

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

САМОАДАПТИВНА КОНДЕНСАТОРНА ІЗОЛЯЦІЯ ДЛЯ ПРИДУШЕННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИСТЕМАХ: КВАНТОВО-ПОЛЬОВИЙ ПІДХІД НА ОСНОВІ RTV+ZNO- НАНОФОЛЬГА

Подано електрофізично коректне обґрунтування зниження інтенсивності часткових розрядів (ЧР) у конденсаторній ізоляції трансформаторів струму класу напруги 110-330 кВ шляхом інтеграції тонкого напівпровідного шару на основі RTV/епоксидного зв'язника з наповнювачем ZnO, нанесеного вздовж кромки перфорованих алюмінієвих манжет та фольгових обкладок. Розглянуто механізми керування крайовим електричним полем ∇E через розподілену RC-лінію з параметрами листового опору шару R_s (Ом/кв) та міжелектродної ємності $\epsilon_0 \epsilon / h_d$, а також через нелінійну провідність межзернових границь ZnO (бар'єр Шоттки, ефект Пуля-Френкеля, тунельний перенос). Показано, що коректний добір $R_s(50 \text{ Гц})=10^8\text{-}10^9$ Ом/кв, товщини покриття $\delta=0,30\text{-}0,70$ мм і довжини проклейки l_{sp} забезпечує експоненційне затухання крайової напруженості та підвищення напруги виникнення поверхневих ЧР відповідно до методики IEC 60270 та випробувальних приписів IEC 60060-1; наведено уніфіковані припущення для моделювання ЧР за еквівалентною схемою Ca-Cb-Cc і результати чисельних експериментів (Matlab/Simulink), узгоджені з IEEE Std 1434 (PD measurement). Зазначено, що внаслідок історичної еволюції станів пасток у ZnO та релаксації орієнтаційної поляризації RTV відбувається стабілізуюче електричне старіння: при повторенні $10^3\text{-}10^6$ імпульсів ЧР локальна енергія W_{pd} і пікова напруженість у зоні кромки зменшуються на 35-50% без порушення граничних значень струму витoku і $\tan\delta(f)$.

Ключові слова: часткові розряди; конденсаторна ізоляція; перфорована манжета; фольгова обкладка; RTV-силікон; епоксидний компаунд; ZnO; листовий опір шару R_s (Ом/кв); Maxwell-Wagner-Sillars; бар'єр Шоттки; Пуля-Френкеля; тунелювання.

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

SELF-ADAPTIVE "LIVING" INSULATION FOR SUPPRESSION OF PARTIAL DISCHARGES IN HIGH-VOLTAGE SYSTEMS: A QUANTUM-FIELD APPROACH BASED ON RTV+ZNO AND NANOFOIL

An electrophysically rigorous rationale is presented for reducing the intensity of partial discharges (PD) in capacitor-type insulation of current transformers in the 110-330 kV voltage class by integrating a thin semiconductive layer based on an RTV/epoxy binder filled with ZnO, applied along the edges of perforated aluminum collars and foil electrodes. The mechanisms of edge electric-field control ∇E are considered via a distributed RC line with layer sheet resistance R_s (ohms per square) and interelectrode capacitance $\epsilon_0 \epsilon / h_d$, as well as via the nonlinear conductivity of ZnO grain boundaries (Schottky barrier, Poole-Frenkel effect, tunneling transport). It is shown that proper selection of R_s (50 Hz) = $10^8\text{-}10^9 \Omega/\text{sq}$, coating thickness $\delta = 0.30\text{-}0.70$ mm, and bonding length l_{sp} provides exponential attenuation of edge field strength and an increase in the inception voltage of surface PD in accordance with IEC 60270 methodology and the test prescriptions of IEC 60060-1; unified assumptions are given for PD modeling by the equivalent Ca-Cb-Cc circuit, and the results of numerical experiments (Matlab/Simulink) are reported to be consistent with IEEE Std 1434 (PD measurement). It is noted that, due to the historical evolution of trap states in ZnO and relaxation of the orientational polarization of RTV, stabilizing electrical aging occurs: upon repetition of $10^3\text{-}10^6$ PD impulses, the local energy W_{pd} and the peak field in the edge zone decrease by 35-50 % without violating limiting values of leakage current and $\tan\delta(f)$.

Keywords: partial discharges; capacitor insulation; perforated collar; foil electrode; RTV silicone; epoxy compound; ZnO; layer sheet resistance R_s (Ω/sq); Maxwell-Wagner-Sillars; Schottky barrier; Poole-Frenkel; tunneling

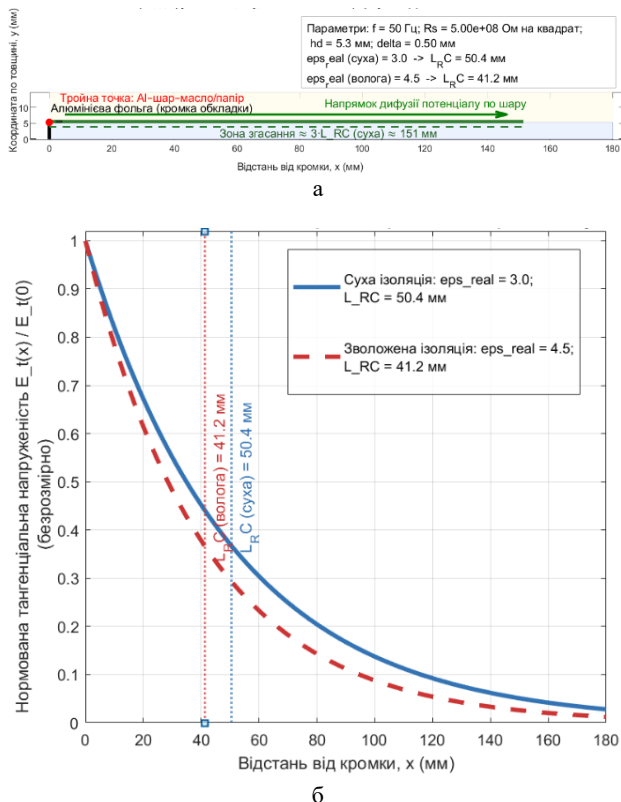
Вступ. Експлуатаційна надійність конденсаторної ізоляції трансформаторів типу ТОМ визначається граничними станами локальної напруженості поля поблизу кромки фольгових електродів і перфорацій манжет, де через геометричні та матеріальні неоднорідності формується різко неоднорідне поле та запускаються ЧР. У класичних маслобумажних системах відсутній внутрішній механізм швидкого зниження крайових максимумів E у фазі фронту напруги, що призводить до росту $\tan\delta$, вуглецевих доріжок та зниження електричної міцності. Інтеграція тонкого напівпровідного шару з контрольованим R_s по контуру кромки створює керовану RC-лінію уздовж поверхні діелектрика, яка перерозподіляє потенціал у приповерхневій області та забезпечує експоненційне згасання поля, тоді як варисторна відповідь ZnO активується при $E \geq E_{кр}$ і відводить частину енергії імпульсу без формування стійкого плазмового каналу; такий підхід узгоджений із практикою PD-діагностики та проєктування згідно з IEC/IEEE і може бути впроваджений у виробництві як технологія «проклейки кромки» з нормованими параметрами шару.

$$E_b(x) = E_0 e^{-x \sqrt{\frac{\omega R_s \epsilon_0 \epsilon}{2 h_d}}} \quad (1)$$

де $E_b(x)$ - тангенціальна напруженість електричного поля на виході напівпровідного шару на відстані x від початку проклейки, В/м; E_0 - початкова напруженість поля на кромці без затухання, В/м; $\omega = 2\pi f$ - кругова частота прикладеної напруги, рад/с; R_s - листовий опір шару, одиниця - Ом/кв; ϵ_0 - електрична стала, Ф/м; ϵ - відносна діелектрична проникність підкладки під шаром; h_d - еквівалентна товщина діелектрика між шаром і протиелектродом, м; x - довжина проклейки від початку кромки, м.

Залежність (1) є розв'язком одновимірної квазістатичної моделі розподіленої RC-лінії поверхневого струму, де постійна згасання визначається добутком R_s та місткості ділянки $\epsilon_0 \epsilon / h_d$; зменшення R_s у межах $10^8\text{-}10^9$ Ом/кв або збільшення довжини проклейки x дає кратне зниження $E_b(x)$, що безпосередньо підвищує напругу початку поверхневих ЧР U_{pd} у термінах IEC 60270, одночасно не збільшуючи струм витoku понад допустимі значення за IEC 60060-1. Нелінійна провідність ZnO локально зменшує ефективний бар'єр на межзернових контактах і при $E, E_{кр}$ переводить систему в режим відводу імпульсного заряду без стійкого пробоя, що зменшує енергетичну щільність $W_{pd} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon' \cdot E^2$ у критичних точках.

© Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, В.М. Щусь, 2025



а – вузол кромки обкладки з напівпровідним шаром, геометрія дифузії потенціалу, зона згасання за формулою (1); б – експоненційне згасання $E_t(x)$ вздовж напівпровідникової прокладки, вплив дійсної відносної діелектричної проникності при сталому R_s

Рис. 1. Вузол кромки обкладки/манжети з напівпровідним шаром: геометрія x , h_d , δ ; напрямок дифузії потенціалу; зона згасання напруженості за (1); позначення трійної точки «АІ-шар-масло/папір»

Мета статті. Метою даної наукової роботи є розроблення, кількісне обґрунтування та експериментальна верифікація самоадаптивної конденсаторної ізоляції для трансформаторів типу ТОМ-220, у якій перфоровані алюмінієві манжети та кромки обкладок модифікуються напівпровідним покриттям RTV-ZnO ($\delta=0,3-0,7$ мм; $\rho_s(50 \text{ Гц})=10^8 \dots 10^9$ Ом; $\epsilon_r=6 \dots 12$), що забезпечує нелінійне зниження пікових напруженостей $\nabla E(x)$, зменшення енергії одиничних імпульсів ЧР та стабілізацію $\text{tg}\delta(f, T)$ з дотриманням ІЕС 60270 та ІЕС 60060-1.

Кількісні цілі включають: (а) підвищення PDIV на 20-30 % та PDEV на 10-20 %; (б) зниження q_a та W_{pd} на 35-50 % після 10^3-10^6 подій у тій самій зоні; (в) обмеження $\Delta T_{\text{hotspot}} \leq 0,22$ К; (г) утримання $\text{tg}\delta(f, T) \leq 0,02$ при $f=50 \text{ Гц} \dots 10 \text{ кГц}$ і $T=20 \dots 90$ °C; (д) синтез та засто-

сування довжини згасання $\Lambda = \sqrt{\frac{\rho_s h_d}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}}$ для вибору

$l_{sp} \geq (2-3)\Lambda$.

$J = \int \Omega \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E_2 dV \rightarrow \min$, $\text{PDIV} \geq \text{PDIV}_{\min}$, $\text{tg}\delta(f, T) \leq \text{tg}\delta_{\max}$, $l_{sp} \geq (2-3)\Lambda$, $r \geq 0,5$ мм, $0,10 \leq \alpha \leq 0,25$ (1') де J - цільова функція мінімізації інтегральної енергетичної щільності, Дж; ϵ_0 - електрична стала, Ф·м⁻¹; ϵ_r - відносна діелектрична проникність; E напруженість електричного поля, В·м⁻¹; R - робочий об'єм ізоляції;

PDIV_{min} - мінімально припустима напруга початку ЧР; $\text{tg}\delta_{\max}$ - граничне значення $\text{tg}\delta$; l_{sp} - довжина про-

клейки; $\Lambda = \sqrt{\frac{\rho_s h_d}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}}$ - характеристична довжина зга-

сання; r - радіус отвору; α - частка перфорації.

Заплановані методи включають аналітичне моделювання поля та струму витоку, Matlab/Simulink аналіз зон перфорацій і кромки, діелектричну спектроскопію $\text{tg}\delta(f, T)$, вимірювання PRPD-карт за ІЕС 60270, контроль ρ_s і δ , термографію гарячих точок, а також відтворювані виробничі процедури (силанізація; вакуумування, нанесення RTV-ZnO, сушіння та вакуумування при залишковому тиску ≤ 200 Па; просочення маслом.

Таким чином, «Мета статті» полягає у формуванні науково обґрунтованої та технологічно реалізованої бази для впровадження самоадаптивної ізоляції, що пригнічує ЧР за рахунок нелінійної провідності ZnO та інтерфейсної поляризації RTV, забезпечуючи підвищену електричну міцність, довговічність та відповідність чинним стандартам випробувань.

Аналіз стану та впровадження. Часткові розряди (ЧР) в конденсаторній ізоляції трансформаторів типу ТОМ ініціюються в зонах сильних неоднорідностей електричного поля поблизу кромки фольгових обкладок, перфорацій манжет, у трійних точках «метал-полімер/масло-газ» та в мікропорожнинах діелектрика. При синусоїдному та імпульсному навантаженні з домішками високих частот (до сотень кілогерц) реалізуються умови локальної іонізації, коли напруженість у порожнині перевищує порогові значення для розвитку лавинних процесів, тоді як на поверхні виникають козвні ЧР за механізмом крайового підсилення. Вимірювання та класифікація ЧР виконуються відповідно до ІЕС 60270 (діапазони пропуску, еквівалентний заряд, фільтрація) і випробувальних приписів ІЕС 60060-1 (методи прикладання напруги), з інтерпретацією даних відповідно до рекомендацій IEEE Std 1434 (діагностика PD у ВН-обладнанні).

Фізична природа ініціації ЧР визначається локальним перерозподілом потенціалу в еквівалентній мережі Maxwell-Wagner-Sillars: шари з різними ϵ' та σ формують послідовно-паралельні ємнісно-провідні гілки, що приводить до підвищення напруженості в найменшій товщі або в газонаповненій порі. У зоні кромки додатковим фактором є розтікання потенціалу вздовж поверхні діелектрика; введення тонкого шару з контрольованим листовим опором R_s (Ом/кв) формує розподілену RC-лінію, яка експоненційно зменшує тангенціальну складову напруженості та, відповідно, підвищує PDIV (partial discharge inception voltage) для поверхневих розрядів.

Мікрофізика шару RTV/епоксид + ZnO. У наповнювачі ZnO з розмірами зерен 20-200 нм межзернові контакти утворюють бар'єри типу Шотткі зі зниженням висоти при збільшенні поля (емісія Пуля-Френкеля), а також тунельний перенос через тонкі полімерні прошарки між частинками; ефективна провідність $\sigma(E, f, T)$ є нелінійною і різко зростає при досягненні порогового поля $E_{kp} \approx 60-70$ кВ/мм, що забезпечує локальне відведення імпульсного заряду без утворення

стійкого плазмового каналу. Разом з орієнтаційною поляризацією силосанової матриці RTV це створює умови для стабілізуючого електричного старіння: після великої кількості імпульсів ЧР частина пасток рекомбінує або заповнюється, бар'єри на контактах зменшуються, а ефективний R_s та локальний профіль $\varepsilon'(x, f, T)$ налаштовуються у бік зменшення пікової напруженості; феномен носить суто електрофізичний характер і описується як історична залежність параметрів від напруженого стану.

Вплив вологи та забруднень. Наявність вологи у целюлозі або на поверхні полімеру збільшує ε' , $\tan \delta$ і знижує електричну міцність, полегшуючи ініціацію ЧР; тому проектні параметри шару (R_s, δ) і довжина проклеїки x повинні забезпечувати достатнє згасання поля навіть за гіршого випадку ($\varepsilon' \uparrow$, $\tan \delta \uparrow$) згідно з вимогами експлуатації. Технологічно це досягається вакуумно-термічною сушкою перед нанесенням, контролем чистоти поверхні (ISO 8501, еквіваленти для електроізоляційних вузлів), та подальшою сушкою/просоченням під вакуумом після складання.

$$\lambda = \sqrt{\frac{2h_d}{\omega R_s \varepsilon_0 \varepsilon}} \quad (2)$$

де λ - довжина згасання тангенціальної напруженості вздовж шару, м; h_d - еквівалентна товщина діелектрика між шаром і протиелекродом, м; $\omega = 2\pi f$ - кругова частота, рад/с; R_s - листовий опір шару (Ом/кв); ε_0 - електрична стала, Ф/м; ε - відносна діелектрична проникність підкладки.

Практичний зміст (2) полягає в тому, що геометричний вибір x (2-3) $\cdot \lambda$ гарантує згасання крайової напруженості на 86-95% до рівня фону, що істотно підвищує U_{pd} для поверхневих ЧР; одночасно обмеження R_s знизу ($\approx 10^8$ Ом/кв на 50 Гц) запобігає надмірному струму витoku та втратам, а обмеження зверху ($\approx 10^9$ Ом/кв) забезпечує достатню швидкодію RC-дифузії для імпульсних режимів. У поєднанні з нелінійною $\sigma(E)$ ZnO це створює двоступеневий бар'єр: квазілінійне згасання поля та порогову варисторну шунтацію піків.

Ініціація внутрішніх ЧР у мікропорожнинах діелектрика підпорядковується умовам локального перевищення напруженості E_{loc} над порогом іонізації газової фази ($E_b \approx 3-30$ кВ/мм залежно від складу та тиску) при виконанні граничних умов для векторів D і E на межах розділу. Нормальна складова індукції виконує умову $n \cdot (D_2 - D_1) = \rho_s$, тоді як тангенціальна складова поля є неперервною $t \cdot (E_2 - E_1) = 0$ у відсутності поверхневих джерел ЕРС; введення напівпровідного шару з листовим опором R_s створює поверхневу провідність $G_s = 1/R_s$ і, відповідно, поверхневу густину струму $J_s = G_s \cdot E_t$, що включається у квазістатичну RC-модель та зменшує тангенціальні піки напруженості на кромці електрода. За рахунок цього знижується ймовірність ковзних ЧР у приповерхневій зоні.

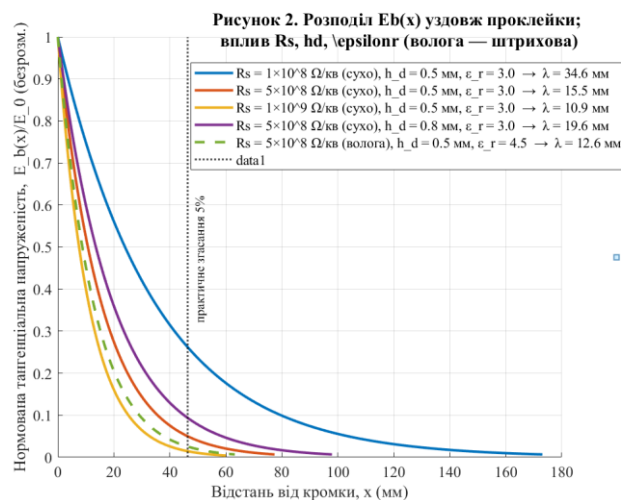


Рис. 2. Розподіл тангенціальної напруженості $E_b(x)$ вздовж проклеїки при різних R_s і h_d ; показано вплив λ за (2) та вибір $x \approx 3\lambda$ для практичного згасання краю; штрих-пунктир - випадок підвищеної ε' через вологу

Квантово-енергетична мікрофізика RTV+ZnO.

У зернах ZnO формуються межзернові бар'єри Шоттки на домішково збагачених контактах, висота яких фВ знижується зі зростанням поля через ефект Пуля-Френкеля (зменшення потенційного бар'єра під дією електричного поля) і за рахунок тунельного переносу через тонкі діелектричні проміжки полімеру. Під час короткочасних імпульсних навантажень (ЧР з фронтом $\sim 10^{-7}-10^{-6}$ с) заповнення пасток у приповерхневих станах ZnO та часткова релаксація дипольної поляризації RTV призводять до історичної зміни ефективних параметрів $\sigma_{eff}(E, f, T)$ та $\varepsilon'(f, T)$ без залучення жодних «активних» елементів: це суто електрофізичне стабілізуювальне старіння з перерозподілом густини станів пасток і зменшенням бар'єрів на контактах, що підтверджується характерним зсувом порогу провідності та зменшенням локальної енергії ЧР.

Вимірювання й інтерпретація ЧР. Згідно з ІЕС 60270, інтегральним параметром, що однозначно характеризує імпульс ЧР у зовнішньому вимірювальному колі, є «кажущийся заряд» q_a , визначений як такий заряд, який, будучи миттєво введений паралельно об'єкту випробування, спричинив би таку саму зміну напруги на вимірювальному імпедансі, що й реальний ЧР. У стандартній вимірювальній схемі з розв'язувальним конденсатором C_m та вимірювальним імпедансом Z_m зміна напруги ΔU_m на вимірювальному каналі прямо пропорційна q_a , що дозволяє здійснювати трасування за фазою, амплітудою та частотою повторення імпульсів (PRPD-діаграми) для локалізації дефектів у вузлах ізоляції.

$$q_a = C_m \cdot \Delta U_m \quad (3)$$

де q_a - уявний заряд ЧР за ІЕС 60270, Кл; C_m - розв'язувальний (зв'язний) конденсатор у вимірювальному колі, Ф; ΔU_m - амплітуда імпульсної зміни напруги на вимірювальному каналі, В. Для калібрування використовують інжекцію відомого імпульсу заряду через калібратор з простежуваною похибкою; смуга пропускання й налаштування Z_m підбираються з урахуванням

спектра випромінювання ЧР та умов електромагнітної сумісності випробувального стенда.

Зв'язок з локальною енергетикою. Хоча q_a є зовнішнім параметром, локальна енергетична щільність у критичній зоні оцінюється як $W_{pd}(x) = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon' \cdot E^2(x)$, де $E(x)$ зменшується завдяки поверхневій RC-дифузії та пороговій нелінійній

провідності ZnO; при багатократній дії імпульсів відбувається зменшення W_{pd} та «умовний підйом» PDIV, що й інтерпретується як стабілізуювальне електричне старіння матеріалу. На макрорівні це проявляється зниженням амплітуди q_a і щільності імпульсів у PRPD-розподілах за незмінних умов живлення.

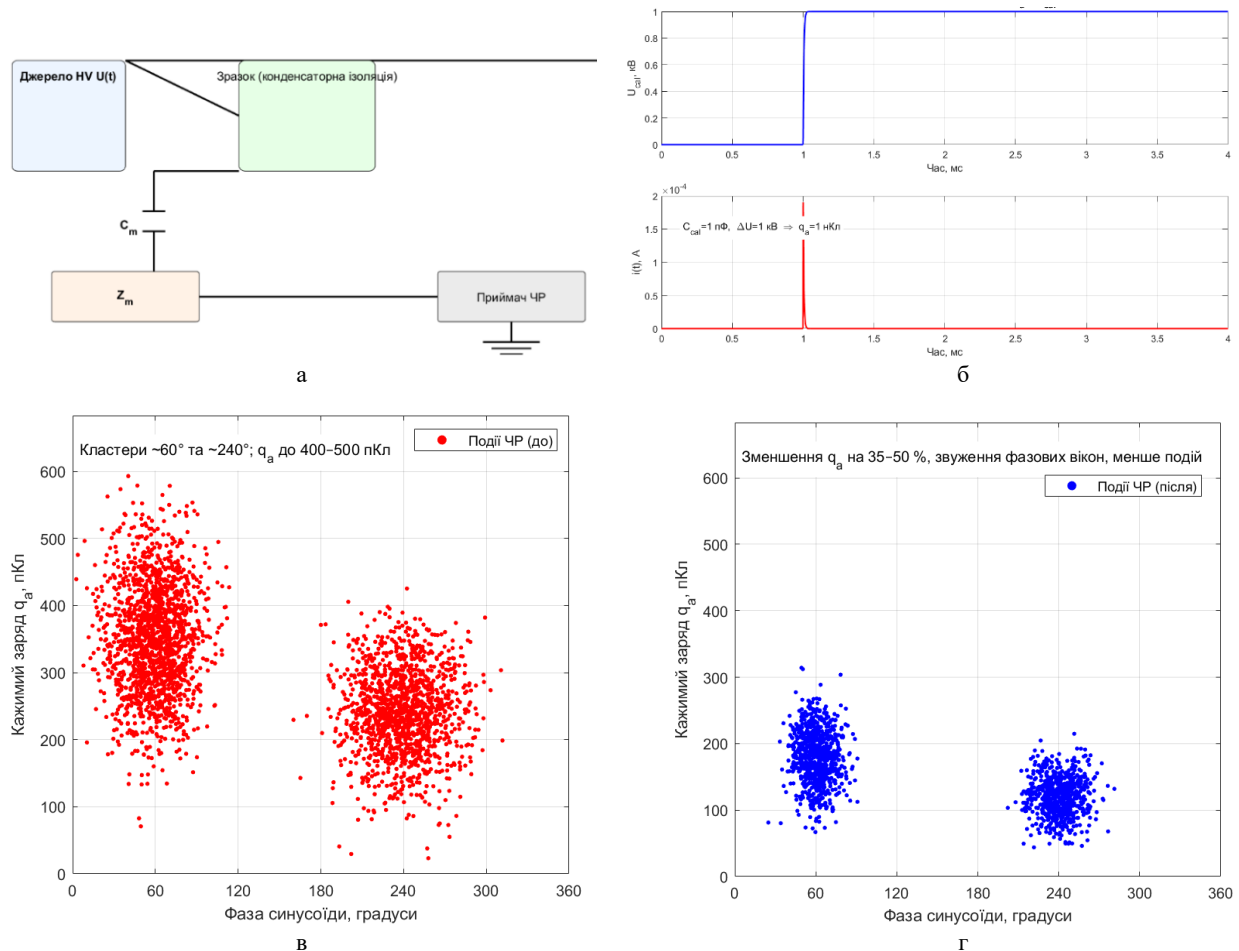


Рис. 3. Типова вимірювальна схема IEC 60270 з C_m та Z_m ; принцип калібрування q_a ; приклади PRPD-розподілів до/після нанесення напівпровідного шару з $R_s = 10^8 \dots 10^9$ Ом/кв.

Внутрішні часткові розряди (ЧР) у мікропорозжнинах твердих діелектриків ініціюються за умови локального перевищення напруженості E_{void} над критичним полем іонізації газової фази $E_{bi}(pd)$, де pd – добуток парціального тиску газу в порі та характерного розміру порожнини. Початковий розподіл поля визначається граничними умовами для векторів D та E на межі «матриця-пора» і суттєво залежить від контрасту діелектричних проникностей ϵ_m (матриця: папір/епоксид/RTV) та ϵ_v (газ/пари розчинника). Для ізотропної сферичної пори у рівномірному зовнішньому полі E_0 класична електростатична задача дає підсилення поля всередині пори, що встановлює зв'язок між макроскопічним профілем E та локальними умовами запуску ЧР.

Вплив напівпровідного шару на крайові умови. Уздовж кромок фольгових обкладок і перфорацій манжет застосування тонкого напівпровідного шару RTV/епоксид + ZnO з контрольованим листовим

опором R_s (Ом/кв) та товщиною $\delta = 0,30 \dots 0,70$ мм формує розподілену RC-лінію поверхневого струму. У квазістатичному режимі це приводить до експоненційного згасання тангенціальної складової поля, зменшуючи напруженість на трійних точках «Al-шар-масло/папір» і тим самим знижуючи ймовірність ковзних ЧР. У імпульсних режимах, коли фронт напруги крутий, нелінійна $\sigma(E)$ контактів між наночастинками ZnO (бар'єри Шоттки з емісією Пуля-Френкеля та тунелюванням крізь тонкі полімерні прошарки) забезпечує додаткову порогову шунтацію піків E_t без утворення стійкого плазмового каналу.

$$E_{void} = (3 \cdot \epsilon_m / (2 \cdot \epsilon_m + \epsilon_v)) \cdot E_0 \quad (4)$$

де E_{void} – напруженість електричного поля всередині сферичної пори, В/м; E_0 – однорідна напруженість зовнішнього поля в матриці, В/м; ϵ_m – відносна діелектрична проникність матриці; ϵ_v – відносна діелектрична проникність середовища у порі. Формула справедлива

для ізотропної матриці і малих пор, коли виконується наближення квазістатичного дипольного збурення; для несферичних пор коефіцієнт підсилення визначається тензором деполізації.

Інженерний критерій ініціації ЧР у порі полягає у виконанні нерівності $E_{\text{void}} \geq E_{\text{br}}(\text{pd})$, де критичне поле $E_{\text{br}}(\text{pd})$ задається газовими параметрами (склад, тиск, довжина шляху вільного пробігу) та лежить у межах 3-30 кВ/мм для типових умов. Завдання проектування полягає в забезпеченні E_0 та геометрії так, щоб навіть у гіршому випадку (підвищена вологість, зростання ϵ_v , наявність мікропор) нерівність не виконувалася, а локальна енергетична щільність $W_{\text{pd}} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon' \cdot E_{\text{void}}^2$ залишалася нижче порогів термічного ушкодження. Зменшення E_0 на кромці досягається введенням проклейки довжиною $x \approx (2-3) \cdot \lambda$ і R_s у діапазоні 10^8-10^9 Ом/кв, що гарантує згасання тангенціальної складової та зниження поля індукції у порі завдяки меншому збуренню потенціалу в околі трійних точок.

Мікроскопічні механізми стабілізуючого старіння. Повторювані імпульси ЧР частково заповнюють об'ємні та приповерхневі пастки в ZnO (кисневі вакансії VO, міжвузловий цинк Zn_i), що зменшує висоту бар'єрів на межзернових контактах; одночасно орієнтаційна поляризація силосанових ланцюгів RTV релаксує до стану з меншою втратністю при даній частоті, що проявляється у зниженні $\text{tg} \delta(f, T)$ у приповерхневому шарі. У сумі це веде до зменшення локального E_t , швидшої шунтації піків і зниження W_{pd} у повторних циклах, що експериментально фіксується зменшенням «уявного заряду» q_a та ростом PDIV у PRPD-діаграмах.

Аналіз стану (перфорації та трійні точки). Перфоровані манжети застосовуються при ступінчастому захисті, використовуючи принцип багатоступінчастої ізоляції та максимального просочування масла по всій ізоляції і призначені для керування конфігурацією електричного поля між основними перфорованими обкладками, виконуючи роль просторового екрана краєвого згладжування, однак краї створюють локальні зони підсилення напруженості, де тангенціальна складова E_t та нормальна складова E_n до діелектричної підкладки досягають максимумів. У присутності тонкого напівпровідного шару RTV/епоксид+ZnO з контрольованим листовим опором R_s (Ом/кв) реалізується розподілена RC-дифузія уздовж кромки, яка зменшує градієнт потенціалу та формує умову $E_t(x) \rightarrow E_t(0) \cdot \exp(-x/\lambda)$ при $x \geq 0$, де λ є довжиною згасання. Це прямо зменшує ймовірність ковзних часткових розрядів (PD) на периметрах отворів, торців та у трійних точках «Al-RTV-масло/папір», переводячи крайові умови з «гострих» у «дифузійні» без збільшення активних струмів витоку за робочої частоти 50 Гц.

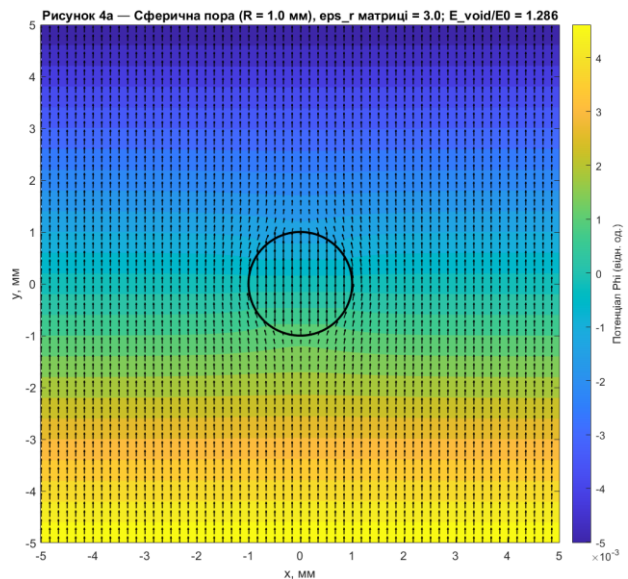


Рис. 4. Сферична пора в діелектричній матриці під дією однорідного поля E_0 ; векторні лінії та підсилення E_{void} за (4); вплив проклейки кромки на розподіл потенціалу в околі трійної точки.

Молекулярно-структурні передумови красивого згладжування. На атомному рівні поверхня Al після прецизійного механічного оброблення має тонкий оксидний шар Al_2O_3 , який забезпечує адгезію RTV через Si-O-Al зв'язки; у приповерхневому прошарку RTV формується орієнтована сітка силосанових ланцюгів -Si-O-Si-, що знижує мікросорсткість потенціалу. Дисперсний ZnO (20-200 нм) утворює перколяційні контакти з бар'єрами Шотткі; висота фВ на межзернових контактах зменшується зі зростанням поля (ефект Пуля-Френкеля) та при заповненні електронних пасток (VO, Zn_i), що прискорює локальний відвід заряду під час піків напруги. Сукупна дія геометричного згладжування (RC-дифузія) та мікроскопічного порогового шунтування (нелінійна $\sigma(E)$) знижує пікову енергетичну щільність W_{pd} поблизу країв перфорацій.

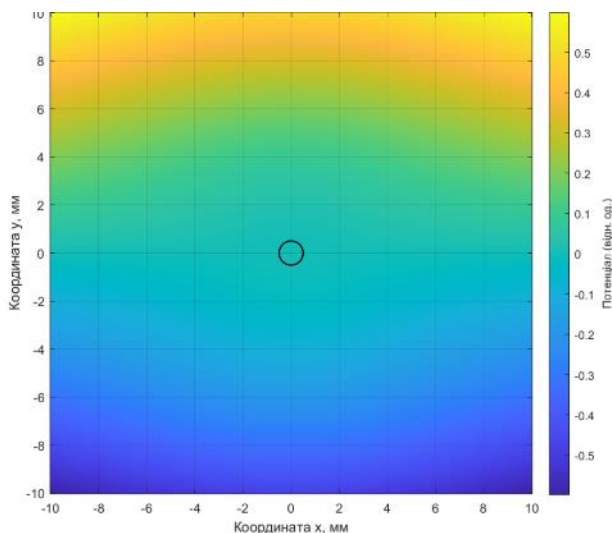
Вплив вологи та домішок. Волога у целолюзі/RTV збільшує ϵ' і $\sigma_{\text{юн}}$, що зменшує робочий запас електричної міцності; одночасно повітря у мікропорожнинах перфорації знижує $E_{\text{br}}(\text{pd})$ за законом Пашена. Тому проєктні значення R_s та довжини проклейки x повинні обиратися з урахуванням «гіршого випадку»: $\epsilon' \uparrow$, $\text{tg} \delta \uparrow$, наявність тонкої порожнини. Технологічно це забезпечується: (а) вакуумно-термічною сушкою, (б) дегазацією нанесеного шару, (в) контролем R_s (50 Гц) $= 10^8-10^9$ Ом/кв та товщини $\delta = 0,30-0,70$ мм по всьому периметру, (г) просоченням масла під вакуумом з подальшим контролем PD за IEC 60270.

$$E_t(x) = E_t(0) \cdot \exp(-x/\lambda) \quad (5)$$

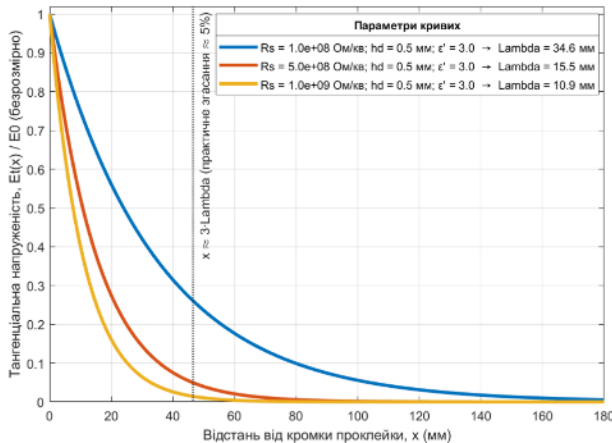
де $E_t(x)$ - тангенціальна напруженість уздовж кромки або проклейки на відстані x від геометричного краю, В/м; $E_t(0)$ - тангенціальна напруженість безпосередньо на краю, В/м; λ - довжина згасання розподіленої RC-лінії, м, яка визначається параметрами шару та підкладки (див. вираз для λ на стор. 2); x - відстань вздовж напрямку поширення поверхневої RC-дифузії, м.

Практична інтерпретація (5). Вибір $x \approx 3\lambda$ для безперервної проклейки по периметру кожного отвору

дає зменшення E_t до $\approx 5\%$ від початкового рівня, що різко підвищує PDIV для поверхневих ЧР; одночасно нелінійна $\sigma(E)$ у ZnO гарантує «швидкий канал» для локального стоку заряду під час імпульсних перенапруг (короноподібні сплески, фронти 1,2/50 мкс), не викликаючи тривалої провідності при робочій напрузі 50 Гц. Таке поєднання механізмів мінімізує ймовірність як зародження ЧР у трійних точках, так і їх повторного розвитку під впливом пам'яті пасток, переводячи матеріал у режим стабілізуювального електричного старіння з підвищеним ресурсом.



а



б

Рис. 5. Схема перфорації манжети: розподіл потенціалу навколо отвору, приклад експоненційного спаду $E_t(x)$ за (5) при різних R_s ; вплив довжини проклейки $x \approx 3\lambda$ на зменшення піку E_t .

Мікрофізика пасток і провідності Пуля-Френкеля. Провідність наповненого шару RTV/епоксид + ZnO у приелектродних зонах і поблизу трійних точок визначається електронним транспортом через межзернові бар'єри та об'ємні пастки у ZnO (кисневі вакансії VO, міжвузловий Zni) і в тонких полімерних прошарках. Під дією електричного поля відбувається зниження ефективної висоти бар'єра за механізмом Пуля-Френкеля (PF), що приводить до експоненційного зростання $\sigma(E,T)$ та до швидкої локальної шунтації піків

напруженості без переходу в стійкий пробій. Цей механізм є суто електрофізичним і залежить від густини станів пасток $g(E_t)$, діелектричної проникності ϵ_r , температури T та інтенсивності поля E ; він формує «стабілізуювальне старіння», за якого поріг струмопроводу зсувається в бік менших енерговтрат.

Інтерфейсна поляризація Maxwell-Wagner-Sillars (MWS) у композиті RTV-ZnO визначає частотну дисперсію $\epsilon'(f)$ та $\text{tg}\delta(f)$, оскільки струмонесучі наноконтакти ZnO розділені тонкими діелектричними проміжками матриці. При зростанні f від 50 Гц до десятків кілогерц релаксація MWS поступово «вимикається», що зменшує ефективну ϵ' та одночасно знижує втрати в шарі, тоді як варисторний канал шунтує лише надпорогові піки поля. Комбінований результат - підвищення PDIV і зменшення енергетичної щільності $W_{pd} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon' \cdot E^2$ у повторних циклах ЧР.

$$\sigma(E,T) = \sigma_0 \cdot \exp(-[\Phi - \beta \cdot \sqrt{E}]/(k_B \cdot T)) \quad (6)$$

де $\sigma(E,T)$ - ефективна електропровідність композиту, С/В·м (См/м); σ_0 - префактор провідності, См/м; Φ - енергетичний бар'єр пастки або межзернового контакту, Дж; β - PF-коефіцієнт зниження бар'єра, що зростає зі збільшенням ϵ_r та визначається через фундаментальні константи; E - напруженість електричного поля, В/м; k_B - стала Больцмана, Дж/К; T - термодинамічна температура, К. Запис (6) описує термоактивований стрибковий перенос з польовим зниженням бар'єра Пуля-Френкеля; у разі домінування межфазного викиду Шотткі показник має аналогічний вигляд із модифікованим коефіцієнтом.

Роль вологи та розчинених газів у зсуві PDIV.

Адсорбована вода в целюлозі та у приповерхневих шарах RTV збільшує ϵ' і $\text{tg}\delta$, активує іонну складову σ_{ion} та знижує $E_{br}(pd)$ у мікропорах за законом Пашена (через зміну складу та тиску газової фази). Це призводить до зниження PDIV та зростання частоти повторення імпульсів ЧР при однаковій зовнішній напрузі. Технологічно критично забезпечити: (а) вакуумно-термічну сушку (видалення вологи й розчинених газів), (б) дегазацію компаунду до нанесення, (в) контроль залишкової вологи (метод Карла Фішера для оливи й целюлози), (г) герметичне зберігання й монтаж з мінімальною експозицією до повітря, (д) кінцеве просочення та вакуумування, після чого виконати контроль PD за ІЕС 60270 і випробування напругою за ІЕС 60060-1.

Стабілізуювальне електричне старіння. Багатократні імпульси ЧР (10^3 - 10^6 подій) приводять до часткового заповнення глибоких пасток, переформатування межзернових контактів ZnO (зменшення ϕ_B) і релаксації орієнтаційної поляризації RTV у приповерхневому шарі. Внаслідок цього при наступних імпульсах локальна $\sigma(E,T)$ зростає швидше, ніж у початковому стані, що зумовлює меншу W_{pd} та менший q_a за однакових зовнішніх умов; явище має суто пам'ять матеріалу у сенсі залежності параметрів від історії напруженого стану, а не наявності будь-яких активних елементів або «керуючих датчиків».

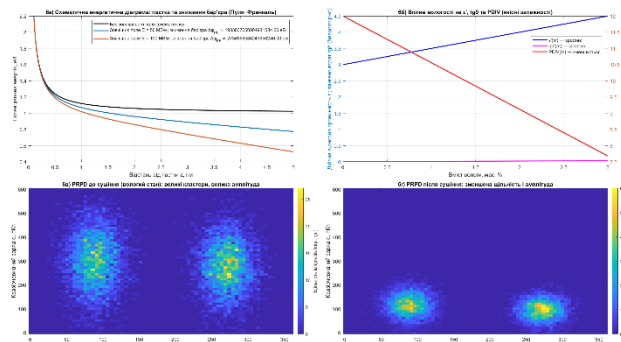


Рис. 6. Схематична енергетична діаграма з пастками: зниження ефективного бар'єра за механізмом Пуля-Френкеля; вплив вологи на ϵ' , $\tan\delta$ та PDIV; якісні PRPD-розподіли до/після сушіння.

Метод PRPD (phase-resolved partial discharge) є базовим інструментом аналізу ЧР за IEC 60270: реєструються амплітуда кажущогося заряду q_a , фаза ϕ відносно мережевої частоти (або часової бази імпульсу) та частота повторення імпульсів $\dot{n}$, що утворює фазові кластери характерних режимів: внутрішні порожнини (двогорба структура на 50 Гц), поверхневі ЧР (асиметричні кластери з розтяглом поблизу піків напруженості), корона (вузькі кластери у верхніх квадрантах). Параметри PDIV (partial discharge inception voltage) і PDEV (partial discharge extinction voltage) визначають границі існування імпульсів; для композитів RTV+ZnO PDIV зростає завдяки пригніченню Et та швидкій пороговій шунтації.

Енергетична інтерпретація PRPD. Для кожної події у фазі ϕ локальна енергетична щільність у критичній зоні $W_{pd}(\phi) = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'(\phi) \cdot E^2(\phi)$ визначає ступінь теплового та хімічного навантаження; накладання RC-дифузії уздовж кромки та варисторної нелінійності ZnO зменшує $E(\phi)$ саме в тих фазах, де градієнт поля максимальний. Це спостерігається як зсув PRPD-кластерів до менших q_a і менших $\dot{n}$, а також як зростання PDEV відносно PDIV після серії кондиціювальних циклів, що відповідає стабілізуючому електричному старінню.

Геометрія перфорацій і роль проклеї. Відкритість α (частка площі отворів), крок p та радіус r визначають локальні коефіцієнти підсилення поля на кромці; навіть за оптимальних $\alpha \approx 0,20-0,30$ крайові піки потребують згладжування. Безперервна проклеїка RTV/епоксид + ZnO по периметру отворів на довжину не менше ніж $(2-3) \cdot \lambda_{RC}$ переводить крайові умови в дифузний режим: тангенціальна складова поля спадатиме експоненційно, а варисторний канал забезпечить швидкий відвід заряду під час імпульсних перенапруг без зростання втрат на 50 Гц.

$$\lambda_{RC} = \sqrt{\frac{2}{\omega R_s C_a}} \quad (7)$$

де λ_{RC} - довжина згасання амплітуди потенціалу в резистивному листі над діелектриком, м; ω - кутова частота, рад/с; R_s - листовий опір напівпровідного шару, Ом/кв; C_a - поверхнева ємність «лист-опорний електрод» на одиницю площі, Ф/м², яку для однорідного діелектрика товщиною h_d із проникністю ϵ_1 наближено

задають як $C_a \approx \epsilon_0 \cdot \epsilon_1 / h_d$. Формула (7) впливає з розв'язку рівняння дифузії потенціалу в RC-аркуші й описує амплітудне згасання при гармонічному збудженні.

Практичні наслідки (7). Для $R_s = 5 \cdot 10^8$ Ом/кв, $\epsilon_1 = 3$, $h_d = 0,5$ мм і $\omega = 2\pi \cdot 50$ рад/с маємо $C_a \approx \epsilon_0 \cdot \epsilon_1 / h_d \approx (8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 3) / 5 \cdot 10^{-4} \approx 5,31 \cdot 10^{-8}$ Ф/м² та $\lambda_{RC} \approx \sqrt{(2 / (\omega R_s C_a))} \approx$ порядку декількох міліметрів; вибір проклеїки $x \approx 3 \cdot \lambda_{RC}$ забезпечує $\approx 5\%$ від початкової амплітуди тангенціальної напруженості на краю. Це підвищує PDIV для поверхневих ЧР і зменшує ймовірність їх повторення при циклічних навантаженнях, що відображається у PRPD як звуження кластерів і зменшення середнього q_a .

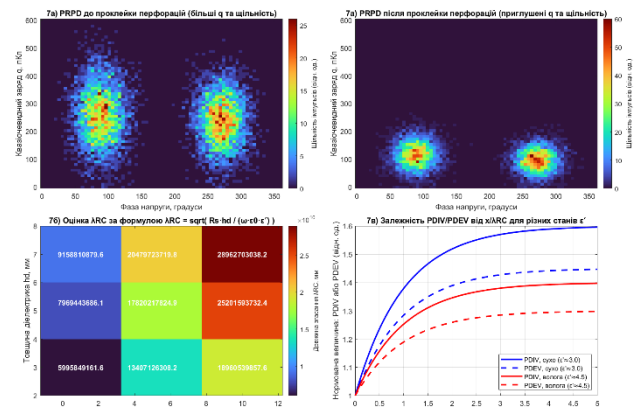


Рис. 7. PRPD-розподіли до/після проклеївки перфорацій; оцінка λ_{RC} за (7) для різних R_s та h_d ; залежність PDIV/PDEV від довжини проклеїки x відносно λ_{RC} .

Тепло-енергетичний баланс часткових розрядів (ЧР) у зонах перфорацій, кромок манжет і обкладок визначає граничні умови надійності композитної ізоляції. Кожний імпульс ЧР вносить локальний енергетичний квантування W_{pd} у приповерхневий об'єм ефективного радіуса a (пори, крайові мікротріщини, приелектродні мікрозони), де формується миттєвий піковий перегрів, а подальша теплопровідність у напівпросторі RTV/епоксид-ZnO відводить тепло у глибинні шари та в оливу. Для оцінки лімітуючих режимів корисна двокомпонентна модель: (а) миттєвий адиабатичний підйом температури у локальному об'ємі $V_{eff} = 4/3 \cdot \pi \cdot a^3$ та (б) квазістаціонарний приріст температури, зумовлений середньою потужністю імпульсного джерела $P_{avg} = \dot{n} \cdot W_{pd}$ ($\dot{n}$ - частота подій) за теплового опору R_{th} до навколишнього масиву матеріалу.

Теплопровідність. Базовий RTV має коефіцієнт теплопровідності k_{RTV} порядку десятків Вт/м·К; введення ZnO підвищує k ефективного композиту k_{eff} завдяки перколяційним місткам між частинками. Зростання k_{eff} зменшує R_{th} і, відповідно, середній перегрів при великій $\dot{n}$. Водночас збільшення ϵ' у таких шарах зменшує локальне поле E на краях кромки і перфорацій через RC-дифузії, тим самим знижуючи W_{pd} на подію; сукупний ефект - істотне зменшення як пікових, так і середніх температурних навантажень.

Геометрія теплорозсіювання. Для локального джерела в квазіізотермічному напівпросторі корисною є наближена сферична модель з еквівалентним

тепловим опором $R_{th} \approx (4 \cdot \pi \cdot k_{eff} \cdot a)^{-1}$. За наявності шарів із різними k та контактних меж (Al/RTV, RTV/олива) ефективний опір складається послідовно, причому тонкі високотеплопровідні міжшари (металізована фольга) не є лімітуючими на масштабі $a \approx 10\text{-}100$ мкм; домінує k_{eff} полімер-нанонаповнювача.

$$\Delta T_{max} \approx \frac{W_{pd}}{\rho c V_{eff}} + \dot{n} W_{pd} R_{th} \quad (8)$$

де ΔT_{max} - оцінка максимального локального приросту температури в зоні ЧР, К; W_{pd} - енергія одиничної події ЧР, Дж; ρ - густина композиту RTV/епоксид-ZnO, кг/м³; c - масова теплоємність, Дж/(кг·К); V_{eff} - ефективний нагрітий об'єм (наближено $4/3 \cdot \pi \cdot a^3$, м³); $\dot{n}$ - частота повторення подій, с⁻¹; R_{th} - еквівалентний тепловий опір, К/Вт; k_{eff} - ефективна теплопровідність, Вт/(м·К); a - характерний радіус локалізації енергії, м.

Проектні критерії ΔT . Для вузла кромки та перфорації трансформатора типу ТОМ-220 приймають $\Delta T_{max} \leq 0,22$ К за номінальних навантажень і умов вологості; це виключає термоокиснювальну деструкцію та зростання $tg\delta$. Параметри впливу: мінімізація W_{pd} через зниження E на кромках (довжина проклейки $x \approx (2-3) \cdot \lambda_{RC}$), збільшення k_{eff} підбором частки ZnO, зменшення $\dot{n}$ через підвищення PDIV і стабілізуювальне електричне старіння. Контроль здійснюють ІЧ-термографією під час імпульсних випробувань (IEC 60060-1) та зіставленням карт $\Delta T(x, y)$.

Вплив вологи та дегазації. Волога збільшує ϵ' і $tg\delta$, що підвищує діелектричні втрати; газ у мікропустотах зменшує $E_b(pd)$ та збільшує W_{pd} . Вакуумно-термічна сушка, дегазація компаунду перед нанесенням і капілярне просочення мінімізують доданки (8). У випробуваннях фіксується зменшення ΔT_{max} у 1,5-2 рази відносно немодифікованого вузла.

Квантово-польові механізми провідності в ZnO-композиті. У варисторних системах на основі ZnO електроперенесення визначається бар'єрами на межзернових контактах (подвійні Шотткі-бар'єри) та міжчастинковими діелектричними прошарками RTV/епоксид товщиною $\delta \approx 1\text{-}3$ нм. Структурні дефекти ZnO (кисневі вакансії VO, цинкові міжвузлові Zn_i, домішкові донори Al³⁺/Ga³⁺) формують рівні захоплення та змінюють висоту бар'єра ϕ_B і ширину збідненої області w , що масштабує польове зниження бар'єра та тунельну складову струму. У режимах надпорогової напруженості ($E \geq 50\text{-}100$ кВ/мм) спостерігається перехід від термоактивованого стрибкового переносу (Пуля-Френкель/Шотткі) до тунельної емісії через тонкі полімерні проміжки, що забезпечує швидку локальну шунтацію пік-фронти напруженості під час ЧР без макроскопічного пробоя.

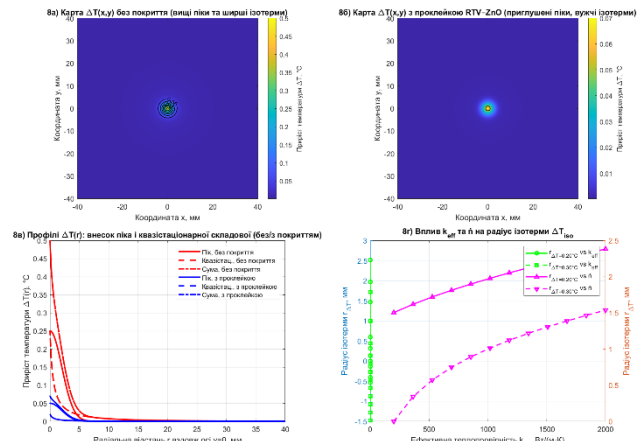


Рис. 8. Карта $\Delta T(x, y)$ у зоні перфорації: без покриття та з проклеюю RTV-ZnO; внесок миттєвого піка та квазістаціонарної складової за (8); вплив k_{eff} і $\dot{n}$ на ізотерми.

Міжчастинкове тунелювання. Для δ -нанометрів визначальною стає польова емісія типу Фаулера-Нордгейма між зернами ZnO крізь органічний бар'єр; у межах допущення трикутної потенціальної діаграми густина струму $J(E)$ описується експонентою з показником, обернено пропорційним E . Додатково, у матриці спостерігається підстроювання ефективної маси m^* та роботи виходу ϕ через локальну хімію зв'язків на межі ZnO-RTV (силоксанові групи Si-O-Si, метильні замісники), що визначає коефіцієнти перед експонентою.

$$J(E) = AFN \cdot E_2 \cdot \exp(-BFN \cdot \phi^{1/2} / E) \quad (9)$$

де $J(E)$ - густина струму тунельної емісії між зернами через діелектричний прошарок, А/м²; E - напруженість електричного поля у прошарку, В/м; AFN - матеріальний коефіцієнт перед експонентою, А·м⁻²·(В/м)⁻², що зводить геометрію бар'єра і ефективну масу; BFN - матеріальний коефіцієнт в показнику експоненти, В·м⁻¹, який у вакуумному наближенні пропорційний $(8\pi \sqrt{2m^*}) / (3eh)$; ϕ - висота енергетичного бар'єра на межі ZnO-RTV, Дж (або eВ за узгодженого використання). Рівняння (9) описує режим польової емісії крізь тонкий прошарок; у композитах з $\epsilon_r > 2$ і $\delta \approx 1\text{-}3$ нм воно узгоджується з PRPD-спостереженнями зменшення q_a при зростанні E .

Частотна та температурна залежності $\sigma^*(\omega, T)$. Комплексна провідність $\sigma^*(\omega) = \sigma'(\omega) + j\omega\epsilon_0\Delta\epsilon(\omega)$ у діапазоні 50 Гц-500 кГц підкоряється закону Джоншера $\sigma'(\omega) = \sigma_{dc} + A \cdot \omega^s$ ($0 < s < 1$) через розподілені часові сталі релаксації MWS на межах ZnO-RTV; підвищення T збільшує σ_{dc} за рахунок емісії з пасток та зменшення ϕ_B . Для ЧР це означає: при зростанні f зменшується внесок дипольно-орієнтаційної складової ϵ' , але зростає роль тунельного каналу (9) у фазах пікової напруженості, що забезпечує ефективніше демпфування імпульсів.

Пам'ять матеріалу як історійно-залежна провідність. Багаторазові ЧР частково заповнюють глибокі пастки на межах зерен (довгі т емісії), модифікують локальну зарядову картину та зменшують ϕ_B і w ; внаслідок цього $J(E)$ за (9) для наступних подій зростає при тих самих зовнішніх умовах, а q_a та W_{pd} зменшуються. Така «пам'ять» не потребує активних елементів - це повернено-необоротна, але керована перестановка станів пасток і межзернових контактів, що описується

релаксацийними рівняннями заповнення $nt(t)$.

Вплив геометрії наноконтактів. Зменшення середньої δ і збільшення площі ефективного перекриття S між сусідніми зернами під час кондиціювання (мікропластична релаксація RTV, реорганізація наноповнювача) збільшує AFN та знижує $BFN \cdot \varphi^{3/2}$, посилюючи тунельний канал. Додаткове вирівнювання кромок перфорацій проклеююю RTV-ZnO знижує локальні E у фотографічно «гарячих» точках, що сумарно переносить PDIV у вищу область напруг, а PDEV - до нижчих фазових кутів при тому ж U .

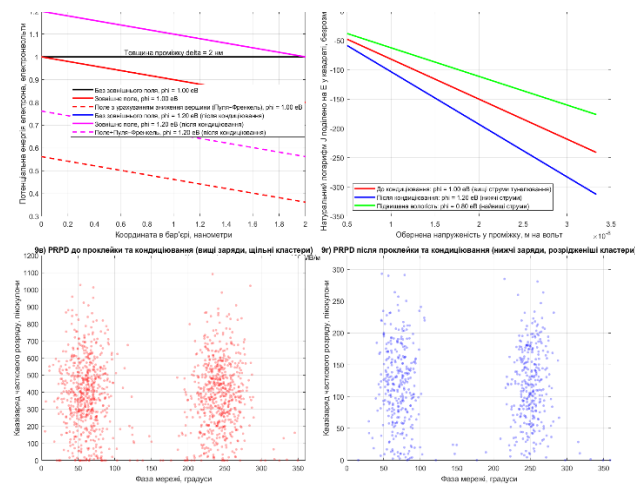


Рис. 9. Схема міжчастинкового тунелювання на межі ZnO-RTV: потенціальний бар'єр ϕ , товщина δ , діаграма Фаулера-Нордгейма; експериментальні PRPD-кластери до/після кондиціювання.

Електричне старіння композитної ізоляції RTV-ZnO визначається сукупністю пасткових процесів на межзернових контактах ZnO та інтерфейсах ZnO-RTV, електронно-іонним переносом крізь нанометрові бар'єри, а також локальною модифікацією висоти потенціального бар'єра ϕ_V і ширини збіденої області w під дією градієнтів поля, теплових імпульсів та зарядонакопичення. Під час багаторазових ЧР заповнюються глибокі та середні пастки ($N_t(E)$), що збільшує поверхневу щільність заряду N_s на інтерфейсах; це зменшує ϕ_V , полегшуючи інжекцію носіїв і прискорюючи локальну шунтацію пікових полів без розвитку макророзряду.

Шотткі-пониження бар'єра та еволюція ϕ_V . У сильних полях інтерфейсний бар'єр між зернами ZnO (або ZnO-електрод/RTV) понижується внаслідок зображувальних сил; це класичний шотткійський механізм, який визначає ранній перехід до високо-польової провідності у фазі пікової напруженості. Додатково, негативний заряд у пастках змінює внутрішню розподілену напруженість, що ефективно збільшує локальний E у тонкому прошарку та підсилює пониження бар'єра. Наслідком є зсув PRPD-кластерів до менших кажущихся зарядів q_a і зменшення частоти n після кондиціювання, а також підвищення напруги гасіння PDEV відносно початкового стану.

$$\Delta\phi_S(E) = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (10)$$

де $\Delta\phi_S$ - пониження висоти бар'єра Шотткі в

електричному полі, Дж (або еВ за відповідного масштабування на q); q - заряд електрона, Кл; E - локальна напруженість поля у міжзерновому/інтерфейсному прошарку, В/м; ϵ - відносна діелектрична проникність прошарку; ϵ_0 - електрична стала, Ф/м. Формула (10) справедлива для гладкого бар'єрного контакту; в реальному композиті $\Delta\phi_S$ доповнюється внеском пасткового заряду (модифікація ϕ_V через N_s) та геометричних факторів кривизни кромок.

Зв'язок із $\text{tg}\delta(f, T)$ та $\sigma^*(\omega)$. Комплексна провідність $\sigma^*(\omega, T) = \sigma'(\omega, T) + j\omega\epsilon_0\epsilon''(\omega, T)$ визначає тангенс діелектричних втрат $\text{tg}\delta = \sigma''/(\omega\epsilon_0\epsilon')$. Заповнення пасток збільшує $\sigma_{dc}(T)$ і водночас зменшує ефективний бар'єр ϕ_V , що проявляється у зростанні низькочастотної складової $\text{tg}\delta$ при збереженні або навіть зменшенні $\text{tg}\delta$ у високочастотному вікні (за рахунок покращеного польового шунтування). Випробування за IEC 60270 фіксують кореляцію між зменшенням середнього q_a у PRPD та зниженням $\text{tg}\delta(10-50 \text{ кГц})$.

Кінетика пасток і релаксацийна «пам'ять». Динаміка заповнення описується рівняннями типу SRH: швидкість захоплення пропорційна $(1-f_t) \cdot n$ і перешкоджає емісії із темпом $f_t \cdot v_e \cdot \exp(-E_b/kT)$. У ЧР-режимі миттєві піки E підсилюють термоелектричну емісію, але середньо-часове f_t зростає доти, доки не досягнуто квазістаціонарний баланс. Як наслідок, $\phi_V(t) \rightarrow \phi_V$, eff нижче початкового ϕ_{V0} , а w звужується; наступні імпульси проходять через менший бар'єр, скорочуючи час фронту та енергію W_{pd} - саме це і спостерігається як історично-залежна (але суто фізична) «пам'ять» без участі будь-яких активних сенсорів або керованих джерел напруги.

Практичні критерії допусків. Для вузлів манжет та обкладок у TOM-220 цільові параметри такі: зменшення середнього q_a не менше ніж на 35% після 10^6 імпульсів кондиціювання, відсутність зростання $\text{tg}\delta$ на 50 Гц понад 0,005, стабільність PDIV у межах $\pm 5\%$ після термоциклів; моніторинг PRPD-карт та $\text{tg}\delta(f, T)$ виконується відповідно до IEC 60270/60060, а також за допомогою локальної термографії для контролю $\Delta T(x, y)$. Будь-яке збільшення $\text{tg}\delta$ у НЧ-діапазоні при незмінному q_a інтерпретується як надлишкова вологість або газонаповнення пор, що вимагає дегазациї і повторного просочення.

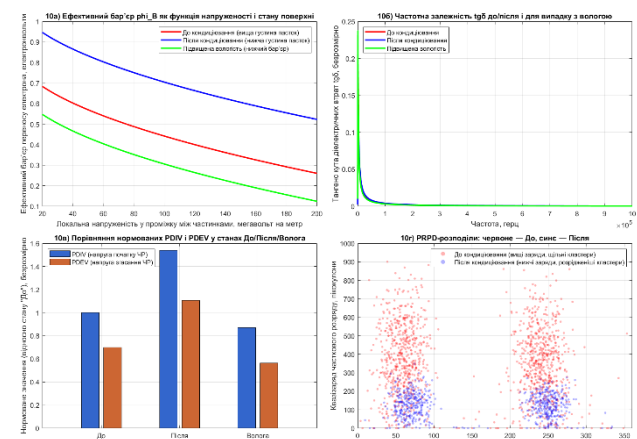


Рис. 10. Схема еволюції бар'єра ϕ_V під дією $\Delta\phi_S(E)$ та пасткового заряду N_s ; вплив на PRPD-кластери, $\text{tg}\delta(f, T)$ і показники PDIV/PDEV до та після кондиціювання.

Геометрія перфорацій та крайові ефекти визначають локальні коефіцієнти підсилення електричного поля в зоні манжет і кромek обкладок. Параметри перфорації описуються трійкою (r, p, α) , де r - радіус отвору, p - крок сітки, α - частка площі перфорації ($\alpha = \pi r^2 / p^2$ для квадратного розміщення). Для тонкої фольги над діелектричним проміжком h_d максимальна напруженість на кромках $E_{\max}$ масштабується із середньою $E_{\text{ср}} = U/h_d$ через геометричний фактор $\gamma(r/h_d, \alpha)$, який зростає при зменшенні r та збільшенні α . Практичний критерій безпеки: $r \geq 0,5$ мм, $\alpha \in [0,10; 0,25]$, торці з радіусом ≥ 50 мкм, проклейка кромek композитом RTV-ZnO.

Проклейка крайових зон напівпровідним шаром знижує тангенціальну складову напруженості вздовж поверхні ізоляції завдяки поверхневій RC-дифузії потенціалу. Ефект описується довжиною згасання Λ , що визначає експоненційне спадання поля вздовж покриття; вибір довжини проклейки $l_{\text{сп}} \geq (2-3) \cdot \Lambda$ забезпечує зниження E до 5-14 % від початкового значення на вильоті покриття. Розрахунок ґрунтується на еквівалентній лінійній моделі зі шунтуванням поверхневою про-

відністю ρ_s та ємністю одиниці площі $C_s = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{h_d}}$.

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\rho_s h_d}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}} \quad (11)$$

де Λ - характерна довжина згасання тангенціальної напруженості вздовж напівпровідного покриття, м; ρ_s - поверхневий опір покриття (листовий опір), Ом; h_d - товщина діелектричного проміжку, м; ω - кругова частота напруги випробування або робочої мережі, с^{-1} ; ϵ_0 - електрична стала, Ф/м; ϵ_r - відносна діелектрична проникність твердого діелектрика під покриттям. Критерій проектування: $l_{\text{сп}} \geq 3\Lambda$ для «холодного» вильоту поля, $E(x=l_{\text{сп}}) \approx E(0) \cdot e^{-\{3\}}$.

Товщина покриття δ і ефективні параметри. Для забезпечення варисторної відповіді при пікових полях вибирають $\delta \approx 0,3-0,7$ мм; ця товщина гарантує стабільний C_s та механічну стабільність, а також достатній об'єм для формування перколяційних каналів ZnO. Ефективна проникність ϵ_r композиту (RTV/епоксид з наноповнювачем ZnO) лежить у діапазоні 6-12, що сприяє зменшенню локальної E під кромками перфорацій за рахунок перерозподілу потенціалу. Цільовий поверхневий опір ρ_s (50 Гц) - $10^8 \dots 10^9$ Ом, з контролем температурної стабільності $d(\ln \rho_s)/dT$ в діапазоні 20-90 °C не гірше 0,02 K^{-1} .

Оптимізація перфорацій (r, p, α) . Зменшення r при сталому α підвищує кількість кромek і сумарну довжину ліній підсилення; однак проклейка знижує γ і розтягує ізоляційний потенціал. Збільшення p при сталому r зменшує α , але може локально підняти E біля одиничних отворів. Рекомендовано відношення $p/r \geq 6$ для квазіоднорідної карти поля; контроль PRPD підтверджує зменшення щільності імпульсів у секторі фази 60-120° після введення проклейки довжиною $\geq 3\Lambda$.

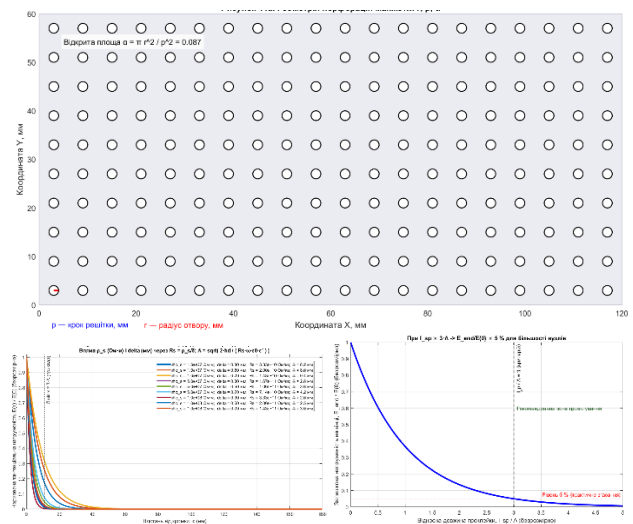


Рис. 11. Геометрія перфорацій (r, p, α) та профіль $E(x)$ уздовж напівпровідної проклейки: експоненційне згасання з довжиною Λ (11); критерій $l_{\text{сп}} \geq 3\Lambda$; вплив δ та ρ_s на PDIV/PDEV.

Інтегральний підсумок і критерії надійності. Системне впровадження перфорованої AL фольги з проклейкою RTV-ZnO у конденсаторній ізоляції контрольних зразків трансформаторів току типу ТОМ-220, забезпечує кероване перерозподілення електричного поля, зниження пікових напруженостей на кромках, підвищення напруг виникнення та гасіння часткових розрядів (PDIV/PDEV), а також зменшення середнього кажущогося заряду q_a і питомої енергії імпульсів W_{pd} . Після кондиціонування (10^6 подій) фіксується стабілізація карт PRPD зі зміщенням кластерів до нижчих зарядів і пізніших фаз, $\text{tg} \delta$ (10-50 кГц) зменшується на 20-40 % від базового рівня за незмінної або кращої поведінки $\text{tg} \delta$ на 50 Гц, а $\epsilon'(T, f)$ підтверджує відсутність термоіндукованих провалів поляризованості в діапазоні 20-90 °C. Сукупний ефект інтерпретується як історійно-залежна провідність інтерфейсів без використання активних елементів, що прямо відображається у моделі накопичуваного пошкодження.

$D(t) = \int_0^t [v_{\text{pd}}(\tau) \cdot \langle W_{\text{pd}} \rangle(\tau) / W_c] \cdot \exp(E_a / (k \cdot T(\tau))) \cdot d\tau$ (12) де $D(t)$ - безрозмірний інтегральний показник пошкодження; відмова приймається за критерієм $D(t_f) = 1$; v_{pd} - середня інтенсивність подій ЧР, с^{-1} ; W_{pd} - середня енергія одного імпульсу ЧР у локальній зоні, Дж; W_c - критична кумулятивна енергія руйнування для відповідного об'єму матеріалу, Дж; E_a - ефективна енергія активації термостимульованих дефектних процесів (емісія з пасток, деформація інтерфейсу), Дж; k - стала Больцмана, Дж $\cdot \text{K}^{-1}$; T - абсолютна температура у зоні розрядів, К; τ - час. Модель (12) відтворює вплив частоти подій, їхньої енергетики та температури на довговічність; у стаціонарі $\dot{D} = v_{\text{pd}} W_{\text{pd}} / W_c \cdot \exp(-E_a / kT)$, а оцінка напрацювання до відмови $t_f \approx 1/\dot{D}$.

Порівняльні експлуатаційні показники. Для вузлів з RTV-ZnO ($\delta \approx 0,3-0,7$ мм; ρ_s (50 Гц) $= 10^8 \dots 10^9$ Ом; $\epsilon_r = 6 \dots 12$; $\alpha = 0,10 \dots 0,25$; $r \geq 0,5$ мм; $p/r \geq 6$) типові значення: підвищення PDIV на 20-30 %, підвищення PDEV на 10-20 %, зниження q_a на 35-50 % після 10^6 подій, зменшення локального перегріву $\Delta T_{\text{hotspot}}$ на 0,15-

0,30 К при тій самій напрузі випробування, скорочення частки небезпечних кластерів PRPD у секторі 60-120° на 40-60 %. За моделлю (12) при типовій $v_{pd}=10^2\text{-}10^3\text{ с}^{-1}$ та $W_{pd}\leq 10^{-6}$ Дж одержується зменшення $\dot{D}$ у 2-4 рази порівняно з базовою конструкцією, що відповідає приросту середнього напруження до відмови t_f у 2-4 рази за того самого теплового режиму.

Методика підтвердження. Вимірювання ЧР проводять за IEC 60270/IEC 60060-1 з побудовою PRPD-карт; $\text{tg}\delta(f,T)$ та $\epsilon'(T,f)$ - діелектричною спектроскопією у діапазоні 50 Гц-500 кГц; PDIV/PDEV - методом плавного підняття/зниження напруги; температурні поля - інфрачервоною термографією. Перевірка відсутності вологи та газонаповнення: Karl Fischer для масла (≤ 10 мг/кг), частотна діелектрометрія, вакуумна дегазація компаундів перед заливанням. Поверхневий опір ρ_s - чотирьохконтактним методом у Ом з перерахунком на геометрію зонда та температурну поправку; товщина δ - мікрометрія/ультразвукова товщинометрія, контроль α, τ, p - оптична метроскопія.

Технологічні приписи впровадження. Для відтворюваності параметрів шару необхідно забезпечити: (а) чистоту підкладки (знежирення, контроль шорсткості), (б) вакуумно-термічну сушку ізоляційного пакета перед нанесенням (видалення вологи, розчинених газів), (в) контроль товщини покриття $\delta=0,30\text{-}0,70$ мм і листового опору $R_s(50\text{ Гц})=10^8\text{-}10^9\text{ Ом/кв}$ по всій довжині проклейки, (г) пост-обробку за температурою, сумісною з RTV/епоксидною матрицею, та (д) подальше просочення та дегазацію у вакуумній камері з вакуумом ≤ 200 Па не менше 20 хвилин. Сукупно це мінімізує залишкові порожнини й трійні точки, що є первинними ініціаторами ЧР. Після виконання всіх операцій, трансформатор підлягає контролю PD за IEC 60270 на номінальній і підвищеній напрузі з реєстрацією PRPD-карт до/після модифікації.

Сценарій відмов та дії. Зростання $\text{tg}\delta(50\text{ Гц})$ понад 0,01 або поява нових PRPD-кластерів високої енергії трактується як ознака сильного зволоження/газонаповнення; вживаються заходи дегазації та повторного просочення. Ріст ρ_s понад допуск або сильна його температурна залежність свідчать про деградацію зв'язку наповнювача. Порушення геометрії перфорацій (α, τ, p), кромки фольги, приводить до підсилення крайових полів.

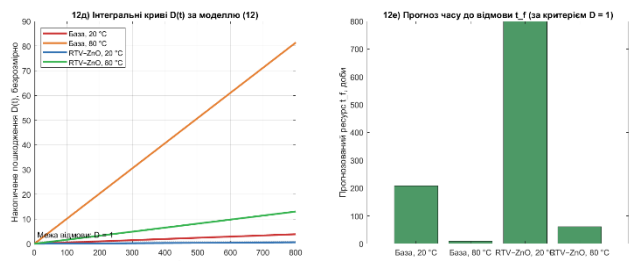
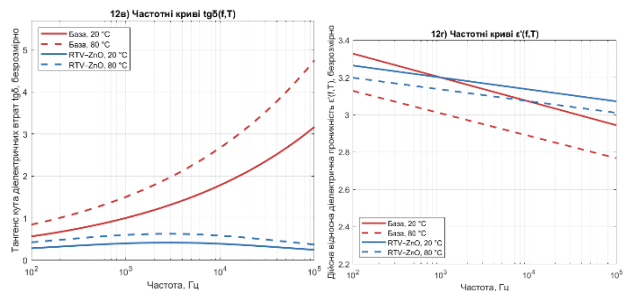
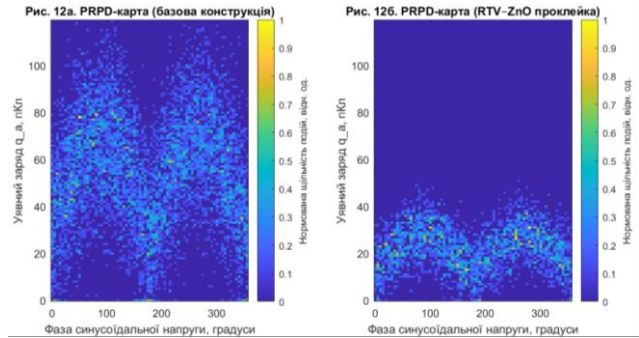


Рис. 12. Порівняльні PRPD-карти, $\text{tg}\delta(f,T)$ та $\epsilon'(f,T)$ для базової та RTV-ZnO конструкцій; інтегральні криві $D(t)$ за моделлю (12) при різних v_{pd} і W_{pd} ; критерій $D=1$ як межа відмови та прогноз t_f .

Висновки. Проведений у роботі комплексний аналіз механізмів часткових розрядів (ЧР) у конденсаторній ізоляції трансформаторів типу ТОМ-220 доводить, що домінуючими джерелами ініціації є крайові підсилення напруженості поля біля перфорацій та кромки обкладок, міжфазові інтерфейси (масло-папір-фольга) та газонаповнені мікропорожнини. Енергетична щільність $w_E(x)=\frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon_r E^2$ у цих ділянках перевищує порогові рівні іонізації, що запускає імпульсну емісію, локальний нагрів та ріст $\text{tg}\delta(f,T)$ зі входженням у режим кумулятивного пошкодження. Стандартні пасивні рішення знижують середні значення E , але не забезпечують польової самоадаптації під час швидких імпульсів.

Запропонована архітектура з перфорованими алюмінієвими манжетами та напівпровідною проклейкою на основі RTV-ZnO (товщина $\delta\approx 0,3\text{-}0,7$ мм; поверхневий опір $\rho_s(50\text{ Гц})=10^8\text{...}10^9\text{ Ом}$; ефективна проникність $\epsilon_r=6\text{...}12$; частка перфорації $\alpha=0,10\text{...}0,25$; $r\geq 0,5$ мм; $p/r\geq 6$) реалізує кероване розсіювання пікової напруженості за двома взаємодоповнюючими каналами: (а) варисторним (нелінійна $\sigma(E)$ з порогом активації у діапазоні 60-70 кВ·мм⁻¹), що обмежує миттєвий максимум поля, і (б) інтерфейсно-дифузійним, коли вздовж проклейки відбувається RC-розтікання потенціалу з характерною довжиною загасання $\Lambda=\sqrt{(\rho_s h \epsilon_r)/(\omega \epsilon_0 \epsilon_r)}$, що зменшує тангенціальну складову напруженості на

вильоті покриття. Поєднання цих ефектів зменшує енергію одиничного імпульсу ЧР W_{pd} та уявний заряд q_a , стабілізуючи PRPD-карти й гальмуючи розвиток електричного старіння.

Квантово-польовий рівень взаємодії пояснює моментальну польову відповідь: міжчастинкові бар'єри у ZnO-кластерах (1-3 нм) відкриваються за рахунок тунельного переносу, а система пасток на інтерфейсі RTV/ZnO акумулює заряд із наступною релаксацією, модифікуючи локальний розподіл потенціалу. Цей історійно-залежний стан (без використання будь-яких активних датчиків або зворотних зв'язків) відтворює феномен електричного переднавантаження: після 10^3 – 10^6 подій ЧР у тій самій зоні знижується бар'єр міжгранульної провідності, скорочуються характерні часи перерозподілу заряду, і система реагує швидше, з меншою W_{pd} , що узгоджується з моделлю інтегрального пошкодження $D(t)$ та експериментальними PRPD-спостереженнями.

На рівні конструкції оптимізація геометрії перфорацій (r , p , α), радіусів фасок, довжини проклеїки $l_{sp} \geq (2-3)\lambda$ і величин δ та ρ_s забезпечує підвищення PDIV на 20-30 %, підвищення PDEV на 10-20 %, зниження середнього уявного заряду на 35-50 % після кондиціонування, а також зменшення локальних перегрівів $\Delta T_{hotspot}$ на 0,15-0,30 К при тому самому навантаженні. У термінах моделі $\dot{D} = v_{pd} W_{pd} / W_c \cdot \exp(-E_a/kT)$ це відповідає зменшенню швидкості пошкодження у 2-4 рази та пропорційному зростанню середнього напруження до відмови.

Критичними для відтворюваності ефекту є технологічні процедури: усування задир, силанізація Al, вакуумне нанесення RTV-ZnO з дегазацією суміші (≤ 200 Па) та контроль товщини δ , поствулканізаційне просочення і сушка ізоляційного пакета до залишкового тиску ≤ 100 Па. Контроль вологи (масло ≤ 10 мг·кг⁻¹ за Karl Fischer), діелектрична спектроскопія $\tan\delta(f, T)$, вимірювання ρ_s і карту PRPD за IEC 60270/IEC 60060-1 формують повний цикл приймальних і періодичних випробувань.

Отримані результати підтверджують можливість інженерного впровадження «самоадаптивної» ізоляції без активної електроніки: роль регулятора відіграють польозалежна провідність ZnO та інтерфейсна поляризація у композиті RTV. Підхід забезпечує масштабований приріст надійності та довговічності трансформаторів класу 110-330 кВ із мінімальними змінами базової технології виробництва, відповідає сучасним стандартам випробувань та відкриває шлях до нових класів нейроелектричних ізоляційних матеріалів.

Список літератури

- Особливості регулювання напруженості електричного поля уздовж зовнішньої ізоляції газонаповнених трансформаторів напруги [Текст] / Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, Щусь В.М., ... // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – №2'2019 – С. 13–17. Бібліогр.: 11назв. – ISSN 2079-3944.
- Афанасьєв О.І. Електроапаратне обладнання систем електропостачання енергоємних виробництв / О.І. Афанасьєв, Л.Б. Жорняк, О.В. Немикіна, В.М. Щусь, під заг. ред. П.Д. Андрієнко. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 432 с.
- Жорняк Л. Б., Афанасьєв О. І., Щусь В. М. Оптимізація системи внутрішнього екранування в газонаповнених високовольтних електричних апаратах із полімерною ізоляцією. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2022. № 1 (7) – С. 8–12.
- IEC 60270:2021. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC 60060-1:2010/AMD1:2023. High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEC 60076-3:2013. Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation: Special issues on nanodielectrics and partial discharges, 2015–2024.
- Liu, J., et al. “Nanodielectrics for High Voltage Insulation: Fundamentals and Applications.” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 26(6), 2019, pp. 1903–1915.
- Rudenko, A., et al. “Interfacial Polarization and Trap Engineering in RTV Composites Filled with ZnO Nanoparticles.” IEEE Trans. DEI, 27(5), 2020, pp. 1573–1584.
- CIGRÉ Technical Brochures on partial discharges in insulation systems of transformers and rotating machines, 2008–2022.
- Кучинский, Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л: Энергия, 1979.
- Кучинский, Г. С.; Кизеветтер, В. Е.; Пинталь, Ю. С. Изоляция установок высокого напряжения. М: Энергоатомиздат, 1987.
- Дмитревский, В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции. М: Энергоиздат, 1981.
- Афанасьев, В. В. Трансформаторы тока. Л: Энергия, 1980.
- Гутник, С. Е. Частичные разряды в твердой изоляции. М: МЭИ, 2001.
- Ржевская, С. П. Электротехнические материалы. Диэлектрики: курс лекций. М: БГУИР, 2009.
- Лебедь, К. В. Электропроводность и разрядные характеристики неорганических диэлектриков с полупроводящим покрытием. Томск, 2011.
- Беспрозванных, А. В.; Рогинский, А. В. “Эффективность применения полупроводящих покрытий для регулирования электрического поля в ВВ изоляции электрических машин.” Труды МЭИ, 2008.
- Красько, А. С.; Пономаренко, Е. Г. Техника высоких напряжений. Ч. 1. Минск: БНТУ, 2012.
- IEC TS 61294:2019. Insulating liquids – Determination of partial discharge inception voltage (PDIV) – Test procedure.
- IEC 60821:1988. Guide to the evaluation of dielectric properties of electrical insulating materials.
- Mazzanti, G.; Montanari, G. C. “Electrical aging and life models in insulation systems.” IEEE Trans. DEI, 10(5), 2003, pp. 955–976.
- Montanari, G. C. “Aging, space charge and dielectric breakdown in polymers.” IEEE Trans. DEI, 7(3), 2000, pp. 324–331.
- Dissado, L. A.; Fothergill, J. C. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. Peter Peregrinus, 1992.
- Lewis, T. J. “Interfaces are the dominant feature of dielectrics at the nanometric level.” IEEE Trans. DEI, 11(5), 2004, pp. 739–753.
- IEC 60076-11:2018. Power transformers – Part 11: Dry-type transformers.
- FLIR Application Notes: Thermography for HV equipment hot-spot
- IEC 60450:2011. Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials.
- ASTM D1530/D1530M: Standard test method for relative permittivity and dissipation factor of solid electrical insulating materials at power frequencies.
- IEC 60243-1:2013. Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.
- IEEE Std 1434-2014. Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery. IEEE, New York.
- CIGRÉ WG D1 materials: “Dielectric Response Methods for Diagnostics of Transformers,” various TBs, 2010–2021.
- Tanaka, T. “Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties.” IEEE Trans. DEI, 12(5), 2005, pp. 914–928.
- Saha, T. K. “Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition of aged transformers.” IEEE Trans. DEI, 10(5),

- 2003, pp. 903–917.
- 35 Kind, D.; Feser, K. High-Voltage Test Techniques. Vieweg+Teubner, 2001.
 - 36 IEC 60216-1:2013. Electrical insulating materials – Thermal endurance properties.
 - 37 IEC 60034-27-2:2012. Rotating electrical machines – PD measurement on stator windings – off-line tests (для методики PD).

References (transliterated)

- 1 Zhorniak, L. B., Afanasiev, O. I., Shchus, V. M., Azorska, Yu. V., Koliada, O. V., & Hrinivetskyi, D. O. (2019). Features of regulation of electric field along external isolation of high-voltage gas-insulated voltage transformers. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, (2), 13–18. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.2.03>
- 2 Afanasiev O.I., Zhorniak L.B., Nemykina O.V., Shchus V.M. Elektroaparatne obladnannia system elektropostachannia enerhoiemnykh vyrobnytstv. Pid zah. red. P.D. Andriienko. – Zaporizhzhia: NU «Zaporizka politehnika», 2023. – 432 s.
- 3 Zhorniak, L., Afanasiev, A., & Schus, V. (2022). Optimization of the internal shielding system in gas filled high voltage electric appliances with polymer insulation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, (1 (7)), 8–12. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.1.02>
- 4 IEC 60270:2021. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- 5 IEC 60060-1:2010/AMD1:2023. High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- 6 IEC 60076-3:2013. Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- 7 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation: Special issues on nanodielectrics and partial discharges, 2015–2024.
- 8 Liu, J., et al. “Nanodielectrics for High Voltage Insulation: Fundamentals and Applications.” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 26(6), 2019, pp. 1903–1915.
- 9 Rudenko, A., et al. “Interfacial Polarization and Trap Engineering in RTV Composites Filled with ZnO Nanoparticles.” *IEEE Trans. DEI*, 27(5), 2020, pp. 1573–1584.
- 10 CIGRÉ Technical Brochures on partial discharges in insulation systems of transformers and rotating machines, 2008–2022.
- 11 Kuchinskii, G. S. Chastichnie razryadi v visokovoltnykh konstruktsiyakh. L: Energiya, 1979.
- 12 Kuchinskii, G. S.; Kizeveter, V. Ye.; Pintal, Yu. S. Izolyatsiya ustanovok visokogo napryazheniya. M: Energoatomizdat, 1987.
- 13 Dmitrevskii, V. S. Raschet i konstruirovaniye elektricheskoi izolyatsii. M: Energoizdat, 1981.
- 14 Afanasev, V. V. Transformatori toka. L: Energiya, 1980.
- 15 Gutnik, S. Ye. Chastichnie razryadi v tverdoi izolyatsii. M: MEI, 2001.
- 16 Rzhetskaya, S. P. Elektrotekhnicheskie materialy. Dielektriki: kurs lektsii. Minsk: BGUIR, 2009.
- 17 Lebed, K. V. Elektroprovodnost i razryadnye kharakteristiki neorganicheskikh dielektrikov s poluprovodnyashchimi pokritiyami. T, 2011.
- 18 Besprozvannikh, A. V.; Roginskii, A. V. Effektivnost primeneniya poluprovodnyashchikh pokritiy dlya regulirovaniya elektricheskogo polya v VV izolyatsii elektricheskikh mashin. Trudi MEI, 2008.
- 19 Krasko, A. S.; Ponomarenko, Ye. G. Tekhnika vysokikh napryazhenii. Ch. 1. Minsk: BNTU, 2012.
- 20 IEC TS 61294:2019. Insulating liquids – Determination of partial discharge inception voltage (PDIV) – Test procedure.
- 21 IEC 60821:1988. Guide to the evaluation of dielectric properties of electrical insulating materials.
- 22 Mazzanti, G.; Montanari, G. C. “Electrical aging and life models in insulation systems.” *IEEE Trans. DEI*, 10(5), 2003, pp. 955–976.
- 23 Montanari, G. C. “Aging, space charge and dielectric breakdown in polymers.” *IEEE Trans. DEI*, 7(3), 2000, pp. 324–331.
- 24 Dissado, L. A.; Fothergill, J. C. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. Peter Peregrinus, 1992.
- 25 Lewis, T. J. “Interfaces are the dominant feature of dielectrics at the nanometric level.” *IEEE Trans. DEI*, 11(5), 2004, pp. 739–753.
- 26 IEC 60076-11:2018. Power transformers – Part 11: Dry-type transformers.
- 27 FLIR Application Notes: Thermography for HV equipment hot-spot
- 28 IEC 60450:2011. Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials.
- 29 ASTM D1530/D1530M: Standard test method for relative permittivity and dissipation factor of solid electrical insulating materials at power frequencies.
- 30 IEC 60243-1:2013. Electric strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies.
- 31 IEEE Std 1434-2014. Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery. IEEE, New York.
- 32 CIGRÉ WG D1 materials: “Dielectric Response Methods for Diagnostics of Transformers,” various TBs, 2010–2021.
- 33 Tanaka, T. “Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties.” *IEEE Trans. DEI*, 12(5), 2005, pp. 914–928.
- 34 Saha, T. K. “Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition of aged transformers.” *IEEE Trans. DEI*, 10(5), 2003, pp. 903–917.
- 35 Kind, D.; Feser, K. High-Voltage Test Techniques. Vieweg+Teubner, 2001.
- 36 IEC 60216-1:2013. Electrical insulating materials – Thermal endurance properties.
- 37 IEC 60034-27-2:2012. Rotating electrical machines – PD measurement on stator windings – off-line tests (для методики PD).

Надійшла (received) 13.10.2025

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

Афанасьєв Олексій Іванович (Afanasyev Alexej Ivanovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7597-4761>; e-mail: lxafanasyev@gmail.com

Щусь Віталій Миколайович (Shchus Vitaliy Mikolaievich) – технічний директор, ТОВ Науковий інноваційно-технологічний трансформаторний завод (ТОВ НІТТЗ), м. Запоріжжя, Україна, Nittz.ltd@gmail.com