

Л. Б. ЖОРНЯК, О. І. АФАНАСЬЄВ, В. М. ЩУСЬ, О. Ю. МОРОЗОВ, Ю. В. РУДЕНКО

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ЗОВНІШНЬОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ГАЗОНАПОВНЕНИХ ВІМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

В статті авторами запропонована методика оцінки параметрів електричного навантаження для розрахунку показників експлуатаційної надійності твердої ізолюючої структури газонаповнених високовольтних апаратів, що являє собою опорну та ізолюючу покривку для вимірювальних високовольтних трансформаторів, заповнених електричним маслом в якості внутрішнього ізолюючого середовища. Ця методика дозволяє оцінити параметри електричного навантаження (напругу та напруженість поля) в залежності від конструктивних особливостей апарату та системи екранування, що використовується для вирівнювання електричного поля. Розроблена методика дозволяє отримати значення показників експлуатаційної надійності газонаповненого високовольтного обладнання (вимірювальні трансформатори, розрядники, обмежувачі перенапруги та ін.) шляхом визначення параметрів теоретичних законів розподілу, або даних експериментальних досліджень чи статистичну інформацію, яка отримана в результаті моніторингу роботи ізоляційних конструкцій з урахуванням реальних умов експлуатації та дії зовнішніх чинників. Реалізація цієї методики дає можливість врахувати вплив зовнішніх факторів і експлуатаційних характеристик, властивих вимірювальним трансформаторам як струму, так і напруги. У запропонованій методиці в якості прикладу розглядається опорна ізоляційна покривка, що знаходиться під час експлуатації в найбільш несприятливих умовах, таких як зовнішнє забруднення, зволоження та їх комбінація, перенапруги різного походження та ін. Теоретичні висновки підтверджуються результатами розрахунків та ймовірного моделювання на прикладі найбільш масової конструкції газонаповненого трансформатора струму серії ТОГ-362. Більш точне визначення ефективності запропонованої методики прогнозування параметрів теоретичних законів розподілу та показників надійності можна досягти за рахунок проведення додаткової серії розрахунків та експериментальних випробувань конкретних ізоляційних конструкцій. Таким чином, був зроблений висновок про можливість використання отриманих результатів для оцінки показників експлуатаційної надійності зовнішньої ізоляції як газонаповнених вимірювальних трансформаторів, так і аналогічного високовольтного обладнання розподільних пристроїв та трансформаторних підстанцій.

Ключові слова: газонаповнений трансформатор струму, напруга перекриття, напруженість поля, ізоляційна покривка, теоретичний закон розподілу, математичне очікування, дисперсія, густина розподілу, напрацювання до відмови, коефіцієнт варіації.

Л.Б. ЖОРНЯК, А.И. АФАНАСЬЄВ, А.Ю. МОРОЗОВ, В.Н. ЩУСЬ, Ю.В. РУДЕНКО

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ВНЕШНЕЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В статье авторами предложена методика оценки параметров электрической нагрузки для расчёта показателей эксплуатационной надёжности твердой изолирующей структуры газонаполненных высоковольтных аппаратов, что представляет собою опорно-изоляционную покрывку для измерительных высоковольтных трансформаторов, заполненных маслом в качестве внутренней изолирующей среды. Эта методика позволяет оценить параметры электрической нагрузки (напряжение и напряженность поля) в зависимости от конструктивных особенностей аппарата и системы экранирования, которая используется для выравнивания электрического поля. Разработанная методика позволяет получить значения показателей эксплуатационной надёжности газонаполненного высоковольтного оборудования (измерительные трансформаторы, разрядники, ограничители перенапряжений и др.) путем определения параметров теоретических законов распределения, или данных экспериментальных исследований, или статистическую информацию, которая получена в результате мониторинга изоляционных конструкций с учетом реальных условий эксплуатации и воздействия внешних факторов. Реализация этой методики дает возможность учесть влияние внешних факторов и эксплуатационных характеристик, присущих измерительным трансформаторам как тока, так и напряжения. В предложенной методике в качестве примера рассматривается опорная изоляционная покрывка, которая находится во время эксплуатации в наиболее неблагоприятных условиях, таких как внешнее загрязнение, увлажнение и их комбинация, перенапряжения различного происхождения и пр. Теоретические выводы подтверждаются результатами расчетов и вероятностного моделирования на примере наиболее массовой конструкции газонаполненного трансформатора тока серии ТОГ-362. Более точное определение эффективности предложенной методики прогнозирования параметров теоретических законов распределения и показателей надёжности можно достигнуть за счет проведения добавочной серии расчетов и экспериментальных исследований конкретных изоляционных конструкций. Таким образом, был сделан вывод про возможность применения полученных результатов для оценки показателей эксплуатационной надёжности внешней изоляции как газонаполненных измерительных трансформаторов, так и аналогичного высоковольтного оборудования распределительных устройств и трансформаторных подстанций.

Ключевые слова: газонаполненный трансформатор тока, напряжение перекрытия, напряженность поля, изоляционная покрывка, теоретический закон распределения, математическое ожидание, дисперсия, плотность распределения, наработка до отказа, коэффициент вариации.

L. B. ZHORNIAK, A. I. AFANASIEV, A. Ю. МОРОЗОВ, V. M. SCHUS, J. V. RUDENKO

ESTIMATION PECULIARITIES OF EXTERNAL POLYMER INSULATION RELIABILITY OF GAS-FILLED INSTRUMENT TRANSFORMERS

In the article, the authors propose a method for estimating the parameters of theoretical distributions for calculating the indicators of operational reliability. In the article, the authors propose a method for estimating the parameters of theoretical distributions for calculating the indicators of the operational reliability of a solid insulating structure of high-voltage devices, which is a supporting insulating cover for high voltage instrument transformers filled with gas as an insulating liquid. This technique makes it possible to estimate the parameters of a new distribution law, which is chosen on the condition that it does not contradict the existing distribution law with its known parameters. The developed technique makes it possible to obtain the values of the indicators of the operational reliability of high-voltage equipment by determining the parameters of theoretical distributions, if the developer is the data of experimental studies or statistical information as a result of monitoring the operation of insulating structures, taking into account the actual operating conditions of such high-voltage devices. This makes it possible to take into account the influence of external factors and performance characteristics inherent in instrument transformers, both current and voltage. In the proposed methodology, as an

example, a supporting insulating casing is considered, which is during operation in the most unfavorable conditions, such as external pollution, humidification, overvoltage, etc. The theoretical conclusions are confirmed by the results of calculations using the example of the design of a current transformer of the ТОГ-362 series. A more accurate determination of the effectiveness of the proposed method for predicting the parameters of theoretical distribution laws can be achieved by performing an additional series of calculations and experimental tests of specific insulating structures. Thus, it was concluded that it is possible to use the results obtained to assess the operational reliability of both gas-filled instrument transformers and similar high-voltage equipment.

Keywords: gas-filled current transformer, overlap voltage, field strength, insulating cover, theoretical distribution law, mathematical expectation, dispersion, distribution density, time to failure, coefficient of variation.

Вступ. В умовах промислової експлуатації для апаратів високої напруги взагалі, а також для газонаповнених вимірювальних трансформаторів конкретно, найважливішою властивістю, що забезпечує високу ефективність їх використання в умовах розподільних пристроїв, є такий показник, як надійність. У загальному випадку надійність визначається як властивість електричного апарату зберігати за часом у завданих межах значення всіх параметрів, що визначають здатність виконувати потрібні функції в завданих режимах та умовах використання, ремонтів, збереження та транспортування [1, 11]. Надійність вимірювального трансформатора як системи визначається надійністю його окремих функціональних блоків, що формують цю систему. Аналіз статистичних даних [2, 11] показує, що більшу частку відмов в процесі експлуатації створює такий функціональний блок, як ізоляційна конструкція (ІК), яка в свою чергу поділяється на внутрішню та зовнішню, причому головним джерелом відмов є остання.

Для ізоляційних конструкцій (ІК) у загальному випадку надійність зазвичай розглядається як властивість виробу виконувати певні завдані їм функції [1, 2]. При цьому ІК має зберігати власні експлуатаційні показники та параметри у встановлених межах впродовж завданого проміжку часу. Особливими параметрами та характеристиками ІК є пробивна або розрядна напруга, робоча напруженість поля, інтенсивність та потужність часткових розрядів, напруга виникнення коронних розрядів та ін. Для окремої ІК, наприклад, прохідного або опорного ізолятора, опорної ізоляційної покришки газонаповненого вимірювального трансформатора та інше, надійність характеризується такими показниками, як напрацювання до відмови, інтенсивність відмов, ймовірність безвідмовної праці, термін служби та ін. В свою чергу, ці показники, насамперед, залежать від якості ізоляційного матеріалу, товщі ізоляції, електричного, теплового, механічного навантаження, параметрів зовнішнього середовища, тощо [3, 4, 5].

Яким чином та наскільки перераховані вище чинники впливають на термін служби ізоляційної конструкції визначити майже неможливо через технічні та конструктивні особливості кожного високовольтного пристрою. Але ж можна зробити приблизне оцінювання, що, в свою чергу, має тій або інший рівень ймовірності. За таких умов найбільш зручним критерієм оцінювання надійності можуть бути такі характеристики, як ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов та густина ймовірності виникнення відмов. Всі ці характеристики надійності між собою пов'язані простими математичними співвідношеннями. Вони визначені для обраного теоретичного закону розподілу випадкової величини, який характеризує співвідношення між значенням випадкової величини та ймовірністю її виникнення. В якості такої випадко-

вої величини можливо обрати, наприклад, напрацювання до відмови або напругу перекрыття.

Великий комплекс досліджень розрядних напруг різного роду ізоляторів проведено в [3, 6] для різноманітного обладнання розподільних пристроїв високої напруги, а також в [4, 5] для опорних та підвісних ізоляторів, що були забруднені у природних умовах. Ці результати довели, що розкид цих напруг найбільш повно можливо описати нормальним або одним з його різновидів, наприклад усіченим нормальним законом розподілу. Можливість усічення зліва графіка функції густини розподілу для теоретичних законів розподілу ймовірностей перекрыття у нормальному експлуатаційному режимі дозволила використовувати як усічений нормальний, так і логарифмічно-нормальний закони розподілу для теоретичної оцінки показників надійності ІК газонаповнених апаратів взагалі та вимірювальних трансформаторів в якості конкретного випадку [7].

Мета роботи. З урахуванням вище сказаного, метою цієї роботи є розробка методики прогнозування параметрів надійності задля визначення показників експлуатаційної надійності зовнішньої ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів. Реалізація такої методики здійснюється з урахуванням даних попередніх досліджень та статистичної інформації, що отримана на основі моніторингу роботи ізоляційних конструкцій в реальних умовах їх експлуатації.

В якості об'єктів дослідження розглянемо опорні ізоляційні покришки газонаповнених вимірювальних трансформаторів струму серії ТОГ та трансформаторів напруги серії НОГ. Автори робіт [3, 4, 8, 9] стверджують, що навіть за нормальних робочих умов опорні ізоляційні покришки працюють в середовищі різко неоднорідних електричних полів. Така структура електричного поля утворює найбільш важкий режим праці та найбільшу швидкість старіння ізоляції. Ця швидкість додатково підсилюється за рахунок складної структури самої ізоляційної покришки. Її основу являє собою скло-епоксидний циліндр, що забезпечує механічну стійкість, на якому розміщуються ребра з кремнійорганічної гуми, що забезпечують необхідну електричну міцність зовнішньої ізоляції. Загальний вид ізоляційної покришки трансформатора струму серії ТОГ показано на рис. 1 [10, 15].

Як було встановлено раніше, в процесі експлуатації ізоляційної покришки можливо виникнення двох видів відмов. По-перше, це пробій твердого ізоляційного матеріалу, оскільки в середині покришки проходять елементи струмопровідного контуру з високим потенціалом (фазна напруга).

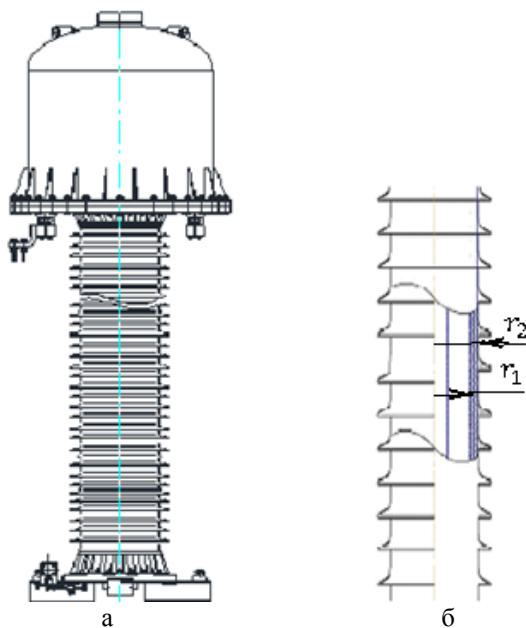


Рис. 1. Загальний вид трансформатора (а) та опорно-ізоляційної покривки (б) вимірального трансформатора струму серії ТОГ-362

Оскільки внутрішня газова ізоляція розрахована на фазну напругу і працює в найбільш спритних умовах, то даний вид пробою мало ймовірний. По-друге, це перекриття ізоляційної покривки по її поверхні внаслідок дії несприятливих зовнішніх чинників та електричного навантаження. Оскільки перекриття по поверхні твердого матеріалу ізоляційної покривки може мати місце як по зовнішній, так і по внутрішній поверхні, то для спрощення аналізу приймаємо наступне припущення. Оскільки умови роботи внутрішньої ізоляції значно легші внаслідок відсутності негативного впливу зовнішнього середовища, то вважатимемо, що відмови типу перекриття матимуть місце тільки в елементах зовнішньої ізоляції.

Через появу будь-якої відмови може виникнути відмова трансформатора в цілому, то в цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи покривки з урахуванням прийнятого припущення визначається за наступною умовою [1, 2]:

$$P(t) = P_{\text{пр}}(t) \cdot P_{\text{пер}}(t) = P_{\text{пер}}(t),$$

де $P_{\text{пр}}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи при пробі твердого ізоляційного матеріалу;

$P_{\text{пер}}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи при перекритті по зовнішній поверхні покривки.

Як показують статистичні дані [2, 12] відмови внаслідок пробою крізь товщу твердої ізоляції покривки мало ймовірні внаслідок того, що внутрішня елегазова ізоляція розраховується на повний клас прикладеної напруги. Тому на першому етапі досліджень розглянемо, яким чином впливає електричне навантаження на величину $P_{\text{пер}}(t)$.

Ймовірність безвідмовної роботи при перекритті ізоляції може бути визначена за умовою:

$$P_{\text{пер}}(t) = 1 - Q_{\text{пер}}(t),$$

де t – випадкова величина (визначальний параметр), під дією якої відбувається процес перекриття ізоляції. В якості цієї величини можливо обирати напругу пе-

рекриття $U_{\text{пер}}$, або величину напруженості електричного поля $E_{\text{р.п}}$ уздовж опорно-ізоляційної покривки. Методику оцінки цих параметрів у загальному виді приведено у [8, 9];

$Q_{\text{пер}}(t)$ – ймовірність перекриття ізоляції під дією визначального параметру.

Для визначення показників надійності в якості початкових даних необхідно знати вид теоретичного закону розподілу випадкової величини та параметри цього закону. Якщо за визначальний параметр обрати $U_{\text{пер}}$, то її значення можливо встановити за методикою, що викладено в [7, 8, 9] наступним чином.

Значення середньоквадратичного відхилення σ_H та математичного очікування m_U розподілу напруг перекриття за умови застосування нормального закону розподілу можливо визначити за наступними співвідношеннями:

$$\frac{\sigma_H}{U_{\text{пер}}} = K_B = (0,03 - 0,06), \quad U_{\text{пер}} = E_{\text{ср.д}} \cdot l_{\text{вит}}, \quad (1)$$

де $U_{\text{пер}}$ – напруга перекриття покривки за умови максимального зволоження (знаходження під дощем);

K_B – коефіцієнт варіації, найбільші значення якого відповідають ізоляції з підвищеним рівнем забруднення зовнішньої поверхні та електричного навантаження;

$E_{\text{ср.д}}$ – значення середньої напруженості поля уздовж шляху витoku при перекритті ізолятора під дощем; в залежності від типу забруднення та категорії розміщення обладнання вона може мати значення в межах від 25 кВ/м до 60 кВ/м [3, 8, 9];

$l_{\text{вит}}$ – довжина шляху витoku по зовнішній поверхні ізоляційної покривки.

Для визначення коефіцієнта навантаження в якості критичного значення напруги перекриття можливо використовувати напругу виникнення поверхневих часткових розрядів $U_{\text{п}}$ у вигляді появи ковзкого розряду. Її значення визначається за наступною умовою [12, 13]:

$$U_{\text{п}} = \frac{7,8}{C_{\text{п}}^{0,44}},$$

де $C_{\text{п}}$ – питома поверхнева ємність $\Phi/\text{м}^2$, значення якої для циліндричної ізоляційної конструкції покривки (див. рис. 1,б) може бути визначене за формулою:

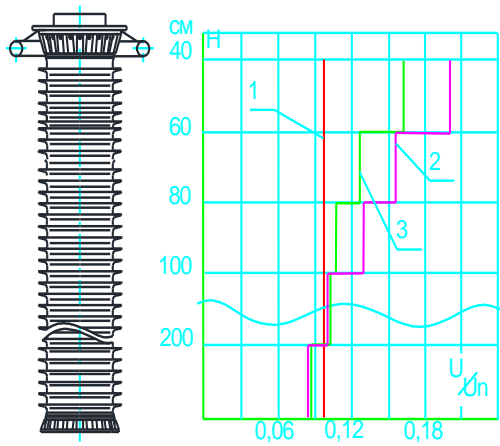
$$C_{\text{п}} = \frac{\epsilon_d \cdot \epsilon_0}{r_2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

де ϵ_d – відносна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу, з якого виготовлено покривку;

ϵ_0 – постійна величина, що дорівнює $8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м}$;

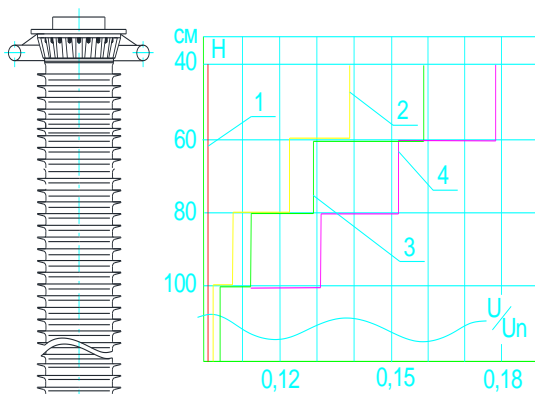
r_1, r_2 – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси циліндричного твердого діелектрика покривки.

Для конструкції ізоляційної покривки, що розглядається, за вище зазначеною методикою проведений розрахунок розподілу напруги перекриття вздовж зовнішньої поверхні, яке показано на рис. 2, для різних значень коефіцієнту варіації (рис. 2, а) та середньої напруженості поля $E_{\text{ср.д}}$ (рис. 2, б).



а

1 – теоретичний рівномірний; 2 – відповідно з мінімальною та максимальною системою екранування;



б

1 – теоретичний рівномірний; 2, 3, 4 – відповідно з мінімальним та максимальним значенням $E_{ср.д.}$

Рис. 2. Розподіл електричного навантаження (напряга перекриття) уздовж ізоляційної покриття трансформатора струму серії НОГ-362

Якщо за визначальний параметр обрати напруженість поля $E_{р.п.}$, то її розподіл уздовж поверхні ізоляційної покриття можливо визначити за наступними методиками, що у загальному випадку викладено в [3, 8, 9, 14]. З урахуванням конкретних особливостей газонаповнених апаратів це можливо зробити наступним чином. На класи номінальної напруги 330 кВ та вище ІК працює в умовах різко неоднорідного поля, що приводить до суттєво нерівномірного розподілу напруженості уздовж поверхні ізоляційної покриття. При цьому, максимальне значення напруженості має місце біля електроду з високим потенціалом. Як один із засобів для найбільш ефективного вирівнювання розподілу напруженості використовують зовнішні екрани. У випадку, коли конструкція апарату має осьову симетрію, як це має місце у конструкціях вимірювальних трансформаторів, екрани мають кільцеву форму (тороїдальні екрани). Наприклад, у конструкції ТОГ-362 функції екрану виконує нижній фланець бака трансформатора (див. рис. 1), у конструкції НОГ – це тороїдальний екран, що розташований біля верхнього електроду вводу високої напруги (див. рис. 2).

Для визначення картини розподілу напруженості поля уздовж ізоляційної покриття будується графічно-розрахункова модель, яку показано на рис. 3 [3].

Причому, верхній електрод (фланцеве з'єднання або бак трансформатора) апроксимується еквівалентною кулею радіусом R_1 .

Значення напруженості поля у будь-якій точці поверхні покриття що відраховується від поверхні еквівалентної кулі в напрямку заземленого фланцю, визначається за умовою:

$$E_{zi} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 z^2} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{z - (H_2 - H_1)}{\left[(z - H_2 + H_1)^2 + R_0^2 \right]^{3/2}} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{R_1}{\sqrt{(H_2 - H_1)^2 + R_0^2}} \left\{ \frac{1}{z^2} \cdot \frac{z - A}{\left[(z - A)^2 + B^2 \right]^{3/2}} \right\} \quad (2)$$

Заряди на екрані q_1 та еквівалентній кулі q_2 , що апроксимує верхній електрод, які входять як початкові параметри в рівняння (2), можливо визначити на основі рішення системи потенціальних рівнянь [3, 11]:

$$U = \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2,$$

$$U = \alpha_{12} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2,$$

$$q_1 = \frac{U_{w.p.}}{\alpha_{11}\sqrt{3}} \cdot \frac{1 - \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{22}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{12} \cdot \alpha_{11}}} \quad (3)$$

$$q_2 = \frac{U_{w.p.}}{\alpha_{22}\sqrt{3}} \cdot \frac{1 - \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22}}} \quad (4)$$

Власні та взаємні коефіцієнти α_i для вище позначених рівнянь можуть бути визначені за наступними формулами. Власний коефіцієнт для еквівалентної сфери радіусом R_1 при висоті центру еквівалентної кулі над землею H_2 визначається за умовою:

$$\alpha_{11} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R_0} \left(1 - \frac{R_1}{2H_2} \right) \quad (5)$$

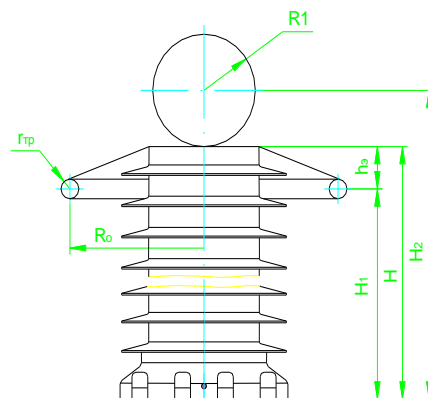


Рис. 3. Графічна розрахункова модель для розрахунку розподілу напруженості уздовж ізоляційної покриття вимірювальних трансформаторів

Для тороїдального екрану, який має радіус труби $r_{тр}$ і радіус осової лінії R_0 при висоті центру симетрії над землею H_1 , власний коефіцієнт визначається за умови:

$$\alpha_{22} = \frac{1}{4\pi^2\epsilon_0 R_0} \left(1 + \frac{r_{тр}}{2R_0} \right) \left[\ln \frac{9R_0}{r_{тр}} \left(1 + \frac{r_{тр}}{2R_0} \right) - \frac{\pi \cdot R_0}{2H_1} \right] \quad (6)$$

Визначається взаємний коефіцієнт для сфери (апроксимуюча куля) та тороїда (екран) за умови:

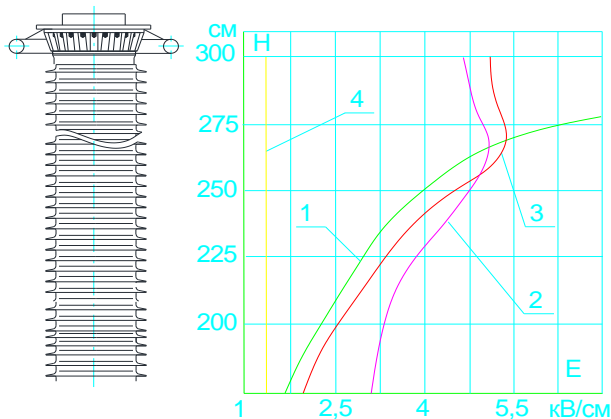
$$\alpha_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\sqrt{(H_2 - H_1)^2 + R_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{(H_2 + H_1)^2 + R_0^2}} \right) \quad (7)$$

Коефіцієнти А та В, які враховують комплексний вплив другого екрану полюса (при наявності), екранів інших фаз, шинування та відображення всієї системи електродів від землі, визначаються наступним чином:

$$A = \frac{R_1^2(H_2 - H_1)}{(H_2 - H_1)^2 + R_0^2},$$

$$B = \frac{R_0 R_1^2}{(H_2 - H_1)^2 + R_0^2}.$$

Як приклад, результати розрахунку розподілу напруженості поля вздовж ізоляційної покривки вимірювального трансформатора на основі раніше наведеної методики показані на рис. 4. З наведених даних можна щодо розподілу електричного навантаження (див. рис. 2 та рис. 4) максимальне навантаження має верхню частину ізоляційної покривки в межах (0 – 0,75) м відстані від верхнього фланцю з високим потенціалом. Шляхом змінювання параметрів системи екранування можливо досягнути зменшення кидків напруженості поля і, відповідно, коефіцієнтів електричного навантаження на ізоляцію, причому як зовнішню, так і внутрішню.



1 – без тороїдального екрану; 2, 3 – відповідно з максимальними та мінімальними розмірами тороїдального екрану; 4 – теоретичний рівномірний

Рис. 4. Розподіл напруженості поля уздовж поверхні ізоляційної покривки

В умовах зрівняльного аналізу у спрощеному варіанті електричне навантаження можливо визначити за допомогою критичної напруженості поля за наступною методикою. Визначається критична напруга корони U_k на одиночному кільцевому екрані, який встановлено на опорній ізоляційній покривці трансформатора за умовою [3, 6]:

$$U_k = \frac{E_k r_{TP}}{A_2 \left(1 - \frac{A}{N}\right) + \frac{r_{TP}}{\ln \frac{8R_0}{r_{TP}} - 1} + \frac{r_{TP}}{N \cdot R_0}},$$

де E_k – критична напруженість корони, кВ, яка визна-

чається за умовою:

$$E_k = 16,5 \cdot K_{ш} \cdot \gamma \left(1 + \frac{0,62}{\gamma^{0,3} \cdot r_{TP}} \right), \quad (8)$$

де $K_{ш}$ – коефіцієнт шорсткості поверхні екрану, з урахуванням кліматичних умов експлуатації та агресивного впливу оточуючого середовища обирається у межах (0,75 – 0,8);

γ – відносна густина оточуючого повітря;

r_{TP} – радіус труби екрану, см.

A, A_2, N – емпіричні коефіцієнти, які враховують вплив конструктивних чинників, наприклад другого екрану, сусідніх полюсів тощо, і визначаються за умовами:

$$A = \ln \frac{2H}{R_0} - \ln \left[0,5 + 0,5 \sqrt{1 + \left(\frac{2H}{H_{II}} \right)^2} \right],$$

$$A_2 = 1 + \frac{r_{TP}}{R_0} \ln \frac{8R_0}{r_{TP}},$$

$$N = \ln \frac{2H}{R_e},$$

$$R_e = \sqrt[m]{m \cdot q \cdot v^{m-1}},$$

де H – висота ізоляційної покривки, см;

H_{II} – відстань між сусідніми полюсами, см;

R_0 – радіус тороїдального екрану, см;

m – кількість дротів ошиновки (при використанні розчіпленого проводу);

q – радіус одного дроту, см;

v – радіус кола розташування дротів в елементі їх сумісного кріплення.

Отримані після розрахунку значення параметрів електричного навантаження ізоляційної покривки в подальшому будуть початковими даними для визначення коефіцієнтів навантаження для її окремих частин.

Для обраного в якості теоретичного нормального закону розподілу для подальших досліджень в якості основних характеристик надійності обираються густина розподілу відмов $f(U, E)$ та ймовірність безвідмовної роботи $P(U, E)$. Значення цих характеристик для нормального закону розподілу можливо оцінити за такими умовами [1, 2]:

$$f_H(U) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} \exp \left[-0,5 \left(\frac{U - m_U}{2\sigma_U} \right)^2 \right], \quad (9)$$

$$P_H(U) = 0,5 - \Phi \left(\frac{U - m_U}{\sigma_U} \right), \quad (10)$$

де m_U, σ_U – параметри нормального закону розподілу;

Φ – нормована функція Лапласа.

Параметри нормального закону розподілу можливо визначити за умовою (1) наступним чином:

$$\sigma_{U_H} = K_B \cdot U_{пер.д}; \quad m_{U_H} = 1,1 \cdot U_{пер.д} \quad (11)$$

де $U_{пер.д}$ – напруга перекриття ізоляційної покривки під дощем, кВ [6, 13].

Задля перевірки адекватності наведених вище методик було проведено розрахунки головних показників надійності для опорно-ізоляційної покривки трансформатора струму серії ТОГ-362 при початкових

даних, що були отримані на основі досліджень, наведених в [7]. Результати показані в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри нормального закону розподілу для опорно-ізоляційної покриття вимірювального трансформатора

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$U_{\text{пер}}, \text{кВ}$	K_B	σ_{U_n}
330	398	0,06	24

На основі отриманих значень параметрів нормального закону розподілу можуть бути визначені функція густини розподілу $f(U, E)$, ймовірність безвідмовної роботи $P(U, E)$ та інші показники надійності. В якості прикладу на рис. 5 та рис. 6 приведено характерні залежності $P(U)$ та $P(t)$ для ізоляційної покриття трансформатора струму серії ТОГ-362.

На рис. 5 було використані наступні позначення: 1, 2 – функції надійності відповідно для нормального та усіченого нормального законів розподілу; а також 3, 4 – функції розподілу ймовірності безвідмовної роботи для коефіцієнтів варіації 0,04 та 0,06 відповідно.

На рис. 6 показано залежність функції надійності в залежності від виду розрахункових параметрів та системи екранування. При цьому використані наступні позначення: 1, 2 – функції надійності, що розраховані з використанням критичних напруги та напруженості поля, відповідно; 3, 4 – функції надійності при використанні оптимальної та мінімальної систем екранування, відповідно.

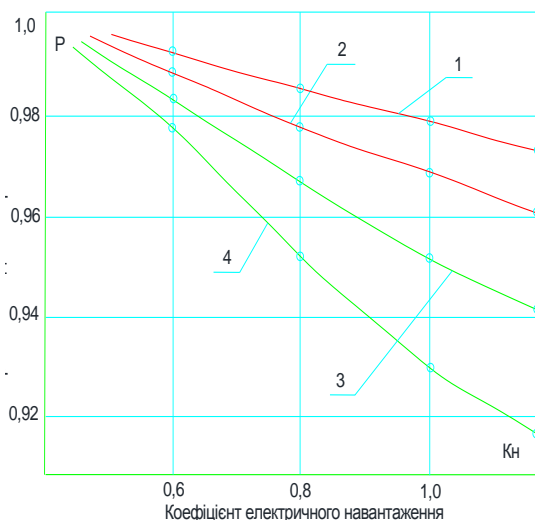


Рис. 5. Функції ймовірності безвідмовної роботи в залежності від електричного навантаження

Висновки. Аналіз отриманих графічних залежностей (див. рис. 2 та рис. 4) дозволяє зробити наступні висновки. Максимальне електричне навантаження на ізоляційну покриття припадає на проміжку від 0 м до 0,7 м від верхнього фланцю з високим потенціалом. А отже, як показують розрахунки, ця відстань збільшується несуттєво при зростанні номінальної напруги. В такому випадку експлуатаційна надійність покриття буде визначатися переважно параметрами навантаження на цій верхній ділянці ізоляційної конструкції. Покращити умови роботи трансформаторів при тих чи інших ізоляційних конструкціях в зоні максимального електричного навантаження можливо за рахунок

вдосконалення систем екранування, ефективність яких, в свою чергу, можливо визначити за допомогою використання вище наведеної методики на етапі їх конструювання. Крім того, застосування цієї методики дає можливість враховувати вплив окремих чинників, які характеризують особливості конструкції, а також умови експлуатації ІК.

Функції ймовірності безвідмовної роботи, що отримані розрахунком за різними методиками, що показані в роботі, мають приблизно однакові результати і можуть бути рекомендовані для використання для порівняльних розрахунків.

Розроблена та запропонована методика дозволяє здійснити визначення показників експлуатаційної надійності елементів ізоляційної конструкції високовольтного обладнання схожого конструктивного виконання, наприклад розрядників, обмежувачів перенапруг, опорних ізоляційних конструкцій тощо. Для уточнення отриманих результатів необхідно використати додаткову інформацію, що враховує параметри теоретичного закону розподілу, або їх комбінації, вплив рівню забруднення поверхні покриття, інтенсивність випадання дощів та ін.

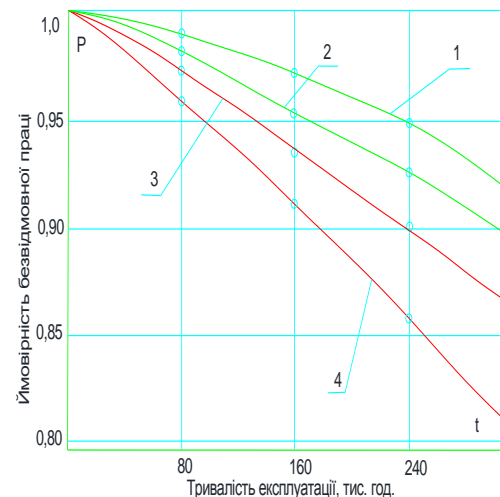


Рис. 6. Функція надійності зовнішньої ізоляції

Для забезпечення максимальної достовірності розрахункових даних необхідно порівняти отримані результати з даними експериментальних досліджень або статистичної інформації, що формуються на основі моніторингу роботи конкретних ізоляційних конструкцій в реальних умовах експлуатації.

Список літератури

1. Дружинин Г.В. *Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах* / ред. Г.В. Дружинина. Москва: Энергия, 1976. 448 с.
2. Гук Ю.Б. *Теория надежности в электроэнергетике*. Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. 208 с.
3. Александров Г. Н., Иванов В. Л. *Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения*. Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. 208 с.
4. Мархелев С.Д., Соломоник Е.А. *Выбор и эксплуатация изоляции в районах с загрязненной атмосферой*. Энергоатомиздат, 1983. 120 с.
5. Мархелев С.Д., Соломоник Е.А. *Изоляция линий и подстанций в районах с загрязненной атмосферой*. Ленинград: Энергия, 1873. 248 с.
6. Ушаков В.Я. *Изоляция установок высокого напряжения*.

- Москва: Энергоатомиздат, 1994. 496 с.
7. Жорняк Л.Б., Афанасьев О. И., Поляков В. О. та ін. Особливості обрання теоретичного закону розподілу при оцінці надійності зовнішньої ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* Харків: НТУ "ХПІ", 2020. № 1. С. 10–14.
 8. Жорняк Л.Б., Афанасьев А.И., Леонов Р.С., Карпук А.В. Возможности компенсации напряженности электрического поля внешней изоляции высоковольтных газонаполненных трансформаторов тока. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.* Харків: НТУ "ХПІ", 2017. № 34 (1256). С. 14–18.
 9. Жорняк Л.Б., Афанасьев О.И., Щусь В.М. Особенности регулирования напряженности электрического поля вдоль внешней изоляции газонаполненных трансформаторов напруги. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.* Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 2. С. 13–17.
 10. КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zva.zp.ua>.
 11. Александров Г. Н., Борисов В. В., Каплан Г.С. и др. Проектирование электрических аппаратов: учебник для вузов. / ред. Г. Н. Александрова. Ленинград: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. 448 с.
 12. Дмитриевский В. С. *Расчет и конструирование электрической изоляции.* Москва: Энергоиздат, 1981. 392 с.
 13. Александров Г. Н., Афанасьев А.И., Борисов В.В. *Электрические аппараты высокого напряжения* / ред. Г.Н. Александрова. 2-е изд., доп. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 2000. 503 с.
 14. Жорняк Л.Б., Волкова О. Г., Макогон М. А. К вопросу об улучшении качества внутренней изоляции высоковольтных измерительных трансформаторов. *Вісник Національного технічного університету ХПІ*, 2017, № 34(1256) С.19-25.

References (transliterated)

1. Druzhynin H.V. *Teoriya nadiynosti radioelektronnykh system v prykladakh i zadachakh* [Reliability theory of radio electronic systems in examples and problems]. Moscow, Enerhiya, 1976. 448 p.
2. Huk Yu.B. *Teoriya nadiynosti v elektroenerhetysi* [Reliability theory in the electric power industry]. Leningrad, Vyscha shkola, 1990. 208 p.
3. Aleksandrov H. N., Ivanov V. L. *Izolyatsiya elektrychnykh aparativ vysokoyi napruhy*. [Insulation of high voltage electrical apparatus]. - Leningrad, Vyscha shkola, 1984. 208 p.
4. Markhelev S.D., Solomonyk E.A. *Vybir i ekspluatatsiya izolyatsiyi v rayonakh iz zabrudnenoju atmosferoyu* [Selection and operation of insulation in areas with a polluted atmosphere]. Vyscha shkola, 1983. 120 p.
5. Markhelev S.D., Solomonyk E.A. *Izolyatsiya liniy i pidstantsiy v rayonakh iz zabrudnenoju atmosferoyu* [Insulation of lines and substations in areas with a polluted atmosphere]. Leningrad, Enerhiya, 1873. 248 p.
6. Ushakov V.Ya. *Izolyatsiya ustanovok vysokoyi napruhy* [Insulation of high voltage installations]. Moscow, Vyscha shkola, 1994. 496 p.
7. Zhornyak L.B., Afanas'yev A. I., Polyakov V. A., Kulik Z.O., Kot R.V., Kravets I.O. Osoblivosti izbraniya teoreticheskogo zakona raspredeleniya pri otsenke nadezhnosti vneshney izolyatsii gazonapolnennykh izmeritel'nykh transformatorov [Peculiarity of theoretical distrbution law selection by gas-insulated transformers external isolation calculation] *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KHPI". Seriya: Problemy sovershenstvovaniya elektricheskikh mashin i apparatov. Teoriya i praktika* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ., 2020, no 1, pp. 10-14.
8. Zhornyak L.B., Afanas'yev A.I., Leonov R.S., Karpuk A.V. Mozhlyvosti kompensatsiyi napruzenosti elektrychnoho polya zovnishn'oyi izolyatsiyi vysokovol'tnykh hazonapovnenykh transformatoriv strumu [The possibilities of compensating the electric field strength of external insulation of high-voltage gas-filled current transformers]. *Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn y aparativ* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ., 2017, no 34 (1256). pp. 14-18.
9. Zhornyak L.B., Afanas'yev A.I., Shchus' V.M. Osobnosti regulirovaniya napryazhenosti elektricheskogo polya vdol' vneshney izolyatsii gazonapolnennykh transformatorov napryazheniya [Features of regulation of electric field along external isolation of high-voltage gas-insulated voltage transformers]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KHPI". Seriya: Problemy sovershenstvovaniya elektricheskikh mashin i apparatov. Teoriya i praktika* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ., 2019, no 2, pp. 13-17.
10. КО «Запорізький завод високовольтної апаратури» [Elektronnyy resurs] - Rezhym dostupu: <http://www.zva.zp.ua>.
11. Aleksandrov H. M., Borysov V. V., Kaplan H.S. i in. *Proektuvannya elektrychnykh aparativ* [Electrical Apparatus Design]. Leningrad, Vyscha shkola, Lenynhr. otd-nya, 1985. 448 p.
12. Dmytrivs'ka V. S. *Rozrakhunok ta konstruyuvannya elektrychnoyi izolyatsiyi* [Calculation and design of electrical insulation]. Moscow, Enerhoizdat, 1981. 392 p.
13. Aleksandrov H. N., Afanas'yev A.I., Borysov V.V. *Elektrychni aparaty vysokoyi napruhy* [High voltage electrical apparatus], 2 ed, St. Petersburg, SPbHTU Publ., 2000. 503 p.
14. Zhornyak L.B., Volkova O. H., Makohon M. A. *Do pytamnya pro polipshennya yakosti vnutrishn'oyi izolyatsiyi vysokovol'tnykh vymiryval'nykh transformatoriv* [To the question of improving the quality of internal insulation of high-voltage measurement transformers]. *Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn y aparativ* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice]. Kharkiv, NTU "KHPI" Publ., 2017, no 34 (1256). pp.19-25.

Надійшла (received) 09.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жорняк Людмила Борисівна (Жорняк Людмила Борисовна, 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 (Афанасьєв Алексей Иванович, Afanasiev Alexej Ivanovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних та електронних апаратів; м.Запоріжжя, Україна, e-mail: lxafanasiev@gmail.com

Щусь Віталій Миколайович (Щусь Виталий Николаевич, Schus Vitaliy Miolaievich) – головний конструктор ТОВ «ЕЛІЗ» Запорізький трансформаторний завод, м. Запоріжжя, Україна; e-mail: cliz.zp.ua

Морозов Олексій Юрьєвич (Морозов Алексей Юрьевич, Morozov Olexij Jurijovich) – студент кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; e-mail: aneon100@gmail.com

Руденко Олія Володимирівна (Руденко Юлия Владимировна, Rudenko Julia Volodimirivna) – студентка кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; e-mail: zodapani@gmail.com