

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

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВНУТРІШНЬОГО ЕКРАНУВАННЯ В ГАЗОНАПОВНЕНИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ ІЗ ПОЛІМЕРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

В статті авторами запропонована методика оцінки параметрів електричного навантаження для розрахунку розподілу напруженості електричного поля твердої ізоляційної конструкції газонаповнених високовольтних апаратів, що мають осьову симетрію. Така конструкція являє собою опорну та ізолюючу покришку, заповнену електричним газом 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. Запропонована методика дозволяє здійснити оцінку ефективності впливу конструктивних чинників системи екранування газонаповненого високовольтного обладнання (вимірювальні трансформатори, розрядники, обмежувачі перенапруг та ін.) при проектуванні та удосконаленні окремих конструктивних рішень. Результати розрахунків добре збігаються з даними експериментальних досліджень та статистичною інформацією, 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 та обмежувачам перенапруг. У запропонованій методиці в якості прикладу розглядається опорна ізоляційна покришка, що знаходиться під час експлуатації в найбільш несприятливих умовах, таких як зовнішнє забруднення, зволоження та їх комбінації, перенапруги різного походження та ін. Теоретичні висновки підтверджуються результатами розрахунків на прикладі найбільш масової конструкції газонаповненого трансформатора струму серії ТОГ-245. Більш точне визначення ефективності запропонованої методики прогнозування параметрів розподілу напруженості поля під впливом системи екранування 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 параметрів зовнішньої ізоляції як газонаповнених вимірювальних трансформаторів, так і аналогічного високовольтного обладнання розподільних пристроїв та трансформаторних підстанцій.

Ключові слова: газонаповнений трансформатор струму, напруженість поля, ізоляційна покришка, напруга перекриття, тороїдальний екран, радіуси труби екрану та екрану.

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

OPTIMIZATION OF THE INTERNAL SHIELDING SYSTEM IN GAS FILLED HIGH VOLTAGE ELECTRIC APPLIANCES WITH POLYMER INSULATION

In the article, the authors propose a technique for estimating the parameters of the electrical load for calculating the distribution of the electric field strength of a solid insulating structure of gas-filled high-voltage apparatus that have axial symmetry. This design is a support and insulating cover filled with SF₆ gas as an internal insulating medium. This technique makes it possible to estimate the parameters of the electrical load (voltage and field strength) depending on the design features of the device and the shielding system that is used to equalize the electric field. The proposed method makes it possible to evaluate the effectiveness of the influence of the design parameters of the shielding system for gas-filled high-voltage equipment (instrument transformers, arresters, surge suppressors, etc.) when designing and improving individual design solutions. The calculation results are in good agreement with the data of experimental studies and statistical information obtained as a result of monitoring the operation of insulating structures, taking into account real operating conditions and the impact of external factors. The implementation of this technique makes it possible to take into account the influence of external factors and operational characteristics inherent in instrument transformers and surge arresters. In the proposed method, as an example, a supporting insulating cover is considered, which is during operation in the most unfavorable conditions, such as external pollution, moisture and their combination, overvoltage of various origins, etc. Theoretical conclusions are confirmed by the results of calculations on the example of the most mass-produced design of a gas-filled current transformer TOG-245 series. A more accurate determination of the effectiveness of the proposed method for predicting the parameters of the distribution of the field strength under the action of the shielding system can be achieved by carrying out an additional series of calculations and experimental tests of specific insulating structures. Thus, it was concluded that the obtained results can be used to assess the external insulation performance of both gas-filled instrument transformers and similar high-voltage switchgear equipment and transformer substations.

Keywords: gas-filled current transformer, field strength, insulating cover, overlap voltage, screen and screen tube radius.

Вступ. В умовах промислової експлуатації газонаповнених електричних апаратів високої напруги найважливішими властивостями, що забезпечують високу ефективність їх використання, є роботоспроможність, довговічність та експлуатаційна надійність їх ізоляційної конструкції. Конструктивні особливості таких апаратів, наприклад вимірювальних трансформаторів струму та напруги, обмежувачів перенапруг тощо, сприяють утворенню різко неоднорідного електричного поля. Спотворення електричного поля, в свою чергу, призводить до нерівномірного розподілу електричного навантаження на ізоляційну конструкцію [1, 2], яку згідно з впливом чинників оточуючого середовища прийнято розподіляти на внутрішню та зовнішню. Головним елементом зовнішньої ізоляції є опорна ізоляційна покришка, в середині якої розміщуються елементи активної частини того чи іншого електричного апарату. Наприклад, у трансформаторах струму це є заземлені виводи вторинних обмоток, у

трансформаторів напруги – це виводи первинної обмотки, у каскадних трансформаторів напруги – це активна частина трансформатору. Загальний вигляд опорно-ізоляційної покришки показано на рис. 1.

Відомо, що в процесі експлуатації газонаповненого апарату швидкість старіння зовнішньої ізоляції додатково підсилюється через складну та неоднорідну структуру самої ізоляційної покришки. Її основою є склоепоксидний циліндр (це забезпечує механічну стійкість конструкції), на якому розміщуються ребра з кремнійорганічної гуми, що в свою чергу забезпечує електричну міцність зовнішньої ізоляції. Зазвичай для розрахунків зовнішньої ізоляції в якості параметрів електричного навантаження використовують такі, як пробивна або розрядна напруга, робоча напруженість поля, інтенсивність та потужність часткових розрядів, напруга виникнення коронних розрядів тощо [1, 3, 6, 8].

© Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, В.М. Щусь, 2022



Рис. 1. Вид загальний опорно-ізоляційної покришки з використанням силіконового спірального оребріння

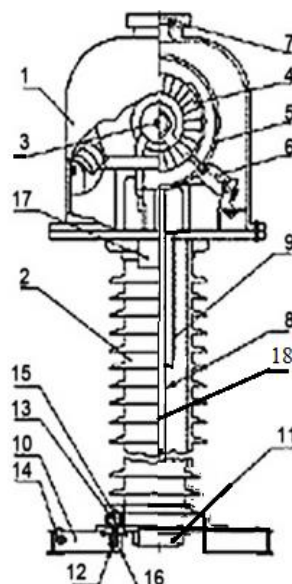
Експлуатаційна надійність зовнішньої ізоляції визначається переважно електричним навантаженням, яке характеризується місцевими значеннями напруженості поля. Напруженість поля вздовж ізоляційної покришки (див. рис. 1) розподіляється дуже нерівномірно і має максимальне значення біля електроду з високою напругою [1, 3]. Оскільки ізоляційна покришка має осьову симетрію, то для вирівнювання розподілу напруженості, тобто зниження її у верхній частині ізоляційної покришки, на класи номінальної напруги більші за 110 кВ застосовуються вбудовані екрани. Їх використання дає можливість мінімізувати масо-габаритні розміри системи екранування [1, 7, 8].

Мета роботи. Метою цієї роботи – це довести можливість зниження матеріалоемності кольорових металів високовольтних вимірювальних трансформаторів за рахунок оптимізації та удосконалення конструкції системи екранування на прикладі газонаповненого трансформатора струму серії ТОГ-245, структуру якого показано на рис. 2.

В конструкції трансформатора струму, що розглядається для вирівнювання розподілу напруженості використовується вбудований просторовий екран циліндричної форми (див. рис 2) [5, 11]. Він виконаний з алюмінієвого сплаву марки АД1 та розміщений у верхній частині ізоляційної покришки. Заміна зазначеної конструкції екрану на тороїдальний одиночний (рис. 3, а) або подвійний тороїдальний екран (рис. 3, б) з аналогічного матеріалу та зовнішніми габаритами згідно аналогу на нашу думку дозволяє значно зменшити матеріалоемність екрану. При цьому повинно бути забезпечено приблизно такий же рівень напруженості поля в місці його встановлення.

Для дослідження ефективності такого технічного рішення просторовий циліндричний екран можливо уявити як систему тороїдальних екранів, що розміщені у вертикальній площині, як це показано на рис. 3, в.

Результати досліджень, що наведені у [1, 7], доводять, що при конструкції трансформатора з потрійним тороїдальним екраном з однакових співосних тороїдів середній, який екранований з обох сторін, використовується неефективно, тобто напруженість поля на його поверхні є значно меншою, ніж на інших крайніх тороїдах.



1 – корпус; 2 – покришка; 3 – первинна обмотка; 4 – вторинна обмотка; 5 – підставка; 6 – ізолятори; 7 – мембрана; 8 – вторинні обмотки; 9 – екран; 10 – підстава; 11 – коробка виводів вторинних обмоток; 12 – вентиль; 13 – манометр; 14 – вивід для заземлення; 15 – кожух на манометр; 16 – кожух на вентиль; 17 – кожух на первинні виводи; 18 – труба підставки активної частини, що виконує роль «нульової» обкладки

Рис. 2. Вид загальний та конструктивна схема елегазового трансформатора струму серії ТОГ-245

З урахуванням того факту, що головною метою запропонованого технічного рішення є зниження матеріалоемності системи екранування, то в подальшому розглянемо два її конструктивних варіанти – рис. 3, а та рис. 3, б.

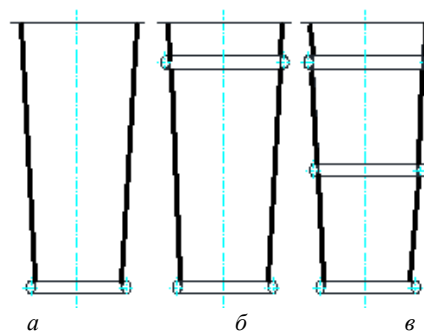
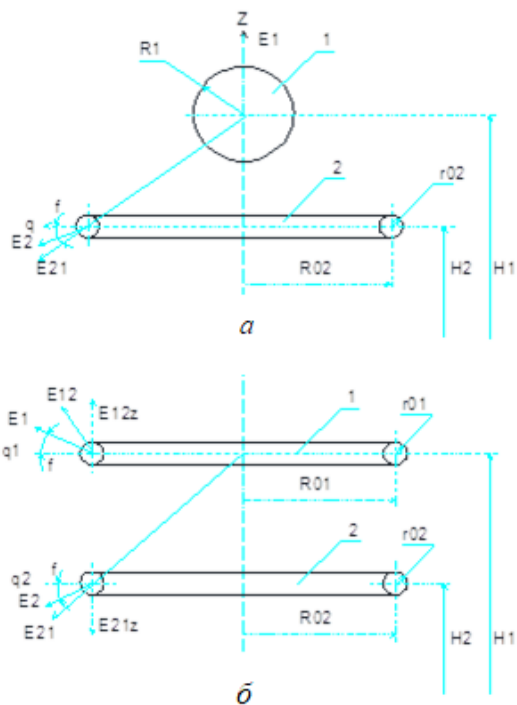


Рис. 3. Варіанти виконання та структура просторового тороїдального екрану

Оптимальні розміри тороїдів та їх співвідношення можливо визначити за умови порівняння максимальної напруженості електричного поля, що утворюється на поверхні всіх тороїдальних екранів. Розрахунок такої системи екранування виконується на основі рішення системи потенціальних рівнянь, що визначають заряди на тороїдах та подальшого підсумовування напруженості полів, що утворюються від власного заряду тороїдів та від суміжних тороїдів [1, 8]. Для визначення ефективності системи екранування проаналізуємо три варіанти раніше зазначених системи екранування: одиночний екран (див. рис. 3, а), подвійний та потрійний тороїдальний екрани (див. рис. 3, б та рис. 3, в відповідно).

В якості першого наближення розглянемо систему екранування, що складається з одного кільцевого екрану, що розміщено у нижній частині, що віддалена від електроду з високою напругою. Тороїд виготовлено з алюмінієвої труби діаметром 16 мм і товщиною стінки 2 мм з аналогічного матеріалу та зовнішніми габаритами згідно аналогу (див. рис. 3, а).

Як що за визначальний параметр обрати напруженість поля $E_{p.n.}$, то її розподіл уздовж поверхні ізоляційної покритишки можливо визначити за методиками, що викладено в [1, 3, 4] наступним чином. На першому етапі будується графічно-розрахункова модель, яку показано на рис. 4. Причому, верхній електрод (бак трансформатора) апроксимується еквівалентною кулею радіусом $R1$.



а – одиночний кільцевий екран; б – система екранів
Рис. 4. Графічна розрахункова модель для визначення розподілу напруженості вздовж ізоляційної покритишки для різних систем екранування

Величина напруженості поля у будь-якій точці поверхні покритишки, що відраховується від поверхні еквівалентної кулі в напрямку заземленого фланцю, визначається за умови:

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

Електричні заряди на кулі, яка апроксимує верхній електрод, q_1 та тороїди q_2 , які входять як початкові параметри в рівняння (1), можливо визначити на основі рішення системи потенціальних рівнянь [3, 11]:

$$\begin{aligned} U &= \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2, \\ U &= \alpha_{12} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2, \\ q_1 &= \frac{U_{н.р}}{\alpha_{11}\sqrt{3}} \cdot \frac{1 - \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{22}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{11}\alpha_{22}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

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

Власні та взаємні коефіцієнти α_{ii} для вище позначених рівнянь можуть бути визначені за наступними формулами. Власний коефіцієнт для сфери радіусом $R1$ при висоті центру над землею $H2$ визначається за умовою:

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

Для тороїдального екрану, який має радіус труби $r_{тп}$ та радіус осевої лінії $R0$, при висоті центру симетрії над землею $H1$ власний коефіцієнт визначається за умови:

$$\alpha_{22} = \frac{1}{4\pi^2\epsilon_0 R_0 (1 + \frac{r_{тп}}{2R_0})} \left[\ln \frac{8R_0}{r_{тп}} \left(1 + \frac{r_{тп}}{2R_0} \right) - \frac{\pi \cdot R_0}{2H_1} \right]. \quad (5)$$

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

$$\alpha_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\sqrt{(H_2-H_1)^2+R_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{(H_2+H_1)^2+R_0^2}} \right). \quad (6)$$

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:

$$\begin{aligned} A &= \frac{R_1^2(H_2-H_1)}{(H_2-H_1)^2+R_0^2}, \\ B &= \frac{R_0 \cdot R_1^2}{(H_2-H_1)^2+R_0^2}. \end{aligned}$$

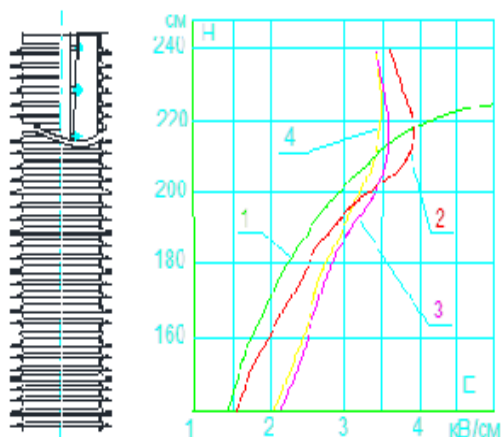
Як приклад, результати розрахунку розподілу напруженості поля вздовж ізоляційної покритишки на основі вище приведеної методики показано на рис 5. Для забезпечення більш глибокого обмеження напруженості поля можливо використовувати комбіновані (розщеплені) тороїдальні екрани, які мають однаковий потенціал та розташовані на різних рівнях відносно високовольтного електроду (див. рис. 3, б). В конструкції системи екранування, що розглядається, використано два тороїда з однаковим радіусом, тобто $R01 = R02$, один з яких розташовано на рівні високовольтного електроду, а другий – на відстані $(R01 + R02)/\sqrt{2}$. Тоді розподіл напруженості поля та початкову напругу корони на кожному з тороїдів може бути знайдено на основі наступної методики [1]. Величина зарядів на верхньому q_1 та нижньому q_2 тороїдах визначається за формулами (2) та (3). Взаємний потенціальний коефіцієнт для двох тороїдів, які мають загальну до землі вісь визначається за умовою:

$$\alpha_{12} = \frac{1}{2\pi^2\epsilon_0} \left(\frac{K\left(\sqrt{\frac{4R_01R_02}{(H_2-H_1)^2+(R_01+R_02)^2}}\right)}{\sqrt{(H_2-H_1)^2+(R_01+R_02)^2}} - \frac{K\left(\sqrt{\frac{4R_01R_02}{(H_2+H_1)^2+(R_01+R_02)^2}}\right)}{\sqrt{(H_2+H_1)^2+(R_01+R_02)^2}} \right) \quad (7)$$

де $H1, H2$ – відповідно відстань від землі до верхнього та нижнього екранів (див. рис. 4);

$K(x)$ – повний еліптичний інтеграл першого роду [1].

Розподіл напруженості поля в умовах використання двох еквіпотенційних тороїдальних екранів, що отримано на основі використання вище означеної методики, показано на рис. 5.



1 – без тороїдального екрану; 2, 3, 4 – відповідно з одинарним, подвійним та потрійним тороїдальними екранами.

Рис. 5. Графіки розподілу напруженості поля вздовж поверхні ізоляційної покришки

Аналіз отриманих залежностей показує, що використання подвійного та потрійного розщеплених екранів забезпечує практично однакову картину розподілу напруженості поля вздовж ізоляційної покришки. Таким чином, найбільш оптимальним рішенням є система екранування з двома тороїдальними екранами. Подальше вирівнювання розподілу напруженості поля можливо отримати за рахунок зміння геометричних розмірів тороїдів та місцем їх розташування відносно верхнього електроду.

Радіуси тороїдів змінити в більшу сторону не можливо, оскільки вони визначаються конструкцією покришки (внутрішній діаметр) та ізоляційними проміжками внутрішньої ізоляції. Впливати на напруженість з метою її зниження можливо наступними шляхами: по-перше, це зміння радіусу труби тороїдів; по-друге, це висотою розміщення тороїдів відносно електроду з високою напругою та між собою. Результати оцінки впливу висоти встановлення тороїдів, що отримані на основі вище приведеної методики показано на рис 6, де прийняті наступні позначення: крива 1 – це розподіл напруженості без системи екранування; крива 2 – це розподіл напруженості з тороїдом, розташованим безпосередньо біля електроду з високою напругою; крива 3 – з тороїдом, розташованим нижче електроду з високою напругою; крива 4 – з системою екранування з двома тороїдами; крива 5 – теоретичний рівномірний розподіл напруженості поля.

Як видно з рис. 6 оптимальна структура системи екранування складається з двох тороїдів, які розміщені на одній вісі за умови, що відстань від верхнього електроду до першого тороїда має довжину 25 мм, а до другого тороїда – 65 мм.

Подальшого зниження напруженості можливо досягнути за рахунок збільшення радіусу труби, з якої виготовлені тороїди. Результати розрахунків за вище приведеною методикою для різних значень радіусів труби екранів показано на рис. 7. Як показують результати розрахунків, підвищення радіусу труби тороїдів дає суттєвий ефект в межах до 20 мм. При подальшому зростанні радіусу ефект вирівнювання знижується, але при цьому підвищується матеріалоемність конструкції системи екранування.

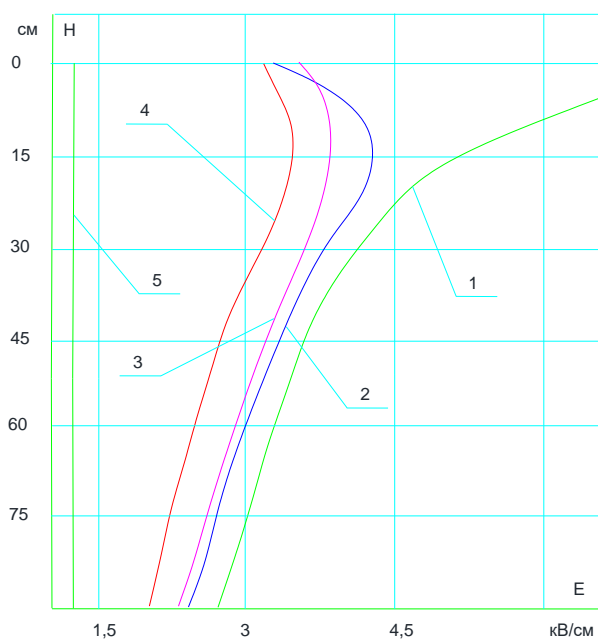


Рис. 6. Графіки розподілу напруженості поля в залежності від висоти розміщення тороїдів відносно електроду з високою напругою

Підвищення радіусу труби екрану дає можливість суттєво знизити напруженість за умови дії імпульсних перенапруг.

Висновки. Аналіз отриманих графічних залежностей (див. рис. 2 та рис. 4) дозволяє зробити наступні висновки. Найбільше електричне навантаження на ізоляційну покришку має місце на проміжку від 0 мм до 650 мм на відстані від верхнього електроду з високим потенціалом. Попередні розрахунки показують, що ця відстань зростає несуттєво при підвищенні номінальної напруги, що діє на ізоляційну конструкцію.

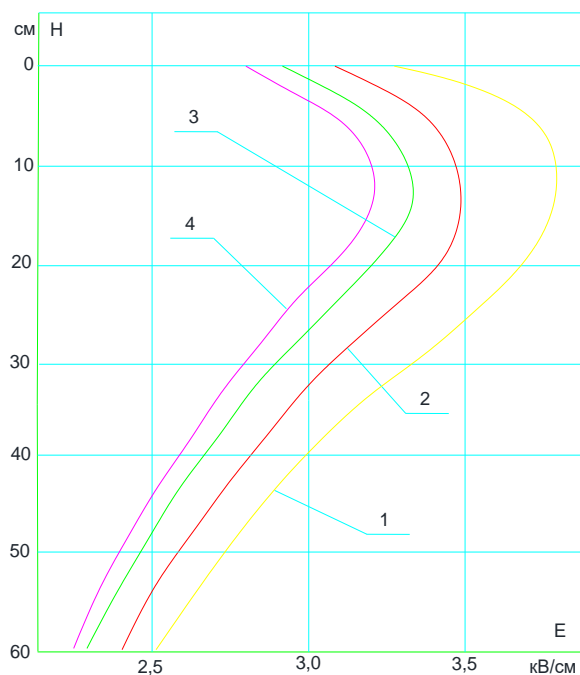


Рис. 7. Результати впливу радіусу труби тороїдів на розподіл напруженості поля

Запропонована методика дозволяє проводити оцінку розподілу параметрів електричного навантаження на ізоляційну конструкцію при використанні систем екранування як внутрішнього, так і зовнішнього встановлення.

При доповненні результатів електричних розрахунків економічними характеристиками можливо з високою мірою достовірності обрати найбільш оптимальне конструктивне рішення системи екранування для електротехнічного обладнання схожого конструктивного виконання. 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. Подальше зменшення електричного навантаження в безпосередній близькості до електроду з високим потенціалом можливо досягнути шляхом вдосконалення системи струмовідводу [1], але це потребує проведення додаткових досліджень.

Список літератури:

1. Александров, Г. Н. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения: учебник для вузов [Текст] / Г.Н. Александров, В. Л. Иванов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. – 208 с.
2. Базуткин, В. В. Техника высоких напряжений вузов [Текст] / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 446 с.
3. Жорняк, Л.Б. 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. – ISSN 2079-3944.
4. Жорняк, Л.Б. Особливості обрання теоретичного закону розподілу при оцінці надійності зовнішньої ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів [Текст] / Л. Б. Жорняк, О. І. Афанасьєв, В. О. Поляков та ін. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ», 2020. – №1 '2020 – С. 10–14. – ISSN 2079-3944.
5. КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zva.zp.ua>.
6. Ушаков, В. Я. Изоляция установок высокого напряжения [Текст] В. Я. Ушаков. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
7. Александров, Г. Н. Проектирование электрических аппаратов: учебник для вузов [Текст] / Г.Н. Александров, В. В. Борисов, Г.С. Каплан и др.; под ред. Г. Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 448 с.
8. Дмитриевский, В. С. Расчет и конструирование электрической

изоляции: учеб. [Текст] / В. С. Дмитриевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.

9. Афанасьев, В. В. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения [Текст] / Под ред. В. В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 544 с.
10. Гук, Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике [Текст] / Ю.Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 208 с.
11. ТОВ «ЕЛІЗ» Запорізький трансформаторний завод [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ua.eliz.zp.ua>.
12. Ушаков, В. Я. Изоляция установок высокого напряжения [Текст] / В. Я. Ушаков. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.

References (transliterated):

1. Aleksandrov G. N., Ivanov V. L. *Izolyatsiya elektrychnykh apparatov vysokoho zv'yazku: navchal'nyy posibnyk dlya vuziv*. Leningrad: Enerhoatomizdat, Leninhr. vidd-nye, 1984. 208 p.
2. Bazutkin V. V., Lariyonov V. P., Pintal U. S. *Tekhnika vysokyykh napruh vuziv*. Moscow: Enerhoatomizdat, 1986. 446 p.
3. Zhornyak L.B., Afanas'yev O.I., Shchus V. M. Osoblyvosti rehulyuvannya napruhy elektrychnoho polya vzdovzh zovnishn'oyi izolyatsiyi hazonapovnenykh transformatoriv napruhy. *Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn y apparatov* [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.
4. Zhornyak L.B., Afanas'yev O. I., Polyakov V. O. ta in. Osoblyvosti vyboru teoretychnoho zakonu rozpodilu pry otsynsi nadiynosti zovnishn'oyi izolyatsiyi hazonapovnenykh vymiryuval'nykh transformatoriv. *Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn y apparatov* [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.
5. КО «Zaporiz'kyy zavod vysokovol'tnoyi tekhniky» [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: <http://www.zva.zp.ua>.
6. Ushakov V.Ya. *Izolyatsiya vysokovol'tnykh ustanovok*. Moscow: Enerhoatomizdat, 1994. 496 p.
7. Aleksandrov G. N., Borysov V. V., Kaplan H. S. ta in. *Proektuvannya elektrychnykh apparatov: navchal'nyy posibnyk dlya vuziv*. Leningrad: Enerhoatomizdat, Leninhr. vidd-nye, 1985. 448 p.
8. Dmytrevs'kyy V. S. *Rozrakhunok i proektuvannya elektrychnoyi izolyatsiyi*. Moscow: Enerhoizdat, 1981. 392 p.
9. Afanas'yev, V. V. *Dovidnyk z vysokovol'tnykh elektrychnykh prykladiv*. Leningrad: Enerhoatomizdat, Leninhr. vidd-nye, 1987. 544 p.
10. Zvuk Yu.B. *Teoriya nadiynosti v elektroenerhetytsi*. Leningrad: Enerhoatomizdat, Leninhr. vidd-nye, 1990. 208 p.
11. ТОВ «ЕЛІЗ» Запорізький трансформаторний завод [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu: <http://ua.eliz.zp.ua>.
12. Ushakov V.Ya. *Izolyatsiya vysokovol'tnykh ustanovok*. Moscow: Enerhoatomizdat, 1994. 496 p.

Надійшла (received) 21.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

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

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

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