

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

ДО ПИТАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕКРАНУВАННЯ В КОНСТРУКЦІЯХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

В роботі авторами запропонована методика оцінки параметрів електричного навантаження для розрахунку розподілу напруженості електричного поля вздовж опорної ізоляційної конструкції високовольтних електричних апаратів та опорних ізоляційних конструкцій, що мають осьову симетрію. Таки конструкції можуть бути у вигляді опорної ізолюючої покришки, заповнену електричним середовищем в якості внутрішнього ізолюючого середовища або стрижневу ізоляційну колону. Запропонована методика дозволяє оцінити параметри електричного навантаження (напругу та напруженість поля) з урахуванням конструктивних особливостей апарату та застосованої системи екранування для вирівнювання електричного поля. Запропонована методика дозволяє здійснити оцінку ефективності впливу конструктивних чинників системи екранування високовольтного обладнання (вимірювальні трансформатори, обмежувачі перенапруги, опорні ізоляційні колони та ін.) на величину електричного навантаження ізоляції. Реалізація цієї методики дозволяє оцінити вплив конструктивних особливостей системи екранування з урахуванням зовнішніх та експлуатаційних факторів. 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 опорно-ізоляційної покришки обмежувача перенапруги серії ОПН-500. 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 обмежувачів перенапруги, так і газонаповнених вимірювальних трансформаторів, а також і аналогічного високовольтного обладнання розподільних пристроїв та трансформаторних підстанцій в умовах зверх- та ультрависоких напруг.

Ключові слова: обмежувач перенапруги, газонаповнений трансформатор струму, напруженість поля, ізоляційна покришка, напруга перебиття, тороїдальний екран, радіуси труби екрану.

L.B. ZHORNIAK, A.I. AFANASIEV, V.M. SCHUS, O.P. LEVCHENKO

TO THE PROBLEM OF THE SHIELDING SYSTEMS EFFICIENCY IN CONSTRUCTIONS OF EXTRA-HIGH VOLTAGE ELECTRICAL APPARATUS

In the article, the authors proposed a method for estimating the electric load parameters to calculate the distribution of the electric field strength of the solid insulating structure of gas-filled high-voltage devices with axial symmetry. This structure consists of a support and insulating busbar filled with SF₆ gas as an internal insulating medium. This technique allows to evaluate the parameters of the electrical load (voltage and field strength) depending on the design features of the device and the shielding system used to equalize the electric field. The proposed methodology allows to evaluate the effectiveness of the influence of design parameters of the protection system for gas-filled high-voltage equipment (instrument transformers, arresters, surge arresters, 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 actual operating conditions and the influence of external factors. The implementation of this technique allows us to take into account the influence of external factors and operational characteristics inherent in instrument transformers and surge suppressors. In the proposed methodology, as an example, we consider a supporting insulating coating that is in operation under the most unfavorable conditions, such as external pollution, moisture and their combination, overvoltage of various origins, etc. The theoretical conclusions are confirmed by the results of calculations using the example of the support-insulating cover of the surge suppressor of the ОПН-500 series. A more accurate determination of the effectiveness of the proposed methodology for predicting the field strength distribution parameters under the influence of a shielding system can be achieved by conducting an additional series of calculations and experimental tests of specific insulating structures. Thus, it was concluded that the obtained results can be used to evaluate the external insulation characteristics of both surge suppressors and gas-filled instrument transformers, as well as similar high-voltage equipment of switch-gear and transformer substations in conditions of ultra- and transformer substations ultra-high voltages

Keywords: surge suppressor, gas-filled current transformer, field strength, insulating sheath, breakdown voltage, shielding tube radius.

Вступ. Системи екранування ізоляційних конструкцій апаратів надвисокої напруги разом з їх електродами, що знаходяться під високим потенціалом (бак вимірювального трансформатора, контактний фланець обмежувача перенапруги, арматура високовольтної опори тощо) утворюють систему високовольтних елементів, які істотно впливають один на одного. Це значно ускладнює процес розрахунку та аналізу таких систем екранування. Існуючі методики розрахунку аналогічних систем для характерних варіантів конструктивного виконання наведені в [2, 3].

Досвід експлуатації ізоляційних конструкцій показав, що електрична міцність колонок опорних ізоляторів при дії перенапруг практично повністю визначається характером електричного поля, що сформовано на високовольтному кінці ізоляційної конструкції. Досягти зниження напруженості поля високовольтно-

го електрода, де воно має максимальне значення, можливе встановлення відповідних екранів [2, 3, 6, 7]. Екрани дозволяють виключити появу та подальший розвиток електричного розряду вздовж поверхні ізоляційної конструкції та забезпечити розвиток усіх розрядів повітрям між екраном і землею.

Одним із головних параметрів, що є критерієм ефективності роботи будь-якої ізоляційної конструкції, є допустима робоча напруга електричного поля, яка залежить від якості ізоляції. Застосування різних типів екранів дозволяє змінювати максимальну робочу напругу в широких межах за умови постійної величини середньої напруги. Тому від екранів суттєво залежить ефективність використання ізоляції та надійність її роботи. Головними кількісними критеріями при виборі екранів є:

– максимальна напруженість поля, яка не має пе-

© Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, В.М. Щусь, О.П. Левченко, 2024

ревищувати допустимого значення, тобто повинна виконуватися умова:

$$E_{\max} < E_{\text{доп}}; \quad (1)$$

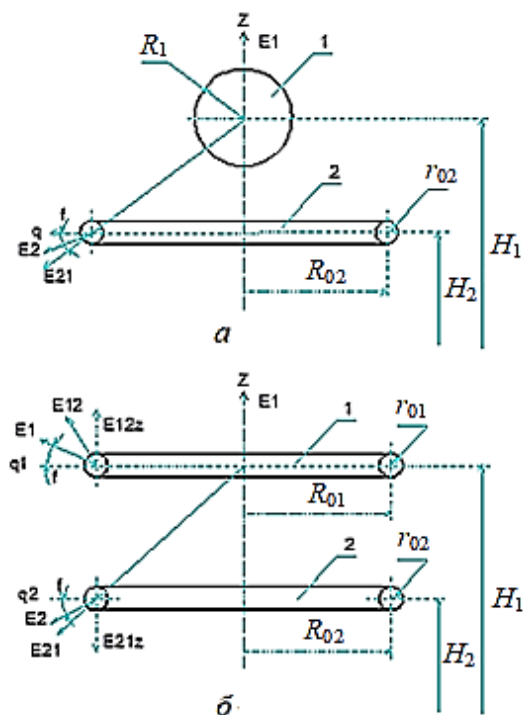
– максимальна напруженість на поверхні екранів, яка не повинна перевищувати допустимого значення за умовами обмеження інтенсивності коронного розряду. На практиці в якості кількісного критерію використовують умову:

$$U_{\text{ф.н}} = 0,9 \cdot U_{\text{нач}}, \quad (2)$$

де $U_{\text{ф.н}}$ – найбільша фазна напруга;

$U_{\text{поч}}$ – початкове значення напруги за умови виникнення корони.

Найбільш широкое використання в системах екранування отримали тороїдальні екрани, що встановлюються поблизу або в зоні електрода з високим потенціалом. Крім того, в умовах надвисокої напруги використовуються просторові системи екранів, що розміщуються по висоті ізоляційної конструкції. Головними розрахунковими критеріями є радіус екрану R_0 , радіус труби екрану $r_{\text{тр}}$ і відстань між екранами $\alpha_{\text{ек}}$ (для подвійних та просторових екранів). Графічно-розрахункову модель для різних систем екранування показано на рис. 1 [7].



a – одиночний кільцевий екран;
б – подвійна система екранів

Рис. 1. Графічна розрахункова модель для визначення розподілу напруженості вздовж ізоляційної покривки для різних систем екранування

В цьому випадку потенціал високовольтного електрода та тороїдального екрану або групи екранів (тороїдів) є однаковими, а напруженість поля при цьому може знижуватися до 40 % [2, 8, 9].

За умови надвисокої напруги, коли необхідно мати більш значне обмеження максимальної напруженості поля біля високовольтного електрода, виконання умов

(1) та (2) при використанні одиночних тороїдів або зовсім неможливо або дуже складно. Для вирішення цієї проблеми можна використовувати тороїдальні екрани у вигляді комбінації двох або більше тороїдів (багаторазово розщеплений екран), які розташовані на різних рівнях відносно високовольтного електрода (z) (див. рис. 1 [7]).

На рис. 1, *a* зображені: 1 – верхній електрод (бак трансформатора), що апроксимується еквівалентною кулею радіусом R_1 , центр якої розташований над землею на висоті H_1 ; 2 – тороїдальний екран, що має радіус труби r_{02} та радіус осьової лінії R_{02} , центр якої розташований над землею на висоті H_2 відносно високовольтного електрода (z).

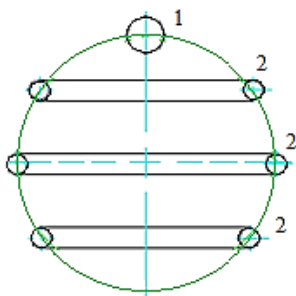
На рис. 1, *б* зображена подвійна система тороїдальних екранів, а саме: 1 – тороїдальний екран, що має радіус труби r_{01} та радіус осьової лінії R_{01} , центр якої розташований над землею на висоті H_1 ; 2 – це другий тороїдальний екран, що має радіус труби r_{02} та радіус осьової лінії R_{02} , центр якої розташований над землею на висоті H_2 відносно високовольтного електрода (z).

Таке технічне рішення дозволяє підвищити початкову напругу корони на електродах і тим самим розширити область ефекту вирівнювання. Максимальне значення напруги корони, а також найбільш рівномірне розподілення напруженості поля вздовж ізоляційної конструкції з проміжними екранами можна отримати за відсутності зв'язку з джерелом напруги. Ефективність такої системи екранування залежить від параметрів та конструктивних особливостей ізоляційної конструкції, що потребує проведення додаткового комплексу досліджень.

Мета роботи. Метою цієї роботи є дослідження ефективності та удосконалення системи екранування з різними потенціалами на прикладі ізоляційної покривки газонаповненого трансформатора струму серії ТОГ-500 або обмежувача перенапруги серії ОПН-500, верхню частину структури якої показано на рис. 2 [9, 10].

Виготовляти комбінований екран з кількістю однакових тороїдів більше двох є нераціональним, оскільки в цьому випадку напруженість поля на крайніх тороїдах значно більше, ніж на інших тороїдах, тому їх поверхня використовується не ефективно [2, 3, 7, 8]. Максимальне значення напруги корони багаторазово розщепленого екрану можливо отримати при розташуванні осьових ліній всіх соосних тороїдів на поверхні однієї сфери, як це показано на рис. 2.

Відстані між суміжними тороїдами можуть бути різні, вони тим більше, чим менше діаметр їх осьових ліній, але для всіх випадків тороїд з найбільшими розмірами повинен бути розміщено по горизонтальній лінії сфери (див. рис. 2).



1 – еквівалентна куля, що апроксимує високовольтний електрод (рис. 1, а); 2 – система тороїдальних екранів.

Рис. 2. Структура багаторазово розщепленого тороїдального екрану

Найбільш рівномірного розподілу напруженості поля вздовж ізоляційної конструкції можливо отримати за відсутності їх гальванічного зв'язку з джерелом живлення, тобто з електродом з високим потенціалом. У цьому випадку величину напруженості можливо визначити на основі методики, наведеної у [2, 5, 6]. Результати вказаних розрахунків свідчать наступне. Якщо потенціали проміжних екранів значно менші, ніж прикладена напруга, а співвідношення взаємних потенціальних коефіцієнтів, що не мають зв'язку з високовольтним електродом (α_{j1}), до власного потенціального коефіцієнту верхнього екрану, з'єднаного з високовольтним електродом (α_{11}) невелике, то розподіл напруженості вздовж ізоляційної конструкції буде значно нерівномірним.

Як було встановлено раніше, вирівнювання напруженості поля можна досягти шляхом фіксації потенціалу в різних точках поля, де величина напруженості має найбільше значення. Найчастіше зустрічається випадок, коли проміжний потенціал фіксується за допомогою одного екрану тороїдальної форми. Причому що більші розміри додаткового екрану, то ефективніше керування полем ізоляційної конструкції з допомогою проміжного потенціалу [2]. Такий спосіб екранування використовується в номінальних напругах 500 кВ та вище. Тому наступним етапом буде розробка методики оцінки розподілу напруженості поля вздовж опорної ізоляційної конструкції обмежувача перенапруги, а також дослідження впливу конструктивних факторів і параметрів навантаження на ефективність вирівнювання напруженості за допомогою такої системи екранування.

Для проведення досліджень та виконання необхідних для цього розрахунків створюється розрахункова модель для відповідної ізоляційної конструкції. Для конструкції обмежувача перенапруги типу ОПН – 750 опорна ізоляційна покривка може виконуватися як одноелементною, так і багатоеlementною в залежності від виробника [1, 5]. Для спрощення процесу рішення задач, що поставлено, приймаємо наступні припущення:

- опорна ізоляційна конструкція (покривка) виконується багатоеlementною в полімерному корпусі;
- вплив фланцевих з'єднань та внутрішньої структури не враховується;

– згідно з [2, 3], вплив додаткового екрану з проміжним потенціалом обумовлено як зниженням напруженості біля високовольтного електроду, так і зміненням умов накопичення об'ємного заряду. Причому за наявності додаткового екрану виникає деформація зони зовнішнього об'ємного заряду, що набуває форми еліпсоїда обертання, стисненого у вертикальному напрямку. У цьому випадку верхній фланець з елементами кріплення виводу (високовольтний електрод) зручно апроксимувати у вигляді тороїда, що знаходиться під потенціалом мережі живлення.

З урахуванням прийнятих припущень та конструктивних особливостей аналогу, графічно-розрахункова модель вміщатиме два тороїдальних екрани і матиме вигляд, що показано на рис. 3. Для подальшого аналізу вводяться такі позначення:

– для верхнього електроду з потенціалом мережі у вигляді еквівалентного тороїда використовується індекс «1»;

– для додаткового тороїду з проміжним потенціалом використовується індекс «2»;

– R_0 – радіус екрану;

– r_0 – радіус труби екрану;

– H – відстань від землі до екрана.

Тоді система потенціальних рівнянь для обраної структури екранування матиме такий вид:

$$\begin{aligned} U_1 &= \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2, \\ U_2 &= \alpha_{21} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2, \end{aligned} \quad (3)$$

де α_{11} , α_{22} – власні потенціальні коефіцієнти відповідно до верхнього та нижнього тороїдів;

α_{12} – взаємний потенціальний коефіцієнт верхнього та нижнього тороїдів;

q_1 , q_2 – заряди на верхньому та нижньому тороїдах відповідно;

U_1 , U_2 – потенціали відповідно на верхньому та нижньому тороїдах.

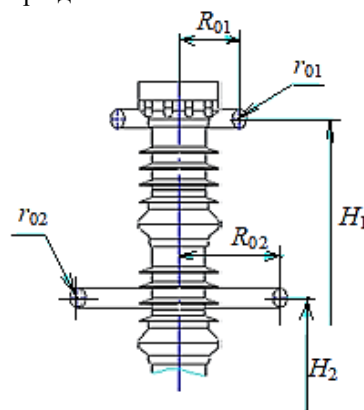


Рис. 3. Графічно-розрахункова модель системи двох тороїдальних екранів з проміжним потенціалом

Після вирішення системи (3) відносно зарядів верхнього та нижнього тороїдів отримаємо наступне:

$$q_1 = \frac{U_1}{\alpha_{11}} \cdot \frac{1 - \frac{U_2 \cdot \alpha_{12}}{U_1 \cdot \alpha_{22}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22}}}, \quad (4)$$

$$q_2 = \frac{U_2}{\alpha_{22}} \cdot \frac{1 - \frac{U_1 \cdot \alpha_{12}}{U_2 \cdot \alpha_{11}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{11} \cdot \alpha_{22}}}. \quad (5)$$

Власний потенційний коефіцієнт α_{11} для верхнього тороїда визначається наступним чином:

$$\alpha_{11} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R_{01}} \left[\frac{1}{1 + \frac{r_{01}}{2R_{01}}} \cdot \ln \frac{8R_{01}}{r_{01}} \left(1 + \frac{r_{01}}{2R_{01}} \right) - \frac{3,14R_{01}}{2H_{01}} \right], \quad (6)$$

де ϵ_0 – діелектрична проникність повітря;
 R_{01} – радіус екрану верхнього тороїда;
 r_{01} – радіус труби верхнього тороїда;
 H_1 – відстань від верхнього тороїда до землі (див. рис. 3).

Взаємний потенціальний коефіцієнт нижнього та верхнього тороїдів із загальною віссю симетрії визначається наступним чином:

$$\alpha_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\sqrt{(H_1 - H_2)^2 + R_{02}^2}} - \frac{1}{\sqrt{(H_2 + H_1)^2}} \right], \quad (7)$$

де H_2 – відстань від нижнього тороїда до землі;
 R_{02} – радіус екрану нижнього тороїду.

Власний потенційний коефіцієнт α_{22} для нижнього тороїду визначається наступним чином:

$$\alpha_{22} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R_{02}} \left[\frac{1}{1 + \frac{r_{02}}{2R_{02}}} \ln \frac{8R_{02}}{r_{02}} \left(1 + \frac{r_{02}}{2R_{02}} \right) - \frac{3,14R_{02}}{2H_{02}} \right], \quad (8)$$

де r_{02} – радіус труби нижнього тороїда.

При екрануванні опорної ізоляційної конструкції розщепленим екраном, що складається з еквівалентного тороїда та екрана зі власним потенціалом, картину розподілу напруженості може бути отримано шляхом накладення полів кожного з тороїдів на наступною умовою [2, 3, 7]:

$$E_{zi} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i(z-d_{1i})}{[(z-d_{1i})^2 + R_{0i}^2]^{3/2}}, \quad (9)$$

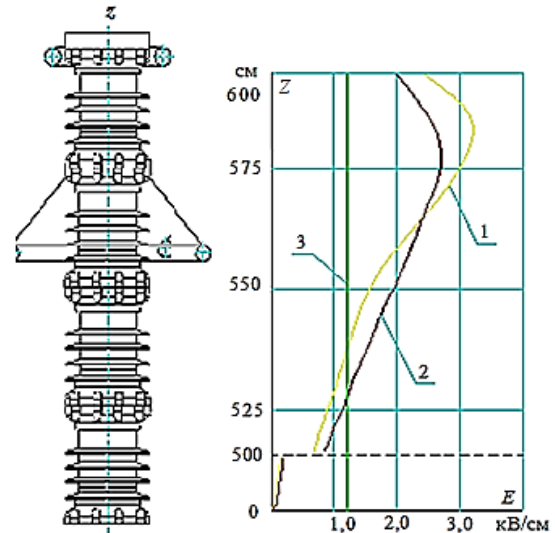
де n – кількість співвісних тороїдів, яка дорівнює 2;
 q_i – заряди відповідних тороїдів;
 z – лінійна координата вздовж загальної осі тороїдів, що відраховується від верхнього тороїда (див. рис. 1);
 d_{1i} – відстань між осьовими лініями відповідних екранів при умові, що для верхнього тороїда величина d_{11} обирається рівною 0;
 R_{0i} – радіуси осьових ліній відповідних тороїдів.

На основі розробленої методики з алгоритмом розрахунку було розроблено відповідне програмне забезпечення для проведення подальших досліджень, метою яких є визначення оптимальних розмірів тороїда при порівнянні максимальної напруженості поля для систем екранів з однаковими та різними потенціалами. Оскільки за визначальний параметр вибрати напруженість поля $E_{p,л}$, її розподіл уздовж поверхні ізоляційної покривки при використанні еквівалентних екранів можна визначити за методикою, викладеною в [2, 3]. Початкові дані для подальших розрахунків наведено в табл. 1.

Як приклад, результати розрахунку розподілу напруженості поля вздовж ізоляційної покривки, отримані на основі вище наведеної методики та [2], показані на рис. 4. Очевидно, розподіл напруженості поля найбільш суттєво залежить від таких факторів як розміри та параметри тороїдального екрану, глибина розташування і величина проміжного потенціалу на нижньому тороїді.

Таблиця 1 – Вихідні дані для оцінки розподілу напруженості вздовж ізоляційної конструкції ОПН-750

Параметр	Позначення	Розмір	Значення
Потенціали: – верхнього тороїда; – нижнього тороїда	U_1	кВ	750
	U_2	кВ	450
Діелектрична проникність повітря	ϵ_0	Ф/м	$8,85 \cdot 10^{-12}$
Радіуси екранів: – верхній; – нижній	R_{01}	см	32
	R_{02}	см	135
Радіус труби екрану: – верхній; – нижній	r_{01}	см	4
	r_{02}	см	6
Висота встановлення екрану відносно землі: – верхній; – нижній	H_1	см	850
	H_2	см	650



1 – система еквіпотенційних тороїдів;
 2 – система тороїдів з різними потенціалами;
 3 – середнє арифметичне значення напруженості поля.
 Рис. 4. Розподіл напруженості вздовж ізоляційної покривки

Нижче розглянемо можливості подальшого вирівнювання розподілу напруженості поля за рахунок змінення геометричних розмірів нижнього тороїду та місцем (глибиною) його розташування відносно верхнього електроду. Для аналізу впливу розмірів нижнього екрану на розподіл напруженості необхідно побудувати картину поля для різних по діаметру тороїдів. Початкові дані для різних варіантів виконання показано в табл. 2, а результати розрахунків – в табл. 3.

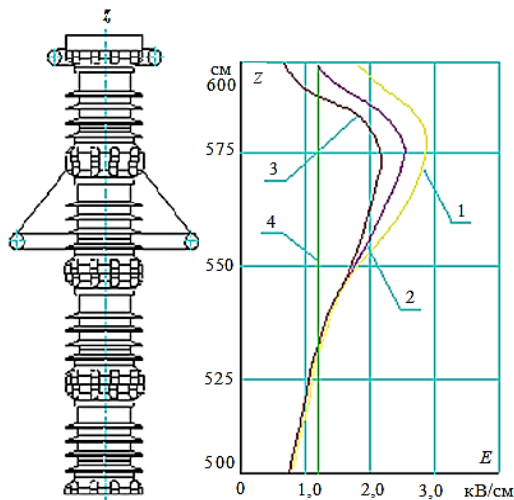
Таблиця 2 – Початкові дані для розрахунку напруженості поля для варіантів виконання нижнього тороїда

R_{02} , см	α_{11}	α_{12}	α_{22}	q_1	q_2
100	$1,1 \cdot 10^9$	$3,4 \cdot 10^9$	$4,4 \cdot 10^{10}$	$7,3 \cdot 10^{-9}$	$9,6 \cdot 10^{-9}$
120	$1,1 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^9$	$3,8 \cdot 10^{10}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$	$12 \cdot 10^{-9}$
135	$1,1 \cdot 10^9$	$3,1 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^{10}$	$7,1 \cdot 10^{-9}$	$14 \cdot 10^{-9}$

Таблиця 3 – Результати розрахунку напруженості поля для різних варіантів виконання нижнього тороїда

R_{02} , см	Напруженість, кВ/см							
	Лінійна координата z, см							
	10	25	50	75	100	200	400	600
100	0,09	0,24	0,26	0,82	1,2	1,8	2,7	1,9
120	0,09	0,22	0,23	0,8	1,2	1,8	2,4	0,86
135	0,09	0,21	0,21	0,78	1,1	1,8	2,2	0,4

Результати розрахунків проілюстровано на рис. 5. Аналіз графіків показує, що встановлення екрану з проміжним потенціалом дозволяє ефективно знижувати напруженість в зоні його встановлення. Однак при цьому в зоні верхнього електроду напруженість залишається підвищеною особливо при малих розмірах нижнього тороїду.



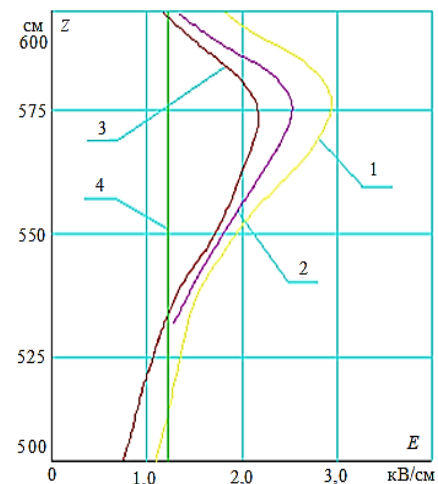
1 – радіус 100 см; 2 – радіус 120 см; 3 – радіус 135 см; 4 – середнє арифметичне значення напруженості.

Рис. 5. Розподіл напруженості вздовж ізоляційної покривки в залежності від розмірів нижнього тороїду

Підвищення розмірів нижнього тороїду потребує підвищення розмірів розподільного пристрою для забезпечення необхідної міцності повітряних проміжків. Для мінімізації цього недоліку потрібно оцінити ефективність підвищення радіусу труби тороїда для зниження його габаритних розмірів при збереженні того ж значення напруженості поля. Для рішення цієї задачі за вище означеною методикою проведено розрахунки для різних значень діаметра труби екрану результати яких показано на рис. 6.

Як показують результати розрахунків, підвищення радіусу труби тороїдів дає суттєвий ефект в межах до 80 мм. При подальшому зростанні радіусу ефект вирівнювання знижується, але при цьому підвищується матеріалоемність конструкції системи екранування. Підвищення радіусу труби тороїду дає можливість додатково знизити напруженість при умові дії імпульсних перенапруг.

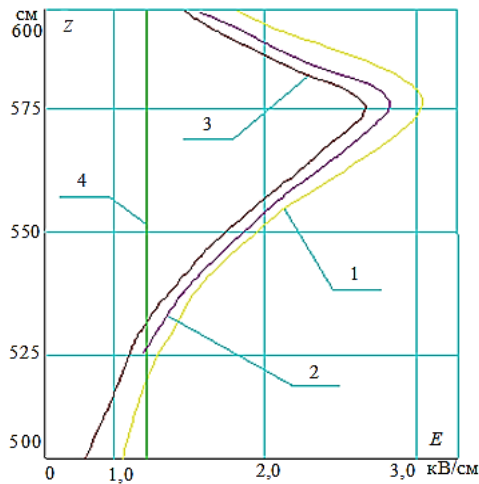
Не менш важливим чинником, який оказує вплив на розподіл напруженості, є величина потенціалу нижнього екрану. Як показують результати досліджень [2, 3, 4], оптимальне значення потенціалу нижнього екрану коливається в межах (0,59-0,67) і залежить від класу номінальної напруги, конкретних параметрів системи екранування та конструктивних особливостей електричного апарату. Для опорної ізоляційної конструкції, що розглядається, розрахунок розподілу напруженості здійснюється на основі вище приведеної методики. На основі результатів розрахунків побудовано графіки, які показано на рис. 7. Аналіз отриманих результатів показує, що оптимальним значенням потенціалу нижнього тороїда при параметрах, що розглядаються, є величина $0,63 U_{ном}$.



1 – радіус труби 40 мм; 2 – радіус труби 60 мм; 3 – радіус труби 80 мм; 4 – середнє арифметичне значення напруженості

Рис. 6. Результати впливу радіуса труби нижнього тороїда на розподіл напруженості поля

Крім розглянутих вище чинників на розподіл напруженості оказують вплив такі параметри, як глибина встановлення нижнього тороїду. Попередній аналіз показує, що для таких апаратів, як ОПН використовують заглиблене встановлення тороїдального екрану. Однак в цих умовах зростає напруженість в зоні верхнього електроду, що потребує встановлення додаткового тороїдального екрану відносно невеликої величини. Запропонована вище методика дозволяє визначити оптимальні параметри такої системи екранування.



1 – $0,5 \cdot U_{\text{ном}}$; 2 – $0,7 \cdot U_{\text{ном}}$; 3 – $0,6 \cdot U_{\text{ном}}$;
4 – середнє арифметичне значення рівномірного розподілу
напруженості поля

Рис. 7. Графіки розподілу напруженості в залежності
від величини потенціалу на нижньому тороїді

Висновки. Аналіз отриманих графічних залежностей (див. рис. 4-7) дозволяє зробити наступні висновки. Найбільше електричне навантаження на ізоляційну покриття має місце на проміжку (0-125) см від верхнього електроду з високим потенціалом. Попередні розрахунки показують, що ця відстань зростає несуттєво при підвищенні номінальної напруги, що діє на ізоляційну конструкцію.

Покращити умови праці опорної ізоляції в зоні максимального електричного навантаження можливо за рахунок використання екрану з потенціалом нижче номінального значення. Крім того, суттєвого ефекту можливо досягнути за рахунок вибору оптимальних розмірів системи екранування, ефективність якої в кожному конкретному випадку дозволяє визначити вище наведена методика. Припущення, які при цьому приймаються, не оказують суттєвого впливу на результати розрахунків, особливо тоді, коли вони здійснюються для проведення порівняльної оцінки ефективності системи екранування.

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 щодо 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 формується на основі моніторингу роботи конкретних ізоляційних конструкцій в реальних умовах експлуатації.

Додаткове зменшення електричного навантаження в безпосередній близькості до електроду з високим

потенціалом в таких апаратах, як вимикачі, роз'єднувачі, шинні опори тощо можливо досягнути шляхом вдосконалення системи струмовідводу [4–7], але це потребує проведення додаткових досліджень.

Список літератури

1. Shebanin V., Vakhonina L., Zhorniak L., Sadovoy O. Optimization Method for Electromagnetic Systems of Electrical Apparatus. *Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022*, 2022.
2. Афанасьев О. І., Жорняк Л.Б., Щусь В.М. *Електричні апарати високої напруги*. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 356 с.
3. Афанасьев О. І., Жорняк Л. Б., Немикіна О. В., Щусь В. М. *Електроапаратне обладнання систем електропостачання енергосмисних виробництв / за заг. ред. П. Д. Андрієнко*. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. 432 с.
4. Жорняк Л. Б., Афанасьев О. І., Леонов Р.С., Карпук А.В. Можливості компенсації напруженості електричного поля зовнішньої ізоляції високовольтних газонаповнених трансформаторів струму. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2017. № 34 (1256). С. 14-18.
5. Жорняк Л. Б., Афанасьев О. І., Поляков В. О., Кулік Ж. О., Кот Р. В., Кравець І. О. Особливості обрання теоретичного закону розподілу при оцінці надійності зовнішньої ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2020. № 1. С. 10–14. doi: 10.20998/2079-3944.2020.1.02.
6. Жорняк Л. Б., Афанасьев О. І., Щусь В. І., Азорська Ю. В., Коляда О. В., Грінівецький Д. О. Особливості регулювання напруженості електричного поля вздовж зовнішньої ізоляції газонаповнених трансформаторів напруги. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. № 2 (1308). С. 13–18. doi: 10.20998/2079-3944.2019.2.03.
7. Жорняк Л. Б., Афанасьев О. І., Щусь В. М. Оптимізація системи внутрішнього екранування в газонаповнених високовольтних електричних апаратах із полімерною ізоляцією. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів*. Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 1 (7). С. 3–8. doi:10.20998/2079-3944.2022.1.02.
8. Інструкція із застосування, монтажу та експлуатації засобів захисту від перенапруг в електроустановках напругою 6–750 кВ. затверджена Міністерством Енергетики та Вугільної Промисловості України, Наказ № 374 від 23.05.2014.
9. КО «Запорізький завод високовольтної апаратури» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zva.zp.ua>.
10. ТОВ «ЕЛІЗ» Запорізький трансформаторний завод [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ua.eliz.zp.ua>.

References (transliterated)

1. Shebanin V., Vakhonina L., Zhorniak L., Sadovoy O. [Optimization Method for Electromagnetic Systems of Electrical Apparatus]. *Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022*, 2022.
2. Afanas'yev O. I., Zhornyak L.B., Shchus' V. M. *Elektrychni aparaty vysokoyi napruhy*. Zaporizhzhya: NU «Zaporiz'ka politekhnik», 2021. 356 p.
3. Afanas'yev O. I., Zhornyak L. B., Nemykina O. V., Shchus' V. M. *Elektroaparate obladnannya system elektropostachannya energoemnykh vyrobnystv*. Zaporizhzhya: NU «Zaporiz'ka politekhnik», 2023. 432 p.
4. Zhornyak L.B., Afanas'yev O.I., Leonov R.S., Karpuk A.V. *Mozhlyvosti kompensatsiyi napruzenosti elektrychnoho polya zovnishn'oyi izolyatsiyi vysokovol'tnykh transformatoriv strumu z hazovym promizhkom* [The possibilities of compensating the electric field strength of external insulation of high-voltage gas-filled current transformers] *Visnyk NTU «KhPI»*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, no. 34 (1256), pp. 14-18.
5. Zhornyak L. B., Afanas'yev O. I., Polyakov V. O., Kulik Zh. O.,

- Kot R. V., Kravets' I. O. Osoblyvosti obrannya teoretychnoho zakonu rozpodilu pry otsynsi nadiynosti zovnishn'oyi izolyatsiyi hazonapovnenykh vymiryval'nykh transformatoriv [Peculiarity of theoretical distribution law selection by gas-insulated transformers external isolation calculation] *Visnyk NTU «KhPI»*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2020, no. 1, pp. 10–14. doi: 10.20998/2079-3944.2020.1.02.
6. Zhornyak L. B., Afanas'yev O. I., Shchus' V. I., Azors'ka Yu. V., Kolyada O. V., Hrinivets'kyi D. O. Osoblyvosti rehulyuvannya napruzhenosti elektrychnoho polya vzdovzh zovnishn'oyi izolyatsiyi hazonapovnenykh transformatoriv napruhy [Features of regulation of electric field along external isolation of high-voltage gas-insulated voltage transformers]. *Visnyk NTU «KhPI»*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2019, no. 2 (1308), pp. 13–18. doi: 10.20998/2079-3944.2019.2.03.
 7. Zhornyak L.B., Afanas'yev O. I., Shchus' V. M. Optymizatsiya systemy vnutrishn'oho ekranuvannya v hazonapovnenykh vysokovol'tnykh elektrychnykh aparatakh iz polimernoyu izolyatsiyeyu [Optimization of the internal shielding system in gas filled high voltage electric appliances with polymer insulation]. *Visnyk NTU «KhPI»*. [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU«KhPI», 2022, no. 1 (7), pp. 3–8. doi:10.20998/2079-3944.2022.1.02.
 8. Instruktsiya iz zastosuvannya, montazhu ta ekspluatatsiyi zasobiv zakhystu vid perenapruh v elektroustanovkakh napruhoyu 6-750 kV. zatverdzhena Ministerstvom Enerhetyky ta Vuhil'noyi Promyslovosti Ukrainy, Nakaz № 374 vid 23.05.2014.
 9. КО «Zaporiz'kyi zavod vysokovol'tnoyi aparatury» [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <http://zva.zp.ua>.
 10. TOV «ELIZ» Zaporiz'kyi transformatornyy zavod [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <http://ua.eliz.zp.ua>

Надійшла (received) 27.02.2024

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

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

Левченко Олександр Петрович (Levchenko Oleksandr Petrovich) – аспірант кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: levchenko17101984@gmail.com