

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

## АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ СИСТЕМИ ЕКРАНУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ІЗОЛЯЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

В статті авторами проведено аналіз існуючих систем екранування ізоляційних конструкцій апаратів високої напруги разом з електродами, що знаходяться під високим потенціалом. При цьому розглядаються можливості застосування тороїдальних екранів різного конструктивного виконання та умов їх встановлення в структурі газонаповненого апаратного обладнання (газонаповнені вимірювальні трансформатори струму та напруги, обмежувачі перенапруг тощо) з використанням полімерних ізоляційних матеріалів. На основі аналізу літературних джерел запропоновано найбільш ефективну методику оцінки параметрів електричного навантаження для визначення розподілу напруженості електричного поля вздовж твердої суцільної ізоляційної конструкції газонаповнених високовольтних пристроїв з аксіальною симетрією. Така конструкція являє собою опорно-ізолюючу покривку, заповнену елегазом в якості внутрішнього ізолюючого середовища. Рекомендовано методичні матеріали, що дозволяють оцінити параметри електричного навантаження (напругу та напруженість поля) в залежності від конструктивних особливостей апарату та системи екранування, що використовується для вирівнювання електричного поля. На їх основі створюється можливість здійснити оцінку ефективності впливу конструктивних чинників системи екранування газонаповненого високовольтного обладнання в процесі проектування та при удосконаленні окремих конструктивних рішень. Результати аналітичної оцінки такими методами добре узгоджуються з даними експериментальних досліджень та статистичною інформацією, отриманою в результаті моніторингу роботи ізоляційних конструкцій з урахуванням реальних умов експлуатації та впливу зовнішніх чинників. Впровадження отриманих матеріалів дозволяє врахувати вплив зовнішніх факторів і експлуатаційних характеристик, властивих вимірювальним трансформаторам та обмежувачам перенапруг. Для пояснення результатів проведеного в статті аналізу методичних матеріалів, як приклад, наведено результати розрахунків опорно-ізоляційної покривки газонаповненого трансформатора струму серії ТОГ, що зазнає найбільшого впливу під час експлуатації при несприятливих умовах, таких як зовнішнє забруднення, вологість та їх поєднання, а також в умовах перенапруг різного походження тощо. На основі представлених матеріалів можна більш точно визначити ефективність різних систем екранування, спрогнозувати параметри розподілу напруженості поля під впливом системи екранування з урахуванням її конструктивних особливостей. Крім того, на основі сформульованих у роботі висновків можна спланувати та провести додаткову серію розрахунків та експериментальних випробувань з урахуванням конкретних особливостей ізоляційних конструкцій. Таким чином, отримані результати можуть бути використані для оцінки параметрів зовнішньої ізоляції як газонаповнених вимірювальних трансформаторів, так і аналогічного високовольтного обладнання розподільних пристроїв і трансформаторних підстанцій.

**Ключові слова:** газонаповнений трансформатор струму, напруженість поля, опорно-ізоляційна покривка, напруга перекриття, тороїдальний екран, радіуси труби екрану та екрану, надійність, ефективність.

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

## ANALYSIS OF THE FEATURES OF THE SHIELDING SYSTEM OF POLYMER INSULATION STRUCTURES OF HIGH VOLTAGE ELECTRICAL EQUIPMENT

In the article, the authors analysed the existing shielding systems of insulating structures of high-voltage devices together with electrodes under high potential. At the same time, the possibilities of using toroidal screens of various designs and the conditions of their installation in gas-filled equipment structures (gas-filled current and voltage measuring transformers, arresters, etc.) using polymer insulating materials are considered. Based on the analysis of literary sources, the most effective method of estimating the electric load parameters for determining the electric field strength distribution along the continuous insulating structure of gas-filled high-voltage devices with axial symmetry is proposed. This design is a support-insulating shell filled with SF<sub>6</sub> as an internal insulating medium. Methodical materials are recommended that allow you to estimate the electrical load parameters (voltage and field strength) depending on the design features of the device and the shielding system used to level the electric field. Based on them, it is possible to evaluate the effectiveness of the calculation coefficients of the shielding system of gas-filled high-voltage equipment in the design process and during the improvement of individual design solutions. The results of the analytical evaluation by such methods are in good agreement with the data of experimental studies and statistical information obtained as a result of monitoring the work of insulating structures, taking into account real operating conditions and the influence of external factors. The introduction of the obtained materials allows you to take into account the influence of external factors and operational characteristics inherent in measuring transformers and overvoltage limiters. To explain the results of the analysis of methodical materials carried out in the article, as an example, the results of calculations of the support-insulation shell of the gas-filled current transformer of the TOG series, which was the most affected during operation, are given. In adverse conditions, given under such conditions as external pollution, humidity and their combination, as well as under conditions of overvoltage of various origins, etc. On the basis of the presented materials, it is possible to more accurately determine the effectiveness of various screenings. system, as well as how to predict the field strength distribution parameters under the influence of the shielding system, taking into account its design features. In addition, on the basis of the conclusions formed in the work, it is possible to plan and conduct an additional series of calculations and experimental tests taking into account the features of specific structures. Thus, the obtained results can be used to evaluate the external insulation parameters of both gas-filled measuring transformers and similar high-voltage equipment of distribution devices and transformer substations.

**Keywords:** gas-filled current transformer, field intensity, insulating shell, overlap voltage, toroidal shield, shield and shield tube radii, reliability, efficiency.

**Вступ.** Будь-яке електроенергетичне високовольтне обладнання закритих або відкритих розподільних пристроїв станцій та підстанцій (масляні та елегазові трансформатори струму (ТС) та напруги (ТН), вводи силових трансформаторів, елегазові колонкові та бакові вимикачі, елегазові комплекtnі розподільні пристрої, обмежувачі перенапруги, роз'єднувачі тощо) з напругою від 3 кВ до 1150 кВ має в своєму складі ізоляційну конструкцію (ІК), яка є важливою складовою частиною їх конструкцій і, зазвичай, крім ізоляційних завдань, виконує ще й інші функції, зокрема, сприйняття або передачу механічних сил, відведення тепла або герметизацію від навколишнього середовища (рис. 1–6). До того ж

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

ізоляційна конструкція повинна забезпечувати електричну ізоляцію струмопровідних частин електричного апарату від заземлених частин, або від струмопровідних частин інших полюсів, а також виконувати функцію підтримки та закріплення частин, що знаходяться під високою напругою.

Через необхідність забезпечення перерахованих вимог, що висуваються до ІК, визначається концепція її виконання, конструкція та форма конкретного ізоляційного пристрою, а також ізоляційний матеріал, з якої вона виготовляється [1–3].

При технічній реалізації ізоляції варто пам'ятати, що не завжди вдається знайти оптимальне з усіх точок зору рішення. Тому часто необхідно домагатися компромісів, які забезпечують нормальне функціонування та необхідний термін експлуатації обладнання за умови найбільш економічного вирішення.



Рисунок 1 – Електроенергетичне високовольтне обладнання відкритого розподільного пристрою підстанції 800 кВ GE VERNOVA [4]



Рисунок 2 – Високовольтний роз'єднувач для зовнішньої установки [4]



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд тороїдальних екранів обладнання підстанції 800 кВ виробництва SIMENS [5]



Рисунок 4 – Високовольтні вводи виробництва ABB [6, 7]



Рисунок 5 – Вимірювальні трансформатори-TOR-110S [8]



Рисунок 6 – Обмежувач перенапруги типу ОПНн-750 у складі ОРУ-750 кВ на Запорізькій АЕС [9]

Працездатність та економічна ефективність зовнішньої ізоляції електрообладнання високої та надвисокої напруги є основними складовими загальної проблеми забезпечення високої надійності та покращення техніко-економічних показників роботи енергетичної системи України. Вирішення цього завдання безпосередньо пов'язане зі створенням оптимальних варіантів виконання ізоляційних конструкцій високої надійності за умови мінімальних витрат на їх створення.

Найважливішим критерієм при виборі зовнішньої ізоляції, що визначає габарити ізоляції, як правило, є її надійна робота в умовах забруднення та зволоження.

Першочерговий інтерес представляє завдання вибору ізоляції для ліній електропередачі і підстанцій змінного струму, що забезпечують основний потік електроенергії, а також високоекономічні та гнучкі лінії передачі постійного струму з високою пропускну здатністю потребують обґрунтований вибір ізоляції за критерієм її надійної роботи в системах постійного струму.

**Аналіз стану питання.** Найбільш жорсткі вимоги пред'являються до надійності ізоляції підстанційного обладнання, оскільки аварії внаслідок перекриттів цієї ізоляції можуть спричинити значне недовідпускання електроенергії. Короткочасна і тривала електрична міцність, а також ряд інших важливих характеристик ізоляційних конструкцій сильно залежать від конфігурації та геометричних параметрів електричних полів в ізоляційних проміжках. Тому аналіз електричних полів та вибір засобів для їх регулювання займають важливе місце у створенні ізоляційних конструкцій [1–3, 10, 11].

Аналіз електричних полів для деяких найпростіших конструкцій можна здійснити за допомогою аналітичних методів. На теперішній час поля складної конфігурації розраховуються з використанням чисельних методів (інтегральних рівнянь, еквівалентних зарядів, сіток тощо) [9, 10], що забезпечують похибку вирахування максимальних значень напруженості не більше 5–10 %.

Для спрощеної характеристики форми електричного поля в ізоляційному проміжку зазвичай використовують коефіцієнт неоднорідності поля  $k_n = E_{\max}/E_{\text{ср}}$ , де  $E_{\max}$  та  $E_{\text{ср}}$  – відповідно максимальна та середня напруженості на ізоляційному проміжку, або величину  $\eta = 1/k_n$ , яку називають коефіцієнтом використання ізоляції. У ряді випадків в якості параметрів, що характеризують поле в проміжку, використовуються площа  $S_a$  частини поверхні електрода або об'єм  $V_a$  області проміжку, в межах яких напруженість  $E \geq \alpha \cdot E_{\max}$ , де  $\alpha < 1,0$  (зазвичай  $\alpha = 0,8 \dots 0,9$ ). Площа  $S_a$  та обсяг  $V_a$  називаються «напруженими» чи «активними».

За відсутності спеціальних заходів електричні поля в ізоляційних конструкціях установок високої напруги є, як правило, різко неоднорідними ( $k_n > 3,0$ ). Ізоляційні проміжки з такими полями мають ряд істотних недоліків. Так, у повітряних проміжках з  $k_n > 3,0$  при відносно низьких напругах виникає коронний розряд, що супроводжується значними втратами енергії та потужними радіоперешкодами. Середня розрядна напруженість для таких проміжків при порівняно малих ізоляційних відстанях (до 2 м), приблизно в 4–5 разів нижче, ніж для проміжків зі слабонеоднорідними полями. За умови збільшення ізоляційних відстаней понад 2 м середні розрядні напруженості поступово знижуються ще більше. Для внутрішньої ізоляції практично будь-якого типу з різконеоднорідними електричними полями характерні відносно низькі

напруги виникнення часткових розрядів і, відповідно, низькі тривала та короткочасна електричні міцності.

Вирівнювання електричного поля завжди дає підвищення електричної міцності проміжків і дозволяє скоротити ізоляційні відстані в конструкції. Наприклад, товщина  $d$  внутрішньої ізоляції у багатьох випадках визначається з умови  $E_{\max} \leq E_{\text{доп}}$  де  $E_{\text{доп}}$  – допустима максимальна напруженість при розрахунковому значенні напруги  $U_{\text{розр}}$ , а цій умові відповідає нерівність  $d \geq k_n \cdot U_{\text{розр}} / E_{\text{доп}}$ . А отже, вирівнювання електричного поля дає зменшення товщини внутрішньої ізоляції, пропорційне коефіцієнту  $k_n$ . Отже, за допомогою регулювання електричних полів вирішуються задачі зниження втрат енергії на корону та рівня радіоперешкод, а також зменшення ізоляційних відстаней у зовнішній та внутрішній ізоляції. Тим самим зрештою вирішуються завдання створення економічно доцільних високовольтних конструкцій.

Оптимальний ступінь вирівнювання поля повинен визначатися в кожному конкретному випадку на основі аналізу техніко-економічних показників можливих варіантів виконання всієї установки в цілому. Досвід розробки ізоляційних конструкцій свідчить про те, що зі зростанням номінальної напруги економічна ефективність різних засобів регулювання електричних полів різко зростає. Для над- та ультрависоких номінальних напруг конструкції без ефективного регулювання полів, як правило, технічно неможливі.

Відомо, що у нерівномірному полі окремі ділянки електроізоляційної конструкції несуть підвищене електричне навантаження, через що може статися досить швидке руйнування матеріалів перевантажених областей, а на решту частин буде діяти підвищена напруженість поля, що призведе до їх руйнування.

Завадити цьому при неоднорідному електричному полі можна, по перше, шляхом збільшення розмірів конструкцій через що підвищиться працездатність електричної ізоляції, при цьому напруженість поля знижуватиметься в найбільш навантажених ділянках. Однак, через підвищення габаритних розмірів, маси і, як наслідок, суттєве зростання вартості електричного апарату в цілому, такий шлях економічно не виправданий.

Другий можливий шлях – це вирівнювання електричного поля в самій конструкції шляхом регулювання (вирівнювання) електричного поля завдяки чому створюється більш рівномірний розподіл електричного навантаження на окремих ділянках електроізоляційних матеріалів, підвищуючи, як правило, їх працездатність.

Як відомо, регулювання електричного поля можна здійснювати двома способами: змінюючи або активну провідність, або ємність окремих ділянок ізоляції ІК. Перший спосіб регулювання реалізується наступними конструктивними рішеннями: підбором електроізоляційних матеріалів з різною провідністю, використанням активних дільників напруги, встановленням коронуючих електродів, а також застосуванням напівпровідникових покриттів. Ємнісні способи регулювання електричних полів засновані на збільшенні ємності тих ділянок електричної ізоляції, в

яких необхідно знизити падіння напруги, що отримується: розміщенням у місцях з високим падінням напруги діелектриків з підвищеною діелектричною проникністю (градуванням ізоляції), використанням внутрішніх та зовнішніх екранів або використанням конденсаторних обкладинок.

Екрани різної форми (рис. 7) застосовуються для обмеження найбільших напруженостей електричного поля на елементах високовольтних конструкцій та вирівнювання електричних полів в ізоляційних проміжках, а саме біля високовольтного електрода, у тих випадках, коли цим елементам неможливо або не раціонально надати форму, яка забезпечуватиме необхідну міру обмеження напруженості поля. Крім того, таке технічне рішення підвищує напругу появи коронного розряду на частинах конструкції, які знаходяться під високим потенціалом, як при робочій напрузі, так і при виникненні перенапруг, до того ж зменшує радіозавади, вирівнює розподіл напруги по висоті ІК та зменшує відстані між контактами, наприклад у роз'єднувачів, або між сусідніми фазами.



Рисунок 7 – Зовнішній вигляд типів екранів для встановлення на електроустановці класів до 1150 кВ розробки та виробництва Українського інституту трансформаторобудування «ВІТ» (м. Запоріжжя):  
 а – тарілчастий сферичний; б – циліндричний;  
 в – подвійний тороїдальний зі сферичним екраном;  
 г – потрійний тороїдальний; д – сферичний;  
 е – подвійний тороїдальний [12]

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 високовольтного електрода, де воно має максимальне значення, можна встановленням відповідних екранів [1–3, 10–12]. 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 конструкції екранів суттєво залежить ефективність використання ізоляції та надійність її роботи.

Серед екранів різних форм, але однакових габаритів найбільший радіус кривизни поверхні і, отже, найбільший ефект обмеження максимальної напруженості  $E_{\text{макс}}$  дають сферичні екрани (див. рис. 7 а, в та д). Такі екрани, що розташовані у повітрі, частіше виготовляються зі стандартних елементів малого розміру, що укріплюються на жорсткому металевому каркасі (див. рис. 7 а). Вони значно зручніші у виготовленні з технологічної точки зору, однак коефіцієнт гладкості поверхні для них значно нижчий, ніж для суцільних сферичних екранів. Сферичні екрани для електроустановок вищих класів напруги виходять громіздкими, вони складні у виготовленні, ускладнюють доступ до елементів конструкції в середині екрана, а при зовнішній установці можуть бути причиною великих вітрових навантажень. Тому в таких установках широко використовують тороїдальні екрани (див. рис. 7 б–г та е).

Як зазначається в [1, 10–12], при правильному виборі розміру та розташування екрана вздовж ізоляційної конструкції її розрядна напруга при сухій поверхні визначається довжиною повітряного проміжку між екраном та землею. Зі збільшенням діаметру тороїдального екрана при незмінному діаметрі труби, з якої виготовляють екран, розрядна напруга зростає. Також зазначається, що розрядні напруги слабо залежать від виду діючої напруги. Чим рівномірніше електричне поле повітряного проміжку, тим слабша залежність розрядної напруги від тривалості фронту імпульсу. Та як і для лінійної ізоляції, розрахункова напруга практично не залежить від тривалості, що діє. Оскільки зі збільшенням діаметра тороїдального екрану разом зі зростанням розрядної напруги відносно землі зменшується повітряний проміжок до сусідніх фаз або між розімкненими контактами роз'єднувача, віддають перевагу замість збільшення діаметра тороїда йти шляхом застосування здвоєних або потрійних екранів меншого діаметра.

**Мета статті.** Метою цієї роботи є проведення аналізу систем екранування ізоляційних конструкцій апаратів високої та надвисокої напруги разом з їх електродами, що знаходяться під високим потенціалом. Дослідити ефективність та удосконалити системи екранування електроустановки з різними

потенціалами та 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. 8 а [13–15].

**Основна частина.** В конструкції трансформатора струму (ТС), що розглядається для вирівнювання розподілу напруженості використовується вбудований просторовий екран циліндричної форми (див. рис. 9 а) [12–14, 16, 17]. Він виконаний з алюмінієвого сплаву марки АД1 та розміщений у верхній частині ізоляційної покривки (рис. 8 а та б). Заміна екрану зазначеної конструкції на потрійний тороїдальний екран (рис. 9 б) з аналогічного матеріалу на нашу думку дозволяє значно зменшити матеріалоемність екрану. При цьому забезпечується приблизно такий же рівень напруженості поля в місці його встановлення.

Конструкція трансформатора струму, що зображена на рис. 8 а, має наступні вузли та деталі:

1. Мембрана.
2. Вторинна обмотка з магнітопроводом.
3. Ізоляція вторинної обмотки.
4. Опорні ізолятори.
5. Вбудований просторовий екран циліндричної форми.
6. Ізоляційний циліндр виводів вторинних обмоток.
7. Металева труба підставки активної частини, що виконує роль «нульової» обкладинки.
8. Коробка виводів вторинних обмоток.

9. Кожух на вентиль заповнення електричним газом.
10. Вентиль.
11. Цоколь (підставка).
12. Вивід для заземлення.
13. Манометр для контролю тиску електричного газу.
14. Кожух на манометр.
15. Високовольтний порожній ізолятор (покривка).
16. Кожух на первинні виводи.
17. Первинна обмотка.
18. Металевий бак (корпус).

Також відома конструкція ТС з екраном конічної форми, що показана на рис. 10 а. У даній конструкції трансформатора струму для вирівнювання розподілу напруженості поля вздовж опорної ізоляційної конструкції застосовується просторовий тороїдальний екран, виконаний з алюмінію [13, 14].

З метою економії кольорових металів пропонується замінити просторовий екран на подвійний тороїдальний, а також – матеріал екрану, зокрема замінити мідь на алюміній. За рахунок застосування такого технічного рішення знижується матеріалоемність та вартість трансформатора струму загалом. Результати досліджень, які наведені у [10, 11], доводять, що при конструкції трансформатора з потрійним тороїдальним екраном зі співвісних тороїдів (див. рис. 10 г) середній, який екранований з обох сторін, використовується неефективно, тобто напруженість поля вздовж його поверхні є значно меншою, ніж на інших крайніх тороїдах.

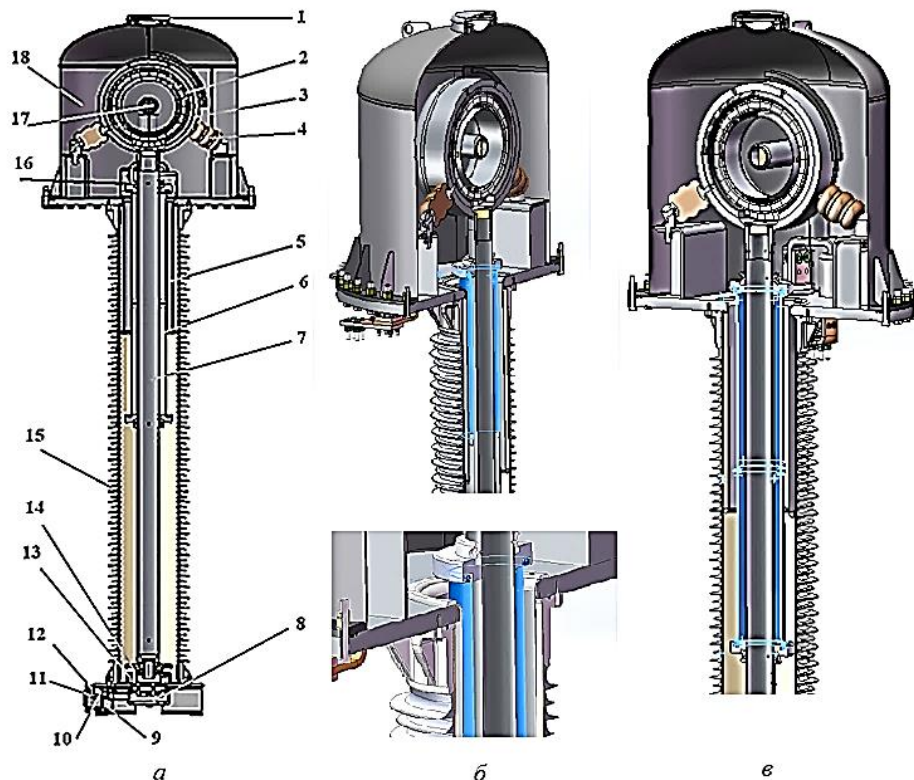


Рисунок 8 – Вид загальний та конструктивна схема електричного трансформатора струму серії ТОГ-245:  
а та б – конструкція ТС із вбудованим просторовим екраном циліндричної форми;  
в – конструкція ТС із вбудованим просторовим тороїдальним потрійним екраном

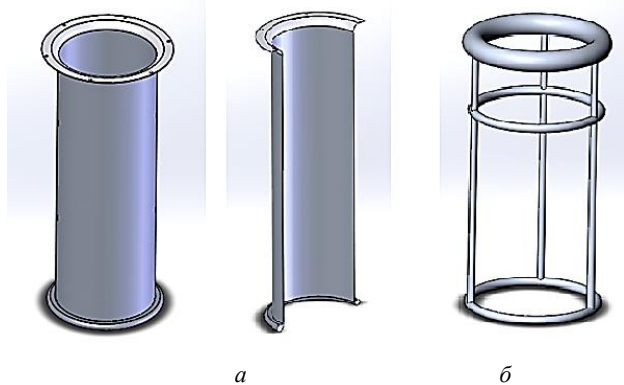


Рисунок 9 – Варіанти виконання вбудованого просторового екрану циліндричної форми

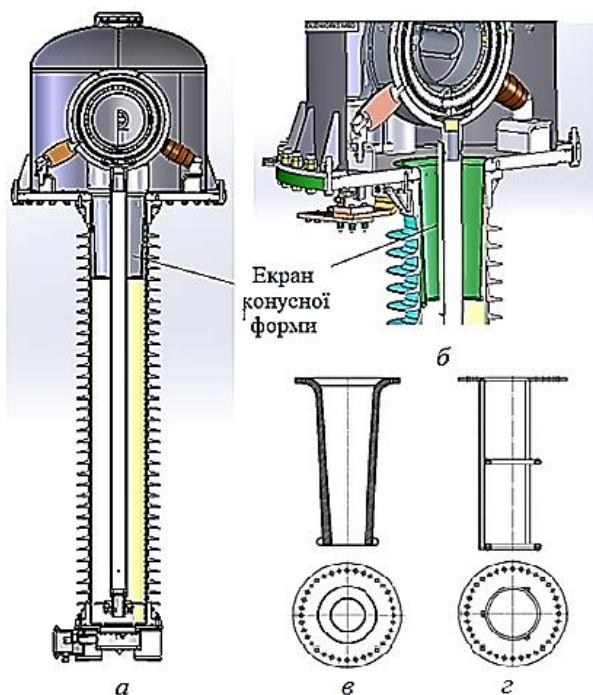


Рисунок 10 – Варіанти виконання вбудованого просторового екрану циліндричної форми [15–17]

В роботах [1, 10, 11] показано, що оптимальні розміри тороїдів та їх співвідношення можна 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, 10, 11]. Для визначення ефективності системи екранування було проаналізовано три варіанти раніше зазначених системи екранування: одиночний конусний екран, подвійний та потрійний тороїдальні екрани (див. рис. 10 в), з чого було отримано висновок, що для забезпечення більш глибокого обмеження напруженості поля можна використовувати комбіновані (розщеплені) тороїдальні екрани, які

мають однаковий потенціал та розташовані на різних рівнях відносно високовольтного електроду.

Авторами було розраховано і отримано в графічній формі розподіл напруженості поля в умовах використання двох еквіпотенційних тороїдальних екранів, як показано на рис. 11.

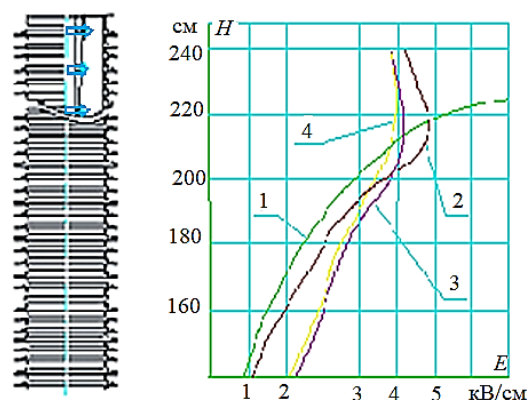


Рисунок 11 – Графіки розподілу напруженості поля  $E$  вздовж поверхні ізоляційної покриття ТС ТОГ-245 Н: 1 – без тороїдального екрану; 2, 3, 4 – відповідно з одинарним, подвійним та потрійним тороїдальними екранами [10, 11]

Аналіз отриманих авторами в роботі [1, 10, 11] залежностей показує, що використання подвійного та потрійного розщеплених екранів забезпечує практично однакову картину розподілу напруженості поля уздовж ізоляційної покриття. Отже виходить, що 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 технічно, оскільки вони визначаються конструкцією покриття (внутрішній діаметр) та ізоляційними проміжками внутрішньої ізоляції. Впливати на напруженість з метою її зниження можна наступними технічними рішеннями: по-перше, – це зміння радіусу труби тороїдів; по-друге, – розміщенням тороїдів по висоті вздовж електроду з високою напругою та відносно одне до одного по висоті ізоляційної конструкції. Результати оцінки впливу висоти встановлення тороїдів, що отримані на основі вище приведеної методики показано на рис. 12, 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 [10, 11].

Як видно з рис. 12 оптимальна структура системи екранування складається з двох тороїдів, які розміщені на одній осі за умови, що відстань від верхнього електроду до першого тороїда має довжину 25 мм, а до другого тороїда – 65 мм.

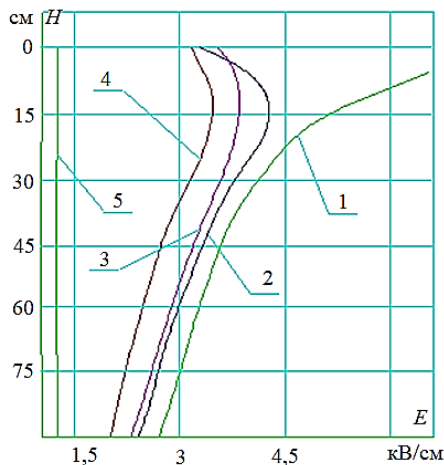


Рисунок 12 – Графіки розподілу напруженості поля  $E$  в залежності від висоти розміщення тороїдів відносно електрода з високою напругою  $H$  (див. поз. 16 на рис. 8)

Подальшого зниження напруженості можна досягнути за рахунок збільшення радіусу труби, з якої виготовлені тороїди, тобто це дає можливість суттєво знизити напруженість за умови дії імпульсних перенапруг, але при цьому підвищується матеріалоемність конструкції системи екранування.

Як показують дослідження [10, 11], значного ефекту щодо вирівнювання розподілу напруженості завдяки встановленню внутрішніх екранів в зоні електрода з високим потенціалом можливо отримати в електричних апаратах з класом напруги до 220 кВ включно. Для вищих напруг ефективність регулювання напруженості шляхом встановлення внутрішніх екранів суттєво знижується, тому на класи напруги 330 кВ та 500 кВ більш ефективним засобом внутрішнього екранування є використання конденсаторних обкладинок (конденсаторів) [11].

Підвищення ефективності систем екранування з використанням тороїдальних екранів в умовах класів напруги вище за 330 кВ можливо отримати за рахунок використання просторової системи екранів, що розміщуються зовні ІК вздовж її висоти (див. рис. 1–6). При цьому максимального ефекту можливо досягти, якщо застосувати систему екранів, що мають різні потенціали відносно номінальної напруги. Дослідження ефективності та можливостей вдосконалення системи екранування з різними потенціалами авторами [10, 11] проведено на прикладі опорно-ізоляційної покришки газонаповненого трансформатора струму серії ТОГ-525 та обмежувача перенапруги серії ОПН-500. Результати цих досліджень показують, що досягти суттєвого ефекту можна за рахунок вибору оптимальних розмірів елементів системи екранування, ефективність якої у кожному конкретному випадку дозволяє визначити наведеною в цих роботах методикою. Припущення, які при цьому приймаються, суттєво не впливають на результати розрахунків, особливо в тих випадках, коли вони проводяться для порівняльної оцінки ефективності системи екранування.

Додаткове зменшення електричного навантаження в безпосередній близькості до електрода

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.

**Висновок.** Аналіз вище наведених результатів досліджень та досвіду експлуатації ізоляційних конструкцій електричних апаратів над- та ультрависоких напруг показує, що існує гостра необхідність у зниженні напруженості поля в зоні електрода з високим потенціалом, де вона має максимальне значення. Причому це питання дуже важливе в умовах використання полімерних опорно-ізоляційних покришок в якості зовнішньої ізоляції. Значного ефекту в цьому напрямку можна отримати за рахунок встановлення відповідної системи екранування [1, 10, 11]. В даній роботі проведено аналіз таких систем та надано рекомендації, щодо їх впровадження при проектуванні та вдосконаленні ІК [10, 11]. В якості прикладів наведені результати досліджень ефективності впровадження системи екранування з використанням тороїдальних екранів в конструкціях газонаповнених трансформаторів струму серії ТОГ. Отримані результати можна використовувати для вдосконалення ІК інших видів електричних апаратів та окремих ізоляційних структур.

### Список літератури

1. Афанасьев О. І., Жорняк Л. Б., Шуть В. М. Електричні апарати високої напруги. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 356 с.
2. Василюк С. В., Василюк К. С. Техніка високих напруг : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2018. 187 с.
3. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / А. Ю. Орлович та ін. Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2019. 272 с.
4. Line Traps. *GE Vernova | The energy to change the world*. URL: [https://www.gevernova.com/grid-solutions/hmv\\_equipment/catalog/linetraps.htm](https://www.gevernova.com/grid-solutions/hmv_equipment/catalog/linetraps.htm).
5. Розподіл електроенергії. *Siemens*. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/kompaniya/pro-kompaniyu/istoriya-siemens/tehnolohiyi/vyrobnytstvo-ta-rozpodil-elektroenerhiyi/rozpodil-elektroenerhiyi.html>.
6. ABB. *Galantpol*. URL: <https://galantpol.com.ua/ua/brands/abb.html>.
7. High-voltage bushings with RIP insulation - for the voltage of 35 - 220 kV solid. *ABB Library*. URL: <https://library.abb.com/d/1LAB000569>.
8. Елегазові трансформатори струму серії ТОГ. *ТОВ «ЕЛІЗ»*. URL: [http://eliz.zp.ua/catalog-eliz/transformatory-izmeritelnie/gaz\\_transformatory\\_toka/233-elegazov-transformatory-strumu-seryi-tog.html](http://eliz.zp.ua/catalog-eliz/transformatory-izmeritelnie/gaz_transformatory_toka/233-elegazov-transformatory-strumu-seryi-tog.html).
9. Обмежувач перенапруги ОПН-П-150/100/10/750 УХЛ1. *ТОВ «СБЕТ»*. URL: <https://sebt.com.ua/obmezhuвач-perenapruhy-opn-p-150-100-10-750-ukhl1/>.
10. Жорняк Л. Б., Афанасьев О. І., Шуть В. М. Оптимізація системи внутрішнього екранування в газонаповнених високовольтних електричних апаратах із полімерною ізоляцією. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2022. № 1 (7). С. 8–12. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.1.02>.
11. Особливості оцінки надійності зовнішньої полімерної ізоляції газонаповнених вимірювальних трансформаторів / Л. Б. Жорняк та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2021. № 2 (6). С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.2.01>.
12. Український Інститут Трансформаторобудування. *АТ «ВІТ»*. URL: <http://www.vit.zp.ua/>.

13. Запорізький завод високовольтної апаратури. КО «Запорізький завод високовольтної апаратури». URL: <http://zva.zp.ua/>.
14. Запорізький трансформаторний завод. ТОВ «ЕЛІЗ». URL: <http://www.eliz.zp.ua/>.
15. Трансформатори вимірювальні. Компанія СЕА. URL: <https://www.sea.com.ua/oborudovanie-dlya-energetiki/transformatory-izmeritelnye>.
16. ТОВ «Науковий інноваційно-технологічний трансформаторний завод «НІТТЗ». YouControl. URL: [https://youcontrol.com.ua/catalog/company\\_details/44338594/](https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/44338594/).
17. Трансформатори струму елегазові серії ТОГ, 110-750кВ. ТОВ «ВІ «ЗТА». URL: <https://zta.energy/uk/catalog/transformatori-strumu-elegazovi-serii-tog-110-750kv/>.
8. “SF6 current transformers of the ТОГ series.” TOV “ELIZ.” [Online]. Available: <http://en.eliz.zp.ua/sf6-current-transformers/>
9. “Obmezhuvach perenapruhy OPN-P-150/100/10/750 UKhL1 [Surge arrester OPN-P-150/100/10/750 UHL1].” TOV “SEBT.” [Online]. Available: <https://sebt.com.ua/obmezhuvach-perenapruhy-opn-p-150-100-10-750-ukhl1/> (in Ukrainian)
10. L. Zhorniak, O. Afanasiev, and V. Schus, “Optimization of the internal shielding system in gas filled high voltage electric appliances with polymer insulation”, *Bulletin of National Technical University “KhPI”. Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 1 (7), pp. 8–12, 2022, doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.1.02> (in Ukrainian)
11. L. Zhorniak, O. Afanasiev, V. Schus, O. Morozov, and J. Rudenko, “Estimation peculiarities of external polymer insulation reliability of gas-filled instrument transformers”, *Bulletin of National Technical University “KhPI”. Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 2 (6), pp. 3–9, 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2021.2.01> (in Ukrainian)
12. “Ukrainian transformer institute.” JSC “VIT.” [Online]. Available: <http://www.vit.zp.ua/>
13. “Zaporizkyi zavod vysokovoltnoi aparatury.” КО “Zaporizkyi zavod vysokovoltnoi aparatury”. [Online]. Available: <http://zva.zp.ua/> (in Ukrainian)
14. “Zaporizhzhya transformer plant.” LLC “ELIZ.” [Online]. Available: <http://www.eliz.zp.ua/>
15. “Measuring transformers.” SEA Company. [Online]. Available: <https://www.sea.com.ua/oborudovanie-dlya-energetiki/transformatory-izmeritelnye> (in Ukrainian)
16. “NITZZ Scientific and Innovative Plant of Technological Transformers LLC.” YouControl. [Online]. Available: [https://youcontrol.com.ua/catalog/company\\_details/44338594/](https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/44338594/) (in Ukrainian)
17. “Gas-insulated current transformers TOG series, 110-750kV.” “PS” ZTA LLC. [Online]. Available: <https://zta.energy/en/catalog/gas-insulated-current-transformers-tog-series-110-750kv/>

## References

1. O. I. Afanasiev, L. B. Zhorniak, and V. M. Shchus, *Elektrychni aparaty vysokoi napruhy [Electrical devices of high voltage]*. Zaporizhzhia: NU “Zaporizhzhia Polytechnic”, 2021. (in Ukrainian)
2. S. V. Vasylets and K. S. Vasylets, *Tekhnika vysokokh napruh [High voltage technology]*. Rivne: NUVHP, 2018. (in Ukrainian)
3. A. Yu. Orlovych, P. H. Plieshkov, O. A. Kozlovskiy, O. V. Spivak, A. I. Kotysh, and T. V. Velychko, *Elektrychne obladnannia pidstantsii system elektropostachannia [Electrical equipment of substations of power supply systems]*. Kropyvnytskyi: Vyd. Lysenko V. F., 2019. (in Ukrainian)
4. “Line Traps.” GE Vernova | The energy to change the world. [Online]. Available: [https://www.governova.com/grid-solutions/hvmv\\_equipment/catalog/linetraps.htm](https://www.governova.com/grid-solutions/hvmv_equipment/catalog/linetraps.htm)
5. “Power distribution.” Siemens. [Online]. Available: <https://www.siemens.com/global/en/company/about/history/technology/power-generation-and-distribution/power-distribution.html>
6. “ABB.” Galantpol. [Online]. Available: <https://galantpol.com.ua/ua/brands/abb.html> (in Ukrainian)
7. “High-voltage bushings with RIP insulation - for the voltage of 35 - 220 kV solid.” ABB Library. [Online]. Available: <https://library.abb.com/d/1LAB000569>

Надійшла (received) 17.06.2024

## Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

**Жорняк Людмила Борисівна (Liudmyla Zhorniak)** – 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: [zproton@zp.edu.ua](mailto:zproton@zp.edu.ua).

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

**Щуць Віталій Миколайович (Vitaliy Schus)** – аспірант кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: [Nitzz.ltd@gmail.com](mailto:Nitzz.ltd@gmail.com).