

УДК 621.613

Л.Б. ЖОРНЯК, О.І. АФАНАСЬЄВ, Р.С. ЛЕОНОВ, А.В. КАРПУК

МОЖЛИВОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ЗОВНІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ГАЗОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

Пропонуються методи регулювання розподілу напруженості уздовж опорної ізоляційної покривки газонаповнених трансформаторів струму. У запропонованих методах розглядається колона з послідовно з'єднаних опорних ізоляторів, головними елементами схеми заміщення обрані особиста ємність окремої частини опорного ізолятора і його часткові ємності на землю та струмоведучі елементи. Таким чином зроблено висновок щодо можливості покращення розподілу напруги та зменшення неоднорідності електричного поля.

Ключові слова: розподіл напруженості, ізоляційна покривка, напівпровіднє покриття, екран, ємність.

Предлагаются методы регулирования распределения напряженности вдоль опорной изоляционной покрывки газонаполненных трансформаторов тока. В предложенных методах рассматривается колонна из последовательно соединенных опорных изоляторов, главными элементами схемы замещения выбраны определенная емкость отдельной части опорного изолятора и его частичные емкости на землю и токоведущие элементы. Таким образом сделан вывод о возможности улучшения распределения напряжения и уменьшения неоднородности электрического поля.

Ключевые слова: распределение напряженности, изоляционная покрывка, полупроводниковое покрытие, экран, емкость.

There have been proposed methods of intensity distribution regulation along external isolator of gas-filled current transformers. In the offered methods the column from sequentially connected insulators is considered, the principal circuit elements of substitution selected a certain capacity of a separate part of the reference isolation center and its partial capacities on the earth and conductive elements. Thus, it was concluded a possibility of improving of intensity distribution regulation and reduction of non-uniformity of an electric field.

Keywords: intensity distribution, external isolator, semiconductor covering, screen, capacity.

Вступ. Ізоляція є найважливішим елементом конструкції електричних апаратів і суттєво впливає як на її конструкцію, так і на експлуатаційну надійність, особливо в апаратах на зверх високі напруги. В цих умовах форма електродів така, що утворює різномірне електричне поле та, як наслідок цього-суттєву нерівномірність електричного навантаження на ізоляцію. У таких апаратах, як вимірювальні трансформатори струму та напруги, обмежувачі перенапруг, які мають опорну ізоляційну конструкцію (покривку) з проходжними всередині неї заземленими або струмоведучими частинами утворюється різна нерівномірність розподілу напруги і напруженості поля уздовж ізоляційної покривки від електрода з високим потенціалом до землі.

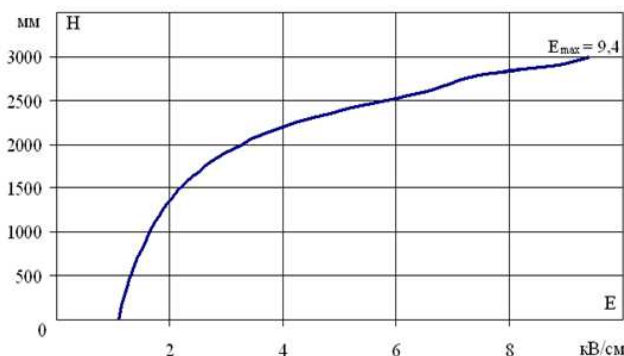


Рис. 1 – Розподіл напруженості електричного поля уздовж поверхні ізоляційної покривки без застосування способів вирівнювання електричного поля

У сучасному апаратобудуванні для виготовлення ізоляційних покривок все ширше використовують полімерну ізоляцію. В цьому випадку покривка виконується у вигляді комбінованого ізолятора, який складається з ізоляційного циліндру, армованого скловолокном з наплавними силіконовими ребрами. Крім суттєвих переваг такої конструкції вона має

такий недолік, як знижена, у порівнянні з фарфоровою ізоляцією, робоча напруженість поля, яка не повинна перевищувати (6...7) кВ/см [1, 2]. Тому оцінка і аналіз розподілу напруженості поля по висоті такої ізоляційної конструкції з урахуванням засобів по вирівнюванню розподілу напруги (зовнішні тороїдальні екрани, внутрішня конденсаторна ізоляція) мають суттєвий інтерес для подальшого вдосконалення апаратів високої напруги та підвищення їх експлуатаційної надійності.

Характерною рисою електростатичного поля полімерних ізоляторів є наявність максимуму напруженості поблизу електрода. Полімерні ізолятори схильні до старіння через дії нерівномірного електричного поля в більшій мірі, ніж їх порцелянові аналоги. Тому важливим етапом проектування стає розрахунок і дослідження електричних полів.

У більшості випадків при конструюванні електричної ізоляції не вдається використати кращу її форму з точки зору отримання найбільш вигідного для роботи електроізоляційних матеріалів рівномірного поля. У рівномірному полі ділянки електроізоляційного матеріалу навантажуються практично однаковою напруженістю поля, тобто має місце краще його використання. В нерівномірному полі окремі ділянки електроізоляційної конструкції несуть підвищене електричне навантаження, що може привести до досить швидкого руйнування матеріалів перевантажених областей, а на решту частин буде діяти підвищена напруженість поля, що також призводить до руйнування. Метою регулювання електричного поля є підвищення однорідності електричного поля. Вирівнювання електричного поля в тілі ізолятора і по його поверхні дозволяє зменшувати габарити ізоляційних конструкцій.

Високовольтне обладнання підстанцій (силові і вимірювальні трансформатори, вимикачі, роз'єднувачі, розрядники і ін.) забезпечується спеціальними екранами, призначеними для обмеження коронного розряду на елементах

конструкцій, що знаходяться під високою напругою. Залежно від місця розташування екранів їх поділяють на зовнішні і внутрішні. Зовнішні екрани встановлюються на обладнанні поза основної частини твердої ізоляції. Зовнішні екрани у вигляді куль, кілець, рогів, що встановлюються на кінцях і по довжині конструкції, вирівнюють електричне поле і тим самим підвищують напругу появи коронного розряду, а в деяких випадках і пробивна напруга. Внутрішні або вбудовані екрани встановлюються в межах основних габаритних розмірів твердої ізоляції. Внутрішні екрани знаходять застосування в ізоляції прохідних і опорних ізоляторів, електричних машин, трансформаторів і інших конструкцій. У порівнянні з зовнішніми екранами внутрішні мають ту перевагу, що їх установка не призводить до збільшення зовнішніх габаритних розмірів конструкції. Екрани використовуються також для вирівнювання розподілу напруги уздовж ізоляційних конструкцій електричних апаратів. Завдяки цьому вдається помітно підвищити їх електричну міцність в сухому стані і при дуже слабкому зволоженні, коли струм витоку по поверхні ізоляторів досить малий [5].

Градуювання ізоляції як спосіб підвищення електричної міцності ізоляції найбільшого поширення набув у високовольтних конструкціях з комбінованою ізоляцією, перш за все кабелях з паперово-масляною ізоляцією. Є також досвід його використання в кабелях з полімерною ізоляцією. Якщо поблизу електрода, що задає неоднорідність електричного поля, помістити електроізоляційний матеріал з більшою діелектричною проникністю (для пристроїв, що працюють на змінному та імпульсному напруженні) або з більшою провідністю (для пристроїв постійної напруги), то область з максимальною напруженістю поля переміщається на кордон шарів діелектрика, а абсолютне значення $E_{\max}$ істотно знижується, т. е. коефіцієнт неоднорідності поля зменшується, коефіцієнт використання ізоляції збільшується. Застосування градування ізоляції економічно доцільно лише в кабелях на найвищі класи напруги (1000 кВ і вище). Для дискових і стрижневих ізоляторів струмопроводу з еластичною ізоляцією, для прохідних ізоляторів, трансформаторів перспективним способом підвищення $U_{\text{пр}}$ і $U_{\text{пер}}$ є безперервне градування, здійснюване введенням в монолітну полімерну ізоляцію наповнювачів (наприклад, рутилової кераміки, титанату кальцію).

Ідея секціонування тіла ізолятора з метою зменшення неоднорідності поля за допомогою проміжних електродів виникла на основі зручного і широко поширеного способу регулювання поля в високовольтних пристроях з паперово-масляною, паперово-плівкового ізоляцією за допомогою конденсаторних обкладок. Вони являють собою додаткові напilenі або фольгові електроди під «плаваючим» потенціалом. При змінному і імпульсному напруженні розподіл поля визначається співвідношенням ємностей, утворених обкладками і електродами, а при постійній напрузі - опором шарів ізоляції. Підбором розмірів, числа і взаіположення додаткових електродів вдається істотно зменшити

ступінь неоднорідності поля в основній ізоляції, як в радіальному, так і в осьовому напрямку. Для високовольтних конденсаторів перспективними діелектриками виявилися полімерні плівки, які при малій товщині мають дуже високу $E_{\text{пр}}$. Такі ізоляційні структури широко застосовуються в конденсаторах, трансформаторах і кабелях [15].

Методи розрахунку зовнішніх екрануючих пристроїв для вирівнювання розподілу напруги уздовж опорної ізоляції розглянуті в [1, 2, 5], внутрішніх конденсаторних обкладок у [4]. У цих роботах розглядається колона з послідовно з'єднаних опорних ізоляторів, головними елементами схеми заміщення обрані особиста ємність окремої частини опорного ізолятора і його часткові ємності на землю та струмоведучі елементи (шини). Активна провідність при умові сухої та чистої поверхні ізоляторів у порівнянні з ємнісною не враховується. За допомогою зовнішніх екранів у вигляді кільцевої або більш складної форми змінюють співвідношення часткових ємностей окремих ділянок опорної ізоляційної конструкції. Таким чином можливо покращити розподіл напруги та зменшити неоднорідність електричного поля.

На відміну від збірної колони опорних ізоляторів ізоляційна покрішка вимірювальних трансформаторів є монолітною та має всередині конструктивні елементи, які розміщені у середині труби. Вони можуть мати високий потенціал (виводи трансформатора струму) або заземлені (виводи трансформатора струму). Для проведення аналізу розподілу напруги уздовж покрішки її можливо уявити як еквівалентну схему заземлення. Для її побудови циліндричну покрішку з висотою l умовно поділяємо на випадкову кількість рівних по висоті відрізів (елементів) висотою l_i . З урахуванням того, що на кожному зі зрізів покрішки точки, що рівновіддалені від вертикальної осі, будуть мати однакові потенціали, ємнісну схему заміщення зовнішньої ізоляції можливо уявити у зручному для аналізу вигляді, що представлено на рис. 2. В цьому випадку ізоляційна покрішка апроксимується у вигляді електричного елементу $C1$, ємність елементу по відношенню до центральної труби $C4$, тобто значення цих ємностей можливо визначити за умовами [5]. Для розглянутих класів напруг висота ізоляційної покрішки l суттєво перевищує значення емпіричного коефіцієнту (a), тобто $l \gg a$, тому величина ємностей $C1 \dots C4$ у фарадах визначаються з умов

$$C1 = \frac{35,4 \cdot 10^{-14} \cdot \epsilon \cdot r}{1 - 0,637 \cdot \frac{r}{l}} \quad (1)$$

$$C2 = 1,11 \cdot \epsilon \cdot \left(1 + \frac{r_e}{2h_e} + \frac{r_e^2}{4h_e^2} \right) \cdot 10^{-12}, \quad (2)$$

$$C3 = (0,10 \dots 0,12) C2 \dots \quad (3)$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу;

r – радіус ізоляційної частини покрішки, см;

l – висота ізоляційної частини покрішки, см;

r_e – радіус еквівалентної кулі, яка апроксимує

елемент ізоляційної покривки, см

$$r_e = 0,2235(b + d), \quad (4)$$

де b , d – відповідно висота та діаметр елемента покривки, см.

h_e – середня висота від центру еквівалентної кулі, якою апроксимується верхній електрод до землі, см.

Середня висота від центру еквівалентної кулі визначається з умови

$$h_e = 0,5l + 250. \quad (5)$$

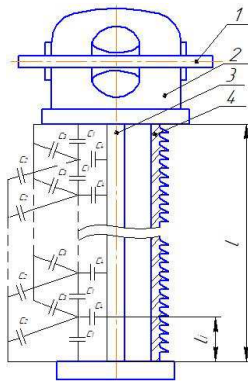


Рис. 2 – Смнісна схема заміщення ізоляційної покривки

Смність елемента покривки по відношенню до центральної труби C_4 визначається як смність циліндричного конденсатора за умовою [2]

$$C_4 = \frac{2\pi\epsilon \cdot l_i}{\ln \frac{r}{r_T}}, \quad (6)$$

де l_i – висота елемента ізоляційної покривки;

r , r_T – відповідно радіуси покривки та центральної труби.

Необхідні початкові дані та методика розрахунку розподілу напруги уздовж ізоляційної покривки приведені у [5]. Для проведення досліджень ефективності впливу системи екранування на розподіл напруги уздовж покривки газонаповненого трансформатора струму розроблено програмне забезпечення Red.Volt., що дозволяє за результатами розрахунку обрати оптимальне співвідношення параметрів системи екранування. Результати досліджень впливу діаметра труби екрана, діаметра екрана та висоти його встановлення показані на рис. 3, а-3, в.

Як показують дані рис. 3, а, використання внутрішнього тороїдального екрана крива у межах габариту бака трансформатора дозволяє суттєво вирівняти розподіл напруги та зменшити навантаження на ізоляцію до 20% у порівнянні з стандартним базовим вбудованим екраном без суттєвого зростання масо-габаритних показників трансформатора.

Підвищення діаметра труби екрана здійснює значно менший вплив на розподіл напруги, однак може підсилити ефект вирівнювання розподілу напруги додатково до 5% (крива 6).

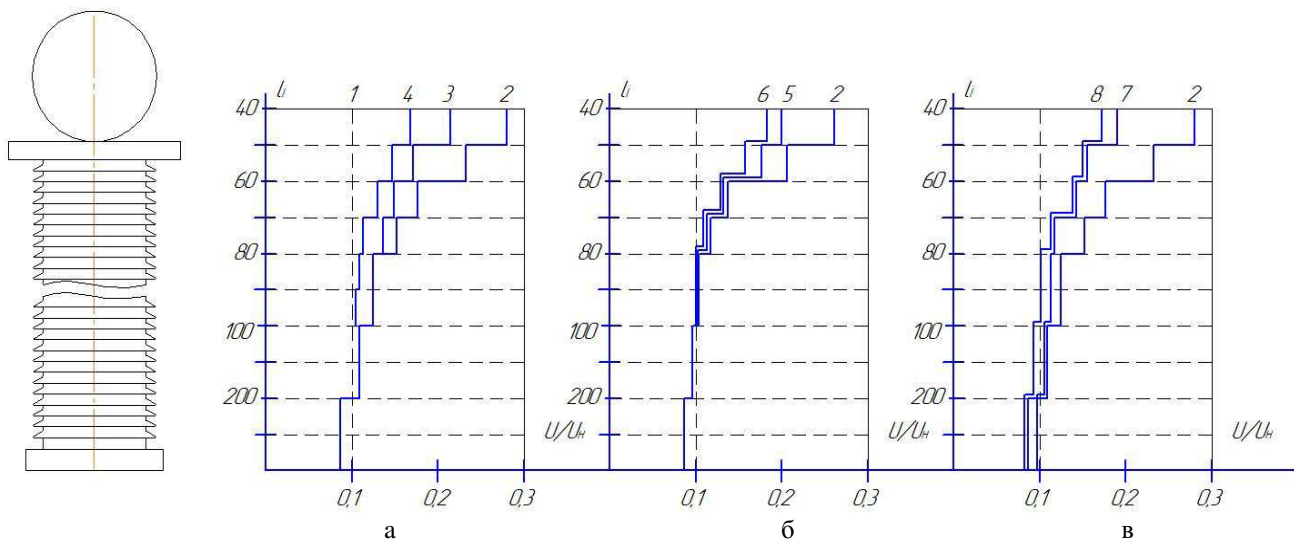


Рис. 3 – Вплив параметру екрана на розподіл напруги уздовж ізоляційної покривки трансформатора струму ТОГ-232:

а – вплив діаметру екрана; б – вплив діаметру труби екрана; в – вплив висоти встановлення екрана;

Висота встановлення екрана у порівнянні з базовим варіантом виконання практично не впливає на розподіл напруги (крива 7). Однак використання подвійного екрана (крива 8) діє можливість додатково знижити неоднорідність розподілу напруги.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє оцінити комплексний вплив змін параметрів системи екранування, наприклад при подальшому вдосконаленні окремих конструктивних елементів, заміні матеріалів для їх виготовлення та ін.

Висновки. Як показує аналіз отриманих даних величини часткових ємностей $C_1 \dots C_3$ для конкретної конструкції ізоляційної покривки відносно стабільні та їх регулювання потребує суттєвих конструктивних рішень. Більшого впливу на зменшення нерівномірності розподілу напруги можливо досягнути змінюючи величину часткової ємності C_4 . Ефективність цього процесу можна показати на рис. 4 при умові змінення ємності окремих елементів покривки у верхній її частині, де має місце найбільш

неоднорідний розподіл напруги. В якості засобу регулювання ємності можна використовувати напівпровідні покриття внутрішньої поверхні ізоляційної покритишки.

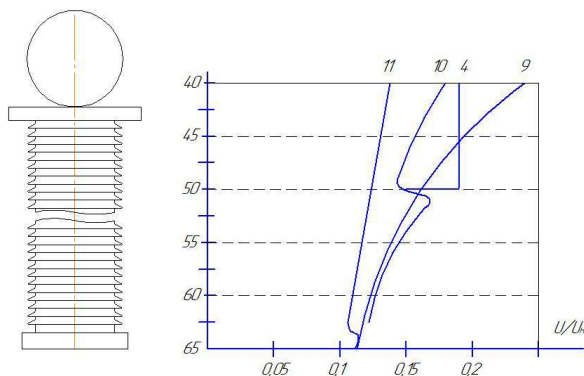


Рис. 4 – Ефективність впливу змінення C_4 на розподіл напруги уздовж ізоляційної покритишки

Як приклад оцінки ефективності цього засобу є використання напівпровідного покриття з $S=.....$ відрізка (40...50)см (крива 10) на відрізка (40...65)см (крива 9). Більш точного визначення впливу вищезазначених методів регулювання розподілу напруги можна досягти проведенням додаткової серії розрахунків та експериментальних випробувань.

Список літератури

1. Александров, Г.Н. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения: учеб. / Г. Н. Александров, В. Л. Иванов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
2. Афанасьев, В.В. Трансформаторы тока: учеб. / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
3. Базуткин, В. В. Техника высоких напряжений / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 446 с.
4. Бачурин, Н.И. Трансформаторы тока: учеб. / Н.И. Бачурин. – М.: Энергия, 1964. – 376 с.
5. Дмитриевский, В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции: учеб. / В. С. Дмитриевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
6. Колечицкий, Е. С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / Е. С. Колечицкий. – М.: Энергоиздат, 1983. – 168 с.
7. Кучинский, Г. С. Изоляция установок высокого напряжения: учеб. / Г. С. Кучинский, В. Е. Кизеветтер, Ю. С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
8. Куртенов, Г. Е. Основы проектирования изоляции высоковольтного электрооборудования: учеб. пособие / Г. Е. Куртенов. – Томск: издательство НТЛ, 1999. – 276 с.
9. Лебедь, К. В. Применение полупроводящих покрытий в изоляции высоковольтных электрофизических установок / К. В. Лебедь // Современная техника и технологии. – 2008. – Т. 1. – С. 60-62.
10. Лебедь, К. В. Электропроводность и разрядные характеристики неорганических диэлектриков с полупроводящим покрытием: автореф. дис. к. т. н.: 20.06.2011 / К. В. Лебедь; [Национальный исследовательский Томский политехнический университет]. – Т., 2011. – 20 с.
11. Левшунов, Р. Т. Исследование изоляторов, покрытых полупроводящей глазурью / Р. Т. Левшунов // Электрические станции. – 1954. – №4. – С. 36-41.
12. Полтев, А. И. Конструкции и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения: учеб. / А. И. Полтев. – Л.: Энергия, 1979. – 240 с.

13. Полтев, А. И. Элегазовые аппараты: учеб. / А. И. Полтев. – Л.: Энергия, 1978. – 240 с.
14. Тарасюк, Г. М. Планирование деятельности предприятия: навч. посібник / Г. М. Тарасюк, Л. І. Шваб. – К.: «Каравела», 2003. – 432 с.
15. Ушаков, В. Я. Изоляция установок высокого напряжения / В. Я. Ушаков. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
16. Чунихин, А.А. Аппараты высокого напряжения: учебное пособие для вузов: учеб. / А.А. Чунихин, М.А. Жаворонков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
17. Экономика предприятия: учебник / под ред. С. Ф. Покропивного. – К.: КНЕУ, 2001. – 432 с.
18. ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. – Введ. 1997-04-12. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 50 с.
19. ГОСТ 7746-2001 Трансформаторы тока. Общие технические условия. – Введ. 2002-03-13. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 33 с.
20. ТУ 16-505.357-78 Провод обмоточный с эмажево-волоконистой изоляцией
21. ТУ 6-02-12-49-83 Элегаз повышенной чистоты
22. А. с. 2010409 РФ, МПК H02K3/40 Способ контроля эмали для покрытия, регулирующего электрическое поле / Ваксер Б. Д., Коган В. О. – 5032954/07; заявл. 17.03.1992; опубл. 30.03.1994, Бюл. № 9. – 4 с.
23. ОАО ВО «Электроаппарат» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ea.spb.ru>
24. Trenchcompany [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.trenchgroup.com/en>
25. КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zva.zp.ua>.

References (transliterated)

1. Aleksandrov, G.N. Insulation of high-voltage electric apparatus: Proc. GN Aleksandrov, VL Ivanov. - L.: Energoatomizdat, 1984. - 208 p.
2. Afanasyev, V.V. Current transformers: Proc. V.V. Afanasyev, N.M. Adoniev, V.M. The cable. - L.: Energoatomizdat, 1989. - 416 p.
3. Bazutkin, V. V. Technique of high stresses. VV Bazutkin, VP Lariouov, Yu. S. Pinal. - M.: Energoatomizdat, 1986. - 446 p.
4. Bachurin, N.I. Transformers: teaching. N.I. Bachurin. - M.; - L.: Energy, 1964. - 376 p.
5. Dmitrevsky, VS Calculation and design of electrical insulation: Proc. V.S. Dmitrevsky. - M.: Energoizdat, 1981. - 392 p.
6. Kolechitsky, ES Calculation of electric fields of high-voltage devices. ES Kolechitsky. - M. Energoizdat, 1983. - 168 p.
7. Kuchinsky, GS Insulation of high voltage installations: Proc. GS Kuchinsky, VE Kizevetter, Yu. S. Pinal. - M.: Energoatomizdat, 1987. - 368 p.
8. Kurtenkov, GE Fundamentals of designing the insulation of high-voltage electrical equipment: Textbook. allowance. GE Kurtenkov. - Tomsk: NTL Publishing House, 1999. - 276 p.
9. Lebed, K. V. Application of semiconductive coatings in the insulation of high-voltage electrophysical installations. K. V. Lebed. Modern techniques and technologies. - 2008. - T. 1. - P. 60-62.
10. Lebed, K. V. Electrical conductivity and discharge characteristics of inorganic dielectrics with a semiconducting coating: the author's abstract. dis. Cand. Sc.: 20.06.2011. K.V. Lebed; [National Research Tomsk Polytechnic University]. - T., 2011. - 20 seconds.
11. Levshunov, RT Investigation of Insulators Covered with Semiconducting Icing. RT Levshunov. Electric Stations. - 1954. - № 4. - P. 36-41.
12. Poltev, AI Designs and calculation of high-voltage SF6 apparatus: Proc. AI Poltev. - L.: Energy, 1979. - 240 p.
13. Poltev, A. I. Elegazoapparaty: training. AI Poltev. - L.: Energy, 1978. - 240 p.
14. Tarasyuk, G.M. Planuvannya діяльності підприємства: навч. Posobnik. G.M. Tarasyuk, L.I. Schwab. - K.: "Caravel", 2003. - 432 p.
15. Ushakov, V. Ya. Insulation of high voltage installations. V. Ya. Ushakov. - M.: Energoatomizdat, 1994. - 496 p.
16. Chunikhin, A.A. Apparatuseshigh stress: training for universities: Textbook. A.A. Chunikhin, M.A. Larks. - M.: Energoatomizdat, 1985. - 432 p.
17. The economy of the enterprise: a textbook. ed. SF Pokropivnogo. - K.: KNEU, 2001. - 432 p.

18. ГОСТ 1516.3-96 AC electrical equipment for voltage from 1 to 750 kV. - Enter. 1997-04-12. - M.: Publishing house of standards, 1997. - 50 p.
19. ГОСТ 7746-2001 Current transformers. General specifications. - Enter. 2002-03-13. - M.: Publishing house of standards, 2002. - 33 p.
20. TU 16-505.357-78 Winding wire with enamel-fibrous insulation
21. TU 6-02-12-49-83 High-purity gas monoxide
22. A. with. 2010409 RF, IPC H02K3. 40 Method of enamel control for coating that regulates the electric field. Vakser BD, Kogan VO - 5032954/07; claimed. 17.03.1992; publ. 30.03.1994, Bul. № 9. - 4 with.
23. JSC VO "Electroapparat" [Electronic resource] - Access mode: <http://www.ea.spb.ru>
24. Trenchcompany [Electronic resource] - Access mode: <http://www.trenchgroup.com/en>
25. KO "Zaporozhye plant of high-voltage equipment" [Electronic resource] - Access mode: <http://www.zva.zp.ua>.

Поступила (received) 31.08.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Можливості компенсації напруженості електричного поля зовнішньої ізоляції високовольтних газонаповнених трансформаторів струму / Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, Р.С. Леонов, А.В. Карпук // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 14–18. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2079-3944.

Возможности компенсации напряженности электрического поля внешней изоляции высоковольтных газонаполненных трансформаторов тока / Л.Б. Жорняк, А.И. Афанасьев, Р.С. Леонов, А.В. Карпук // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 14–18. – Библиогр.: 25 назв. – ISSN 2079-3944.

The possibilities of compensating the electric field strength of external insulation of high-voltage gas-filled current transformers / L.B. Zhornyak, A.I. Afanasiev, R.S. Leonov, A.V. Karpuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 14–18. – Bibliography: 25. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жорняк Людмила Борисівна – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя; тел.: (050) 257-05-10.

Жорняк Людмила Борисовна – кандидат технических наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье. тел. (050) 257 10.

Zhornyak Lyudmila Borisovna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Zaporizhya National Technical University; tel.: (050) 257 10.

Афанасьєв Олексій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя; тел.: (067) 833-70-35

Афанасьев Алексей Иванович – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье. тел.: (067) 833-70-35.

Afanasiev Alexej Ivanovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Zaporizhya National Technical University; tel.: (067) 833-70-35.

Леонов Роман Сергійович – Запорізький національний технічний університет, студент; тел.: (066) 695-87-67; e-mail: leonov5555@ukr.net.

Леонов Роман Сергеевич – Запорожский национальный технический университет, студент; тел.: (066) 695-87-67; e-mail: leonov5555@ukr.net.

Leonov Roman Sergeevich – Zaporizhya National Technical University, student; tel.: (066) 695-87-67; e-mail: leonov5555@ukr.net.

Карпук Антоніна Василіївна – Запорізький національний технічний університет, студент; тел.: (063) 484-27-89.

Карпук Антонина Васильевна – Запорожский национальный технический университет, студент; тел.: (063) 484-27-89.

Karpuk Antonina Vasilievna – Zaporizhya National Technical University, student; tel.: (063) 484-27-89.