

С. Атарод, В.О. Бржезицький, Я.О. Гаран, І.М. Маслюченко

РОЗРАХУНОК НАВЕДЕНОГО ПОТЕНЦІАЛУ В ЗАДАЧІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПОДІЛЬНИКА НАПРУГИ

Розглянуто модель високовольтного подільника напруги, в якій враховується вплив наведеного потенціалу окремих секцій конструкції високовольтного плеча на загальну картину електричного поля. Запропоновано новий метод розрахунку геометричних параметрів високовольтного плеча та потенціалів окремих секцій подільника напруги.

Рассмотрена модель высоковольтного делителя напряжения, в котором учитывается влияние наведенного потенциала отдельных секций конструкции высоковольтного плеча на общую картину электрического поля. Предложен новый метод расчета геометрических параметров высоковольтного плеча и потенциалов отдельных секций делителя напряжения.

ВСТУП

Традиційно до вимірювань високих напруг висуваються значно менш "жорсткі" вимоги у порівнянні з вимірюваннями напруг аналогічних форм залежності зміни у часі в діапазоні десятків – сотень вольт, які на відміну від високих напруг звичайно називають "низькими" напругами. Зазначене положення обумовлене реально протікаючими складними, нелінійними процесами та просторово-польовими взаємодіями, що характерні для пристроїв високої напруги [1]. Висока матеріалоемність та вартість, відсутність (як правило) дублювання вузлів високої напруги та інші фактори обумовлюють в останній час підвищення вимог до точності вимірювань в техніці високих напруг.

Вищезазначене пояснює інтерес, який постійно зростає до точності високовольтних вимірювань, зазначений у багатьох публікаціях. В цьому ж напрямі сформовані документи Міжнародної електротехнічної комісії [2].

Розвиток теорії високовольтних подільників напруги є актуальним в зв'язку з тим, що ця категорія високовольтних масштабних перетворювачів є обов'язковою для визначення показників якості електричної енергії на високій напрузі. Тому визначення наведеного потенціалу в реальній конструкції високовольтного подільника напруги (ВПН) є важливим.

Метою статті є розробка методу розрахунку наведеного потенціалу, який утворюється на секціях ВПН при впливі на нього реальних елементів конструкції.

РОЗРАХУНОК НАВЕДЕНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

Конструкція високовольтного подільника напруги представлена на рис. 1, де 1 – високовольтний електрод, 2 – екран, 3 – протикоронний екран, 4 – секція спіралевидної конструкції високовольтного плеча подільника напруги (представлена тороїдом), в якій знаходяться його послідовно-паралельно з'єднані резистори та конденсатори, 5 – заземлений електрод.

Наведемо приклад розрахунку для секції високовольтного плеча подільника напруги та основні положення, які були застосовані для одержання значень наведеного потенціалу на секціях ВПН.

Високовольтний подільник напруги, який розглядається, має наступні параметри: номінальна вхідна напруга $U_{ном}=100$ кВ, R – радіус закріплення секцій ВПН (радіус спіралі дорівнює 0,11 м), r – радіус перерізу тороїдальної секції високовольтного плеча ВПН

(дорівнює 0,015 м). Загальна висота h подільника напруги складає 1 м. Відповідно, його перша (верхня) секція знаходиться, за попередніми розрахунками, на висоті $h_c=0,881$ м від заземленого електроду з потенціалом 98 кВ.

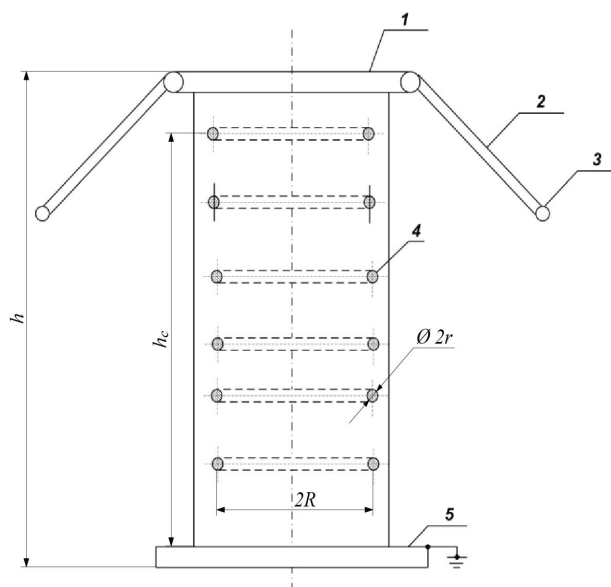


Рис. 1. Конструкція високовольтного подільника напруги

Для розрахунку значень наведеного потенціалу були застосовані комп'ютерні програми MathCAD 14 та Comsol Multiphysics 3.5 [3].

Вигляд моделі ВПН для розрахунку в програмі Comsol Multiphysics 3.5 наведено на рис. 2. Заземлені поверхні приміщення, в якому знаходиться високовольтний подільник напруги, представлені в моделі заземленою напівсферою радіусом 3 м. Електричне поле даної моделі ВПН формується як різницю потенціалів високовольтного й низьковольтного електродів подільника напруги, так і за рахунок наведеного потенціалу секцій високовольтного плеча ВПН, які знаходяться в певних точках просторової конструкції ВПН. Розрахунок наведеного потенціалу проводимо для кожної секції окремо. Даний розрахунок можна продемонструвати на прикладі першої секції ВПН.

По-перше, в програмі Comsol Multiphysics 3.5 отримуємо картину поля для обраної секції. Картина силових ліній електричного поля для обраної секції ВПН (першої) представлена на рис. 3.

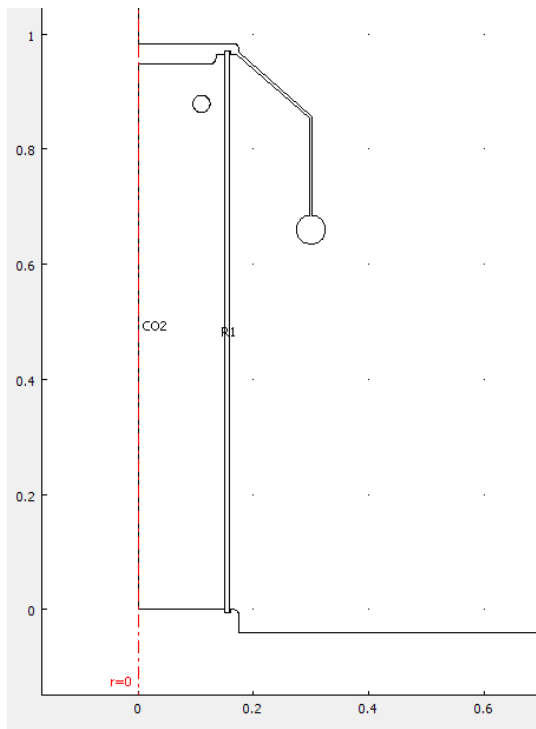


Рис. 2. Розрахункова модель ВПН

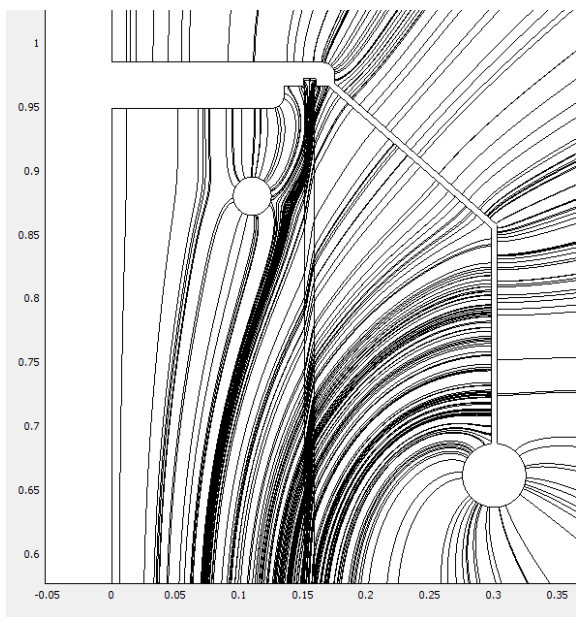


Рис. 3. Картина електричного поля для обраної секції ВПН

Картина силових ліній рис. 3 свідчить про наявність на поверхні тороїдальної секції ВПН позитивних зарядів, негативних зарядів та крайніх точок, в яких заряд дорівнює нулю.

Наступним кроком визначаємо заряд на поверхні цієї секції, обмеженої верхнім сегментом в діапазоні кутів α_1 та α_2 в поперечному перерізі секції при напруженості поля в крайніх точках, відповідно E_1, E_2 .

Визначення крайніх точок відбувається за допомогою пошуку "нульових" або близьких до $E=0$ значень. На рис. 4 показано графічне визначення "нульових" точок. Для вищезазначених умов для першої секції одержуємо крайні точки $\alpha_1=343,48^\circ$ (або $-16,52^\circ$); $\alpha_2=171,31^\circ$; $E_1=4,38$ В/м $E_2=4,27$ В/м.

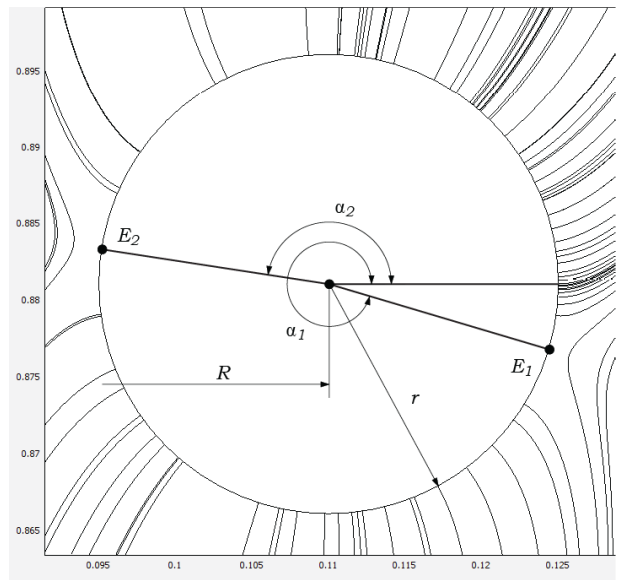


Рис. 4. Визначення крайніх точок картини поля секції ВПН

Розбиваємо даний кутовий інтервал на 19 рівних за різницею кутів i -проміжків, тобто отримаємо 20 j -точок на верхньому сегменті перерізу секції з власним значенням кута α_j . Збільшення кількості проміжків та точок, в яких визначатиметься нормальна складова напруженості електричного поля, збільшує точність розрахунків при інтегральному обчисленні (в рамках даного прикладу наведені наближені розрахунки). З картини електричного поля (рис. 4) визначаємо за допомогою програмного пакету Comsol Multiphysics 3.5 напруженість в кожній визначеній точці на верхньому сегменті секції (табл. 1).

Таблиця 1

№ j	Кут α_j (радіан)	E_j (В/м)
1	-0.28833	4.3803
2	-0.11581	11676
3	0.05672	22431
4	0.22924	32313
5	0.40177	41078
6	0.57429	48546
7	0.74682	54721
8	0.91934	59551
9	1.09187	62863
10	1.26439	64657
11	1.43692	64965
12	1.60944	63369
13	1.78197	60167
14	1.95449	55370
15	2.12702	48854
16	2.29954	41017
17	2.47207	32105
18	2.64459	21992
19	2.81711	11189
20	2.98964	4.2739

Приймаючи припущення, що на кожному з i -проміжків нормальна складова напруженості поля зростає лінійно, послідовно визначаємо значення i -го заряду для кожного з проміжних інтервалів верхнього сегменту секції ВПН за формулою, виведеною за допомогою теореми Остроградського-Гауса [4]:

ВИСНОВОК

Запропонована методика розрахунку для реальної конструкції високовольтного подільника напруги дозволяє визначати наведений потенціал його секцій, отримати наближений до рівномірного розподіл напруги вздовж секцій високовольтного плеча та виконати відповідну корекцію розташування секцій високовольтного подільника напруги по висоті таким чином, щоб зменшити його похибку вимірювань високої напруги [5].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Рудаков В.В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг. Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ "ХПІ" – Торнадо, 2005. – 230 с.
2. Internationale standard IEC 60-2/ High-voltage test techniques. – Part 2: Measuring Systems. – 2003. – 139 p.
3. FEMLAB User's Guide and Introduction. FEMLAB 2.3. COMSOL, Inc., 1994 – 2002. – 436 с.
4. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
5. Бржезицкий В.А. Прецизионные масштабные измерительные преобразователи высокого напряжения переменного тока/ Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Киевский политехнический институт. – Киев, 1992. – 513 с.

Bibliography (transliterated): 1. Brzhezic'kij V.O., Isakova A.V., Rudakov V.V. ta in. Tehnika i elektrofizika visokih naprug. Navch. posibnik / Za red. V.O. Brzhezic'kogo ta V.M. Mihajlova. - Harkiv: NTU "HPI" - Tornado, 2005. - 230 s. 2. Internationale standard IEC 60-2/ High-voltage test techniques. - Part 2: Measuring Systems. - 2003. - 139 p. 3. FEMLAB User's Guide and Introduction. FEMLAB 2.3. COMSOL, Inc., 1994 - 2002. - 436 s. 4. Kolechickij E.S. Raschet `elektricheskikh polej ustrojstv vysokogo napryazheniya. - M.: `Energoatomizdat, 1983. - 168 s. 5. Brzhezickij V.A. Precizionnye mashtabnye izmeritel'nye preobrazovateli vysokogo napryazheniya peremennogo toka/ Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk. - Kievskij politehnicheskij institut. - Kiev, 1992. - 513 s.

Надійшла 23.01.2012

Атарод Соруш,
Бржезицький Володимир Олександрович, д.т.н., проф.,
Гаран Ярослав Олександрович,
Маслюченко Ігор Миколайович
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"
факультет електроенерготехніки та автоматики
кафедра техніки і електрофізики високих напруг
Київ, пр. Перемоги, 37
тел.: (044) 4068235, e-mail: brzhezitsky@mail.ru

Атарод С., Бржезицький В.А., Гаран Я.А., Маслюченко І.Н. Calculation of induced potential in a high-voltage voltage divider problem.

A high-voltage voltage divider model allowing for effect of induced potential of the high-voltage arm sections on the overall electric field pattern is considered. A new computational method for the divider high-voltage arm geometric parameters and its separate sections induced potential is introduced, allowing to refine its parameters of accuracy.

Key words – high-voltage voltage divider, induced potential, electric field pattern, computational method.

$$q_i(\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, E_{1j}, E_{2j}, R, r) = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \varepsilon_0 \cdot \int_{\alpha_{1j}}^{\alpha_{2j}} (E_{1j} + \frac{E_{2j} - E_{1j}}{\alpha_{2j} - \alpha_{1j}} \cdot (\alpha - \alpha_{1j})) \cdot (R + r \cdot \cos \alpha) d\alpha, \quad (1)$$

де α_{1j}, α_{2j} – кути, які обмежують i -й проміжний інтервал верхнього сегменту секції ВПН; E_{1j}, E_{2j} – відповідні значення нормальної складової напруженості електричного поля в граничних точках даного i -го інтервалу.

В результаті, сумарний заряд на верхній частині тороїда дорівнює сумі зарядів на проміжних інтервалах верхнього сегменту секції ВПН. Для першої секції сумарний заряд дорівнює:

$$Q_{\text{верхн}} = \sum_1^{19} q_i = -4.302 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}. \quad (2)$$

Аналогічно, проводимо розрахунок сумарного заряду на нижній частині тороїда секції ВПН та одержуємо:

$$Q_{\text{нижн}} = \sum_1^{19} q_i = 3.924 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}. \quad (3)$$

Одержаний результат показав, що для досягнення критерію наведеного потенціалу $Q_{\text{верхн}} = Q_{\text{нижн}}$, необхідно зменшувати значення h_c .

Проводячи аналогічні розрахунки для $h_c=0,879$ м, отримуємо наступні значення заряду на верхній та нижній частинах поверхні тороїду:

$$Q_{\text{верхн}} = \sum_1^{19} q_i = -4.099 \cdot 10^{-9} \text{ Кл},$$

$$Q_{\text{нижн}} = \sum_1^{19} q_i = 4.12 \cdot 10^{-9} \text{ Кл},$$

що можна прийняти достатнім для умови $Q_{\text{верхн}} = Q_{\text{нижн}}$ в границях розглянутого прикладу розрахунку.

Після проведення розрахунків за наведеною методикою отримуємо картину розподілу потенціалу по секціях високовольтного подільника напруги (рис. 5).

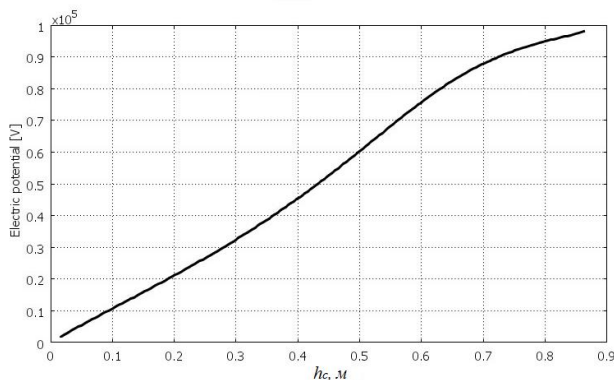


Рис. 5. Розподіл наведеного потенціалу по секціях високовольтного подільника напруги в залежності від висоти секції h_c .