

УДК. 614.8

М.Б. Старостенко<sup>1</sup>, С.В. Рудаков<sup>2</sup>, С.В. Швець<sup>2</sup><sup>1</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup>Університет цивільного захисту України, Харків

## РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ, ЩО ПРОНИКАЄ В ІЗОЛЯЦІЮ КАБЕЛІВ, ЯКІ ПЕРЕБУВАЮТЬ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА АТОМНИХ СТАНЦІЯХ

Пропонується методика розрахунку електростатичного поля, що проникає в ізоляцію окремих жил кабелів, які перебувають в експлуатації на атомних об'єктах. Це дозволить зменшити погрішність результату контролю параметрів ізоляції кабельних виробів. Наведена оцінка числового значення відносної погрішності виміру напруженості поля в ізоляції кабелів, дозволяє врахувати вплив зондувального електромагнітного поля при контролі параметрів ізоляції кабелів.

**Ключові слова:** електростатичне поле, ізоляція, кабель.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Своєчасне виявлене відхилення значень параметрів ізоляції окремого кабелю від нормативних, допомагає спрогнозувати старіння ізоляції інших кабелів, що перебувають в однакових умовах експлуатації, що сприяє запобіганню надзвичайних ситуацій на атомних станціях (АС). Для цього була розроблена методика оцінки стану ізоляції окремих жил кабелю для оцінки його стану в цілому [1], яка дозволила визначити параметри ізоляції конструктивних елементів кабелів. Виникаюча при цьому неоднозначність рішень представляє певну проблему для правильної інтерпретації даних. У кабелях контроль характеристик (часткової ємності, кута діелектричних втрат) кожної з компонентів ізоляції (поліетилен, Пвх-пластикат) окремо неможливий.

Розглянемо поле екранованої крученої пари (рис. 1).

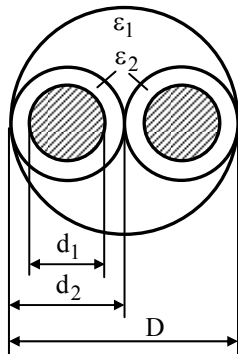


Рис. 1. Поле екранованої крученої пари

Вона містить три електроди: дві жили й екран. Це дає можливість створювати в ній різні структури електричного поля, концентруючи його, в основному, або в ізоляції однієї жили, або - іншої, або в проміжку між ними. Електроди з ділянки ізоляції, яку необхідно виключити з контролю, закорочують. Частина силових ліній при цьому, все ж таки проникає в закорочену частину ізоляції, викликаючи в ній

втрати (діелектричні втрати й втрати на наскрізну провідність).

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Існує кілька методів знаходження характеристик одного (шуканого) компонента на фоні сукупних вимірів: частотний, часовий, просторовий [2 – 4]. При використанні цих методів не враховується часткове проникнення електромагнітного поля в ізоляцію окремих елементів кабелю. Необхідно врахувати погрішність виміру, що виникає при такому впливі полів.

**Мета статті.** Розробка методики розрахунку електростатичного поля, що проникає в ізоляцію жили кабелю.

### Постановка задачі та її рішення

Для оцінки ступеня проникнення зондувального поля в закорочену частину ізоляції виконаємо розрахунок електростатичного поля.

Розглянемо два види випробувальних схем (рис. 2).

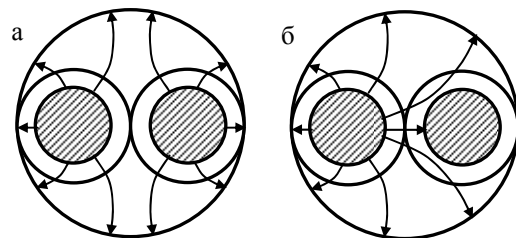


Рис. 2. Характер силових ліній поля при різних схемах випробувань: а – “дві жили – екран”; б – “жила – проти другої жили і екрану сумісно”

У розрахунковій моделі врахуємо розходження діелектричних проникливостей міжфазного заповнення ( $\epsilon_1$ ) і ізоляції жил ( $\epsilon_2$ ).

Розрахунок виконаємо методом вторинних зарядів, тобто від розрахунків поля у вихідному завданні перейдемо до розрахунку поля у вакуумі. Розрахункові моделі містять поверхні, що збігають-

ся із границями розділу середовищ вихідного завдання. На поверхнях варто розташувати заряди (так звані, вторинні заряди) і підібрати їхню щільність  $\sigma$ , Кл/м<sup>2</sup> так, щоб на поверхнях моделей, що відбивають електроди, досягалися задані потенціали, а на поверхнях, що відбиває границі розділу діелектричних середовищ – виконувалися граничні умови рівності нормальних складових вектора електричного зсуву. Тоді поле моделі буде ідентично полю вихідного завдання. Випробуваний відрізок кабелю зігнутий за формою окружності радіуса  $R_0$ . Саме в такому виді він і міститься у випробувальну камеру. Тому його поле – вісесиметричне.

Система інтегральних рівнянь може бути представлена у вигляді:

а) для вузлів, розташованих на поверхнях електродів, записуються інтегральні рівняння Фредгольма першого роду

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma(M) \cdot 4R_M \cdot K(k) \cdot dl_M}{\sqrt{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}} = \varphi(Q), \quad (1)$$

де  $K(k)$  – повний еліптичний інтеграл першого роду;

$$k = \sqrt{\frac{4R_Q R_M}{(Z_Q - Z_M)^2 + (R_Q + R_M)^2}};$$

$R_Q, Z_Q$  – циліндричні координати точки  $Q$ , у якій шукається потенціал;  $R_M, Z_M$  – циліндричні координати точки  $M$ , у якій розташований заряд;  $dl_M$  – довжина ділянки образуючої із центром у точці  $M$ ;  $\sigma(M)$  – щільність вторинного заряду на цій ділянці (Кл/м<sup>2</sup>);  $\epsilon_0$  – електрична постійна;  $\varphi(Q)$  – заданий потенціал точки  $Q$ ;

б) для вузлів, розташованих на границі розділу діелектричних середовищ, записуються інтегральні рівняння Фредгольма другого роду, що відбивають умову незмінності нормальної складової вектора електричного зсуву при переході через цю границю

$$\frac{\sigma(Q)}{2\epsilon_0} - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \int (n_R \cdot dE_R + n_Z \cdot dE_Z) = 0, \quad (2)$$

де  $n_R, n_Z$  – одиничні вектори нормалі до границі розділу діелектричних середовищ  $\epsilon_2$  і  $\epsilon_1$ ;  $\epsilon_2$  і  $\epsilon_1$  – відносні діелектричні проникності середовищ, що граничать у точці  $Q$  з боку негативного ( $\epsilon_2$ ) і позитивного ( $\epsilon_1$ ) напрямку нормалі;  $dE_R, dE_Z$  – радіальний і осьовий компоненти вектора напруженості поля, що створюється в точці  $Q$  кільцевим зарядом із точки  $M$ :

$$dE_R = \frac{\sigma(M) dl_M}{4\pi\epsilon_0 R_Q} \sqrt{\frac{R_M}{R_Q}} k^2 \left\{ \frac{k}{2} K(k) \left( \frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) - \left[ -K'(k) \left[ 1 - \frac{k^2}{2} \left( \frac{R_Q}{R_M} + 1 \right) \right] \right] \right\};$$

$$dE_Z = \frac{\sigma(M) \cdot dl_M}{4\pi\epsilon_0 R_Q} \cdot \frac{k^3 (Z_Q - Z_M)}{2\sqrt{R_Q R_M}} [K(k) + k \cdot K'(k)],$$

$K'(k)$  – похідна повного еліптичного інтеграла по параметру  $k$ .

Інтегрування в (1) і (2) здійснюється по всім образуючим кільцевим поверхонь вісесиметричної моделі. Виконаємо дискретизацію образуючих і проведемо нумерацію вузлів спочатку тих, які ставляться до електродів (вузли з номерами від 1 до  $N_e$ ), а потім і інших  $N_d$  вузлів, розташованих на границях розділу діелектричних середовищ. Їх номери будуть від  $N_e + 1$  до  $N = N_e + N_d$ . Тоді (1) і (2) приведуть до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАУ) виду

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U}, \quad (3)$$

де  $\bar{A}$  – квадратна матриця коефіцієнтів, елементи якої  $a_{ij}$  знаходять за формулами [5]

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4R_j \cdot K(k_{ij}) \cdot \Delta l_j}{\sqrt{(Z_i - Z_j)^2 + (R_i + R_j)^2}} & \forall i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{16R_j e}{\Delta l_j}\right) \cdot \Delta l_j & \forall i = j \end{cases} \left. \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right\} i = 1 \div N_e;$$

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2\epsilon_0} & \forall i = j \\ \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} (n_R \cdot dE'_R + n_Z \cdot dE'_Z) & \forall i \neq j \end{cases} \left. \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right\} i = N_e + 1 \div N,$$

$dE'_R, dE'_Z$  – компоненти вектора напруженості, що створюються одиничним зарядом (щільністю 1 Кл/м<sup>2</sup>);  $i, j$  – індекси точок, де шукаються характеристики поля ( $i$ ) і розташовані заряди ( $j$ );  $\bar{\sigma}$  – матриця-стовпець невідомих щільностей вторинних зарядів;  $\bar{U}$  – матриця-стовпець, перші  $N_e$  членів якої відбивають задані потенціали вузлів, що лежать на електродах, а інші – дорівнюють нулю.

Чисельно вирішуючи СЛАУ (3), знайдемо щільності шуканих вторинних зарядів. Тоді напруженості електростатичного поля визначаються за формулами

а) для поверхонь електродів

$$E_i = \sigma_i / \epsilon_0; \quad (4)$$

б) для границь розділу діелектричних середовищ (нормальна складова напруженості)

$$E_i = \frac{\sigma_i}{2\epsilon_0} \left( 1 \pm \frac{1}{\alpha} \right), \quad (5)$$

де  $\alpha = (\epsilon_2 - \epsilon_1) / (\epsilon_2 + \epsilon_1)$ .

Формула (4) витікає з теореми Гауса-Остроградського для елементарного циліндра, що охоплює вузол, розташований на поверхні електрода. Образуюча цього циліндра нормальна поверхні електрода, а обидві основи – паралельні.

Формула (5) аналогічно виходить для вузла, розташованого на границі розділу діелектричних середовищ. У цьому випадку власне поле елементарного заряду  $\Delta\sigma$ , що потрапив у циліндр, існує по обидві сторони заряду, в результаті чого напруженість поля зменшується в 2 рази (див. перший дода-

нок в (2) і відповідно число 2 у знаменнику (5)). Дія ж всіх інших зарядів, що не потрапили в циліндр, відбивається другим доданком в (2) і чисельно дорівнює власному полю заряду  $\Delta\sigma$ , розділеному на безрозмірний коефіцієнт  $\alpha$ .

В (5) знак “+” вибирається при знаходженні поля з боку позитивного напрямку нормалі до границі розділу середовищ, а “-” – з боку негативного напрямку. Зазвичай цікавить напруженість поля в середовищі з меншою діелектричною проникністю, тобто в повітрі. Тут вона найбільша, до того ж саме це середовище пробивається в першу чергу. Надалі перебувала напруженість поля саме в повітряних прошарках, а оскільки вектори нормалей всіх кругових границь розділу середовищ були орієнтовані нами одноманітно – назовні, то й треба було введення двох знаків в (5): перший знак вибирався, коли повітряний прошарок виявлявся ззовні кругової границі, другий – коли усередині.

Результати розрахунків поля.

Розраховувалася напруженість поля в заданих точках всередині ізоляції кожної з жил (1 і 2). Потім розраховувалися енергії електростатичного поля в ізоляції незакороченої жили –  $W_1$  і закороченої жили –  $W_2$ . Відношення  $W_2/W_1$  дає представлення про ступінь проникнення поля. Воно наведено в табл. 1 для ряду значень товщини ізоляції й співвідношень діелектричних проникливостей середовищ.

Таблиця 1

Коефіцієнт ступеню проникнення поля в ізоляцію електродів

Товщина ізоляції, $\delta/R$	Співвідношення діелектричних проникливостей середовищ, $\epsilon_2/\epsilon_1$	
	1	2,1
0,5	0,134	0,157
1,0	0,0906	0,117
2	0,0616	0,086

Як видно з таблиці, енергія електростатичного поля в ізоляції закороченої жили може становити 0,0616 – 0,157 від енергії поля в ізоляції незакороченої жили. Для кабелю з поліетиленовою ізоляцією й

типovим співвідношенням  $\delta/R = 1$  величина  $W_2/W_1 = 0,117 \approx 12\%$ .

## Висновки

Наведена оцінка числового значення відносної погрішності виміру напруженості поля в ізоляції кабелів, дозволяє врахувати вплив зондувального електромагнітного поля при контролі параметрів ізоляції кабелів.

Запропонована розрахункова модель впливу зондувального електростатичного поля на погрішність результату контролю ізоляції окремих компонентів кабелів, може застосовуватися для своєчасного виявлення відхилень значень параметрів ізоляції окремого кабелю від нормативних. А це, в свою чергу, допомагає спрогнозувати старіння ізоляції інших кабелів, які перебувають в однакових умовах експлуатації, що сприяє запобіганню надзвичайних ситуацій на атомних станціях.

## Список літератури

1. Рудаков С.В. Предотвращение чрезвычайных ситуаций на атомных станциях путем оценивания состояния изоляции кабельных изделий / С.В. Рудаков, С.В. Швец // Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. пр. УЦЗУ. – 2008. – Вып. 8. – С. 146-156.
2. Шалыг Г.М. Определение мест повреждения в электрических цепях / Г.М. Шалыг. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 312 с.
3. Беспрозванных А.В. Контроль параметров изоляции трехфазных кабелей методом косвенных / А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока, С.В. Рудаков // Вестник НТУ «ХПИ». – Х., 2002. – Вып. 7, т. 1. – С. 103-108.
4. Боев М.А. Техническая диагностика низковольтной полимерной изоляции / М.А. Боев // Труды Международной научно-технической конференции «Изоляции-99». – СПб, 1999. – С. 19-20.
5. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике / Б.Г. Набока. – К.: ИСИО, 1995. – 120 с.

Надійшла до редколегії 27.03.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ПРОНИКАЮЩЕГО В ИЗОЛЯЦИЮ КАБЕЛЕЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ НА АТОМНЫХ СТАНЦИЯХ

М.Б. Старостенко, С.В. Рудаков, С.В. Швец

Предлагается методика расчета электростатического поля, которое проникает в изоляцию отдельных жил кабелей, находящихся в эксплуатации на атомных объектах. Это позволит уменьшить погрешность результата контроля параметров изоляции кабельных изделий. Приведенная оценка числового значения относительной погрешности измерения напряженности поля в изоляции кабелей позволяет учесть влияние зондирующего электромагнитного поля при контроле параметров изоляции кабелей.

**Ключевые слова:** электростатическое поле, изоляция, кабель.

## CALCULATION OF ELECTROSTATIC PAUL, PENETRABLE IN ISOLATION OF CABLES, BEING IN EXPLOITATION ON THE ATOMIC STATIONS

M.B. Starostenko, S.V. Rudakov, S.V. Shvec

The method of calculation of the electrostatic field, which gets to the isolation of separate tendons of cables, being in exploitation on atomic objects, is offered. It will allow to decrease the error of result of control of parameters of isolation of cable wares. The resulted estimation of numerical value of relative error of measuring of the field tension in the isolation of cables allows to take into account influencing of the sounding electromagnetic field at control of parameters of isolation of cables.

**Keywords:** electrostatic field, isolation, cable.