

# ДО ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ОПОР

Бржезицький В.О., д.т.н., проф., Хомінч В.І., к.т.н., доц., Миронов Д.В., аспірант

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра техніки і електрофізики високих напруг*

**Вступ.** Розрахунок електричного поля повітряних ліній (ПЛ) електропередач достатньо детально визначений у наближенні безкінечно протяжних проводів, паралельних поверхні землі [1]. Новим для цього наближення є пропозиція авторів [2] щодо суттєвого спрощення та підвищення точності розрахунків електричного поля за рахунок відмови від уведення в розгляд формул електричної ємності проводів ПЛ на основі методичної розробки О.С. Ільєнка [3]. Розрахунки електричних полів за [2] відповідають визначенню картини поля між проводами та поверхнею землі в області їх найбільшого провисання. Разом з тим, не менш актуальною є задача розрахунку електричного поля з урахуванням опори, яка є як би «протилежною» першій [2].

**Мета роботи.** Визначення структури математичної моделі та послідовності розрахункових операцій, що забезпечать, в кінцевому результаті, можливість розрахунку напруженості електричного поля ПЛ з урахуванням металеві опори.

## **Матеріали та результати дослідження:**

1. Замінюємо, як звичайно, поверхню землі горизонтальною площиною з провідністю ґрунту, достатньою для використання наближення дзеркального відображення. Суміщуємо площину декартових координат  $YOX$  з поверхнею землі, а вісь  $Z$  направляємо вертикально. Вісь  $OX$  направляємо по лінії, що з'єднує центри опор у площині  $YOX$  (для початкової постановки задачі вважаємо, що центри сусідніх опор ПЛ знаходяться на вісі  $OX$ ).

2. Вибираємо просторову область розрахунку: від максимального провисання проводів до опори - окіл опори - до максимального провисання проводів після опори.

3. У відповідності до [4, 5] проводимо заміну проводів прямолінійними циліндрами з діаметром, що дорівнює діаметру струмопроводів ПЛ. Якщо характерний розмір опори складає порядок 10 м, то довжина «циліндрів струмопроводів» повинна бути на порядок меншою, тобто, порядку 1 м.

4. Виділяємо на осі кожного струмопроводу фаз А, В, С точки  $i = 1, 2 \dots n$  з координатами  $X_{Ai}, Y_{Ai}, Z_{Ai}; X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi}; X_{Ci}, Y_{Ci}, Z_{Ci}$ .

5. Сусідні точки  $i: 1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 3, \dots n - 1 \rightarrow n$  визначають відрізки циліндрів проводів довжиною, наприклад, для фази А:

$$l_{A_{i-1},i} = \sqrt{(X_{Ai} - X_{A_{i-1}})^2 + (Y_{Ai} - Y_{A_{i-1}})^2 + (Z_{Ai} - Z_{A_{i-1}})^2}$$

з координатами центру (позначимо як точку  $M(X_{A_{i-1,1}}; Y_{A_{i-1,1}}; Z_{A_{i-1,1}})$ ), причому  $X_{A_{i-1,i}} = 0.5(X_{A_{i-1}} + X_{A_i})$ ;  $Y_{A_{i-1,i}} = 0.5(Y_{A_{i-1}} + Y_{A_i})$ ;  $Z_{A_{i-1,i}} = 0.5(Z_{A_{i-1}} + Z_{A_i})$ .

6. Уводимо невідомі (шукані) значення поверхневої густини зарядів проводів

$$\begin{aligned} & \sigma_{A_{1,2}}; \sigma_{A_{2,3}}; \dots \sigma_{A_{i-1,i}}; \sigma_{A_{i,i+1}}; \dots \sigma_{A_{n-1,n}}; \\ & \sigma_{B_{1,2}}; \sigma_{B_{2,3}}; \dots \sigma_{B_{i-1,i}}; \sigma_{B_{i,i+1}}; \dots \sigma_{B_{n-1,n}}; \\ & \sigma_{C_{1,2}}; \sigma_{C_{2,3}}; \dots \sigma_{C_{i-1,i}}; \sigma_{C_{i,i+1}}; \dots \sigma_{C_{n-1,n}}. \end{aligned}$$

7. Металеву опору можна представити (виходячи з [4]) сукупністю найпростіших елементів – дисків з номерами  $j = 1, 2 \dots m$ , наприклад, однакового діаметру  $d_m$ , розташованими у вертикальній площині  $YOZ$  опори ПЛ. Позначимо невідомі (шукані значення) поверхневої густини зарядів цих дисків  $\sigma_1; \sigma_2; \dots \sigma_j; \dots \sigma_m$ , та координати їх центрів:  $X_1, Y_1, Z_1; X_2, Y_2, Z_2; \dots X_j, Y_j, Z_j; \dots X_m, Y_m, Z_m$ .

8. Будемо вважати, що кожному елементу, розташованому над поверхнею землі з координатами центру  $X, Y, Z$  та поверхневою густиною заряду  $\sigma$ , відповідає дзеркально відображений елемент з координатами центру  $X, Y, -Z$  та поверхневою густиною заряду  $-\sigma$ .

9. Вважаємо, що заданими є значення напруги на фазах А, В, С у часі  $t$ :  $U_A(t), U_B(t), U_C(t)$ , причому напругою на елементах металевих опор за [4,5] можна нехтувати, тобто  $U_j = 0$ .

10. Тоді можна сформулювати за методом інтегральних рівнянь I роду систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно шуканих значень  $\sigma_{A_{i-1,i}}, \sigma_{B_{i-1,i}}, \sigma_{C_{i-1,i}}, \sigma_j$  наступного виду (записуємо, як приклад, для  $\sigma_{A_{i-1,i}}$ ):

$$\begin{aligned} & \sigma_{A_{1,2}} \cdot K_{A_{1,2};A_{i-1,i}} + \sigma_{A_{2,3}} \cdot K_{A_{2,3};A_{i-1,i}} + \dots + \sigma_{A_{i-1,i}} \cdot K_{A_{i-1,i};A_{i-1,i}} + \dots + \sigma_{A_{n-1,n}} \cdot \\ & \cdot K_{A_{n-1,n};A_{i-1,i}} + \sigma_{B_{1,2}} \cdot K_{B_{1,2};A_{i-1,i}} + \dots + \sigma_{B_{n-1,n}} \cdot K_{B_{n-1,n};A_{i-1,i}} + \sigma_{C_{1,2}} \cdot K_{C_{1,2};A_{i-1,i}} + \\ & \dots + \sigma_{C_{n-1,n}} \cdot K_{C_{n-1,n};A_{i-1,i}} + \sigma_1 \cdot K_{1;A_{i-1,i}} + \dots + \sigma_m \cdot K_{m;A_{i-1,i}} = U_A(t), \end{aligned}$$

де значення коефіцієнтів  $K$  знаходяться за формулами [4].

Аналогічно, рівняння для  $\sigma_{B_{i-1,i}}$  буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} & \sigma_{A_{1,2}} \cdot K_{A_{1,2};B_{i-1,i}} + \dots + \sigma_{A_{i-1,i}} \cdot K_{A_{i-1,i};B_{i-1,i}} + \dots + \sigma_{A_{n-1,n}} \cdot K_{A_{n-1,n};B_{i-1,i}} + \\ & + \sigma_{B_{1,2}} \cdot K_{B_{1,2};B_{i-1,i}} + \dots + \sigma_{B_{i-1,i}} \cdot K_{B_{i-1,i};B_{i-1,i}} + \dots + \sigma_{B_{n-1,n}} \cdot K_{B_{n-1,n};B_{i-1,i}} + \\ & + \sigma_{C_{1,2}} \cdot K_{C_{1,2};B_{i-1,i}} + \dots + \sigma_{C_{n-1,n};B_{i-1,i}} + \sigma_1 \cdot K_{1;B_{i-1,i}} + \dots + \sigma_m \cdot K_{m;B_{i-1,i}} = U_B(t). \end{aligned}$$

Аналогічно, маємо рівняння для  $\sigma_{C_{i-1,i}}$ :

$$\begin{aligned} & \sigma_{A_{1,2}} \cdot K_{A_{1,2};C_{i-1,i}} + \dots + \sigma_{A_{n-1,n}} \cdot K_{A_{n-1,n};C_{i-1,i}} + \sigma_{B_{1,2}} \cdot K_{B_{1,2};C_{i-1,i}} + \dots + \\ & + \sigma_{B_{n-1,n}} \cdot K_{B_{n-1,n};C_{i-1,i}} + \sigma_{C_{1,2}} \cdot K_{C_{1,2};C_{i-1,i}} + \dots + \sigma_{C_{i-1,i}} \cdot K_{C_{i-1,i};C_{i-1,i}} + \dots + \\ & + \sigma_{C_{n-1,n}} \cdot K_{C_{n-1,n};C_{i-1,i}} + \sigma_1 \cdot K_{1;C_{i-1,i}} + \dots + \sigma_m \cdot K_{m;C_{i-1,i}} = U_C(t). \end{aligned}$$

Рівняння для  $\sigma_j$  буде мати вираз:

$$\begin{aligned} & \sigma_{A_{1,2}} \cdot K_{A_{1,2};j} + \dots + \sigma_{A_{n-1,n}} \cdot K_{A_{n-1,n};j} + \sigma_{B_{1,2}} \cdot K_{B_{1,2};j} + \dots + \sigma_{B_{n-1,n}} \cdot K_{B_{n-1,n};j} + \\ & + \sigma_{C_{1,2}} \cdot K_{C_{1,2};j} + \dots + \sigma_{C_{n-1,n}} \cdot K_{C_{n-1,n};j} + \sigma_1 \cdot K_{1;j} + \dots + \sigma_j \cdot K_{j;j} + \dots + \sigma_m \cdot K_{m;j} \\ & = 0. \end{aligned}$$

11. Повна система рівнянь має  $n - 1$  рівнянь з правою частиною, що дорівнює  $U_A(t)$ , крім того  $n - 1$  рівнянь з правою частиною, що дорівнює  $U_B(t)$ , крім того  $n - 1$  рівнянь з правою частиною, що дорівнює  $U_C(t)$ , та  $m$  рівнянь з правою частиною, що дорівнює нулю.

12. У підсумку вирішення системи порядку  $3(n - 1) + m$  знаходимо шукані значення поверхневих густин зарядів елементів проводів фаз А, В, С та металевої опори ПЛ.

13. Далі визначаємо (за відповідним значеннями густин зарядів та площею їх поверхні) повні заряди цих елементів і, на основі закону Кулона, розрахуємо проекції напруженості електричного поля  $E_x, E_y, E_z$  у довільних заданих точках повітряного середовища під лінією електропередачі.

**Висновки.** Визначена структура математичної моделі та сформована послідовність розрахункових операцій, що забезпечать можливість розрахунку напруженості електричного поля повітряної лінії електропередачі з урахуванням впливу опори.

#### Перелік посилань

1. Сокол Е.И. Методика комплексного автоматизированого мониторинга объектов энергетической системы Украины с целью повышения безопасности её функционирования: / Сокол Е.И., Резинкина М.М., Гриб О.Г., Васильченко В.И., Зуев А.А., Бортников А.В., Сосина Е.В.// Електротехніка та електромеханіка, №2, 2016 - 65-70 с.

2. Бржезицький В.О. Структура у часі електричних полів повітряних ліній електропередач: / Бржезицький В. О., Хомініч В. І., Миронов Д. В.// Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», 2016. - 363-367с.

3. Ильенко, О.С. Розрахунки електростатичних полів на персональному комп'ютері: навч. посібник / Ильенко, О.С., Шеховцов, В.І. // К.:УМК ВО, 1991. – 124 с.

4. Бржезицкий, В. А. Прецизионные масштабные измерительные преобразователи высокого напряжения переменного тока : дис. докт. техн. наук: 05.09.13 / Бржезицкий Владимир Александрович – Київ, 1992. – 513 с.

5. Веников В.А. Теория подобия и моделирования / Веников В.А. Веников Г.В.// учебник, Книжный дом "ЛИБРОКОМ", Москва, 4-е изд., 2014. – 440 с.