

УДК 621.3.001

В. М. Кутін, д-р. техн. наук, проф.; В. М. Стискал, асп.

## МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ЗОНІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ПІДСТАНЦІЙ 220–750 кВ

Запропоновано метод розрахунку екрануючої дії порталів підстанцій і опор повітряних ліній напруження 220–750 кВ, який ґрунтується на використанні методу еквівалентних зарядів змінної щільності. На відміну від існуючих, цей метод дозволяє врахувати реальні конструкції порталів і опор у розрахунках електричних полів в електроустановках надвисоких напруг.

### Вступ

Для конструкцій металевих опор повітряних ліній (ПЛ) і порталів характерне решітчасте виконання елементів, причому при створенні їх використовується різноманітний сортамент металу. У поєднанні з складним геометричним виконання самих опор це викликає певні складнощі розрахунку електричного поля біля опори.

Мета роботи — підвищити точність і спростити методику розрахунку електричного поля поблизу опори шляхом використання методу еквівалентних зарядів, в якому елементи опор замінюються круглими стрижнями еквівалентного радіусу.

### Результати досліджень

Найзручнішим для розрахунку полів такого класу слід вважати метод еквівалентних зарядів [1]. Згідно з методом еквівалентних зарядів елементи опор ПЛ замінюються круглими стрижнями еквівалентного радіусу. Еквівалентні заряди — це розташовані на осях цих стрижнів заряджені відрізки з щільністю заряду, що кусково-лінійно змінюється по довжині.

Загальний аналіз електричного поля поблизу основи опори проведемо на прикладі, вважаючи його першим наближенням до реальної опори ПЛ, що знаходиться в зовнішньому полі. Опору ПЛ замінимо вертикальним провідним стрижнем радіусом  $r$  і висотою  $h$  з напівсферичним заокругленням кінця, що розташований на провідній площині в зовнішньому однорідному, направленому до площини полі напруженістю  $E_0$  (рис. 1). Розрахунок електричного поля завжди проводиться в точці, що знаходиться на відстані  $R$  від осі стрижня і на висоті  $d$  над провідною площиною. Співвідношення  $h/r$  беремо рівним 50 і 20, що приблизно відповідає співвідношенню довжини і товщини опор і стійок порталів.

Відома система еквівалентних зарядів, оптимальна для розрахунку поля такої конфігурації, якщо  $h \gg r$  [2]. Це заряджений відрізок осі, що знаходиться на осі стрижня, з лінійною щільністю заряду  $\tau_m$  що лінійно зменшується від максимального значення  $\tau_m$  в центрі напівсфери до нуля в точці перетину з площиною, і точковий заряд  $q$  в центрі півсфери.

Вибравши розрахункові точки 1 і 2 на поверхні стрижня (рис. 1), можемо написати вираз для потенціалу цих точок

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{\tau_m}{4\pi\epsilon} \ln \frac{(h-r)\sqrt{3}}{r \cdot l} + \frac{4q}{4\pi\epsilon(h-r)3} - E_0 \frac{l-r}{2} = 0; \\ \phi_2 = \frac{\tau_m}{4\pi\epsilon} \left[ \frac{h}{h-r} \ln \frac{h}{e \cdot r} - \ln \frac{h}{2} \right] + \frac{q}{4\pi\epsilon} \left( 1 - \frac{r}{2h} \right) - E_0 l = 0, \end{cases} \quad (1)$$

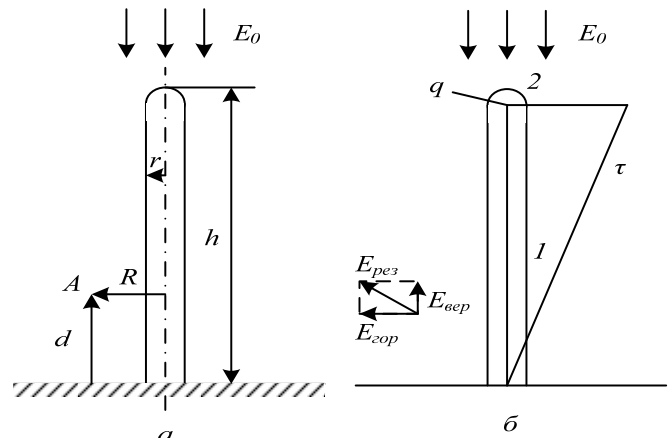


Рис. 1. Стрижень у зовнішньому полі

ЗВІДКИ

$$\frac{\tau_m}{4\pi\epsilon} \approx \frac{E_0 h}{2 \ln \frac{h\sqrt{3}}{rl}} \tag{2}$$

$$\frac{q}{4\pi\epsilon \cdot r} = E_0 h \left( 1 - \frac{\ln \frac{2h}{e^2 r}}{2 \ln \frac{h\sqrt{3}}{e \cdot r}} \right) = E_0 h \frac{\ln \frac{3h}{2r}}{2 \ln \frac{h\sqrt{3}}{e \cdot r}} \tag{3}$$

У разі розташування точок розрахунку напруженості поблизу основи стрижня, за умови  $d \leq h/2$ , впливом точкового заряду можна знехтувати.

Вертикальна складова напруженості поля розраховується з формули

$$E_{\text{верт.}} = E_0 \left[ 1 + \frac{\frac{h(m_2 + m_3)}{m_2 \cdot m_3} - \ln \frac{(h+d+m_3)(h-d+m_2)}{R^2}}{2 \ln \frac{h\sqrt{3}}{r \cdot e}} \right] \tag{4}$$

горизонтальна складова —

$$E_{\text{гор.}} = \frac{E_0}{2 \ln \frac{h\sqrt{3}}{re}} \frac{m_3 \cdot m_1 (m_2 - m_1) - m_2 m_1 (m_3 - m_1) + dh (m_3 + m_2)}{R m_2 m_3} \tag{5}$$

де

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \sqrt{R^2 + d^2}; \\ m_2 &= \sqrt{R^2 - (h-d)^2}; \\ m_3 &= \sqrt{R^2 + (h+d)^2}. \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

Похибка формул для  $d < 0,7h$  і  $R > r$  не перевищує 5 %.

Результуюча напруженість електричного поля поблизу основи стрижня розраховується з формули

$$E_{\text{рез}} = \sqrt{E_{\text{гор.}}^2 + E_{\text{верт.}}^2} \tag{7}$$

Результати розрахунку напруженості поля показані на рис. 2.

У безпосередній близькості від стрижня результуюча напруженість перевищує зовнішню напруженість  $E_0$ . При  $d/h = 0,1$  і  $h/r = 50$  на відстані більшій  $3r$  від осі стрижня результуюче поле не перевищує зовнішнє; зі збільшенням відстані від стрижня  $E_{\text{рез}}$  стає менше  $E_0$  і у міру віддалення асимптотично прямує до величини зовнішньої напруженості. На відстані більшій висоти стрижня впливом його можна знехтувати.

Розраховуючи напруженість електричного поля у основи стояка опори, слід чекати посилення поля в безпосередній близькості і ослаблення поля  $E_{\text{зовн}}$  при віддаленні від опори з подальшим асимптотичним наближенням напруженості до величини  $E_{\text{зовн}}$ .

Оскільки стояк опори є решітчастою конструкцією, що складається з відносно тонких елементів, поблизу них існуватимуть додаткові локальні області посилення поля, за розміром співрозмірні з радіусами цих елементів.

Спрощуючи конструкції реальних елементів опори ПЛ і порталів підстанції надвисокої на-

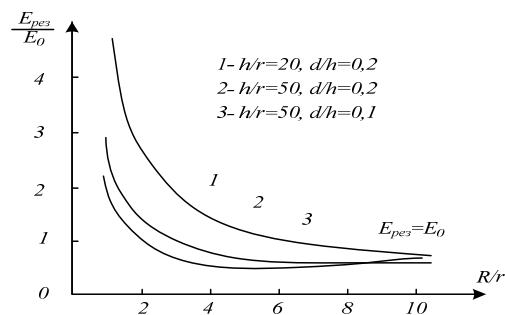


Рис. 2. Розподіл напруженості поблизу основи стрижня у зовнішньому полі

пруги, замінюючи їх розрахунковими, доцільно виділити декілька етапів такого спрощення:

- а) заміна реальних прокатних профілів, що використовуються для спорудженні опори (кут, швелер, тавр, двотавр і ін.) круглими стрижнями еквівалентного радіусу;
- б) заміна реальної решітчастої конструкції елемента опори (стояка, траверси або їх ділянки) системою круглих стрижнів, розставлених уздовж протяжного елемента по його утворювальній;
- в) заміна отриманої протяжної системи круглих стрижнів еквівалентним циліндром.

Під поняттям еквівалентної заміни маємо на увазі заміну конструкції круглим стрижнем еквівалентного радіусу [3].

Розглянемо виділені етапи заміни початкової конструкції опори детально. Домінуючим профілем прокату, що використовується при споруді опор і порталів ПЛ, є рівносторонній кут з різним співвідношенням товщини  $r$  і ширини  $a$  полиці. Вплив цього співвідношення на зовнішнє електричне поле відокремленого протяжного кута був досліджений за допомогою розробленої програми розрахунку осесиметричних електричних полів методом інтегральних рівнянь 1-го роду на прикладі поля тонкого тороїда з внутрішнім радіусом  $R$  і з перетином у вигляді рівностороннього кута при співвідношенні  $R/a = 1000$ .

Розрахунки показали, що зовнішнє поле відокремленого рівностороннього кута практично не залежить від співвідношення  $a/r$  і визначається, перш за все, шириною полиці.

На цій підставі для розрахунку величини еквівалентного радіусу відокремленого рівностороннього кута була використана спрощена модель, в якій товщина полиці  $h = 0$ .

Розрахунок проводиться методом середнього потенціалу [4]. Для розрахункових точок на моделі за умови постійної поверхневої щільності заряду  $\sigma$  на поверхні кута можна записати

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{\sigma l}{2\pi\epsilon} 2\ln \frac{2He}{l}; \\ \phi_2 = \frac{\sigma l}{2\pi\epsilon} \left( \ln \frac{2He}{l} + \ln \frac{2He}{l \cdot 1,118} - 0,5 \arctg 2 \right); \\ \phi_3 = \frac{\sigma l}{2\pi\epsilon} \left( \ln \frac{2He}{l} + \ln \frac{2H \cdot e}{l \cdot 1,41} - \arctg 1 \right), \end{cases} \quad (8)$$

звідки з формули трапецій

$$\phi_{\text{ср.}} = \frac{1}{6} (\phi_1 + 4\phi_2 + \phi_3) = \frac{2\sigma l}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2H \cdot 2,5}{l}. \quad (9)$$

Ємність кута на одиницю довжини визначається

$$C_{\text{уд.уг.}} = \frac{\tau_{\Sigma}}{\phi_{\text{ср.}}} = \frac{2\sigma l}{\frac{2\sigma l}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2H \cdot 2,5}{l}} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{2H}{0,4l}}. \quad (10)$$

Враховуючи, що питома ємність протяжного відокремленого циліндра визначається як

$$C_{\text{уд}} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{2H}{r}}, \quad (11)$$

отримуємо, що еквівалентний радіус рівностороннього кута

$$r_{\text{е.кут.}} = 0,4l. \quad (12)$$

Розрахунки розподілу заряду по складовим конструкції показали, що частини елемента опори, які знаходяться всередині решітчастої конструкції, сильно екрановані, слабо заряджені і практично не впливають на розподіл зовнішнього електричного поля. Тому при складанні розрахункової моделі ними можна знехтувати, враховуючи лише провідники, розташовані на зовнішній поверхні елемента опори.

Нехай у розрахунку вже проведена заміна всіх прокатних профілів, що створюють зовнішність елемента опори, еквівалентними круглими стрижнями, і нехай для простоти радіуси всіх стрижнів однакові.

Критерієм заміни такої конструкції на систему паралельних тонких стрижнів того ж радіу-

су є рівність загальної довжини стрижнів на одиницю довжини в кожній грані елемента опори при однаковому заповненні стрижнями поверхні грані в обох випадках.

Можливість такої заміни підтверджується розрахунком напруженості електричного поля поза двома відокремленими стрижньовими конструкціями квадратного перерізу (рис. 3), що знаходяться під однаковим, одиничним потенціалом.

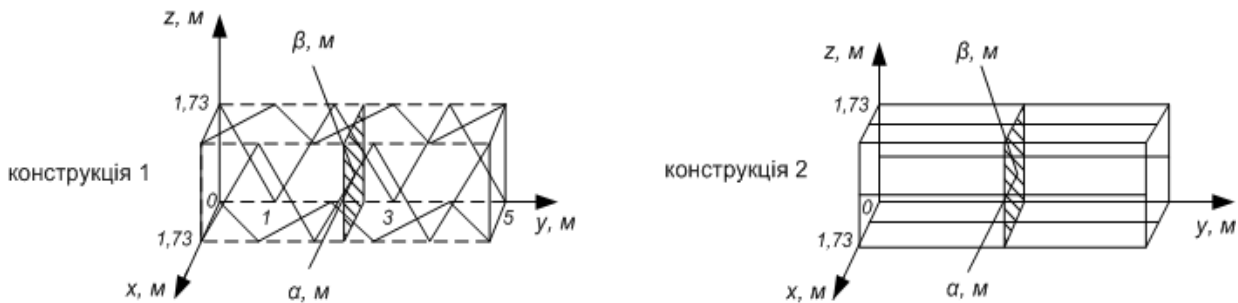


Рис. 3. До заміни решітчастої конструкції

Напруженість розраховувалася в середньому перерізі конструкцій по двох напрямках. Результати розрахунку показані на рис. 4.

Як впливає з рис. 4, вже на відстанях рівних найбільшому проміжку між сусідніми стрижнями елемента, величини напруженості електричного поля двох конструкцій практично збігаються.

### Висновки

Запропоновано метод розрахунку екрануючої дії порталів підстанцій і опор повітряних ліній напругою 220–750 кВ, який ґрунтується на використанні методу еквівалентних зарядів змінної щільності. На відміну від існуючих, цей метод дозволяє врахувати реальні конструкції порталів і опор у розрахунках електричних полів в електроустановках надвисоких напруг.

Якщо здійснюється розрахунок електричного поля біля основи опори або portalу на відстані від стояка більше за її ширину доцільно застосовувати просту розрахункову модель, що замінює решітчасту конструкцію стояка одним циліндром еквівалентного радіусу. За необхідності розрахунку поля на меншій відстані від стояка необхідно будувати складнішу розрахункову модель, яка має враховувати конструкцію нижньої частини стояка реальної опори або portalу.

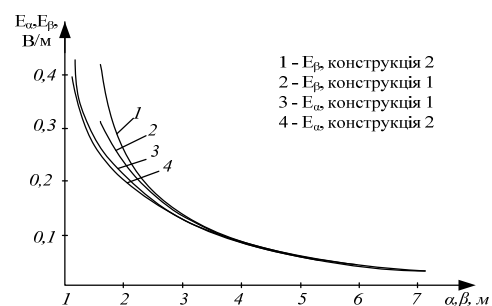


Рис. 4. До розрахунку напруженості поля стрижневих конструкцій

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Колечицкий Е. С. Численный метод расчета осесимметричных электрических полей / Е. С. Колечицкий // Электричество. — 1972. — № 7. — С. 57—61.
2. Колечицкий Е. С. Расчет электрического поля стержневых зарядов / Е. С. Колечицкий, А. А. Филиппов // Электричество. — 1979. — № 7. — С. 59—62.
3. Миролубов Н. Н. Методы расчета электростатических полей / Н. Н. Миролубов и др. — М.: Высшая школа, 1963. — 305 с.
4. Кривова Т. И. Нормирование напряженности электрического поля промышленной частоты по порогу болевого раздражения электрическими разрядами / Т. И. Кривова и др. — М., 1973. — С. 69—73. — (В кн. «Защита от действия электрических полей и электрического тока в промышленности»).

Рекомендована кафедрою електричних станцій та системи

Стаття надійшла до редакції 14.10.11  
Рекомендована до друку 25.11.11

**Кутін Василь Михайлович** — професор кафедри електричних станцій та систем.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Стискал Віталій Миколайович** — інженер.

Публічне акціонерне товариство «Вінницяобленерго», Вінниця