

8. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст]: учеб. пос. / П. М. Тихомиров. — 5-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 529 с.
9. Кантор, В. В. К расчету индуктивности рассеяния обмоток трансформаторов [Текст] / В. В. Кантор // Электротехника: Ежемесячный научно-техн. журнал. — 2009. — № 4. — С. 51–55.
10. Кантор, В. В. Расчет индуктивности рассеяния сложных обмоток трансформаторов методом средних геометрических расстояний [Текст] / В. В. Кантор // Электротехника: Ежемесячный научно-техн. журнал. — 2011. — № 5. — С. 23–29.
11. Бржезицкий, В. А. Прецизионные масштабные измерительные преобразователи высокого напряжения переменного тока [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.05; 05.14.12 / В. А. Бржезицкий; КПИ. — К., 1992. — 513 с.
12. Бржезицкий, В. А. К расчету взаимной индуктивности обмоток, расположенных на ферромагнитном стержне [Текст] / В. А. Бржезицкий, А. В. Найдовский, А. Н. Безмен // Электромеханика. — 1989. — № 1. — С. 45–54.
13. Петров, Г. Н. Электрические машины [Текст]: учеб. / Г. Н. Петров. — М.: Энергия, 1974. — Ч. 1. — 240 с.
14. Зихерман, М. Х. Об электромагнитном рассеянии обмоток трансформаторов [Текст] / М. Х. Зихерман // Электричество. — 1983. — № 9. — С. 60–69.
15. Бржезицкий, В. А. К расчету параметров индуктивности рассеяния обмоток различных форм поперечного сечения [Текст] / В. А. Бржезицкий // В кн.: Математическое моделирование в энергетике. — К.: Наукова думка, 1992. — С. 92–94.

#### ЗАСТОСУВАННЯ СОЛЕНОЇДАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ОБМОТОК ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ІНДУКТИВНОСТІ РОЗСІЮВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Обґрунтовано необхідність модифікації відомого методу середніх геометричних відстаней для розрахунку індуктивності розсіювання обмоток силових трансформаторів. Наведено розрахункові вирази для індуктивності розсіювання силових трансформаторів, отримані на підставі використання соленоїдальних моделей обмоток. Теоретичні матеріали статті апробовані результатами проведеного експерименту. Запропоновано розрахунковий вираз індуктивності розсіювання з використанням відносних розмірів обмоток.

**Ключові слова:** індуктивність розсіювання, силовий трансформатор, обмотка, експеримент, магнітопровід, соленоїд.

*Маслюченко Ігорь Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина, e-mail: masluchenko@yandex.ru.*

*Маслюченко Ігор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.*

*Masluchenko Igor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: masluchenko@yandex.ru*

УДК 621.315.1

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47757

Троценко Є. О.

## РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

*Адаптовано метод еквівалентних зарядів для розрахунку напруженості електростатичного поля під одноланцюговими та дволанцюговими біполярними лініями електропередачі постійного струму. Метод дозволяє розраховувати напруженість електростатичного поля під повітряними лініями постійної напруги за умови відсутності коронного розряду на проводах лінії в сухих кліматичних умовах.*

**Ключові слова:** лінія електропередачі постійного струму, біполярна лінія, напруженість електричного поля, метод еквівалентних зарядів.

### 1. Вступ

В останні роки у світі знову відновився інтерес до передачі електричної енергії на постійному струмі. Головним чином тому, що лінії електропередачі постійного струму високої та надвисокої напруги виявляються більш економічними при передачі великої кількості електричної енергії на великі відстані ніж відповідні лінії електропередачі змінного струму [1]. Ця технологія не нова і була відома ще на початковому етапі розвитку електроенергетики, коли відбувалась боротьба між прихильником постійного струму Томасом Едісоном та прихильниками змінного струму Джорджем Вестінгаузом та Ніколою Тесла. Тоді у цій конкурентній боротьбі, як відомо, перемогли останні, і дотепер у світі для виробництва електричної енергії, передачі її на

відстань та споживання використовується в основному змінний струм.

Прогрес у створенні ліній високої та надвисокої напруги постійного струму став можливим завдяки появі у другій половині минулого століття високовольтних тиристорів та біполярних транзисторів з ізолюваним затвором, які дозволили створювати ефективні статичні перетворювачі, розраховані на великі струми та напруги. Відтоді постійний струм використовується тільки для передачі електричної енергії, а її виробництво і розподілення залишається на змінному струмі. Потужні статичні перетворювачі використовуються як випрямлячі та інвертори. Випрямляч установлюється на відправному кінці передачі для перетворення змінного струму в постійний, а інвертор установлюється на прийомному кінці для перетворення постійного струму в змінний.

Вартість перетворювальних підстанцій на постійному струмі вище вартості підстанцій на змінному струмі, але вартість лінії постійного струму нижче вартості лінії змінного струму за рахунок меншої кількості проводів, ізоляторів, лінійної арматури, більш легких опор, тощо [1]. Незважаючи на наявні недоліки, істотні переваги передач постійного струму визначають їхній розвиток в усьому світі.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Найбільш інтенсивно будівництво нових ліній електропередачі і вставок постійного струму відбувається в таких країнах, як Індія та Китай [2], які мають великі відстані між місцями споживання і виробництва електричної енергії. Наприклад, в Китаї побудовані і будуються нові лінії електропередачі постійного струму високої і надвисокої напруги для передачі великої кількості електричної енергії на великі відстані від великих гідроелектростанцій і вітрових електростанцій [3].

Але і в Європі існують великі плани щодо зміни усієї енергетичної системи з метою зменшення викидів парникових газів. Передбачається, що до 2050 року доля електроенергії, яка буде споживатися від поновлюваних джерел енергії досягне майже 100 % [4]. Для інтеграції в енергосистему великих вітрових електростанцій, розташованих в Північному морі [4], а також передачі електроенергії від великих сонячних електростанцій, розташованих в Північній Африці [5] знадобляться лінії електропередачі постійного струму високої напруги.

Взагалі в ряді країн спостерігається тенденція до збільшення кількості ліній електропередачі і вставок постійного струму і виконання усіх міжсистемних зв'язків на постійному струмі. Окрім будівництва нових, одним із шляхів розвитку електропередач постійного струму є переобладнання існуючих ліній змінного струму в лінії постійного струму. Це питання розглядається в багатьох країнах, оскільки витрати на переобладнання існуючих ліній менше ніж витрати на будівництво нових ліній. Є як практична реалізація цього [6], так дослідження можливості такої реалізації в майбутньому. Тому для України, як європейської держави, питання розвитку електропередач постійного струму також є актуальним, тим паче, що в Європейському Союзі електропередачам постійного струму відводиться велика роль вже в найближчому майбутньому.

На даний час задача визначення розподілення електричного поля під лініями електропередачі постійного струму вирішується головним чином методом інтегральних рівнянь [7], методом кінцевих різниць [8] та методом кінцевих елементів [9–11]. Всі ці методи дозволяють розрахувати поле з урахуванням коронного розряду на провадах лінії тільки вздовж окремої силової лінії та шляхом ітераційного уточнення щільності струму на поверхні коронуючих проводів лінії [7–9, 11]. В зв'язку з цим, застосування цих методів потребує спеціальних знань та навичок комп'ютерного програмування [7] або комп'ютерного моделювання [8–11], що суттєво збільшує витрати часу на вирішення даної задачі. Тому існує потреба у спрощеному інженерному методі розрахунку, який би дозволив з достатньою для практики точністю вирішити задачу оцінки рівня електростатичного поля, наприклад, за допомогою звичайного табличного

процесора без необхідності застосування потужного програмного забезпечення.

## 3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження

*Об'єкт дослідження* — електростатична складова електричного поля ліній електропередачі постійного струму.

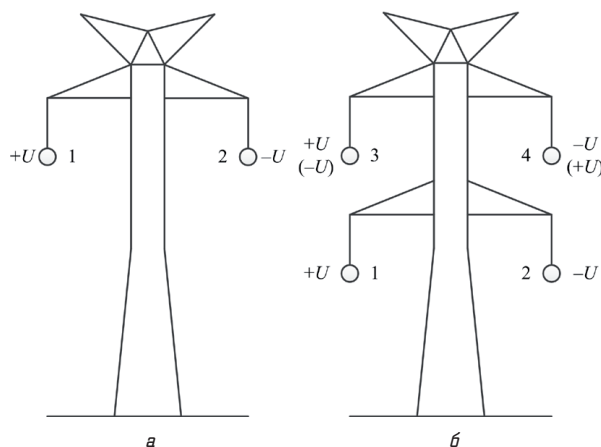
*Метою роботи* є адаптація методу еквівалентних зарядів для вирішення задачі розрахунку розподілення напруженості електростатичного поля під лініями електропередачі постійного струму, шляхом зведення його до відносно простих розрахункових формул, які не потребують застосування мов програмування або середовищ комп'ютерного моделювання.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- 1) узагальнення основних конструктивних особливостей опор ліній електропередачі постійного струму;
- 2) представлення методу розрахунку напруженості електростатичного поля під повітряними лініями постійної напруги за умови відсутності коронного розряду на провадах лінії в сухих кліматичних умовах;
- 3) максимальне спрощення розрахункових формул запропонованого методу;
- 4) сформулювати перспективи подальшого використання запропонованого методу.

## 4. Матеріали та методи дослідження електричного поля повітряних ліній електропередачі постійного струму

Нові лінії електропередачі постійного струму, як правило, виконуються одноланцюговими біполярними (рис. 1, а) або ж двохранцюговими біполярними (рис. 1, б).



**Рис. 1.** Ескізи опор ліній електропередачі постійного струму: а — опора одноланцюгової біполярної лінії; б — опора двохранцюгової біполярної лінії (в дужках показані потенціали полюсів при їх чергуванні)

На відміну від передач змінного струму в передачах постійного струму розподілення напруги по ізоляторам гірлянди визначається їхніми опорами витоків, а не власними ємностями. Якщо поверхня ізоляторів чиста та суха, то розподілення напруги по гірлянді рівномірне, але при забрудненні або зволоженні поверхні ізоляторів ця рівномірність порушується, що може викликати часткове перекриття окремих ізоляторів або ж всієї гірлянди. Особливо це проявляється в районах із забрудненою

атмосферою. На підставі наявного досвіду проектування та експлуатації передач постійного струму довжина шляху витоку має бути вдвічі більшою [6], ніж у передачах змінного струму, а саме рівною 2,6 см/кВ для районів із чистою сухою атмосферою та 3,6 см/кВ для районів із забрудненою атмосферою. Наприклад, у Бразилії для біполярної лінії електропередачі постійного струму напругою ±600 кВ були використані ізолятори з довжиною шляху витоку 2,7 см/кВ [6]. Вирішення цієї проблеми при переобладнанні існуючих ліній електропередачі змінного струму в лінії постійного струму полягає в застосуванні інших ізоляторів зі збільшеною довжиною шляху витоку або у збільшенні кількості існуючих ізоляторів в підтримуючих гірляндах. Структура переобладнаних ліній не відрізняється від ескізів, наведених на рис. 1.

Як правило переведення лінії на більшу напругу для ще більшого збільшення пропускної здатності супроводжується зміною конструкції опор. В [6] наведені приклади переобладнання одноланцюгової і двохланцюгової ліній змінного струму напругою 330 кВ, відповідно, у одноланцюгову і двохланцюгову біполярні лінії постійного струму напругою ±500 кВ. В обох випадках переобладнання супроводжувалося: збільшенням висоти існуючих опор, збільшенням кількості розщеплених проводів у полюсі; збільшенням довжини гірлянд ізоляторів. Також у першому випадку демонтувалася середня фаза лінії змінного струму, а в другому випадку демонтувалися середні траверси, розташовані з обох сторін двохланцюгової опори. Таке перетворення ліній дозволяє значно збільшити пропускну здатність електропередачі без збільшення існуючої смуги відчуження.

В електричних мережах України є велика кількість ліній 35, 110, 220 кВ змінного струму з двохланцюговими опорами та ліній 330, 500 і 750 кВ з одноланцюговими опорами з горизонтальним підвішуванням проводів, які в майбутньому можуть бути переобладнані у лінії постійного струму. В будь-якому разі всі лінії електропередачі постійного струму створюють в навколишньому середовищі електричне поле, яке в залежності від його рівня, може здійснювати шкідливий вплив на людину. Тому існує потреба в методі розрахунку напруженості електричного поля саме ліній високої напруги постійного струму.

Електричне поле, яке створюється лініями електропередачі постійного струму містить дві складових. Перша складова — це електростатичне поле, обумовлене зарядами проводів при відсутності іонізації навколо проводів. Друга складова обумовлена об'ємним зарядом навколо проводів, який створюється при іонізації.

Нехтуючи дією об'ємного заряду, можна розрахувати теоретичне значення напруженості поля під лініями електропередачі постійного струму в сухих кліматичних умовах, використовуючи той же самий метод розрахунків [12], що й для ліній електропередачі змінного струму. Мається на увазі метод еквівалентних зарядів, який завдяки своїй відносній простоті та достатньої точності одержав широке поширення на практиці розрахунків електричних полів повітряних ліній електропередачі змінного струму [13]. Згідно з цим методом розрахунок виконується для площини, проведеної нормально до напрямку траси повітряної лінії електропередачі в середині прогону, тобто там, де завдяки провисанню проводів, відстань від них до землі є найменшою, а, відповідно, напруженість електричного поля біля поверхні землі є максимальною. В розрахунок не враховують вплив

опор, завдяки віддаленню від останніх в середині прогону повітряної лінії електропередачі. В розрахунок також не враховують грозозахисні троси, завдяки їх несуттєвому впливу на розподілення поля біля поверхні землі. З урахуванням вищезазначеного можна відмітити, що задача розрахунку електричного поля повітряної лінії зводиться до розрахунку поля системи заряджених осей, розташованих поблизу провідної поверхні. Адаптований до ліній електропередачі постійного струму метод еквівалентних зарядів пропонується в наступному вигляді.

В довільній точці біля поверхні землі з геометричними координатами  $(x, y)$ , напруженість електричного поля визначається як (кВ/м):

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}, \tag{1}$$

де  $E_x, E_y$  — проекції вектора напруженості на координатні осі (кВ/м):

$$E_x = \sum_{i=1}^k E_{xi}, \tag{2}$$

$$E_y = \sum_{i=1}^k E_{yi}, \tag{3}$$

де  $k$  — кількість полюсів лінії електропередачі постійного струму (наприклад, для лінії, зображеної на рис. 1,  $a$   $k=2$ , а для зображеної на рис. 1,  $b$   $k=4$ ). В свою чергу проекції вектора напруженості на координатні осі визначаються з наступних виразів:

$$E_{xi} = \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{x-x_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \frac{x-x_i}{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2} \right), \tag{4}$$

$$E_{yi} = \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{y-y_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \frac{y+y_i}{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2} \right), \tag{5}$$

де  $\tau_i$  — заряд на одиницю довжини проводу відповідного полюса лінії, Кл/м;  $x_i, y_i$  — геометричні координати осей проводів полюсів лінії, м;  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — електрична стала.

Щоб визначити невідомі заряди  $\tau_i$  необхідно скласти та вирішити систему рівнянь, яку прийнято називати першою групою формул Максвелла [12]. Для одноланцюгової біполярної лінії (рис. 1,  $a$ ) ця система має вигляд (6), для двохланцюгової біполярної (рис. 1,  $b$ ), відповідно, вигляд (7). Причому тут і далі, знаки « $\pm$ » та « $\mp$ » означають, що верхній з них відноситься до двохланцюгової лінії без чергування полюсів, а нижній до лінії з чергуванням полюсів.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +U \\ -U \end{bmatrix}, \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +U \\ -U \\ \pm U \\ \mp U \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Потенціали полюсів  $+U$  та  $-U$  необхідно задати в кіловольтах (кВ). Незалежно від типу лінії потенціальні коефіцієнти визначають за формулами (8) і (9).

$$a_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2y_i}{r_0}\right), \text{ при } i = j, \quad (8)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\sqrt{\frac{(x_j - x_i)^2 + (y_j + y_i)^2}{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}}\right), \text{ при } i \neq j. \quad (9)$$

Аналогічно розщепленій фазі ліній електропередачі змінного струму, на лініях постійного струму використовується розщеплена конструкція полюса. Під конструкцією полюса мають на увазі кількість проводів у полюсі, їх діаметр та взаємне розташування. Окремі  $n$  проводів розщепленого полюса розташовуються по вершинах правильного багатокутника. Радіус окружності, описаної по вершинам цього багатокутника також називається радіусом розщеплення  $R$ , а відстань між осями проводів називається кроком розщеплення  $a$ . Ці величини пов'язані співвідношенням:

$$R = \frac{a}{2 \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}. \quad (10)$$

Розщеплені проводи з електричної точки зору еквівалентні одиночному проводу, але більшого перетину, ніж кожен з окремих складових:

$$r_\Sigma = \sqrt[n]{nr_0 R^{n-1}} = R \sqrt[n]{nr_0}. \quad (11)$$

Саме значення  $r_\Sigma$ , розраховане за формулою (11) необхідно підставляти в (8) замість  $r_0$  у випадку використання розщепленого полюса.

Вирішивши систему рівнянь (6) або (7), наприклад, за допомогою детермінантів, знаходять значення  $\tau_i$ , а вже після цього — напруженість електричного поля в довільній точці за формулами (1)–(5). Покажемо, як це можна зробити спочатку для одноланцюгової лінії електропередачі постійного струму (рис. 1, а).

Для розв'язання першої групи формул Максвелла (6) згідно з правилом Крамера запишемо систему з двома невідомими в матричній формі:

$$a \cdot \tau = u,$$

де  $a$  — основна матриця системи,  $\tau$  — матриця-стовпець невідомих,  $u$  — матриця-стовпець вільних членів:

$$a = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} +U \\ -U \end{bmatrix}.$$

Тоді, згідно з правилом Крамера, невідомі  $\tau_1$  і  $\tau_2$  обчислюються за такими формулами:

$$\tau_1 = \frac{\det a_1}{\det a}, \quad (12)$$

$$\tau_2 = \frac{\det a_2}{\det a}. \quad (13)$$

В рівняннях (12), (13) матриці  $a_1$  і  $a_2$  отримують з  $a$  заміною  $i$ -го стовпця ( $i=1,2$ ) стовпцем вільних членів  $u$ :

$$a_1 = \begin{bmatrix} +U & a_{12} \\ -U & a_{22} \end{bmatrix}, \quad a_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & +U \\ a_{21} & -U \end{bmatrix}.$$

Тоді, з урахуванням симетрії траверс відносно центральної осі опори (оскільки  $|x_1|=|x_2|$  та  $y_1=y_2$ , то  $a_{22}=a_{11}$ ;  $a_{21}=a_{12}$ ) детермінанти в рівняннях (12), (13) обчислюються за формулами (14)–(16):

$$\det a = a_{11}^2 - a_{12}^2, \quad (14)$$

$$\det a_1 = U(a_{11} + a_{12}), \quad (15)$$

$$\det a_2 = -U(a_{11} + a_{12}). \quad (16)$$

Тепер розглянемо випадок двохланцюгової лінії електропередачі постійного струму (рис. 1, б). Невідомі заряди  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  і  $\tau_4$  визначаються аналогічно:

$$\tau_1 = \frac{\det a_1}{\det a}, \quad (17)$$

$$\tau_2 = \frac{\det a_2}{\det a}, \quad (18)$$

$$\tau_3 = \frac{\det a_3}{\det a}, \quad (19)$$

$$\tau_4 = \frac{\det a_4}{\det a}. \quad (20)$$

Матриці  $a_i$  мають вид:

$$a_1 = \begin{bmatrix} +U & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ -U & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \pm U & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ \mp U & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}, \quad a_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & +U & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & -U & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & \pm U & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & \mp U & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix},$$

$$a_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & +U & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & -U & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & \pm U & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & \mp U & a_{44} \end{bmatrix}, \quad a_4 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & +U \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & -U \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \pm U \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & \mp U \end{bmatrix}.$$

З урахування симетрії траверс відносно центральної осі опори (оскільки  $|x_1|=|x_2|=|x_3|=|x_4|$ ,  $y_1=y_2$  та  $y_3=y_4$ , то  $a_{22}=a_{11}$ ;  $a_{44}=a_{33}$ ;  $a_{21}=a_{12}$ ;  $a_{43}=a_{34}$ ;  $a_{23}=a_{32}=a_{41}=a_{14}$ ;  $a_{24}=a_{42}=a_{31}=a_{13}$ ) детермінанти в рівняннях (17)–(20) обчислюються за формулами (21)–(25):

$$\det a = (-a_{13}^2 - 2a_{13}a_{14} - a_{14}^2 + a_{11}a_{33} + a_{11}a_{34} + a_{12}a_{33} + a_{12}a_{34})(-a_{13}^2 + 2a_{13}a_{14} - a_{14}^2 + a_{11}a_{33} - a_{11}a_{34} - a_{12}a_{33} + a_{12}a_{34}). \quad (21)$$

$$\det a_1 = U(a_{13} - a_{14} \mp a_{33} \pm a_{34}) \times (\pm a_{13}^2 \pm 2a_{13}a_{14} \pm a_{14}^2 \mp a_{11}a_{33} \mp \mp a_{11}a_{34} \mp a_{12}a_{33} \mp a_{12}a_{34}). \quad (22)$$

$$\det a_2 = U(a_{13} - a_{14} \mp a_{33} \pm a_{34}) \times (\mp a_{13}^2 \mp 2a_{13}a_{14} \mp a_{14}^2 \pm a_{11}a_{33} \pm \pm a_{11}a_{34} \pm a_{12}a_{33} \pm a_{12}a_{34}). \quad (23)$$

$$\det a_3 = U(a_{11} - a_{12} \mp a_{13} \pm a_{14}) \times (\mp a_{13}^2 \mp 2a_{13}a_{14} \mp a_{14}^2 \pm a_{11}a_{33} \pm \pm a_{11}a_{34} \pm a_{12}a_{33} \pm a_{12}a_{34}). \quad (24)$$

$$\det a_4 = U(a_{11} - a_{12} \mp a_{13} \pm a_{14}) \times (\pm a_{13}^2 \pm 2a_{13}a_{14} \pm a_{14}^2 \mp a_{11}a_{33} \mp \mp a_{11}a_{34} \mp a_{12}a_{33} \mp a_{12}a_{34}). \quad (25)$$

Вирішення систем рівнянь (6) та (7) за допомогою детермінантів (14)–(16) та, відповідно, (21)–(25) усуває необхідність застосування ітераційних методів розрахунку, які потребують використання мов програмування (наприклад, методу Гауса зі зворотним ходом). При цьому необхідно зазначити, що детермінанти  $\det a$  мають розмірність  $\text{м}^4/\Phi^4$ , а детермінанти  $\det a_i$  розмірність  $\text{кВ} \cdot \text{м}^3/\Phi^3$ .

### 5. Обговорення результатів розрахунків напруженості електростатичного поля повітряних ліній електропередачі постійного струму

Завдяки готовим виразам (14)–(16) та (21)–(25) запропонований вище метод розрахунку напруженості електростатичного поля під лініями електропередачі постійного струму усуває необхідність в застосуванні мов програмування в інженерних розрахунках. Порівняння з розрахунками, проведеними за іншими методами [14] показало, що похибка запропонованого методу не перевищує 2 %. Співставлення проводилося для біполярної лінії  $\pm 400$  кВ з геометричними параметрами  $x_1 = -6,1$  м;  $x_2 = 6,1$  м;  $y_1 = y_2 = 10,7$  м;  $a = 0,46$  м;  $r_0 = 0,0191$  м;  $r_2 = 0,0937$  м. Розраховане максимальне значення напруженості електростатичного поля на рівні землі становить 9,55 кВ/м. Загалом незважаючи на те, що електричне поле під лініями постійного струму може чисельно бути більшим, ніж поле під лініями змінної напруги, екологічний вплив від ліній постійного струму менший, ніж від ліній змінного струму. Статичні електричні поля можуть відчуватись, але вони, практично, не проникають в тіло. Оскільки первинні електростатичні поля не змінюються в часі, то поля, індуковані в тілі від зовнішнього джерела поля – несуттєві. Технічним комітетом CENELEC (від фр. – Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique) за граничний допустимий рівень напруженості постійного електричного поля, яке діє на все тіло людини, прийнято 42 кВ/м [14, 15] (для змінного електричного поля частотою 50 Гц це значення становить 20 кВ/м [15]). Також для персонала встановлюється граничний час перебування в постій-

ному електричному полі протягом усієї 8-ми годинної робочої зміни [14]:

$$t \leq \frac{112}{E}, \quad (26)$$

де  $t$  – час перебування, години;  $E$  – напруженість постійного електричного поля, кВ/м. Тоді, згідно (26), в полі напруженістю 28 кВ/м не можна перебувати більше  $112/28 = 4$  годин, а протягом усієї 8-ми годинної робочої зміни, персонал може перебувати в постійному електричному полі напруженістю не більше  $112/8 = 14$  кВ/м.

Представлений в даній статті метод цілком може бути використаний для інженерних розрахунків електростатичного поля під лініями електропередачі постійного струму в сухих кліматичних умовах. Розрахунок поля з урахуванням об'ємного заряду представляє більш складну наукову задачу і може бути виконаний з використанням модифікованого методу Дейча-Попкова [16]. Проведені розрахунки [16] показують, що об'ємний заряд у зовнішній зоні уніполярного коронного розряду підсилює поле біля некоронуючого електрода і послабляє його біля коронуючого електрода з малим радіусом кривизни. Тобто, за умови коронного розряду на проводах, порівняно з розглянутим електростатичним полем, поле біля поверхні землі збільшиться, а поле біля полюсів лінії зменшиться.

### 6. Висновки

1. Показано, що як нові лінії електропередачі постійного струму, так і переобладнання на постійний струм існуючі лінії змінного струму як правило, виконуються одноланцюговими або двохранцюговими біполярними лініями, що характеризуються симетрією відносно центральної осі опори.
2. Адаптовано метод еквівалентних зарядів для розрахунку напруженості електростатичного поля під вищезазначеними одноланцюговими та двохранцюговими біполярними лініями постійного струму за умови відсутності коронного розряду на проводах ліній в сухих кліматичних умовах.
3. Вперше отримано вирази, які суттєво спрощують інженерні розрахунки електростатичного поля, оскільки враховують симетрію полюсів відносно центральної осі опори, а також не використовують ітераційних методів розрахунків (наприклад, методу Гауса).
4. Запропонований метод може бути основою для подальшого врахування дії коронного розряду на розподілення напруженості електричного поля під лініями електропередачі постійного струму.

### Література

1. Hingorani, N. G. High-voltage DC transmission: a power electronics workhorse [Text] / N. G. Hingorani // IEEE Spectrum. – 1996. – Vol. 33, № 4. – P. 63–72. doi:10.1109/6.486634
2. Long, W. HVDC transmission: yesterday and today [Text] / W. Long, S. Nilsson // IEEE Power and Energy Magazine. – 2007. – Vol. 5, № 2. – P. 22–31. doi:10.1109/mpae.2007.329175
3. Lou, S. Optimizing HVDC transmission for large-scale wind power base in China [Text] / S. Lou, T. Hou, Y. Wu, Y. Cui // IEEE Power and energy society general meeting. – 2013. – P. 1–5. doi:10.1109/pesmg.2013.6672733
4. Haileselassie, T. M. Power system security in a meshed North Sea HVDC grid [Text] / T. M. Haileselassie, K. Uhlen // Proceedings of the IEEE. – 2013. – Vol. 101, № 4. – P. 978–990. doi:10.1109/jproc.2013.2241375

5. Bohn, S. A pan-European-North African HVDC grid for bulk energy transmission – a model-based analysis [Text] / S. Bohn, M. Agsten, A.-K. Marten, D. Westermann, I. Boie, M. Ragwitz // IEEE/PES T&D Conference and exposition. – 2014. – P. 1–5. doi:10.1109/tde.2014.6863272
6. Häusler, M. Converting AC power lines to DC for higher transmission ratings [Text] / M. Häusler, G. Schlayer, G. Fitterer // ABB Review. – 1997. – Vol. 3. – P. 4–11.
7. Zhang, B. Calculation of ion flow field under HVDC bipolar transmission lines by integral equation method [Text] / B. Zhang, J. He, R. Zeng, S. Gu, L. Cao // IEEE Transactions on Magnetics. – 2007. – Vol. 43, № 4. – P. 1237–1240. doi:10.1109/tmag.2007.892305
8. Qiao, J. Calculation of the ionised field and the corona losses of high-voltage direct current transmission lines using a finite-difference-based flux tracing method [Text] / J. Qiao, J. Zou, B. Li // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2015. – Vol. 9, № 4. – P. 348–357. doi:10.1049/iet-gtd.2014.0333
9. Al-Hamouz, Z. M. Improved calculation of finite-element analysis of bipolar corona including ion diffusion [Text] / Z. M. Al-Hamouz, M. Abdel-Salam, A. Mufti // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1998. – Vol. 34, № 2. – P. 301–309. doi:10.1109/28.663472
10. Zhao, H. EM environmental evaluation of HVDC transmission lines [Text] / H. Zhao, S. Fortin, J. Ma, F. P. Dawalibi // The 2006 4th Asia-Pacific conference on environmental electromagnetic. – 2006. – P. 260–262. doi:10.1109/ceem.2006.257948
11. Li, W. Boundary condition improvements on ion flow field calculation of HVDC bipolar transmission lines [Text] / W. Li, B. Zhang, J. He, R. Zeng // International conference on high voltage engineering and application. – 2008. – P. 245–248. doi:10.1109/ichve.2008.4773919
12. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле [Текст]: уч. для электротехн., энерг., приборостронт. / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1986. – 8-е изд. – 263 с.
13. Mujezinovic, A. Electric field calculation around of overhead transmission lines in Bosnia and Herzegovina [Text] / A. Mujezinovic, A. Carsimamovic, S. Carsimamovic, A. Muharemovic, I. Turkovic // International symposium on electromagnetic compatibility (EMC Europe). – 2014. – P. 1001–1006. doi:10.1109/emceurope.2014.6931049
14. Bailey, W. H. HVDC Power transmission environmental issues review [Text] / W. H. Bailey, D. E. Weil, J. R. Stewart // Oak Ridge National laboratory. – 1997. – P. 1–108. doi:10.2172/580576
15. Дьяков, А. Ф. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы [Текст] / под общ. ред. А. Ф. Дьякова // Электропередачи переменного тока. – М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2012. – Т. 1. – 696 с.
16. Бржезицкий, В. О. Розрахунок уніполярної корони методом Дейча-Попкова [Текст]: доп. / В. О. Бржезицкий, Є. О. Троценко, Т. Ф. Татаренко // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетички та автоматики». – Київ: «Політехніка», 2009. – Т. 2. – С. 243–247.

#### РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Адаптирован метод эквивалентных зарядов для расчетов напряженности электростатического поля под одноцепными и двухцепными биполярными линиями электропередачи постоянного тока. Метод позволяет рассчитывать напряженность электростатического поля под воздушными линиями постоянного напряжения при условии отсутствия коронного разряда на проводах линии в сухих климатических условиях.

**Ключевые слова:** линия электропередачи постоянного тока, биполярная линия, напряженность электрического поля, метод эквивалентных зарядов.

---

*Троценко Євгеній Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: trotsenko@email.ua.*

---

*Троценко Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.*

---

*Trotsenko Yevgeniy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: trotsenko@email.ua*