

DOI:

УДК 622.457:519.6

М.М. Біляєв, д-р т. н., професор, gidravlika2013@mail.ru

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна,
м. Дніпро

Т.І. Русакова, к.т.н., доцент, gusakovati1977@gmail.com

Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, м. Дніпро

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ВУЛИЦІ

У статті представлено методику чисельного розрахунку напруженості електричного поля на вулиці, яка дозволяє розраховувати дану фізичну величину з урахуванням розміщення на вулиці екранів та оцінювати ефективність застосування екранів для зменшення величини електричного поля в робочій зоні. Розроблено програмне забезпечення для розрахунку електричного потенціалу на основі алгоритмів кінцево-різницевих методів розв'язання рівняння Лапласа. Встановлено зони та рівень потенціалу електричного поля. Методика дозволяє визначати інтенсивність напруженості електричного поля від декількох джерел електричного поля на вулиці, що дає можливість прогнозувати рівень електричного поля при збільшенні кількості електромобілів на вулицях міста.

Ключові слова: чисельна методика, напруженість, потенціал електричного поля, кінцево-різницеві методи, екрани, робоча зона.

The article presents the method of numerical calculation of electric field strength on the street, which allows to calculate this physical quantity taking into account the location of screens in the street and evaluate the efficiency of the use of screens to reduce the electric field in the working area. The software for calculating the electric potential based on the algorithms of finite-difference methods for solving the Laplace equation is developed. The zones and level of potential electric field strength are established. The method allows to determine the intensity of the electric field strength from several sources of electric field in the street, which makes it possible to predict the level of the electric field with the increase in the number of electric vehicles on the streets of the city.

Keywords: numerical method, tension, electric field potential, finite-difference methods, screens, working area.

Постановка проблеми

У містах різних країн світу поширеним залишається використання громадського електротранспорту, поряд з цим спостерігаються тенденції активного впровадження електромобілів. Незважаючи на мізерну частку електрокарів у світовому автопарку, ринок електромобілів набуває розвитку. У 2016 році інвестиції в цей сегмент в усьому світі склали \$ 2 млрд — це в два рази більше, ніж у 2015 році і на \$ 650 млн більше, ніж за три попередні роки разом узяті. Як відомо з початку десятиліття інвестиції в електричний транспорт не показували вражаючих результатів. У 2010—2012 роках вони становили \$ 800 млн в рік, у 2013 році інвестиції практично припинилися. Але завдяки успіхам компаній Tesla, Nicola Motor і популяризації електротранспорту, інвестиції почали зростати. Німецький концерн Daimler планує витратити € 10 млрд на створення 10 моделей електричних автомобілів до 2025 року та німецька компанія Volkswagen ставить перед собою мету — 30 моделей нових електромобілів до цього ж терміну при рівні продажів — мільйон електромобілів на рік. Масовий випуск електрокарів до 2020 року планує налагодити японська Toyota. Займатися розвитком електричного транспорту компанії стимулює влада країн. Екологічно чистий транспорт підтримують уряди таких країн, як США, Китай, Німеччина, Норвегія, Нідерланди та інші. Електромобілі будуть превалювати на дорогах починаючи з 2025 року. На сьогоднішній частку електрокарів на автомобільному ринку Китаю досягла 1,4 %, в США вона становить 1,1 %, в Європі — 1,2 %. Найбільш активно в поширенні транспорту з нульовими викидами інвестує саме Німеччина. Навесні 2016 року уряд цієї країни оголосило про остаточне затвердження плану і бюджету програми розвитку електричного транспорту, яка обійдеться країні в € 900 млн.

Програма включає ряд заходів з підтримки громадян, які вирішили пересісти на екологічно чистий автомобіль. Німеччина поставила собі за мету випустити на дороги 1 млн електромобілів до 2020 року, а також запропонувала Євросоюзу з 2030 року ввести заборону на продаж нових автомобілів з бензиновими і дизельними двигунами.

Перспектива розвитку електромобілів призводить до зростання потужності електричного поля на вулиці. Неоднорідність розподілу електромагнітного та електростатичного полів полягає в тому, що в деяких районах, на вулицях або проспектах їх фон змінюється в 5—7 разів і більше. Причинами цього є різний рельєф місцевості, різноповерхова забудова, різна потужність генеруючих джерел. Людина потрапляє в зони з різною напруженістю поля, тому повинні спрацьовувати механізми адаптації. Очевидно, що такий режим не є природним для людини, а отже, небезпечний.

Для захисту від електромагнітного поля розроблено спеціальні рекомендації щодо зниження напруженості електричного поля, що генерується системами розподілу і передачі електроенергії, наприклад: заземлити металевий дах, а на неметалевий дах встановлювати заземлену сітку; на відкритій місцевості можуть застосовуватися залізобетонні огорожі, тросові екрани або просто посадки дерев висотою більше 2 м. Прийнято наступні гранично допустимі значення напруженості електричного поля: всередині житлових будинків — 0,5 кВ/м; на території зони житлової забудови — 1 кВ/м; в населеній місцевості, поза зоною житлової забудови, а також на території городів і садів — 5 кВ/м; на ділянках перетину ПЛ з автомобільними дорогами I—IV категорії — 10 кВ/м; в населеній місцевості (незабудовані місцевості, хоча б і часто відвідувані людьми, доступні для транспорту, та сільськогосподарські угіддя) — 15 кВ/м; в важкодоступній місцевості, спеціально огороженій для виключення доступу населення — 20 кВ/м.

При напруженості електричного поля вище 1 кВ/м повинні бути вжиті заходи по виключенню впливу на людину відчутних електричних розрядів і струмів згідно Державних санітарних норм і правил.

У зв'язку із зростанням та неоднорідністю напруженості електричного поля необхідні методики, які б дозволяли швидко прогнозувати рівень електричного напруження біля автомагістралей. Дуже важливо, щоб ці методики дозволяли виконувати прогноз з урахуванням об'єктів, що розташовуються вздовж автомагістралей, оскільки вони призводять до деформації еквіпотенціальних ліній напруженості електричного поля, а також самі можуть бути джерелами виникнення електричного поля. Це достатньо складна задача, оскільки потрібно виконувати розрахунки в області складної геометричної форми.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Найбільш повна картина формування електромагнітного поля може бути отримана в наслідок інтегрування системи рівнянь Максвелла. Розв'язання такої системи для простих областей виконується на основі аналітичних методів: розділення змінних, власних функцій, конформного відображення та інтегральних методів.

Вирішення системи рівнянь Максвелла для областей більш складної геометричної форми виконується на основі чисельних методів. Метод кінцевих елементів (FDTD), розроблений К. Уее [1] простий та ефективний, але його важко застосовувати на неструктурованих сітках, адже виникає неточність представлення рішення на кривих границях та обмеженість порядку точності. Метод кінцевих елементів використовується на глобальній сітці, що не має висячих (з'єднувальних) вузлів [2]. Метод Гальоркіна [3], що дозволяє легко обробляти елементи різних типів та форм. Варіаційно-інтеграційний метод (VIM) [4], запропонований J. He [5], базується на методі Лагранжа, а також застосування послідовного наближення функцій призводить до точного розв'язку. Цей метод є потужним інструментом для вирішення різних задач без необхідності дискретизації змінних, тому не викликає помилок округлення і не потребує великої комп'ютерної пам'яті та часу. Метод кінцевих різниць (FDM) був вперше розроблений А. Томом для вирішення нелінійних гідродинамічних рівнянь та знайшов застосування для розв'язання різних прикладних задач [6]. Методи кінцевих різниць засновані на наближеннях, які дозволяють замінити диференціальні рівняння на різницеві рівняння. Кінцеві різницеві апроксимації пов'язують значення залежної змінної в точці області зі значенням змінної в деяких сусідніх точках, включає в себе три

кроки [7]: заміна області рішення на сітку вузлів; апроксимація даного диференціального рівняння кінцевими різницями; вирішення різницевого рівнянь згідно граничних та початкових умов.

Рівняння Максвелла зазвичай розв'язуються в диференціальній формі, тому є доцільним розв'язувати їх методом кінцевих різниць. Аналізуючи роботи сучасних та зарубіжних авторів можна зробити висновок, що вирішення системи рівнянь Максвелла, як правило зводиться до розв'язання рівняння Лапласа або Пуассона. Викладено розв'язання рівняння Лапласа для електричного потенціалу в певній області простору з використанням чисельного методу кінцево-різницевої апроксимації, отримано криві рівня електричного потенціалу біля пластини [8]. Розглянуто метод чисельного рішення диференціального рівняння Пуассона з метою розрахунку розподілу потенціалу електростатичного поля в двовимірній області. Проаналізовано приклади розв'язання задач в декартових і сферичних координатах [9]. Наведено огляд та порівняльний аналіз основних постановок задач розрахунку нестационарних тривимірних електромагнітних полів методом скінчених елементів. Розглянуті постановки базуються на використанні векторного магнітного потенціалу та інших потенціалів електромагнітного поля. Проаналізовано переваги та недоліки різних постановок [10]. Показано, що рівняння Пуассона є дуже потужним інструментом моделювання електростатичних систем, але може бути вирішене аналітично для дуже спрощених моделей. Отже, чисельний кінцево-різницевий метод дозволяє змоделювати поведінку потенціалу напруги та інтенсивності електричного поля для заданих тіл конкретної геометричної форми [11]. Виконано моделювання тривимірних електромагнітних полів за допомогою потенціалів [12]. Для дослідження розподілу магнітного поля, а саме, вектору магнітної індукції, вектору напруженості і магнітного векторного потенціалу, а також основних електромагнітних характеристик, тобто індуктивності і електромагнітної сили електротехнічних пристроїв і систем використано програмний пакет ANSYS [13]. Електричний скалярний потенціал φ і значення векторного потенціалу після дискретизації і перетворення диференціальних рівнянь визначено із застосуванням ітераційного методу [14].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка чисельної методики для розрахунку електростатичного поля в областях складної геометричної форми. На основі проведених розрахунків треба побудувати ізолінії для електричного потенціалу з урахуванням різної висоти екранів.

Виклад основного матеріалу

Більшість практичних задач відносно формування електромагнітного поля може бути розв'язана методом інтегрування системи рівнянь Максвелла (1—4) [15].

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (1)$$

де H — напруженість магнітного поля (А/м), J — щільність струму провідності (А/м²), $\frac{\partial D}{\partial t}$ — щільність струму зміщення (А/м²). Перше рівняння Максвелла виражає той факт, що магнітне поле існує скрізь, де змінюється від часу вектор електричного зміщення або вектор напруженості електричного поля, що обумовлює зміщення.

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2)$$

де $\frac{\partial B}{\partial t}$ — зміна магнітної індукції з часом (В/м²), E — напруженість електричного поля (В/м). Фізичний зміст другого рівняння Максвелла полягає в тому, що в просторі, де магнітна індукція змінюється з часом, з'являється напруженість електричного поля.

Перше додаткове рівняння або третє рівняння Максвелла висловлює відсутність джерел вектору магнітної індукції.

$$\operatorname{div} B = 0. \quad (3)$$

Друге додаткове рівняння системи розглядається для визначення щільності заряду, його

називають також диференціальній формою теореми Гауса.

$$\operatorname{div} D = \rho. \quad (4)$$

Між векторами D і E , B і H , E і J , що входять в систему рівнянь (1—4), існують співвідношення, що залежать від того середовища, в якому розглядається поле:

$$D = \varepsilon \cdot E, \quad B = \mu \cdot H, \quad J = \gamma \cdot (E + E_e), \quad (5)$$

де ε , μ , γ — відповідно діелектрична проникність, магнітна проникність і електрична провідність (питома електропровідність) середовища, E_e — стороння напруженість, складова, яка утворює електрорушійну силу.

Щільність енергії поля w пов'язана з напруженням електричного та магнітного полів рівністю:

$$w = \frac{1}{2} ED + \frac{1}{2} HB. \quad (6)$$

Рівняння (1)—(6) утворюють систему, за допомогою якої при заданих початкових умовах визначається електричне поле для будь-якого подальшого моментів часу.

Ця задача є дуже складною з математичної точки зору, тому що розв'язання ускладнюється тим, що потрібно шукати розв'язок в області складної геометричної форми. Наприклад, на вулиці таку складну форму створюють малі архітектурні форми, тимчасові споруди, будівлі.

З практичної точки зору від рівнянь Максвелла (1)—(6) переходять до більш простих моделей: електростатичних та магнітостатичних.

В даній роботі розглядається розрахунок електростатичного поля при наявності джерела електричного поля на вулиці. Виходячи з прийнятих в електростатиці постулатів для дослідження електростатичних полів, використовується рівняння для електричного потенціалу, тобто рівняння Лапласа, яке справедливе при відсутності заряду.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (7)$$

При розв'язанні крайових задач використовуємо наступні граничні умови:

$\varphi = 0$ — на поверхні Землі та на віддалених границях розрахункової області; $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$, якщо внутрішня тверда границя в розрахунковій області (екран) виступає діелектриком, де \vec{n} — одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої стінки; $\varphi = 0$, якщо внутрішня тверда границя в розрахунковій області (екран) виступає провідником.

Для чисельного розв'язання рівняння (7) використовується два кінцево-різницевого методи з метою контролю проведення обчислювальних розрахунків.

Спочатку рівняння Лапласа приводиться до рівнянь еволюційного виду, тобто застосовується ідея встановлення розв'язання з часом:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, \quad (8)$$

де t — фіктивний час, при $t \rightarrow \infty$, розв'язок рівняння (8) прямує до розв'язку рівняння Лапласа. Слід підкреслити, що для розв'язання даного рівняння необхідно задати початкову умову, тобто поле потенціалу при $t = 0$. Наприклад, можна прийняти $\varphi = 0$ в усій розрахунковій області при $t = 0$.

Для чисельного інтегрування рівняння (8) застосовується метод сумарної апроксимації [16]. Метод базується на центрально-різницевої апроксимації похідних за часових та по координаті. Розглядається рівномірно розподілена прямокутна сітка в двовимірному просторі, кожна комірка сітки має розміри Δx , Δy вздовж відповідної декартової осі, координати вузлів сітки обчислюються, як $(x, y)_{i,j} = (i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y)$, $i, j \in Z$. Аналогічно час рівномірно дискретизується

$t = n \cdot \Delta t$. Функція $\varphi(x, y, t)$ може бути виражена в будь-якому вузлу дискретним аналогом $\varphi(x, y, t) = \varphi(i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y, n \cdot \Delta t) = \varphi_{i,j}^n$.

$$\frac{\varphi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \varphi_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-\varphi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \varphi_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-\varphi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \varphi_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right], \quad (9)$$

$$\frac{\varphi_{i,j}^{n+1} - \varphi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{\varphi_{i+1,j}^{n+1} - \varphi_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{\varphi_{i,j+1}^{n+1} - \varphi_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \quad (10)$$

Невідома величина $\varphi_{i,j}$ на кожному кроці розщеплення розраховується за формулами:

– на першому кроці:

$$\varphi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \left[\varphi_{i,j}^n + \Delta t \left[\frac{\varphi_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{\varphi_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] \right] / \left[1 + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \right]; \quad (11)$$

– на другому кроці:

$$\varphi_{i,j}^{n+1} = \left[\varphi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \left[\frac{\varphi_{i+1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{\varphi_{i,j+1}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] \right] / \left[1 + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \right]. \quad (12)$$

Розрахунок закінчується при виконанні умови $|\varphi_{i,j}^{n+1} - \varphi_{i,j}^n| \leq \varepsilon$, де ε — точність розрахунків, $\varepsilon = 10^{-3} \div 10^{-6}$.

Знайдені значення електричного потенціалу дозволяють розрахувати компоненти вектору напруженості електричного поля на гранях різницевих комірок в кожний момент часу.

$$E_{x \ i,j} = \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad E_{y \ i,j} = \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i,j-1}}{\Delta y}. \quad (13)$$

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа (7) використовується метод Лібмана [6], який дозволяє апроксимувати рівняння Лапласа залежностями виду:

$$\frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0. \quad (14)$$

Значення потенціалу швидкості визначається залежністю:

$$\varphi_{i,j} = \frac{(\varphi_{i+1,j} + \varphi_{i-1,j}) \cdot \Delta y^2 + (\varphi_{i,j+1} + \varphi_{i,j-1}) \cdot \Delta x^2}{2 \cdot (\Delta y^2 + \Delta x^2)}. \quad (15)$$

Для того, щоб розпочати процес розрахунку по методу Лібмана необхідно задати «початкове» наближення для електричного потенціалу в розрахунковій області. Розрахунок ітераційного процесу закінчується при виконанні умови $|\varphi_{i,j}^{m+1} - \varphi_{i,j}^m| \leq \varepsilon$, де ε — точність розрахунків, m — номер ітерації.

Знайдені значення електричного потенціалу дозволяють розрахувати компоненти вектору напруженості електричного поля (13).

Розглядається розв'язання модельної задачі: в межах автодороги розміщується два джерела електричного поля, а на границі проїжджої частини дороги, знаходиться екран та робоча зона працівника (рис. 1). При моделюванні враховується величина електричного поля Землі. Потрібно визначити напруженість електричного поля в робочій зоні при різній висоті бар'єру.

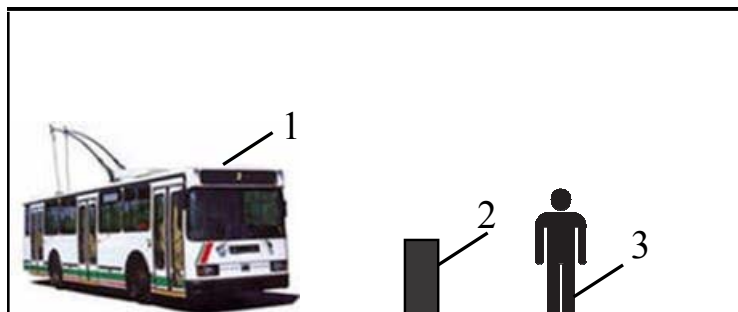


Рис. 1. Схема розрахункової області: 1 — електричний транспорт, 2 — екран, 3 — робітник в робочій зоні

Верхнє джерело — контактний провід, нижнє джерело — електродвигун. Розглядаються варіанти низького та високого екрану, який виступає діелектриком. Ставиться задача оцінки впливу висоти екрану на рівень електричного поля за екраном, де знаходиться робоча зона працівника рис. 1. Задача, що розглядається є модельною, але ілюструє можливості використання розробленої чисельної моделі для прогнозування напруженості електричного поля при наявності електромобілів на автотрасах.

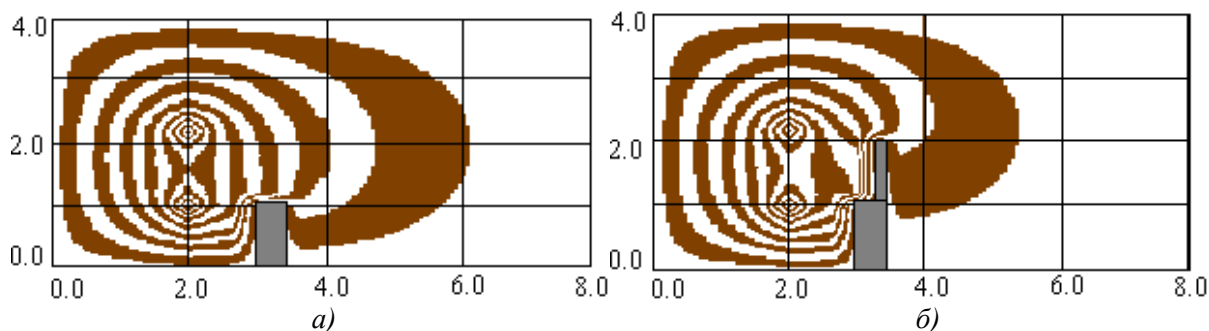


Рис. 2. Поле електричного потенціалу з використанням екранів:
а) низький екран; б) високий екран

На рис. 2 представлено результати комп'ютерного моделювання, зображено поле електричного потенціалу у випадках використання різного по висоті екрану. Добре видно як наявність екрану призводить до деформації ізоліній електричного поля. На рисунку чітко визначається розміщення джерел електричного поля — це дві підзони з великим градієнтом електричного потенціалу, що має форму кола. Із рис. 2 б) видно, що контур електричного потенціалу при наявності високого екрану змінює свою форму за екраном, він менш опущений вниз, ніж у випадку низького екрану рис. 2 а). Це підтверджує можливості моделі «вловлювати» зміни у внутрішніх граничних умовах, що впливають на формування поля електричного потенціалу.

На рис. 3 представлено значення напруженості електричного поля в робочій зоні на різній відстані від екрану. Видно, що використання високого екрану призводить до зниження напруженості електричного поля в робочій зоні.

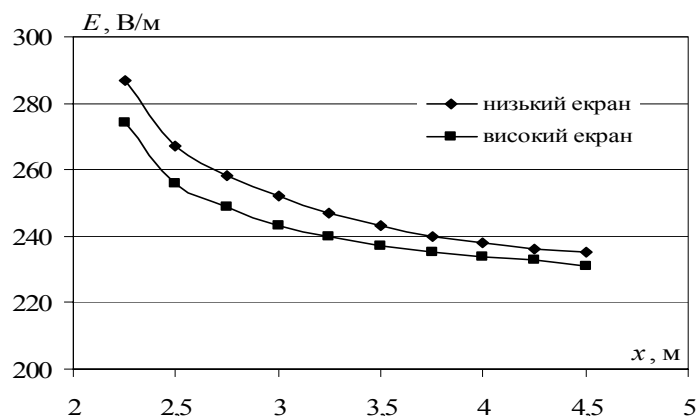


Рис. 3. Розподіл напруженості електричного поля на висоті $h = 2,2$ м при використанні екранів різної висоти

Висновки та перспективи подальших досліджень

В результаті проведених досліджень було отримано наступні результати:

- розроблено чисельну методіку для аналізу напруженості електричного поля на вулиці, яка дозволяє розраховувати величину напруженості електричного поля з урахуванням розміщення на вулиці екранів та оцінювати ефективність застосування екранів для зменшення величини електричного поля в робочій зоні;
 - враховано, що дана методіка дозволяє визначати інтенсивність напруженості електричного поля від декількох джерел електричного поля на вулиці, що дає можливість прогнозувати рівень електричного поля при збільшенні кількості електромобілів на вулицях міста;
 - розроблено програмне забезпечення для розрахунку електричного потенціалу на основі алгоритмів кінцево-різницевого методу розв'язання рівняння Лапласа;
 - проведено обчислювальні експерименти, встановлено зони та рівень напруженості електричного поля;
 - особливістю розробленої чисельної методіки є швидкість проведення обчислень, що дозволяє використовувати програмне забезпечення при проведенні великої кількості розрахунків при розв'язанні комплексу задач, пов'язаних із забезпеченням нормальних умов мікроклімату на вулицях міста.

Список використаної літератури

1. Taflove, A. Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method / A. Taflove // Artech House, Boston. – 1995. – P. 149–161.
2. Momani, S. Application of He's Variational Iteration Method to Helmholtz Equation / S. Momani, S. Abuasad // Chaos, Solitons and Fractals. – 2005. – Vol. 27. – P. 1119–1123.
3. Konig, M. The Discontinuous Galerkin Time-Domain Method for Maxwell's Equations with Anisotropic Materials / M. Konig, K. Bush // Photonics and Nanostructures-Fundamentals. – 2010. – P. 239–254.
4. Sweilam, N. Convergence of Variational Iteration Method Applied to Non-Linear Coupled System of Partial Differential Equations / N. Sweilam, M. Khader // Int. J. of Computer Math. – 2010. – Vol. 87(s). – P. 1120–1130.
5. Sweilam, N. Variational Iteration Method for One-Dimensional Non-Linear Thermo-Elasticity / N. Sweilam, M. Khader // Solitons and Fractals. – 2007. – Vol. 32. – P. 145–149.
6. Sadiku, M. Numerical techniques in electromagnetics, 2nd edition, CRC Press, 2000. – P. 635–684.
7. Sharma, J. Partial Differential Equations for Engineers and Scientists / J. Sharma, K. Singh // 2nd edition, Narosa Publishing House, 2009. – P. 346–358.
8. Mesa, F. Numerical Solution of the Laplace Equation: Electrostatic Potential / F. Mesa, P.P.C. Alzate, C.A.R. Varela // Advanced Studies in Theoretical Physics. – 2017. – Vol. 11. – P. 717–723.

9. Майер, Р. В. О численном решении уравнения Пуассона при моделировании электростатических полей / Р. В. Майер, А. А. Романов // Научный альманах. – 2017. – N 1-2(27). – С. 138-141. [http:// www.ucom.ru/na](http://www.ucom.ru/na)
10. Пантелют, М. Г. Использование векторного магнитного потенциала в конечноэлементном анализе нестационарных трехмерных электромагнитных полей в проводящих средах / М. Г. Пантелют, Н. Г. Шульженко // Электротехника і Електромеханіка. – 2007. – № 5. – С. 42–47.
11. Nagel, J. R. Solving the Generalized Poisson Equation Using the Finite-Difference Method (FDM) February 15. – 2012. – P. 1–18.
12. Fast simulation of 3D electromagnetic problems using potentials / E. Haber, U. M. Ascher, D. A. Aruliah, D. W. Oldenburg // Journal of Computational Physics. – 2000. – Vol. 163. – N. 1. – P. 150–171.
13. Андреева, Е. Г. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета Ansys / Е. Г. Андреева, С. П. Шамец, Д. В. Колмогоров // Нефтегазовое дело. – 2004. – С. 1–10. <http://www.ogbus.ru>
14. Косенков, В.М. Граничные условия при математическом моделировании электромагнитного поля внутри и вне разрядной камеры высоковольтной электрогидравлической установки / В. М. Косенков, В. М. Бычков // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 3. – С. 25–32.
15. Шимони, К. Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М.: Мир, 1964. – 775 с.
16. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

CALCULATION OF ELECTRIC FIELD ON THE STREET

Biliaiev M.M., Rusakova T.I.

Abstract

In cities of different countries, the use of public electricity remains widespread, along with the observed trends in the active introduction of electric vehicles. The prospect of the development of electric vehicles will increase the power of the electric field on the street. The heterogeneity of the distribution of electromagnetic and electrostatic fields is that in some areas, in streets or avenues their background varies from 5-7 times or more. The reasons for this are different relief terrain, multi-storey buildings, different power generating sources. People can fall into zones with different field strengths, so the mechanisms of adaptation must be activated. Obviously, such a regime is not natural for a person, and therefore dangerous.

Due to the growth and heterogeneity of the electric field tension, techniques are needed that would allow to quickly predict the level of electric voltage near highways. It is very important that these techniques allow to carry out the forecast taking into account the objects located along the highways, as they lead to deformation of the equipotential lines of electric field strength, as well as themselves can be sources of electric field. This is a rather difficult task, since it is necessary to perform calculations in the field of complex geometric shapes.

The purpose of the study is to develop a numerical method for calculating an electrostatic field in areas of complex geometric shape.

In this paper we consider the calculation of an electrostatic field in the presence of an electric field source on the street. Based on the postulates adopted in electrostatics for the study of electrostatic fields, the Laplace equation for electric potential is used. For numerical integration, finite-difference methods are used: the method of total approximation, the Liebman method.

The solution of the model problem is considered: two sources of the electric field are located within the road, and on the boundary of the roadway there is a screen and an employee's work area. When modeling takes into account the value of the electric field of the Earth. It is necessary to determine the intensity of the electric field in the working zone at a different height of the barrier. The upper source is a contact wire, the lower source is the electric motor. Examples are low and high screen

versions that act as an insulator. An estimation of the influence of the height of the screen on the level of the electric field on the screen, where the work area of the worker is located.

The paper presents the results of computer simulation, depicts the field of electric potential in cases of use of different height of the screen. It is clearly seen how the presence of the screen leads to deformation of the isolation of the electric field. The figure clearly identifies the location of sources of electric field – these are two sub-regions with a large gradient of electric potential, which has the form of a circle. Also calculated and graphically represented the value of the intensity of the electric field in the working area at different distances from the screen. It can be seen that the use of a high screen results in a decrease in the intensity of the electric field in the working area.

References

- [1] Taflove, A. Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method. *Artech House, Boston*. – 1995. – pp. 149–161.
- [2] Momani, S., Abuasad S. Application of He's Variational Iteration Method to Helmholtz Equation. *Chaos, Solitons and Fractals*. – 2005. – Vol. 27. – pp. 1119–1123.
- [3] Konig, M., Bush, K. The Discontinuous Galerkin Time-Domain Method for Maxwell's Equations with Anisotropic Materials. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals*. – 2010. – pp. 239–254.
- [4] Sweilam, N., Khader M. Convergence of Variational Iteration Method Applied to Non-Linear Coupled System of Partial Differential Equations. *Int. J. of Computer Math.* – 2010. – Vol. 87(s). – pp. 1120–1130.
- [5] Sweilam, N., Khader M. Variational Iteration Method for One-Dimensional Non-Linear Thermo-Elasticity. *Solitons and Fractals*. – 2007. – Vol. 32. – pp. 145–149.
- [6] Sadiku, M. Numerical techniques in electromagnetic. *2nd edition, CRC Press, 2000*. – pp. 635–684.
- [7] Sharma, J., Singh, K. Partial Differential Equations for Engineers and Scientists. *2nd edition, Narosa Publishing House, 2009*. – P. 346–358.
- [8] Mesa, F., Alzate, P.P.C., Varela C.A.R. Numerical Solution of the Laplace Equation: Electrostatic Potential. *Advanced Studies in Theoretical Physics*. – 2017. – Vol. 11. – pp. 717–723.
- [9] Mayyer, R. V., Romanov A. A. O chislennom reshenii uravneniya Puassona pri modelirovanii elektrostati cheskich poley. *Nauchnyy al'manakh*. – 2017. – N 1-2(27). – pp. 138–141. <http://www.ucom.ru/na>
- [10] Pantelyat, M. G., Shul'zhenko, N. G. Ispol'zovaniye vektornogo magnitnogo potentsiala v konechnoelementnom analize nestatsionarnykh trekhmernykh elektromagnitnykh poley v provodyashchikh sredakh. *Yeletrotekhnika i Yeletromekhanika*. – 2007. – № 5. – pp. 42–47.
- [11] Nagel, J. R. Solving the Generalized Poisson Equation Using the Finite-Difference Method (FDM) February 15. – 2012. – pp. 1–18.
- [12] Haber, E., Ascher U. M., Aruliah D. A., Oldenburg D. W. Fast simulation of 3D electromagnetic problems using potentials. *Journal of Computational Physics*. – 2000. – Vol. 163. – N. 1. – pp. 150–171.
- [13] Andreyeva, Ye. G., Shamets, S. P., Kolmogorov, D. V. Raschet statsionarnykh magnitnykh poley i kharakteristik elektrotekhnicheskikh ustroystv s pomoshch'yu programmnoho paketa Ansys. *Neftegazovoye delo*. – 2004. – pp. 1–10. <http://www.ogbus.ru>
- [14] Kosenkov, V. M., Bychkov, V. M. Granichnyye usloviya pri matematicheskom modelirovanii elektromagnitnogo polya vnutri i vne razryadnoy kamery vysokovol'tnoy elektrogidravlicheskoj ustanovki. *Tekhn. yeletrodinamika*. – 2016. – № 3. – pp. 25–32.
- [15] Shimoni, K. Teoreticheskaya elektrotekhnika [Theoretical electrical engineering]. Moscow, Mir, 1964. 775 p.
- [16] Samarskiy, A. A. Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]. Moscow, Nauka, 1983. 616 p.