

МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ФОКАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОРОЖНИСТОГО КОНУСНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ЕЛЕКТРОННИХ ГАРМАТАХ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ З ФОКУСУВАЛЬНОЮ МАГНІТНОЮ ЛІНЗОЮ

І.В. МЕЛЬНИК, С.Б. ТУГАЙ, В.О. КИРИК, І.С. ШВЕД

Анотація. Розглянуто алгоритм розрахунку фокусної відстані порожнистого конусного електронного пучка, який формується електронними гарматами високовольтного тліючого розряду з магнітним фокусуванням пучка за умови дрейфу, а також спосіб розрахунку діаметра фокального кільця та його товщини для такого пучка. Запропонований алгоритм ґрунтується на теорії дрейфу електронів у полі фокусувальної магнітної лінзи і сформований з використанням методів дискретної математики та мінімаксного аналізу. Отримані результати моделювання дозволили встановити вплив струму магнітної лінзи на фокальний діаметр порожнистого конусного електронного пучка та на товщину фокального кільця. Показано, що фокальні параметри порожнистого конусного електронного пучка можна ефективно змінювати через регулювання струму магнітної лінзи.

Ключові слова: високовольтний тліючий розряд, магнітна лінза, порожнистий електронний пучок, модель дрейфу електронів, мінімаксний аналіз, фокальний діаметр електронного пучка, товщина фокального кільця.

ВСТУП

Електронні гармати високовольтного тліючого розряду (ВТР) знаходять широке впровадження в різних галузях промисловості: електронній, приладобудування, машинобудування, металургійній, автомобільній, авіаційній тощо. Це насамперед зумовлено тим, що гармати ВТР мають низку переваг порівняно із традиційними електронними гарматами з розжарюваними катодами за умови роботи в низькому вакуумі в середовищі різних технологічних газів, зокрема інертних та активних [1–7]. Серед цих переваг варто відзначити передусім такі [1–3, 7]:

- 1) високу стабільність роботи електронних гармат ВТР та довговічність охолоджуваних катодів у діапазоні робочого тиску 0,1–10 Па;
- 2) відносну простоту конструкцій електронних гармат ВТР і можливість їх оновлення та ремонту із заміною головних функціональних вузлів, насамперед охолоджуваних катодів;
- 3) простоту та дешевизну вакуумного технологічного обладнання;
- 4) можливість формування профільних електронних пучків з кільцевим або лінійним фокусом за умови використання охолоджуваних катодів з відповідною просторовою геометрією;

5) простоту керування потужністю електронного пучка зміною тиску газу у розрядній камері або електричним способом через запалювання допоміжного низьковольтного розряду;

6) можливість роботи електронних гармат ВТР в імпульсному режимі.

Проте подальший розвиток та впровадження у промисловість електронних гармат ВТР дещо стримується відсутністю ефективних методів їх моделювання [8]. Крім цього, необхідно розробляти нові конструкції гармат ВТР, призначені для виконання специфічних технологічних операцій, пов'язаних із термічним обробленням речовини. Одним зі шляхів удосконалення конструкцій електронних гармат ВТР є розроблення гармат з відповідною просторовою геометрією холодних катодів, які формують профільні електронні пучки з кільцевим або лінійним фокусом [7]. Головною перевагою таких гармат є висока стабільність роботи та висока продуктивність у разі термічного оброблення циліндричних або плоских поздовжніх виробів у масовому виробництві. З метою спрощення охолодження вузлів таких гармат та підвищення стабільності їх роботи ефективним є використання імпульсного режиму роботи гармати [1]. Головний недолік конструкцій таких гармат — формування збіжного електронного пучка зі сферичної поверхні катода, що не дає змоги регулювати положення фокуса електронного пучка і значною мірою ускладнює конструкцію гармати. Можливим є формування порожнистого конусного електронного пучка з кільцевим фокусом з плоскої поверхні холодного катода. У цьому разі для формування порожнистого конусного електронного пучка використовується фокусувальна магнітна лінза. Перевага такого способу формування електронного пучка — можливість зміни положення та розміру фокального кільця зміною струму магнітної лінзи. Тобто така конструкція гармати ВТР є більш універсальною і може бути пристосованою для виконання різних термічних технологічних операцій. Спрощену конструктивну схему електродної системи електронної гармати ВТР з магнітною лінзою, яка формує порожнистий конусний електронний пучок із кільцевим фокусом, зображено на рис. 1.

У праці [9] описано узагальнений алгоритм, призначений для визначення фокальних параметрів електронних пучків із кільцевим фокусом, що формується в електродних системах ВТР зі сферичним катодом та конусним анодом. У праці [10] оцінювались топологічні та геометричні параметри таких електродних систем ВТР з урахуванням похибок вимірювань цих параметрів та інженерних допусків на них. У цілому, система топологічних параметрів, яка була запропонована у праці [10], є досить універсальною і може бути застосована для електродної системи з плоским катодом та фокусувальною магнітною лінзою, конструктивну схему якої зображено на рис. 1. Проте алгоритм визначення фокальних параметрів порожнистого конусного електронного пучка у разі його проходження в магнітному полі фокусувальної лінзи має певні особливості. Описання та аналіз цих особливостей, а також формування відповідного алгоритму, призначеного для обчислення положення фокального кільця та його товщини для електродної системи ВТР, зображеної на рис. 1, є головною метою цієї роботи.

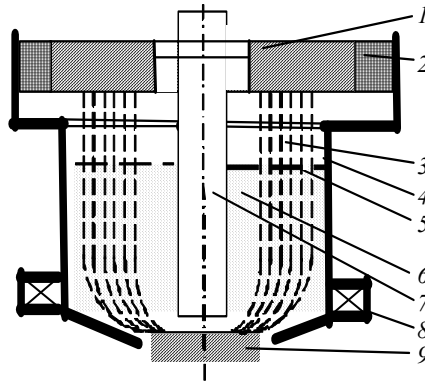


Рис. 1. Конструктивна схема аксіально-симетричної електродної системи ВТР, призначеної для формування порожнистого конусного електронного пучка: 1 — катод; 2 — високовольтний ізолятор; 3 — електронний пучок; 4 — анод; 5 — плазмова межа; 6 — анодна плазма; 7 — допоміжний циліндричний електрод; 8 — магнітна лінза; 9 — виріб, який обробляється

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Узагальнену методику розв'язування самоузгодженої електронно-оптичної задачі для електродних систем ВТР сформульовано у праці [8]. Насамперед слід відзначити, що методи розв'язування задачі визначення розподілу електричного поля та розрахунку траєкторій заряджених частинок в ділянці катодного падіння для системи з магнітним фокусуванням конусного електронного пучка не відрізняються від подібних методів для електродних систем зі сферичною формою катода, які формують порожнисті конусні електронні пучки з кільцевим фокусом. Методику моделювання таких електродних систем ВТР досконало розглянуто у працях [8–10]. Головною особливістю цієї методики є визначення положення плазмової межі відносно катода на основі трьох припущень [8–10].

1. Плазмова межа в джерелах електронів ВТР розглядається як рухомий, прозорий для електронів пучка електрод, з фіксованим значенням потенціалу, а також як джерело іонів.

2. За умови однакового струму ВТР анодна плазма в лінійній одновимірній електродній системі та в системі зі складною просторовою геометрією електродів займає однаковий об'єм.

3. Для великих значень струму розряду плазмова межа є паралельною поверхні катода.

Головні топологічні параметри електродної системи ВТР зі сферичним катодом та конусним анодом, у якій формується порожнистий конусний електронний пучок з кільцевим фокусом, а також відповідні обмеження, що накладаються на ці параметри, та інженерні допуски на них, розглядалися у працях [9, 10]. Запропонована у праці [10] топологічна модель електродної системи ВТР є універсальною, а відповідні співвідношення можуть бути використані в електродній системі з магнітним фокусуванням конусного електронного пучка, конструктивну схему якої зображено на рис. 1. Розрахунки за цією методикою значною мірою спрощуються, оскільки плазмова

межа у цьому випадку має не сферичну, а лінійну форму. Тобто аналіз розподілу потенціалу та траєкторій заряджених частинок в електродній системі ВТР (рис. 1) не має жодних суттєвих особливостей і не становить особливої концептуальної проблеми. У праці [11] наведено матричні арифметико-логічні співвідношення для розрахунку розподілу потенціалу та траєкторій заряджених частинок у ділянці катодного падіння потенціалу електронних гармат ВТР. Ці співвідношення ґрунтуються на базових поняттях рекурентної матриці та вектор-функції і значною мірою спрощують реалізацію матричних рекурентних алгоритмів у сучасних системах програмування [12–14].

Проте аналіз проходження електронів пучка за умови вільного дрейфу для електродної системи з магнітним фокусуванням має свої певні особливості, які, з алгоритмічної точки зору, слід розглянути окремо. Загалом завдання аналізу траєкторій електронів за умови вільного дрейфу у фокусувальному магнітному полі є комплексним і поділено на окремі задачі [15–17].

1. Розрахунок магнітного поля фокусувальної лінзи.

2. Формування алгоритму розрахунку траєкторій електронів за умови вільного дрейфу з урахуванням відповідних фізичних процесів, головними з яких є такі:

– розсіювання електронів на атомах залишкового газу;

– вплив власного просторового заряду електронів пучка;

– вплив позитивного заряду іонів залишкового газу;

– розрахунок траєкторій електронного пучка в магнітному полі фокусувальної лінзи.

Узагальнене описання алгоритму розрахунку траєкторій електронів за умови вільного дрейфу для електродної системи (рис. 1) є головною метою цієї роботи.

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОЇ ФОКУСУВАЛЬНОЇ ЛІНЗИ

Сьогодні для коротких фокусувальних магнітних лінз найбільш правдоподібною і точною вважається апроксимація значення індукції магнітного поля за Явором [15–17]. Ця апроксимація завжди є адекватною і забезпечує похибку експериментальних значень не вищу за 3%; у разі відсутності ефекту насичення феромагнітного матеріалу та виконання умови щодо просторових розмірів короткої лінзи [15–17]:

$$0,5 \leq D_{\text{л}} / S_{\text{л}} \leq 2, \quad (1)$$

де $S_{\text{л}}$ — ширина немагнітного зазору; $D_{\text{л}}$ — товщина ділянки намотаного дроту. Відповідні геометричні розміри лінзи показано на рис. 2.

Згідно з апроксимацією за Явором, у разі виконання співвідношення (1) та відсутності ефекту насичення феромагнітного матеріалу, індукція магнітного поля на осі симетрії лінзи B_{z0} розраховується з використанням аналітичного співвідношенням [15–17]:

$$B_{z0} = \frac{1,257 \cdot 10^{-4} I_{\text{л}} N_{\text{л}}}{2S_{\text{л}}} \left(\frac{z_{\text{л}} + \frac{S_{\text{л}}}{2}}{\sqrt{\left(\frac{D_{\text{л}}}{3}\right)^3 + \left(z_{\text{л}} + \frac{S_{\text{л}}}{2}\right)^2}} - \frac{z_{\text{л}} - \frac{S_{\text{л}}}{2}}{\sqrt{\left(\frac{D_{\text{л}}}{3}\right)^3 - \left(z_{\text{л}} + \frac{S_{\text{л}}}{2}\right)^2}} \right), \quad (2)$$

де $I_{\text{л}}$ — струм лінзи; $N_{\text{л}}$ — кількість витків. Без насичення магнітного матеріалу похибка обчислень за формулою (2) становить кілька відсотків [15–17].

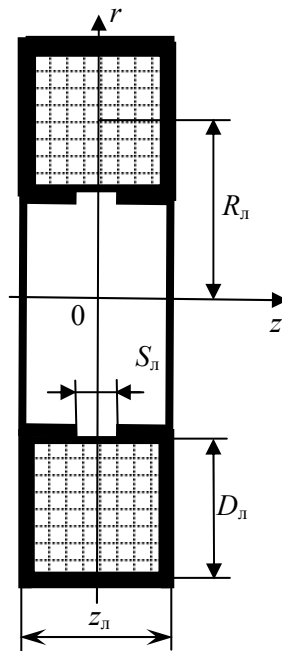


Рис 2. Конструктивні параметри короткої фокусувальної магнітної лінзи: $S_{\text{л}}$ — ширина немагнітного зазору; $z_{\text{л}}$ — ширина лінзи; $D_{\text{л}}$ — товщина ділянки намотаного дроту; $R_{\text{л}}$ — радіус лінзи

За умови відомого розподілу магнітного поля на осі симетрії лінзи $B_{z0}(z)$, яке розраховується з використанням співвідношення (2), можна знайти індукцію магнітного поля у будь-якій точці електродної системи газорозрядного пристрою розкладанням у ряд Тейлора складових магнітної індукції B_r і B_z . Відповідні аналітичні співвідношення мають такий вигляд [15–17]:

$$B_r = \frac{r}{2} B'_{z0} + \frac{r^3}{16} B'''_{z0} + \dots, \quad B_z = \frac{r}{2} B_{z0} - \frac{r^2}{16} B''_{z0} + \dots \quad (3)$$

Рівняння (2), (3) застосовують для розрахунку траєкторій електронів пучка за умови вільного дрейфу. Приклад розрахунку траєкторії електронного пучка з використанням цих співвідношень подано на рис. 3. Результати отримано для таких електричних і геометричних параметрів магнітної лінзи: $I_{\text{л}} = 10 \text{ А}$; $N_{\text{л}} = 1000$; $z_{\text{л}} = 0,02 \text{ м}$; $D_{\text{л}} = 0,05 \text{ м}$; $0,1 \text{ м}$; $0,15 \text{ м}$; $0,2 \text{ м}$ [12].

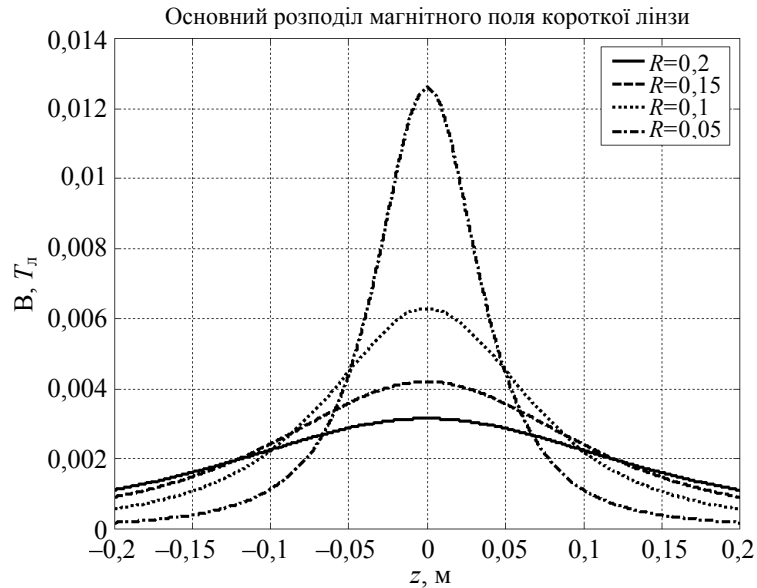


Рис. 3. Осьовий розподіл магнітного поля тонкої магнітної лінзи для різних її геометричних розмірів

УЗАГАЛЬНЕНИЙ АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕННЯ ФОКАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОРОЖНИСТОГО КОНУСНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, ЩО ҐРУНТУЄТЬСЯ НА МЕТОДАХ ДИСКРЕТНОЇ МАТЕМАТИКИ ТА МІНІМАКСНОГО АНАЛІЗУ

Модель вільного дрейфу електронів пучка в іонізованому газі досконало розглянуто у працях [9, 17]. Із фізичного погляду ця модель ґрунтується на тому, що за відсутності електричного поля електрони рухаються між іонами у заданому напрямку та зіштовхуються з ними, а просторовий заряд електронів пучка та іонів залишкового газу безпосередньо впливає на цей рух. Проте, у разі наявності магнітного поля траєкторії електронів мають досить складний тривимірний характер з обертанням навколо осі z на кут φ . Приклад розрахованої тривимірної траєкторії електрона в полі фокусувальної магнітної лінзи ілюструє рис. 4. Результати отримано для таких електричних та геометричних параметрів лінзи: $I_{\text{л}} = 10 \text{ А}$; $N_{\text{л}} = 1000$; $D_{\text{л}} = 0,05 \text{ м}$ [12].

Алгоритм пошуку фокальних параметрів порожнистого конусного електронного пучка з кільцевим фокусом ґрунтується на методах дискретної математики [18] та мінімаксного аналізу [19] і в загальній формі його записують так [9].

1. Виконують дискретизацію ділянки за координатами r і z .

2. За даними попереднього траєкторного аналізу для ділянки катодного падіння потенціалу формують масив векторів швидкості електронів пучка v_e для всіх значень радіальної координати r . На цьому етапі вважають, що номер поточної ітерації $k = 0$.

Траєкторія електрона у фокусувальній магнітній лінзі при струмі лінзи $I=10$ А

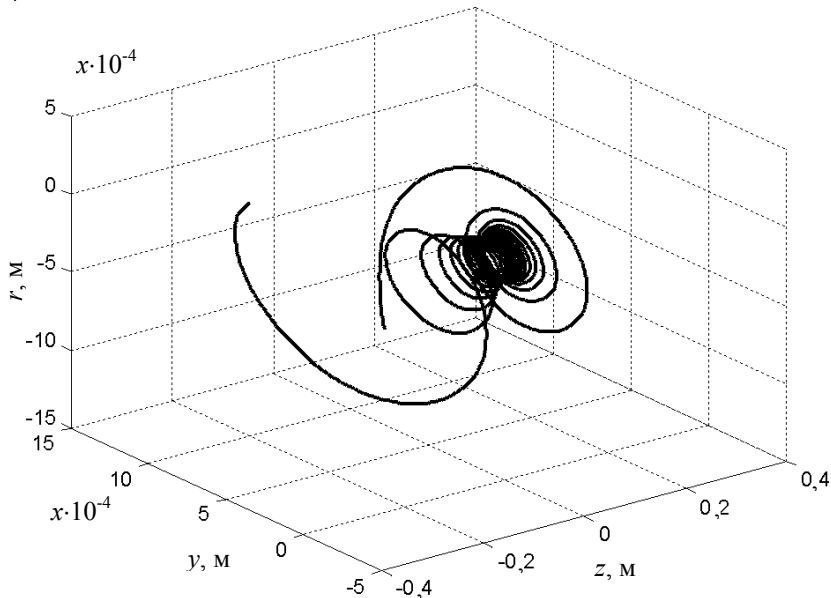


Рис. 4. Траєкторія електрона за струму магнітної лінзи 10 А

3. Вважають, що номер поточної ітерації $k = k + 1$.

4. За умови відомої швидкості електронів пучка v_e обчислюють зміну радіальної координати r і кута нахилу траєкторій електронів φ на малому відрізку h_z за координатою z .

5. Визначають положення елементарної трубки електронного пучка з номером i , для якої струм j є максимальним. Для цього перебирають усі значення струму трубок j за змінною i з метою пошуку максимального значення j_{\max} .

6. Виконують пошук координати z , для якої значення r_{\min} для трубки з максимальним струмом j_{\max} є мінімальним. Положення фокуса електронного пучка F_{Π} відповідає цій координаті z .

7. Радіус фокального кільця R_{Φ} відповідає положенню трубки з максимальним струмом за координатою r у фокальній площині, тобто значенню F_{Π} .

8. Товщину фокального кільця T_{Φ} розраховують як різницю положення двох віддалених трубок з мінімальними струмами.

9. За умови $r_{\Pi}^{\max}(k) > r_{\Pi}^{\max}(k-1)$ обчислення закінчують, у противному випадку — перехід до пункту 3 алгоритму.

Сформульований алгоритм у формі аналітичних співвідношень дискретної математики записують у такий спосіб [9]:

$$\Omega_k = \{k | \overline{1 \dots K}, k \in N\}; \quad M = [D / h_r]; \quad \Omega_i = \{i | \overline{1 \dots K}, k \in N\};$$

$$r(i, k) = r(i, k - 1) + h_z \operatorname{tg}(\varphi(i, k)); j_{\Pi}^{\max} = \max_{i \in \Omega_i} [j_{\Pi}(i, k)]; \quad (4)$$

$$r_{\Pi}^{\max} = \max_{i \in \Omega_i} [r_{\Pi}(i, k)]; F_{\Pi} = d_{k\Pi} + h_z \operatorname{argmin}_{i \in \Omega_i} (r_{\Pi}^{\max});$$

$$r_{\Pi 1}^{\max}(k) = \operatorname{arg}[0, 1 j_{\Pi}^{\max}(k)] \Big|_{z=F_{\Pi}, r_{\Pi} < r_{\Pi}^{\max}};$$

$$r_{\Pi 2}^{\max}(k) = \operatorname{arg}[0, 1 j_{\Pi}^{\max}(k)] \Big|_{z=F_{\Pi}, r_{\Pi} > r_{\Pi}^{\max}}; r_{\Pi}^{\max}(k) T_{\Phi}(r_{\Pi 2}^{\min}(k) - r_{\Pi 1}^{\min}(k)) \Big|_{z=F_{\Pi}},$$

де Ω_k — діапазон значень змінної k ; Ω_i — діапазон значень змінної i ; $r(i, k)$ $r(i, k)$ — поточна радіальна координата r , яка характеризує положення трубки струму з номером i ; D — довжина ділянки, яка розраховується; h_z — крок її дискретизації; $r_{\Pi}(k)$ — радіус пучка для поточної поперечної координати z , заданої відліковою точкою k ; $j_{\Pi}^{\max}(k)$ — максимальне значення струму у поперечному перетині електронного пучка.

УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ НА ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРОЦЕСУ РОЗСИЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ ТА ФОКУСУВАННЯ В ПОЛІ МАГНІТНОЇ ЛІНЗИ

Загалом аналітичні співвідношення, за якими розраховують вплив розсіювання на атомах залишкового газу та просторового заряду на процес формування електронного пучка, наведено у працях [8, 9, 15–17]. Головні з них такі.

Процес розсіювання електронів пучка на атомах залишкового газу.

Для фізичних умов горіння ВТР зазвичай може бути використана модель багатократного пружного розсіювання Резерфорда. Відповідну систему рівнянь записують у такому вигляді [15–17]:

$$\operatorname{tg}(0,5 \cdot \theta_{\min}) = \frac{10^{-4} z^{4/3}}{2\gamma_p \beta^2}; \operatorname{tg}(0,5 \cdot \theta_{\max}) = \frac{Ze^2}{m_e v^2 r_{\Pi}(i)};$$

$$v_e = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}; \gamma_p = \sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}};$$

$$dL = h_z \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi)}; d\theta = \frac{4Z(Z+1)r_e^2 \gamma_p^2}{(\gamma_p^2 - 1)^2} n_0 dL \ln\left(\frac{\theta_{\min}}{\theta_{\max}}\right); \quad (5)$$

$$\varphi(i, k) = \varphi(i, k - 1) + d\theta,$$

де φ — кут вльоту електронів; Z — заряд ядра атомів робочого газу; m_e — маса електрона; r_e — радіус електрона відповідно до моделі Бора; γ_p — релятивістський фактор; θ_{\max} — максимальний кут розсіювання; θ_{\min} —

мінімальний кут розсіювання; $\bar{\theta}$ — середній кут розсіювання; $\beta = v_e/c$ — відношення швидкості електронів пучка до швидкості світла; r_{Π} — радіус електронного пучка на даній ітерації; n_0 — концентрація атомів газу.

Ефект іонного фокусування електронного пучка. Вплив іонного фокусування на траєкторії електронів пучка залежить безпосередньо від тиску газу в порожнині конусного анода p і визначається концентрацією іонів на поверхні симетрії електронного пучка n_{i0} . Цей внутрішній параметр системи транспортування порожнистого конусного електронного пучка за умови відомого значення тиску p і прискорювальної напруги $U_{\text{пр}}$ розраховують за таким співвідношенням [15–17]:

$$n_{i0} = \sqrt{\pi} r_{\Pi}^2 B_i p n_e \sqrt{\frac{m_i \varepsilon_0 n_e}{m_e U_{\text{пр}}}} \exp\left(-\frac{U_{\text{пр}}}{\varepsilon_0 n_e r_{\Pi}^2}\right), \quad (6)$$

де n_e — концентрація електронів у пучку; n_{i0} — концентрація іонів на поверхні симетрії електродної системи; m_i — молекулярна маса іонів газу; B_i — ступінь іонізації газу; ε_0 — діелектрична стала.

Розрахунок впливу просторового заряду на граничну траєкторію електронного пучка. З урахуванням співвідношень (5), (6) для визначення впливу просторового заряду на процес вільного дрейфу електронів в іонізованому газі можна записати систему рівнянь [15–17]:

$$f = \frac{n_e}{n_{i0} - n_e}; \quad C = \frac{I_{\Pi}(1 - f - \beta^2)}{4\pi\varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m_e} U_{\text{пр}}^{3/2}}}, \quad (7)$$

де f — ступінь компенсації просторового заряду електронного пучка іонами залишкового газу; C — узагальнений коефіцієнт, який характеризує вплив просторового заряду на траєкторії електронів пучка.

Розрахунок граничної траєкторії електронного пучка з урахуванням впливу просторового заряду та магнітного поля фокусувальної лінзи. Ураховуючи співвідношення (4)–(7), остаточний розрахунок параметрів електронного пучка виконують через розв'язування диференціального рівняння другого порядку [15–17]:

$$\frac{d^2 r_{\Pi}}{dz^2} = \frac{C}{r_{\Pi}} - \frac{e r_{\Pi} B_z^2}{8 m_e U_{\text{пр}}}. \quad \theta = \frac{d^2 r_{\Pi}}{dz^2} dz + \theta_p. \quad (8)$$

Розмірність $\frac{d^2 r_{\Pi}}{dz^2}$ становить м^{-1} . Диференціальне рівняння системи (8)

на кожній ітерації за координатою z розв'язано числовим способом з використанням методу Рунге–Кутта четвертого порядку [20, 21].

Блок-схему алгоритму обчислення фокальних параметрів порожнистого конусного електронного пучка, заданого співвідношеннями (4)–(8), показано на рис. 5.

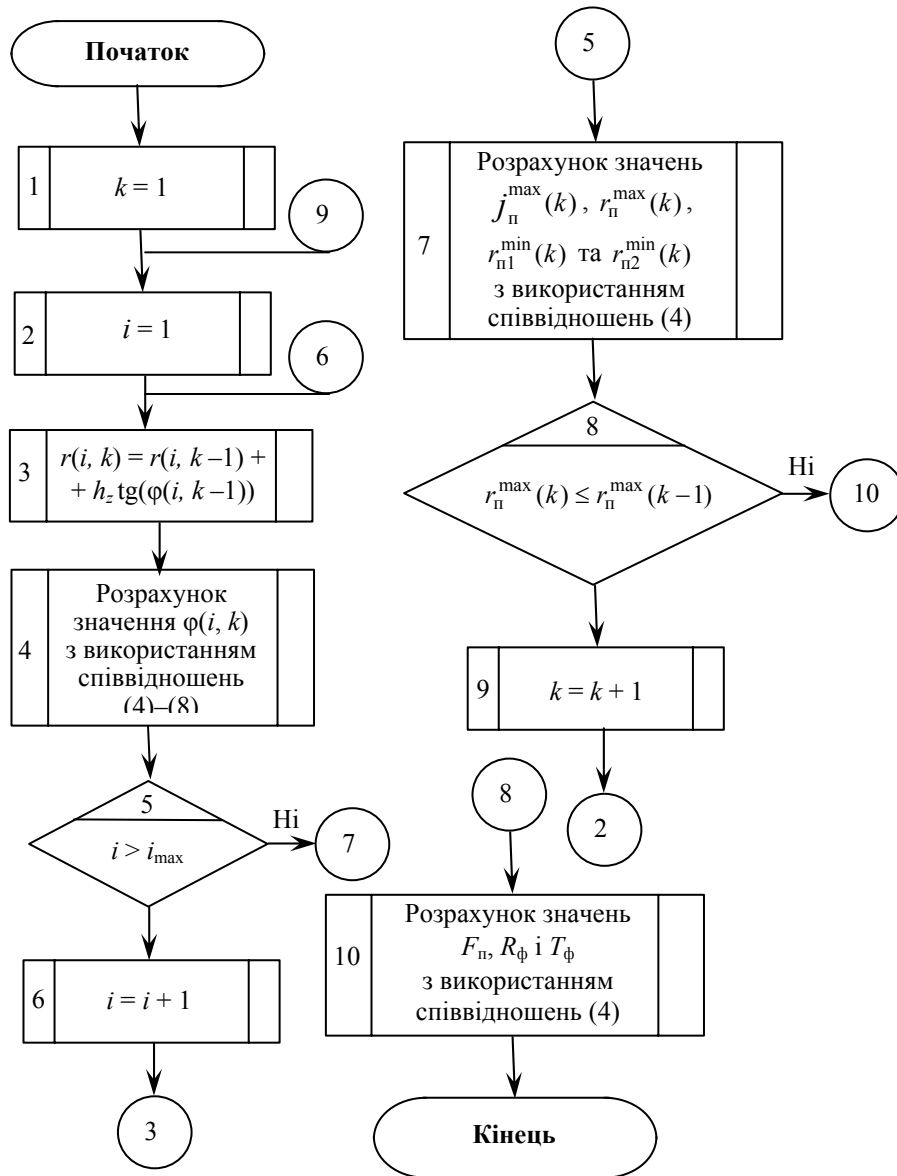


Рис. 5. Блок-схема алгоритму обчислення фокальних параметрів порожнистого конусного електронного пучка для електродної системи ВТР з фокусувальною магнітною лінзою, конструктивну схему якої зображено на рис. 1

Реалізація алгоритму обчислення фокальних параметрів електронного пучка з використанням засобів матричного програмування. У працях [12, 14] сформовано загальну концепцію теорії матричного програмування і теоретично обґрунтовано, що вагомою перевагою цих засобів програмування є простота запису математичних виразів з використанням регулярних мов та можливість ефективної оцінки ступеня розпаралелювання матричного алгоритму. Загалом концепція матричного програмування ґрунтується на формуванні рекурентної матриці і на записуванні арифметико-логічних виразів у матричній формі через рекурентні матриці та вектор-функції. Недолік програмної реалізації методів матричного програмування

— необхідність використання більшої ємності оперативної пам'яті. Проте запис ітераційних алгоритмів у формі матричних співвідношень значною мірою спрощує процес написання та відлагодження складних програм, що суттєво пришвидшує процес створення складного програмного забезпечення. Натепер цей фактор вважається на ринку програмних продуктів одним з найбільш вагомих. Сьогодні засоби матричного програмування є найбільш розвиненими у системі науково-технічних розрахунків MatLab [12] та системі програмування Anaconda, написаній мовою програмування Python [14].

У праці [11] показано і теоретично обґрунтовано, що рекурентну матрицю для алгоритму пошуку фокальних параметрів електронного пучка з кільцевим фокусом можна з урахуванням співвідношень (4)–(8) записати у такий спосіб:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \theta_{\max 0} & dL_0 & d\theta_0 & dz_0 & \varphi_0 & j_{п0} & r_{п0} & d_{п0} & F_{п0} \\ \theta_{\max 1} & dL_1 & d\theta_1 & dz_1 & \varphi_1 & j_{п1} & r_{п1} & d_{п1} & F_{п1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_{\max n} & dL_n & d\theta_n & dz_n & \varphi_n & j_{пn} & r_{пn} & d_{пn} & F_{пn} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Масив значень \mathbf{M} розглядався як тривимірний масив розмірністю $9 \times k \times i$, де k — кількість ітерацій для кожної траєкторії; i — кількість траєкторій [11]. Для розрахунку мінімальних та максимальних значень для кожної сторінки тривимірного масиву \mathbf{M} запропоновано використовувати такі арифметико-логічні вирази [11, 12]:

$$x_{\max}(1) = x(1); \quad x_{\max}(j) = (x(j) \geq x_{\max}(j-1))x(j) + (x(j) < x_{\max}(j-1))x_{\max}(j-1); \quad j = 2 \dots i; \quad (10)$$

$$x_{\min}(1) = x(1); \quad x_{\min}(j) = (x(j) \leq x_{\min}(j-1))x(j) + (x(j) > x_{\min}(j-1))x_{\min}(j-1); \quad j = 2 \dots i.$$

У праці [11] показано також, що коефіцієнт розпаралелювання алгоритму пошуку фокального діаметра електронного пучка з використанням матриці \mathbf{M} та арифметико-логічних співвідношень (9), (10) становить:

$$p = \frac{1}{1 - \frac{3i}{1 + 3i}}. \quad (11)$$

Наприклад, для кількості траєкторій $i = 100$, згідно зі співвідношенням (11), потенціально можливим є пришвидшення обчислення фокальних параметрів електронного пучка в 300 разів.

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Згідно з алгоритмом, блок-схему якого зображено на рис. 5, з використанням співвідношень (4)–(8) і врахуванням (9), (10) отримано залежності розподілу струму електронного пучка у фокальній площині та знайдено

радіус фокального кільця і його товщину. Отримані результати розподілу густини струму електронного пучка вздовж поперечної координати наведено на рис. 6. Розрахунки виконано для прискорювальної напруги $U_{пр} = 15$ кВ; робочий газ — азот, тиск газу в розрядній камері $p = 4,5$ Па, струм магнітної лінзи $I_{л}$ — 1 А, 1,5 А та 2 А, кількість витків магнітної лінзи $N_{л}$ — 1000. За таких умов отримано числові результати для положення фокуса електронного пучка $F_{п}$ і товщини фокального кільця $T_{ф}$, які наведено у таблиці.

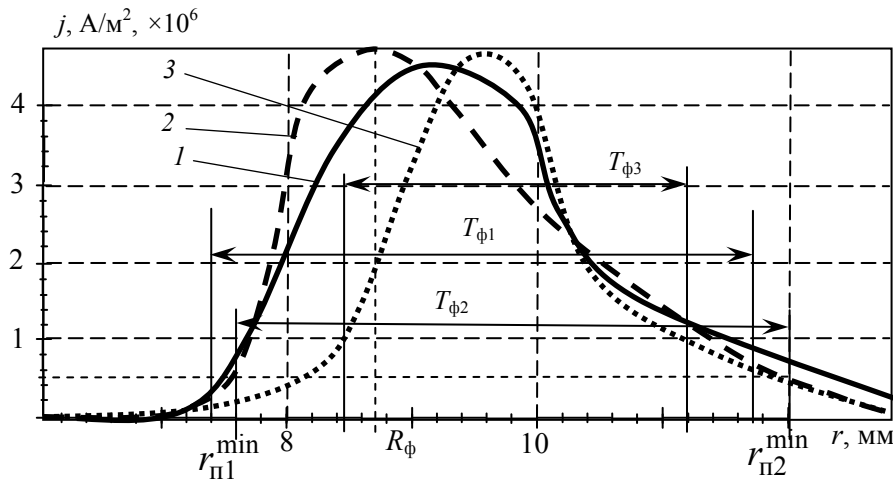


Рис. 6. Розподіл густини струму електронного пучка у його фокальній площині для різних значень струму магнітної лінзи: 1 — $I_{л} = 1$ А; 2 — $I_{л} = 1,5$ А; 3 — $I_{л} = 2$ А; $N_{л} = 1000$; $U_{пр} = 15$ кВ

Значення фокальних параметрів порожнистого конусного електронного пучка для різних струмів фокусувальної магнітної лінзи

Струм магнітної лінзи $I_{л}$, А	Положення фокуса електронного пучка $F_{п}$, мм	Товщина фокального кільця $T_{ф}$, мм
1	68, 25	4,3
1,5	64, 85	4,1
2	60, 31	2,1

Із фізичної точки зору зрозуміло, що зі зростанням струму магнітної лінзи збільшується кут повороту α для електронів пучка, що рухаються у площині лінзи. Тому фокальна площина електронного пучка $F_{п}$ для великих струмів лінзи наближається до катода. Тобто значення $F_{п}$ стає меншим. Закономірним є і те, що зі зростанням струму магнітної лінзи меншою стає товщина фокального кільця $T_{ф}$. Це зумовлено більш високим ступенем компресії пучка за умови великих струмів лінзи.

Слід відзначити, що зсув положення фокуса пучка відносно площини зрізу анода гармати для різних струмів фокусувальної лінзи зумовлено тим, що змінюється кут нахилу його граничних траєкторій. Щодо виникнення відповідної асиметрії відносно осі, яка відповідає максимуму функції $j(r)$,

вона зумовлена тим, що нижні та верхні траєкторії пучка фокусуються лінзою по-різному та з різним нахилом. Відповідні розрахунки виконано з використанням співвідношень (2)–(9).

Можливість регулювання фокальних параметрів порожнистого конусного електронного пучка зміною струму магнітної лінзи дозволяє забезпечити універсальність використання електронної гармати ВТР для термічного оброблення виробів різного діаметра з різними термодинамічними властивостями. За такої умови переналаштування положення фокуса електронного пучка, а також діаметр і товщину фокального кільця можна змінювати регулюванням струму магнітної лінзи. Тобто використання електронних гармат з магнітним фокусуванням порожнистого конусного електронного пучка в малосерійному виробництві зі зміною номенклатури виробів є вкрай ефективним і перспективним.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано алгоритм розрахунку положення фокуса порожнистого конусного електронного пучка та товщини фокального кільця в електродній системі із фокусувальною магнітною лінзою. Алгоритм ґрунтується на методах дискретної математики, мінімаксного аналізу та на врахуванні фізичних процесів, які впливають на фокусування електронного пучка за умови дрейфу електронів в іонізованому газі в магнітному полі. Результати моделювання показали, що товщина фокального кільця порожнистого конусного електронного пучка для гармат такої конструкції становить кілька міліметрів і може бути змінена регулюванням струму магнітної лінзи. Гармати ВТР з магнітним фокусуванням порожнистого конусного електронного пучка можуть знайти широке застосування в малосерійному виробництві із частою зміною номенклатури виробів. Робота може бути цікавою для фахівців з моделювання та розроблення електронно-променевого обладнання і його подальшого впровадження у промислове виробництво.

ЛІТЕРАТУРА

1. А.А. Новиков, *Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой*. М.: Энергоатомиздат, 1983, 96 с.
2. М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, и Л.П. Шантурин, *Плазменные процессы в технологических электронных пушках*. М.: Атомиздат, 1989, 256 с.
3. С.В. Ладохин и др., *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве*. Киев: Сталь, 2007, 605 с.
4. P. Feinaeugle, G. Mattausch, S. Schmidt, and F.H. Roegner, “A new generation of plasma-based electron beam sources with high power density as a novel tool for high-rate PVD”, *Society of Vacuum Coaters, 54-th Annual Technical Conference Proceedings, Chicago, 2011*, pp. 202–209.
5. G. Mattausch et al., “Gas discharge electron sources – proven and novel tools for thin-film technologies”, *Elektrotechnica and Electronica (E+E)*, vol. 49, no. 5–6, pp. 183–195, 2014.
6. M.I. Grechanyuk, A.G. Melnyk, I.M. Grechanyuk, V.G. Melnyk, and D.V. Kovalchuk, “Modern electron beam technologies and equipment for melting and physical vapor deposition of different materials”, *Elektrotechnica and Electronica (E+E)*, vol. 49, no. 5–6, pp. 115–121, 2014.

7. S. Denbnovetskiy et al., “Principles of operation of high voltage glow discharge electron guns and particularities of its technological application”, *Proceedings of SPIE – The International Society of Optical Engineering*, 2017, pp. 10445–10455.
8. I. Melnyk, S. Tyhai, and A. Pochynok, “Universal Complex Model for Estimation the Beam Current Density of High Voltage Glow Discharge Electron Guns”, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 152, pp. 319–341, 2021. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9783030583583>
9. І.В. Мельник та А.В. Починок, “Алгоритм розрахунку фокальних параметрів профільних електронних пучків, які формуються газорозрядними гарматами”, *Системні дослідження та інформаційні технології*, № 2, с. 7–17, 2019.
10. І.В. Мельник та А.В. Починок, “Система конструктивних геометричних параметрів моделі електронних гармат високовольтного тліючого розряду, які формують профільні електронні пучки”, *Системні дослідження та інформаційні технології*, № 1, с. 50–65, 2019.
11. И.В. Мельник и А.В. Починок, “Использование матричных алгоритмов для расчета траекторий заряженных частиц и определения фокальных параметров электронного пучка”, *Электронное моделирование*, т. 42, № 1, с. 73–90, 2020.
12. І.В. Мельник, *Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв’язання задач із електроніки: навчальний посібник у 2-х томах. Т. 2. Основи програмування та розв’язання прикладних задач*. К.: Університет “Україна”, 2009, 327 с.
13. J.H. Mathews and K.D. Fink, *Numerical Methods. Using Matlab. Third Edition*. Amazon, 1998.
14. І.В. Мельник, *Основи програмування на мові Python. Том 2. Розвинені засоби мови програмування Python. Комплексний навчальний посібник з курсів “Об’єктно-орієнтоване програмування” та “Обчислювальні системи та мережі” для студентів-бакалаврів, які навчаються за освітньою програмою “Електронні прилади та пристрої”*. Київ: “Кафедра”, 2020, 492 с.
15. С.И. Молоковский и Д.И. Сушков, *Интенсивные электронные и ионные пучки*. Москва: Энергоатомиздат, 1991, 304 с.
16. М. Силадьи, *Электронная и ионная оптика*. Москва: Мир, 1990, 640 с.
17. I. Melnyk, “Methodic of Simulation of Guiding of Short-Focus Electron Beam in The Equipotential Transporting Channel of High Voltage Glow Discharge Electron Guns”, *Вісник кийського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка*, № 1 (23), с. 57–62, 2015.
18. Д. Андерсон, *Дискретная математика и комбинаторика*. Москва: Издательский дом “Вильямс”, 2004, 960 с.
19. В.П. Васильев, *Численные методы решения экстремальных задач: учебное пособие для вузов*. Москва: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1988, 552 с.
20. А.А. Самарский и А.В. Гулин, *Численные методы*. Москва: Наука, 1989, 432 с.
21. Э. Камке, *Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям*. Москва: Наука, 1976, 589 с.

Надійшла 30.07.2021

INFORMATION ON THE ARTICLE

Igor V. Melnyk, ORCID: 0000-0003-0220-0615, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine, e-mail: imelnik@phbme.kpi.ua

Sergey B. Tugay, ORCID: 0000-0001-7646-1979, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine, e-mail: sbtuhai@gmail.com

Volodymyr O. Kyryk, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine, e-mail: vo-va.kirik1975@gmail.com

Iryna S. Shved, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine, e-mail: shvettd@gmail.com

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ФОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛОГО КОНУСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШКАХ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ФОКУСИРУЮЩЕЙ МАГНИТНОЙ ЛИНЗОЙ / И.В. Мельник, С.Б. Тугай, В.А. Кирик, И.С. Швед

Аннотация. Рассмотрен алгоритм расчета фокусного расстояния полого конусного электронного пучка, формируемого электронными пушками высоковольтного тлеющего разряда с магнитной фокусировкой пучка в области дрейфа, а также способ расчета диаметра фокального кольца и его толщины для такого пучка. Предложенный алгоритм основан на теории дрейфа электронов в поле фокусирующей магнитной линзы и сформирован с использованием методов дискретной математики и минимаксного анализа. Полученные результаты моделирования позволили установить влияние тока магнитной линзы на фокальный диаметр полого конусного электронного пучка и на толщину фокального кольца. Показано, что изменение фокальных параметров полого конусного электронного пучка может эффективно осуществляться через регулирование тока магнитной линзы.

Ключевые слова: высоковольтный тлеющий разряд, магнитная линза, пустотный электронный пучок, модель дрейфа электронов, минимаксный анализ, фокальный диаметр электронного пучка, толщина фокального кольца.

METHODS AND ALGORITHM FOR CALCULATING THE FOCAL PARAMETERS OF A HOLLOW CONICAL ELECTRON BEAM IN HIGH-VOLTAGE GLOW DISCHARGE ELECTRON GUNS WITH A FOCUSING MAGNETIC LENS / I.V. Melnyk, S.B. Tugay, V.O. Kyryk, I.S. Shved

Abstract. The algorithm is considered for calculating the focal distance of a hollow conical electron beam generated by high-voltage glow discharge electron guns with magnetic focusing of the beam in the drift region, as well as a method for calculating the diameter of the focal ring and its thickness for such a beam. The proposed algorithm is based on the theory of electron drift in the field of a focusing magnetic lens and is designed using the methods of discrete mathematics and the minimax analysis. The obtained simulation results made it possible to establish the influence of the magnetic lens current on the focal diameter of a hollow conical electron beam and on its focal ring thickness. It is shown that the change in the focal parameters of a hollow conical electron beam can be effectively provided through the regulation of the magnetic lens current.

Keywords: high-voltage glow discharge, magnetic lens, hollow electron beam, electron drift model, minimax analysis, focal diameter of the electron beam, focal ring thickness.

REFERENCES

1. A.A. Novikov, *High Voltage Glow Discharge Electron Sources with Anode Plasma* [in rus]. Moscow: Energoatomiadat, 1983, 96 p.
2. M.A. Zavialiv, Yu.E. Kreindel, A.A. Novikov, and L.P. Shanturin, *Plasma Processes in technological Electron Guns* [in rus]. Moscow: Atomiadat, 1989, 256 p.
3. S.V. Ladokhin et al., *Electron Beam Melting in Foundry Production* [in rus]. Kiev: Steel, 2007, 605 p.
4. P. Feinaeugle, G. Mattausch, S. Schmidt, and F.H. Roegner, "A new generation of plasma-based electron beam sources with high power density as a novel tool for high-rate PVD", *Society of Vacuum Coaters, 54-th Annual Technical Conference Proceedings, Chicago*, 2011, pp. 202–209.
5. G. Mattausch et al., "Gas discharge electron sources – proven and novel tools for thin-film technologies", *Elektrotechnica and Electronica (E+E)*, vol. 49, no. 5–6, pp. 183–195, 2014.

6. M.I. Grechanyuk, A.G. Melnyk, I.M. Grechanyuk, V.G. Melnyk, and D.V. Kovalchuk, “Modern electron beam technologies and equipment for melting and physical vapor deposition of different materials”, *Elektrotechnica and Electronica (E+E)*, vol. 49, no. 5–6, pp. 115–121, 2014.
7. S. Denbnovetskiy et al., “Principles of operation of high voltage glow discharge electron guns and particularities of its technological application”, *Proceedings of SPIE – The International Society of Optical Engineering*, 2017, pp. 10445–10455.
8. I. Melnyk, S. Tyhai, and A. Pochynok, “Universal Complex Model for Estimation the Beam Current Density of High Voltage Glow Discharge Electron Guns”, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 152, pp. 319–341, 2021. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9783030583583>
9. I.V. Melnyk and A.V. Pochynok, “Algorithm for Calculating the Focal Parameters of Profile Electron Beams, Which Are Formed by Gas-Discharge Guns [in ukr]”, *Systems Research and Information Technology*, no. 2, pp. 7–17, 2019.
10. I.V. Melnyk and A.V. Pochynok, “System of Constructive Geometrical Parameters of The Model of Electronic Guns of High-Voltage Glow Discharge, Which Form Profile Electron Beams [in ukr]”, *Systems Research and Information Technology*, no. 1, pp. 50–65, 2019.
11. I.V. Melnyk and A.V. Pochynok, “Using Matrix Algorithms to Calculate the Trajectories of Charged Particles and Determine the Focal Parameters of the Electron Beam [in ukr]”, *Electronic Modeling*, vol. 42, no. 1, pp. 73–90, 2020.
12. I.V. Melnyk, *MatLab as Scientific and Technical Calculation System and Its Use for Solving Problems in Electronics: a Textbook in 2 Volumes. Vol. 2. Fundamentals of Programming and Solving Applied Problems* [in ukr]. Kyiv: University “Ukraine”, 2009, 327 p.
13. J.H. Mathews and K.D. Fink, *Numerical Methods. Using Matlab; 3rd edition*. Amazon, 1998.
14. I.V. Melnyk, *Basics of Programming in Python. Volume 2. Developed Python Programming Language. Comprehensive Textbook on the Courses “Object-Oriented Programming” and “Computing Systems and Networks” for Undergraduate Students Studying In The Educational Program “Electronic Devices* [in ukr]. Kyiv: “Kafedra”, 2020, 492 p.
15. S.I. Molokovsky and D.I. Sushkov, *Intense Electron and Ion Beams* [in rus]. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 304 p.
16. M. Siladzy, *Electronic and Ionic Optics* [in rus]. Moscow: Mir, 1990, 640 p.
17. I. Melnyk, “Methodic of Simulation of Guiding of Short-Focus Electron Beam in the Equipotential Transporting Channel of High Voltage Glow Discharge Electron Guns”, *Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Radiophysics and Electronics*, no. 1 (23), pp. 57–62, 2015.
18. J. Anderson, *Discrete Mathematics and Combinatorics* [in rus]. Moscow: Williams Publishing House, 2004, 960 p.
19. V.P. Vasiliev, *Numerical Methods for Solving Extreme Problems: Textbook for Universities* [in rus]. Moscow: “Nauka”, 1988, 552 p.
20. A.A. Samarskiy and A.V. Gulin, *Numerical methods* [in rus]. Moscow: “Nauka”, 1989, 432 p.
21. E. Kamke, *Handbook of Ordinary Differential Equations* [in rus]. Moscow: “Nauka”, 1976, 589 p.