

УДК 621.316.35:006.354

ОСОБЛИВОСТІ ПОЛЬОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ТРОЛЕЙНОГО ШИНОПРОВОДА

- КОЦУР М.І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kotsur8@gmail.com;
- ЯРИМБАШ Д.С. д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричних машин НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- БЕЗВЕРХНЯ Ю.С. аспірант кафедри електричних та електронних апаратів НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: juliaeea@ukr.net;
- ДІВЧУК Т.Ю. канд. техн. наук, доцент кафедри електричних машин НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com;

Мета роботи. Дослідження електромагнітних параметрів тролей шинопроводу, та верифікація отриманих результатів розрахунку за допомогою просторової (3D) та плоско-паралельної (2D) математичних польових моделей.

Методи дослідження. Дослідження проводилися із застосуванням методів теорії електромагнітного поля, інтерполяції та апроксимації, математичної фізики, скінченних елементів.

Отримані результати. Розроблена математична просторова модель електромагнітних процесів в сталевому тролейному шинопроводі у часовій постановці задачі розподілу електромагнітного поля. Отримані залежності розподілу еквіпотенціальних ліній результуючої z-складової вектору магнітного потенціалу уздовж шинопроводу, а також розподілу результуючої нормальної складової магнітної індукції і напруженості магнітного поля у поперечному (XY) перетині при несинусоїдальному струмі в тролей шинопроводу. Доведено, що уздовж довжини шинопроводу, у поперечному їх перетині, магнітне поле прагне до плоско-паралельної форми. Нев'язка модуля векторного магнітного потенціалу уздовж довжини шинопроводу не перевищує 0,9-1,2%. Для зменшення розмірності задачі, обчислювальних ресурсів та часу на розрахунок, запропонована двомірна плоско-паралельна математична модель у частотній постановці розподілу електромагнітного поля. Для врахування нелінійних магнітних властивостей сталевих тролей запропоновано визначення ефективної кривої намагнічування для нелінійної двовимірної задачі електромагнітного поля шинопроводу. Отримані результати верифікації, за розрахованим падінням напруги, підтверджують високу точність розрахунку та достовірність отриманих результатів (похибка не перевищує 1,88%÷2,06%) двовимірної моделі у частотній постановці по відношенню до просторової моделі в постановці задачі залежної від часу електромагнітного поля.

Наукова новизна. Запропоновано математичну двомірну модель електромагнітних процесів у частотній постановці задачі розподілу електромагнітного поля в тролейному шинопроводі, що враховує конструктивні особливості, нелінійність магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, ефекти близькості, поверхневі та зовнішні поверхневі ефекти, вплив гармонійних складових струму на падіння напруги та втрати потужності в процесі електропередачі, яка дозволяє з високою точністю і ефективністю чисельної реалізації визначити параметри тролей шинопроводу для відповідних значень амплітуд та частот вищих гармонік струму.

Практична цінність. Проведена верифікація за розрахованим падінням напруги підтверджує високу точність розрахунку та достовірність отриманих результатів (похибка не перевищує 1,88%÷2,06%) двовимірної моделі у частотній постановці по відношенню до просторової моделі в постановці задачі залежної від часу розподілу електромагнітного поля.

Ключові слова: шинопровід; електромагнітне поле; 3D та 2D модель; метод; гармоніки; частота, верифікація.

І. ВСТУП

Забезпечення технологічних операцій для виробництва металургійної енергоємної продукції за допомогою застосування підйомно-транспортних механізмів, в тому числі кранових електроприводів, а також сучасних потужних станків ЧПУ в цехах підприємств є досить енергоємним. Тому для моде-

рнізації власних енергосистем підприємств металургійної та інших промисловостей України необхідно застосування сучасних рішень в області енергоресурсозбереження. Системи цехового електропостачання повинні відповідати жорстким вимогам високої надійності, ефективності та безпеки, забезпечуючи при цьому високу якість електричної ене-

ргії. Сучасні системи цехового електропостачання можуть мати значну протяжність від 300 метрів і більше. Тому, їх параметри і електричні характеристики істотно впливають на якість електроенергії, режими роботи електроприймачів і енергоефективність технологічних процесів [1]. Широке застосування силових напівпровідникових перетворювачів в усіх галузях промисловості дозволило підвищити енергоефективність промислових установок, знизити споживання електроенергії, підвищити якість продукції, що виготовляється [2].

Але вони призводять до генерації вищих гармонійних складових у струмопроводах постійного і змінного струму, що негативно позначається на коефіцієнті потужності мережі [3]. Припустимий гармонійний склад струмів і напруг регламентований стандартом [4], [5]. Наявність вищих гармонік, а також їх відхилення від нормованих значень, негативно впливає на ефективність і надійність елементів системи електропостачання, зокрема цехових шинопроводів. Вони можуть призводити до істотного збільшення електричних опорів шинопроводів, падіння напруги, втрат, зниження коефіцієнта потужності, перегріву провідників шинопроводів і виходу їх з ладу

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Відомо, що класичні інженерні методи розрахунку параметрів і електромагнітних характеристик тролейного шинопровода в різних режимах роботи різноманітних струмоприймачів, засновані на цілому ряді припущень [1,2], які можуть призводити до суттєвої похибки розрахунку, що не задовольняє сучасним вимогам до енергоефективності. Поряд з класичними методами найбільш популярними на сьогоднішній день в інженерній практиці, а також серед дослідників, застосовуються методи схемного моделювання [6]-[15]. Параметри схем, як правило, визначаються на основі узагальнених рівнянь. Ці рівняння отримані в наслідок ряду припущень і наближень, що значно обмежує область їх використання. Застосування методик на їх основі не дозволяє забезпечити необхідну точність і достовірність результатів, врахувати вплив гармонійного складу струмів і напруг, нелінійність властивостей активних матеріалів, поверхневі ефекти, ефекти близькості та ін. Методи оцінки впливу гармонійного складу струмів і напруг на параметри і характеристики шинопроводів, запропоновані в [16], засновані на емпіричних залежностях і не враховують геометрію активних матеріалів, а також їх електромагнітні властивості.

Набуло поширення застосування методів розрахунку на основі польового моделювання для широкого класу задач електротехніки [17]-[18]. Їх основним обмеженням є необхідність використання спеціалізованого програмного забезпечення, високі витрати обчислювальних ресурсів і часу на чисель-

ну реалізацію.

В роботах [17] - [20] пропонується визначити електромагнітні параметри електротехнічних систем перетворення змінного струму на основі реалізації найефективнішої 3D моделі електромагнітного поля для завдання в time step формулюванні. Такий підхід дозволяє враховувати нелінійність властивостей активних матеріалів, гармонійний склад струмів і напруг, але вимагає значних витрат часу на чисельну реалізацію через необхідність збіжності розрахунку кожного часового шару. В роботі [19] було запропоновано модель поля у частотному формулюванні. Такий підхід вимагає значно менших витрат часу на чисельну реалізацію і дозволяє врахувати окремо вплив кожної гармонійної складової струму і напруги на параметри і характеристики шинопроводів. Однак, використання частотного формулювання розрахунку розподілу електромагнітного поля може бути застосовано тільки для лінійних задач. Для врахування нелінійності магнітних властивостей в [18] запропоновано використання ефективних значень магнітних властивостей феромагнітних матеріалів. Це дозволяє враховувати нелінійність властивостей як основних струмоведучих, так і допоміжних матеріалів в частотних постановках розрахунку розподілу магнітного поля.

Тому актуальним завданням є розробка математичної двомірної моделі в частотних постановках розрахунку розподілу магнітного поля, яка враховує конструктивні особливості, нелінійність магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, ефекти близькості, поверхневі та зовнішні поверхневі ефекти, вплив гармонійних складових струму на падіння напруги та втрати потужності в процесі електропередачі, яка дозволяє у порівнянні з 3D польовою моделлю з високою точністю і ефективністю чисельної реалізації визначити параметри тролей шинопровода для відповідних значень амплітуд та частот вищих гармонік струму.

III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження електромагнітних параметрів тролей шинопроводу, та верифікація отриманих результатів розрахунку за допомогою просторової (3D) та плоско-паралельної (2D) математичних польових моделей.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛА І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

При дослідженні особливостей розподілу електромагнітного поля в активній частині тролейного шинопроводу приймаються наступні припущення та умови [2], [4], [6], [7]:

- відсутні монтажні тримачі шинопроводу, болтові з'єднання, а також його кріпильних елементів; не враховуються електрофізичні властивості

ізоляторів, їх опір дорівнює нескінченності;

- у випадку наявності металевого екрануючого кожуха шинопроводу, розподіл магнітного поля за межі розрахункової області відсутній. При цьому, магнітне поле, що створюється струмами, які протікають в трелеях шинопроводу, локалізується в сталевому кожусі і не виходить за його межі;

- приймається, що струми зміщення відсутні;

- електротехнічні системи цехового навантаження симетричні, струми що протікають в шинопроводах рівні за амплітудним значенням, фазовий зсув між фазами шинопроводу складає 120 ел. град;

- в середовищі моделювання електромагнітних процесів шинопроводу відсутні вільні заряди.

Для розрахунку просторового магнітного поля формуються розрахункові області для найпоширеніших трелейних шинопроводів з прямокутного профілю (рис.1). Для цих розрахункових областей системи з трелейних шинопроводів відповідають рівняння для векторного магнітного потенціалу [8]:

$$\{\bar{B}\} = \text{rot}\{\bar{A}\} \quad (1)$$

де \bar{B} - вектор магнітної індукції, Тл; \bar{A} - вектор магнітного потенціалу Вб/м.

Геометрична просторова модель трелейного шинопроводу має підобластні компоненти з різними електричними та магнітними властивостями: фазні трелеї шинопроводу (1 – фаза А, 2 – фаза В, 3 – фаза С); 4 – кронштейн; 5 – ізолятор; 6 – повітря (рис.1.)

Для багатоелементного модельного середовища трелейних фазних шинопроводів з різними магнітними і електрофізичними властивостями, система рівнянь другого порядку в вираженні векторного магнітного потенціалу (1) має вигляд [9]:

$$\begin{cases} \sigma_j \partial A_j / \partial \tau + \sigma_j (\theta_j) \nabla V_j + \\ + \nabla \times [(\mu_0 \mu_j (B))^{-1} \nabla \times A_j] = J_{ej}; \\ - \nabla \cdot \partial (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V_j) / \partial \tau - \\ - \nabla \cdot (\sigma_j (\theta_j) \cdot \nabla V_j - J_{ej}) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де V – електричний потенціал, В; $\sigma(\theta)$ – питома електропровідність, См/м; μ – відносна магнітна проникність; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна постійна, Гн/м; ε_r – відносна діелектрична проникність; θ – температура, К; ω – кутова частота, рад/с; J_e – щільність стороннього джерела струму, А/м; j – індекси, що відповідають розрахунковим компонентам геометричної розрахункової області (рис. 1).

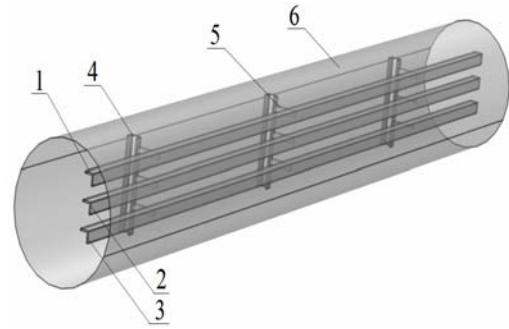


Рисунок 1. – Геометрична розрахункова область трелейних шинопроводів

Температурний режим шинопроводу вважається стаціонарним і оцінюється відповідно до даних [10]. Питома електрична провідність шинопроводу враховується у відповідності з [11]:

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma(\theta_0)}{[1 + \alpha_\rho \cdot (\theta - \theta_0)]} \quad (3)$$

де σ_0 – питома електрична провідність шинопроводу; α_ρ – температурний коефіцієнт опору; θ_0 – температура шинопроводу при визначенні питомої електричної провідності шинопроводу за довідниковими значеннями [11]; θ – температура шинопроводу під робочим струмовим навантаженням.

У тривимірному просторі вектор магнітного потенціалу має вигляд [12]:

$$\mathbf{A}_{i,j} = iA_{x_{i,j}} + jA_{y_{i,j}} + kA_{z_{i,j}} \quad (4)$$

Для системи рівнянь (2.2) задаються умови Коші для визначення початкових умов [13]:

$$A_i|_{t=0} = A_{0,i} \quad (5)$$

У відповідності [13], [14] система рівнянь (2) доповнюється умовами калібрування Кулона:

$$\text{div}\{\bar{A}\} = 0 \quad (6)$$

Умови сполучення для магнітних і електричних полів можна сформулювати у вигляді [15, 16]:

$$\begin{cases} n_{i,k} \times (H_i - H_k) = 0|_{\forall i,k \in (1,6), i \neq k}, \\ H = (\mu_0 \mu)^{-1} \nabla \times A, \\ n_{i,k} \cdot (J_i - J_k) = 0|_{\forall i,k \in (1,6), i \neq k}, \\ J = \sigma(\theta) \cdot E, \quad E = -\nabla V - j\omega A. \end{cases} \quad (7)$$

де H - напруженість магнітного поля; E - напруженість електричного поля.

На зовнішніх границях розрахункової області задаються граничні умови [17]:

$$\begin{cases} A_j = 0 \Big|_{\forall j \in (1,6)}, A_j = \bar{k} \cdot A_y(x,z) \Big|_{j=1}, \\ V_j = \varphi_j \Big|_{\forall j \in (1,6)}, \\ n_j \cdot (J_j) = 0 \Big|_{j=1} \end{cases} \quad (8)$$

Для врахування магнітних властивостей матеріалів (сталь, мідь) застосовуються залежності $\mu = f(B, H)$, що наведені в [27]-[29].

Щільність фазного струму в шиніпроводі визначається співвідношенням [18]:

$$\mathbf{J}_\phi = \frac{I_\phi}{A} \mathbf{e}_{coil} \quad (9)$$

де I_ϕ – фазний струм; A – поперечний переріз

ефективного провідника; \mathbf{e}_{coil} – векторна змінна, що представляє локальну щільність шиніпровода, його довжину й поперечний переріз.

Трифазну систему струмів шиніпровідів з врахуванням вищих гармонік представлено у вигляді:

$$\begin{cases} I_{A,k} = \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_k) \\ I_{B,k} = \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_k + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ I_{C,k} = \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_k - \frac{2 \cdot \pi}{3}) \end{cases} \quad (10)$$

де ψ_k – кут зсуву k -ї гармоніки струму від основної; I_{mk} – амплітуда k -ї гармоніки струму.

Методи щодо визначення індуктивності і взаємної індуктивності контурів зі струмом [19]-[24] справедливі для умови рівномірного розподілу фаз щільності векторів струму в струмопровідних елементах. Однак, при врахуванні вищих гармонік струму, умова рівномірного розподілу може не виконуватись, тому доцільним являється застосування інтегральних співвідношень енергії магнітного поля, а також активної, реактивної та повної потужностей.

Енергія магнітного поля в геометричних елементах конструкції шиніпровода з врахуванням вищих гармонік струму може бути представлена у вигляді [23], [24]:

$$W_k \Big|_j = \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} \iiint (B_k \cdot H_k) dx dy dz. \quad (11)$$

Питома енергія магнітного поля:

$$w_k \Big|_j = W_k \Big|_j / V_j \quad (12)$$

де V_j – об'єм струмопровідних елементів розрахункової моделі ($j = 1, 2, 3$);

Активні втрати та питомі активні втрати в геометричних елементах конструкції шиніпровода з врахуванням вищих гармонік струму можуть бути представлені у вигляді [23, 24]:

$$P_k \Big|_j = \sum_{k=1}^n \iiint \sigma_j^{-1} \mathbf{J}_k \cdot (\mathbf{J})^* dx dy dz, \quad (13)$$

$$p_k \Big|_j = P_k \Big|_j / V_j. \quad (14)$$

Реактивна потужність:

$$Q_k \Big|_j = \sum_{k=1}^n \omega \cdot W_k \Big|_j = \sum_{k=1}^n 2\pi \cdot f \cdot k \cdot W_k \Big|_j \quad (15)$$

Повна потужність:

$$S_k \Big|_j = \sqrt{P_k^2 + Q_k^2} \Big|_{j=1,2,3}, \quad (16)$$

Повний опір фазних шиніпровідів може бути представлено у вигляді [23, 24]:

$$Z_j = |Z_j| e^{i\varphi_j} \Big|_{j=1,2,3}, \quad (17)$$

або

$$Z_k \Big|_j = \frac{S_k}{\mathbf{I}_k^2} \Big|_{j=1,2,3}, \quad (18)$$

або

$$Z_k \Big|_j = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \Big|_{j=1,2,3}, \quad (19)$$

Активний опір фазних шиніпровідів:

$$R_k \Big|_j = \frac{P_k}{S_k} \Big|_j \quad (20)$$

Індуктивність фазних шиніпровідів:

$$L_k \Big|_j = \frac{2 \cdot W_k}{\mathbf{I}_k^2} \Big|_j \quad (21)$$

Індуктивний опір фазних шиніпровідів:

$$X_k \Big|_j = \omega L_k \Big|_j = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot k \cdot L_k \Big|_j \quad (22)$$

Падіння напруги в фазних шиніпроводах:

$$\Delta U_k \Big|_j = \frac{Z_k}{\mathbf{I}_k} \Big|_j \quad (23)$$

На рис.2 наведені результати просторового польового моделювання у вигляді розподілу екви-

потенціальних ліній результуючої z-складової вектору магнітного потенціалу уздовж шинопроводів, а також розподілу результуючої нормальної складової магнітної індукції і напруженості магнітного поля у поперечному (XY) перетині при несинусоїдальному струмі фазних шинопроводів. Результати просторового польового моделювання отримані за

допомогою методу кінцевих елементів в структурі засобів ПЗ COMSOL Multiphysics. Кількість перетинів дорівнює 10, які рівномірно розподілені уздовж довжини всього шинопровода.

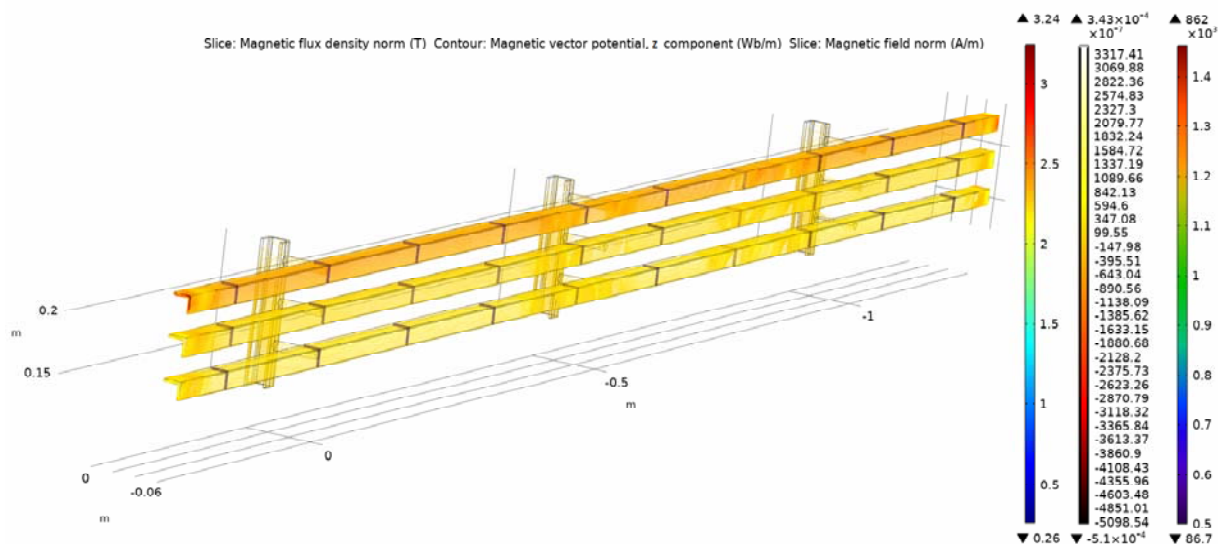


Рисунок 2. Результати чисельного просторового моделювання розподілу електромагнітного поля в тролейних шинопроводах

Тролеї виконані з прямокутного сталюого профілю розміром 30x30x4 при значенні струму основної гармоніки $I_{m1}=75A$. Амплітудні значення струмів вищих гармонік обиралися згідно стандарту [25], в якому задекларовані норми генерації гармонійних складових струму для симетричних трифазних електромеханічних систем (табл. 1) при коефіцієнті короткого замикання $R_{sce}=33$ в.о.

Для візуалізації даних чисельного моделювання відображається область локалізації магнітного поля для моменту часу, коли струм фази А лімітується максимальним амплітудним значенням при $t = 0,005c$. Ця область відповідає діапазону змін модуля векторного магнітного потенціалу, для фази А обмеженого значеннями $|A_{min}| = 0,4 \cdot 10^{-3}$ Вб/м та $|A_{max}| = 0,405 \cdot 10^{-4}$ Вб/м; для фази В – $|A_{min}| = 0,85 \cdot 10^{-4}$ Вб/м та $|A_{max}| = 0,867 \cdot 10^{-4}$ Вб/м; для фази С – $|A_{min}| = 1,05 \cdot 10^{-4}$ Вб/м та $|A_{max}| = 1,062 \cdot 10^{-4}$ Вб/м (рис.2). Як показує аналіз, уздовж довжини шинопроводів у поперечному їх перетині магнітне поле прагне до плоско-паралельної форми. Нев'язка модуля векторного магнітного потенціалу уздовж довжини шинопроводів не перевищує 0,9-1,2%. Тому доцільним є перехід від просторового до плоско-паралельного формулювання розподілу електрома-

гнітного поля, так як чисельна реалізація просторової моделі електромагнітного поля змінного у часі є дуже складна і потребує значних обчислювальних ресурсів та часу на розрахунок.

Таблиця 1. – Норми генерації гармонійних складових струму для симетричних трифазних технічних засобів

Мінімальне значення R_{sce} , в.о.	Гранично допустиме значення гармонійної складової струму, I_k/I_1 , %				Гранично допустиме значення коефіцієнта гармонійних складових, %	
	Номер гармоніки				СКГС	ЧЗКС
	5	7	11	13		
33	10,7	7,2	3,1	2	13	22
66	14	9	5	3	16	25
120	19	12	7	4	22	28
250	31	20	12	7	37	38
≥ 350	40	25	15	10	48	46

Для істотного скорочення розмірність задачі та підвищення ефективності обчислення пропонується для розрахунку розподілу електромагнітного поля в елементах конструкції тролейних шинопро-

водів застосовувати відому польову модель у частотному формулюванні [30]-[33].

Система рівнянь Максвелла формулюється для комплексних амплітуд векторного магнітного і електричного потенціалів в геометричних електропровідних областях тролейного шинопровода, за наявності сталевих кожухів і оточуючого їх електроізоляційного середовища (повітря):

$$\begin{cases} -\nabla \cdot [(j\omega\sigma_j - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,j}) \cdot \mathbf{A}_j + \\ + (\sigma_j + i\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,j}) \nabla V_j - \mathbf{J}_j^e] = 0; \\ (i\omega\sigma_j - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,j}) \mathbf{A}_j + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_{r,j}^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j) + \\ + (\sigma_j + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,j}) \nabla V_j = \mathbf{J}_j^e; \end{cases} \quad (24)$$

де $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – електрична постійна, Ф/м; $|V|$ – комплексна амплітуда електричного потенціалу, В; μ_r – ефективна магнітна проникність; індекс $j=0$ – відповідає області електроізоляційного та навколишнього середовища; індекси $j=1,2..n$ – відповідають областям струмопровідних тролей і кожухів.

Проекції векторного магнітного потенціалу та електричні потенціали є параметричними функціями кутовий частоти змінного струму. Формулювання розподілу електромагнітного поля в плоскопаралельному наближенні та має наступний вигляд [34-35]:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_j = i_z \cdot A_{z,j}, \\ \mathbf{B}_j = i_x \cdot B_{x,j} + i_y \cdot B_{y,j}, \\ \mathbf{H}_j = i_x \cdot H_{x,j} + i_y \cdot H_{y,j}, \\ V_j = i_z \cdot V_{z,i} \end{cases} \quad (25)$$

де i_x, i_y, i_z - просторові одиничні вектори.

Система рівнянь (2), (24) доповнюється умовами калібрування Кулона, умовами сполучення областей з різними електричними і магнітними властивостями і умовами електричної і магнітної ізоляції на зовнішніх межах за допомогою рівнянь (6)-(8). Щільність фазного струму в шинопроводі визначається співвідношенням (9).

Трифазна система струмів шинопроводів для польової стаціонарної моделі у частотному формулюванні для кожної окремої частоти та амплітуди гармоніки має вигляд:

$$\begin{cases} I_{A,k} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-j2\pi \cdot f_k \cdot t} \\ I_{B,k} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-j2\pi \cdot f_k \cdot t + j\left(\frac{2\pi}{3}\right)}, \\ I_{C,k} = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot e^{-j2\pi \cdot f_k \cdot t + j\left(\frac{4\pi}{3}\right)} \end{cases} \quad (26)$$

де I_k - ефективне значення струму k -ї гармоніки; f_k - частота струму k -ї гармоніки;

При застосуванні польової моделі при частотному формулюванні поля потрібно визначати ефективну криву намагнічування для нелінійної двовимірної задачі електромагнітного поля шинопроводів, які виготовлені зі сталі. Для визначення ефективної кривої намагнічування сталі потрібно застосувати просторову польову модель в постановці задачі залежної від часу протікання електромагнітних процесів в шинопроводі. Нелінійні властивості сталі можна представити як ефективні властивості певного ізотропного та однорідного уявного матеріалу [29], [36], [37].

В умовах дії змінного струму уявний матеріал буде мати магнітні властивості сталі, які мають нелінійну залежність від магнітної індукції та напруженості магнітного поля [30].

Згідно [29], [36], [37] для створення ефективної кривої сталі для двовимірної моделі електромагнітного поля, величини магнітної індукції B та напруженості магнітного поля H можуть бути визначені як функція простору та часу:

$$B(r,t) = \sqrt{B_x^2(r) \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_x(r)) + B_y^2(r) \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_y(r))}, \quad (27)$$

$$H(r,t) = \sqrt{H_x^2(r) \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_x(r)) + H_y^2(r) \cdot \cos^2(\omega t + \varphi_y(r))}. \quad (28)$$

Для формування ефективної кривої намагнічування сталі враховується лише залежність магнітної індукції від часу $B(t)$, яка представляє собою періодичну функцію, значення якої змінюються від B_{\min} до B_{\max} , та набувають цих значень в залежності від фазових кутів φ_x та φ_y при певних значеннях B_x та B_y . [29], [38]. Апроксимація функціональної залежності магнітної індукції $B(t)$ виконується в залежності від $\varphi_x, \varphi_y, B_x, B_y$. [29]. Завдяки чому можна отримати сімейство кривих намагнічування [29]. В [29], [39] автори пропонують для забезпечення простої та ефективної апроксимації прирівняти фазові кути φ_x та φ_y , тобто $\varphi_x = \varphi_y$, а залежності $B(t)$ замінити на подібну до функції $\cos(\omega t)$ [29], [39].

Залежність магнітної індукції від часу $B(t)$ для математичної моделі (26), що виражена у формулюванні векторного магнітного потенціалу, згідно [40] можна представити у вигляді:

$$B(t) = \hat{B} \cdot |\cos(\omega t)| \quad (29)$$

Щодо залежності напруженості магнітного від

часу $H(t)$ згідно [39]:

$$H(t) = \hat{H} \cdot |\cos(\omega t)| \quad (30)$$

Магнітні властивості уявного матеріалу на основі відомої кривої намагнічування сталі марки Ст.3 можна описати за допомогою методу середньоквадратичного значення [39] для вже відомих часових залежностей магнітної індукції від часу $B(t)$ та напруженості магнітного поля $H(t)$:

$$\nu_{ef} = \frac{H_{ck3}}{B_{ck3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T H^2(t) dt}}{\hat{B}}, \quad (31)$$

де T - період періодичних функцій $B(t)$ та $H(t)$.

Враховуючи залежність (32), згідно [29, 38] ефективна магнітна проникність визначається за наступним рівнянням:

$$\mu_{ef} = \frac{B_{ck3}}{H_{ck3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T B^2(t) dt}}{\hat{H}}. \quad (32)$$

Враховуючи відомі значення H_{ck3} та B_{ck3} можна побудувати ефективну криву намагнічування сталі марки Ст.3. Розв'язання рівняння (26) методом скінчених елементів використовуються рівняння (29) для розрахунку середньоквадратичного значення $B(t)$, а для $H(t)$ - рівняння (30) [29], [38].

При розрахунку електромагнітних параметрів поля, а також активних та індуктивних параметрів шинопроводів при частотному формулюванні задачі, для кожної амплітуди та частоти відповідної k -ї гармоніки виконується умова суперпозиції для електромагнітного поля за законом Біо-Савара [40]:

$$\begin{cases} \vec{B} = \sum_k \vec{B}_k \\ \vec{B} = \int d\vec{B} \end{cases} \quad (33)$$

Для двовимірної польової моделі у частотній постановці задачі енергія магнітного поля, в геометричних елементах конструкції шинопровода з врахуванням вищих гармонік струму відповідно до (12) може бути представлена у вигляді [23, 24]:

$$W_k|_j = \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} \iint_{S_j} (B_k \cdot H_k) dx dy. \quad (34)$$

де S_j - площа перетину j -го елемента геометричної моделі трифазних шинопроводів ($j=1,2,3$).

Активні втрати:

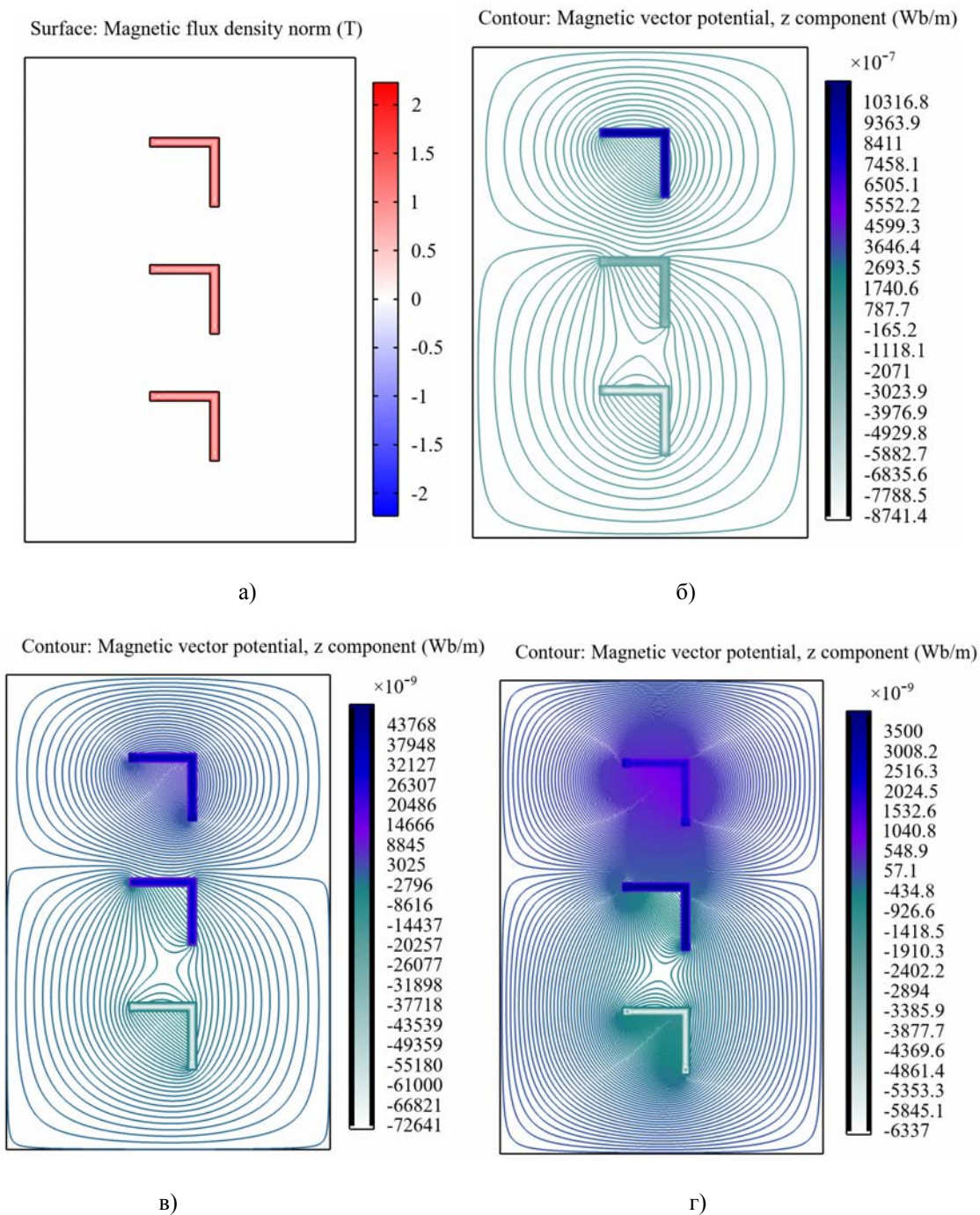
$$P_k|_j = \sum_{k=1}^n \iint_{S_j} \sigma_j^{-1} \mathbf{j}_k \cdot (\mathbf{j})^* dx dy. \quad (35)$$

Враховуючи рівняння (36) та (37) повний, активний та реактивний опори можна визначити відповідно до рівнянь (19), (21), (23). Падіння напруги в фазних шинопроводах відповідно до (24).

Для визначення точності розрахунку запропонованої двовимірної польової моделі у частотній постановці, а також підтвердження достовірності та прийнятності умов суперпозиції електромагнітного поля при декомпозиції електромагнітних процесів у тролейних шинопроводах для окремих амплітуд та частот k -х гармонік струму необхідно провести верифікацію розрахунків часозалежної просторової моделі електромагнітного поля у формуваннях векторного магнітного потенціалу за (2) та двовимірної моделі електромагнітного поля у формуваннях векторного магнітного потенціалу при частотній постановці задачі за (25).

На рис.3 наведені результати двовимірного польового моделювання при частотній постановці задачі у вигляді нормальної складової магнітної індукції для сталевих тролейних шинопроводів куткової форми за амплітудою і частотою основної гармоніки струму (рис. 3, а), та у вигляді розподілу вектору магнітного потенціалу за амплітудою і частотою $k=1,5,13$ гармонік струму (рис. 2.3, б, в, г), відповідно до табл. 1. Початкові дані моделювання повністю відповідають даним при моделюванні просторового електромагнітного поля (рис.2).

При зростанні частоти гармоніки струму, незалежно від амплітуди k -ї гармоніки фазовий зсув між вектором струму та вектором падіння напруги зменшується: при $f=50$ Гц - $\varphi_A|_{f=50}=45,24$ ел. град, $\varphi_B|_{f=50}=164,94$ ел. град, $\varphi_C|_{f=50}=-75,35$ ел. град; при $f=250$ Гц - $\varphi_A|_{f=250}=29,35$ ел. град, $\varphi_B|_{f=250}=148,94$ ел. град, $\varphi_C|_{f=250}=-91,5$ ел. град; при $f=650$ Гц - $\varphi_A|_{f=650}=20$ ел. град, $\varphi_B|_{f=650}=140,24$ ел. град, $\varphi_C|_{f=650}=-100,43$ ел. град. Це обумовлено зростанням впливу процесами підмагнічення фази В, що викликано відстаючим вектором струму фази А відносно фази В, та розмагнічення фази В, що викликано випереджаючим вектором струму фази А [41]. Зростання впливу процесів підмагнічення та розмагнічення при більших значеннях f призводить до зміни напрямку вектору магнітного потенціалу у зоні локалізації шинопровода фази В (рис. 3, б, в, г).



а) нормальної складової магнітної індукції при $f = 50\text{Гц}$, $I_m = I_{m1}A$; б) розподіл вектору магнітного потенціалу при $f = 50\text{Гц}$, $I_m = I_{m1}A$; в) розподіл вектору магнітного потенціалу при $f = 250\text{Гц}$, $I_m = 0,107 I_{m1}A$; г) розподіл вектору магнітного потенціалу при $f = 650\text{Гц}$, $I_m = 0,002 I_{m1}A$;

Рисунок 3. Результати двовимірного польового моделювання при частотній постановці задачі для сталевих тролейних шинопроводів куткової форми

Згідно [40] результуюче значення падіння напруги від сумарної дії k -х гармонік струму можна визначити за наступним виразом:

$$\Delta U_{\text{рез}} \Big|_j = \sqrt{\sum_k \Delta U_k^2} \Big|_j \quad (36)$$

Результуюче значення повного опору шиноп-

роводів від вищих гармонік струму, враховуючи (20) можна визначити за наступним рівнянням:

$$\begin{aligned} Z_{pez} \Big|_j &= \sqrt{\sum_k Z_k^2 \Big|_j} = \sqrt{\sum_k (R_k^2 + X_k^2) \Big|_j} = \\ &= \sqrt{R_{pez}^2 + X_{pez}^2} \Big|_j. \end{aligned} \quad (37)$$

В табл. 2 наведені значення падіння напруги, розрахованої за просторовою моделлю електромагнітного поля за (2) та значення результуючого падіння напруги за двовимірною польовою моделлю у частотній постановці задачі. Результати верифікації за розрахованим падінням напруги підтверджують високу точність розрахунку та достовірність отриманих результатів (похибка не перевищує 1,88%÷2,06%) двовимірної моделі у частотній постановці по відношенню до просторової часозалежної моделі електромагнітного поля.

Таблиця 2. Результати верифікації моделей електромагнітного поля

Розраховані параметри ΔU_{pez} , В/м	За просторовою моделлю	За двовимірною моделлю у частотному формулюванні	Відносна нев'язка, %
фаза А	0,2253	0,2208	1,99
фаза В	0,2273	0,2226	2,06
фаза С	0,2285	0,2242	1,88

Таким чином двовимірна польової моделі у частотній постановці задачі дозволяє з високою точністю та ефективністю чисельної реалізації проводити декомпозицію електромагнітних процесів в тролейних шинопроводів та для кожної відповідної амплітуди та частоти k -ї гармоніки мережевого струму визначати електромагнітні параметри та параметри тролейних шинопроводів з врахуванням їх конструктивних особливостей, нелінійність магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, ефекту близькості, поверхневих та зовнішніх поверхневих ефектів.

V. ВИСНОВКИ

Запропоновано математичну модель для завдання у частотному формулюванні електромагнітних процесів в сталевих та мідних тролей шинопровода, що враховує конструктивні особливості, нелінійність магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, ефекти близькості, поверхневі та зовнішні поверхневі ефекти, вплив гармонійних складових струму на падіння напруги та втрати потужності в процесі електропередачі, яка дозволяє з високою точністю і ефективністю чисельної реалізації визначити параметри тролей шинопровода для відповідних значень амплітуд та частот вищих гармонік струму.

Отримані значення падіння напруги, розрахованої за просторовою моделлю електромагнітного поля та значення результуючого падіння напруги за двовимірною польовою моделлю у частотній постановці задачі. Результати верифікації за розрахованим падінням напруги підтверджують високу точність розрахунку та достовірність отриманих результатів (похибка не перевищує 1,73%÷1,9%) двовимірної моделі у частотній постановці по відношенню до просторової моделі в постановці задачі залежної від часу електромагнітного поля.

Запропонована математична модель для завдання у частотному формулюванні електромагнітних процесів в сталевих та мідних тролей шинопровода може застосовуватись для розрахунку параметрів, втрат напруги, енергії магнітного поля та активних втрат для різних форм тролей шинопровода та відстаней між ними з урахуванням та без урахування екрануючих елементів для кожних k -х гармонік мережевого струму.

Запропонована математична модель для завдання у частотному формулюванні електромагнітних процесів в сталевих та мідних тролей шинопровода може застосовуватись для розрахунку параметрів, втрат напруги, енергії магнітного поля та активних втрат для різних форм тролей шинопровода та відстаней між ними з урахуванням та без урахування екрануючих елементів для кожних k -х гармонік мережевого струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Яримбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Яримбаш, М. И. Коцур, С. Т. Яримбаш, И. М. Коцур // Электротехника та електроенергетика – 2016. – №2 – С. 43 – 50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>
- [2] Yarymbash, D. A New Simulation Approach of the Electromagnetic Fields in Electrical Machines [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Subbotin, A. Oliinyk // IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies, July 5th - 7th, Zilina, Slovakia. – 2017. - Catalog Number CFP17CDT-USB. - pp. 452-457. DOI: 10.1109/DT.2017.8024332.
- [3] Yarymbash, D. Analysis of inrush currents of the unloaded transformer using the circuitfield modelling methods [Text] / D.Yarymbash, S. Yarymbash, M. Kotsur, T. Divchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 3. –№ 5 (93). – P. 6-11. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.134248
- [4] Jiang, B. N. The origin of spurious solutions in computational electromagnetics [Text] / B.N. Jiang, J. Wu, L.A. Povinelli // Comput. Phys. – 1996. – Vol. 125. – P. 104–123.
- [5] Yarymbash, D. Parameters Determination of the Trolley Busbars by Electromagnetic Field Simulation [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, I. Kotsur // IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), September 10-14,

- Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 76-79. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559576
- [6] Yarymbash, D. Electromagnetic parameters determination of power transformers [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, T. Divchuk // IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), September 10-14, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 70-75. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559573
- [7] Yarymbash, D.S. Hysteresis and eddy currents effects simulation in idling mode of the transformer [Text] / D.S. Yarymbash, M.I. Kotsur, S.T. Yarymbash, T.Ye. Divchuk // Problemele energeticii regionale. – 2019. - №1(39). – P. 12-21. – Режим доступу: DOI: 10.5281/zenodo.2650413.
- [8] Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 2003. – 317 с.
- [9] Демирчан, К. С. Машинные расчеты электромагнитных полей [Текст] / К. С. Демирчан, В. Л. Чечурин. – М.: Высш. школа, 1986. – 240 с.
- [10] Delgado F. 3D thermal model and experimental validation of a low voltage three-phase busduct [Text] / F. Delgado, C.J. Renedo, A. Ortiz, I. Fernández, A. Santisteban // Applied Thermal Engineering. – 2017. - Volume 110. - №5. - P. 1643-1652 DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.09.002
- [11] Филиппов, И. В. Теплообмен в электрических машинах [Текст]: учеб. пос. для вузов / И. В. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
- [12] Дивчук, Т.Е. Уточнючий підхід до визначення функціональних залежностей відносних магнітних проникностей анізотропних холоднокатаних електротехнічних сталей [Текст] / Т.Е. Дивчук, Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш, І.М. Килимник, М. І. Коцур, Ю. С. Безверхня // Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – N 2. – С. 6-15. – Режим доступу: DOI : 10.15588/1607-6761-2018-2-1.
- [13] Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т. 2 Теория поля [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 59 с.
- [14] Матвеев, А. Н. Электричество и магнетизм [Текст] / А. Н. Матвеев. – М.: Высш. школа, 1983. – 463 с.
- [15] Yarymbash D. An error estimation of the current sensors of the automated control system of the technological process of graphitation [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, M. Kylymnyk IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 10-14 September, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 64-69 DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559489
- [16] Shuhong, Wang. A new parametric finite element analysis software for electrical machine electromagnetic fields and its implementation [Text] / Wang Shuhong, Li Qingfu, Qiu Jie, Shi Shan // ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501), Shenyang, China, 2001. - pp. 1098-1101 vol.2.doi: 10.1109/ICEMS.2001.971869
- [17] Черных, И. В. Решение полевых задач с помощью программы ELCUT 4.2 [Текст] / И. В. Черных. – Екатеринбург: Изд-во УГТИ-УПИ, 2002. – 23 с.
- [18] Kotsur, M. Improving efficiency in determining the inductance for the active part of an electric machine's armature by methods of field modeling [Electronic Resource] / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, S. Yarymbash // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 6, № 5 (102). – pp. 39-47. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185136
- [19] Бида, В. В. К расчету токоведущих систем, образованных контурами сложной геометрии [Текст] / В. В. Бида, Ю. М. Васецкий, С. В. Захарченко // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1990. – №6. – С. 19-21.
- [20] Васецкий, Ю. М. К расчету магнитного поля пространственных контуров с током [Текст] / Ю. М. Васецкий, Ю. П. Ковбасенко // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1987. – №5. – С. 28–32.
- [21] Васецкий, Ю. М. Поверхностный эффект в массивном проводнике, образующем плоский контур [Текст] / Ю. М. Васецкий // Техническая электродинамика. – 1989. – №12. – С. 72–74..
- [22] Васецкий, Ю. М. Приближенный метод расчета поля внутри и в окрестности проводника плоского контура [Текст] / Ю. М. Васецкий // Техническая электродинамика. – 1987. – №4. – С. 5–7.
- [23] Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей [Текст]: справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – [3-е изд.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
- [24] Цейтлин, Л. А. Индуктивности проводов и контуров [Текст] / Л. А. Цейтлин. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – 228 с.
- [25] МЭК (61000-3-12:2004) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase
- [26] Марков, Б. Л. Физическое моделирование в металлургии [Текст] / Б. Л. Марков, А. А. Кирсанов. – М.: Металлургия, 1984. – 119 с.
- [27] Демирчан, К.С. Моделирование магнитных

- полей [Текст] / К.С. Демирчан. – Ленинград: Энергия. 1974. – 288 с.
- [28] Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS Учебное пособие для студентов вузов [Текст] / О.Б. Буль. – М.: Академия, 2006. – 288с.
- [29] Yarymbash D. Electromagnetic Properties Determination of Electrical Steels [Electronic Resource] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk // IEEE: 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 25-29, Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 185-189. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235419
- [30] Яримбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Яримбаш, М. И. Коцур, С. Т. Яримбаш, И. М. Коцур // Электротехника та електроенергетика – 2016. – №2 – С. 43 – 50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>
- [31] Yarymbash, D. S. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method [Text] / D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, M. I. Kotsur, D. O. Litvinov // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – № 1. – P. 65-74. – Way of Access: DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-8>
- [32] Yarymbash, D. Parameters Determination of the Trolley Busbars by Electromagnetic Field Simulation [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, I. Kotsur // IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), September 10-14, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 76-79. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559576
- [33] Kotsur, M. Determination of a busbar's parameters by electromagnetic field simulation [Text] / M.I. Kotsur, D.S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240811
- [34] Paoli, G. Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems [Text] / G. Paoli, O. Biro, G. Buchgraber // Transactions on Magnetism. – 1998. – Volume 34. – Issue: 5. – p. 2625 – 2628.
- [35] H. Koeppl G. Paoli Non-linear modeling of a broadband SLIC for ADSL-Lite-over-POTS using harmonic analysis [Text] / H. Koeppl G. Paoli, 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Proceedings (Cat. No.02CH37353), August, Phoenix-Scottsdale, AZ, USA, 2002, pp. II-II, doi: 10.1109/ISCAS.2002.1010942.
- [36] Junwei Lu Harmonic balance methods used in computational electromagnetics. harmonic balance finite element method: applications in nonlinear electromagnetics and power systems [Text]. Lu Junwei, Zhao Xiaojun, Yamada Sotoshi. - John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. - 2016. — 304 p.
- [37] Junwei, Lu Nonlinear electromagnetic field and its harmonic problems in harmonic balance finite element method: applications in nonlinear electromagnetics and power systems [Text] / Lu Junwei, Zhao Xiaojun, Yamada Sotoshi // Wiley-IEEE Press. – 2016.- №1. - pp. 19-59.
- [38] Stockreiter C. transfinite element method using the v-potential formulation with edge elements in the frequency domain [Text] / C. Stockreiter // IEEE Transactions on Magnetism. – 2007. - vol. 43. - №. 4. - pp. 1349-1352. doi: 10.1109/TMAG.2006.891008.
- [39] Gerhard Paoli Oszkar Biro Time harmonic eddy currents in non-linear media [Text] / P, Gerhard, B. Oszkar // «COMPEL» – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. – 1997. - Vol. 17. - issue № 5. - pp. 567-575.
- [40] Измайлов, С. В. Курс Электродинамики [Текст]: для физико-математических факультетов педагогических вузов / С. В. Измайлов. – М: Гос. Учебн-педагог. Изд-во мин. просвещ. РСФСР, 1962. – 440с.
- [41] Kotsur, M. Improving efficiency in determining the inductance for the active part of an electric machine's armature by methods of field modeling [Electronic Resource] / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, S. Yarymbash // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 6. - № 5 (102). – pp. 39-47. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185136.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2020

ОСОБЕННОСТИ ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ТРОЛЛЕЙНЫХ ШИНОПРОВОДОВ

- КОЦУР М.И. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: kotsur8@gmail.com;
- ЯРЫМБАШ Д.С. д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических машин Запорожского национального университета, Запорожье, Украина, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- БЕЗВЕРХНЯЯ Ю.С. аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина e-mail: juliaeee@ukr.net;
- ДИВЧУК Т.Ю. канд. техн. наук, доцент кафедры электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com;

Цель работы. Исследование и анализ параметров троллейных шинопроводов, в условиях действия высших гармонических составляющих тока, с учетом конструктивных особенностей, нелинейности магнитных и электрофизических свойств материалов, эффектов близости, поверхностных и внешних поверхностных эффектов.

Методы исследования. Исследования проводились с применением методов теории электромагнитного поля, теории электрических цепей, математической физики, конечных элементов, интерполяции, аппроксимации и регрессионного анализа.

Полученные результаты. Разработана математическая пространственная модель электромагнитных процессов в стальном троллейном шинопроводе во временной постановке задачи распределения электромагнитного поля. Получены зависимости распределения эквипотенциальных линий результирующей z -составляющей вектора магнитного потенциала вдоль шинопровода, а также распределения результирующей нормальной составляющей магнитной индукции и напряженности магнитного поля в поперечном (XU) сечении при несинусоидальном токе в троллеях шинопровода. Доказано, что вдоль длины шинопровода, в поперечном их пересечении, магнитное поле стремится к плоско-параллельной форме. Невязка модуля векторного магнитного потенциала вдоль длины шинопровода не превышает 0,9-1,2%. Для уменьшения размерности задачи, вычислительных ресурсов и времени на расчет, предложена двухмерная плоско-параллельная математическая модель в частотной постановке распределения электромагнитного поля. Для учета нелинейных магнитных свойств стальных троллеев предложено определение эффективной кривой намагничивания для нелинейной двумерной задачи электромагнитного поля шинопровода. Полученные результаты верификации, по рассчитанному падению напряжения, подтверждают высокую точность расчета и достоверность полученных результатов (погрешность не превышает 1,88% ÷ 2,06%) двумерной модели в частотной постановке, по отношению к пространственной модели, в постановке задачи зависимой от времени электромагнитного поля.

Научная новизна. Предложена математическая двухмерная модель электромагнитных процессов в частотной постановке задачи распределения электромагнитного поля в троллейном шинопроводе, учитывающая конструктивные особенности, нелинейность магнитных и электрофизических свойств, эффекты близости, поверхностные и внешние поверхностные эффекты, влияние гармонических составляющих тока на падение напряжения и потери мощности в процессе электропередачи, которая позволяет с высокой точностью и эффективностью численной реализации определить параметры троллей шинопровода для соответствующих значений амплитуд и частот весших гармоник тока.

Практическая ценность. Проведена верификация по рассчитанному падению напряжения подтверждающая высокую точность расчета и достоверность полученных результатов (погрешность не превышает 1,88% ÷ 2,06%) двумерной модели в частотной постановке, по отношению к пространственной модели, в постановке задачи зависимой от времени распределения электромагнитного поля.

Ключевые слова: шинопровод; электромагнитное поле; 3D и 2D модель; метод, гармоники; частота, верификация.

FEATURES OF FIELD MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF TROLLEY BUSBAR

- KOTSUR M.I.** PhD, associate professor, associate professor of Electrical and Electronic Devices Zaporizhzhya Polytechnic National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: kotsur8@gmail.com;
- YARYMBASH D.S.** D.Sc., professor, head of the department of Electrical Machines Zaporizhzhya Polytechnic National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- BEZVERKHNYA Yu.S.** postgraduate student of the department of Electrical and Electronic Devices of Zaporizhzhya Polytechnic National University, Zaporizhia, Ukraine, e-mail: juliaeea@ukr.net;
- DIVCHUK T.Yu.** PhD, associate professor of the department of Electrical machines Zaporizhzhya Polytechnic National University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tetiana.divchuk@gmail.com;

Purpose. Research and analysis trolley busbar's parameters in condition of higher current harmonic actions, with taking into account the structural features of nonlinearity of magnetic and electrical properties of materials, proximity effects, surface and external surface effects.

Methodology. The researches were carried out using the electromagnetic field theory methods, the electrical circuit theory, mathematical physics, finite elements, interpolation, approximation and regression analysis.

Findings. The mathematical spatial model of electromagnetic processes in a steel trolley busbar in time statement of a problem of distribution of an electromagnetic field is developed. The dependences of the distribution of equipotential lines of the resulting z-component of the magnetic potential vector along the busbar, as well as the distribution of the resulting normal component of magnetic induction and magnetic field strength in the transverse (XY) cross section at non-sinusoidal current in busbar trolleys is obtained. Along the length of the busbar, in their cross section, the magnetic field tends to a plane-parallel shape it is proved. The error of the modulus of the vector magnetic potential along the length of the busbar does not exceed 0.9-1.2%. To reduce the dimension of the problem, computational resources and calculation time, a two-dimensional plane-parallel mathematical model in the frequency setting of the electromagnetic field distribution is proposed. To take into account the nonlinear magnetic properties of steel trolleys, to determine the effective magnetization curve for the nonlinear two-dimensional problem of the electromagnetic field of the busbar it is proposed. The verification results, according to the calculated voltage drop, confirm the high accuracy of the calculation and the reliability of the obtained results (error does not exceed 1.88% ÷ 2.06%) of the two-dimensional model in the frequency setting relative to the spatial model in the problem of time-dependent electrical -magnetic field is obtained.

Originality. A mathematical two-dimensional model of electromagnetic processes in the frequency formulation of the problem of electromagnetic field distribution in a trolley busbar is proposed, which takes into account design features, nonlinearity of magnetic and electrophysical properties of materials, proximity effects, surface and external surface effects, influence of harmonic current components power transmission, which allows with high accuracy and efficiency of numerical implementation to determine the parameters of the bus trolleys for the corresponding values of the amplitudes and frequencies of the frequencies harmonics of the current.

Practical value. Verification of the calculated voltage drop confirms the high accuracy of the calculation and the reliability of the results (error does not exceed 1.88% ÷ 2.06%) of the two-dimensional model in the frequency reference relative to the spatial model in the problem of time-dependent electromagnetic field distribution is performed.

Keywords: busbar; electromagnetic field; 3D and 2D model; method; harmonics; frequency, verification.

REFERENCES

- [1] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. (2016). Osobennosti trekhmernogo modelirovaniya elektromagnitnykh polej asinkhronnogo dvigatelya. Elektrotehnika ta elektroenergetika, 2, 43 – 50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>
- [2] Yarymbash, D., Kotsur, M., Subbotin, S., Olinyk, A. (2017) New simulation approach of the electromagnetic fields in electrical machines. IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies. Catalog Number CFP17CDT-USB. 452-457. DOI: 10.1109/DT.2017.8024332 (in English).
- [3] Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kotsur, M., Divchuk, T. (2018). Analysis of inrush currents of the unloaded transformer using the circuit-field modelling methods. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3, 5 (93), 6-11. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.134248

- (in English).
- [4] Jiang, B., Wu, J., Povinelli, L. (1996). The origin of spurious solutions in computational electromagnetics, *Comput. Phys*, 125, 104–123.
- [5] Yarymbash, D., Kotsur, M., Bezverkhnia, Yu., Kotsur I. (2018). Parameters determination of the trolley busbars by electromagnetic field simulation. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 76-79. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559576 (in English).
- [6] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Divchuk, T. (2018). Electromagnetic parameters determination of power transformers. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 70-75. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559573 (in English).
- [7] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Divchuk, T. (2019). Hysteresis and eddy currents effects simulation in idling mode of the transformer. *Problemele energeticii regionale*, 39, 12-21. –DOI: 10.5281/zenodo.2650413. (in English).
- [8] Bessonov, L. (2003). Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. *Elektromagnitnoe pole tokov, magnitnogo polya. Vysshaya shkola*, 317 (in Russian).
- [9] Demirchan, K., Demirchan, V., Chechurin L. (1986). Mashinnye raschety elektromagnitnykh polej, *Vysshaya shkola*, 240. (in Russian)
- [10] Roskopf, A., Bar, E., Joffe, C. (2014). Influence of linner skin- and proximity effects on conduction in litz wires. *IEEE Trans. Power Electron.*, 29, 10, 5454–5461, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2293847 (in Russian).
- [11] Filippov, I. (1986) *Teploobmen v elektricheskikh mashinakh: ucheb. pos. dlya vuzov. Energoatomizdat*, 256. (in Russian)
- [12] Divchuk, T., Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Kotsur, M., Bezverkhnia, Y. (2018). Ytochyuyuchy pidhid do vyznachenya funkcional'nykh zalezhnostey vidnosnykh magnitnykh pronykhnostey anizotropnykh kholodnokatannykh staley (An adjusting approach to the determination of the permeability functional dependencies of anisotropic cold-rolled electrotechnical steels). *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 6-15. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2018-2-1 (in Ukrainian).
- [13] Landau, L. D. Lifshicz, E. M. Nauka (1988). *Teoreticheskaya fizika. T. 2 Teoriya polya*, 59. (in Russian)
- [14] Matveev, A. N. (1983). *Elektrichestvo i magnetizm. Vysshaya shkola*, 463. (in Russian)
- [15] Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Kylymnyk M. (2018). An error estimation of the current sensors of the automated control system of the technological process of graphitiation. *IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 64-69. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559489 (in English).
- [16] Shuhong, Wang., Qingfu, Li, Jie Qiu, Shan Shi (2001). A new parametric finite element analysis software for electrical machine electromagnetic fields and its implementation. *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501)*, 2, 1098-1101 doi: 10.1109/ICEMS.2001.971869.
- [17] Chernykh, I. V., (2002) *Reshenie polevykh zadach s pomoshhyu programmy ELCUT 4.2 Izdatelstvo UGTI-UIPI*, 23. (in Russian)
- [18] Kotsur, M., Yarymbash, D., Kotsur, I., Yarymbash, S. (2019). Improving efficiency in determining the inductance for the active part of an electric machine's armature by methods of field modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 5 (102), 39-47. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185136 (in English).
- [19] Bida, V., Vaseczkij, Yu., Zakharchenko, S. (1990). K raschetu tokovedushhikh sistem, obrazovannykh konturami slozhnoj geometrii. *Izvestiya VUZov. Elektromekhanika*, 6, 19-21. (in Russian).
- [20] Vaseczkij, Yu., Kovbasenko, Yu. (1987). K raschetu magnitnogo polya prostranstvennykh konturov s tokom. *Izvestiya VUZov. E'lektromekhanika*, 5, 28–32. (in Russian).
- [21] Vaseczkij, Yu. M., (1989). Poverkhnostnyj effekt v massivnom provodnike, obrazuyushhem ploskij kontur. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, 12, 72–74. (in Russian).
- [22] Vaseczkij, Yu. M. (1987). Priblizhennyj metod rascheta polya vnuti i v okrestnosti provodnika ploskogo kontura. *Tekhnicheskaya e'lektrodinamika*, 4, 5–7. (in Russian).
- [23] Kalantarov, P. L., Czejtlin, L. A. (1986). *Raschet induktivnostej: spravochnaya kniga. Energoatomizdat*, 488. (in Russian).
- [24] Czejtlin, L. A. (1950). *Induktivnosti provodov i konturov. Gose`nergoizdat*, 228. (in Russian).
- [25] МЭК (61000-3-12:2004) *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase IEC (61000-3-12: 2004) Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ogranichenie garmonicheskikh sostsvlyaiushikh toka, sozdavaemykh*

- tehnicheskimi sredstvami potrebyaemymy tokom bolee 16A, no ne bolee 75A (v odnoy faze), podkluchaemykh k nizkovol'nym sistemam electrosnabzheniya obshshego naznacheniya. Normy i metody ispytaniy. (Electromagnetic compatibility of technical means. Limit of harmonic current components created by technical means with a current consumption of more than 16 A, but not more than 75 A (in one phase), connected to low-voltage general-purpose power systems. Norms and methods of testing). (in Russian).
- [26] Markov, B. L. (1984). Fizicheskoe modelirovanie v metallurgii. Metallurgiya, 119. (in Russian).
- [27] Demirchan, K.S. (1974). Modelirovanie magnitnykh polej. E`nergiya, 288. (in Russian).
- [28] Bul', O.B. (2006). Metody rascheta magnitny`kh sistem elektricheskikh apparatov. Programma ANSYS Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. Akademiya, 288. (in Russian).
- [29] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Klymnyk, I., Divchuk, T. (2020). Electromagnetic Properties Determination of Electrical Steels [Electronic Resource]. IEEE: 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 185-189. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235419 (in English).
- [30] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. (2016). Osobennosti trekhmernogo modelirovaniya elektromagnitnykh polej asinkhronnogo dvigatelya. Elektrotehnika ta elektroenergetika, 2, 43–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5> (in Russian).
- [31] Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kotsur, I. Litvinov, D. (2018). Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method. Radio Electronics, Computer Science, Control, 1, 65-74. –DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-8> (in English).
- [32] Yarymbash, D., Kotsur, M., Bezverkhnia, Yu., Kotsur, I. (2018). Parameters Determination of the Trolley Busbars by Electromagnetic Field Simulation. IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 76-79. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559576 (in English).
- [33] Kotsur, M., Yarymbash, D., Bezverkhnia, Yu., Kotsur, I. (2020). Determination of a busbar's parameters by electromagnetic field simulation. IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240811. (in English).
- [34] Paoli, G., Biro, G., Buchgraber, O. (1998). Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems. Transactions on Magnetics, 34, 5, 2625 – 2628. (in English).
- [35] Koepl, H., Paoli, G. (2002). Non-linear modeling of a broadband SLIC for ADSL-Lite-over-POTS using harmonic analysis. IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Proceedings (Cat. No.02CH37353. II-II, doi: 10.1109/ISCAS.2002.1010942. (in English).
- [36] Junwei, Lu., Xiaojun, Zhao, Sotoshi, Yamada (2016). Harmonic balance methods used in computational electromagnetics. harmonic balance finite element method: applications in nonlinear electromagnetics and power systems. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 304. (in English).
- [37] Junwei, Lu., Xiaojun, Zhao, Sotoshi, Yamada (2016). Nonlinear electromagnetic field and its harmonic problems in harmonic balance finite element method: applications in nonlinear electromagnetics and power systems. Wiley-IEEE Press, 1, 19-59. (in English).
- [38] Stockreiter, C. (2007). Transfinite element method using the v-potential formulation with edge elements in the frequency domain. IEEE Transactions on Magnetics, 43, 4, 1349-1352. doi: 10.1109/TMAG.2006.891008. (in English).
- [39] Paoli, G., Biro, O. (1997). Time harmonic eddy currents in non-linear media. «COMPEL» – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 17, 5, 567-575. (in English).
- [40] Izmajlov, S. V. (1962). Kurs Elektrodinamiki: dlya fiziko-matematicheskikh fakul'tetov pedagogicheskikh vuzov. Gos. Uchebn-pedagog. Izdatel'stvo ministerstva prosveshheniya RSFSR, 440. (in Russian).
- [41] Kotsur, M., Yarymbash, D., Kotsur, I., Yarymbash, S. (2019). Improving efficiency in determining the inductance for the active part of an electric machine's armature by methods of field modeling [Electronic Resource]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6, 5 (102), 39-47. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185136. (in English).