

**Ю. С. БЕЗВЕРХНЯ, М. І. КОЦУР, Д. С. ЯРИМБАШ, І. М. КОЦУР**

### **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРОЛЕЙНИХ ШИНОПРОВОДІВ НА ОСНОВІ ПОЛЬОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Сучасні системи цехового електропостачання можуть мати значну довжину. Тому їх параметри та електричні характеристики істотно впливають на якість електроенергії, режими роботи електроприймачів та енергоефективність технологічних процесів. Існуючі в інженерній практиці методики розрахунку параметрів та характеристик шинопроводів засновані на методах схемного моделювання. Параметри схем зазвичай визначаються на основі узагальнених рівнянь. Ці рівняння отримані внаслідок низки припущень, що обмежує область їх використання. Альтернативною методикам, заснованих на емпіричних залежностях може бути застосування методів розрахунку електричних параметрів та характеристик на основі польового моделювання. Таким чином, в роботі було запропоновано математичну модель електромагнітних процесів в активних елементах тролей шинопровода, що враховує конструктивні параметри, нелінійність магнітних властивостей, вплив гармонійних складових струмів і напруг. На основі реалізації математичної моделі запропоновано методику визначення параметрів та характеристик тролей шинопровода на основі польового моделювання, що враховує конструктивні параметри, нелінійність магнітних властивостей, вплив гармонійних складових струмів та напруг, що володіє високою точністю та ефективністю чисельної реалізації. Встановлено вплив сталого кожуха на електричні параметри та характеристики шинопровода. Наявність сталого кожуха призводить до зниження коефіцієнта потужності, збільшення падін напруги та спотворення їх фаз, а також до зростання втрат на 2 %. Виконано оцінку впливу на втрати активної потужності від гармонійних складових струмів. Наявність гармонійних складових струмів у межах стандарту призводить до додаткового збільшення втрат на 3 %. Однак, при перевищенні стандартизованих значень їх вплив на втрати активної потужності істотно зростає. Запропонована методика має високу точність та ефективність чисельної реалізації і може бути реалізована за допомогою програмного забезпечення зі статусом вільної ліцензії (наприклад, FEMM).

**Ключові слова:** тролейний шинопровід, польове моделювання, коефіцієнт потужності, реактивний опір, падіння напруги, гармоніки струму.

**Ю. С. БЕЗВЕРХНЯ, М. И. КОЦУР, Д. С. ЯРЫМБАШ, И. М. КОЦУР**

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРОЛЛЕЙНЫХ ШИНОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Современные системы цехового электроснабжения могут иметь значительную протяженность. Поэтому их параметры и электрические характеристики оказывают существенное влияние на качество электроэнергии, режимы работы электроприемников и энергоэффективность технологических процессов. Имеющиеся в инженерной практике методики расчета параметров и характеристик шинопроводов основаны на методах схемного моделирования. Параметры схем обычно определяются на основе обобщенных уравнений. Эти уравнения получены в результате ряда предположений, что ограничивает область их использования. Альтернативой методикам, основанным на эмпирических зависимостях, может быть применение методов расчета электрических параметров и характеристик на основе полевого моделирования. Таким образом, в работе была предложена математическая модель электромагнитных процессов в активных элементах троллей шинопровода, учитывающая конструктивные параметры, нелинейность магнитных свойств, влияние гармонических составляющих токов и напряжений. На основе реализации математической модели предложена методика определения параметров и характеристик троллей шинопровода на основе полевого моделирования, учитывающая конструктивные параметры, нелинейность магнитных свойств, влияние гармонических составляющих токов и напряжений, обладающих высокой точностью и эффективностью численной реализации. Установлено влияние стального кожуха на электрические параметры и характеристики шинопровода. Наличие стального кожуха приводит к снижению коэффициента мощности, увеличению падений напряжения и искажению их фаз, а также к росту потерь на 2 %. Выполнена оценка влияния на потери активной мощности от гармонических составляющих токов. Наявність гармонічних складових струмів у межах стандарту призводить до додаткового збільшення втрат на 3 %. Однак, при перевищенні стандартизованих значень, їх вплив на втрати активної потужності істотно зростає. Предлагается методика имеет высокую точность и эффективность численной реализации и может быть реализована посредством программного обеспечения со статусом свободной лицензии (например, FEMM).

**Ключевые слова:** троллейный шинопровод, полевое моделирование, коэффициент мощности, реактивное сопротивление, падение напряжения, гармоники тока.

**YU. S. BEZVERKHNIYA, M. I. KOTSUR, D. S. YARYMBASH, I. M. KOTSUR**

### **INCREASING THE EFFICIENCY OF DETERMINING THE PARAMETERS OF TROLLEY BUSBARS BASED ON FIELD SIMULATION**

Modern systems of shop power supply can be of considerable length. Therefore, their parameters and electrical characteristics have a significant impact on the quality of electricity, operating modes of electrical consumers and the energy efficiency of technological processes. Techniques for calculating the parameters and characteristics of busbars available in engineering practice are based on the methods of circuit modelling. Circuit parameters are usually determined based on generalized equations. These equations are obtained as a result of a number of assumptions, which limits the area of their use. An alternative to methods based on empirical dependencies can be the use of methods for calculating electrical parameters and characteristics based on field modelling. Thus, the work proposed a mathematical model of electromagnetic processes in the active elements of trolleys busbars. This model allows to take into account design parameters, nonlinearity of magnetic properties, the influence of harmonic components of currents and voltage. Based on the implementation of a mathematical model, a method was proposed for determining the parameters and characteristics of busbars trolleys based on field modelling. This allows you to take into account design parameters, nonlinearity of magnetic properties, the influence of harmonic components of currents and voltages. This model has high accuracy and efficiency of numerical implementation. The influence of the steel casing on the electrical parameters and characteristics of the busbar is established. The presence of a steel casing leads to a decrease in the power factor, an increase in voltage drops and distortion of their phases, as well as increase losses by 2 %. An assessment of the impact on active power losses due to harmonic components

© Ю. С. Безверхня, М. І. Коцур, Д. С. Яримбаш, І. М. Коцур, 2021

of currents has been carried out. The presence of harmonic components of currents within the standard leads to an additional increase in losses by 3 %. However, when the standardized values are exceeded, their effect on active power losses increases significantly. The proposed method has high accuracy and efficiency of numerical implementation and can be implemented using software with the status of a free license (for example, FEMM).

**Keywords:** trolley busbar, field modelling, power factor, reactance, voltage drop, current harmonics.

**Вступ.** Системи цехового електропостачання повинні відповідати жорстким вимогам високої надійності, ефективності та безпеки, забезпечуючи при цьому високу якість електричної енергії. Сучасні системи цехового електропостачання можуть мати значну протяжність. Тому, їх параметри та електричні характеристики істотно впливають на якість електроенергії, режими роботи струмоприймачів та енергоефективність технологічних процесів [1]. Наявність силового електрообладнання, індукційних двигунів, перетворювачів, трансформаторів із насиченими магнітними системами тощо, істотно впливають на гармонійний склад струмів і напруги цехової електромережі [2–4]. Допустимий гармонійний склад струмів та напруги регламентований стандартом [5–6]. 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 суттєвого збільшення електричних опорів шинопроводів, падіння напруги, втрат, зниженню коефіцієнта потужності, перегріву провідників шинопроводів та виходу їх з ладу.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Існуючі в інженерній практиці методики розрахунку параметрів та характеристик шинопроводів засновані на методах схемного моделювання [7–11]. Параметри схем зазвичай визначаються на основі узагальнених рівнянь. Ці рівняння отримані внаслідок низки припущень та наближень, що обмежує область їх використання. Застосування методик на їх основі не дозволяє забезпечити необхідну точність та достовірність результатів, врахувати вплив гармонійного складу струмів та напруги, нелінійність властивостей активних матеріалів, поверхневі ефекти, ефекти близькості тощо. Методи оцінки впливу гармонійного складу струмів і напруги на параметри та характеристики шинопроводів, запропоновані в [12], засновані на емпіричних залежностях та не враховують геометрію активних матеріалів, а також їх електромагнітні властивості. Альтернативною методикам, заснованих на узагальнених виразах та емпіричних залежностях може бути застосування методів розрахунку електричних параметрів та характеристик на основі польового моделювання. Застосування методів розрахунку на основі польового моделювання набуло поширення для широкого класу задач електротехніки [13–19]. Їх основним обмеженням є необхідність використання спеціалізованого програмного забезпечення, високі витрати обчислювальних ресурсів та часу на чисельну реалізацію.

В роботах [20–23] пропонується визначити електричні параметри електротехнічних систем перетворення змінного струму на основі реалізації

моделі електромагнітного поля в *time step* формулюванні. Такий підхід дозволяє враховувати нелінійність властивостей активних матеріалів, гармонійний склад струмів та напруги, але потребує значних витрат часу на чисельну реалізацію через необхідність збіжності розрахунку. У [22] було запропоновано модель електромагнітного поля у частотному формулюванні. Такий підхід вимагає значно менших витрат часу на чисельну реалізацію та дозволяє окремо врахувати вплив кожної гармонійної складової струму та напруги на параметри та характеристики шинопроводів. Однак, використання частотного формулювання розрахунку розподілу електромагнітного поля застосовується тільки для лінійних задач. Тролейні шинопроводи, як правило, мають сталевий кожух та інші елементи з феромагнітних матеріалів, що мають суттєву нелінійність магнітних властивостей. В [13–15] запропоновано використання ефективних значень магнітних властивостей феромагнітних матеріалів. Це дозволяє враховувати нелінійність властивостей матеріалів у частотних постановках розрахунку розподілу магнітного поля. Існуючі методи визначення ефективних значень магнітних властивостей матеріалів не завжди дозволяють забезпечити достовірність їх врахування, тому потрібне їх коригування з врахуванням відомих експериментальних та розрахункових даних. Таким чином, розробка високоефективної методики розрахунку параметрів шинопроводів та оцінки впливу гармонійного складу струмів та напруг на їх характеристики є актуальним науково-практичним завданням.

**Мета роботи.** Розробка методики визначення параметрів та характеристик тролейних шинопроводів на основі польового моделювання, що враховує конструктивні параметри, нелінійність магнітних властивостей, вплив гармонійних складових струмів та напруг, що володіє високою точністю та ефективністю чисельної реалізації.

**Основний матеріал досліджень.** Дослідження проводилися з прикладу тролейного шинопроводу з тролєями виготовлених з міді ШТМ-73 250А 660В. Розрахункова область наведено на рис. 1. Даний шинопровід набув широкого застосування та призначений для живлення мостових кранів, електричних талей, підвісних електричних однобалкових кранів та підлогових візків. Шинопровід має три мідні тролєї 1, вмонтовані в сталевий кожух 2 (рис. 1). Тролеї у кожусі закріплені на ізоляторах (кліцях) 3 (рис. 1).

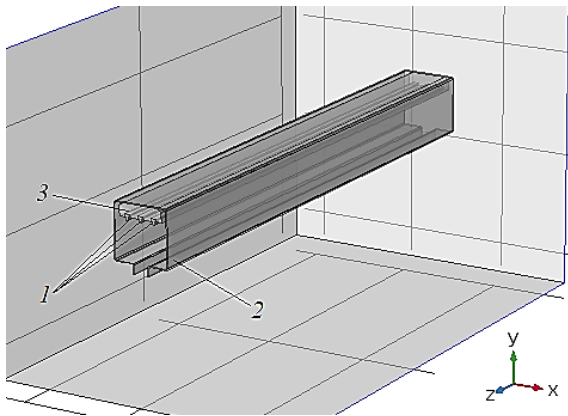


Рисунок 1 – Розрахункова область шинопроводу

При дослідженні електромагнітних процесів в шинопроводі були прийняті припущення, що магнітне поле, створене струмами, що протікають у трояках шинопроводу, локалізується у сталевому кожусі та не виходить за його межі. Це дозволило виключити з області моделювання елементи кріплення шинопроводу, що дозволить скоротити витрати тимчасових та обчислювальних ресурсів, а також підвищити стійкість обчислювального процесу через відсутність необхідності врахування елементів, геометричні розміри яких значно менші за основні елементи шинопроводу.

Для врахування впливу поверхневого ефекту та ефекту близькості на величину активного та реактивного опорів шинопроводу реалізовувалося завдання розрахунку розподілу щільності струму та питомих електричних втрат у поперечному перетині трояків та кожуха на основі сполучених просторових стаціонарних математичних моделей електромагнітного перетворення електричної енергії.

Система рівнянь Максвелла формулюється для комплексних амплітуд векторного магнітного та електричного потенціалів у геометричних електропровідних областях трояків і сталевому кожусі та навколишнього електроізоляційного середовища (повітря) [21–25]:

$$\begin{cases} -\nabla \left[ (j\omega\sigma_i - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\mathbf{A}_i + (\sigma_i + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\nabla V_i - \mathbf{J}_i^e \right] = 0 \\ (j\omega\sigma_i - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\mathbf{A}_i + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_{r,i}^{-1}\nabla \times \mathbf{A}_i) + (\sigma_i + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,i})\nabla V_i = \mathbf{J}_i^e \end{cases} \quad (1)$$

де  $\omega$  – кутова частота, рад/с;  
 $\sigma$  – електрична провідність, См/м;  
 $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  – електрична постійна, Ф/м;  
 $\varepsilon_r$  – діелектрична проникність;  
 $\mathbf{A}$  – векторний магнітний потенціал, Вб/м;  
 $V$  – комплексна амплітуда електричного потенціалу, В;  
 $\mathbf{J}^e$  – комплексна щільність струму, А/м<sup>2</sup>;  
 $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  – магнітна постійна, Гн/м;  
 $\mu_r$  – ефективна магнітна проникність;

індекс  $i = 0$  відповідає області електроізоляційного та навколишнього середовища, а індекси  $i = 1, 2$  – областям струмопровідних трояків та кожуха.

Значення ефективної магнітної проникності визначалося відповідно до [22] і корегувалося за даними реалізації електромагнітної моделі в time step формулюванні.

Оскільки довжина секції шинопроводу становить 3 м, а загальна довжина може перевищувати 1 км, авторами було зроблено припущення, що поле в поперечному перетині шинопроводу наближається до плоскопаралельного. Це дозволяє суттєво скоротити розмірність задачі та перейти від просторового формулювання до плоскопаралельного [6, 26, 27]:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i &= \mathbf{k} \cdot A_{z,i}; \mathbf{B}_i = \mathbf{i} \cdot B_{x,i} + \mathbf{j} \cdot B_{y,i}; \mathbf{H}_i = \\ &= \mathbf{i} \cdot H_{x,i} + \mathbf{j} \cdot H_{y,i}; V_i = \mathbf{k} \cdot V_{z,i} \end{aligned} \quad (2)$$

Система рівнянь (1) і (2) доповнюється умовами калібрування Кулона, умовами поєднання областей з різними електричними та магнітними властивостями та умовами електричної та магнітної ізоляції на зовнішніх межах та реалізується методом кінцевих елементів у структурі засобів програмного забезпечення COMSOL Multiphysics та FEMM. Температурний режим шинопроводу розраховувався відповідно до [18, 20].

За даними чисельного моделювання виконується оцінка енергії магнітного поля та питомої енергії магнітного поля у розрахунковій області [14, 15]

$$W|_i = \frac{1}{2} \iiint_{V_i} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz, w|_i = W|_i / V_i, \quad (3)$$

а також активних втрат та питомих активних втрат у трояках та кожусі

$$P|_i = \iiint_{V_i} \sigma_i^{-1} \mathbf{J} \cdot (\mathbf{J})^* dx dy dz, p|_i = P|_i / V_i. \quad (4)$$

З використанням співвідношень (3) і (4) визначаються активні, реактивні, повні електричні опори трояків та падіння напруги в них:

$$\begin{aligned} R|_i &= P|_i / S|_i; \\ W|_i &= \sum_k |I_k|^2 \cdot \frac{L_k}{2}; \\ X_k &= \omega L_k, Z|_i = \sqrt{R^2 + X^2}|_i; \\ \Delta U|_i &= \frac{Z}{I}|_i. \end{aligned} \quad (5)$$

Точність результатів чисельного моделювання оцінюється шляхом порівняння розрахункових значень електричних опорів шинопроводу з даними вимірювання заводу виробника. За активним опором похибка не перевищила 0,6 %.

Розрахунками електромагнітного поля підтверджено припущення авторів про локалізацію магнітного поля в межах сталевих кожухів та майже повну відсутність поля за границями зовнішніх меж кожухів (рис. 2). При силі струму в троліях 250 А та частоті 50 Гц, магнітне поле локалізується в зонах кожухів, що прилягають до його внутрішньої поверхні та поблизу крайніх тролієв шинопровода фази А та С (рис. 2).

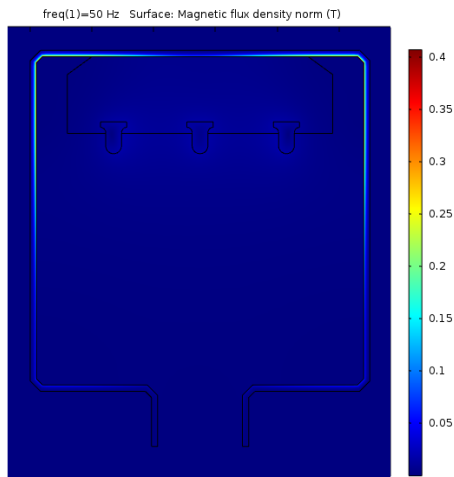


Рисунок 2 – Магнітне поле в розрахунковій області

Значення нормальної складової індукції у цих зонах досягають 0,41 Тл та знижуються до 0 на зовнішніх межах сталевих кожухів. Втрати активної потужності локалізуються в троліях. Питомі втрати становлять 4,5...5,2 Вт/м<sup>3</sup> (рис. 3). При цьому, на характер розподілу втрат значно впливають як поверхневі ефекти в троліях, так і ефекти близькості між троліями різних фаз (рис. 3). Величина втрат у сталевому кожусі при частоті 50 Гц становить близько 2 % від сумарних активних втрат у шинопроводі. При цьому, сталевий кожух істотно впливає на падіння напруги у фазах тролієв, кут фазового зсуву між фазами і коефіцієнт потужності.

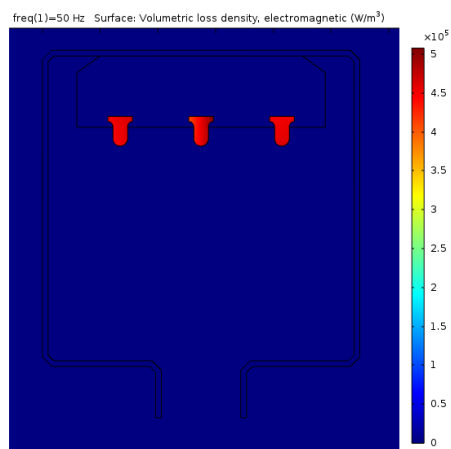


Рисунок 3 – Питомі втрати активної потужності

Для оцінки впливу гармонік струму та напруги були проведені розрахунки електромагнітного поля для допустимих значень гармонійних складових, для

мереж з найменшим коефіцієнтом відношення потужності короткого замикання до повної встановленої потужності обладнання  $R_{sc} = 33$  відповідно до стандарту [5]: 5-та гармоніка  $i_5 = 0,107 \cdot i_1$ ; 7-ма гармоніка  $i_7 = 0,072 \cdot i_1$ ; 11-та гармоніка  $i_{11} = 0,031 \cdot i_1$ ; 13-та гармоніка  $i_{13} = 0,02 \cdot i_1$ . Результати розрахунків наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Електричні параметри за наявності сталевих кожухів

Номер гармоніки	P, Вт/м	U (A/B/C)	
		Діюча, В/м	Фаза, град
1	78,397	0,145/0,153/0,179	27/137/-99
5	1,21	0,035/0,029/0,042	76/177/-69
7	0,58	0,032/0,026/0,037	83/-175/-65
11	0,12	0,021/0,016/0,023	88/-167/-61
13	0,056	0,018/0,016/0,023	90/-163/-59

По мірі збільшення частоти зона локалізації магнітного поля в сталевому кожусі значно звужується, що викликано зниженням глибини проникнення поля. Також змінюється характер локалізації питомих втрат у мідних троліях. При цьому проявляється більший вплив поверхневого ефекту та ефекту близькості.

За результатами розрахунку встановлено, що наявність феромагнітного кожухів призводить до зниження коефіцієнта потужності, збільшення асиметрії фаз і діючих значень напруги, а також зростання втрат активної потужності. Наявність гармонійних складових струму в діапазоні регламентованому стандартом, призводить до додаткового збільшення активних втрат до 3 %. При цьому, при відхиленні гармонійного складу від стандартизованих значень, спостерігається істотне збільшення втрат активної потужності.

**Висновки.** Запропоновано математичну модель електромагнітних процесів у мідному тролієвому шинопроводі, яка дозволяє враховувати конструктивні параметри, нелінійність магнітних властивостей, вплив гармонійних складових струмів та напруг. На основі її реалізації запропоновано методіку розрахунку електричних параметрів та характеристик тролієвих шинопроводів.

Встановлено вплив сталевих кожухів на електричні параметри та характеристики шинопроводу. Наявність сталевих кожухів призводить до зниження коефіцієнта потужності, збільшення падіння напруги і не симетрії між фазами тролієв шинопровода, а також зростання втрат на 2 %.

Виконано оцінку впливу гармонійних складових струмів на втрати активної потужності. Наявність гармонійних складових струмів у межах стандарту призводить до додаткового збільшення втрат на 3 %. Однак, при перевищенні стандартизованих значень, їх вплив на втрати активної потужності істотно зростають. Запропонована методіка має високу точність і ефективність чисельної реалізації і може бути реалізована за допомогою програмного забезпечення зі статусом вільної ліцензії (наприклад, FEMM).

## Список літератури

1. Zare F., Ledwich G. F. Reduced layer planar busbar for voltage source inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002. Vol. 17, no. 4. P. 508–516. doi: 10.1109/TPEL.2002.800990.
2. Коцур М. И., Коцур И. М., Близняков А. В. Повышение эффективности режима торможения противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Т. 1, № 8(73). С. 27–30. doi: 10.15587/1729-4061.2015.36670.
3. Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M., Bliznyakov O. V. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. No. 4. P. 49–54.
4. Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Bezverkhnia Y., Andrienko D. Speed synchronization methods of the energy-efficient electric drive system for induction motors. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2018. P. 304–307. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336208.
5. IEC 61000-3-12:2011+A1:2021. *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*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2021. 54 p.
6. Pellerey P., Lanfranchi V., Friedrich G. Coupled Numerical Simulation Between Electromagnetic and Structural Models. Influence of the Supply Harmonics for Synchronous Machine Vibrations. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. Vol. 48, no. 2. P. 983–986. doi: 10.1109/TMAG.2011.2175714.
7. Жемеров Г. Г., Ильина Н. А., Ильина О. В. Взаимосвязь между модулем мгновенной реактивной мощности и КПД системы электроснабжения. *Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Проблеми сучасної електротехніки»*. 2008. Ч. 4. С. 31–36.
8. Subbotin S., Oleynik A. The Feature Selection Method Based on the Evolutionary Approach With a Fixation of a Search Space. *2006 International Conference – Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science*. 2006. P. 574–575. doi: 10.1109/TCSET.2006.4404637.
9. Subbotin S., Oleynik A. Entropy Based Evolutionary Search for Feature Selection. *2007 9th International Conference – The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics*. 2007. P. 442–443. doi: 10.1109/CADSM.2007.4297612.
10. Oleynik A., Subbotin S., Oleynik A. Bee colony optimization for clustering. *2010 International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. 2010. P. 286–286.
11. Oleynik A., Subbotin S. Parametrical synthesis of neural network models based on the evolutionary optimization. *2009 10th International Conference – The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*. 2009. P. 335–338.
12. Федоров А. А. *Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: в 2 т. Т. 2. Электрооборудование*. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 592 с.
13. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T. An application of scheme and field models for simulation of electromagnetic processes of power transformers. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2018. P. 308–313. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336209.
14. Yarymbash D., Kotsur M., Subbotin S., Oleynik A. A new simulation approach of the electromagnetic fields in electrical machines. *2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. 2017. P. 429–434. doi: 10.1109/IDT.2017.8024332.
15. Kotsur M., Yarymbash D., Yarymbash S., Kotsur I. A new approach of the induction motor parameters determination in short-circuit mode by 3D electromagnetic field simulation. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017. P. 207–210. doi: 10.1109/YSF.2017.8126620.
16. Васецкий Ю. М., Дзюба К. К. Аналитический метод расчета квазистационарного трехмерного электромагнитного поля тока, протекающего по контуру произвольной конфигурации вблизи электропроводного тела. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 7–17. doi: 10.15407/techned2017.05.007.
17. Hwang C. C., Chang J. J., Jiang Y. H. Analysis of electromagnetic and thermal fields for a bus duct system. *Electric power systems research*. 1998. Vol. 45, no. 1. P. 39–45. doi: 10.1016/S0378-7796(97)01220-0.
18. Kotsur M., Kotsur I., Bezverkhnia Y., Andrienko D. Increasing of thermal reliability of a regulated induction motor in non-standard cycle time conditions. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 88–91. doi: 10.1109/MEES.2017.8248960.
19. Popa I. C., Dolan A., Ghindeanu D., Boltașu C. Thermal modeling and experimental validation of an encapsulated busbars system. *2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*. 2014. P. 1–4. doi: 10.1109/SIELA.2014.6871884.
20. Ярымбаш Д. С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока. *Научный вестник Национального горного университета*. 2015. Вып. 3. С. 95–102.
21. Yarymbash D. S., Oleinikov A. M. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads. *Russian Electrical Engineering*. 2015. Vol. 86, no. 2. P. 86–92. doi: 10.3103/S1068371215020121.
22. Yarymbash D., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T., Litvinov D. Features of defining three-phase transformer no-load parameters by 3D modeling methods. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 132–135. doi: 10.1109/MEES.2017.8248870.
23. Wu X. W., Shu N. Q., Li H. T., Li L. Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated bus bars with the finite-element method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. Vol. 50, no. 2. P. 277–280. doi: 10.1109/TMAG.2013.2282033.
24. Плюгин В. Е. Численное моделирование электромагнитного поля асинхронного двигателя с внешним массивным ротором. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2013. № 51 (1024). С. 66–75.
25. Wilow V. *Electromagnetical model of an induction motor in COMSOL Multiphysics. Master's thesis*. KTH University, Sweden. 2014. 41 p.
26. Зенкевич О., Морган К. *Конечные элементы и аппроксимация*. Москва: Мир, 1986. 318 с.
27. He G., Huang Z., Chen D. Two-Dimensional Field Analysis on Electromagnetic Vibration-and-Noise Sources in Permanent-Magnet Direct Current Commutator Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011. Vol. 47, no. 4. P. 787–794. doi: 10.1109/TMAG.2010.2103382.

## References (transliterated)

1. Zare F., Ledwich G. F. Reduced layer planar busbar for voltage source inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002, vol. 17, no. 4, pp. 508–516. doi: 10.1109/TPEL.2002.800990.
2. Kotsur M. I., Kotsur I. M., Bliznyakov A. V. Povyshenie effektivnosti rezhima tormozheniya protivovklyucheniem asinkhronnogo dvigatelya c faznym rotorom [Increase effectiveness of reversible braking mode realization of the wound-rotor induction motor]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015, Vol. 1, no. 8(73), pp. 27–30. doi: 10.15587/1729-4061.2015.36670.
3. Kotsur M. I., Andrienko P. D., Kotsur I. M., Bliznyakov O. V. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017, no. 4, pp. 49–54.
4. Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Bezverkhnia Y., Andrienko D. Speed synchronization methods of the energy-efficient electric drive system for induction motors. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2018, pp. 304–307. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336208.
5. IEC 61000-3-12:2011+A1:2021. *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*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2021. 54 p.

6. Pellerey P., Lanfranchi V., Friedrich G. Coupled Numerical Simulation Between Electromagnetic and Structural Models. Influence of the Supply Harmonics for Synchronous Machine Vibrations. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012, vol. 48, no. 2, pp. 983–986. doi: 10.1109/TMAG.2011.2175714.
7. Zhemerov G. G., Il'ina N. A., Il'ina O. V. Vzaimosvyaz' mezhdum modulem mgnovnoy reaktivnoy moshchnosti i KPD sistemy elektrosnabzheniya [Relationship between instantaneous reactive power module and power system efficiency]. *Tekhnichna Elektrodynamika, tem. vypusk, «Problemy suchasnoyi elektrotekhniki»*. 2008, no. 4, pp. 31–36.
8. Subbotin S., Oleynik A. The Feature Selection Method Based on the Evolutionary Approach With a Fixation of a Search Space. *2006 International Conference – Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science*. 2006, pp. 574–575. doi: 10.1109/TCSET.2006.4404637.
9. Subbotin S., Oleynik A. Entropy Based Evolutionary Search for Feature Selection. *2007 9th International Conference – The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics*. 2007, pp. 442–443. doi: 10.1109/CADSM.2007.4297612.
10. Oleynik A., Subbotin S., Oleynik A. Bee colony optimization for clustering. *2010 International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. 2010, pp. 286–286.
11. Oleynik A., Subbotin S. Parametrical synthesis of neural network models based on the evolutionary optimization. *2009 10th International Conference – The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*. 2009, pp. 335–338.
12. Fedorov A. A. *Spravochnik po elektrosnabzheniyu i elektrooborudovaniyu: v 2 t. T. 2. Elektrooborudovanie* [Handbook on electrical supply and electrical equipment: in 2 vols. Vol. 2. Electrical equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 592 p.
13. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T. An application of scheme and field models for simulation of electromagnetic processes of power transformers. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2018, pp. 308–313. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336209.
14. Yarymbash D., Kotsur M., Subbotin S., Oleynik A. A new simulation approach of the electromagnetic fields in electrical machines. *2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. 2017, pp. 429–434. doi: 10.1109/IDT.2017.8024332.
15. Kotsur M., Yarymbash D., Yarymbash S., Kotsur I. A new approach of the induction motor parameters determination in short-circuit mode by 3D electromagnetic field simulation. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 2017, pp. 207–210. doi: 10.1109/YSF.2017.8126620.
16. Vasetskiy Yu. M., Dzyuba K. K. Analiticheskiy metod rascheta kvazistatsionarnogo trekhmernogo elektromagnitnogo polya toka, protekayushchego po konturu proizvol'noy konfiguratsii vblizi elektroprovodnogo tela [An analytical calculation method of quasi-stationary three-dimensional electromagnetic field created by the arbitrary current contour that located near conducting body]. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017, no. 5, pp. 7–17. doi: 10.15407/techned2017.05.007.
17. Hwang C. C., Chang J. J., Jiang Y. H. Analysis of electromagnetic and thermal fields for a bus duct system. *Electric power systems research*. 1998, vol. 45, no. 1, pp. 39–45. doi: 10.1016/S0378-7796(97)01220-0.
18. Kotsur M., Kotsur I., Bezverkhnia Y., Andrienko D. Increasing of thermal reliability of a regulated induction motor in non-standard cycle time conditions. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017, pp. 88–91. doi: 10.1109/MEES.2017.8248960.
19. Popa I. C., Dolan A., Ghindeanu D., Boltașu C. Thermal modeling and experimental validation of an encapsulated busbars system. *2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*. 2014, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIELA.2014.6871884.
20. Yarymbash D. S. Issledovanie elektromagnitnykh i termoelektricheskikh protsessov v pechakh grafitatsii peremennogo i postoyannogo toka [The research of electromagnetic and thermoelectric processes in the ac and dc graphitization furnaces]. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015, no. 3, pp. 95–102.
21. Yarymbash D. S., Oleinikov A. M. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads. *Russian Electrical Engineering*. 2015, vol. 86, no. 2, pp. 86–92. doi: 10.3103/S1068371215020121.
22. Yarymbash D., Yarymbash S., Kylymnyk I., Divchuk T., Litvinov D. Features of defining three-phase transformer no-load parameters by 3D modeling methods. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017, pp. 132–135. doi: 10.1109/MEES.2017.8248870.
23. Wu X. W., Shu N. Q., Li H. T., Li L. Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated bus bars with the finite-element method. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014, vol. 50, no. 2, pp. 277–280. doi: 10.1109/TMAG.2013.2282033.
24. Plyugin V. E. Chislennoe modelirovanie elektromagnitnogo polya asinkhronnogo dvigatelya s vneshnim massivnym rotorom [Numerical modelling of the electromagnetic field of an asynchronous motor with external solid rotor]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Problems of the Improvement of Electrical Machines and Apparatuses*. 2013, no. 51 (1024), pp. 66–75.
25. Wilow V. *Electromagnetical model of an induction motor in COMSOL Multiphysics. Master's thesis*. KTH University, Sweden. 2014. 41 p.
26. Zenkevich O., Morgan K. Konechnye elementy i approksimatsiya [Finite elements and approximation]. Moscow, Mir Publ., 1986. 318 p.
27. He G., Huang Z., Chen D. Two-Dimensional Field Analysis on Electromagnetic Vibration-and-Noise Sources in Permanent-Magnet Direct Current Commutator Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011, vol. 47, no. 4, pp. 787–794. doi: 10.1109/TMAG.2010.2103382.

Надійшла (received) 30.11.2021

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Безверхня Юлія Сергіївна (Безверхняя Юлия Сергеевна, Yuliia Sergiivna Bezverkhnia)** – асистент кафедри електричних машин, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8779-2615>; e-mail: [juliakafedraem@gmail.com](mailto:juliakafedraem@gmail.com).

**Коцур Михайло Ігорович (Коцур Михаил Игоревич, Mykhailo Igorovych Kotsur)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0072-5437>; e-mail: [kotsur\\_m@ukr.net](mailto:kotsur_m@ukr.net).

**Яримбаш Дмитро Сергійович (Яримбаш Дмитрий Сергеевич, Dmytro Serhiiovych Yarymbash)** – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Запорізька політехніка», завідувач кафедрою електричних машин, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2324-9303>; e-mail: [yarymbash@gmail.com](mailto:yarymbash@gmail.com).

**Коцур Ігор Михайлович (Коцур Игорь Михайлович, Igor Mykhailovych Kotsur)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних машин, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6394-7849>; e-mail: [igor.m.kotsur@gmail.com](mailto:igor.m.kotsur@gmail.com).