

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

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТРОЛЕЙНИХ ШИНОПРОВІДІВ РІЗНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ЗА УМОВИ НАЯВНОСТІ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ

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. Найвні в інженерній практиці методики розрахунку параметрів та характеристик шинопроводів ґрунтуються на методах схемного моделювання. Параметри схем зазвичай визначаються основі узагальнених рівнянь. Ці рівняння отримані внаслідок низки припущень, що обмежує область їх використання. Альтернативною методикам, заснованим на емпіричних залежностях, може бути застосування методів розрахунку електричних параметрів і характеристик на основі польового моделювання. Таким чином у роботі запропонована математична двовимірний польова модель електромагнітних процесів у частотній постановці задачі, яка дозволяє з високою точністю та ефективністю чисельної реалізації проводити декомпозицію електромагнітних процесів в активних елементах тролейного шинопровода і для кожної відповідної амплітуди і частоти k -ї гармоніки струму визначати електромагнітні параметри тролейного шинопровода з урахуванням їх конструктивних особливостей, нелінійності магнітних та електрофізичних властивостей матеріалів, скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та зовнішніх поверхневих ефектів. Виконано загальний аналіз активного та індуктивного опорів фазних тролей шинопровода залежно від їх форми, матеріалу та спектру гармонік струму. Наведено рівень несиметрії параметрів шинопроводів, що викликане ефектами близькості, поверхневими ефектами, скін-ефектами та іншими крайовими ефектами. Встановлено, що при наявності вищих гармонік струму, параметри (активний і реактивний опори) тролей шинопровода не залежать від амплітуди k -х гармонік струму, а залежать лише від їх частоти. Рівень несиметрії падіння напруги для всіх форм фазних тролей шинопровода викликане несиметрією їх параметрів. Серед досліджених L-, W-, I-, U- та X-подібних форм тролей шинопровода встановлено, що найбільш оптимальною формою сталевих і мідних тролей шинопровода є куткова форма тролей (L-подібна форма), при якій забезпечується найменше прирощення активного та реактивного опорів тролей шинопровода, викликаного дією вищих гармонік струму, а також найменший рівень їх несиметрії між фазами тролей шинопровода.

Ключові слова: гармоніки, тролей шинопровода, польове моделювання, струм, активний опір, реактивний опір.

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF TROLLEY BUSBAR PARAMETERS OF DIFFERENT GEOMETRIC SHAPES UNDER THE CONDITION OF HIGHER CURRENT HARMONICS

Modern workshop power supply systems can have a significant length. Therefore, their parameters and electrical characteristics have a significant impact on power quality, operation modes of electrical consumers and energy efficiency of technological processes. Available in engineering practice methods of calculation of parameters and characteristics of bus ducts are based on methods of circuit modeling. Circuit parameters are usually determined on the basis of generalized equations. These equations are derived from a number of assumptions, which limits the scope of their use. Alternative methods, based on empirical dependencies, can be used to calculate the electrical parameters and characteristics based on field modeling. Thus, the paper proposes a mathematical two-dimensional field model of electromagnetic processes in the frequency statement of the problem, allowing with high accuracy and efficiency of numerical implementation to decompose electromagnetic processes in the active elements of the trolley busduct and for each relevant amplitude and frequency of the k -th harmonic current to determine the electromagnetic parameters. busduct with regard to their design features, nonlinearity of magnetic and electrical properties of materials, the skin effect, the blitz effect. A general analysis of active and inductive resistances of busduct phase trolleys depending on their shape, material and current harmonic spectrum is performed. The level of asymmetry of busbar parameters caused by proximity effects, surface effects, skin effects and other edge effects is given. It is found that in the presence of higher current harmonics, the parameters (active and reactive supports) of busbar trolley do not depend on the amplitude of k current harmonics, but depend only on their frequency. The level of voltage drop asymmetry for all forms of phase trolley busducts is caused by the asymmetry of their parameters. Among investigated L, W, I, U, X-forms of bus duct trolleys it was found that the most optimal form of steel and copper bus duct trolleys is the angular form of trolleys (L-form), which provides the least increment of active and reactive resistance of bus duct trolley, current harmonics, as well as the minimum level of their asymmetry between phases of bus duct trolleys.

Keywords: harmonics, busbar trolleys, field simulation, current, resistance, reactance.

Вступ. Підприємства гірничо-металургійного комплексу при виробництві власної продукції використовують енергоємні технологічні операції [1–4]. Для виконання енергоємних технологічних операцій в основному використовуються сучасний електропривод (для верстати, прокатних станів, підйомно-транспортні механізми тощо) [5–7]. У сукупності ці системи вимагають великих енергетичних витрат. Внаслідок масштабної модернізації виробничих потужностей із застосуванням сучасних систем електроприводу системи електропостачання цехів не можуть задовольнити актуальні вимоги надійності, енергоефективності та якості електроенергії, що

відпускається кінцевим споживачам [8]. Це пов'язано з невідповідністю їх параметрів, електромагнітних характеристик, порушенням енергетичного балансу цеху та загальнопромислової електромережі, а також зміною режимів їх роботи [9, 10]. Перехід на сучасні системи електропривода, що містять напівпровідникові перетворювачі, дозволило підвищити коефіцієнт корисної дії, зменшити споживання енергії та розширити діапазон керування споживачами електроенергії [11]. Однак, широке використання напівпровідникових перетворювачів призводить до значного збільшення генерації гармонічних складових струму та напруги [12, 13]. Наслідком цього є зниження коефіцієнта потужності

© М. І. Коцур, Ю. С. Безверхня, Д. С. Яримбаш, І. М. Коцур, 2022

мережі цехів [14–16]. Допустимий гармонічний склад струмів і напруг регламентується згідно до стандарту [12]. Надмірно високі гармонійні спотворення струму, особливо для систем електропостачання цехів, що мають середню та велику протяжність, призводять до значного підвищення та несиметрії активного та реактивного опорів тролей шинопровода, падіння напруги та активних втрат. Це може призвести до зниження їх строків експлуатації та надійності роботи споживачів електроенергії [17–19].

Аналіз досліджень та публікацій. Для забезпечення надійної роботи струмопровідних систем залежно від характеру навантаження та коефіцієнта потужності мережі необхідно точно визначити параметри шин (активний і реактивний опір) [20]. На сьогоднішній день існують емпіричні методи оцінки параметрів тролей шинопровода, які базуються на використанні схемо-технічних методів моделювання [21, 22]. Ці методи мають велику кількість припущень і обмежень внаслідок чого похибка при визначенні параметрів шин може досягати 30–50 % [23, 24]. Ці припущення включають: не враховується вплив гармонійного складу струму та напруги, ефект близькості, ефекту зміщення струму, поверхневих ефектів та електрофізичних властивостей матеріалів [25]. У роботах [26–28] запропоновано метод оцінки падіння напруги від коефіцієнта потужності мережі та режимів роботи споживачів електроенергії. даний метод також базується на емпіричних залежностях [20] і не враховує геометричні особливості конфігурації тролей шинопровода, електрофізичні властивості матеріалів та вплив гармонійного складу струму різних фаз. У цьому випадку параметри шин визначають за довідковими матеріалами [29].

Ці методи можна використовувати для попередньої оцінки падіння напруги в тролей. Аналітичний метод розрахунку імпедансу тролей прямокутного профілю представлений у [30]. Метод заснований на теорії часткової індуктивності [28–31]. Описано визначення імпедансу тролей прямокутного профілю у трифазній системі з нульовим провідником. Отримано результати розрахунку параметрів цих систем з кількох прямокутних провідників [32]. Використання польових методів розрахунку набуло широкого поширення для вирішення складних і об'ємних задач в електротехніці [33, 34]. У роботах [27, 35] запропоновано підхід до визначення параметрів електричних комплексів і систем, заснований на реалізації моделі розподілу електромагнітного поля у часовій постановці задачі. Такий підхід до вирішення складних і об'ємних задач за допомогою польового моделювання, забезпечує врахування впливу нелінійності електрофізичних властивостей матеріалів, гармонійних спотворень струму та напруги. У роботі [36] запропонована польова електромагнітна модель у частотній постановці задачі. Такий підхід забезпечує скорочення часу на обчислення, а також дозволяє виконати декомпозицію для визначення електромагнітних

параметрів, активного та індуктивного опорів тролей шинопровода для кожної окремої гармоніки струму. У [37, 38] розглянуто процеси взаємного впливу електромагнітних полів між фазами шинопровода, та визначення активного та індуктивного опорів I- та U-подібних форм тролей шинопроводів (рис. 1). Порівнюється вплив вищих гармонік струму, геометричних параметрів, електрофізичних властивостей матеріалів, скін-ефекту, ефекту близькості та інших крайових ефектів. Але в роботах відсутній порівняльний аналіз електромагнітних та конструкційних параметрів шинопровода у трифазних системах електроживлення цехів. Це дозволить для існуючих форм магістральних та тролейних шинопроводів визначити вплив електромагнітних параметрів шинопровода з врахуванням вищих гармонік струму на їх параметри. Також визначити оптимальну конфігурацію шинопровода при проектуванні та модернізації існуючих систем цехового електропостачання.

Мета роботи. Проведення порівняльного аналізу параметрів трифазних струмопровідних систем енергопостачання цеху підприємства з врахуванням вищих гармонік струму, електрофізичних властивостей матеріалів, скін-ефекту, ефекту близькості та інших крайових ефектів для шинопроводів різними геометричними формами тролей, що дозволить визначити оптимальну конфігурацію шинопровода при проектуванні та модернізації існуючих систем цехового енергопостачання.

Основний матеріал досліджень. На рис. 1 показані форми шинопроводів для тролейних систем живлення мостових кранів, які виготовляються вітчизняними та зарубіжними заводами-виробниками.

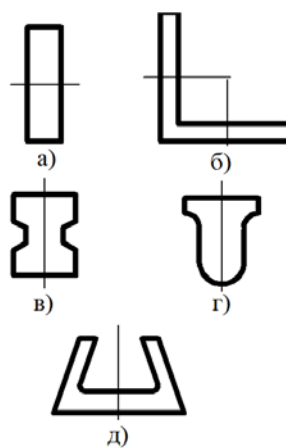


Рисунок 1 – Форми тролейних шинопроводів:
а) I-подібна форма; б) L-подібна форма; в) X-подібна форма;
г) U-подібна форма; д) W-подібна форма

На великих металургійних підприємствах України для тролейних ліній переважно використовуються шинопроводи L-подібні форми (куткової форми), для магістральних ліній – шинопроводи I-подібні форми (прямокутної форми). Результати розподілу вектору магнітного потенціалу

для тролей шинного проводу L-подібної форми наведено на рис. 2.

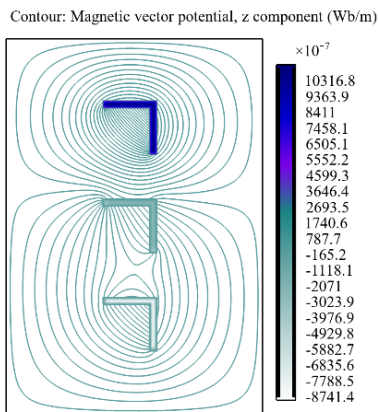


Рисунок 2 – Результати розподілу вектору магнітного потенціалу при $f = 50$ Гц для сталевих тролей шинного проводу куткової форми (L-подібна форма)

Дана модель реалізована за аналогією [28–30]. При цьому значення ефективної магнітної проникності для сталевих шинних візків було визначено за [39]. Для визначення індуктивного і реактивного опорів тролей шинного проводу для кожної k -ї гармоніки струму була виконана умова суперпозиції електромагнітного поля [30]. Кількість і амплітуди гармоніки струму підбирають згідно з [12]. Для кожного конструктивного елемента геометричної моделі шинної системи формується комплексне рівняння Максвелла для амплітуд електричного та векторного магнітного потенціалів згідно з [39, 40] наступним чином:

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

де V – електричний потенціал у комплексному значенні, В;

ω – кутова частота, рад/с;

\mathbf{A} – векторний магнітний потенціал, Вт/м;

μ_0 – магнітна константа, Г/м;

\mathbf{J}^e – комплексна густина струму, А/м²;

μ_r – ефективна магнітна проникність;

i – індекс для розрахункових площ активної частини шини;

ε_0 – електрична постійна, Ф/м;

ε_r – діелектрична проникність;

σ – електропровідність, С/м.

Розрахунки виконувались для всіх форм тролейних шинного проводу (рис. 1) при: однаковому перетині $S = 60$ мм²; однаковому номінальному значенні модуля вектора струму навантаження $I_A = 106$ А; $I_B = -53 + j91,8$ А; $I_C = -53 - j91,8$ А та однаковій відстані між фазними троллями шинного проводу $l = 28$ мм.

Визначення індуктивного та реактивного опорів тролей шинного проводу кожної фази проводили згідно з [30, 31] наступним чином:

$$\begin{cases} R_i = P_i / S_i; \quad L_i = \frac{2 \cdot W_i}{|I_i|^2} \\ X_i = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot f \cdot L_i; \quad Z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_i = \iint_{S_i} \sigma_i^{-1} \mathbf{J} \cdot (\mathbf{J})^* dx dy; \quad p_i = \frac{P_i}{S_i}; \\ W_i = \frac{1}{2} \iint_{S_i} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy; \quad w_i = \frac{W_i}{S_i}; \end{cases} \quad (3)$$

де W – енергія магнітного поля;

S – повні втрати в троллях;

P – це активні втрати в троллях.

На рис. 3 наведені результати моделювання у вигляді залежності активного опору сталевих тролей шинного проводу L-, W-, X-, I- та U-подібних форм на 1 м їх довжини від амплітуди 5-ї гармоніки струму фази А. При дії 5-ї гармоніки струму активний опір для тролей L-подібної форми дорівнює $R_A^L \Big|_{k=5} = 0,0055$ Ом/м, що у 2,54 рази більше активного опору при основній гармоніці струму (при $R_A^L \Big|_{k=1}$); W-подібної форми – $R_A^W \Big|_{k=5} = 0,006$ Ом/м (відповідно у 2,44 рази більше); для X-подібної форми – $R_A^X \Big|_{k=5} = 0,0095$ Ом/м (відповідно у 2,69 рази більше), а також I- та U-подібної форм – $R_A^I \Big|_{k=5} \approx R_A^U \Big|_{k=5} = 0,0105$ Ом/м (відповідно у 2,73 рази більше). Причому, значення активного опору тролей шинного проводу, не залежно від їх форми і амплітуди гармонік струму, залишається незмінним.

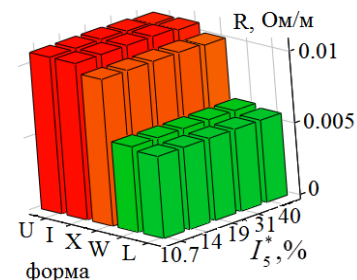


Рисунок 3 – Залежності активного опору від амплітуди 5-ї гармоніки струму при різних формах сталевих тролей шинного проводу

Для порядкових номерів гармонік струму $k = 7, 9, 11, 13$ значення активного опору не залежно від форм тролей шинного проводу збільшуються від 3,27 до 4,85 разів відносно значення активного опору при основній гармоніці струму (рис. 4). Також для всіх форм сталевих тролей шинного проводу виконується

симетрія активного опору між фазами А і В, фазами А і С, а також фазами В і С.

Для мідних тролей шинопровода, що мають лінійні магнітні характеристики, значення активного опору на основній гармоніці струму, та значення активного опору для відповідних вищих гармонік струму незалежно від форми тролей шинопровода, через наявності впливу ефектів взаємодукції та інших крайових ефектів, має місце несиметрія між фазами А, В, С. Найбільше відхилення активного опору при основній гармоніці струму фаз В та С відносно фази А має місце для L-подібної форми тролей, найменше – для I-подібної.

При наявності вищих гармонік струму, залежності від форми тролей шинопровода, відносно фази В несиметрія активного опору фаз А та С не перевищує: для 5-ї гармоніки – 33,3–42 %; для 7-ї

гармоніки – 33,4–55 %; для 11-ї гармоніки – 43,7–280 % і для 13-ї гармоніки – 48,2–452% (рис. 5).

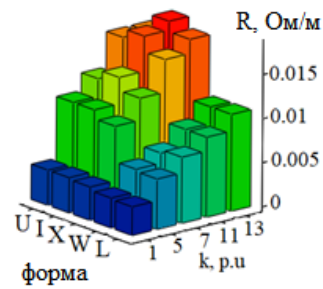


Рисунок 4 – Залежності активного опору від k -ї гармоніки струму для різних форм тролей шинопровода

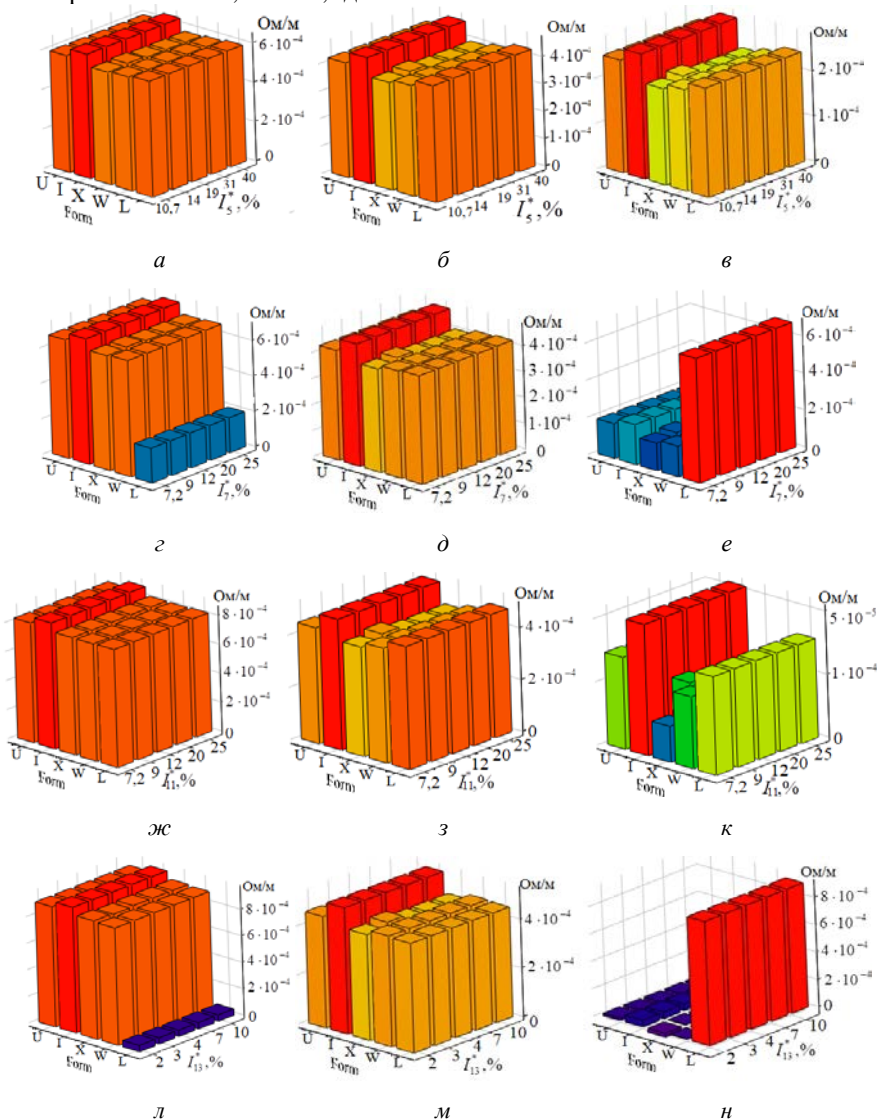


Рисунок 5 – Залежності активного опору від амплітуди k -ї гармоніки струму фаз А, В, С для різних форм мідних тролей шинопровода:

- a) для 5-ї гармоніки струму фази А; б) для 5-ї гармоніки струму фази В; в) для 5-ї гармоніки струму фази С;
- г) для 7-ї гармоніки струму фази А; д) для 7-ї гармоніки струму фази В; е) для 7-ї гармоніки струму фази С;
- ж) для 11-ї гармоніки струму фази А; з) для 11-ї гармоніки струму фази В; к) для 11-ї гармоніки струму фази С;
- л) для 13-ї гармоніки струму фази А; м) для 13-ї гармоніки струму фази В; н) для 13-ї гармоніки струму фази С

Як і для сталевих тролей шинопровода, величини активного опору не залежать від амплітуди вищих гармонік струму. Для 7-ї і 11-ї гармонік струму (рис. 5) найбільш яскраво виражені підмагнічуючі й розмагнічуючі ефекти фаз А та С відносно фази В, що виражено їх суттєвою несиметрією значень активного опору фаз А, С. Підмагнічуючі і розмагнічуючі ефекти відповідних фаз найменше виражені для тролей шинопровода L-подібної форми.

Таким чином, як для сталевих, так і мідних тролей шинопровода, незалежно від їх геометричної форми, величина активного опору буде постійною, незалежно від значення коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої струму (THD_i), і буде залежати від перетину та відстані між троллями шинопровода, а також величини їх питомого активного опору. При наявності гармонійних складових струму активний опір тролей шинопровода залежить як від їх геометричної форми, так і від частоти кожної гармоніки струму. При цьому, амплітуда складових гармонік струму не впливає на активний опір тролей. Найбільш оптимальною формою тролей шинопровода, при якій забезпечується найменше значення активного опору від дії вищих гармонік струму, а також найменший рівень несиметрії активного опору між їх фазами, є тролі L-подібної форми, виготовлені із сталевих або мідних куткових профілів.

За допомогою даних польового моделювання отримані розрахункові значення повного реактивного опору для сталевих і мідних тролей L-, W-, X-, I- та U-подібної форми на 1 м їх довжини при основній та вищих гармонік струму фази А (рис. 6).

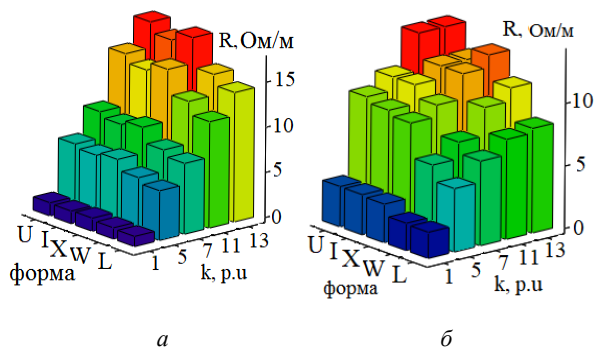


Рисунок 6 – Повний індуктивний опір різних форм мідних (а) та сталевих (б) тролей шинопровода для кожної k -ї гармоніки струму

Для тролей всіх розглянутих геометричних форм виконується симетрія повного реактивного опору між фазами А, В і С. Повні індуктивні опори як для сталевих, так і для мідних тролей при основній гармоніці струму для L-, W-, X-, I- та U-подібної форми мають практично однакові значення. При наявності вищих гармонік струму, величина повного індуктивного опору для сталевих тролей зростає в 2,77–4,41 рази залежно від їх форми. Для мідних тролей – від 4,89 до 12,9 разів. При цьому, найменші абсолютні значення повного індуктивного опору при відповідних k -х гармоніках струму матимуть місце

як для сталевих, так і для мідних тролей L-подібної форми, а найбільші значення – для тролей U-подібної форми.

Для сталевих тролей при $\text{THD}_i > 0$ значення повного реактивного опору відносно власних значень при основній гармоніці струму зростають у 14,8–16,2 рази залежно від їх форми. Найменше значення повного реактивного опору має місце для тролей L-подібної форми, найбільше – для тролей U-подібної форми. Для мідних тролей повний реактивний опір при дії вищих гармонік струму зростає в 36–36,6 разів відносно власного значення при основній гармоніці струму, в залежності від форми тролей. Несиметрія повних реактивних опорів фаз В і С відносно фази А для всіх форм мідних тролей практично ідентична, тобто для фази В відносно фази А у межах $-13,67\div-17,8\%$, для фази С відносно фази А – $0,24\div3,1\%$. Для всіх форм сталевих тролей повні реактивні опори симетричні.

Таким чином, в результаті порівняльного аналізу активного і повного реактивного опорів для різних геометричних форм тролей шинопровода (L-, W-, X-, I- та U-подібні форми), при впливі вищих гармонік струму було встановлено, що значення активного і повного реактивного опорів не залежить від величини амплітуди вищих гармонік, а залежать від їх частоти. Найбільш оптимальною формою сталевих і мідних тролей шинопровода є L-подібна форма (куткова форма профілю), при якій, серед розглянутих форм, забезпечується найменше абсолютне значення активного і повного реактивного опорів тролей, а також найменший рівень несиметрії параметрів шинопровода, що викликані ефектами близькості, крайовими ефектами, а також скін-ефектом.

Висновки. На підставі польового моделювання електромагнітних процесів L-, W-, X-, I- та U-подібних форм фазних тролейних шинопроводів виконано порівняльний аналіз їх повних активних та індуктивних опорів залежно від коефіцієнта THD_i та матеріалу, з яких вони виготовлені. Показаний рівень несиметрії фазних повних активних та індуктивних опорів розглянутих шинопроводів, викликаний ефектами близькості, поверхневими ефектами, скін-ефектами та іншими крайовими ефектами.

Встановлено, що величини складових активного та реактивного опорів не залежать від величини амплітуди вищих гармонік, а залежать від їх частоти.

Найбільш оптимальною формою для сталевих та мідних тролей шинопровода є L-подібна форма (куткова форма шинопровода), при якій серед розглянутих форм, забезпечується найменше збільшення абсолютного значення як складових, так і результуючого активного і реактивного опорів шинопровода, викликаного дією вищих гармонік, а також найменший рівень несиметрії між фазами шинопроводів.

Список літератури

1. Fedorchuk S., Ivakhnov A., Bulhakov O., Danylchenko D. Optimization of storage systems according to the criterion of

- minimizing the cost of electricity for balancing renewable energy sources. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 5–10 October 2020. P. 519–525. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250155>.
2. Shevchenko S., Danylchenko D. Defeat of overhead lines transmission networks with protected wires from lightning strike. *2015 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)*, Dnipropetrovsk, Ukraine, 29 September – 2 October 2015. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ysf.2015.7333228>.
 3. Rubanenko O., Yanovych V., Miroshnyk O., Danylchenko D. Hydroelectric Power Generation for Compensation Instability of Non-guaranteed Power Plants. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. P. 52–56. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263151>.
 4. Shevchenko S., Danylchenko D. Development of the method for determining the number of direct lightning strikes in overhead lines with protected wires. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 29 May – 2 June 2017. P. 479–482. DOI: <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100293>.
 5. Shevchenko S., Danylchenko D. Experimental studies of current voltage characteristics of the arrester leakage currents in the area. *2015 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)*, Dnipropetrovsk, Ukraine, 29 September – 2 October 2015. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ysf.2015.7333227>.
 6. 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: <https://doi.org/10.1109/tpel.2002.800990>.
 7. Popa I. C., Dolan A. L., Ghindeanu D., Boltasu C. Thermal modeling and experimental validation of an encapsulated busbars system. *2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, Bourgas, Bulgaria, 29–31 May 2014. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/siela.2014.6871884>.
 8. Shkarupylo V., Skrupsky S., Oliinyk A., Kolpakova T. Development of stratified approach to software defined networks simulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5, no. 9 (89). P. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110142>.
 9. Bezverkhnia Y. S. A voltage loss preliminary estimation in ac busbars. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. No. 4. P. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/13>.
 10. Nazarova O. Computer modeling of multi-mass electromechanical systems. *Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, Zaporizhzhia, Ukraine, 27 April – 1 May 2020. P. 474–488.
 11. Osadchyy V., Nazarova O. Laboratory Stand for Investigation of Liquid Level Microprocessor Control Systems. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenichuk, Ukraine, 21–25 September 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240868>.
 12. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. Effective from 2014-06-11. Official edition. 2014. 29 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>.
 13. Yarymbash D., Kotsur M., Bezverkhnia Yu., Yarymbash S., Kotsur I. Parameters Determination of the Trolley Busbars by Electromagnetic Field Simulation. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 10–14 September 2018. P. 76–79. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559576>.
 14. Puzyr R., Kukhar V., Maslov A., Shchipkovsky Y. The Development of the Method for the Calculation of the Shaping Force in the Production of Vehicle Wheel Rims. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, no. 4.3. P. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.20128>.
 15. Stockreiter C., Matzenauer G., Biro O. et al. Transfinite Element Method Using the A, ψ -Potential Formulation With Edge Elements in the Frequency Domain. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007. Vol. 43, no. 4. P. 1349–1352. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmag.2006.891008>.
 16. Koepl H., Paoli G. Non-linear modeling of a broadband SLIC for ADSL-Lite-over-POTS using harmonic analysis. *2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Phoenix-Scottsdale, AZ, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/iscas.2002.1010942>.
 17. Wang Q., Liao J., Su Y. et al. An optimal reactive power control method for distribution network with soft normally-open points and controlled air-conditioning loads. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018. Vol. 103. P. 421–430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.06.027>.
 18. Pourshafie A., Saniei M., Mortazavi S. S., Saedian A. Optimal Compensation of Reactive Power in the Restructured Distribution Network. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2009. Vol. 3, no. 6. P. 1268–1271. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1078468>.
 19. Canova A., Giaccone L. Numerical and Analytical Modeling of Busbar Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009. Vol. 24, no. 3. P. 1568–1578. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2009.2014270>.
 20. Федоров А. А. Справочник энергетика промышленных предприятий. Том 1. Электроснабжение. Москва : Госэнергоиздат, 1987. 840 с.
 21. Alsayaydeh J. A., Shkarupylo V., Hamid M. S., Skrupsky S., Oliinyk A. Stratified Model of the Internet of Things Infrastructure. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2018. Vol. 13, no. 20. P. 8634–8638. DOI: <https://doi.org/10.3923/jeasci.2018.8634.8638>.
 22. Kolpakova T., Oliinyk A., Lovkin V. Improved method of group decision making in expert systems based on competitive agents selection. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 29 May – 2 June 2017. P. 939–943. DOI: <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100388>.
 23. Artiukh V., Kukhar V., Balalayeva E. Refinement issue of displaced volume at upsetting of cylindrical workpiece by radial dies. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. P. 01036. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401036>.
 24. Park S. W., Cho H. A practical study on electrical contact resistance and temperature rise at the connections of the copper busbars in switchgears. *2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, New Orleans, LA, USA, 12–15 October 2014. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/holm.2014.7031066>.
 25. Kusiak D. The magnetic field and impedances in three-phase rectangular busbars with a finite length. *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 8. P. 1419. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12081419>.
 26. Yarymbash D., Yarymbash S., Divchuk T. et al. Calculation of No-load Currents Using Hysteresis Loop. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenichuk, Ukraine, 23–25 September 2019. P. 122–125. DOI: <https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896366>.
 27. Roskopf A., Bar E., Joffe C. Influence of Inner Skin- and Proximity Effects on Conduction in Litz Wires. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. Vol. 29, no. 10. P. 5454–5461. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2013.2293847>.
 28. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Divchuk T. Electromagnetic Parameters Determination of Power Transformers. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 10–14 September 2018. P. 70–75. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559573>.
 29. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Kylymnyk I. An Error Estimation Of The Current Sensors Of The Automated Control System Of The Technological Process Of Graphititation. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 10–14 September 2018. P. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559489>.
 30. Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Yarymbash S. Determination of Stray-Load Losses from Field Current Ripple of a Synchronous Machine by Field Simulation Methods. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenichuk, Ukraine, 21–25 September 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240812>.
 31. Kotsur M., Bezverkhnia Yu., Yarymbash D., Kotsur I. Determination of a Busbar's Parameters by Electromagnetic Field Simulation. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenichuk, Ukraine, 21–25 September 2020. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240811>.

32. Nazarova O., Osadchyy V., Brylysty V. Research on the Influence of the Position of the Electric Vehicles Mass Center on Their Characteristics. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 21–25 September 2020. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240824>.
33. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval A. A. Classification of steels according to their sensitivity to fracture using a synergetic model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119, no. 7-8. P. 5277–5287. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08653-y>.
34. Kurpe O. H., Kukhar V. V., Klimov E. S. Finite-Element Simulation of Steckel Mill Rolling. *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 887. P. 564–574. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.887.564>.
35. Zidarič B., Miljavec D. A new ferromagnetic hysteresis model for soft magnetic composite materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2011. Vol. 323, no. 1. P. 67–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.08.031>.
36. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Klymnyk I. An Accuracy Enhancement of Parameters Calculation Of The Jiles-Atherton Model. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 21–25 September 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240843>.
37. Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Yarymbash S. An Inductance Determination of a Synchronous Machine with Combined Armature Winding by Field Simulation Methods. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 25–29 February 2020. P. 117–122. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcset49122.2020.235405>.
38. Kotsur M., Yarymbash D., Bezverkhnia Yu., Kotsur I., Accuracy Improvement for the Determination of Parameters and Voltage Drops in Busbars, Considering the Networks Power Factor. *Problems of the Regional Energetics*. 2021. No. 3(51). P. 37–52. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.04>.
39. Kotsur M., Yarymbash D., Kotsur I., Yarymbash S. 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*. 2019. Vol. 6, no. 5 (102). P. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185136>.
40. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S., Klymnyk I., Divchuk T. Electromagnetic Properties Determination Of Electrical Steels. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 25–29 February 2020. P. 185–189. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcset49122.2020.235419>.
- area.” *2015 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF)*, 2015, pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/YSF.2015.7333227>.
6. F. Zare and G. F. Ledwich, “Reduced layer planar busbar for voltage source inverters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no. 4, pp. 508–516, July 2002, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2002.800990>.
7. I. C. Popa, A. Dolan, D. Ghindeanu and C. Boltașu, “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: <https://doi.org/10.1109/SIELA.2014.6871884>.
8. V. Shkaruplyo, S. Skrupsky, A. Oliinyk, and T. Kolpakova, “Development of stratified approach to software defined networks simulation”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, no. 9 (89), pp. 67–73, Oct. 2017, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110142>.
9. Y. S. Bezverkhnia, “A voltage loss preliminary estimation in ac busbars,” *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 4, pp. 73–78, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/13>.
10. O. Nazarova, “Computer modeling of multi-mass electromechanical systems,” in *Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, Zaporizhzhia, Ukraine, Apr. 27–May 1, 2020, pp. 474–488.
11. V. Osadchyy and O. Nazarova, “Laboratory Stand for Investigation of Liquid Level Microprocessor Control Systems,” *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020, pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240868>.
12. “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” in *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, pp.1-29, 11 June 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2014.6826459>.
13. D. Yarymbash, M. Kotsur, Y. Bezverkhnia, S. Yarymbash and I. Kotsur, “Parameters Determination of the Trolley Busbars by Electromagnetic Field Simulation,” *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2018, pp. 76–79, doi: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559576>.
14. R. Puzyr, V. Kukhar, A. Maslov, and Y. Shchipkovsky, “The Development of the Method for the Calculation of the Shaping Force in the Production of Vehicle Wheel Rims,” *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 4.3, p. 30–34, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.20128>.
15. C. Stockreiter et al., “Transfinite Element Method Using the A, v-Potential Formulation With Edge Elements in the Frequency Domain,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 4, pp. 1349–1352, April 2007, doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.891008>.
16. H. Koepl and G. Paoli, “Non-linear modeling of a broadband SLIC for ADSL-Lite-over-POTS using harmonic analysis,” *2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Proceedings (Cat. No.02CH37353)*, 2002, pp. II-II, doi: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2002.1010942>.
17. Q. Wang, J. Liao, Y. Su, C. Lei, T. Wang, and N. Zhou, “An optimal reactive power control method for distribution network with soft normally-open points and controlled air-conditioning loads,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 103, pp. 421–430, Dec. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.06.027>.
18. A. Pourshafie, M. Saniei, S. S. Mortazavi, and A. Saeedian, “Optimal Compensation of Reactive Power in the Restructured Distribution Network,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 3, no. 6, pp. 1268–1271, 2009, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1078468>.
19. A. Canova and L. Giaccone, “Numerical and Analytical Modeling of Busbar Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1568–1578, July 2009, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2014270>.
20. A. A. Fedorov, “*Spravochnik energetika promyshlennykh predpriyatii. Tom 1. Elektrosnabzhenie*” [Handbook of Energy Professionals for Industrial Enterprises. Volume 1: Electricity supply]. Moscow: Gosenergoizdat, 1987.
21. J. A. Alsayaydeh, V. Shkaruplyo, M. S. Hamid, S. Skrupsky, and A. Oliinyk, “Stratified Model of the Internet of Things

- Infrastructure,” *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 13, no. 20, pp. 8634–8638, 2018. doi: <https://doi.org/10.3923/jeasci.2018.8634.8638>.
22. T. Kolpakova, A. Oliinyk and V. Lovkin, “Improved method of group decision making in expert systems based on competitive agents selection,” *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2017, pp. 939–943, doi: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100388>.
 23. V. Artiukh, V. Kukhar, and E. Balalayeva, “Refinement issue of displaced volume at upsetting of cylindrical workpiece by radial dies,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 224, p. 01036, 2018. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401036>.
 24. S. W. Park and H. Cho, “A practical study on electrical contact resistance and temperature rise at the connections of the copper busbars in switchgears,” *2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, 2014, pp. 1–7, doi: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2014.7031066>.
 25. D. Kusiak, “The magnetic field and impedances in three-phase rectangular busbars with a finite length,” *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1419, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12081419>.
 26. D. Yarymbash, S. Yarymbash, T. Divchuk, M. Kotsur, I. Kylymnyk and Y. Kulanina, “Calculation of No-load Currents Using Hysteresis Loop,” *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2019, pp. 122–125, doi: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896366>.
 27. A. Robkopf, E. Bär and C. Joffe, “Influence of Inner Skin- and Proximity Effects on Conduction in Litz Wires,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 10, pp. 5454–5461, Oct. 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2293847>.
 28. D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash and T. Divchuk, “Electromagnetic Parameters Determination of Power Transformers,” *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2018, pp. 70–75, doi: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559573>.
 29. D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash and I. Kylymnyk, “An Error Estimation Of The Current Sensors Of The Automated Control System Of The Technological Process Of Graphitization,” *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2018, pp. 64–69, doi: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559489>.
 30. M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur and S. Yarymbash, “Determination of Stray-Load Losses from Field Current Ripple of a Synchronous Machine by Field Simulation Methods,” *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020, pp. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240812>.
 31. M. Kotsur, Y. Bezverkhnia, D. Yarymbash and I. Kotsur, “Determination of a Busbar’s Parameters by Electromagnetic Field Simulation,” *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020, pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240811>.
 32. O. Nazarova, V. Osadchy and V. Brylysty, “Research on the Influence of the Position of the Electric Vehicles Mass Center on Their Characteristics,” *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020, pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240824>.
 33. S. G. Karnaukh, O. E. Markov, V. V. Kukhar, and A. A. Shapoval, “Classification of steels according to their sensitivity to fracture using a synergetic model,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 7-8, pp. 5277–5287, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08653-y>.
 34. O. H. Kurpe, V. V. Kukhar, and E. S. Klimov, “Finite-Element Simulation of Steckel Mill Rolling,” *Key Engineering Materials*, vol. 887, pp. 564–574, May 2021, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.887.564>.
 35. B. Zidarič and D. Miljavec, “A new ferromagnetic hysteresis model for soft magnetic composite materials,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 323, no. 1, pp. 67–71, Jan. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.08.031>.
 36. D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash and I. Kylymnyk, “An Accuracy Enhancement of Parameters Calculation Of The Jiles-Atherton Model,” *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020, pp. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240843>.
 37. M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur and S. Yarymbash, “An Inductance Determination of a Synchronous Machine with Combined Armature Winding by Field Simulation Methods,” *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2020, pp. 117–122, doi: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235405>.
 38. M. Kotsur, Y. Yarymbash, D. Bezverkhnia, and I. Kotsur, “Accuracy Improvement for the Determination of Parameters and Voltage Drops in Busbars, Considering the Networks Power Factor,” *Problems of the Regional Energetics*, no. 3(51), pp. 37–52, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.04>.
 39. M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, and S. Yarymbash, “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*, vol. 6, 5 (102), pp. 39–47, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185136>.
 40. D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk and T. Divchuk, “Electromagnetic Properties Determination Of Electrical Steels,” *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2020, pp. 185–189, doi: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235419>.

Надійшла (received) 02.06.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Безверхня Юлія Сергіївна (Bezverkhnia Yuliia Sergiivna) – доктор філософії (кандидат технічних наук), Національний університет «Запорізька політехніка», старший викладач кафедри електричних машин; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8779-2615>; e-mail: juliakafedraem@gmail.com.

Коцур Михайло Ігорович (Kotsur Mykhailo Igorovych) – 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.

Яримбаши Дмитро Сергійович (Yarymbash Dmytro Serhiiovych) – 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.

Коцур Ігор Михайлович (Kotsur Igor Mykhailovych) – 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.