

УДК 621.316.13

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ШИНОПРОВІДІВ ЦЕХОВИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ДІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ

- БЕЗВЕРХНЯ Ю.С.** аспірант кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: juliaeea@ukr.net;
- КОЦУР М.І.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: kotsur8@gmail.com;
- ЯРИМБАШ Д.С.** д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- КОЦУР І.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com;
- ЯРИМБАШ С.Т.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: kstj06@gmail.com;
- КИЛИМНИК І.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри вищої математики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: dnukim76@gmail.com.

Мета роботи. Дослідження і аналіз параметрів тролейних шинопроводів в умовах дії вищих гармонійних складових струму із врахуванням конструктивних особливостей, нелінійності магнітних і електрофізичних властивостей матеріалів, ефектів близькості, поверхневих та зовнішніх поверхневих ефектів.

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

Отримані результати. Проведено оцінку падіння напруги в фазах тролей шинопроводу від дії вищих гармонік струму. Встановлено, що при допустимих значеннях вищих гармонік, регламентованих стандартом для різних коефіцієнтів короткого замикання R_{sc} , величина падіння напруги може зрости в 3,5 рази, а з використанням сталевих кожухів - в 4 рази. При цьому, приріст енергії магнітного поля і активних втрат в шинопроводі становить 20% відносно їх значень для основної гармоніки струму без урахування екранування, і до 23% з урахуванням екранування тролей шинопроводу. Дія вищих гармонік при допустимих власних амплітудах відповідних значень коефіцієнта короткого замикання R_{sc} , також викликає збільшення активного опору в 4 рази, індуктивного - в 20 разів. Зважаючи на особливості розміщення системи шинопроводів в цеху, виробництва і технологічних процесів, необхідне екранування тролей шинопроводів. Тому, в таких випадках, для компенсації приросту та асиметрії падіння напруги в троліях та активних втрат в шинопроводах, струмові навантаження тролей шинопроводу повинні бути знижені на 5-20% в залежності від значення коефіцієнту короткого замикання цехової мережі.

Наукова новизна. Запропоновано математичну модель електромагнітних процесів в мідному 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. Вперше встановлено співвідношення падіння напруги та питомих активних втрат від спектрів частот і амплітуд гармонік струму та значень коефіцієнту короткого замикання, що дозволяє виявити ступінь і характер впливу на асиметрію падіння напруги і параметрів тролей шинопроводу.

Практична цінність. Встановлено, що при допустимих значеннях вищих гармонік, регламентованих стандартом для різних коефіцієнтів короткого замикання R_{sc} , величина падіння напруги може зрости в 3,5 рази, а з використанням сталевих кожухів - в 4 рази. При цьому, приріст енергії магнітного поля і активних втрат в шинопроводі становить 20% відносно їх значень для основної гармоніки струму без урахування екранування, і до 23% з урахуванням екранування тролей шинопроводу. Дія вищих гармонік при допустимих власних ампліту-

дах при відповідних значеннях коефіцієнта короткого замикання R_{sc} , також викликають збільшення активно-го опору в 4 рази, а індуктивного - в 20 разів. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні або модернізації існуючих цехових систем електропостачання, а також для визначення параметрів, оцінки надійності напруги в системах шинопроводів інших конструкцій.

Ключові слова: шинопровід; електромагнітне поле; модель; метод; гармоніки; коефіцієнт короткого замикання.

I. ВСТУП

Виробництво металургійної енергоємної продукції, забезпечення технологічних операцій за допомогою застосування підйомно-транспортних механізмів, в тому числі кранових електроприводів, в цехах підприємств є досить енергозатратним. Тому для модернізації власних енергосистем підприємств металургійної промисловості 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 енергії. Сучасні системи цехового електропостачання можуть мати значну протяжність. 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].

Впровадження частотно-регульованих електроприводів, випрямлячів та інших напівпровідникових перетворювачів призводить 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

Існуючі в інженерній практиці методики розрахунку параметрів і характеристик шинопроводів засновані на методах схемного моделювання [6]-[9]. Параметри схем, як правило, визначаються на основі узагальнених рівнянь [10]-[15]. 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.

Альтернативою методикам, заснованих на узагальнених виразах та емпіричних залежностях може бути застосування методів розрахунку електричних параметрів і характеристик на основі польового моделювання. Застосування методів розрахунку на основі польового моделювання набуло поширення для широкого класу задач електротехніки [17]-[18]. Їх основним обмеженням є необхідність використання спеціалізованого програмного забезпечення, високі витрати обчислювальних ресурсів і часу на чисельну реалізацію.

В роботах [17]-[20] пропонується визначати електромагнітні параметри електротехнічних систем перетворення змінного струму на основі реалізації 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. Сучасні системи тролейних шинопроводів, як правило, мають захисний пластиковий кожух, сталеві тримачі, а також інші елементи конструкції виготовлених з феромагнітних матеріалів, що в свою чергу володіють істотною нелінійністю 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. Існуючі методи визначення ефективних значень магнітних властивостей матеріалів не завжди дозволяють забезпечити достовірність їх обліку, тому потрібно їх корегування з урахуванням відомих експериментальних і розрахункових да-

них. Таким чином, розробка високоефективної методики розрахунку параметрів шинопроводів і оцінки впливу гармонійного складу струмів і напруг на їх характеристики є актуальною науково-практичною задачею.

III. МЕТА РОБОТИ

Дослідження і аналіз параметрів тролейних шинопроводів в умовах дії вищих гармонійних складових струму із врахуванням конструктивних особливостей, нелінійності магнітних і електрофізичних властивостей матеріалів, ефектів близькості, поверхневих та зовнішніх поверхневих ефектів.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження проводилися на прикладі тролейного шинопроводу з мідними провідниками ШТМ-73 250А 660В. Геометрична 2D модель і розрахункова область, у вигляді кінцевих елементів, зображені на рис. 1.

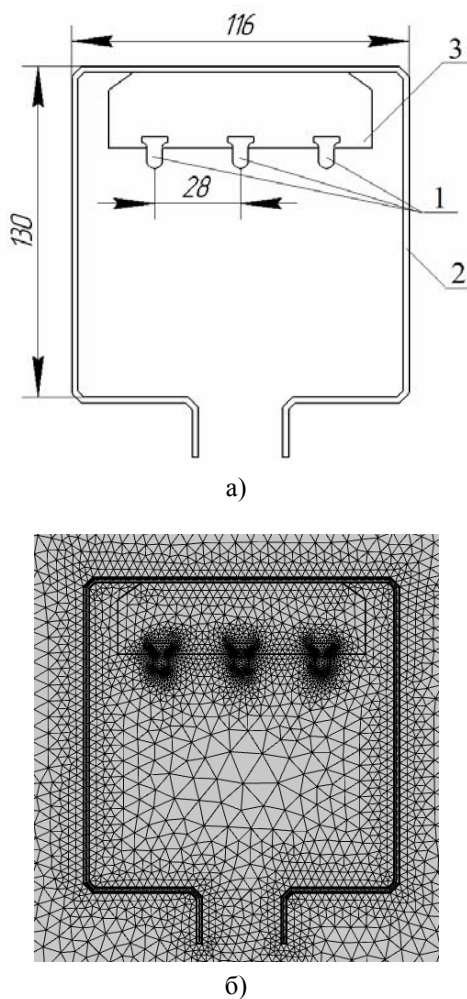


Рисунок 1. Геометрична модель (а) розрахункова область (б) шинопроводу ШТМ-73 250А 660В

Даний шинопровід має широке застосування і призначений для живлення мостових кранів, електричних талей, підвісних електричних однобалочних кранів і підлогових візків. Шинопровід має три мідних тролей 1, вмонтованих в кожух 2 (рис. 1). Тролеї в кожусі закріплені на ізоляторах (клинях) 3 (рис. 1).

При моделюванні електромагнітних процесів в шинопроводі авторами були прийняті допущення про відсутність монтажних тримачів шинопроводу, а також його кріпильних елементів. У випадку з металевим екрануючим кожухом шинопроводу, розподіл магнітного поля за межі розрахункової області шинопроводу відсутній. При цьому, магнітне поле, що створюється струмами, які протікають в тролей шинопроводу, локалізується в сталевому кожусі і не виходить за його межі. Це дозволило значно спростити геометрію шинопроводу, що в значній мірі забезпечує скорочення часу розрахунку і обчислювальних ресурсів, а також підвищення стійкості обчислювального процесу через відсутність необхідності врахування елементів геометричні розміри, яких значно менші від основних елементів шинопроводу.

Для врахування впливу поверхневого ефекту і ефекту близькості на величину активного і реактивного опорів шинопроводу реалізувалось завдання розрахунку розподілу щільності струму і питомої електричних втрат за поперечним перетином тролей і захисного кожуха (з врахуванням і без врахування екрануючих властивостей) на основі сполучених просторових стаціонарних математичних моделей електромагнітного перетворення електричної енергії змінного струму.

При розрахунку параметрів електромагнітного поля при частотному формулюванні задачі, для кожної амплітуди та частоти відповідної k -ї гармоніки виконується умова суперпозиції для електромагнітного поля за законом Біо-Савара [21].

Система рівнянь Максвелла формулюється для комплексних амплітуд векторного магнітного і електричного потенціалів в геометричних електропровідних областях тролейних провідників, сталевго кожуха і оточуючого їх електроізоляційного середовища (повітря) [19]:

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

де ω – кутова частота, рад/с; σ – електрична провідність, См/м; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – електрична постійна, Ф/м; ε_r – діелектрична проникність; \mathbf{A} – векторний магнітний потенціал, Вб/м; V – комплексна амплітуда електричного потенціалу, В; \mathbf{J}^e – комплексна щільність струму, А/м²; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна

постійна, Гн/м; μ_r – ефективна магнітна проникність; індекс $i = 0$ – відповідає області електроізоляційного та навколишнього середовища, індекси $i = 1, 2$ – відповідають областям струмопровідних тролей і кожуха.

Значення ефективної магнітної проникності визначалося відповідно до [17], [18] і корегувалося за даними реалізації електромагнітної моделі в time step формулюванні.

Так як довжина секції шинопроводу може становити 0,75, 1,5 і 3 м, а загальна протяжність може перевищувати 1 км, доцільно вважати, що поле в поперечному перетині шинопроводу прагне до плоскопаралельного. Це дозволяє істотно скоротити розмірність задачі і перейти від просторового формулювання до плоскопаралельного [19]:

$$\begin{cases} A_i = k \cdot A_{zi}; B_i = i \cdot B_{xi} + j \cdot B_{yi}; \\ H_i = i \cdot H_{xi} + j \cdot H_{yi}; V_i = k \cdot V_{zi}. \end{cases} \quad (2)$$

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

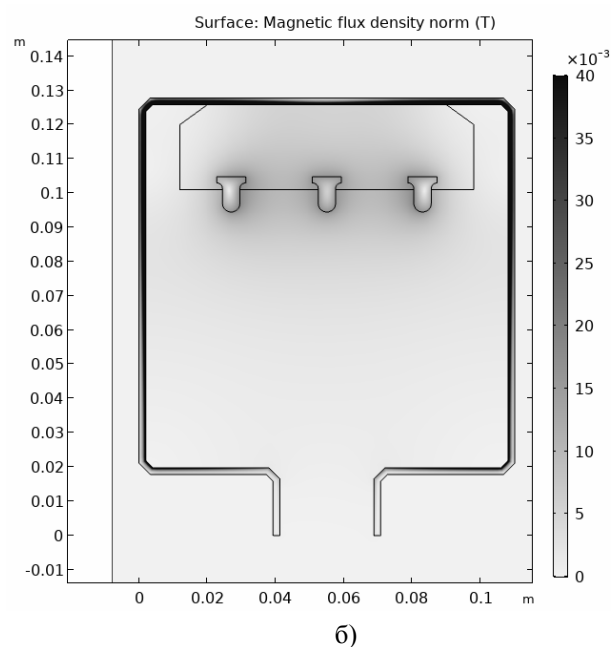
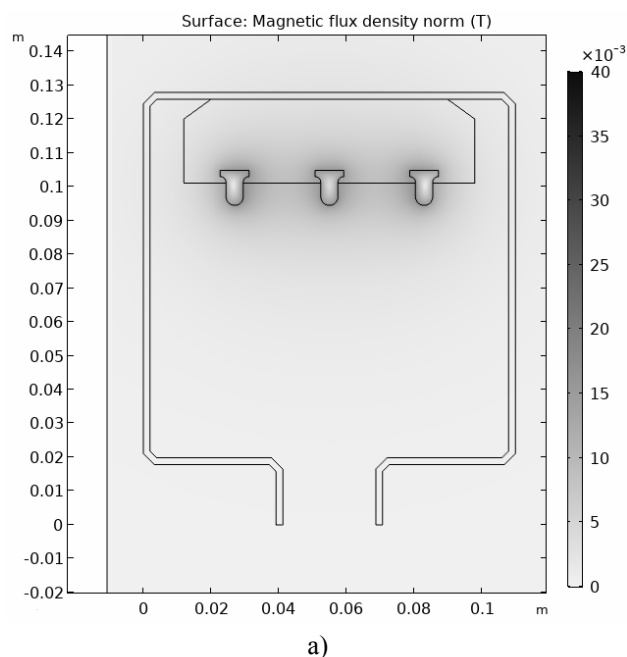
На рис.2 відповідно наведені результати польового моделювання електромагнітних процесів в шинопроводах без екранування (кожух виконаний із пластика, рис.2, а) та з екрануванням (кожух виконаний з конструкційної сталі, рис.2, б) при величині струму основної гармоніки 250А. Гармонійний склад струму визначався для стандартних значень коефіцієнта короткого замикання R_{sce} , який уявляє собою відношення потужності короткого замикання мережі до повної встановленої потужності електротехнічних пристроїв (табл. 1) [5].

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_n/I_1 , %			
	Номер гармоніки			
	5	7	11	13
33	10,7	7,2	3,1	2
66	14	9	5	3
120	19	12	7	4
250	31	20	12	7
≥ 350	40	25	15	10

Відносно основної гармоніки струму значення нормальної складової індукції від тролей до внутрішньої границі кожуха змінюється від 0,02 до 0,005 Тл (без екранування) і 0,02 ... 0,01 Тл (при екранування).

У випадку із сталевим кожухом, в його межах поле локалізується від зовнішньої до внутрішньої границі і приймає значення 0,03 ... 0,1 Тл. При дії вищих гармонік, для випадку $R_{sce} \geq 350$, величина нормальної складової магнітної індукції у внутрішніх границях кожуха на 5 гармоніці може досягати 60% від основної, а на 13-й гармоніки - до 30% від основної.



а) без екранування; б) з екрануванням;

Рисунок 2. Розподіл нормальної складової індукції у шинопроводі ШТМ-73 250А 660В при частоті основної гармоніки струму 50 Гц.

При збільшенні частоти гармоніки і відповідних зна-

чень їх амплітуд (табл.1) [4] проявляється ефект витіснення поля до внутрішньої границі кожуха, що супроводжується зростанням щільності магнітної індукції.

В результаті польового моделювання отримані результати розрахунку падіння напруг на 1м довжини тролей шинопроводу відповідно для пластикового кожуха (рис. 3) і сталевго кожуха (рис. 4) у вигляді складових падінь напруги ΔU для кожної фази А, В, С k -ї гармоніки струму при різних значеннях коефіцієнта короткого замикання мережі R_{sce} . Як показує аналіз, найбільше збільшення падіння напруги має місце для $k=1 \div 7$ гармоніки. Для $k > 7$ приріст падіння напруги знижується в $2 \div 3,5$ рази. Зі збільшенням R_{sce} , величина питомого падіння напруги при відповідному значенні $k > 2$ зростає за прямолінійним законом і для $R_{sce} \geq 350$ може досягти свого 4-кратного значення (рис.3, рис.4).

Результатами моделювання підтверджується, що гармоніки на власній несучій частоті не чинять вплив на асиметрію падіння напруги ΔU в фазах тролей шинопроводу. При цьому, зі зростанням частоти k -ї гармоніки струму, асиметрія ΔU фаз щодо центральної фази В тролі залишається незмінним. Однак в даному випадку на рівень асиметрії ΔU впливає коефіцієнт короткого замикання R_{sce} , величина якого прямо пропорційна значенням питомого змісту k -ї гармоніки. (див. табл.1., [4]). Для цехових мереж з $R_{sce} \geq 350$ асиметрія ΔU може зрости в 10 разів відносно рівня асиметрії ΔU щодо основної гармоніки струму.

У табл.2. наведені значення відносного падіння напруги в фазах тролей А, В, С при різних значеннях R_{sce} шинопроводу з пластиковим кожухом.

Таблиця 2. Відносне результуюче падіння напруги в фазах А, В, С при різних значеннях R_{sce}

Мінімальне значення R_{sce} , в.о.	Відносне результуюче падіння напруги, U_{pez}/U_1 , в.о.		
	фаза		
	А	В	С
33	1,62	1,58	1,62
66	1,852	1,74	1,848
120	2,155	2,01	2,15
250	2,942	2,70	2,932
≥ 350	3,51	3,19	3,496

Відносне значення результуючого падіння напруги являє собою відношення:

$$\Delta U^*_{pez} = \frac{\Delta U_{pez}}{\Delta U_1}; \tag{3}$$

$$\Delta U_{pez} = \Delta U_1 + \sqrt{\sum_{i=2}^k \Delta U_k^2}; \tag{4}$$

де ΔU_1 - падіння напруги на основній гармоніці

струму; k - порядковий номер гармоніки.

Для мінімального значення $R_{sce}=33$, при стандартизованому вмісті вищих гармонік струму, падіння

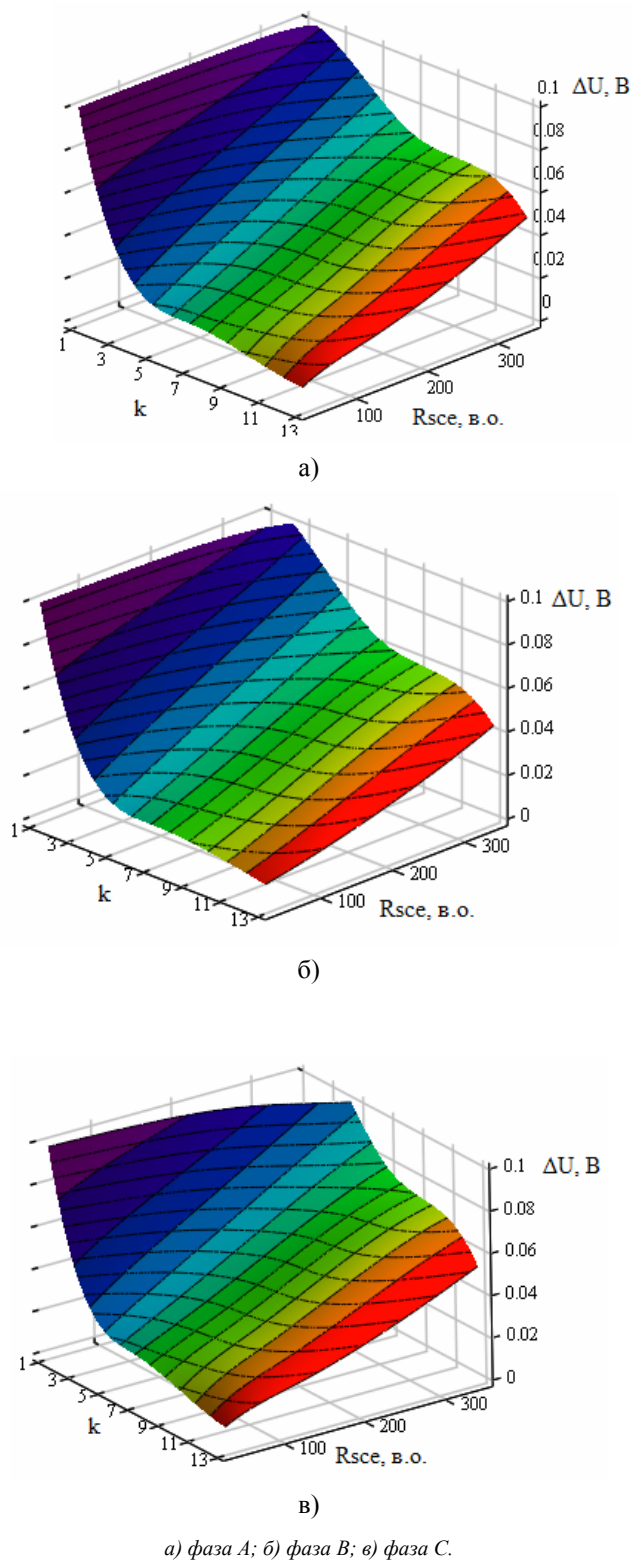
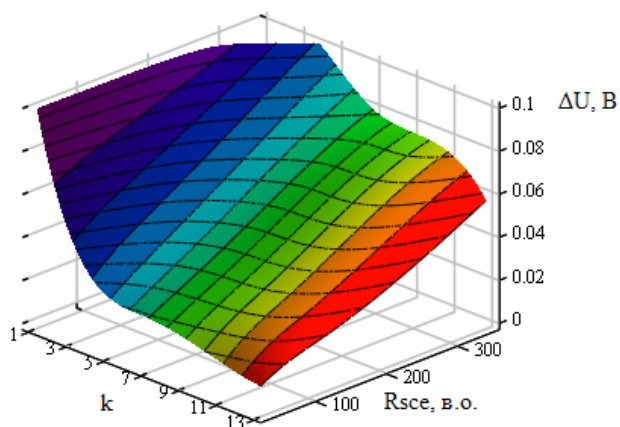
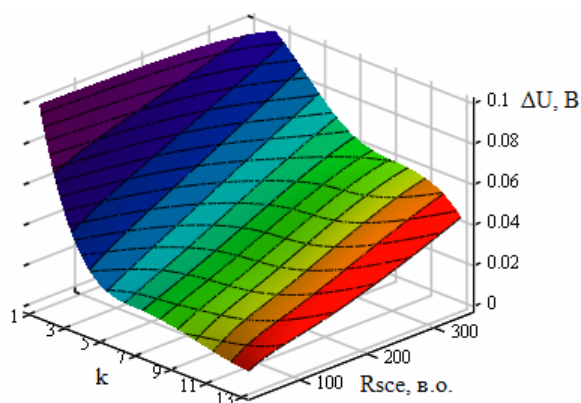


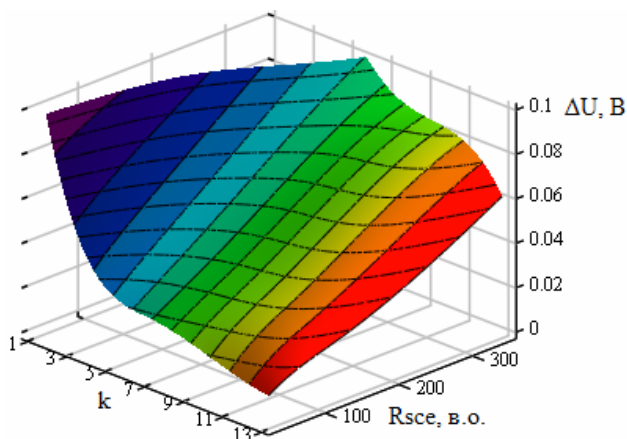
Рисунок 3. Поверхня складових падінь напруги від k -гармоніки струму і коефіцієнта короткого замикання на 1 м довжини тролей шинопроводу з пластиковим кожухом



а)



б)



в)

а) фаза А; б) фаза В; в) фаза С.

Рисунок 4. Поверхня складових падінь напруги від k -гармоніки струму і коефіцієнта короткого замикання на 1 м довжини тролей шинопроводу зі сталевим кожухом

напруги в тролєях шинопроводу збільшується в 1,58 ... 1,62 рази. Для більших значень R_{sce} , переви-

щення падіння напруги з урахуванням впливу вищих гармонік може досягти 2,19 ... 3,51 рази. При цьому, асиметрія напруги між фазами А і В, В і С зі зростанням R_{sce} залишається практично незмінною. Моделювання виконувалося при номінальному струмі 250А шинопроводу ШТМ-73 250А 660В регламентованому заводом-виробником. Однак на практиці шинопровод може бути перевантажений за струмом в 1,2 ... 1,7 рази, тому перевищення падіння напруги може бути значно більше ніж при розрахунковому перевищенні при номінальному струмі.

За результатами дослідження також було виконано порівняльну оцінку по-фазного перевищення падіння напруги в тролєях шинопроводу з пластиковим й сталевим кожухом. Таким чином, при виборі шинопроводу зі сталевим кожухом для $R_{sce}=33$ падіння напруги в фазі А на 7,48% вище відносно шинопроводу з пластиковим кожухом; для фази В - на 0,294%; для фази С - на 9,09%. Для $R_{sce} \geq 350$ падіння напруги на фазі А - на 11,98%; для фази В - на 0,76%; для фази С - на 11,54%. При цьому, найбільше перевищення напруги припадає на фази А і С, що розміщені в безпосередній близькості до сталевих кожухів.

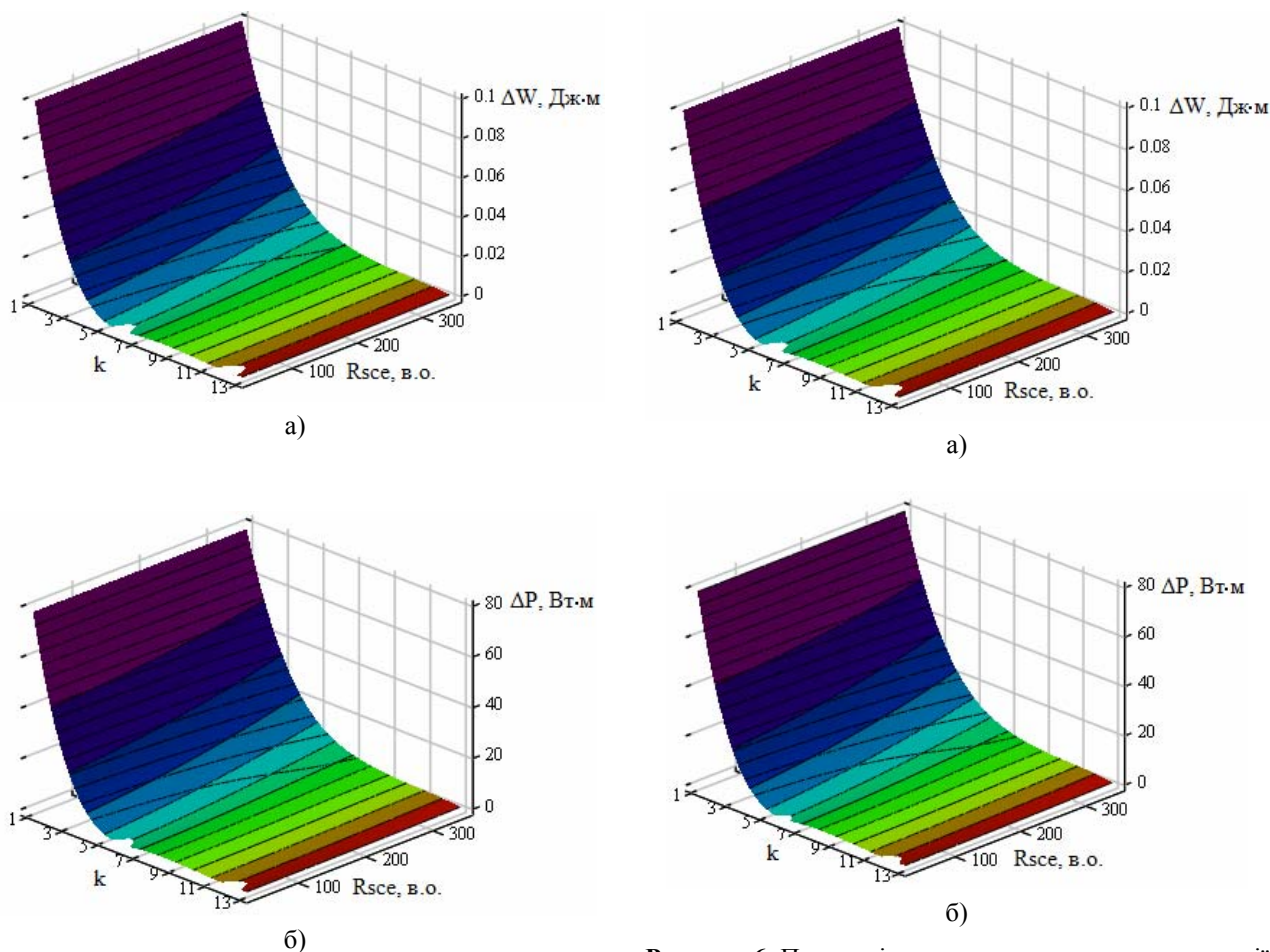
За даними чисельного моделювання виконувалася оцінка енергії магнітного поля і питомої енергії магнітного поля в розрахунковій області [19]:

$$W|_i = \frac{1}{2} \iiint_{V_i} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz, \quad w|_i = W|_i / V_i, \quad (5)$$

активних втрат і питомих активних втрат в тролєях і кожусі –

$$P|_i = \iiint_{V_i} \sigma_i^{-1} \mathbf{j} \cdot (\mathbf{j})^* dx dy dz, \quad p|_i = P|_i / V_i. \quad (6)$$

За результатами моделювання побудовані поверхні складових значень енергії магнітного поля (рис.5, а) та активних втрат (рис. 5, б) для відповідних k -их гармонік струму і коефіцієнту короткого замикання R_{sce} цехової мережі з пластиковим кожухом, і відповідно зі сталевим кожухом (рис.6, а, б). На характер розподілу енергії магнітного поля і активних втрат значний вплив мають як поверхневі ефекти в тролєях, так і ефекти близькості між тролєями різних фаз. Величина результуючих активних втрат при дії вищих гармонік тролєях шинопроводу з пластиковим кожухом для $R_{sce}=33$ на 1,82% більше в порівнянні з активними втратами на основній гармоніці при частоті 50 Гц. Для більших значень $33 < R_{sce} \leq 350$, результуючі активні втрати в шинопроводі можуть зрости до 20,4%. У разі застосування сталевих кожухів, при зміні коефіцієнта короткого замикання мережі $33 < R_{sce} \leq 350$, перевищення результуючих активних втрат в шинопроводі становить 2,75 ... 23%.



а) енергія магнітного поля; б) активні втрати.

Рисунок 5. Поверхні складових значень енергії магнітного поля (а) та активних втрат (б) для відповідних значень k -их гармонік та R_{sce} шинопроводу на 1 м довжини з пластиковим

За даними чисельного моделювання, з використанням співвідношень (5), (6) визначалися активні, реактивні та повні електричні опори тролей кожної з фаз [19]:

$$\begin{cases} R_i = P_i / S_i; L_k = \frac{2 \cdot W_i}{\sum_k |I_k|^2}; \\ X_k = \omega L_k, Z_i = \sqrt{R^2 + X^2}; \end{cases} \quad (7)$$

Точність результатів чисельного моделювання оцінюється шляхом порівняння розрахункових значень електричних опорів тролей шинопроводу з даними вимірів заводу виробника. За омичним опором похибка не перевищувала 0,6%.

Рисунок 6. Поверхні складових значень енергії магнітного поля (а) та активних втрат (б) для відповідних значень k -их гармонік та R_{sce} шинопроводу на 1 м довжини зі сталевим кожухом

Поверхневі ефекти в троях фаз, як і ефект близькості між ними призводить до зростання активного і індуктивного опорів тролей щодо власних значень частоти k -ої гармоніки тролей фаз А і С в порівнянні з центрально розміщеною тролею фази В (рис. 7, рис.8). При цьому величина активного опору фаз А і С щодо фази В на 13-й гармоніці збільшується майже в 2 рази, а індуктивного - в 8 раз відносно цих значень при основній гармоніки струму.

Застосування шинопроводів з екранованим кожухом, магнітне поле якого замикається через сталевий кожух, підсилює ефект близькості і скін-ефект в троях шинопроводу, а також призводить до зростання активних втрат (див. рис. 6).

При цьому має місце ще більше зростання активного, а також і індуктивного опорів тролей фаз А і С, які близько розташовані до сталевих кожуха шинопроводу. Для тролей фази В використання екранованого кожуха не чинить вплив на величини власних активних і індуктивних опорів. При всіх значеннях коефіцієнта короткого замикання мережі R_{scc} , для яких регламентовано питома вага вищих гармонік

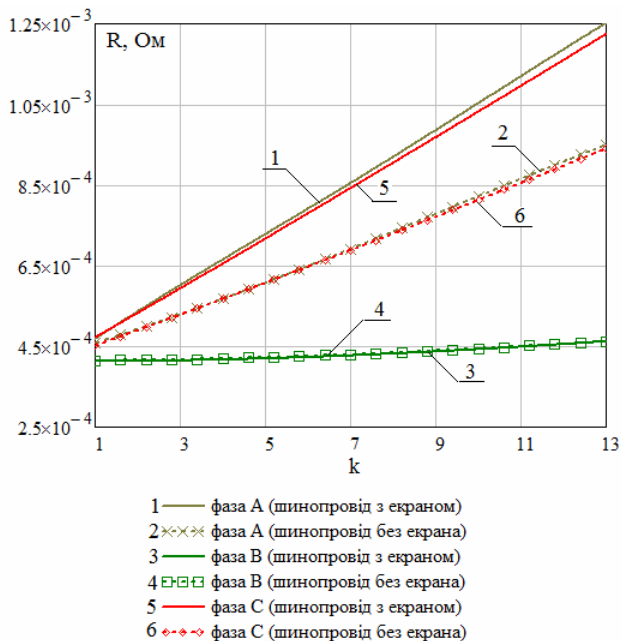


Рисунок 7. Складові активного опору для відповідних значень k -их гармонік струму тролей шинопроводу ШТМ-73 250А 660В з урахуванням та без урахування екранування

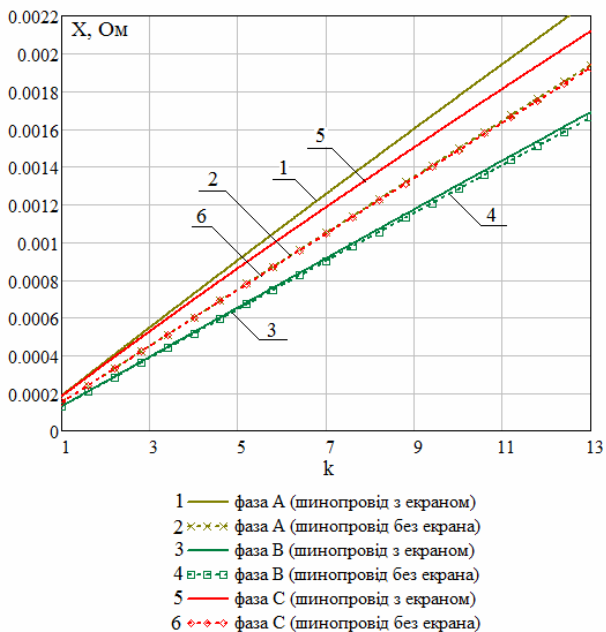


Рисунок 8. Складові індуктивного опору для відповідних значень k -их гармонік струму тролей шинопроводу ШТМ-73 250А 660В з урахуванням та без урахування екранування

струму [4], активні і індуктивні опори тролей фаз мають однакові значення. Таким чином на параметри тролей шинопроводу впливає лише несуча частота k -ої гармоніки струму.

У табл. 3 наведені результуючі значення і зна-

чення для основної гармоніки струму конструкційного параметра $tg\varphi$ для всіх фаз шинопроводу з урахуванням і без урахування екранування.

Таблиця 3. Розрахункові значення конструктивного параметра $tg\varphi$ тролей шинопроводу ШТМ-73 250А 660В

Конструкційний параметр $tg\varphi$	Фаза		
	А	В	С
з екрануванням			
$tg\varphi_1$	0,396	0,314	0,387
$tg\varphi_{рез}$	1,43	2,022	1,38
без екранування			
$tg\varphi_1$	0,327	0,311	0,332
$tg\varphi_{рез}$	1,472	1,981	1,476

Як показує аналіз, значення $tg\varphi$, при результуючій дії вищих гармонік, в середньому збільшується 3,5 ... 4 рази в залежності від фази щодо розрахункового значення $tg\varphi$ основної гармоніки струму. У разі використання сталевих кожухів має місце незначне збільшення значення параметра $tg\varphi$ фази В. Однак, для фаз А і С величина $tg\varphi$ нижче, що викликано зростанням активного опору в тролей цих фаз від дії поверхневого ефекту і ефекту близькості.

Таким чином проведені дослідження дозволили оцінити рівень падіння напруги в тролей шинопроводу з урахуванням впливу вищих гармонік для різних стандартизованих значень коефіцієнта короткого замикання, ефекту близькості і скін-ефекту, величина якого може зрости в 3,5 рази, а з використанням сталевих кожухів - в 4 рази. При цьому приріст енергії магнітного поля і активних втрат в шинопроводі становить 20% відносно їх значень для основної гармоніки струму без урахування екранування і до 23% з урахуванням екранування тролей шинопроводу. Дія вищих гармонік при допустимих власних амплітудах відповідно значень коефіцієнту короткого замикання R_{scse} , також викликають збільшення активного (в 4 рази) і індуктивного (в 20 раз) опорів. Це все негативно позначається на асиметрії напруги в точці підключення приймачів електричної енергії, зниження коефіцієнта потужності мережі, а також енергоефективності в цілому.

V. ВИСНОВКИ

Запропоновано математичну модель для завдання у частотному формулюванні електромагнітних процесів в мідному 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.

На основі польового моделювання вперше встановлено співвідношення падіння напруги та питомих активних втрат від спектрів частот і амплітуд гармонік струму та значень коефіцієнту короткого замикання, що дозволяє виявити ступінь і характер впливу на асиметрію падіння напруги і параметрів тролей шинопроводу.

Проведено оцінку падіння напруги в фазах тролей шинопроводу від дії вищих гармонік струму. Встановлено, що при допустимих значеннях вищих гармонік, регламентованих стандартом для різних коефіцієнтів короткого замикання R_{sce} , величина падіння напруги може зрости в 3,5 рази, а з використанням сталевих кожуха - в 4 рази. При цьому, приріст енергії магнітного поля і активних втрат в шинопроводі становить 20% відносно їх значень для основної гармоніки струму без урахування екранування, і до 23% з урахуванням екранування тролей шинопроводу. Дія вищих гармонік при допустимих власних амплітудах при відповідних значеннях коефіцієнта короткого замикання R_{sce} , також викликають збільшення активного опору в 4 рази, а індуктивного - в 20 разів.

Зважаючи на особливості розміщення шинопроводу в цеху, виробництва і технологічних процесів необхідне екранування тролей шинопроводів. Тому, в таких випадках, для компенсації асиметрії падіння напруг в троліях, і активних втрат в шинопроводах, струмове навантаження тролів шинопроводу повинно бути знижено на 5-20% в залежності від значення коефіцієнту короткого замикання цехової мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Zare , F. Reduced layer planar busbar for voltage source inverters [Text] / F. Zare, G. F. Ledwich // IEEE Trans. Power Electron. – 2002. – Vol. 17. – №. 4. – pp. 508–516.
- [2] Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors [Text] / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // IEEE: 14-th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018): Intern. Scient. and Tech. Conf., 20-23 February 2018: report theses. - Lviv-Slavske, Ukraine. - pp. 304-307. DOI:10.1109/TCSET.2018.8336208
- [3] Gaoyu, Z. Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter [Text] / Z. Gaoyu, Z. Zhengming, Y. Liqiang // IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC): Intern. Scient. and Tech. Conf., 15-17 July 2013: report theses. Long Beach, CA, USA. - pp. 1213- 1218. DOI:10.1109/APEC.2013.6520453
- [4] МЭК (61000-3-12:2004) Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения общего назначения. Нормы и методы испытаний.
- [5] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems [Text] / IEEE standard 519-1992, London. - 1992.
- [6] Bedkowski, M. Coupled numerical modelling of power loss generation in busbar system of low-voltage switchgear [Text] / M. Bedkowski, J. Smolka, K. Banasiak, Z. Bulinski, A. J. Nowak, T. Tomanek, A. Wajda // Int. J. Thermal Sci. – 2014. – vol. 82. – pp. 122–129.
- [7] Mahmoodzadeh, Z. Energy loss estimation in distribution networks using stochastic simulation [Text] / Z. Mahmoodzadeh, N. Ghanbari, A. MehriziSani, M. Ehsan // Power & Energy Society General Meeting. – Denver, Colorado. – 2015. – pp. 1–5.
- [8] Подольцев, А.Д. Численное моделирование электрических токов, магнитного поля и электродинамических сил в силовом трансформаторе при аварийном режиме с использованием MATLAB / SIMULINK и COMSOL [Текст] / А.Д. Подольцев, Л.Н. Конторович // Техническая электродинамика. – 2011. – №. 6. – С. 3-10.
- [9] Plesca, A. Busbar heating during transient conditions [Text] / A. Plesca // Electric Power Syst. Res. – 2012. – № 89. – pp. 31–37. DOI: 10.1109/T-AIEE.1915.4765211
- [10] Roskopf, A. Influence of inner skin- and proximity effects on conduction in litz wires [Text] / A. Roskopf, E. Bar, C. Joffe // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – № 29(10). – pp. 5454–5461, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2293847
- [11] Chen, C. Investigation, evaluation, and optimization of stray inductance in laminated busbar [Text] / C. Chen, X. Pei, Y. Chen, Y. Kang // IEEE Trans. Power Electron. – 2013. – №29(7). – pp. 3679–3693. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2282621
- [12] Popa, I. Numerical modeling of DC busbar contacts [Text] / I. Popa, A.I. Dolan // IEEE: 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012) Intern. Scient. and Tech. Conf., 15-17 September 2012: report theses. Long Beach, CA, USA. - pp. 188- 193 DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231869
- [13] Gaoyu, Z. 2013. Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter [Text] / Z. Gaoyu, Z. Zhengming, Y. Liqiang // IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC): Intern. Scient. and Tech. Conf., 15-17 July 2013: report theses. - Long Beach, CA, USA, 2013 - pp. 1213-1218. –DOI: 10.1109/APEC.2013.6520453

- [14] Popa, I. C. Thermal modeling and experimental validation of an encapsulated busbars system [Text] / I. C. Popa, A.I. Dolan, D. Ghindeanu, C. Boltasu, IEEE: 2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA): Intern. Scient. and Tech. Conf., 15-17 August 2014: report theses. Bourgas, Bulgaria, 2014. - pp.1-4. DOI: 10.1109/SIELA.2014.6871884
- [15] Sung, W. P. A practical study on electrical contact resistance and temperature rise at the connections of the copper busbars in switchgears [Text] / W. P. Sung, Ch. Hyunsu // IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2014): Intern. Scient. and Tech. Conf., 13-15 July 2014: report theses. Long Beach, CA, USA, 2014. - pp. 1213- 1218. DOI: 10.1109/HOLM.2014.7031066
- [16] Федоров А.А. Справочник энергетика промышленных предприятий Т. 1. Электроснабжение. [Текст] / Под общей ред. Федорова А. А. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1987. - 840 С.
- [17] Дівчук, Т.Е. Уточнюючий підхід до визначення функціональних залежностей відносних магнітних проникностей анізотропних холоднокатаних електротехнічних сталей / Т.Е. Дівчук, Д.С. Яримбаш, С.Т. Яримбаш, І.М. Килимник, М.І. Коцур, Ю.С. Безверхня // Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – № 2. - С. 6-15. – Режим доступу: DOI : 10.15588/1607-6761-2018-2-1.
- [18] Дівчук, Т. Е. Підхід до визначення струмів неробочого ходу силових трифазних трансформаторів з плоским стрижневими магнітними системами [Текст]/ Т.Е. Дівчук, Д.С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш, І.М. Килимник, М.І. Коцур, Ю.С. Безверхня // Електротехніка та електроенергетика. – 2017. – № 2. - С. 56-66. – Режим доступу : DOI : 10.15588/1607-6761-2017-2-6.
- [19] Yarymbash, D. Increasing efficiency of 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. 308-313. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336209
- [20] Wu, X. W. Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated bus bars with the finite-element method [Text] / X. W. Wu, N. Q. Shu, H. T. Li, L. Li // IEEE Trans. Magn. - 2014. - Vol. 50. - №. 2. - pp. 277–280.
- [21] 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.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2018

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРОВ ШИНОПРОВОДОВ ЦЕХОВИХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА

- БЕЗВЕРХНЯ Ю.С.** аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина e-mail: juliaee@ukr.net;
- 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;
- КОЦУР И.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com;
- ЯРЫМБАШ С.Т.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: kstj06@gmail.com;
- КИЛИМНИК И.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: dnukim76@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. Проведена оценка падения напряжения в фазах троллей шиннопровода от действия высших гармоник тока. Установлено, что при допустимых значениях высших гармоник, установленных стандартом для разных коэффициентов короткого замыкания R_{sce} , величина падения напряжения может возрасти в 3,5 раза, а с использованием стального кожуха – в 4 раза. При этом приращение энергии магнитного поля и активных потерь в шиннопроводе составляет 20% относительно их значений для основной гармоники тока без учета экранирования, и до 23% с учетом экранирования троллей шиннопровода. Действие высших гармоник при допустимыми собственными амплитудах при соответствующих значений коэффициента короткого замыкания R_{sce} , также вызывают увеличение активного сопротивления в 4 раза, индуктивного – в 20 раз. Ввиду особенностей размещения шиннопровода в цеху, производства и технологических процессов требуется экранирование троллей шиннопроводов. Поэтому, в таких случаях, для компенсации асимметрии падения напряжений и в троллеях и активных потерь в шиннопроводах, токовая нагрузка троллей шиннопровода должна быть снижена на 5-20% в зависимости от значения коэффициента короткого замыкания цеховой сети.

Научна новизна. Предложена математическая модель электромагнитных процессов в медном троллейном шиннопроводе, 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 шиннопровода для соответствующих значений амплитуд и частот высших гармоник тока. Впервые установлено соотношение падения напряжения и удельных активных потерь от спектров частот и амплитуд гармоник тока и значений коэффициента короткого замыкания, что позволяет выявить степень и характер влияния на асимметрию падения напряжения и параметров троллей шиннопровода.

Практическая ценность. Установлено, что при допустимых значениях высших гармоник, установленных стандартом для разных коэффициентов короткого замыкания R_{sce} , величина падения напряжения может возрасти в 3,5 раза, а с использованием стального кожуха – в 4 раза. При этом приращение энергии магнитного поля и активных потерь в шиннопроводе составляет 20% относительно их значений для основной гармоники тока без учета экранирования, и до 23% с учетом экранирования троллей шиннопровода. Действие высших гармоник при допустимыми собственными амплитудах при соответствующих значений коэффициента короткого замыкания R_{sce} , также вызывают увеличение активного сопротивления в 4 раза, индуктивного – в 20 раз. Результаты работы могут быть использованы при проектировании или модернизации существующих цеховых систем электроснабжения, а также для определения параметров, а также оценки падения напряжения в шиннопроводе других конструкций.

Ключевые слова: шиннопровод; электромагнитное поле; модель; метод; гармоники; коэффициент короткого замыкания.

ANALYSIS OF THE SHOP NETWORKS BASBURS PARAMETERS AT HIGHER HARMONIC CURRENT ACTIONS

- BEZVERKHNIA YU.S. Postgraduate student, Department of Electrical and Electronic Apparatuses, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: juliaeeea@ukr.net;
- KOTSUR M.I. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical and Electronic Apparatuses, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kotsur8@gmail.com;
- YARYMBASH D.S. Dr. Tech. Sci., Associate Professor, Head of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- KOTSUR I.M. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com;
- YARYMBASH S.T. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kstj06@gmail.com.;
- KYLYMNYK I.M. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of High

Mathematics, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine,
e mail: dnukim76@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 voltage drop in the phases of busbar's trolleys from the action of higher current harmonics is researched. It has been evidenced that with permissible values of higher harmonics established by the standard for different short-circuit ratio R_{sce} , the magnitude of the voltage drop can increase by 3.5 times, and using the steel casing - by 4 times. At the same time, the increment of the magnetic field energy and active losses in the busbar is 20% relative to their values for the main current harmonic, excluding shielding, and up to 23%, including shielding of busbar's trolleys. The action of higher harmonics at permissible own amplitudes at corresponding values of the short-circuit ratio R_{sce} also causes an increase in active resistance by 4 times, inductive - by 20 times. Due the features of the placement of the busbar in the workshop, production and technological processes, the shielding of the busbar's trolleys is required. Therefore, in such cases, to compensate for the asymmetry of the voltage drop in the trolleys and active losses in the busbars, the current load of the busbar's trolleys should be reduced by 5-20% depending on the value of the short circuit coefficient of the shop network.

Originality. The mathematical model of electromagnetic processes in the copper busbar's trolley, which contain design features, nonlinearity of magnetic and electrophysical properties of materials, proximity effects, surface and external surface effects, the effect of current harmonic components on voltage drop and power loss in the power transmission are proposed. It allows with high accuracy and numerical efficiency, to determine the busbar's trolley parameters for the corresponding values of the amplitudes and frequencies of the current high harmonics. For the first time, the relationship between the voltage drop and specific active losses from the spectrum of frequencies and amplitudes of current harmonics and the values of the short-circuit coefficient is executed, which allows to determine the degree and character of the effect on the asymmetry of the voltage drop and the parameters of the busbar's trolley.

Practical value. It has been evidenced that with permissible values of higher harmonics established by the standard for different short-circuit ratio R_{sce} , the magnitude of the voltage drop can increase by 3.5 times, and using the steel casing - by 4 times. At the same time, the increment of the magnetic field energy and active losses in the busbar is 20% relative to their values for the main current harmonic, excluding shielding, and up to 23%, including shielding of busbar's trolleys. The action of higher harmonics at permissible own amplitudes at corresponding values of the short-circuit ratio R_{sce} also causes an increase in active resistance by 4 times, inductive - by 20 times. The results of the work can be used in the design or modernization of existing shop power supply systems, as well as to determine the parameters, as well as to estimate the voltage drop in the other busbar's design.

Keywords: busbar; electromagnetic field; model; method; harmonics; short-circuit ratio.

REFERENCES

- [1] Zare F., Ledwich G. F. (2002). Reduced layer planar busbar for voltage source inverters. IEEE Trans. Power Electron., 17, 4, 508–516 (in English).
- [2] Kotsur, M., Yarymbash, D., Kotsur, I., Bezverkhnia Yu. (2018). Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors. IEEE: 14-th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018), Lviv-Slavske, Ukraine, 304-307 DOI:10.1109/TCSET.2018.8336208 (in English).
- [3] Gaoyu, Z., Zhengming, Z., Liqiang, Y. (2013). Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter. IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, USA, 1213-1218. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520453 (in English).
- [4] IEC (61000-3-12: 2004) Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ogranichenie gar-
- monicheskikh sostsvlyaiushikh toka, sozdavaemykh tekhnicheskimi 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.).
- [5] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems IEEE standard. London, 1992, 519-1992 (in English).
- [6] Bedkowski, M., Smolka, J., Banasiak, K., Bulinski, Z., Nowak, A. J., Tomanek, T., Wajda, A. (2014). Coupled numerical modelling of power loss generation in busbar system of low-voltage switchgear. Int. J. Thermal Sci., 82, 122–129 (in English).
- [7] Mahmoodzadeh, Z., Ghanbari, N., MehriziSani, A.,

- Ehsan, M. (2015). Energy loss estimation in distribution networks using stochastic simulation. Power & Energy Society General Meeting, Denver, Colorado, P. 1–5. (in English).
- [8] Podol'tsev, A.D., Kontorovich, L.N. (2011). Chislennoe modelirovanie elektricheskikh tokov, magnitnogo polya I elektrodinamicheskikh sil v silovom transformatore pri avariynom rezhyme s ispol'zovaniyem MATLAB / SIMULINK i COMSOL (Numerical Simulation of Electric Currents, Magnetic Field and Electrodynamic Forces in Power Transformer at Emergency Operation Using MATLAB/SIMULINK AND COMSOL). Technical Electrodynamics, 6, 3–10. (in Russian).
- [9] Plesca, A. (2012). Busbar heating during transient conditions. *Electric Power Syst. Res.*, 89, 31–37. DOI: 10.1109/T-AIEE.1915.4765211 (in English).
- [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 English).
- [11] Chen, C., Pei, X., Chen, Y., Kang, Y. (2013). Investigation, evaluation, and optimization of stray inductance in laminated busbar. *IEEE Trans. Power Electron.*, 29, 7, 3679–3693. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2282621 (in English).
- [12] Popa, I., Dolan, A.I. (2013). Numerical modeling of DC busbar contacts. *IEEE: 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012)*, 188 – 193. DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231869 (in English).
- [13] Gaoyu, Z., Zhengming, Z., Liqiang, Y. (2013). Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter. *IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA, 1213–1218. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520453 (in English).
- [14] Popa, I. C., Dolan, A-I., Ghindeanu, D., Boltasu, C. (2014). Thermal modeling and experimental validation of an encapsulated busbars system. *IEEE: 2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, Bourgas, Bulgaria, 1–4. DOI: 10.1109/SIELA.2014.6871884 (in English).
- [15] Sung, W. P., Hyunsu Ch. (2014). A practical study on electrical contact resistance and temperature rise at the connections of the copper busbars in switchgears. *IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2013)*, New Orleans, LA, USA, 1213–1218. DOI: 10.1109/HOLM.2014.7031066 (in English).
- [16] Fedorov, A.A. (1987). Reference book power engineering of industrial enterprises T. 1. Power supply. Under the general ed. Fedorov A.A. M.: Gosenergoizdat, 840. (in Russian).
- [17] Divchuk, T., Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Kotsur, M., Bezverkhnia, Y. (2018). Ytochyuyuchyy pidhid do vyznachennya funktsional'nykh zalezhnostey vidnosnykh magnitnykh pronyklostey 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).
- [18] Divchuk, T., Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Kotsur, M., Bezverkhnia, Y. (2018). Podkhod k opredeleniyu tokov kholostogo khoda silovykh trekhfaznykh transformatorov s ploskimisterzhnevymi magnitnymi sistemami [Approach to determination of no load current of three-phase power transformers with plane rods magnetic systems]. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 56–66. doi: http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-6 (in Russian).
- [19] Yarymbash, D., Kotsur, M., Bezverkhnia, Yu., Kotsur I., Yarymbash, S. (2018). Increasing efficiency of parameters determination of the trolley busbars by electromagnetic Field Simulation. *IEEE: 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 308–313. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336209
- [20] Wu, X. W. (2014). Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated bus bars with the finite-element method. *IEEE Trans. Magn.* 50, 2, 277–280.
- [21] Izmaylov, S. V. (1962). *Kurs Elektrodinamiki*. M.: Gos. Uchebn-pedagog. izdatelstvo ministerstva prosveshcheniya, 440.