

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.365.51

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.005>**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ОБМОТКИ ІНДУКТОРА,
ЩО ПРИЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ НАГРІВУ ВНУТРІШНІХ КІЛЕЦЬ БУКСОВИХ
ПІДШИПНИКІВ КОЛІСНИХ ПАР ВАГОНІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ****А.Ф. Жаркін***, акад. НАН України, **А.Г. Пазєєв****, канд. техн. наук, **О.І. Бондар*****, канд. техн. наукІнститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: pazeev@ied.org.ua

Досліджено процес високочастотного індукційного нагріву внутрішніх кілець буксових підшипників перед демонтажем, що проводиться під час ремонтних робіт колісних пар вагонів метрополітену. Проведено фізичне моделювання процесу нагріву при частоті 10 кГц та використанні індуктора з трирядного обмоткою у 17 витків, довжина якої дорівнювала довжині кільця. Показано, що при варіюванні часу нагріву та потужності, що передається в деталь, не вдається забезпечити вибір прийняттого режиму нагріву для нормального демонтажа з точки зору забезпечення повторюваності результатів та недопущення локального перегріву деталі. Проведено розрахунки у середовищі COMSOL на скінченно-елементній моделі процесу нагріву кільця буксового підшипника при незмінній кількості витків для різних варіантів геометрії обмотки індуктора, тобто кількість рядів обмотки, кількість витків у ряді та їх розташування відносно внутрішніх кілець підшипників. Показано, що геометрична форма обмотки індуктора має суттєвий вплив на розподіл питомих тепловиділень вздовж поверхні деталей. Визначено оптимізовану геометрію обмотки, за якої забезпечується необхідна динаміка нагріву та відсутність зон локального перегріву кілець підшипників, що дозволяє зменшити частку відбракованих деталей. Бібл. 5, рис. 6, таблиця.

Ключові слова: геометрія обмотки індуктора, динаміка нагріву, електротермічна установка, індукційний нагрів, локальний перегрів.

Вступ. На сьогодні індукційне нагрівання на підвищених частотах з використанням електротермічних установок (ЕТУ) широко використовується в машинобудуванні, металургії, на транспорті та ін. Це пояснюється наявністю таких переваг, як висока концентрація енергії в феромагнітному матеріалі, що нагрівається, безконтактність нагрівання, зручність регулювання та можливість автоматизації електротехнологічного процесу, екологічність виробництва, а також економія енергетичних ресурсів та мінімізація негативного впливу на мережі електропостачання завдяки використанню можливостей сучасних напівпровідникових перетворювачів електроенергії [1].

При використанні ЕТУ для високочастотного індукційного нагріву внутрішніх кілець буксових підшипників перед демонтажем із шийки осі під час ремонту колісних пар вагонів метрополітену постає завдання досягти температури 120...130 °С за час близько 30...45 с. Такий час нагріву визначається умовами технологічного процесу, при якому має місце незначний нагрів валу за рахунок теплопровідності, що полегшує демонтаж кільця [2]. Одночасно необхідно враховувати, що сталь опорного кільця втрачає свої міцнісні властивості при температурі вищій за 160 °С, коли виникають помітні «кольори мінливості». Також важливим є недопущення локальних перегрівів окремих ділянок опорного кільця, так як це може викликати небажані деформації деталей. Зазначені особливості накладають обмеження на рівень потужності, що підводиться до деталі в процесі індукційного нагріву, а також на до-



пустими значення градієнту температури при нагріві для забезпечення рівномірного нагріву поверхні деталі з метою зменшення частки відбракованих деталей.

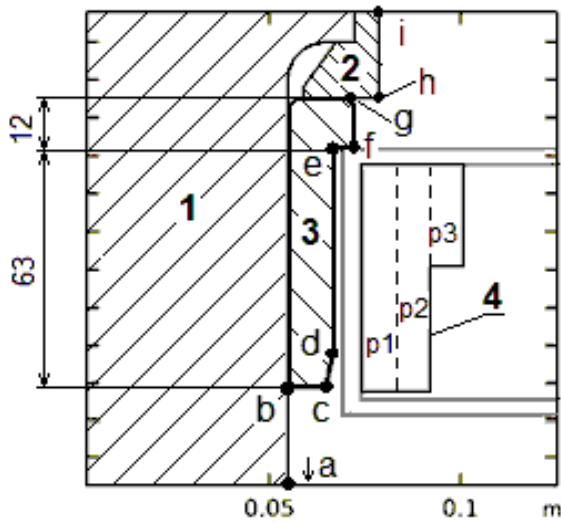


Рис. 1. Геометрія розрахункової області для моделі процесу індукційного нагріву внутрішнього кільця підшипника колісної пари вагону метрополітену

Постановка задачі. Процеси нагріву внутрішнього кільця буксового підшипника колісної пари вагону метрополітену були досліджені при фізичному моделюванні. Ескіз зони нагріву наведено на рис. 1, де в розрізі вздовж осі колісної пари зображені шийка осі (1) на яку насаджено методом гарячого пресування комір букси (2) та внутрішнє кільце буксового підшипника (3). Нагрів здійснювався з використанням індуктора з багатошаровою обмоткою (4), що визначалось конструктивом індуктора та технологічністю його використання, зокрема шириною кільця, природним охолодженням індуктора, необхідністю забезпечити можливість зручної роботи одним оператором при ручному демонтажі кільця. Індуктор був підключений до напівпровідникового перетворювача частоти, що побудований на основі мостового послідовного резонансного інвертора. Регулювання вихідної

потужності перетворювача здійснювалось шляхом регулювання величини вихідного струму [3]. Робоча частота становила 10 кГц. Обмотка індуктора мала 17 витків проводу типу «літцендрат» з перетином по міді 35 мм² у трьох рядах: по 7 витків в рядах p1 і p2, а також 3 витки в ряді p3. У дослідях здійснювався підбір потужності для проведення демонтажу внутрішнього кільця буксового підшипника за час 35...50 с. У точці (d) (рис. 1) контролювалась температура зовнішньої поверхні кільця підшипника, нагрів якого проводився до температури, що не перевищувала 140°C. При використанні індуктора зі вказаною геометрією обмотки стійкого демонтажу внутрішнього кільця підшипника, тобто повторюваності результату в партії з декількох колісних пар в одному циклі технологічного процесу, досягти не вдалось. При підборі прийнятного режиму (час нагріву та потужність) для однієї з колісних пар при нормальному, без прикладення значних зусиль, ручному демонтажі кільця, в іншому випадку спостерігався зсув кільця приблизно на половину його осьового розміру, з наступним «підклинюванням» на місці посадки. Аналіз процесу демонтажу показав, що відмінності в демонтажі різних кілець можливо пояснити як незначною різницею деформацій місць посадки внутрішніх кілець на шийку осі колісної пари та самих внутрішніх кілець, що спричинені особливостями експлуатації різних колісних пар, так і нерівномірністю нагріву кільця. Було з'ясовано, що менш нагріта область в районі борту кільця має дещо менший внутрішній діаметр, ніж інші частини кільця, що і призводило до проблем при демонтажі. Спроби збільшити діаметр нагрітого кільця в районі «проблемної» області, тобто підвищити її температуру, за рахунок збільшення потужності призводили до локального перегріву середньої та нижньої областей (див. рис. 1) кільця підшипника 3.

Метою роботи є дослідження процесу індукційного нагріву внутрішніх кілець підшипників колісної пари вагону метрополітену з точки зору впливу геометричної форми обмотки індуктора на розподіл питомих тепловиділень вздовж поверхні деталей для визначення оптимальної геометрії обмотки, що забезпечує необхідну динаміку нагріву та відсутність зон локального перегріву кілець підшипників перед демонтажем під час ремонту колісних пар.

Викладення матеріалу. У середовищі COMSOL була розроблена скінченно-елементна модель процесу індукційного нагріву внутрішнього кільця підшипника колісної пари. Геометрія розрахункової області (рис. 1) складається з областей внутрішнього кільця

підшипника (3) та коміра букси (2), що насаджені на шийку осі колісної пари (1), а також індуктора, в якому розміщено обмотку (4) з різними варіантами розташування витків як відносно осі індуктора, так і по шарах обмотки. На рис. 1 схематично показано три шари обмотки 4 для одного з варіантів розміщення витків. Для інших варіантів варіювалась довжина кожного шару обмотки, що відповідало зміні кількості витків у шарі.

Вирішувалися стаціонарна електромагнітна і змінна в часі теплова задачі у 2D постановці. Електромагнітна задача розв'язувалась для всієї розрахункової області, а теплова – тільки для феромагнітних деталей, тобто для шийки осі 1, коміра букси 2 та внутрішнього кільця підшипнику 3.

Оскільки задача вирішувалась при заданому струмі індуктора, рівняння електромагнітного поля формулювались для гармонічного випадку відносно комплексних амплітуд векторного магнітного потенціалу $\dot{A}$ та струму в індукторі $\dot{I}$ [4]:

$$j\omega\sigma\dot{A} + \nabla \times ((\mu_0\mu_r)^{-1} \nabla \times \dot{A}) = 0 \quad \text{в областях 1, 2 та 3;} \quad (1)$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}) = \frac{j\omega w}{S} \quad \text{в області індуктора;} \quad (2)$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}) = 0 \quad \text{в навколишній області,} \quad (3)$$

де ω – кругова частота, σ – питома електропровідність, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ_r – відносна магнітна проникність, w – число витків індуктора, S – площа поперечного перерізу індуктора.

Розподіл температури в областях 1, 2 та 3 описується наступними рівняннями:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \lambda \nabla T = Q, \quad (4)$$

де ρ , C_p , λ – густина, питома теплоємність і теплопровідність матеріалу деталі, Q – середня за період питома потужність тепловиділень внаслідок протікання індуктованих струмів, яка визначається формулою

$$Q = \frac{1}{2} \frac{\dot{J} \cdot \dot{J}^*}{\sigma} = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \sigma (\dot{A}_\varphi \dot{A}_\varphi^*), \quad (5)$$

де $\dot{J} = -j\omega\sigma\dot{A}_\varphi$ – комплексна амплітуда густини наведеного (вихрового) струму, $\dot{A}_\varphi^*$ – комплексна спряжена величина магнітного потенціалу.

На осі симетрії для теплової задачі приймалась гранична умова Неймана $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$.

Для кожного з матеріалів були задані свої електро- та теплофізичні властивості. Наявністю контактних електричних опорів між областями 1, 2 та 3 нехтувалося (контакт вважався ідеальним). Багатовиткова структура індуктора замінювалась суцільним неелектропровідним середовищем з заданою азимутальною компонентою густини струму [5]. Це є допустимим наближенням, оскільки обмотка індуктора була виконана проводом типу «літцендрат», який використовується для зменшення впливу таких явищ як скін-ефект і ефект близькості на розподіл струму в перерізі провідника. З огляду на незначну тривалість процесу нагрівання втратою тепла в навколишнє середовище з поверхонь валу, коміру букси та підшипника нехтувалося. Характеристики матеріалів вважались такими, що не залежать від напруженості магнітного поля та температури. Теплопередача через місця посадки деталей на вісь моделювалась сталим коефіцієнтом теплопередачі через площу контакту, так як розрахунки проводились на меншому проміжку часу, ніж необхідний для нагріву кільця підшипника до температури демонтажу. Розрахунки проводились для значень частоти струму 10 кГц, сили струму 90 А. Для всіх варіантів кількість витків обмотки становила 17.

На рис. 2 наведено діаграму розрахованого розподілу питомих тепловиділень вздовж поверхні деталей 1–3 для варіанту розміщення витків обмотки індуктора, що відповідав фізичному моделюванню, тобто для перших двох шарів по 7 витків з довжиною вздовж осі 63 мм та третього шару у 3 витки з довжиною 27 мм. Розрахунки показали, що при наведе-

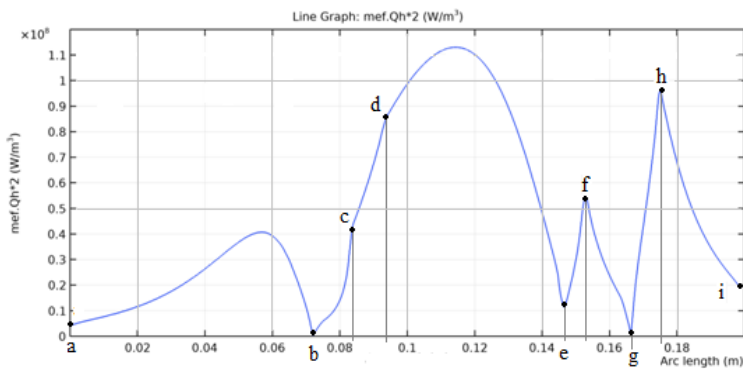


Рис. 2. Розрахований розподіл питомих тепловиділень вздовж поверхні деталей для варіанта геометрії обмотки індуктора, що використовувався при фізичному моделюванні

тепла, а максимум приблизно співпадає з серединою відрізка. В той же час на відрізку $[e-g]$, що відповідає борту кільця, виділяється значно менша кількість тепла.

На рис. 3 показані результати розрахунків температурного поля для зазначеного варіанта геометрії обмотки індуктора при часі нагріву, що становив 20 с. З аналізу результатів розрахунків видно, що в осьовому напрямку в середній частині кільця підшипника спостерігається максимальна температура зовнішньої поверхні кільця, яка становить 322 К. В цій області в площині, що перпендикулярна осі підшипника температура рівномірно спадає в напрямку внутрішньої поверхні кільця, а різниця між температурами зовнішньої і внутрішньої поверхонь кільця підшипника становить 21 К. В той же час максимальна температура буртику кільця, що спостерігається в точці f , становить 305 К, а в площині, що включає точку f і перпендикулярна осі підшипника, більша частина об'єму деталі майже не прогривається, різниця між температурами зовнішньої і внутрішньої поверхонь кільця підшипника становить 11 К. Зрозуміло, що при збільшенні потужності індукційного нагрівача абсолютні значення температури та температурних градієнтів збільшаться, але характер процесів буде повторюватись. А саме буде спостерігатись значний перегрів середньої частини кільця підшипника при недогріві області буртика кільця.

Оскільки розподіл питомих тепловиділень вздовж поверхні кільця підшипнику має суттєво нерівномірний характер, а прогрів деталі «вглиб» відбувається за рахунок теплопровідності, нагрів різних областей кільця в осьовому напрямку відбувається з різною швидкістю. Це призводить до значної різниці температури різних областей кільця в осьовому напрямку в кінці циклу нагріву, коли в найбільш нагрітій області температура досягає верхньої допустимої межі. З аналізу приведених вище розрахунків видно, що найбільш нагрітою є область середини кільця. А найменш нагрітою є верхня крайова область, що відповідає борту кільця.

Збільшити рівномірність нагріву всього об'єму кільця за рахунок використання теплопровідності, одночасно зменшуючи потужність та збільшуючи час нагріву, не вдається. До того ж при збільшенні часу нагріву спостерігався відчутний нагрів шийки осі колісної пари, що

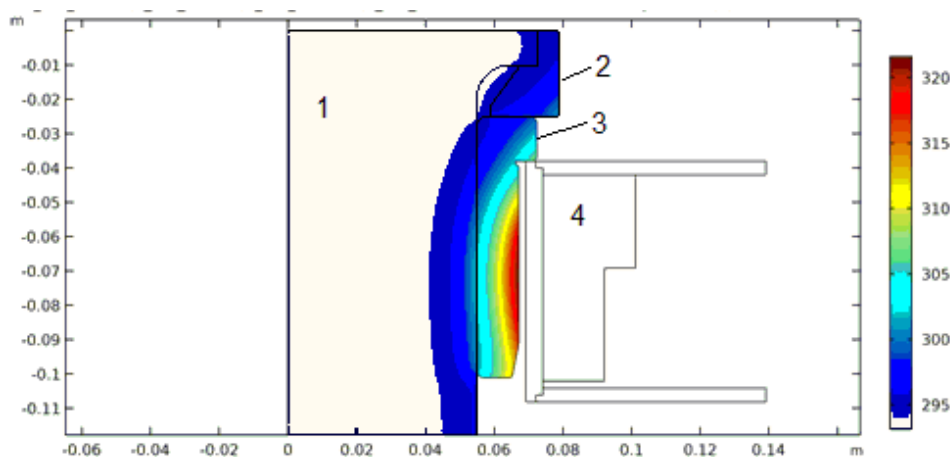


Рис. 3. Розподіл температури для першого варіанта геометрії обмотки

ускладнює демонтаж кільця підшипника з шийки осі.

Було проведено розрахунки процесу індукційного нагріву внутрішнього кільця підшипника для різних варіантів геометрії обмотки індуктора, тобто різних варіантів розміщення витків в обмотці. При цьому кількість витків обмотки не змінювалась. Параметри розглянутих варіантів геометрії обмотки індуктора, а саме дожини рядів обмотки та кількість витків у рядах, які пронумеровані від внутрішнього першого, наведені у таблиці. На рис. 5 та 6 зображено розташування обмотки індуктора 4 відносно внутрішнього кільця підшипника 3 для другого та третього варіантів відповідно. Третій варіант відрізняється від другого тим, що вся обмотка віддалена від кільця на 5 мм та зміщена на 5 мм в напрямку борта кільця таким чином, що частина обмотки розміщується над бортом кільця.

Варіант	Перший ряд, мм/витки	Другий ряд, мм/витки	Третій ряд, мм/витки	Четвертий ряд, мм/витки	Розподіл температури
1	60/7	60/7	27/3	0	рис. 3
2	60/7	51/6	18/2	18/2	рис. 5
3	60/7	51/6	18/2	18/2	рис. 6

На рис. 4 наведено розподіл поверхневої потужності для різних варіантів розміщення витків обмотки. Крива 1 відповідає першому варіанту, а криві 2 та 3 відповідно другому та третьому варіантам геометрії обмотки. Як видно з рисунку, для другого варіанту маємо несуттєве зменшення тепловиділень на відрізку $[c-e]$, який відповідає зовнішній поверхні кільця підшипника, та помірне збільшення тепловиділень на відрізку $[e-g]$, який відповідає борту кільця. Для третього варіанта геометрії обмотки на відрізку $[c-e]$ спостерігається суттєве зменшення тепловиділень, а на відрізку $[e-g]$ – більш суттєве збільшення тепловиділень.

Збільшення тепловиділень в комірці букси (деталь 2) для другого та третього варіантів геометрії обмотки не має негативних наслідків, так як для матеріалу коміра букси максимально можливі температури значно вищі, ніж для матеріалу кільця підшипника. Загалом для третього варіанта розподіл тепловиділень вздовж зовнішньої поверхні кільця підшипника набагато більш рівномірний, ніж для інших варіантів, що повинно сприяти і більш рівномірному прогріву всіх областей внутрішнього кільця підшипника.

Результати розрахунку розподілу температури в кінці нагріву для другого варіанту наведено на рис. 5, а для третього – на рис. 6. З аналізу результатів видно, що для другого варіанта розподіл температури практично повторює такий для першого варіанта, за винятком трохи більшого прогріву зони бурта кільця 3. Водночас розподіл температури в деталях для третього варіанта суттєво відрізняється від першого і другого варіантів і є більш рівномір-

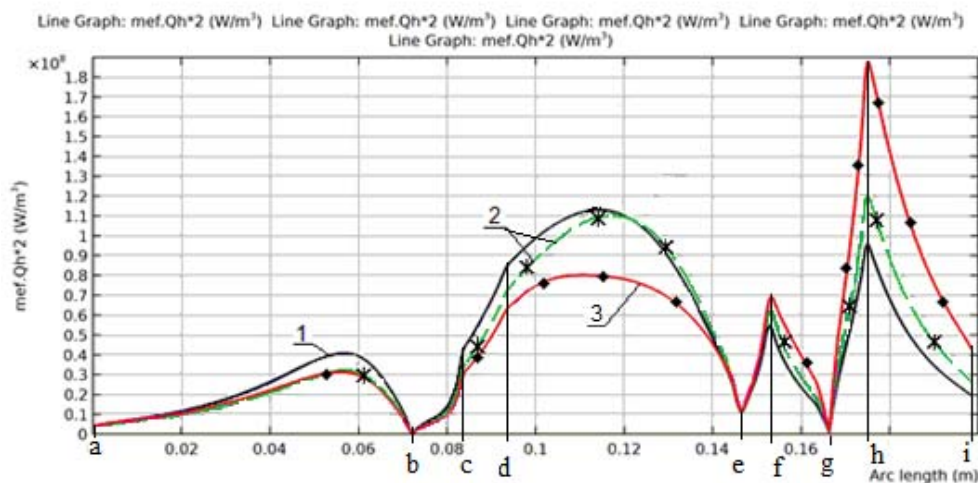


Рис. 4. Розподіл поверхневої потужності вздовж поверхні деталей для різних варіантів розміщення витків обмотки

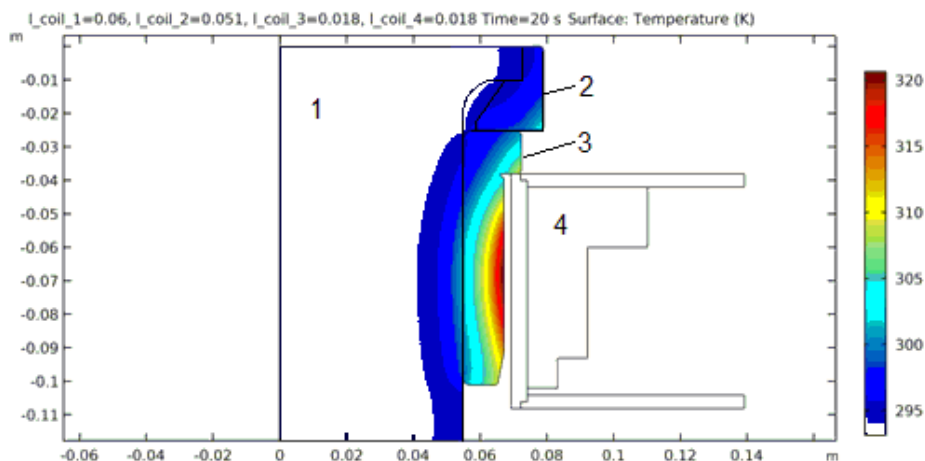


Рис. 5. Розподіл температури для другого варіанту геометрії обмотки

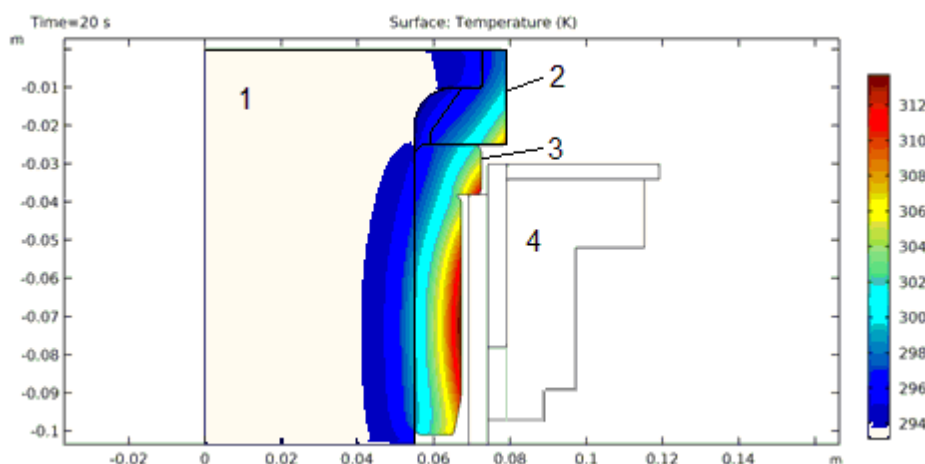


Рис. 6. Розподіл температури для третього варіанту геометрії обмотки

ним. Як слідує з аналізу наведених на рис. 6 результатів, при тих же сумарній потужності та часі нагріву різниця між зовнішньою і внутрішньою поверхнями кільця підшипника в середній, найбільш прогрітій зоні, становить 15 К, причому майже весь об'єм металу під буртом кільця також прогрівається, на відміну від варіантів 1 і 2 геометрії обмотки.

Таким чином встановлено, що при третьому варіанті геометрії обмотки індуктора вдається досягти більш рівномірного розподілу температури по об'єму кільця підшипника, а також меншої різниці між температурами зовнішньої і внутрішньої

поверхонь кільця в середній, найбільш прогрітій зоні, що дозволяє забезпечити необхідну динаміку нагріву та запобігти появі зон локального перегріву кільця підшипника під час ремонту колісних пар вагонів метрополітену.

Висновки. Враховуючи наведені результати, при виготовленні індуктора для нагріву внутрішніх кілець буксових підшипників, було прийнято для реалізації третій варіант геометрії обмотки. Виготовлений індуктор використовується в складі ЕТУ «Нагрівач індукційний НІ-8-20», що призначена для високочастотного індукційного нагріву внутрішніх кілець буксових підшипників та коміра букси перед демонтажем із шийки осі під час ремонту колісних пар вагонів метрополітену серії 81-714 і 81-717 та їх модифікації. ЕТУ використовується на Вагоноремонтному заводі КП «Київський метрополітен». Під час вводу в експлуатацію було визначено параметри технологічного процесу, що дозволило досягти впевненого демонтажу внутрішніх кілець буксових підшипників за час близько 45 с без появи зон локального перегріву кілець.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвинення теорії та розроблення заходів і технічних засобів для забезпечення якісного електропостачання в електричних мережах систем розподілу з відновлюваними джерелами енергії» (шифр «Емісія-3»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 09.07.2019 р., протокол № 12, КПКВК 6541030.

1. Електротермічна енергозберігаюча установка для високочастотного індукційного нагріву. А.К. Шидловський, А.Ф. Жаркін, В.Б. Павлов, В.О. Новський, А.Г. Пазєєв, С.О. Палачов, В.Є. Павленко, П.Ц. Бойко, Ю.П. Тугаєнко, Д.О. Малахатка. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ. 2015. Вип. 41. С. 13–23.

2. Павлов В.Б., Попов А.В., Павленко В.Е. Высоочастотный полупроводниковый источник питания электротехнологических установок. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ. 2008. Вип. 20. С. 48–49.
3. Гуцалюк В.Я., Зубков І.С. Системи фазового автопідлаштування частоти резонансних інверторів установок індукційного нагрівання за низької добротності коливального контуру. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ. 2019. Вип. 54. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.088>
4. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Гориславець Ю.М., Новський В.О., Глухенький О.І., Бондар О.І. Дослідження індукційного нагрівання з'єднаних з натягом металевих деталей. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ. 2018. Вип. 49. С. 60–68.
5. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике: монография. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.

DESIGN OF THE OPTIMUM GEOMETRY OF THE INDUCTOR WINDING FOR HEATING THE INNER RINGS OF AXLE BEARINGS IN WHEEL PAIRS OF CARRIERS IN THE METRO

A.F. Zharkin, A.H. Pazeiev, O.I. Bondar

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: pazeiev@ied.org.ua

The process of high-frequency induction heating of the inner rings of bushing bearings before disassembly, which is carried out during the repair work of wheel pairs of subway cars, has been investigated. Physical modeling of the heating process was carried out at a frequency of 10 kHz and using an inductor with a three-row winding of 17 turns, the length of which was equal to the length of the ring. It is shown that when varying the heating time and the power transmitted to the part, it is not possible to ensure the selection of an acceptable heating mode for normal disassembly from the point of view of ensuring repeatability of results and preventing local overheating of the part. Calculations were carried out in the COMSOL environment on the finite element model of the process of heating the ring of a bushing bearing with a constant number of turns for different variants of the geometry of the inductor winding, that is, the number of winding rows, the number of turns in a row and their location relative to the inner rings of the bearings. It is shown that the geometric shape of the inductor winding has a significant effect on the distribution of specific heat emissions along the surface of the parts. The optimized geometry of the winding was determined, which ensures the necessary heating dynamics and the absence of local overheating zones of the bearing rings, which allows to reduce the proportion of rejected parts. Ref. 5, fig. 6, table.

Keywords: geometry of the inductor winding, heating dynamics, electrothermal installation, induction heating, local overheating.

1. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Pavlov V.B., Novskiy V.O., Pazeiev A.G., Palachov S.O., Pavlenko V.E., Boyiko P.C., Tugaenko Y.P., Malakhatka D.O. Electrothermal energy saving unit for high-frequency induction heating. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2015. Iss. 41. Pp. 13–23. (Ukr)
2. Pavlov V.B., Popov A.V., Pavlenko V.E. High-frequency semiconductor power supply for electrical technology installations. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2008. Iss. 20. Pp. 48–49. (Rus)
3. Hutsaliuk V.YA., Zubkov I.S. Phase-locked loop systems of resonant inverters for induction heating installations under low q-factor of the oscillatory circuit. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2019. Iss. 54. Pp. 88–94. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.088>
4. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Goryslavets Y.M., Novskiy V.O., Glukhenkyi O.I., Bondar O.I. Investigation of induction heating of connected with tension metal details. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2018. Iss. 49. Pp. 60–68. (Ukr)
5. Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine. 2015. 305 p. ISBN 978-966-02-7671-0. (Rus)

Надійшла: 20.11.2024

Прийнята: 29.11.2024

Submitted: 20.11.2024

Accepted: 29.11.2024