

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ТА ЕНЕРГЕТИЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

УДК 621.365.5

ІНДУКЦІЙНЕ НАГРІВАННЯ З'ЄДНАНИХ З НАТЯГОМ ФЕРОМАГНІТНИХ ДЕТАЛЕЙ

А.К. Шидловський, акад. НАН України, **А.Ф. Жаркін**, чл.-кор. НАН України, **Ю.М. Гориславець**, докт. техн. наук, **В.О. Новський**, докт. техн. наук, **О.І. Глухенький**, канд. техн. наук, **О.І. Бондар**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: ugoris@ied.org.ua

Наведено результати розрахункового дослідження електромагнітних, теплових і внутрішньомеханічних (деформаційних) процесів при індукційному нагріванні феромагнітних деталей, з'єднаних між собою з натягом. Зазначені дослідження проводилися за допомогою запропонованої раніше математичної моделі на прикладі індукційного нагрівання, необхідного для демонтажу бандажу з колеса моторного вагона електропоїзда. Для здійснення такого демонтажу запропоновано застосувати індукційну електромагнітну систему у вигляді круглого індуктора з магнітопроводом, що живиться струмом підвищеної частоти. Визначено залежності електромагнітних параметрів та технічних характеристик такої системи від частоти струму джерела живлення. Бібл. 4, рис. 7, таблиця.

Ключові слова: індукційне нагрівання, математичне моделювання, електромагнітна система, демонтаж посаджених з натягом феромагнітних деталей.

Вступ. Як відомо, індукційне нагрівання є одним із найбільш ефективних заходів при проведенні операцій по монтажу і демонтажу вузлів і деталей, з'єднаних шляхом гарячої посадки (посадки з натягом). Звісно, індукційне нагрівання для демонтажу металевих деталей є більш складною технологічною операцією, ніж нагрівання для монтажу зазначених деталей під посадку. Якщо в останньому випадку досить лише окремо нагріти зовнішню деталь до встановленої температури, то при демонтажі необхідно в процесі нагрівання зовнішньої деталі обмежити істотне нагрівання внутрішньої. У багатьох випадках ця задача до того ж ускладнюється просторовими обмеженнями щодо розміщення індуктора. Саме тому при демонтажі деталей з натягом можуть бути ефективно використані переваги високочастотного індукційного нагрівання, що проявляються в можливості забезпечення локалізованого виділення теплоти у матеріалі деталей.

У роботі [1] шляхом мультифізичного моделювання електромагнітних, теплових і внутрішньомеханічних процесів було проведено дослідження індукційного нагрівання посаджених з натягом металевих деталей, яке необхідне для здійснення операції по демонтажу алюмінієвих дисків зі сталеної ступиці котка гусеничного транспортного засобу. Для проведення зазначеного монтажу запропоновано застосувати електромагнітну систему, яка дає змогу сконцентрувати тепловиділення у диску, практично не нагріваючи при цьому ступицю котка.

Представлена робота власне є продовженням статті [1] у напрямку подальшого дослідження індукційного нагрівання металевих деталей. Якщо у попередній роботі розглядався приклад індукційного нагрівання неферомагнітних деталей, то ця робота присвячена індукційному нагріванню деталей, виготовлених із феромагнітного матеріалу. Таким чином, **метою** цієї статті є розрахункові дослідження фізичних процесів при індукційному нагріванні з'єднаних з натягом феромагнітних деталей на основі запропонованої раніше математичної моделі.

Постановка задачі дослідження. Дослідження проводилися на прикладі індукційного нагрівання, необхідного для демонтажу бандажу з колеса моторного вагона електропоїзда.

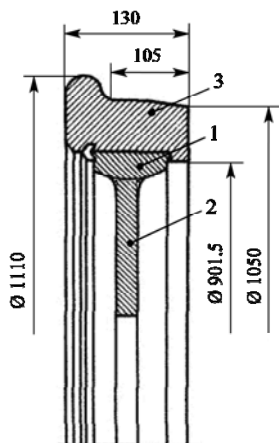


Рис. 1

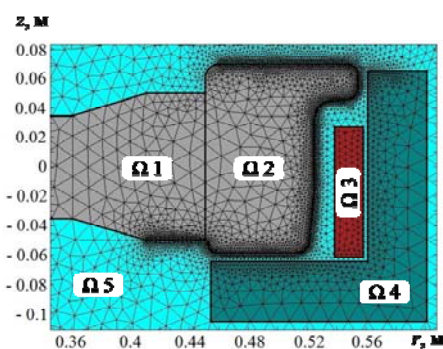


Рис. 2

Необхідність такої операції виникає тому, що після зношення бандажу він підлягає подальшій заміні. Загальний вигляд залізничного колеса з основними його розмірами представлено на рис. 1, де позначено: 1 – обід колеса; 2 – внутрішній диск; 3 – бандаж.

Монтаж бандажу на ободі колеса зазвичай виконується за допомогою гарячої посадки з натягом. При зовнішньому діаметрі обода 901,5

мм внутрішній діаметр бандажа в холодному стані (до посадки на колесо) становить 900 мм. Тому бандаж для посадки слід попередньо нагріти для збільшення його внутрішнього діаметра до розмірів, що перевищують діаметр обода. Після гарячої посадки натяг складає 0,75 мм, що забезпечує міцне з'єднання деталей. Відповідно, для того щоб мати можливість без особливих зусиль зняти бандаж з колеса, його слід нагріти до температури, необхідної для збільшення внутрішнього діаметра бандажа на величину, яка дещо перевищує 1,5 мм. Це є необхідним для компенсації натягу і створення реального зазору між деталями.

Для здійснення зазначеного демонтажу запропоновано проводити індукційне нагрівання бандажа з використанням електромагнітної системи у вигляді круглого індуктора з феромагнітним магнітопроводом, що живиться струмом підвищеної частоти. Магнітопровід пропонується виконати із восьми рівномірно розташованих по колу індуктора шихтованих із електротехнічної сталі окремих пакетів. Як і в попередній роботі, вибір конструкції індукційної системи проводився за умови її живлення від створеного в Інституті електродинаміки НАН України багатofункціонального джерела живлення – енергозберігаючої електротермічної установки ЕТУ-250 [2].

На рис. 2 представлено розрахункову область мультифізичної моделі для дослідження електромагнітних, теплових і внутрішньомеханічних процесів у системі індукційного нагрівання деталей, в якій відображено взаємне положення обода (область Ω_1) і бандажа (область Ω_2) залізничного колеса, а також індуктора (область Ω_3) з магнітопроводом (область Ω_4). Магнітопровід L-подібного поперечного перерізу разом з бандажем, який має гребінь висотою 30 мм та шириною 25 мм, утворюють замкнений феромагнітний контур для проходження магнітного потоку. Між бандажем і магнітопроводом при цьому утворюється вільна зона перерізом приблизно 30 на 105 мм, в якій розміщується котушка індуктора. У випадку використання для котушки мідної трубки зовнішнім діаметром 10 мм з урахуванням електроізоляційних та бандажних елементів котушки та наявності теплоізоляції між нею і бандажем колеса вона може мати до 20 витків. Додатковою перевагою наведеної компоновки системи є можливість вільного (безперешкодного) підведення індуктора до залізничного колеса або, навпаки, – колеса до індуктора.

Відомо, що використання шихтованого феромагнітного магнітопроводу накладає обмеження на вибір частоти струму живлення при індукційному нагріванні. Граничною при цьому вважається значення частоти у 10 кГц [3]. Підвищення частоти супроводжується зростанням втрат на вихрові струми та гістерезис у магнітопроводі, тому за рівних умов перевагу в цьому сенсі слід надавати вибору більш низьких частот.

Чисельне розв'язання пов'язаних між собою електромагнітної, теплової і внутрішньомеханічної (деформаційної) задач проводилось шляхом використання наведеної в роботі [1] математичної моделі за наступним алгоритмом. Спочатку розв'язувалася стаціонарна нелінійна електромагнітна задача, в результаті чого визначалися потужність внутрішніх джерел тепла в металевих деталях та електромагнітні параметри індукційної системи нагрівання.

Задача розв'язувалася при заданій напрузі на індукторі, що дає змогу безпосередньо узгоджувати індукційну систему з джерелом живлення. Після цього сумісно розв'язувалися нестационарні теплова і механічна задачі, що дало можливість у кінцевому рахунку визначити відносне зміщення деталей у процесі нагрівання. Слід зазначити, що електромагнітна задача розв'язувалася для всієї наведеної на рис. 2 розрахункової області, а теплова та механічна – тільки для металевих деталей, тобто для областей обода та бандажа.

Як і в роботі [1], чисельний розрахунок електромагнітної задачі виконувався при заданій напрузі на індукторі $U = 600$ В, яка відповідає амплітудному значенню еквівалентної синусоїди вихідної напруги установки ЕТУ-250. Основну криву намагніченості $B(H)$ для феромагнітного матеріалу (конструкційної сталі) деталей та побудовану на її основі відповідно до усередненого енергетичного методу (average energy method [4]) ефективну криву $B_{\text{еф}}(H)$, що використовувалася при розрахунках нелінійної електромагнітної задачі, представлено на рис. 3. Використання ефективної кривої намагніченості дає змогу, не вдаючись до розрахунків нестационарних процесів, які потребують великих розрахункових ресурсів, обчислювати електромагнітне поле для систем з нелінійними феромагнітними матеріалами в частотній області.

Залежність фізичних характеристик матеріалів деталей від температури в розрахунках не враховувалася. Приймалися їх усереднені значення під час нагрівання у визначеному діапазоні температур. У даному випадку для матеріалу бандажа такими вважалися значення характеристик при температурі 200 °С. У тепловій задачі, враховуючи наявність натягу при посадці, термічний опір між бандажем і ободом колеса не враховувався. Розрахунок проводився в адиабатичному режимі, тобто втратами тепла з поверхні колеса нехтувалося.

Сумісний розрахунок теплової і механічної задач проводився з плином часу до появи проміжку між ободом та бандажем (внаслідок термічної деформації) $\Delta = 1$ мм. Вважалося, що в цей проміжок умовно входить натяг, що дорівнює $0,75$ мм, (нагрівання спочатку має зняти напружений стан бандажа) і реальний проміжок для вільного роз'єднання деталей, який складає $0,25$ мм.

Результати моделювання. У таблиці представлено результати розрахунків індукційного нагрівання бандажа при узгодженій зміні частоти струму живлення f та кількості витків індуктора w , що забезпечують для всіх варіантів розрахунку протікання струму в індукторі $I = 600$ А (амплітудне значення).

w	f , кГц	S , кВА	$P_{\text{банд}}$, кВт	$P_{\text{інд}}$, кВт	$t_{\text{нагр}}$, с	$T_{\text{макс}}$, °С
16	0,44	93,7+152,2i	87,2	6,5	355	409
14	0,67	88,6+153,3i	83,1	5,5	368	405
12	1,03	84,8+158,2i	80,0	4,8	383	384
10	1,74	78,1+161,7i	74,1	4,0	410	382
8	3,2	69,3+165,5i	66,1	3,2	463	376
6	6,7	58,9+169,3i	55,9	3,0	530	370

Дотримання незмінних значень напруги та струму в індукторі забезпечувалось проведенням розрахунків при постійній повній потужності індуктора $\text{Abs}(S) = 0,5UI = 0,5 \cdot 600 \cdot 600 = 180$ кВА. Як видно з представлених у таблиці даних, розглядався діапазон частот від $0,44$ до $6,7$ кГц, що супроводжувався зміною кількості витків відповідно від 16 до 6 .

Із збільшенням частоти струму живлення в зазначеному діапазоні активна потужність електромагнітної системи суттєво зменшується, а реактивна – збільшується. Залежність втрат у котушці індуктора $P_{\text{інд}}$ та тепловиділень у бандажі $P_{\text{банд}}$ від частоти представлено на рис. 4. При незмінному значенні струму в котушці втрати в ній спочатку зменшуються про-

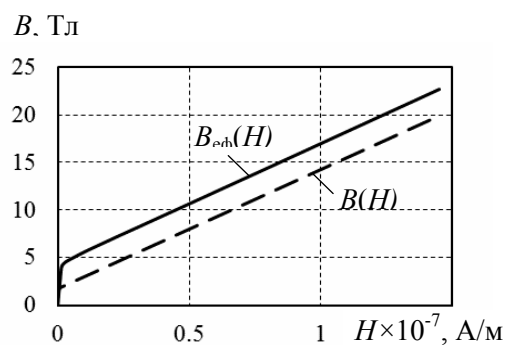


Рис. 3

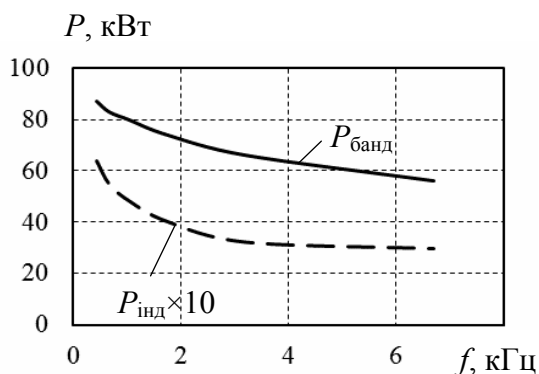


Рис. 4

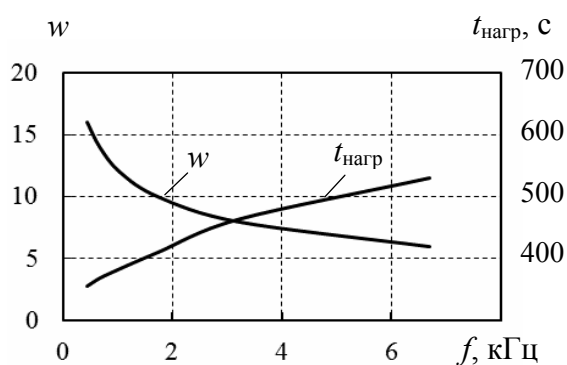


Рис. 5

порційно зменшенню кількості витків. При подальшому збільшенні частоти (вище 4 кГц), коли глибина проникнення електромагнітного поля в мідь стає меншою 1 мм (товщини стінки мідної трубки), на втрати в індукторі починає все більше впливати активний опір трубки.

Залежності від частоти кількості витків індуктора w та часу нагрівання $t_{\text{нагр}}$, протягом якого досягається проміжок між бандажем та ободом $\Delta = 1$ мм, представлено на рис. 5. З наведеної таблиці видно, що бандаж нагрівався до температури, значення якої забезпечувало можливість його демонтажу, впродовж 6-9 хв. Збільшення тривалості нагрівання $t_{\text{нагр}}$, яке забезпечує досягнення необхідного проміжку Δ , зі зростанням частоти пов'язано зі зменшенням потужності тепловиділень у бандажі.

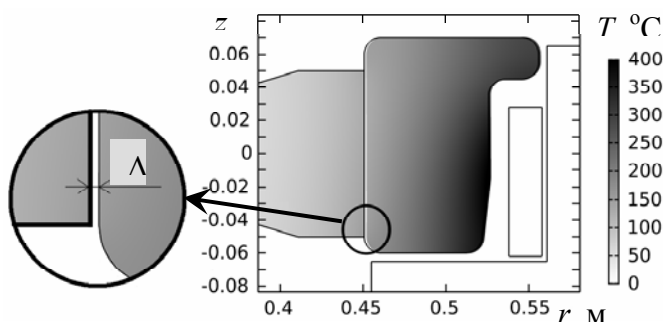


Рис. 6

Максимальна температура на поверхні бандажа в кінці нагрівання досягається при частоті 0,44 кГц, коли тепловиділення в ньому максимальні. Розподіл температури при здійсненні демонтажу на момент $t = t_{\text{нагр}}$ на частоті 0,44 кГц представлено на рис. 6. Слід відзначити достатньо високу середню температуру обода на цей момент, яка сягає 80 °С. Середня температура бандажа при цьому складає 233 °С.

Залежності коефіцієнта корисної дії η та коефіцієнта потужності $\cos \phi$ електромагнітної системи від частоти представлено на рис. 7. У розглянутому діапазоні частот ККД системи практично не змінюється. Спочатку він дещо збільшується від мінімального значення 93,2 % при 0,44 кГц до 95,4 % при 3,2 кГц. Після 4 кГц, як уже зазначалося, відбувається зростання активного опору котушки індуктора і ККД починає дещо знижуватися, досягаючи при частоті 6,7 кГц 95 %. Зазначимо, що наведені значення ККД не враховують втрати на вихрові струми та гістерезис у шихтованому магнітопроводі.

На відміну від ККД коефіцієнт потужності системи монотонно змінюється в значно ширших межах – від 0,53 при 0,44 кГц до 0,33 при 6,7 кГц, маючи більш високі значення при низьких частотах.

$\cos \phi; \eta$

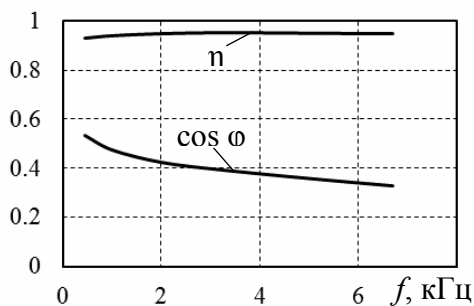


Рис. 7

Таким чином, для зняття бандажу із залізничного колеса моторного вагона електропоїзда пропонується використати електромагнітну систему у вигляді круглого індуктора з магнітопроводом, що складається з низки рівномірно розташованих по колу індуктора шихтованих із електротехнічної сталі окремих пакетів. Виходячи з більш високого значення коефіцієнта потужності та меншого рівня втрат у магнітопроводі при низьких частотах, пропонується вибрати робочу частоту $f = 0,5$ кГц, яка є мінімальною частотою для перетворювача ЕТУ-250.

1. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Гориславец Ю.М., Новський В.О., Глухенький О.І., Бондар О.І. Дослідження індукційного нагрівання з'єднаних між собою металевих деталей. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2018. Вип. 49. С. 60–68.
2. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Павлов В.Б., Новський В.О., Пазєєв А.Г., Палачов С.О., Павленко В.С., Бойко П.С., Тугасенко Ю.П., Малахатка Д.О. Энергозберігаючі електротермічні установки для високочастотного індукційного нагрівання. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2015. Вип. 41. С. 13–22.
3. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. Москва–Ленинград: Энергия, 1965. 552 с.
4. <https://www.comsol.ru/release/5.2>.

УДК 621.365.5

А.К. Шидловский, акад. НАН Украины, **А.Ф. Жаркин**, чл.-корр. НАН Украины, **Ю.М. Гориславец**, докт. техн. наук, **В.А. Новский**, докт. техн. наук, **А.И. Глухенький**, канд. техн. наук, **А.И. Бондар**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ СОЕДИНЕННЫХ С НАТЯЖЕНИЕМ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Приведены результаты расчетного исследования электромагнитных, тепловых и внутримеханических (деформационных) процессов при индукционном нагреве ферромагнитных деталей, соединенных между собой с натяжением. Указанные исследования проводились с помощью предложенной ранее математической модели на примере индукционного нагрева, необходимого для демонтажа бандажа с колеса моторного вагона электропоезда. Для осуществления такого демонтажа предложено применить индукционную электромагнитную систему в виде круглого индуктора с магнитопроводом, питающуюся током повышенной частоты. Определены зависимости электромагнитных параметров и технических характеристик такой системы от частоты тока источника питания. Библи. 4, рис. 7, таблица.

Ключевые слова: индукционный нагрев, математическое моделирование, электромагнитная система, демонтаж посаженных с натяжением ферромагнитных деталей.

A.K. Shydlovskiy, A.F. Zharkin, Y.M. Goryslavets, V.O. Novskiy, O.I. Glukhenkiy, O.I. Bondar

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

INDUCTION HEATING OF CONNECTED WITH TENSION METAL DETAILS

Results of computational investigation of electromagnetic, heat and internally mechanical (deformation) processes during induction heating of ferromagnetic details, connected with tension are presented. These investigations were conducted on the basis of proposed earlier mathematical model as an example of induction heating, that is necessary for dismounting of bandage from the wheel of a train car. For performing of such dismounting process it is proposed to apply induction electromagnetic system that looks like round inductor with magnetic conductor, that powered by current of increased frequency. Electromagnetic parameters and technical characteristics of such system depending on frequency of power supply have been determined. References 4, figures 7, table.

Key words: induction heating, mathematical modelling, electromagnetic system, dismounting of planted with tension ferromagnetic details.

1. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Goryslavets Y.M., Novskiy V.O., Glukhenkiy O.I., Bondar O.I. Investigation of induction heating of connected with tension metal details. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2018. Vip. 49. Pp. 60–67. (Ukr)
2. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Pavlov V.B., Novskiy V.O., Pазієєв А.Н., Palachov S.O., Pavlenko V.Ye., Boiko P.S., Tuhaienko Yu.P., Malahatka D.O. Energy saving electro thermal installations for high frequency induction heating. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. Kyiv. 2015. Vip. 41. Pp. 13–22. (Ukr)
3. Babat G.I. Induction heating of metals and its industrial application. Moskva-Leningrad: Energiya, 1965. 552 p. (Rus)
4. <https://www.comsol.ru/release/5.2>.

Надійшла 05.03.2018

Received 05.03.2018