

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ДРЕШПАК НАТАЛІЯ СТАНІСЛАВІВНА**

**УДК 621.365.5**

**РЕЖИМИ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН З  
РОЗНІМНИМ З'ЄДНАННЯМ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ**

**05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Дніпропетровськ – 2010**

**Дисертацією є рукопис.**

Роботу виконано на кафедрі метрології та інформаційно-вимірювальних технологій Національного гірничого університету (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

**Півняк Геннадій Григорович**, академік НАН України, професор, завідувач кафедри систем електропостачання Національного гірничого університету (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

**Офіційні опоненти:**

**Сінолиций Анатолій Пилипович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого електропривода Криворізького технічного університету Міністерства освіти і науки України.

**Колб Антон Андрійович**, кандидат технічних наук, професор кафедри електропривода Національного гірничого університету (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться ” \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2010 р. о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному гірничому університеті (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49600 м. Дніпропетровськ, пр. К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного гірничого університету Міністерства освіти і науки України за адресою: 49600 м. Дніпропетровськ, пр. К. Маркса, 19.

Автореферат розіслано ” \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2010 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 08.080.07,  
к.т.н., доц.

О.О. Азюковський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Циліндричні з'єднання сталевих деталей машин (втулки з валом), виконані посадкою з натягом, широко використовують в машинобудуванні. Посадки втулок на вал часто виконують у вигляді буртів, бандажів, що фіксують положення інших деталей на валу і перешкоджають їх осьовому переміщенню. До з'єднань такого типу відносять також посадки внутрішніх кілець підшипників на вал.

При ремонті машин, їх випробовуванні доводиться виконувати демонтаж з'єднань. Розпресування з'єднань здійснюють за рахунок осьових навантажень, що при використанні знімачів супроводжується пошкодженням насадочних поверхонь у вигляді виникаючих поверхневих подряпин. Після декількох ремонтів вал стає непридатним для використання. Значні обсяги демонтажних робіт призводять до суттєвих матеріальних втрат.

Небажаних наслідків дозволяє уникнути нагрівання з'єднань деталей. В результаті нагрівання втулка розширюється і її знімають з валу без пошкоджень поверхонь. Одним із найбільш ефективних методів демонтажу є індукційний нагрів з'єднань деталей. Демонтаж здійснюють з мінімальними витратами часу та енергії, що характерно для систем прямого нагріву.

В той же час, режими нагріву з'єднання, що призводять до ліквідації натягу посадки і виникнення умов, необхідних для демонтажу вузла, не досліджені. Індукційний нагрів з'єднань циліндричних деталей характеризується тим, що поряд з електромагнітними і тепловими процесами в системі протікають процеси температурної деформації, які призводять до розширення втулки. Це суттєво впливає на умови теплообміну втулки з валом і визначає досягнутий рівень температур. Відсутність теоретично обґрунтованих параметрів режиму призводить до застосування в практиці індукційного нагріву систем з невдалими конструктивними рішеннями і порівняно низькими техніко-економічними показниками.

Таким чином виникає необхідність виконання актуальних досліджень, спрямованих на визначення раціональних параметрів режиму нагріву, забезпечення на цій основі ефективного демонтажу з'єднань та покращення техніко-економічних показників індукційної установки (зменшення ваги, розмірів, вартості).

Проведені дослідження є логічним продовженням робіт в області електротехнологій, виконаних науковою школою академіка НАН України Г.Г. Півняка.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Дослідження за темою дисертації виконані відповідно планів науково-дослідних робіт Національного гірничого університету: «Обґрунтування енергоресурсозберігаючих режимів і принципів керування електроенергетичних комплексів гірничо-металургійних підприємств» (№ держреєстрації 0108U000539) та «Підвищення ефективності використання електроенергії в технологічних системах» (№ держреєстрації 01010U000529).

**Мета й завдання дослідження.** Метою роботи є визначення раціональних режимів індукційного нагріву, підвищення техніко-економічних показників індукційної установки та забезпечення високих експлуатаційних характеристик. Для досягнення мети необхідно:

- обґрунтувати вимоги до індукційного нагріву з'єднань деталей з метою їх демонтажу та визначити умови їх виконання;
- розробити математичну модель для аналізу електромагнітних процесів у системі індукційного нагріву та визначити на цій основі раціональні значення електричних параметрів, що забезпечують ефективний демонтаж з'єднання деталей;
- розробити математичну модель для аналізу впливу параметрів електромагнітного поля на характеристики теплового процесу. Встановити закономірності протікання

взаємозв'язаних електромагнітного, теплового процесів, а також процесу температурної деформації, що забезпечує демонтаж посадки;

- виконати експериментальні дослідження, що підтверджують достовірність отриманих в роботі наукових результатів.

**Об'єкт досліджень** – взаємозв'язані електромагнітні, теплові процеси та температурна деформація у системі індукційного нагріву деталей, з'єднаних посадкою з натягом.

**Предмет досліджень** – параметри режиму індукційного нагріву деталей, з'єднаних посадкою з натягом.

**Методи досліджень.** Для розв'язання наукових завдань використано: аналітичний метод розрахунку – для дослідження електромагнітних процесів в одновимірному полі; метод фізичного моделювання – для вирівнювання напруженості магнітного поля на поверхні втулки та ідентифікації контактної теплової провідності, оцінки достовірності результатів математичного моделювання; числовий метод розрахунку з формуванням кінцево-різницевого рівняння та застосуванням методу прогонки – для дослідження теплового процесу індукційного нагріву; метод інтерполяції – для встановлення залежностей контактної теплової провідності від різниці температур контактуючих поверхонь; метод оптимізації – при обґрунтуванні вимог до процесу демонтажу з'єднань та визначенні раціональних режимів.

**Наукове положення, що виносяться на захист:**

1. Електрична питома поверхнева потужність індукційного нагріву, що забезпечує демонтаж з'єднання деталей, прямо пропорційна ідентифікованому значенню контактної теплової провідності та необхідній для виконання технологічної операції різниці температур між контактними поверхнями втулки і валу.

**Наукові результати дослідження та їхня новизна:**

1. Обґрунтування сукупності вимог до процесу демонтажу з'єднання деталей (надійність, технологічність, енергоефективність) виходячи із специфіки виконання електротехнологічної операції, наступне визначення особливих умов їх реалізації (забезпечення одновимірності магнітного поля, демонтаж з'єднання в перехідному режимі нагріву) є основою вибору раціональних параметрів технологічного процесу, що покращують техніко-економічні та експлуатаційні характеристики індукційної установки.

2. Рівномірність напруженості магнітного поля на поверхні втулки досягається зв'язуванням кроку намотування обмотки індуктора зі значеннями електрорушійних сил в секціях вимірювальної обмотки і забезпечує одночасну ліквідацію натягу у всіх точках контактної поверхні, що сприяє підвищенню ефективності демонтажу з'єднання.

3. Максимальна глибина проникнення електромагнітної хвилі не повинна перевищувати товщину втулки, що відповідає дії джерел тепла у втулці і виключає таку дію у валу. Уведене обмеження забезпечує швидкий ріст різниці температур в зоні з'єднання втулки з валом, що прискорює процес демонтажу, сприяє покращенню його показників ефективності.

4. На підвищених частотах струму індуктора необхідна для демонтажу з'єднання різниця температур в зоні контакту деталей досягається при більш

високому рівні температури зовнішньої поверхні втулки. Встановлена залежність пояснюється більш вираженим поверхневим ефектом.

5. Розрахункова нелінійна залежність тривалості циклу нагріву з'єднання деталей від значення питомої поверхневої потужності характеризується суттєвим ростом тривалості в області порівняно низьких значень потужності. Значне (на порядок) зменшення в процесі нагріву контактної теплової провідності супроводжується зниженням тривалості циклу нагріву до одиниць або десятків секунд.

6. В процесі індукційного нагріву з'єднання деталей швидкість росту різниці температур в зоні контакту підвищується, що зумовлено залежністю від цієї різниці контактної теплової провідності і призводить до зменшення тривалості циклу нагріву. Гальмування росту різниці температур на початковому етапі пояснюється значним натягом посадки і високою контактною тепловою провідністю.

### **Практичні результати дослідження:**

1. Виконані теоретичні дослідження склали основу для створення методики розрахунку питомої поверхневої потужності на основі ідентифікованого значення теплової провідності, алгоритму визначення цієї провідності з урахуванням вимірюваних на реальному об'єкті значень температур.

2. Використання створеної методики вирівнювання напруженості поля на поверхні втулки та пристрою, що здійснює таке вирівнювання безпосередньо на об'єкті для демонтажу, забезпечило рівномірне розташування джерел тепла на її поверхні, сприяло підвищенню ефективності електротехнологічної операції.

3. Розробка способу управління операцією демонтажу з'єднання деталей, що полягає у зміні частоти слідування імпульсів струму індуктора, створила можливість для реалізації форсованого нагріву, забезпечила зменшення його тривалості.

Результати роботи у вигляді методики розрахунку питомої поверхневої потужності нагріву, вибору частоти струму індукційної установки впроваджені ВАТ «Український науково-дослідний інститут силової електроніки «Преобразователь»» та використані ВАТ "Трак – Авторитет - Днепропетровск".

**Достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій доведена відповідністю припущень, прийнятих у математичних моделях, завданням моделювання та умовам експлуатації індукційних установок, вибором прийнятних методів моделювання електромагнітних та теплових процесів, застосуванням ефективного алгоритму розрахунку ідентифікованого параметра, проведенням фізичного моделювання на реальному об'єкті і підтверджується результатами співставлення теоретичних і експериментальних досліджень, де похибка розрахунку параметрів режиму не перевищує 5 %.

**Особистий внесок здобувача** полягає в обґрунтуванні вимог до процесу демонтажу з'єднань та умов їх виконання, обґрунтуванні та застосуванні методів розрахунку електромагнітних та теплових процесів у системі нагріву, встановленні невідомих раніше зв'язків між параметрами процесів, визначенні раціональних параметрів режиму, розробки методик та алгоритмів їх розрахунку, створенні нового пристрою та способу демонтажу

з'єднань деталей, визначенні економічної ефективності рішень, проведенні експериментальних досліджень та оцінці достовірності отриманих наукових результатів, впровадженні їх у виробництво.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні матеріали і результати, одержані в дисертаційній роботі, доповідались і були схвалені на наступних науково-технічних конференціях: П'ята всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації, енергозбереження» (м. Кременчук, 2007 р.); Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів та молодих учених «Молода академія – 2008» (м. Дніпропетровськ, 2008 р.); 4-й Міжнародний форум для студентів «Розширюючи обрії» (м. Дніпропетровськ, 2009 р.); Науковий симпозиум «Неделя горняка 2010» (м. Москва, 2010 р.); Сьома всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації, енергозбереження» (м. Кременчук, 2010 р.); 1-а Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих учених «Трансфер технологій: від ідеї до прибутку» (м. Дніпропетровськ, 2010 р.); 1-а науково-практична конференція «Наукова весна» (м. Дніпропетровськ, 2010 р.); семінарах Наукової Ради Національної АН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» (Дніпропетровськ, 2008, 2009, 2010 рр.).

**Публікації.** Основні положення й результати роботи опубліковано в 15 друкованих працях, з них 8 – статі у фахових виданнях, 2 – патенти України, 4 – матеріали наукових конференцій, 1 – в інших виданнях.

**Структура й обсяг роботи.** Повний обсяг дисертації становить 166 сторінки друкованого тексту, до складу яких входять 148 сторінок основної частини, що складається зі вступу, 5 розділів і загальних висновків роботи; список використаних джерел з 117 найменувань на 12 сторінках, 5 додатків на 6 сторінках, 39 рисунків, 7 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні задачі досліджень, визначено наукову новизну та практичну цінність, наведено відомості щодо апробацій роботи і публікацій.

**У першому розділі** визначений об'єкт та предмет дослідження, сформульована наукова задача. Виділена базова структура об'єкту, що підлягає дослідженню (рис.1).

Обмотка 1 індуктора індукційної установки розташована на поверхні тонкостінної втулки 2 однакової товщини, що з'єднана з валом 3 посадкою з натягом. Режими нагріву втулки слід пов'язувати з процесами її температурної де-

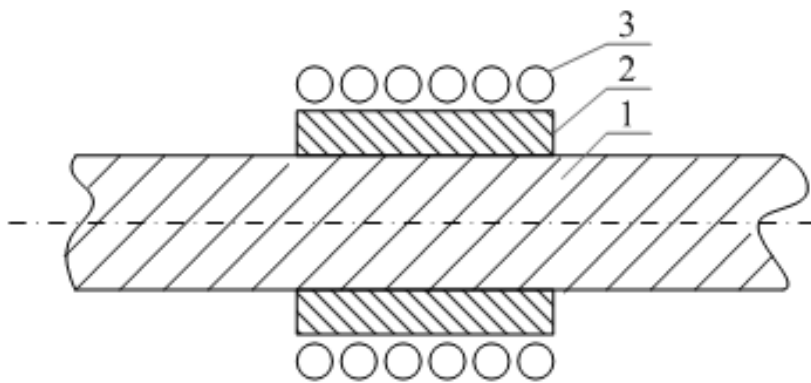
Рис. 1. Система „індуктор – збірка”

1 – вал; 2 – втулка; 3 – обмотка індуктора

формації, які призводять до ліквідації натягу посадки і створюють умови для

демонтажу з'єднання. При наявності посадки з натягом безпосередній контакт між втулкою і валом відбувається завдяки виступаючим часткам жорстких поверхонь. В процесі нагріву втулки і її розширення натяг посадки поступово ліквідується. При цьому площа безпосереднього контакту твердих тіл зменшується, що супроводжується суттєвою зміною умов теплопередачі. Особливість демонтажу з'єднання деталей, що пов'язана із зміною контактної теплової провідності  $\alpha_c$  між втулкою і валом, повинна враховуватися при аналізі процесу нагріву.

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що взаємопов'язані електромагнітні, теплові та механічні процеси в такій системі раніше не розглядалися. Не визначені критерії ефективності операції демонтажу. Тому необхідно сформулювати вимоги до процесу нагріву і визначити умови їх виконання. Виникає необхідність визначення існуючих залежностей між параметрами електромагнітного поля і температурними режимами нагріву, а також



визначення впливу окремих параметрів поля на характер протікання процесу нагріву. Це дозволить встановити раціональні режими нагріву, забезпечити на цій основі ефективний демонтаж з'єднання та покращити техніко-економічні показники індукційної установки.

Управління процесом

індукційного нагріву може здійснюватися шляхом зміни параметрів струму індуктора. Розглянуті варіанти використання синусоїдального та імпульсного струму. При введенні такого управління доцільно орієнтуватися на варіант, що передбачає зміну частоти слідування імпульсів струму. Для розгляду варіанту необхідно забезпечити можливість моделювання теплового процесу при імпульсній дії джерел тепла на поверхні втулки.

**В другому розділі** обґрунтовані загальні вимоги до індукційного нагріву з'єднань деталей, визначені умови і шляхи їх виконання.

Вибраний режим нагріву повинен забезпечити надійність операції демонтажу (її обов'язкову реалізацію). Увага приділяється температурному режиму нагріву в області з'єднання втулки з валом, оскільки саме тут відбувається процес ліквідації натягу посадки при розширенні втулки. Важливо розглядати не окремі локальні області з'єднання, а поверхню в цілому, бо демонтаж передбачає ліквідацію натягу в межах всієї площі контактної поверхні. Невдало вибраний режим може призвести до того, що в окремих локальних областях, або по всій поверхні з'єднання натяг не буде ліквідований, що не призведе до реалізації операції демонтажу. Температурний режим нагріву визначається конфігурацією і параметрами діючого магнітного поля. Тому рішення задачі слід шукати в обґрунтуванні необхідних характеристик магнітного поля і визначенні на цій основі умов формування режиму нагріву.

Сучасні засоби демонтажу з'єднань повинні гарантувати високу технологічність операції, яка, в першу чергу, визначається часом, що витрачається на її проведення. Ця

характеристика особливо важлива при обмеженнях тривалості ремонтних робіт. Скорочення часу нагрівання деталей призводить до зменшення витрат енергії на проведення технологічної операції і може бути досягнуто збільшенням потужності нагріву, тобто застосуванням джерела живлення підвищеної номінальної потужності. Цей шлях вирішення проблеми веде до збільшення вартості джерела живлення, зниження його техніко-економічних показників. Особливо це відчутно при використанні пристроїв силової перетворювальної техніки (перетворювачів частоти). Тому при виборі режиму слід шукати компромісне рішення, яке забезпечить прийнятний показник номінальної потужності джерела живлення при незначній тривалості нагрівання.

Забезпечення надійності, технологічності та енергоефективності операції демонтажу, зменшення номінальної потужності джерела живлення складають перелік сформульованих вимог, виконання яких покращує техніко-економічні показники установки індукційного нагріву та визначає її високі експлуатаційні характеристики. Сформульовані загальні вимоги до індукційного нагріву передбачають пошук умов і конкретних шляхів їх виконання. Це можливо на основі аналізу температурних режимів ліквідації натягу посадки, дослідження картини магнітного поля.

З урахуванням різноманіття видів посадок, а також характеристик сталевих виробів визначена необхідна для демонтажу з'єднання різниця температур  $\Delta T_T$  між внутрішньою поверхнею втулки і поверхнею валу.

Виходячи з осової симетрії системи (симетрії щодо осі валу) значення різниці температур  $\Delta T_T$  доцільно отримати одночасно у всіх точках поверхонь, що сполучаються. Це виключить перегрів окремих зон сполучення, скоротить час на ліквідацію натягу посадки по всій його поверхні. Звідси очевидна необхідність рівномірного розподілу джерел тепла на зовнішній поверхні втулки, що досягається реалізацією магнітного поля з однаковою напруженістю в усіх точках поверхні валу. В системі індукційного нагріву циліндричних з'єднань деталей розміри втулки, що нагрівається, обмежені. Тому тут виникають крайові ефекти, які не сприяють вирівнюванню інтенсивності поля. Отримання необхідної картини поля можливе шляхом зміни кроку намотування індуктора. Задача полягає у тому, щоб визначити необхідні показники зміни цього параметра. Враховуючи різноманіття конструктивних рішень з'єднань, запропоновано проведення фізичного моделювання електромагнітних процесів безпосередньо на реальному об'єкті і отримання на цій основі магнітного поля необхідної конфігурації, виходячи з конкретних вимірювань напруженості поля на поверхні, що нагрівається. Вимірювання здійснюються за допомогою секціонованої обмотки, розташованої на поверхні втулки. Значення ЕРС, наведених в кожній із секцій вимірювальної обмотки, дозволяють судити про напруженість поля на участку втулки, де розташована відповідна секція. При рівності ЕРС в кожній із секцій отримують магнітне поле однакової напруженості. В експерименті застосовують струм частотою 50 Гц, протікання якого через індуктор не призводить до суттєвого нагріву втулки і ліквідації натягу посадки. Такий режим нагріву дозволяє застосувати просте малопотужне обладнання, що має незначну вартість. Розроблена методика формування магнітного поля, яка розкриває суть і послідовність дій, що виконуються в процесі проведення експерименту. Використання цього поля в діючій індукційній установці для демонтажу з'єднання, забезпечує незмінне для всієї поверхні втулки значення питомої поверхневої потужності  $P_0$ , дозволяє використовувати одновимірні моделі, що спрощує моделювання як електромагнітних, так і теплових процесів.

Показано, що вибір рівня  $P_0$  суттєво впливає на характер протікання теплового процесу. Запропоновано встановити значення  $P_0$ , виходячи із забезпечення необхідного рівня  $\Delta T_T$  в перехідному режимі нагріву. При цьому необхідні для демонтажу з'єднання температурні умови зберігаються і в стаціонарному режимі. Ця умова визначення  $P_0$



важлива для скорочення часу нагрівання, підвищення надійності та енергоефективності технологічної операції.

**Третій розділ** присвячений моделюванню електромагнітних процесів у системі нагріву. Обґрунтований метод моделювання, розроблений алгоритм визначення питомої поверхневої потужності, частоти струму, та інших параметрів, що забезпечують умови, необхідні для демонтажу з'єднання.

Встановлено, що в умовах, характерних для індукційного нагріву деталей з метою їх демонтажу, необхідно розглядати поздовжнє одновимірне магнітне поле, яке діє в суцільному циліндрі. Обґрунтована доцільність використання аналітичного методу розрахунку електромагнітних процесів у системі як такого, що урахує особливості, характерні для технології індукційного нагріву з'єднань (одновимірність електромагнітного поля, обмеженість глибини його проникнення товщиною втулки  $\Delta_e$ ) і забезпечує високу інформативність та точність результату. Введено та обґрунтовано припущення при формуванні аналітичних залежностей для розрахунку питомої поверхневої потужності  $P_0$ : втрати тепла з зовнішньої та бокових поверхонь відсутні.

Значення  $P_0$  отримують із формули

$$P_0 = \alpha_e \cdot \Delta T_T \cdot \frac{R_2}{R_1}. \quad (1)$$

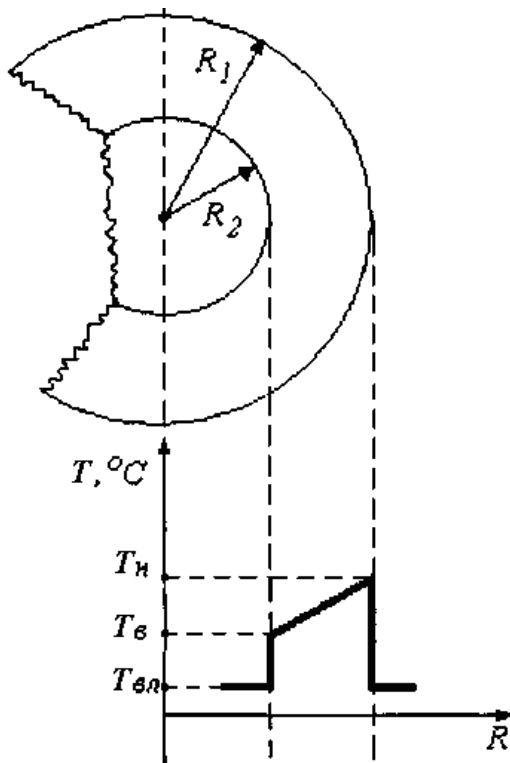
Контактну теплову провідність між втулкою і валом  $\alpha_e$  визначають шляхом ідентифікації її значення при проведенні експерименту безпосередньо на об'єкті, що підлягає демонтажу. В процесі низькотемпературного (без ліквідації натягу посадки) стаціонарного нагріву з'єднання деталей здійснюють вимірювання на боковій поверхні втулки зовнішньої  $T_n$  та внутрішньої  $T_e$  температури її поверхонь, а також температури зовнішньої поверхні валу  $T_{вл}$ . Рис. 2 ілюструє точки вимірювання температури  $T$ .

Значення  $\alpha_e$  отримують із формули

$$\alpha_e = \frac{(T_n - T_e) \lambda_{cm}}{(T_e - T_{вл})(R_1 - R_2)}, \quad (2)$$

де  $\lambda_{cm}$  - коефіцієнт теплопровідності сталі.

При виборі частоти струму індукційної установки  $f_g$  запропоновано виходити з умови високої енергетичної ефективності процесу нагріву, обмеження проникнення електромагнітного поля у вал та з урахуванням стандартних значень вихідних частот джерел живлення. Повне затухання Рис. 2. Характер розподілу електромагнітної хвилі при урахуванні за-



температури в стаціонарному режимі лежності відносної магнітної проникності  $\mu$  від напруженості поля  $H$  відбувається

на відстані від поверхні втулки  $X_n = 1,68\Delta_e$ . Тоді сформульована умова відповідає нерівностям

$$X_n \leq \Delta_e; \quad \Delta_e \leq \Delta_e / 1,68, \quad (3)$$

де  $\Delta_e$  - товщина втулки;  $\Delta_e$  - глибина проникнення електромагнітної хвилі, розрахована виходячи із значення  $\mu$  на поверхні втулки ( $\mu_e$ ). Для граничного режиму  $\Delta_e = \Delta_e / 1,68$  характерне «глибоке» прогрівання втулки. Цьому режиму відповідає нижнє значення

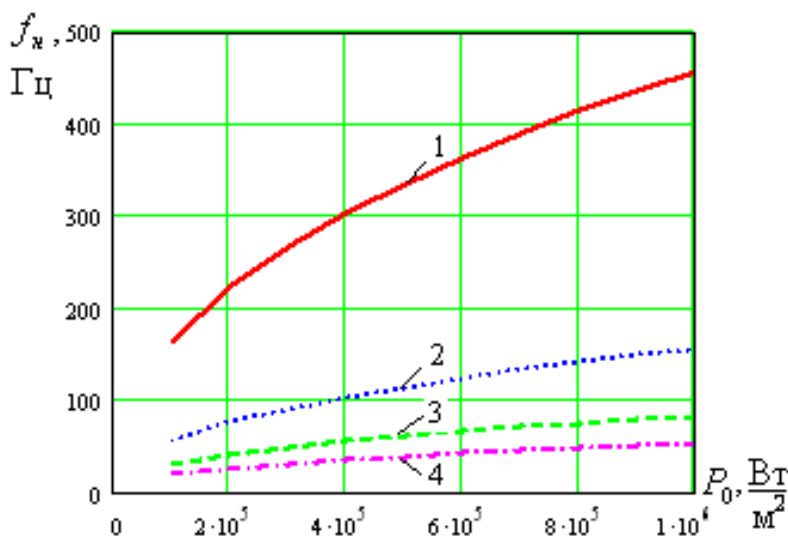
рекомендованого діапазону частот струму індуктора  $f_n$ . На рис. 3 наведені залежності  $f_n(P_0)$ .

Вихідну частоту джерела живлення вибирають з урахуванням її стандартних значень та виконанням умови  $f_g \geq f_n$ . Із рис.3 видно, що при товщині втулки, що перевищує 2 см, можна здійснювати нагрів на промисловій частоті струму 50 Гц. При менших значеннях товщини, а також при масогабаритних обмеженнях у конст-

Рис. 3. Залежності  $f_n(P_0)$

1 –  $\Delta^B = 0,005$  м; 2 –  $\Delta^B = 0,01$  м;

3 –  $\Delta^B = 0,015$  м; 4 –  $\Delta^B = 0,02$  м.



руктивному виконанні доцільне використання підвищених частот (одиниці кГц).

Створена математична

модель, що орієнтована на визначення параметрів режиму  $P_0, f_g, H_e$  ( $H_e$  - діюче значення напруженості магнітного поля на поверхні втулки), які забезпечують температурні умови демонтажу з'єднання і використовуються для розрахунку індуктора, вибору номінальної потужності джерела живлення за відомими методами.

**В четвертому розділі** досліджено вплив параметрів електромагнітного поля на

характер розвитку теплового процесу, отримано залежності, що визначають умови демонтажу з'єднання.

Процес демонтажу з'єднання деталей безпосередньо пов'язаний із температурними режимами нагріву. Тому виникла необхідність оцінки впливу електромагнітних параметрів на характер протікання теплового процесу, підтвердження їх прийнятності для проведення технологічної операції. Це зумовило створення математичної моделі для дослідження перехідних і стаціонарних теплових процесів, що протікають в поперечному перетині втулки. Реалізація одновимірного повздовжнього магнітного поля, що діє у втулці, дозволила нестационарний процес індукційного нагріву з'єднання описати одновимірним у просторі диференціальним рівнянням теплопровідності другого порядку в часткових похідних. При цьому врахований вплив розширення втулки на значення контактної теплової провідності  $\alpha_e$  зони з'єднання деталей, а також реалізована можливість розрахунку процесу при наявності в індукторі струму імпульсної форми. В математичну модель введені та обґрунтовані припущення: - залежність  $\alpha_e(\Delta T)$  представлена двома лінійними участками, що відповідають діапазонам зміни різниці температур  $0 \leq \Delta T \leq \Delta T_n$  та  $\Delta T_n \leq \Delta T \leq \Delta T_T$ ; - виходячи із того, що нагрів з'єднання здійснюється у вузькому діапазоні температур, при моделюванні процесу використані середні значення теплофізичних величин сталі, характерні для цього діапазону; - об'ємна щільність джерел тепла в активному шарові втулки вважається однаковою.

Моделювання дії імпульсного струму індуктора здійснюється шляхом періодичного введення та виведення з дії джерел тепла, зосереджених в активному шарові втулки, що дозволяє аналізувати можливості частотно-імпульсного управління процесом нагріву. Нелінійність рівняння теплопровідності та граничних умов зумовлює використання

числового методу розрахунку теплового процесу з формуванням кінцево-різницевого рівняння та застосуванням методу прогонки. На рис.4 наведений переріз втулки (Вт) і валу (Вл).

Замінюючи часткові похідні першого та другого порядків різницеви похідними отримаємо:

$$\frac{T_i^{K+1} - T_i^K}{\Delta t_k} - a \left( \frac{T_{i+1}^{K+1} - 2T_i^{K+1} + T_{i-1}^{K+1}}{h^2} \right) - \frac{a}{R_i} \left( \frac{T_{i+1}^{K+1} - T_{i-1}^{K+1}}{2h} \right) = \frac{La}{\lambda} \cdot \omega_i^{K+1} \quad (4)$$

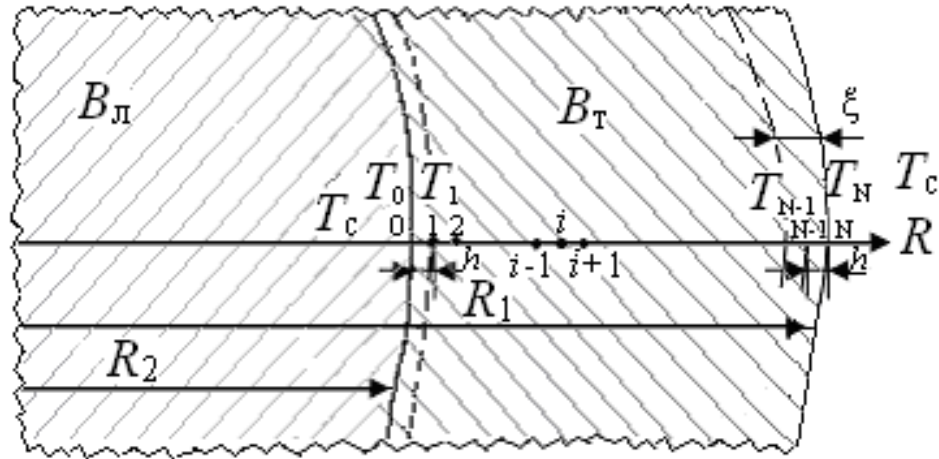


Рис. 4.  
Переріз

втулки

(В<sub>т</sub>) і валу (В<sub>л</sub>)

Граничні умови у вигляді різницевого рівняння наведені нижче

$$-\lambda \left( \frac{T_0^{K+1} - T_1^{K+1}}{h} \right) = \alpha_s^{K+1} (T_0^{K+1} - T_c); \quad -\lambda \left( \frac{T_N^{K+1} - T_{N-1}^{K+1}}{h} \right) = \alpha_z (T_N^{K+1} - T_c).$$

Складена різницева схема віднесена до неявних схем. Значення температури в перетині втулки в залежності від часу знаходять методом прогонки.

Різницева рівняння (4) представляють у вигляді

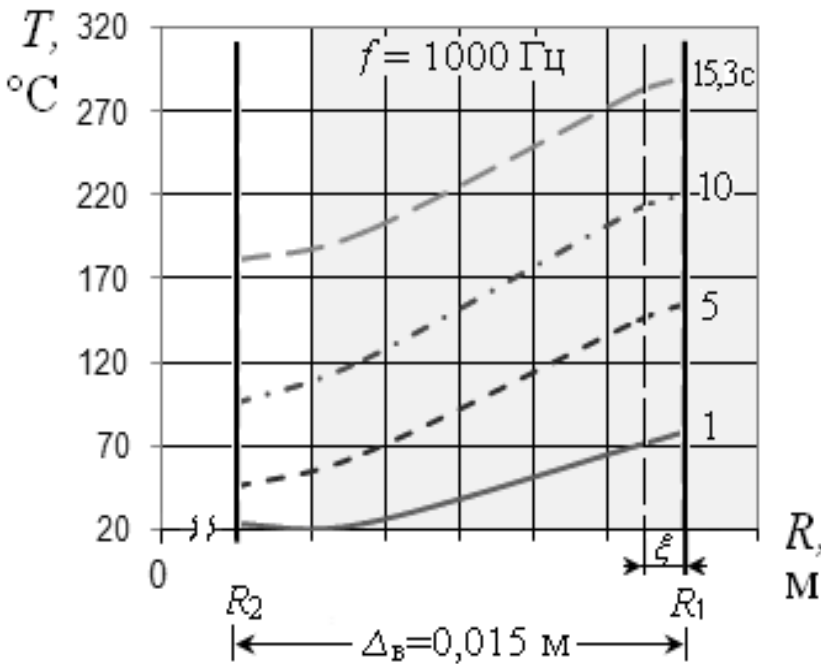
$$A_i T_{i-1}^{K+1} - C_i T_i^{K+1} + B_i T_{i+1}^{K+1} = -F_i^{K+1}.$$

Тоді  $A_i = -\frac{a}{h} \left( \frac{1}{h} - \frac{1}{2R_i} \right); B_i = -\frac{a}{h} \left( \frac{1}{h} + \frac{1}{2R_i} \right); C_i = -\left( \frac{1}{\Delta t_k} + \frac{2a}{h^2} \right);$

$$F_i^{K+1} = -\left( \frac{T_i^K}{\Delta t_k} + \frac{a}{\lambda} \cdot \omega_i^{K+1} \right), \quad (5)$$

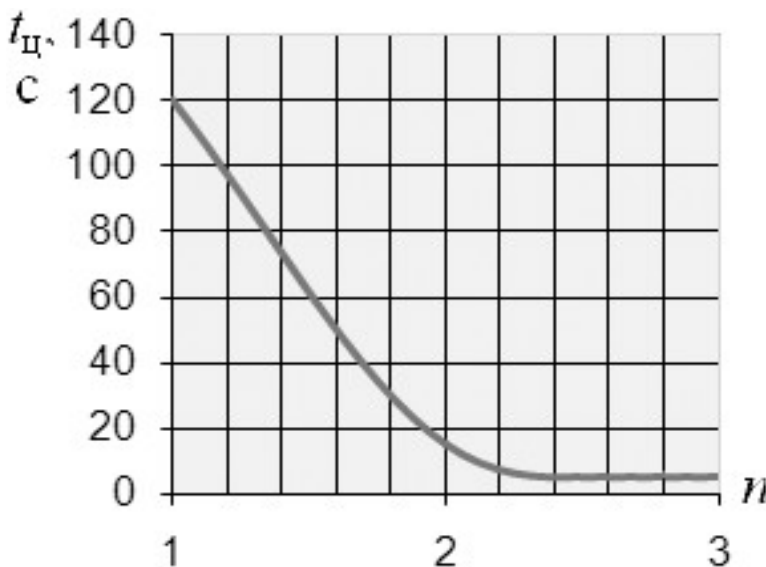
де  $R_i = R_2 + ih$ .

На характер протікання теплового процесу у втулці впливає низка чинників: питома поверхнева потужність  $P_0$ , частота струму індуктора  $f$ , значення контактної теплової провідності  $\alpha_s$ . Моделювання процесу нагріву свідчить про те, що на підвищених частотах



струму індуктора необхідне для демонтажу з'єднання значення  $\Delta T_T$  досягається при більш високому рівні температури на зовнішній поверхні втулки, що пояснюється більш вираженим поверхневим ефектом. Цю залежність слід урахувати при визначенні раціонального значення частоти струму. Встановлено, що вплив частоти струму на характер розвитку теплового процесу проявляється в різних значеннях затримки зростання різниці температур  $\Delta T$  відносно моменту початку нагріву, що пояснюється характером розташування

джерел тепла в перетині втулки. При  $\alpha_s = const$  збільшення питомої поверхневої потужності призводить до зменшення тривалості циклу нагріву  $t_u$  з'єднання деталей. Характерна нелінійність цієї залежності з суттєвим ростом тривалості в області малих значень потужності (рис.5). Тут  $n = P_p / P_0$ . Зменшення в процесі нагріву значення  $\alpha_s$  аналогічне дії підвищеної поверхневої потужності, що забезпечує зниження тривалості циклу нагріву. Зменшення теплової контактної провідності  $\alpha_s$  суттєво змінює характер розподілення температури в перетині втулки. Спостерігається вирівнювання температури в зоні, близькій до її внутрішньої поверхні (рис.6). Необхідне для демонтажу з'єднання значення  $\Delta T = \Delta T_T$  досягається при менших значеннях температури зовнішньої поверхні втулки. Збільшення тривалості нагріву супроводжується підвищенням швидкості зростання  $\Delta T$ , що



пояснюється температурною

Рис.5. Залежність  $t_u(n)$  деформацією втулки (рис.7). Гальмування росту  $\Delta T$  на початковому етапі нагріву пояснюється значним  $\alpha_s$ , що відповідає тісному контакту між втулкою і валом.

Залежність, що ілюструє рис. 6, отримана при розрахунковому значенні питомої поверхневої потужності  $P_0$ , що підтверджує факт виникнення необхідного для демонтажу з'єднання температурного режиму (

$\Delta T = \Delta T_T$ ) у перехідному режимі нагрівання. Встановлено, що при зменшенні товщини втулки  $\Delta \alpha$  тривалість циклу нагріву  $t_u$  зменшується. Збільшення  $P_0$  призводить

Рис. 6. Розподілення температур з урахуванням залежності  $\alpha_e(\Delta T)$

до більш суттєвого зменшення  $t_u$ . Характер цих

залежностей є наслідком дії теплопровідності в сталі. В результаті моделювання дії імпульсного струму індуктора доведено, що збільшення частоти синусоїдальних імпульсів підвищує швидкість росту різниці температур  $\Delta T$ , що свідчить про можливість управління температурним режимом нагріву.

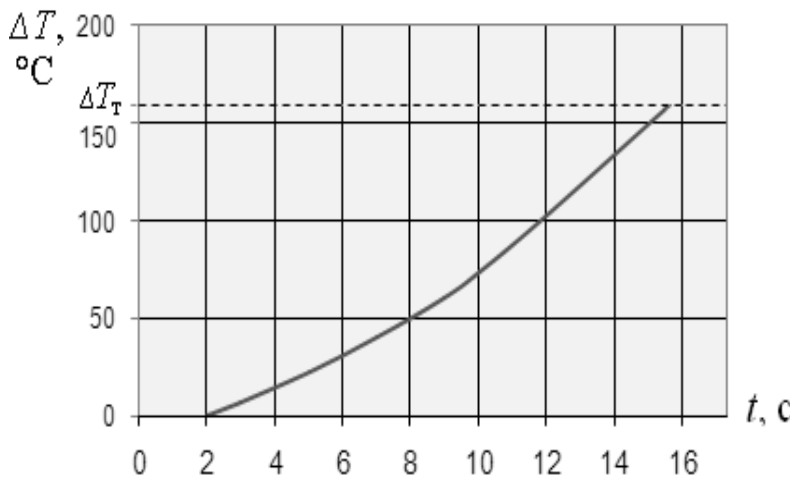
Рис.7. Залежність  $\Delta T(t)$  при зміні  $\alpha_e$  у процесі нагрівання втулки

В п'ятому розділі наведено результати розробки та створення макета

установки для вирівнювання напруженості магнітного поля на поверхні втулки, визначення температурних параметрів процесу нагріву з метою ідентифікації контактної теплової провідності, оцінки достовірності отриманих наукових результатів.

Створено макет установки для вирівнювання напруженості магнітного поля на поверхні втулки та ідентифікації контактної теплової провідності  $\alpha_e$ . В основу покладено технічне рішення, захищене патентом. Використана розроблена автором методика вирівнювання напруженості поля. В результаті зміни кроку намотування обмотки індуктора ступінь нерівномірності значень напруженості поля зменшилася вдвічі, що підтвердило прийнятність розробленої методики для виконання практичних завдань безпосередньо в умовах проведення демонтажних робіт.

Для ідентифікації значення контактної теплової провідності зони з'єднання втулки з валом  $\alpha_e$  за допомогою експериментальної установки здійснювався низькотемпературний (до 50°C) нагрів поверхні втулки. В стаціонарному режимі нагріву за



допомогою безконтактного пірометра вимірювались температури на боковій поверхні втулки та поверхні валу. Значення  $\alpha_e$  розраховувалось з використанням запропонованого автором алгоритму. Отримане із експерименту значення параметра  $\alpha_e$  свідчить про те, що при значному натягу посадки існують сприятливі

умови для передачі тепла від втулки до валу. Значення  $\alpha_e$  суттєво (на два порядки) перевищує значення коефіцієнта тепловіддачі із зовнішньої поверхні втулки  $\alpha_s$ .

Вимірювання значень температур на боковій поверхні втулки в перехідному режимі нагріву дозволило оцінити ступінь збігу результатів теоретичних (отриманих при моделюванні теплового процесу) та експериментальних досліджень. Похибка розрахунку температури з урахуванням похибки пірометра не перевищила 5%.

При необхідності суттєвого скорочення тривалості циклу нагріву  $t_u$  доцільне використання режиму форсованого нагріву з'єднання деталей. За участю автора розроблений спосіб управління процесом нагріву з використанням імпульсної форми струму індуктора. Для забезпечення режиму форсованого нагріву частоту слідування імпульсів струму

стабілізують в періоді часу, що відповідає росту температури зовнішньої поверхні втулки, та змінюють її значення в наступному періоді до завершення демонтажу з'єднання. Застосування способу управління дозволяє зменшити тривалість циклу нагріву  $t_u$  орієнтовно на 30%.

Розробка в дисертаційній роботі методики визначення питомої поверхневої потужності  $P_0$ , та інших параметрів режиму на поверхні втулки дозволяє здійснювати обґрунтований вибір параметрів індуктора та джерела живлення і відмовитись від існуючого в практиці індукційного нагріву завищення номінальної потужності цього джерела. У разі обґрунтованого вибору потужності економія коштів на придбання однієї установки складає декілька тисяч доларів. Суттєво (на десятки відсотків) зменшується вага та габарити джерела живлення, що свідчить про покращення масогабаритних показників індукційної установки.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива **наукова задача**, що полягає у встановленні закономірностей протікання взаємозв'язаних електромагнітних, теплових процесів та температурної деформації у системі індукційного нагріву з'єднання деталей з урахуванням зміни в процесі нагріву контактної теплової провідності і дозволяє визначити раціональні параметри режиму, які забезпечують ефективний демонтаж з'єднання, і завдяки цьому підвищують експлуатаційний ресурс деталей машин, а також покращують техніко-економічні показники установок індукційного нагріву.

1. Обґрунтування вимог до надійності, технологічності, енергоефективності процесу демонтажу з'єднання деталей при обмеженому значенні номінальної потужності джерела живлення і з урахуванням специфіки виконання електротехнологічної операції, та наступне визначення в роботі умов їх виконання (одновимірність магнітного поля, забезпечення демонтажу в перехідному режимі нагріву) складає основу раціонального вибору параметрів режиму індукційного нагріву, сприяє поліпшенню техніко-економічних та експлуатаційних характеристик індукційної установки.

2. Формування діючого у втулці одновимірного магнітного поля забезпечується зміною кроку намотування обмотки індуктора, виходячи із результату вимірювання електрорушійних сил в секціях вимірювальної обмотки. Створення пристрою та розробка методики для отримання одновимірного поля дозволяє здійснювати процедуру його формування безпосередньо на реальному об'єкті у процесі проведення експерименту, що забезпечує достовірність результату, сприяє підвищенню ефективності операції демонтажу.

3. Доведено, що визначення питомої поверхневої потужності, виходячи із ідентифікованого значення контактної теплової провідності та необхідної для демонтажу з'єднання різниці температур між контактними поверхнями, а також забезпечення визначеного рівня потужності в процесі виконання електротехнологічної операції дозволяє ліквідувати натяг посадки, створити зазор, необхідний для демонтажу з'єднання в перехідному режимі нагріву. Температурні умови демонтажу забезпечуються також в стаціонарному режимі. Це сприяє покращенню показників ефективності операції, поліпшує характеристики індукційної установки.

4. Математична модель для визначення параметрів електромагнітного поля на поверхні втулки, відрізняється від відомих моделей орієнтацією розрахунку на отримання значень параметрів, що забезпечують необхідну для демонтажу різницю температур в зоні з'єднання втулки з валом, використанням в структурі моделі ідентифіковано контактної теплової провідності. Визначення параметрів режиму створює основу для розрахунку індуктора і обґрунтованого вибору номінальної потужності джерела живлення.

5. Нижнє значення частотного діапазону струму індуктора обмежують максимальною глибиною проникнення електромагнітної хвилі, яка не перевищує товщину втулки, що відповідає умові дії джерел тепла у втулці і виключає таку дію у валу. На підвищених частотах струму необхідна для демонтажу з'єднання різниця температур в зоні контакту деталей досягається при більш високому рівні температури зовнішньої поверхні втулки, що пояснюється більш вираженим поверхневим ефектом.

6. Математична модель для аналізу впливу параметрів електромагнітного поля на характер розвитку теплового процесу відрізняється від відомих моделей тим, що урахований вплив розширення втулки на зміну контактної теплової провідності зони з'єднання деталей, а також реалізована можливість розрахунку процесу при наявності в індукторі імпульсної форми струму, що дозволяє аналізувати частотно-імпульсне управління нагрівом.

7. Нелінійна залежність тривалості циклу нагріву з'єднання деталей від значення питомої поверхневої потужності характеризується суттєвим ростом тривалості в області порівняно низьких значень потужності. Суттєве (на порядок) зменшення в процесі нагріву контактної теплової провідності зони з'єднання аналогічне дії підвищеної питомої поверхневої потужності нагріву, що забезпечує значне зменшення тривалості циклу нагріву (до одиниць або десятків секунд). Встановлені залежності підтверджують обґрунтованість розробленої методики визначення питомої поверхневої потужності, її спрямованість на підвищення ефективності процесу демонтажу.

8. Встановлено, що збільшення часу нагріву з'єднання деталей супроводжується підвищенням швидкості зростання різниці температур в зоні контакту, що зумовлено залежністю від цієї різниці контактної теплової провідності. Гальмування росту різниці температур на початковому етапі нагріву пояснюється значною контактною тепловою провідністю, що відповідає наявності суттєвого натягу посадки.

9. Доведено, що зменшення тривалості циклу нагріву з'єднання деталей досягається застосуванням імпульсної форми струму індуктора, де частота слідування імпульсів змінюється у відповідності до розробленого способу, який забезпечує режим форсованого нагріву. Спосіб управління частотою слідування імпульсів струму передбачає її стабільність в періоді часу, що відповідає росту температури зовнішньої поверхні втулки, та зменшення її значення в наступному періоді до завершення демонтажу з'єднання.

10. Обґрунтування введених в математичні моделі припущень, вибір прийнятних методів моделювання електромагнітних та теплових процесів, розробка ефективного алгоритму розрахунку ідентифікованого параметра та застосування вимірювальної техніки з прийнятними для проведення експерименту значеннями похибки вимірювання забезпечили достовірність результатів виконаних досліджень. Похибка розрахунку важливих для практики демонтажу з'єднань деталей параметрів режиму (питомої поверхневої потужності, температури нагріву втулки) не перевищує 5%. Ліквідація причини існуючого в практиці індукційного демонтажу з'єднань деталей завищення номінальної потужності джерела живлення шляхом застосування розробленої методики визначення питомої поверхневої потужності дозволяє зменшити витрати коштів на придбання однієї установки в розмірі декількох тисяч доларів. Суттєво (на десятки відсотків) зменшується вага та розміри джерела живлення.

### **Основні положення і результати дисертації опубліковані у роботах:**

1. Выпанасенко Н.С. Индукционный нагрев цилиндрических соединений деталей при их демонтаже / Н.С. Выпанасенко //Гірнична електромеханіка та автоматика.– 2006. – Вип.77. -С. 129-135.

2. Выпанасенко Н.С. Анализ способов управления индукционным нагревом цилиндрических соединений при их демонтаже / Н.С. Выпанасенко //Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. - 2007.- Вип.3. – С.123-128.

3. Выпанасенко Н.С. Вибір методів моделювання теплових та електромагнітних процесів при індукційному нагріві циліндричних з'єднань /Н.С. Выпанасенко //Вісник Кременчуцького Державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. - 2007.- Вип.3. –Ч.2.– С.73-74.

4. Выпанасенко Н.С. Определение удельной поверхностной мощности индукционного нагрева соединений деталей, выполненных посадкой с натягом/ Н.С. Выпанасенко // Вісник Приазовського державного технічного університету. -2008.- Вип. № 18. –Ч.2. – С. 131-136.

5. Выпанасенко Н.С. Параметры электромагнитного поля установки индукционного нагрева цилиндрических з'єднань/ Н.С. Выпанасенко// Збірник наукових праць Національного гірничого університету. -2008.- Вип. № 30. – С. 217-223.

6. Выпанасенко Н.С. Математична модель для аналізу теплових процесів індукційного нагрівання циліндричних з'єднань сталевих деталей/ Н.С. Выпанасенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. -2009.- Вип. № 2. – С. 60-65.

7. Дрешпак Н.С. Методика забезпечення однорідності магнітного поля в процесі демонтажу з'єднань циліндричних деталей/ Н.С. Дрешпак // Гірнична електромеханіка та автоматика.– 2009. – Вип.82. – С. 21-27.-107

8. Дрешпак Н.С. Режимы индукционного нагрева цилиндрических деталей, з'єднаних посадкою з натягом/ Н.С. Дрешпак //Технічна електродинаміка. -2009.- Вип. № 6. – С. 61-66.



9. Пат. України 43365, МПК В23Р19/02. Пристрій для індукційного розпресовування деталей/ Півняк Г.Г., Дрешпак Н.С.; заявник та патентовласник Національний гірничий університет. - № у 2009 03180; заявл. 03.04.2009; опубл. 10.08.2009, Бюл.№15.

10. Пат. України 43339, МПК В23Р19/02. Спосіб керування індукційним розпресовуванням деталей/ Півняк Г.Г., Дрешпак Н.С.; заявник та патентоодержувач Національний гірничий університет. - № у 2009 02908; заявл. 27.03.2009; опубл. 10.08.2009, Бюл.№15.

11. Випанасенко Н.С. Обґрунтування методів моделювання теплових та електромеханічних процесів при індукційному нагріві з'єднань циліндричних деталей/ Н.С. Випанасенко // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації, енергозбереження: всеукраїнська науково-технічна конф., 18-20 квітня 2007 р.: тези доповіді. – Кременчук, 2007. – С. 190

12. Дрешпак Н.С. Моделювання електромагнітних процесів індукційного нагріву циліндричних деталей, з'єднаних посадкою з натягом/ Н.С.Дрешпак// Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації, енергозбереження: всеукраїнська науково-технічна конф., 8-9 квітня 2010 р.: тези доповіді. – Кременчук, 2010. – С. 426-427.

13. Dreshpak N. Induction Heating Requirements for Cylindrical Connections Dismantling / N. Dreshpak //Збірник наукових праць ХНАДУ. - 2009.- Вип.1. – С.318-320.

14. Dreshpak N. Induction Heating for Cylindrical Connections Dismantling/ N. Dreshpak // Розширюючи обрії: міжнародний форум, 26 березня 2009 р.: тези доповіді. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 73-74.

15. Dreshpak N. Induction Heating of Cylindrical Connections Made by an Interference Fit/ N. Dreshpak // Трансфер технологій: від ідеї до прибутку: міжнародна конф., 27-29 квітня 2010 р.: тези доповіді. – Дніпропетровськ, 2010. – С.61-62.

**Особистий внесок автора.** Особистий внесок дисертанта в роботах, опублікованих в співавторстві полягає: в роботі [9] – запропоновано пов'язувати значення кроку намотування обмотки індуктора із значенням електрорушійних сил секціонованої вимірювальної обмотки, запропонована структура пристрою для демонтажу з'єднання деталей; в роботі [10] запропонована послідовність дій при виконанні процесу демонтажу, визначений алгоритм зміни частоти слідування імпульсів струму індуктора.

## АНОТАЦІЯ

**Дрешпак Н.С. «Режими індукційного нагріву деталей машин з рознімним з'єднанням циліндричних поверхонь».**– Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03. – Електротехнічні комплекси та системи. – Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, 2010.

У дисертаційній роботі вирішено важливу наукову задачу, що полягає у встановленні закономірностей протікання взаємозв'язаних електромагнітних, теплових процесів та температурної деформації у системі індукційного нагріву з'єднання деталей з урахуванням зміни в процесі нагріву контактної теплової провідності і дозволяє визначити на цій основі раціональні параметри режиму, які забезпечують ефективний демонтаж з'єднання та покращують техніко-економічні показники (вагу, розміри, вартість) установок індукційного нагріву.

Вперше для систем індукційного нагріву обґрунтовано загальні вимоги до процесу демонтажу з'єднань деталей та умови їх виконання. Отримано залежність для розрахунку

необхідної різниці температур між поверхнями втулки і валу при ліквідації натягу посадки та демонтажі з'єднання. Розроблено методику формування одновимірного магнітного поля та запропоновано пристрій для його реалізації. Обґрунтовано доцільність та визначений порядок ідентифікації контактної теплової провідності. Отримані аналітичні залежності для розрахунку значення питомої поверхневої потужності нагріву. Розрахункове значення питомої поверхневої потужності дозволяє здійснювати демонтаж з'єднання в перехідному режимі нагріву, що забезпечує високі показники ефективності технологічної операції. При виборі частоти струму індукційної установки запропоновано виходити з умови обмеження проникнення електромагнітного поля у вал. Розроблено математичну модель для аналізу впливу параметрів електромагнітного поля на характеристики теплового процесу. Розроблено спосіб управління індукційним нагрівом, що полягає в зміні частоти слідування імпульсів струму індуктора. Проведено експериментальні дослідження, що підтверджують достовірність отриманих в роботі наукових результатів.

**Ключові слова:** індукційний нагрів, посадка з натягом, демонтаж з'єднання.

## АННОТАЦІЯ

**Дрешпак Н.С. «Режимы индукционного нагрева деталей машин с разъемным соединением цилиндрических поверхностей».** – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы. –Национальный горный университет, Днепропетровск, 2010.

Сформулирована научная задача исследования, предусматривающая получение неизвестных ранее закономерностей протекания взаимосвязанных процессов в системе нагрева, выявление особенностей этих процессов, что важно для формирования рациональных параметров режима и обеспечения на этой основе высоких технико-экономических показателей индукционных установок.

Обоснован перечень требований к процессу демонтажа соединений. Должны обеспечиваться надежность, технологичность и энергоэффективность процесса при ограниченной номинальной мощности источника питания. Выполнение требований достигается формированием одномерного магнитного поля, выбором уровня удельной поверхностной мощности, обеспечивающего реализацию температурных условий демонтажа в переходном режиме нагрева.

Предложено устройство обеспечивающее формирование одномерного магнитного поля в процессе экспериментальных исследований его характеристик. Устройство содержит секционированную измерительную обмотку, расположенную на поверхности втулки. Шаг наматывания индуктора определяют исходя из результатов измерений ЭДС измерительной обмотки. Удельную поверхностную мощность, обеспечивающую демонтаж соединения, определяют с учетом необходимой разности температур между поверхностями втулки и вала, идентифицированного значения контактной тепловой проводимости.

Разработана математическая модель для расчета параметров электромагнитного поля на поверхности втулки. Их определение составляет основу расчета индуктора и выбора номинальной мощности источника питания. При выборе частоты тока индукционной установки предложено исходить из условия высокой энергетической эффективности процесса нагрева, ограничения проникновения электромагнитного поля в вал, учета стандартных значений выходной частоты источника питания.

Исследовано влияние параметров электромагнитного поля на характер развития теплового процесса. Создана математическая модель для анализа нестационарного теплового процесса, отличающаяся от известных моделей тем, что учтено влияние расширения втулки, а также реализована возможность расчета процесса при протекании в индукторе тока

импульсной формы. Установлено, что на повышенных частотах необходимое для демонтажа соединения значение разности температур достигается при более высоком уровне температуры внешней поверхности втулки. Увеличение удельной поверхностной мощности приводит к уменьшению длительности цикла нагрева. Характерна нелинейность этой зависимости с существенным ростом длительности в области малых значений мощности. Разработан способ управления процессом нагрева, заключающийся в изменении частоты следования синусоидальных импульсов тока, протекающего в индукторе. Предложен алгоритм изменения частоты во времени, обеспечивающий режим форсированного нагрева.

Погрешность расчета важных для практики демонтажа соединений параметров не превышает 5%. Благодаря использованию рациональных параметров режима удалось существенно улучшить технико-экономические показатели индукционной установки (вес, габариты, стоимость).

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, посадка с натягом, демонтаж соединения.

## ABSTRACT

**Dreshpak N.S. “Induction heating modes of machine parts with a detachable connection of cylindrical surfaces”.** – Manuscript.

The thesis for getting a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences on specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – National Mining University, Dnipropetrovsk, 2010.

The thesis is devoted to solve an urgent scientific task to establish the regularities of interconnected electromagnetic, thermal and deformation processes in the system of induction heating of details connections, considering changes in the heating process of a contact thermal conductivity, and determine appropriate heating mode parameters that provide with an efficient dismantling operation and improve technical and economic factors (weight, size, cost) of induction heating systems.

At the first time the main requirements for the induction heating process and the conditions of their implementation are substantiated. The dependence for calculating the required temperature difference between the surface of a plug and a shaft while an interference liquidation and connection dismantling is received. The methodology to form an one-dimensional magnetic field is created and a device for its realization is proposed. Expediency and the order of the contact thermal conductivity identification are substantiated. Analytical relations for the value of the specific surface heating power calculation are got. The estimated value of the specific surface power allows to realize dismantling in a transition heating mode that provide with an efficient technological operation. While choosing the current frequency of an induction installation it is proposed to stick to the condition of limitation of electromagnetic field penetration into the shaft. A mathematical model to analyze the influence of electromagnetic field parameters on the characteristics of a thermal process is developed. The way of induction heating operation that is based on a current pulse repetition changing is received. Experimental investigations that confirm the reliability of obtained scientific results are conducted.

**Key words:** induction heating, interference fit, connection dismantling.

