

УДК 621.365.5

Ю. В. Батигін¹
О. С. Сабокар¹
В. А. Стрельнікова¹

УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ МАШИНОБУДУВАННЯ

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Проаналізовано стан технологій індукційного нагрівання на сучасному етапі розвитку. Високий ступінь інтегрованості технологій індукційного нагрівання в галузях сучасної промисловості дає можливість вибрати оптимальний спосіб реалізації обладнання індукційного нагрівання. Запропоновані та описані основні вузли індукційного нагрівача, що розробляється, з використанням сучасних технологій виготовлення і елементної бази за оптимальної їх вартості. У конструкції враховуються як електротехнічні вимоги до комплексу індукційного нагрівача, так і вимоги до можливих ремонтних операцій.

Ключові слова: індукційне нагрівання, машинобудування, індукційне зварювання, технічне обслуговування транспортних засобів, магнітне поле, електромагніт.

Вступ

Створення нових автоматизованих систем виробництва є ефективним засобом вирішення супутніх проблем виготовлення деталей машин та їх складальних одиниць. Яскравим прикладом стала поява систем індукційного нагрівання в технологіях виробництва транспортних засобів. Так, використання швидкого і локального безконтактного нагрівання металевих поверхонь дозволило істотно удосконалити виготовлення деталей. Актуальність роботи полягає у визначенні нових напрямків у створенні та впровадженні систем індукційного нагрівання в технологічні процеси обслуговування і ремонту транспортних засобів.

Мета роботи полягає у визначенні альтернативної технології індукційного нагрівання для вирішення завдань ремонту та обслуговування транспортних засобів шляхом виконання аналізу досягнень і розвитку сучасних систем індукційного нагрівання та їх розвитку. Так само необхідно описати передбачувану структуру системи індукційного нагрівання з урахуванням вимог до вихідних параметрів електротехнічного пристрою, безпеки проведення робіт і економічної оптимізації системи, що розробляється.

Устаткування систем індукційного нагрівання можна розділити на дві основні складові: джерело змінного магнітного поля — індуктор і джерело живлення індуктора, який є джерелом напруги або струму високої частоти.

Технології обробки металів з використанням систем індукційного нагрівання мають широку сферу застосування, яка постійно збільшується у зв'язку зі зростанням потреб виробництва, появою нових технологій і задач. Тому таке обладнання має велику кількість варіантів технічної реалізації.

Джерела зовнішнього змінного електромагнітного поля

В основі принципу побудови конструкції індукційних систем та їх можливих комбінацій лежить задача досягнення оптимальної передачі енергії магнітного поля для її трансформації в теплову через індуквані в металі струми. Так, під кожен технічну операцію розраховується і вибира-

ється конструкція індуктора. Наведемо кілька найвикористовуваніших індукторних систем які підтвердили свою працездатність:

- плоскі одновиткові індуктори кругової або прямокутної форм;
- циліндричні індукторні системи;
- багатовиткові індукторні системи з двома і більше робочими площинами укладання провідника;
- індукторні системи, виконані у вигляді обмоток на феромагнітних осердях;
- індукторні системи з виносним феромагнітним осердям — концентратором.

Прямокутні одновиткові індукторні системи використовуються для виконання таких операцій як паяння або індукційне зварювання масивних провідників. Вибір таких форм виконавчого інструмента зумовлене необхідністю досягнення висококонцентрованих індуктованих струмів в зоні утворення механічних зв'язків. Такий режим роботи систем доступний тільки у разі примусового охолодження індуктора, а використання більше, ніж одного витка приведе до збільшення зони теплового впливу і знизить ефективність операції в цілому. Докладніше про подібного роду операції з використанням надпотужних систем індукційного нагрівання можна ознайомитись в роботі [1]. Як видно з джерел, безконтактна пайка знаходить своє застосування в операціях складання електротехнічного обладнання.



Рис. 1. Поверхнєве загартування розподільних валів з миттєвим охолодженням



Рис. 2. Індукційне паяння мідних шин тугоплавким припоєм

Циліндричні індукторні системи займають значну частку з усієї лінійки застосовуваних форм індукторів, за рахунок того, що така конструкція забезпечує досить високий коефіцієнт електромагнітного зв'язку між індуктором і заготовкою, а сама конструкція проста у виготовленні. Залежно від необхідного рівня енергії, що витрачається на нагрів, а отже і амплітуди струмів, що протікають, провідник, з якого виконаний індуктор, може бути провідною трубкою з холодоагентом що протікає в ній. Таке технічне рішення знайшло своє застосування в технологіях поверхневого гартування металевих деталей машин і механізмів циліндричної форми (рис. 1).

Як повідомляється в роботі [1], індукційне гартування на автоматизованих лініях виробництва в десять разів перевищує конвекційні методи гартування. Так за потужності в 345 кВт досягається 65 % ККД тоді, коли енерговитрати на ідентичну операцію для пристрою конвекційного гартування складають 4000 кВт з рівнем 5,5 % ККД.

Багатовиткові індукторні системи з двома і більше робочими площинами укладання провідника є вирішенням проблеми поверхневого нагрівання металів, об'єктів довільної форми або об'єктів, форма і конфігурація яких не допускають їх повного нагрівання в середовищі змінного електромагнітного поля. Окрім того, застосування таких індукторів доцільно у випадках важкодоступності зон нагрівання або за досить великих розмірів об'єкта. Наприклад, використання індукторних систем з декількома робочими зонами можна застосувати в технології поверхневого гартування металевих деталей, а також паяння мідних шин в процесі складання енергетичних електроустановок високої споживаної і генерованої потужності (рис. 2) [2]. Використання такого способу паяння струмопровідних елементів великого перерізу дозволяє істотно підвищити ККД. На відміну від контактного паяння, де тепла енергія передається шляхом пасивного переносу по всьому об'єму паяння, індукційний прогрів зони дозволяє сконцентрувати ефективну теплову енергію в заданих межах за рахунок високої частоти діючих полів та індуктованих струмів. Швидкість такого нагрівання за тієї ж споживаної потужності може бути більшою на порядок, що виключає значне поширення тепла по всьому провідника.

ного переносу по всьому об'єму паяння, індукційний прогрів зони дозволяє сконцентрувати ефективну теплову енергію в заданих межах за рахунок високої частоти діючих полів та індуктованих струмів. Швидкість такого нагрівання за тієї ж споживаної потужності може бути більшою на порядок, що виключає значне поширення тепла по всьому провідника.

Перетворювачі частоти напруги живлення

Виходячи з основних вимог до електричних апаратів цієї сфери застосування [3] джерело живлення змінної напруги високої частоти повинно забезпечити сталість параметрів роботи (амплітуди вихідної напруги живлення і вихідної частотної характеристики) незалежно від зміни параметрів навантаження.

З усіх існуючих класифікацій установок індукційного нагрівання за структурою, можна виділити такі:

- помножувач частоти;
- електромашинні перетворювачі;
- тиристорні перетворювачі;
- сильноточові транзисторні перетворювачі.

Помножувачі частоти мають статичний принцип роботи, оснований на використанні гармонік вищих порядків, які з'являються у разі спотворення форм основного сигналу живлення. Для досягнення такого ефекту застосовуються спеціальні магнітопроводи, які працюють в зоні насичення. Спотворений через нелінійність кривої намагнічування магнітопроводу сигнал піддається подальшій фільтрації вищих частот. Перетворювачі частоти такого типу, через низькі діючі частоти знаходили своє застосування для нагрівання і плавлення масивних металевих об'єктів. Електромеханічні перетворювачі в певному періоді часу займали головну позицію серед частотних інверторів високої частоти. Принцип їх роботи ґрунтувався на генерації високої частоти за допомогою синхронних генераторів, розташованих співвісно з асинхронними двигунами. Таке рішення дозволило досягти рівня вихідної потужності до 500 кВт за діючої частоти до 10 кГц. Поширення такого способу підвищення частоти зумовлювалося простотою, надійністю конструкції і її унікальністю по відношенню до вихідних параметрів протягом довгого часу. Основним недоліком механічного перетворювача була обмеженість максимальної вихідної частоти живлення [4]. Альтернативою двох попередніх способів є тиристорний перетворювач частоти. Використання напівпровідникової техніки істотно удосконалило системи і комплекси індукційного нагрівання, а також розширило область їх застосування. Так, було досягнуто підвищення параметрів потужності від 1000 кВт до 3000 кВт [4]. За своєю конструкцією перетворювач відповідав мостовій схемі включення напівпровідників. До недоліків використання тиристорів можна віднести їх режими роботи і умови комутації. Система керування обов'язково повинна містити вузол контролю комутації тиристора і струму, що протікає через нього, з урахуванням фази коливань у ланцюзі. Це викликано тим, що керуючі сигнали можуть працювати тільки на відкривання, а його закриття залежить тільки від амплітуди струму утримання. Саме з цієї причини вихідні частотні характеристики жорстко прив'язуються до електричних параметрів коливальних контурів і контурів завантаження. Неконтрольоване закриття тиристора в мостових схемах призводить до появи наскрізних струмів і виходу з ладу перетворювача.

Подальший розвиток напівпровідникової техніки супроводжувало появу перетворювачів частоти з використанням високочастотних сильноточових транзисторів, виготовлених за технологією IGBT або MOSFET. Напівпровідникові ключі такого типу є основою у виробництві сучасних установок індукційного нагрівання. Контролювання процесів комутації ключів частотного перетворювача дозволяє досягати оптимальних режимів роботи системи індукційного нагрівання в цілому і підвищує їх термін служби за рахунок можливості варіювання частотних параметрів управління для отримання умов «м'якого» перемикачів ключів. Поява широкої лінійки електронних інтегральних пристроїв, а також інтегральних електронних вузлів дозволило спростити конструкцію за рахунок підвищення надійності при меншій кількості допоміжних пристроїв. До поширених схем реалізації частотних перетворювачів можна віднести, як і в разі тиристорних перетворювачів, напівмостові і мостові схеми вихідного каскаду перетворення [5]. Посилаючись на інформаційні джерела виробників, вибір необхідних радіоелектронних компонентів можна здійснити в залежності від кінцевих параметрів виходу, які повинен забезпечувати частотний перетворювач. Досконалість технології виробництва напівпровідникових ключів за технологією IGBT або MOSFET, а також контроль допусків відхилень основних електростатичних і динамічних параметрів дає можливість конструювати пристрій індукційного нагрівання з меншою кількістю контрольованих вузлів. Так, детермінованість вольт-амперних характеристик для різних температурних режимів і струмових навантажувальних характеристик, дозволяє без додаткових ланцюгів зворотного зв'язку здійснювати контроль комутування струмів і напруг на електронному ключі.

Установка індукційного нагрівання для реалізації альтернативних технологічних операцій

Крім описаних вище основних операцій виробництва з використанням індукційного нагрівання, цей метод безконтактного нагрівання, за задумом авторів, може мати ширшу сферу застосування. Так, індукційний нагрів може бути застосований в технологіях ремонту та обслуговування вузлів і деталей машин, а саме транспортних засобів. Передбачаються такі технологічні операції:

- попереднє нагрівання різьбових з'єднань, які зазнали корозії, для їх демонтажу;
- попереднє нагрівання нерізьбових з'єднань перед їх демонтажем;
- нагрівання клейових з'єднань для їх демонтажу без пошкодження основних елементів (демонтаж стекол);
- виконання рихтування дрібних вм'ятин кузовних елементів транспортних засобів без пошкодження зовнішнього лакофарбового покриття.

Для ефективної реалізації запропонованих операцій ремонту, система індукційного нагрівання, що включає в себе джерело змінного поля — індуктор і джерело живлення індуктора, ці конфігурації повинні відповідати вимогам як енергоефективності, так і економічної доцільності розробок таких систем.

Оскільки вищеперераховані операції не вимагають створення будь-яких унікальних конфігурацій діючих полів, в основі розробки параметрів індуктора покладено принцип досягнення найбільшого електромагнітного зв'язку. Як відомо, таку властивість мають індуктори циліндричної форми і індуктори з використанням феромагнітних концентраторів. Варіації форм останніх дають можливість отримувати найбільше значення ККД процесу нагрівання.

Джерело напруги високої частоти, як одна з найважливіших складових має бути виконане з оптимальними технічними рішеннями. Ця вимога пов'язана з необхідністю створення дешевого робочого зразка, що реалізує задану потужність. Як показують первинні розрахунки, для загальних випадків процесу нагрівання металів заданого об'єму, необхідна потужність лежить в діапазоні до 2 кВт. За частоти діючих полів від 20 до 50 кГц необхідна вихідна потужність з високим ККД перетворення може бути реалізована напівмостовим перетворювачем, виконаним на силових IGBT або MOSFET транзисторах.

Такий підхід, а саме комбінація індукторів ефективною форми з найбільшим коефіцієнтом електромагнітного зв'язку і перетворювача частоти напруги живлення дозволить отримати систему індукційного нагрівання з широкою номенклатурою виконуваних операцій за низької собівартості.

Висновки

Проведений аналіз сучасного стану використання ремонтних технологій із застосуванням системи індукційного нагрівання вказує на можливість ширшого застосування таких систем, тобто збільшення переліку можливих технологічних операцій, що виконуються за допомогою пристроїв такого нагрівання. Окрім того, описані конфігурації виконання інструментів-індукторів та існуючих принципів реалізації джерел живлення індукційного нагрівання та їх комбінації суттєво впливають на ефективність роботи устаткування такого типу. Виходячи з цього, для кожної окремої виробничої операції існує можливість вибрати оптимальну систему індукційного нагрівання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Induction heating applications [Electronic resource] / The site of the company EFD induction. — Access mode: <http://www.efd-induction.com/en/Download/Brochures.aspx>.
2. Induction brazing [Electronic resource] / The site of the company EFD induction. — Access mode: <http://www.efd-induction.com/en/Download/Brochures.aspx>.
3. Слухоцький А. Є. Установки індукційного нагрівання / А. Є. Слухоцький. — Львів : Енергоіздат, 1981. — 328 с.
4. Simpson P. G. Induction heating. Coil and System Design = Індукційний нагрів. Дизайн соленоїда та системи / Simpson P. G. ; McGraw-Hill Book Company Inc. — New York — Toronto — London, 1960. — P. 295.
5. Frode Kleveland. New HF converter for induction heating / Frode Kleveland, John Kåre Langelid, Leif Markegård ; EFD Induction a.s Bøleveien 10 3700 Skien, Norway [Electronic resource] / The site of the company EFD induction. — Access mode: <http://www.efd-induction.com/en/InductionNews/Articles.aspx>.

Рекомендована кафедрою технології підвищення зносостійкості ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.06.2017

Батузін Юрій Вікторович — д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри фізики, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com ;

Сабокар Олег Сергійович — аспірант, асистент кафедри фізики, e-mail: o.s.sabokar@gmail.com ;
Стрельнікова Вікторія Анатоліївна — аспірант кафедри фізики, e-mail: v.strelnikova91@gmail.com .
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

Yu. V. Batyhin¹
O. S. Sabokar¹
V. A. Strelnikova¹

Equipment for Practical Induction Heating Implementation in Modern Technology Engineering

¹Kharkiv National Automobile and Highway University

The contemporary state of the induction heating technologies has been presented in this article. High level of the induction heating technologies integration in the manufacturing branches enables to find out the possibilities to choose the most optimal method to realize equipment for contactless heating. The main electrical units of the induction heating device designed have been described in detail according to modern electronic components at their medium price. The electrical requirements of reliability and safety, technological operations requirements have been taken into consideration.

Keywords: induction heating, mechanical engineering, Induction welding, maintenance of vehicles, magnetic field, electromagnet.

Batyhin Yuriy V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Physics, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com ;
Sabokar Oleh S. — Post-Graduate Student, Assistant of the Chair of Physics, e-mail: o.s.sabokar@gmail.com ;
Strelnikova Viktoriia A. — Post-Graduate Student of the Chair of Physics, e-mail: v.strelnikova91@gmail.com

Ю. В. Батыгин¹
О. С. Сабокар¹
В. А. Стрельникова¹

Оборудование для практической реализации индукционного нагрева в современных технологиях машиностроения

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Проанализировано состояние технологий индукционного нагрева на современном этапе развития. Высокая степень интегрированности технологий индукционного нагрева в отраслях современной промышленности дает возможность выбрать оптимальный способ реализации оборудования индукционного нагрева. Предложены и описаны основные узлы разрабатываемого индукционного нагревателя с использованием современных технологий изготовления и элементной базы при оптимальной их стоимости. В конструкции учитываются как электротехнические требования к комплексу ИН, так и требования к возможным ремонтным операциям.

Ключевые слова: индукционный нагрев, машиностроение, индукционная сварка, техническое обслуживание транспортных средств, магнитное поле, электромагнит.

Батыгин Юрий Викторович — д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой физики, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com ;

Сабокар Олег Сергеевич — аспірант кафедри фізики, e-mail: o.s.sabokar@gmail.com ;
Стрельникова Вікторія Анатоліївна — аспірант кафедри фізики, e-mail: v.strelnikova91@gmail.com