

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

САБОКАР ОЛЕГ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 621.318

**УДОСКОНАЛЕННЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО ОБЛАДНАННЯ
ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЙ РЕМОНТУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент
Чаплигін Євген Олександрович,
Харківського національний автомобільно-дорожній
університет, доцент кафедри фізики.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, с.н.с.
Петков Олександр Олександрович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри інженерної електрофізики;

кандидат технічних наук, доцент
Богуславський Леонід Зіновійович,
Інститут імпульсних процесів і технологій Національної
академії наук України, (м. Миколаїв),
завідувач відділу високовольтних імпульсних систем.

Захист відбудеться 14 березня 2019 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий 12 лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Швидкість та якість виконання виробничих операцій будь-якого технологічного процесу є важливими складовими конкурентоспроможності технології виробництва у порівнянні зі світовими аналогами. Обробка листових металів для надання певних геометричних форм займає основну частку серед виробництв машинобудування. За останні 50–60 років набуло актуальності використання технологій із застосуванням систем магнітно-імпульсної обробки металів (МІОМ) через характерні якісні показники цієї технології, наприклад, швидкості виконання операцій, відсутності механічних ушкоджень металу, відсутність великої кількості рухомих частин і т. д. Поряд із цим існує багато пропозицій щодо використання систем МІОМ в технологіях ремонту. Аналізуючи існуючі пропозиції та впровадження, можна визначити практичність застосування магнітно-імпульсного притягання у процесах ремонту кузовних покриттів, головною відзнакою яких є можливість збереження цілісності зовнішнього пофарбованого покриття та можливість виконувати операції з лише зовнішнім доступом до області механічного ушкодження. Разом з тим, незважаючи на велику кількість запропонованих систем МІОМ, досі не можна стверджувати про остаточне їх включення до технологічних циклів, через недосконалість їх конструкцій, яка визначає її масогабаритні показники, суттєвої залежності якості магнітно-імпульсного впливу від електрофізичних показників металу, а також вимоги до стабільності показників зовнішньої мережі живлення. Таким чином, для того щоб наблизити технології МІОМ до більш широкого застосування, необхідно виконати певні зміни в структурі самого комплексу МІОМ через модернізацію блоків та вузлів, а також поліпшити якість виконання операцій силового впливу шляхом отримання більш сприятливих показників пластичності металу в зоні обробки. Отже підвищення показників систем МІОМ, як технічних так і технологічних, для технології ремонту транспортних засобів з метою підвищення її ефективності є актуальною задачею науково-практичних досліджень і визначає напрямок та мету дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано на кафедрі фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ), а основні експериментальні дослідження за темою дисертації проводились на базі електротехнічної лабораторії АТ «Елеватормлинмаш».

Дослідні роботи виконувались відповідно до плану науково-дослідної, планово-тематичної роботи кафедри, а також завдань держбюджетної теми МОН «Універсальні інструменти безальтернативних технологій ремонту сталевих та алюмінієвих елементів конструкцій автотранспорту». (ДР № 0117U005218).

Мета і завдання дослідження. *Мета дослідження* – удосконалення магнітно-імпульсного устаткування для технологій ремонту транспортних засобів, яке спрямоване на підвищення якості виконання операцій обробки металів, а також характерних технічних показників магнітно-імпульсних установок (МІУ), створенням автономних і інтегрованих систем індукційного нагріву як конструктивних і функціональних елементів систем магнітно-імпульсної обробки

металів для реалізації вдосконаленого електротехнічного устаткування, працюючого із сильними електромагнітними полями.

Для досягнення зазначеної мети поставлені задачі:

- аналіз впливу геометричних параметрів обмотки зовнішнього індуктора, а також частоти збуджувального струму на кількісні показники утворення індуктованих струмів у металі об'єкта обробки;

- аналіз залежності коефіцієнту трансформації за струмом при зміні геометричних показників індуктора та залежності швидкості нагрівання при варіюванні глибини проникнення зовнішнього електромагнітного поля в метал об'єкту нагрівання;

- розробка та аналіз роботи альтернативної конструкції системи заряджання ємнісних накопичувачів МІУ, яка заміщує високовольтний підвищувальний трансформатор;

- аналіз та вибір схеми збудження коливань струму системи індукційного нагріву при різних режимах роботи та аналіз впливу використання модифікованого сигналу напруги збудження коливань при його різних часових параметрах, також отримання математичних залежностей шляхом складання математичної моделі з її наступним числовим аналізом для виконання первинних інженерних розрахунків таких систем;

- експериментальна апробація розроблених зразків систем індукційного нагріву та системи заряджання ємнісних накопичувачів магнітно-імпульсної установки на відповідність з очікуваними електротехнічними показниками роботи та показниками технологічних операцій ремонту транспортних засобів.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси проникнення змінного сильного електромагнітного поля, яке створюється зовнішнім інструментом – індуктором для збудження вихрових струмів в області металу, що приводить до його локального нагрівання, а також електричні процеси формування часових форм функцій струмів і напруги у силових контурах живлення магнітно-імпульсної установки та установок індукційного нагріву.

Предмет дослідження – індуктор-інструмент та джерело живлення системи індукційного нагріву, а також система заряджання ємнісних накопичувачів енергій магнітно-імпульсної установки для технологій ремонту транспортних засобів.

Методи дослідження. Аналіз електромагнітних процесів виконувався за допомогою математичного апарату із застосуванням основних методик інтегрування рівнянь Максвела та аналізу електричних процесів, спираючись на основні положення теорії електричних кіл для чисельного моделювання. Експериментальні дослідження електричних та електромагнітних процесів проводились на спеціально розроблених експериментальних установках індукційного нагріву з набором робочих індукторів з різними конструктивними параметрами та спеціально розробленій системі, яка являє собою вузол заряджання ємнісних накопичувачів енергії МІУ, за допомогою відомих методів вимірювання електричних величин із використанням цифрової вимірювальної техніки.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- вперше запропонована, розроблена та апробована система ступеневого

заряджання ємнісних накопичувачів, що працює як вузол регулятора потужності і є удосконаленим вузлом первинного перетворювача рівнів напруги для силового зарядного контуру МІУ, який заміняє високовольтний підвищувальний трансформатор, що дозволило суттєво зменшити загальну вагу МІУ та передбачає заряджання ємнісних накопичувачів енергій від зовнішньої мережі живлення з нестійким рівнем вихідної напруги;

– отримала подальший розвиток система індукційного нагріву як функціональна складова установки магнітно-імпульсної обробки металів для здійснення попереднього нагрівання області обробки, яка відрізняється тим, що працює в режимі збудження гармонійних коливань струму періодичними імпульсами напруги з частотою нижчою за резонансну, що дозволяє знизити споживання активної потужності в режимі неробочого ходу;

– удосконалено математичну модель, яка описує роботу вузла ступеневого заряджання ємнісних накопичувачів з рекомендаціями щодо інженерних розрахунків подібних систем МІУ, яка представляє альтернативний варіант представлення роботи електричних контурів, що містять напівпровідникові ключі;

– запропоновано та підтверджено доцільність використання модифікованої форми біполярного меандру сигналу напруги живлення силового коливального контуру системи індукційного нагріву з запропонованим оптимальним часовим параметром для збудження гармонійного струму, який протікає в індукторі-інструменті системи індукційного нагріву, що дозволило зменшити кількість спектральних складових сигналу збудження.

Практичне значення отриманих результатів для електротехнічної галузі

1. Розроблено систему індукційного нагріву, яка дозволяє розширити номенклатуру операцій в технологіях ремонту засобів транспорту із використанням індукційного нагріву. Обґрунтовано вибір параметрів геометричних форм інструмента-індуктора, параметрів електричних контурів та доцільність вибору їх структури для найбільш ефективної та стабільної роботи системи.

2. Запропоновано технічне рішення із сумісним використанням установок МІОМ та індукційного нагріву як допоміжної системи для попереднього нагріву зони силового впливу на метал, що дозволило підвищити процент вдалого виконання операцій магнітно-імпульсного притягання зон листового металу.

3. Розроблено та апробовано альтернативну конструкцію системи ступеневого заряджання ємнісних накопичувачів енергії для МІУ, яка дозволяє суттєво знизити масу та розміри усього комплексу. Обґрунтовано доцільність використання запропонованої структури вузла ступеневого заряду, а також докладно представлена математична модель, що дозволяє виконувати актуальну оцінку роботи системи на стадії розробки.

4. Сконструйовані технічні зразки систем індукційного нагріву були експериментально досліджені та апробовані, отримано позитивний ефект від їх використання у технологіях ремонту транспортних засобів. Підтверджена ефективність застосування індукційного нагріву різьбових з'єднань, які піддалися корозії, для їх демонтажу, а також підвищення ефективності видалення вм'ятин у зразках листових металів при магнітно-імпульсній обробці металу.

5. Відповідно до наданих в дисертаційній роботі розробок наведено аналітичні розрахунки із кінцевими математичними залежностями, що використовуються для розрахунку основних параметрів подібних систем, які розробляються або для їх подальших досліджень.

Особистий внесок здобувача. Усі положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз тематичних літературних джерел, постановка та розв'язання задачі, постановка та проведення експериментів, створення дослідних зразків устаткування, аналіз та інтерпретація одержаних експериментальних даних. Створення та апробація методики проведення операцій попереднього нагріву при магнітно-імпульсній обробці металу та при виконанні ремонтних операцій транспортних засобів. Представлені рекомендації, щодо проектування елементів зарядного контуру магнітно-імпульсних установок та вибору режиму роботи систем індукційного нагріву. Проведено чисельне моделювання електромагнітних процесів в описаних електротехнічних вузлах відповідно до прийнятих математичних моделей.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались, обговорювались і були ухвалені на науково-практичних семінарах: «Електромагнітні технології в автомобілебудуванні» (Харків 2015–2017 рр.), «Молодий винахідник» (Харків, 2016р.). В 2018 р. результати роботи були представлені на міжнародному симпозіумі SIEMA – 2018 (Харків, 2018 р.) та науково-практичних конференціях ХНАДУ 2016–2018 рр.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 16 наукових праць, з них 1 монографія у співавторстві, 12 статей у наукових фахових виданнях України (з них 3 у виданнях, які входять до міжнародних баз даних Web of Science), 3 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотацій двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 147 сторінок з них 44 рисунка по тексту; 10 таблиць по тексту; списку використаних джерел з 101 найменування на 11 сторінках, 2 додатка на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

Перший розділ присвячено аналізу науково-технічної літератури, що стосується електрофізичних процесів, які відбуваються в технологіях обробки металів імпульсними магнітними полями з метою надання їм певної геометричної форми поверхні, а також процесів, які відбуваються в технологіях індукційного нагріву та технічних способів їх реалізації. Визначено, що більшість устаткування індукційного нагріву є стаціонарним та розрахованим на виконання типових конвеєрних операцій, наприклад, поверхневого гартування металевих об'єктів, індукційного зварювання шовних труб та багато інших операцій, які передбачають їх циклічне повторення. В розділі розглянуто існуючі конструкції та конфігурації виконавчих елементів систем індукційного нагріву в залежності від цільового

призначення. Окремо висвітлено існуючі технічні реалізації сильнострумівих перетворювачів частоти для збудження високочастотного струму в індукторах-інструментах систем індукційного нагріву.

Розглянуто існуючі технології металообробки, що направлені на надання необхідних геометричних форм листовим металам. Окремо висвітлено технології магнітно-імпульсної обробки у порівнянні з класичними механічними методами та описано основні фізичні принципи обробки металів тиском зовнішніми імпульсними полями. Також проаналізовано стан альтернативного застосування даного способу обробки у технологіях ремонту транспортних засобів для виконання операцій рихтування зон кузовних елементів, які зазнали незначних пошкоджень без руйнування зовнішнього лакофарбового покриття.

Окремо проаналізовано праці, в яких описано вплив нагріву металу на його пластичні властивості, та застосування такої концепції під час обробки металу. За таких тверджень, спираючись на існуючі дослідження, які прямо вказують на підвищення ефективності за рахунок використання нагріву, індукційний нагрів в технологіях МІОМ є концептуально доцільним, а дослідження у цьому напрямі є актуальними.

Визначено науково-практичну задачу, вирішення якої направлене на підвищення показників ефективності під час обробки металу, а також технічне удосконалення систем індукційного нагріву та МІОМ з метою зменшення масагабаритних показників, та розширення номенклатури технологічних операцій ремонту транспортних засобів.

У другому розділі наведено теоретичний аналіз електромагнітних і теплових процесів у системі для індукційного нагріву, що складається з кругового багатовиткового соленоїда, який розташований над площиною тонкостінного листового металу. Прийняті для розрахунків просторові моделі зображено на рис. 1 і відповідно складені рівняння Максвелла були адаптовані до прийнятої системи координат.

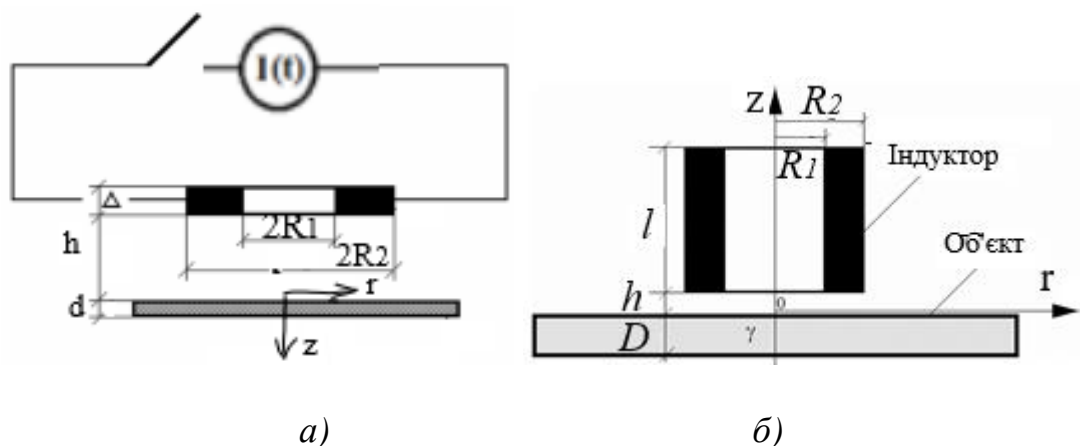


Рисунок 1 – Розрахункова модель в циліндричній системі координат (а), модель індукторної системи з довгим циліндричним індуктором, на торці якого розташована тонкостінна листова заготовка (б).

Даний розгляд дозволяє оцінити кількісні показники процесів збудження

вихрових струмів за допомогою фізико-математичної моделі, яка забезпечує врахування дифузійних ефектів, обумовлених реальними величинами геометричних і електрофізичних параметрів об'єкта обробки.

Прийнявши допущення про те, що електромагнітні процеси в системі квазістационарні, так що $(\omega l / c) \ll 1$, де ω – циклічна частота, c – швидкість світла у вакуумі, l – найбільший характерний розмір системи, а метал обмотки індуктора не впливає на електромагнітні процеси, що протікають, були отримані розрахункові співвідношення які дозволяють виконати числовий аналіз електродинамічних та теплових процесів.

Виконавши стандартний алгоритм інтегрування рівнянь Максвела, із використанням скорочень

$$\Phi_k(\lambda) = \cos(\beta_k) \left[(\lambda D)^2 + 2 \cdot (\lambda D) - \beta_k^2 \right] - 2\beta_k \sin(\beta_k) [1 + (\lambda D)]$$

$F_k(\lambda, \zeta) = \sin(\beta_k \cdot \zeta) + \frac{\beta_k}{(\lambda D)} \cdot \cos(\beta_k \cdot \zeta)$ було отримано просторово-часовий розподіл щільності струму, індукованого в листовому металі в просторі оригіналів

$$j_\varphi(t, r, \zeta) = 2j_m \cdot \int_0^\infty f_1(\lambda) e^{-\lambda h} (1 - e^{-\lambda \ell}) \cdot \lambda J_1(\lambda r) \times \\ \times \sum_{k=0}^\infty a_k \frac{\beta_k \cdot F_k(\lambda, \zeta)}{\Phi_k(\lambda)} \cdot \frac{dj(t)}{dt} * e^{-\frac{(\beta_k^2 + (\lambda D)^2)}{\tau_D} t} d\lambda. \quad (1)$$

де t – параметр часу, r – радіальна змінна, ζ – змінна, пов'язана з товщиною листового металу, j_m – амплітуда густини збуджувального струму, $f_1(\lambda)$ – образ радіального розподілення, густини збуджувального струму, λ – параметр перетворення Фур'є-Бесселя, $J_1(\lambda r)$ – функція Бесселя першого порядку, a_k – ваговий коефіцієнт, β_k – корені рівняння образу за Лапласом, τ_D – характерний час дифузії поля в листовий метал, * – оператор згортки функцій.

Отримана залежність відносної величини струму відносно струму індуктора з урахуванням товщини витків та проміжків між ними.

Усереднення індукованого струму за просторовими координатами і запис у термінах фази збуджувального сигналу приводить до залежності, що впливає з (1)

із використанням скорочень: $F_{1k}(x) = (1 - \cos(\beta_k)) + \left(\frac{\beta_k}{x} \right) \cdot \sin(\beta_k);$

$$\Phi_k(x) = \cos(\beta_k) \cdot (x^2 + 2 \cdot x - \beta_k^2) - 2\beta_k \sin(\beta_k) \cdot (1 + x);$$

$$F(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{\left(x \cdot \frac{R_1}{D}\right)}^{\left(x \cdot \frac{R_2}{D}\right)} y \cdot J_1(y) dy.$$

$$\overline{I_\varphi(\varphi, R)} = \left(\frac{2 \cdot I_m}{N_m}\right) \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 \int_0^\infty F(x) e^{-x \frac{h}{D}} \left(1 - e^{-x \cdot w_\ell \frac{d}{D} \left[1 + \frac{\Delta}{d} \left(1 - \frac{1}{w_\ell}\right)\right]}\right) \times$$

$$\times \left(1 - J_0\left(x \frac{R}{D}\right)\right) \sum_{k=0}^\infty a_k \cdot \frac{F_{1k}(x)}{\Phi_k(x)} \cdot \Omega(\varphi) dx,$$

де $\varphi = \omega \cdot t$ – фаза збуджувального струму, $\omega = 2\pi \cdot f$ – циклічна частота, f – робоча частота, $j(\varphi)$ – фазова залежність збуджувального струму.

Оригінал фазової залежності (2) визначається як

$$\begin{aligned} \Omega(\varphi) &= \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} * e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{(\omega \cdot \tau_D)} \varphi} = \int_0^\varphi \cos(\alpha) \cdot e^{-\frac{(\beta_k^2 + x^2)}{(\omega \cdot \tau_D)} (\varphi - \alpha)} d\alpha = \\ &= \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \cdot \tau_D}\right)} \cdot \left[\sin(\varphi) + \left(\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \cdot \tau_D}\right) \cdot \left(\cos(\varphi) - e^{-\left(\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \cdot \tau_D}\right) \cdot \varphi} \right) \right]. \end{aligned}$$

Значення відносної магнітної проникності приймається в інтервалі $\mu_r \in [200; 500]$, що відповідає $H > 10^4 - 10^5$ А/м для багатьох сортів сталі з урахуванням діючих частот. Як показують оцінки за законом повного струму, даному діапазону значень напруженості відповідають, струми від 50 А і вище в обмотці індуктора із проводу з перерізом 1мм. Робоча частота гармонійного струму в індукторі становить 25 кГц.

За отриманими аналітичними співвідношеннями були побудовані графіки просторового розподілу густини індукованих струмів у металі об'єкта відносно різних геометричних параметрів обмотки індуктора рис. 2.

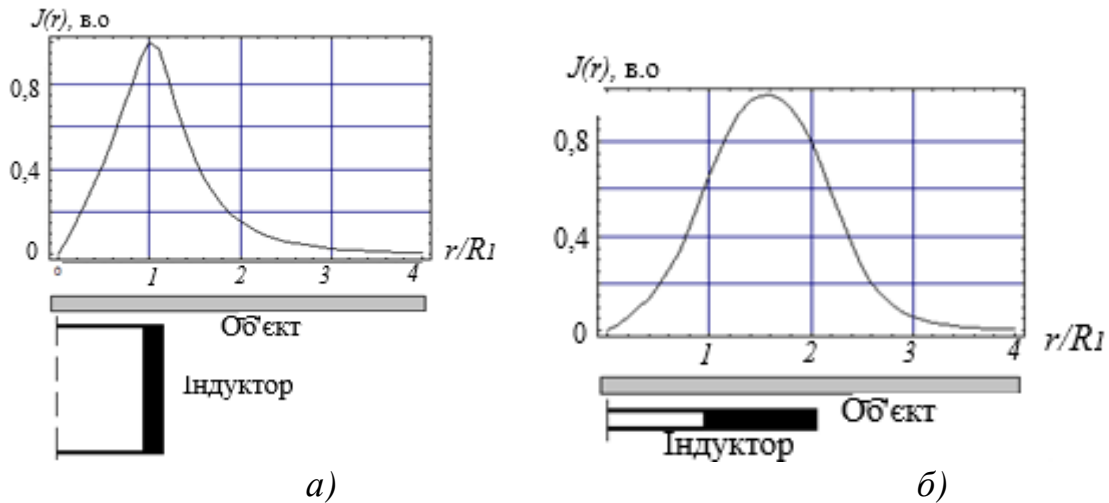


Рисунок 2 – Радіальний розподіл лінійної щільності індукованого струму (діаметр поперечного перерізу витка $0,002$ м, $d = 0,002$ м, частота $f = 25$ кГц) для протяжного циліндричного соленоїда із кількістю витків по горизонталі – $w_r = 1$ і вертикалі – $w_\ell = 10$ (а) та плоского кругового соленоїда із числом витків по горизонталі – $w_r = 10$ і вертикалі – $w_\ell = 1$ (б)

З умови балансу Джоулевого тепла та його кількості, необхідного для зміни температури на величину $-dT^o$, знаходимо залежність для температури нагрівання розглянутої кругової області листового металу за час, що відповідає довільному фазовому проміжку – $\Delta\varphi$

$$\Delta T^o = \frac{1}{(M \cdot C \cdot \gamma \cdot d \cdot \omega)} \cdot \int_0^{\Delta\varphi} (I_\varphi(\varphi, R))^2 \cdot d\varphi, \quad (3)$$

де M – маса пластини, C – питома теплоємність металу пластини,

Основні результати обчислень для прийнятих параметрів розглянутої системи індукційного нагріву листових ферромагнетиків зведені в табл.1.

Таблиця 1 – Числові показники нагрівання

Параметр	μ_r	Δ / d	$K(r \leq R_2, \varphi_{\max})$	t , хв
Значення	200	0,12	15,0	4,6
	350	0,085	9,57	11,5
	500	0,071	7,53	18,08

Найбільш прийнятним і ефективним режимом індукційного нагріву тонкостінного листового ферромагнетика представляється режим, у якому величина скін-шару наближається до товщини листа, тобто, $\Delta / d \rightarrow 1$.

На величину коефіцієнту трансформації k за струмом впливають тонкостінність, точніше «прозорість» листової заготовки для діючих

електромагнітних полів та розташування обмотки відносно площини об'єкта впливу (як ідеального провідника, так і листового металу), що пояснюється рівнем електромагнітного зв'язку між ними (так, при розташуванні циліндричної обмотки торцем до об'єкта впливу величина коефіцієнту зменшується майже у 2 рази в порівнянні із круговою обмоткою, площа якої паралельна площині провідника).

У табл. 2 та 3 зведені дані про максимально можливі показники електромагнітних процесів збудження вихрових струмів індукторами різної геометрії в листовій заготовці товщиною $d = 0,002$ м.

Таблиця 2 – Показники індукційних процесів для обмоток із кількістю витків в одному ряді, що дорівнює $w_{\ell,r} = 10$

Число рядів в обмотці	Загальне число витків в обмотці	Протяжний циліндричний індуктор		Плоский циліндричний індуктор	
		Відносний струм, k	Відносний струм у відношенні до загальної кількості витків	Відносний струм, k	Відносний струм у відношенні до загальної кількості витків
1	10	2,5(4,6)	0,25 (0,46)	5,0 (9,35)	0,5 (0,93)
2	20	4,8 (9,5)	0,24 (0,47)	8,8 (16,2)	0,44 (0,81)

Таблиця 3 – Показники індукційних процесів для обмоток із кількістю витків в одному ряді, що дорівнює $w_{\ell,r} = 20$

Число рядів в обмотці	Загальне число витків в обмотці	Протяжний циліндричний індуктор		Плоский циліндричний індуктор	
		Відносний струм, k	Відносний струм у відношенні до загальної кількості витків	Відносний струм, k	Відносний струм у відношенні до загальної кількості витків
1	20	2,8 (6,04)	0,14 (0,3)	9,26 (19)	0,46 (0,95)
2	40	6,0 (12,27)	0,15 (0,31)	17,6 (32,73)	0,44 (0,8)

Примітка. У дужках наведені аналогічні показники для ідеально провідної заготовки.

Кількість рядів в обмотці індуктора будь-якої геометрії практично не впливає на ступінь збудження вихрових струмів як у випадку ідеального, так і реального провідника. Величина k залишається майже незмінною. Даний висновок слушний тільки тоді, коли метал обмотки є «прозорим» для діючих полів і не впливає на електромагнітні процеси в системі. Процес утворення струмів в металі в цьому випадку визначається винятково відстанню збуджувального струму від площини провідника.

У діапазоні частот збуджувального струму 25–50 кГц максимум коефіцієнта

трансформації залишається практично незмінним.

Зменшення висоти обмотки індуктора за рахунок зменшення висоти її витків приводить до збільшення коефіцієнта трансформації, що пояснюється збільшенням електромагнітного зв'язку при наближенні витків обмотки до площини металу.

Час нагрівання визначається конструктивним виконанням обмотки соленоїдів, а також величиною струму в межах, що не вимагають її примусового охолодження. Так, сталевий зразок товщиною 1 мм можна нагріти до температури 100°C струмом 25 А (частотою 50 Гц) в одношаровій обмотці індуктора за час до 10 хвилин. Збільшення шарів обмотки до 2-х дозволяє знизити час нагрівання до трьох хвилин. Струм 50 А в двошаровій обмотці із проведення збільшеного поперечного перетину нагріває сталевий зразок за 1,5 хвилини.

У **третьому розділі** наведено аналіз принципів схем реалізації джерела живлення системи індукційного нагріву та системи ступеневого заряджання ємнісних накопичувачів енергій установок МІОМ. Було проведено опис процесів збудження коливань в LC -контурі в режимі резонансу струмів при збудженні імпульсами струму та імпульсами напруги. На рис. 3 приведено схему, яка досліджувалась.

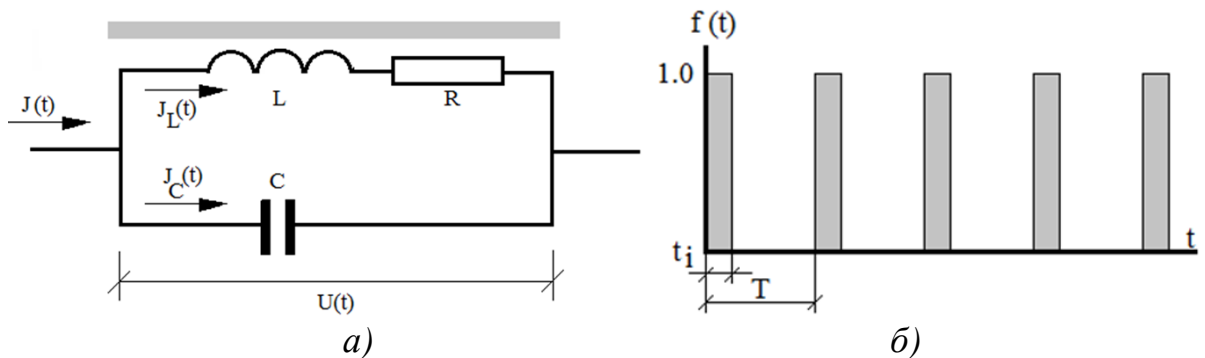


Рисунок 3 – Схема заміщення резонансного контуру з обмоткою індуктора (а) та часова форма сигналу збудження (б).

Напруга на індукторі

$$U(t) = U_m \cdot \eta \cdot \int_0^{\tau} f(x) \cdot e^{-\delta_0 2\pi\eta(\tau-x)} \times \\ \times [\cos(2\pi\eta(\tau-x)) + \delta_0 \sin(2\pi\eta(\tau-x))] dx, \quad (4)$$

де $U_m = 2\pi \cdot Z_w \cdot J_m$ – амплітуда; $Z_w = (L/C)^{1/2}$ – хвильовий опір контуру; $\eta = (\omega T) / (2\pi)$ – відношення частоти коливань до частоти слідування збуджуючих імпульсів; $\tau = t/T$ – відносний час періоду повторення збуджувальних імпульсів; $\delta_0 = \delta / \omega$ – відносний декремент загасання.

Струм в індукторі

$$J_L(t) = J_{Lm} \cdot \eta \cdot \int_0^{\tau} f(x) \cdot e^{-\delta_0 2\pi\eta(\tau-x)} \cdot \sin(2\pi\eta(\tau-x)) dx, \quad (5)$$

де $J_{Lm} = 2\pi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \cdot J_m = 2\pi \cdot \left(1 - \left(\frac{0.5R}{Z_w}\right)^2\right) \cdot J_m$ – амплітуда струму.

Часозалежні функції напруги (4) та струму (5) індуктора матимуть вигляд наданий на рис. 4.

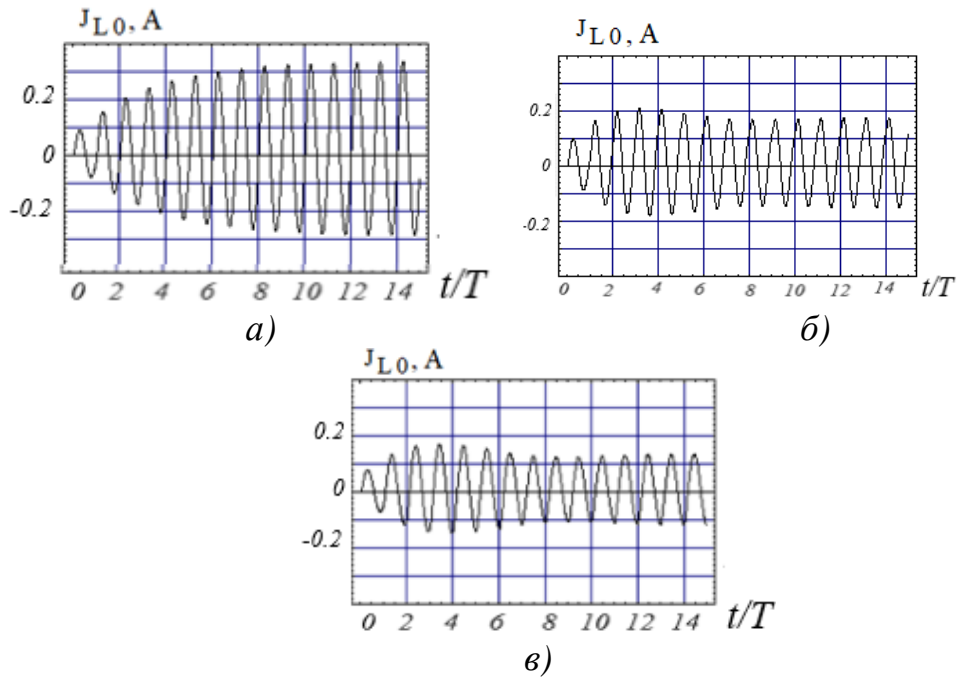


Рисунок 4 – Часові форми струмів індуктора: а) струм у резонансі, $\eta = 1$; б) струм при підвищенні частоти слідування щодо резонансної частоти, $\eta = 0,9$; в) струм при зниженні частоти слідування щодо резонансної частоти, $\eta = 1,1$

Аналіз системи коливань показав, що при збудженні коливань імпульсами напруги виникає аперіодичний процес протікання струму індуктора, що не відповідає потребам для збудження вихрових струмів у металі об'єкта обробки. Окрім того, було виявлено суттєву чутливість системи до відхилення частоти збудження коливань, що призводить до падіння амплітуди струму індуктора, а також появи сплесків напруги при комутації напівпровідникового ключа, чому передують появи точок перелому у функції струму індуктора.

Додатково було проаналізовано спосіб регулювання потужності під час збудження коливального контуру біполярними імпульсами напруги при можливості варіювання часу нульового рівня напруги між спадаючим та наростаючими фронтами сигналу (рис. 5).

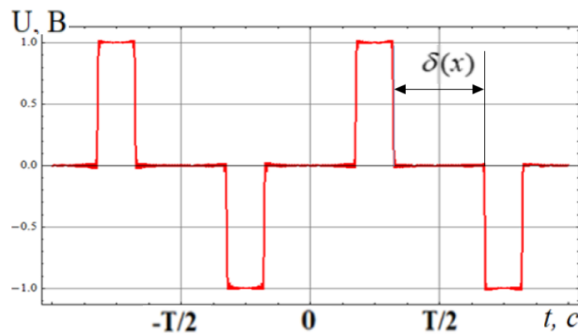


Рисунок 5 – Часова форма напруги живлення:

$\delta(x)$ – час затримки; x – коефіцієнт регулювання потужності; T – період

Після проведеного аналізу та представлення запропонованої форми сигналу як суму гармонійних складових (6), була виділена ефективна особливість, яка полягала у можливості зменшення спектральних складових, а саме наступної після несучої гармоніки сигналу.

$$F(t) = 4f \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\omega} \left[\cos(n\omega\delta(x)) - \cos\left(n\omega\left(\frac{1}{2f} - \delta(x)\right)\right) \right] \sin(n\omega t). \quad (6)$$

Така особливість процесу дозволяє не тільки полегшити навантаження на роботу напівпровідникового перетворювача частоти, але й зменшити ступінь нагріву на силові елементи електричного контуру.

Крім того, була наведена та проаналізована альтернативна конструкція вузла заряду ємнісних накопичувачів установок МІОМ, який є перетворювачем рівнів напруги. Особливою відзнакою запропонованої реалізації є відсутність силового електричного трансформатора, а сам вузол має суттєво менші масу та розміри. На рис. 6 представлена принципова схема даного ступеневого перетворювача.

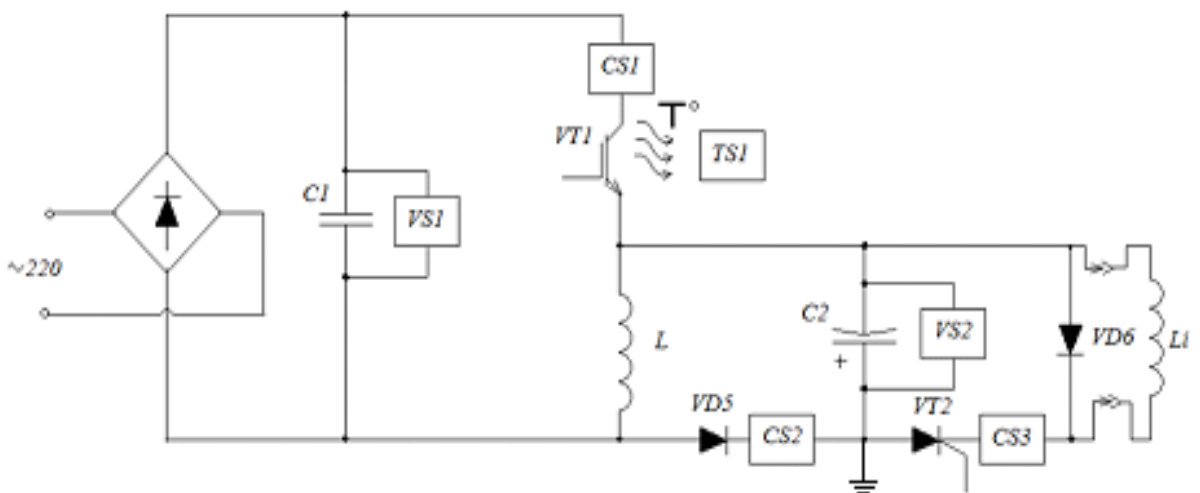


Рисунок 6 – Перетворювач напруги в складі МІУ: $VS1$, $VS2$ – датчики напруги; $CS1$ – $CS3$ – датчики струму; $TS1$ – датчик температури силового ключа; $VT1$ - $VT2$ – напівпровідникові ключі; $VD1$ – $VD6$ – силові високочастотні діод; L – дросель; Li – індуктор-інструмент, що підключається; $C1$, $C2$ – ємності

На виділеному проміжку часу, отримана часткова функція напруги заряду ємності

$$Uc(t - \tau_{1i})_i = \left(Uc(t - \tau_{2i-1})_{i-1} \cos(\omega(t - \tau_{2i})) + \left[\frac{J_3 + C\beta Uc(t - \tau_{2i-1})_{i-1}}{C\omega} \right] \sin(\omega(t - \tau_{2i})) \right) e^{-\beta(t - \tau_{2i})}, \quad (7)$$

де $\beta = R_L / 2L$ – декремент затухання; $\omega_0^2 = (LC)^{-1}$ – власна частота; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – частота перехідного процесу; τ_{2i} – час дії відповідного циклу; C_{1i} – константи інтегрування.

Кінцева функція напруги заряджання, з урахуванням часу приросту струму індуктора $t_L = R / L$ має наступний вигляд

$$U_C(t) = \sum_{i=1}^{\infty} U_{Ci}(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}}) \times \left[\eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}} \right) - \eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_n} \right) \right]. \quad (8)$$

де величина часу переносу енергії накопиченої на індуктивності до ємності визначається як

$$t_{c_i}(J_2(t)_i = 0) = \frac{1}{\omega} \arctg \left[J_3 \left(C Uc(\tau_{i-1})_{i-1} \omega + \frac{\beta J_3}{C\omega} + Uc(\tau_{i-1})_{i-1} \frac{\beta^2}{\omega} \right)^{-1} \right]. \quad (9)$$

Таким чином, аналіз системи збудження коливань в режимі резонансу струмів показав принципову працездатність системи, тим не менш відхилення частоти слідування збуджуючих імпульсів струму призводить до падіння амплітуди струму коливань та до появи точок перелому, що в технічній реалізації призводить до появи сплесків напруги значної амплітуди.

Регулювання амплітуд збуджувального струму у вихідних резонансних контурах системи індукційного нагріву може бути реалізовані трьома способами: фазовим, при живленні системи від мережі змінної напруги, індукційним регулюванням у вигляді джерела електричної енергії (система ступеневого заряду), а також способом модифікованого регулювання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ)

Використання інтегрованого ШІМ регулювання дозволяє виключити додатковий блок перетворення електричної енергії, а реалізація модифікованої форми біполярного меандру при затримці фронту $1/12$ від періоду несучої частоти

виключає наступну значиму гармоніку спектра сигналу, що наближає роботу системи до ідеалізації, яка використовувалась при виконанні аналізу, а так само підвищує якість збудження коливань у силових резонансних контурах.

Розроблена система ступеневого заряджання являє собою автономний блок, що дозволяє реалізувати перетворювач рівнів напруги як контрольованого джерела електричної енергії.

При аналізі процесу заряджання ємнісних накопичувачів МІУ було визначено, що рівень заряду не має асимптотичного стаціонарного характеру і має наближену до квадратичної залежність від тривалості циклу заряду.

Розглянута методика математичного представлення перехідного нестационарного процесу, у схемах зі змінними електричними параметрами, включаючи напівпровідникові елементи, дозволяє представляти фізичні часозалежні величини у вигляді частково-неперервних функцій.

Четвертий розділ містить результати апробацій розроблених систем на предмет відповідності до розрахованих показників параметрів електродинамічних процесів, а також ефективності від застосування запропонованих технічних рішень при виконанні операцій МІОМ та технологічних операцій ремонту транспортних засобів. Експериментальні дослідження проводились на виготовленому обладнанні (рис. 7).

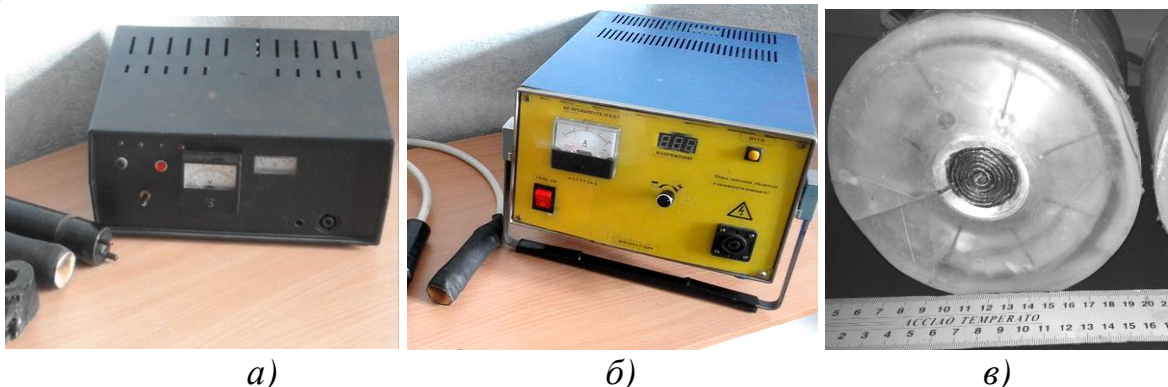


Рисунок 7 – Зовнішній вигляд джерела живлення системи індукційного нагріву, що працює в режимі резонансу струмів (а), що працює в режимі резонансу напруг (б), реалізація сумісного розташування індуктора індукційного нагріву та конічного індуктора МІОМ (в)

За схемою наведеною на рис. 6, була виконана фіксація функцій струму та напруги під час збудження коливального контура в режимі резонансу струмів рис. 8. Струм силового ключа, який фіксувався через шунт з активним опором $R = 0,1$ Ом. Максимальний струм становив 21,56 А. Струм в індукторі фіксувався через датчик струму із коефіцієнтом передачі $k\tau = 197$ А/В. Максимальний струм становив 33,86 А. Напруга на індукторі вимірювалась подільником омічного типу з коефіцієнтом передачі 1:10.

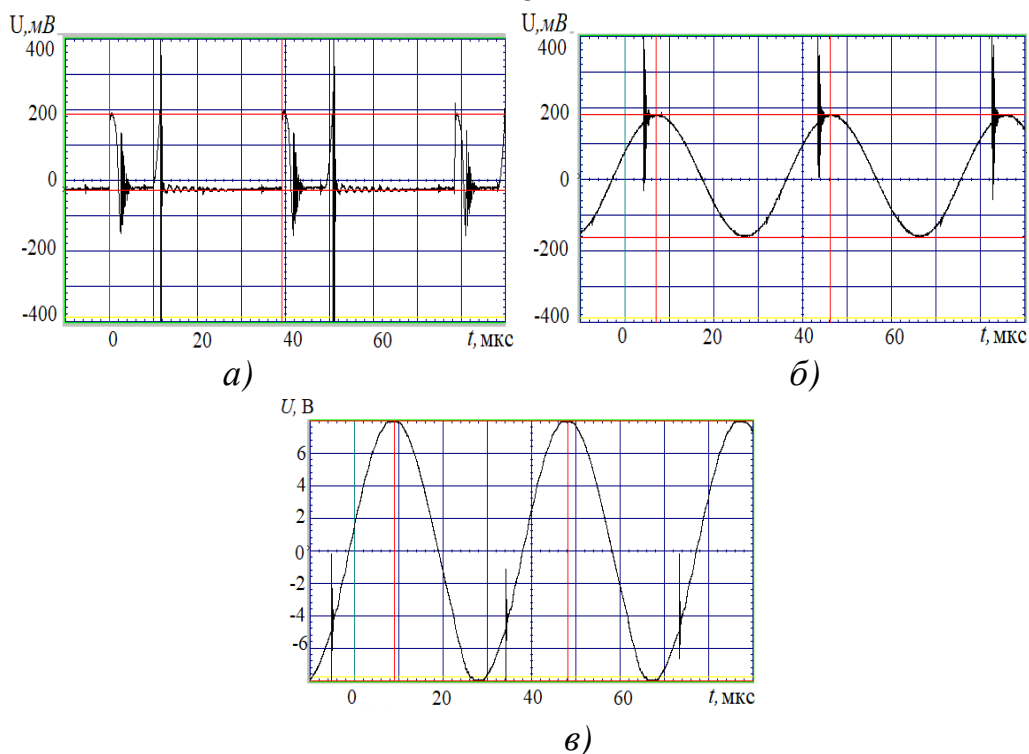


Рисунок 8 – Осцилограми струмів і напруги коливального контуру.

- а) струм силового ключа із шунта $R=0,1$ Ом, $J_{\text{макс}}= 21,56$ А;
 б) струм в індукторі (напруга з датчика струму, коеф. передачі $kt= 197$ Струм $J_{\text{макс}}=33,86$ А); в) напруга на індукторі (подільник напруги 1:10).

Експериментальні дослідження даної схеми показали суттєву обмеженість вимог до параметрів збуджувального сигналу, а саме його частоти, або параметрів індуктора, через появу сплесків напруги, що призводять до електричного пробоя комутатора, обумовлені розходженням частоти збудження та власної частоти контура.

З огляду на це була досліджена схема, яка передбачає збудження коливань у контурі, що працює в режимі резонансу напруги із застосуванням схеми збудження (рис. 9).

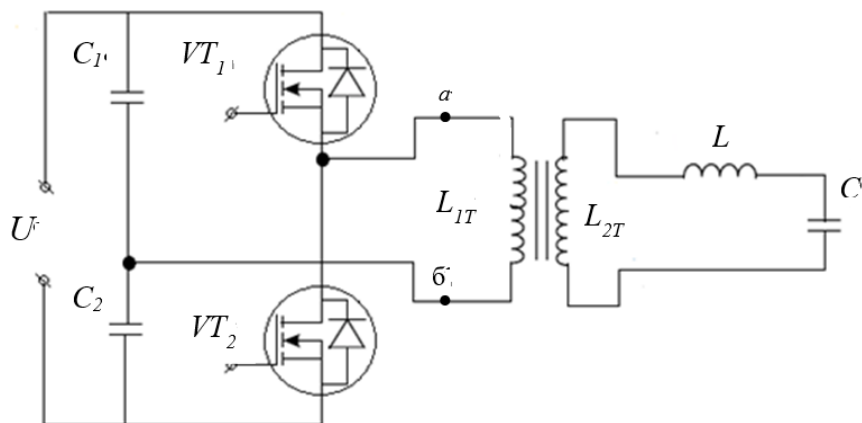


Рисунок 9 – Експериментальна схема збудження коливань в режимі резонансу напруги

Відповідно до запропонованого твердження у розділі 3, щодо використання модифікованої форми сигналу збудження було виконана фіксація осцилограм напруги живлення та спектрального складу, при виконанні заданих умов, (рис. 10 та рис. 11) в точках *a-b* (рис. 9) при еквівалентному активному навантаженні.

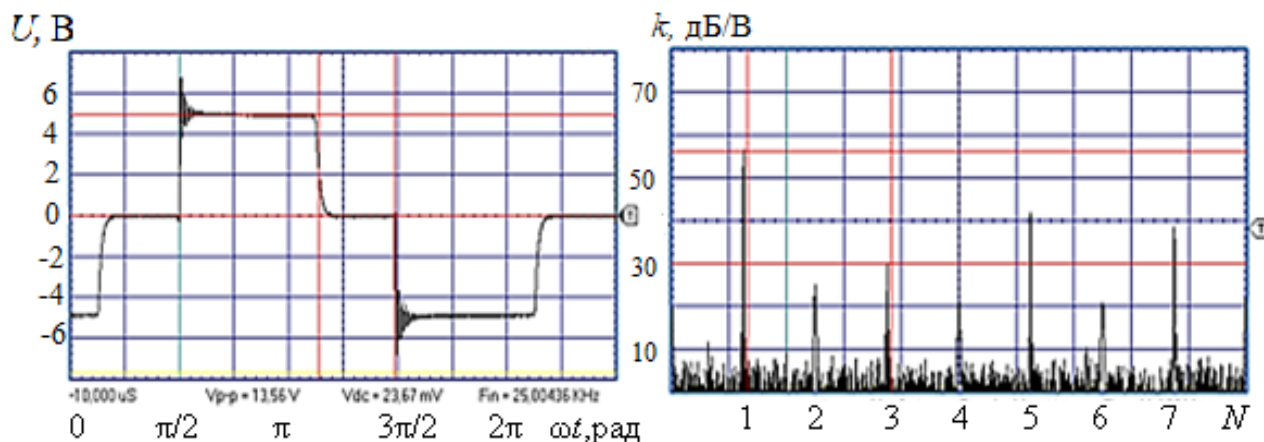


Рисунок 10 – Часова форма та спектральний склад біполярного меандру модифікованої форми

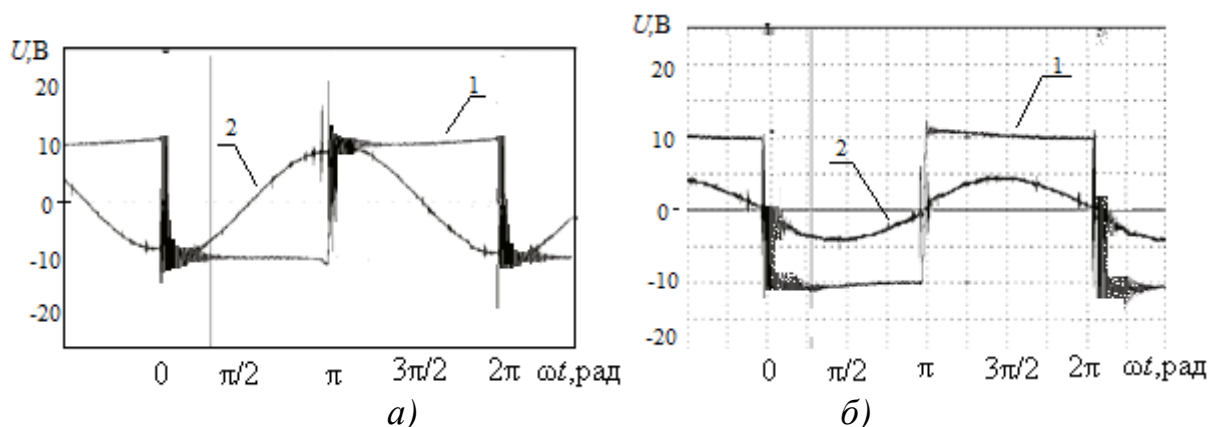


Рисунок 11 – Осцилограма напруги 1 та струму 2 в режимі неробочого ходу (а) та в режимі під навантаженням (б)

Характерною відзнакою запропонованої реалізації схеми, яка була спостерігалась при експериментальному дослідженні, є відсутність суттєвих сплесків напруги в точках комутації напівпровідників та можливість роботи схеми при відхиленні частоти збудження від резонансної частоти.

Досліджено роботу запропонованої системи заряджання ємнісних накопичувачів енергії. Експериментальна схема розроблена відповідно розглянутій в розділі 3. На рис. 12 приведено експериментальний та модельний вигляд стану напруги заряду при тотожних параметрах системи та моделі.

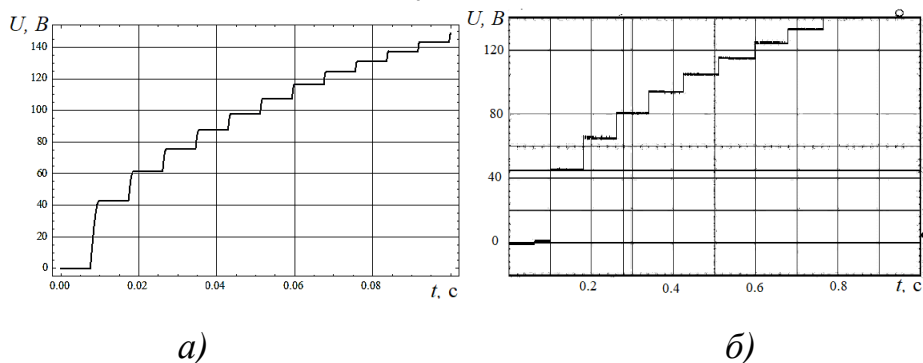


Рисунок 12 – Приріст напруги заряду ємності при моделюванні (а) та при експериментальному вимірюванні за однакових параметрів системи (б)

Отримано, що швидкість заряду, як основний показник якості роботи вузла заряду МІУ визначається лише амплітудою струму накопичувального дроселя, а величина індуктивності впливає лише на необхідну частоту комутації ключа.

Окрім іншого проведена апробація використання індукційного нагріву як допоміжної системи в МІОМ та як автономного пристрою для технологій ремонту транспортних засобів, кількісні показники яких наведено в табл. 4 та табл. 5.

Таблиця 4 – Зведені результати проведеного експерименту по видаленню вмі'ятин

Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глибина вмі'ятин до нагрівання, мм	2,456	2,589	1,987	2,021	2,311	1,894	2,242	2,901	1,68	2,661
Глибина вмі'ятин після нагрівання, мм	0,512	0,410	0,691	0,561	0,761	0,189	0,214	0,494	0,06	0,381

Таблиця 5 – Експериментальні данні апробацій індукційного нагріву для обробки різьбових з'єднань

Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Момент утримання до нагрівання, Н·м	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100
Момент утримання після нагрівання, Н·м	<8	<10	<5	<6	<4	<9	<12	<21	<4	>80

Розроблені зразки систем індукційного нагріву були апробовані та проаналізовані на предмет відповідності з розглянутим їх модельним представленням; виділено, що збудження коливаний доцільно реалізовувати біполярними імпульсами струму модифікованої форми, при чому частоту збудження слід обирати меншою на 15–12 % від резонансної частоти контуру в режимі резонансу напруги.

Розроблена система заряджання ємнісних накопичувачів енергій була апробована та показала свою принципіальну працездатність; запропонована

методика описання електричних процесів в силових електричних контурах показала свою прийнятність та доцільність при розгляді схожих електротехнічних систем.

Апробована методика попереднього нагріву зони силового впливу в процесах МІОМ, а також операцій роз'єму різьбових з'єднань які піддавались корозійному впливу, на предмет ефективності від використання індукційного нагріву; відзначено позитивний ефект а рівні 80–90 % при операціях з різьбовими з'єднаннями та 70–80 % при операціях МІОМ.

У додатках наведені акти впроваджень, список публікацій за темою дисертації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу удосконалення магнітно-імпульсного устаткування для технологій ремонту транспортних засобів, яке спрямоване на підвищення якості виконання операцій обробки металів, а також характерних технічних показників МІУ, створенням автономних і інтегрованих систем індукційного нагріву як конструктивних і функціональних елементів систем магнітно-імпульсної обробки металів для реалізації вдосконаленого електротехнічного устаткування, працюючого із сильними електромагнітними полями.

1. Виконано аналіз впливу геометричних параметрів обмотки зовнішнього індуктора, а також характеру збуджувального струму на амплітуду індукованих струмів, що утворюються у металі об'єкта обробки. Зокрема, при будь-якому розташуванні обмотки індуктора відносно площини тонкостінного провідного листа (циліндрична або плоска кругова конструкція) у діапазоні частот збуджувального струму 25–50 кГц максимум коефіцієнта трансформації залишається практично незмінним, при низькочастотному режимі роботи кількість рядів в обмотці індуктора будь-якої геометрії практично не впливає на кількісні показники утворення вихрових струмів.

2. Збільшення коефіцієнта трансформації при будь-якій частоті збуджувального струму можливо за рахунок конструктивного зменшення висоти обмотки індуктора, що пояснюється збільшенням електромагнітного зв'язку при наближенні витків обмотки до площини об'єкта впливу. Найбільш ефективним режимом індукційного нагріву тонкостінного листового ферромагнетика є режим, у якому величина скін-шару індукованих струмів наближається до товщини листа.

3. Розроблена альтернативна конструкція високовольтного зарядного контуру перетворення рівнів напруги магнітно-імпульсної установки, яка заміщає високовольтний підвищувальний трансформатор. Зокрема, розроблений вузол імпульсного ступеневого заряджання ємнісних накопичувачів МІУ у вигляді первинного перетворювача напруги, який може забезпечити заряджання ємнісних накопичувачів до рівня енергії 2 кДж за 0,3 с, має параболічну залежність напруги заряду від часу тривалості заряду, максимальна швидкість заряджання залежить від вихідної потужності первинної мережі живлення, а максимальна напруга заряду не залежить від напруги первинної мережі живлення.

4. Розроблено та проаналізовано схему перетворення частоти напруги живлення системи індукційного нагріву. Виявлено, що застосування схеми із збудженням коливань струму в режимі резонансу струмів, у порівнянні з режимом резонансу напруги, є практично неприйнятним через появу високовольтних сплесків напруги при відхиленні власних частотних параметрів коливального контуру від заданої частоти слідування збуджувальних імпульсів струму. Експериментально досліджено, що збудження коливань струму в режимі резонансу напруги доцільно виконувати імпульсами біполярного меандру модифікованої часової форми з частотою, яка менша приблизно на 20 % від власної частоти коливального контуру. Підтверджено, що затримка фронту сигналу меандру повинна складати 1/12 від періоду несучої частоти. Запропоновано спрощені аналітичні залежності для первинних інженерних розрахунків електричних силових контурів.

5. Експериментально підтверджено ефективність використання індукційного нагріву для операцій ремонту транспортних засобів та операцій магнітно-імпульсної обробки металів, на рівні 70–80 % від загальної кількості об'єктів обробки, які було досліджено.

6. Результати дисертаційної роботи та розроблена система індукційного нагріву були перевірені та апробовані на спеціалізованих підприємствах («Веда-Авто-Сервіс» (м. Київ) та АТ «Елеватормлинмаш»(м. Харків), про що складені відповідні акти і довідки які наведені в додатку.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сабокар О.С. Альтернативное применение индукционного нагрева в автомобильной промышленности / О.С.Сабокар. // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. ХНАДУ. – 2013. – № 5. – С. 104–107.

2. Сабокар О.С. Modeling of a quarter bridge frequency converter of the inductive heating systems / О.С.Сабокар. // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. ХНАДУ. – 2014. – № 6. – С. 74–81.

3. Сабокар О.С. Анализ электромагнитных процессов нагрева немагнитных металлов полем плоского кругового соленоида / М.В. Барбашова, А.С. Сябрук, О.С. Сабокар. // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. ХНАДУ. – 2015. – №8. – С. 176-181.

Здобувачем зроблено постановку задачі та сформована модель для подальших розрахунків.

4. Sabokar O.S. Induction heating of non-magnetic sheet metals in the field of a flat circular multiturn solenoid / A.V. Gnatov, Sch.V. Argun, O.S. Sabokar // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. ХНАДУ. – Х.: 2016. – Вып. 38. – С. 83–87. *Здобувачем виконано математичні розрахунки рівнянь Максвелла в аналітичному вигляді для прийнятої моделі.*

5. Sabokar O.S. Estimating the limit possibilities of the step charging system for Capacitive energy storage / Yu.V. Batygin, E.A. Chaplygin, O.S. Sabokar // Електротехніка та електромеханіка. – 2016. – №2. – С. 35–37.

Здобувачем виконано математичне описання системи перетворення рівня

напруги в рамках прийнятої ідеалізації.

6. Сабокар О.С. Устаткування для практичної реалізації індукційного нагрівання в сучасних технологіях машинобудування / Ю.В. Батигін, В.А. Стрельнікова, О.С. Сабокар. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Машинобудування і транспорт. 2017. – №4. – С. 70-74.

Здобувачем проаналізовано сучасні технології машинобудування із застосуванням систем індукційного нагріву, сформульовано подальші альтернативні напрямки застосування систем.

7. Сабокар О.С. Індукційний нагрів тонкої феромагнітної пластини в полі плоского кругового соленоїда / Ю.В. Батигін, В.А. Стрельнікова, О.С. Сабокар. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Машинобудування і транспорт. – 2017. – №6. – С. 135-140.

Здобувачем зроблено постановку задачі та описання математичної моделі системи, що розглядалась.

8. Сабокар О.С. Магнитно-импульсная рихтовка кузовов. Теоретические аспекты и практические результаты / Ю. В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин, О.С. Сабокар. // Електротехніка та електромеханіка. – 2016. – №4. – С. 54–57.

Здобувачем виконано аналіз сучасних технологій рихтування та їх альтернативне застосування. Здобувач приймав участь у виконанні експерименту.

9. Сабокар О.С. Вплив геометричних параметрів та магнітних властивостей тонкостінних металів на процеси індукційного нагріву / О.С. Сабокар. // Наукові Вісті НТУ КПП. – 2017.– №6. – С. 87 – 92..

10. Сабокар О.С. Индукционный нагрев во внутренней полости цилиндрического соленоида. Основные соотношения протекающих процессов. / Ю.В. Батигін, Є.О. Чаплигін, О.С. Сабокар, В.А. Стрельнікова. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2017. – №6. – С. 32-36.

Здобувачем проведено частину аналітичних розрахунків для отримання основних залежностей амплітуд індуктованих струмів у металі циліндричного об'єкта.

11. Sabokar O. S. Analysis of electromagnetic processes in the system “cylindrical solenoid – massive conductor” / Yu. V. Batugin, Ye. O. Chaplygin, O. S. Sabokar, V. A. Strelnikova // Електротехніка та електромеханіка. – 2018. – №1. – С.54-58.

Здобувачем виконана постановка задачі, а також розроблена експериментально модель по визначенню адекватності допущення про непрозорість металу об'єкта в змінному ЕМ полі заданої частоти.

12. O. Sabokar. Monograph. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies / Yu. Batygin, M. Barbashova, O. Sabokar // Springer International Publishing. Series ISSN2195-0911, 2018. – 93 p.

Здобувачем виконано частину математичних розрахунків пов'язаних з інтегруванням рівнянь Максвелла, а також виконано частину описання представлених альтернативних технологій магнітно – імпульсної обробки металів. Виконано частину стилістичного редагування перекладу.

13. Сабокар О.С. Ступінчатий перетворювач напруги як альтернативне

джерело живлення систем магнітно-імпульсної обробки металів та індукційного нагріву / О.С. Сабокар. // Вісник НТУ ХП. Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2018. – Вип. №32. – С. 93-98.

14. Пат. на кор. мод. 103494 України, Н05В 6/10 (2006.01) В21D 26/14 (2006.01) В21D 1/12 (2006.01) Спосіб індукційного нагріву для ремонту металевих елементів автомобільних конструкцій / Батигін Ю.В., Чаплигін Є.О., Сабокар О.С., Гнатов А.В. // Заявка № у 2015 01654; Заявл. 25.02.2015; Опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.

Здобувачем проведено аналіз існуючих аналогів та виконано описання запропонованого технічного рішення..

15. Пат. на кор. мод. 110809 України, Н02М 1/10 (2006.01), Н02М 11/00, Н03К 3/00В21D 26/14 (2006.01) Перетворювач енергії зарядного контуру магнітно-імпульсної установки / Батигін Ю.В., Чаплигін Є.О., Сабокар О.С. // Заявка № у 2016 03335; Заявл. 31.03.2016; Опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.

Здобувачем сформульована формула винаходу та представлена схема винаходу.

16. Пат. на кор. мод. 121597 України, Н05В 6/10 (2006.01), В21D 26/14 (2006.01) Спосіб обробки листових металів концентрованими джерелами енергії магнітних полів з попереднім нагрівом / Батигін Ю.В., Чаплигін Є.О. Сабокар О.С., Стрельнікова В.А. // Заявка № у 2016 06140; Заявл. 19.06.2017; Опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.

Здобувачем розроблено запроповану конструкцію системи, а також виконано часткове описання винаходу.

АНОТАЦІЇ

Сабокар О. С. Удосконалення магнітно-імпульсного обладнання для технологій ремонту транспортних засобів: – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків 2019.

Дисертація присвячена вирішенню завдання поліпшення технічних показників обладнання магнітно-імпульсної обробки металів (міоми) для використання в технологіях металообробки і технологіях ремонту транспортних засобів. У роботі представлена розробка альтернативної конструкції вузла заряду ємнісних накопичувачів енергії та розробка системи індукційного нагріву. Дано числові показники нагріву при варіації часових параметрів збуджуючого струму і конструктивних параметрів інструменту індуктора. Розглянута модель системи збудження струму індуктора доповнена експериментальними дослідженнями системи в режимі резонансу напруги. Запропоновано використання модифікованої часової форми біполярного меандру сигналу збудження для зменшення кількості спектральних складових. Сконструйована система індукційного нагріву, що працює в режимі резонансу напруги, показала свою працездатність і ефективність. Було

запропоновано виконувати збудження коливань струму імпульсами напруги модифікованої форми з частотою нижче на 20% від резонансної частоти, що забезпечує прийнятний ККД в режимі роботи системи без навантаження. Розробка система індукційного нагріву пройшла апробацію і випробування на підприємствах «Веда Авто Сервіс» (м.Київ) і АТ «Елеватормлинмаш» (м.Харків).

Результати дисертаційної роботи використовують при підготовці бакалаврів та магістрів на кафедрі автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно - дорожнього університету.

Ключові слова: моделювання сильних електричних і магнітних полів, електротехнічні системи, індукційний нагрів, магнітно-імпульсна установка, перетворювач рівнів напруги.

Сабокарь О. С. Усовершенствование магнитно-импульсного оборудования для технологий ремонта транспортных средств: – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 - техника сильных электрических и магнитных полей. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков 2019.

Диссертационная работа посвящена решению задачи улучшения технических показателей оборудования магнитно-импульсной обработки металлов (МОИМ) для использования в технологиях металлообработки и технологиях ремонта транспортных средств. В работе выделены два основных направления. Первым направлением является разработка альтернативной конструкции узла зарядки емкостных накопителей энергии который в значительной степени меньшей массы и более лояльной к отклонению параметров сети. Вторым направлением является адаптация системы индукционного нагрева в качестве вспомогательной системы, выполняющей предварительный нагрев зоны силового импульсного воздействия и обеспечивает улучшение показателей упругости металла в зоне деформации. В работе был проведен анализ электромагнитных процессов связанных с приведением индуцированных токов в листовых металлах и выделены основные параметры, влияющие на скорость нагрева объекта. Математический анализ, предоставленный в аналитическом и численном виде дает возможность проводить оценку для подобных по конструкции электродинамических систем. Аналогично рассмотренной расчетной модели было создано экспериментальный образец и выполнены измерения физических величин, которые имели идентичный характер с величинами рассматриваемых аналитически. Даны исчерпывающие числовые показатели нагрева при вариации временных параметров возбуждающего тока и конструктивных параметров инструмента индуктора. Проанализированы способы возбуждения гармонических токов питания инструмента-индуктора. Рассматриваемая модель системы дополнена экспериментальным исследованием системы в режиме резонанса напряжения. Предложено использование модифицированной временной формы биполярного меандра для уменьшения количества спектральных составляющих, что было экспериментально

подтверждено. Разработаны и апробированы два образца систем индукционного нагрева, работающих в двух различных режимах возбуждения. Выявлено, что в режиме резонанса токов имеет место нестабильная работа установки из-за ее привязанность к параметрам индуктивности инструмента-индуктора, а их отклонения, то есть изменение резонансной частоты, приводит к появлению всплесков напряжения высокой амплитуды и электрического повреждения силового коммутатора. Подобный способ возбуждения колебаний тока целесообразно применять при постоянных параметрах силовых электрических контуров. Сконструирована система индукционного нагрева, которая работает в режиме резонанса напряжения, показала свою работоспособность и эффективность, то есть выполняла все предполагаемые функции, а количественный показатель технологической операции был большим по сравнению с существующими технологическими операциями. Причем впервые было предложено выполнять возбуждения колебаний тока импульсами напряжения модифицированной формы с частотой меньше на примерно 20% от резонансной частоты, что обеспечило приемлемый КПД в режиме работы системы без нагрузки. В диссертационной работе впервые представлена и проанализирована работа альтернативной конструкции узла зарядки емкостных накопителей энергии установок МИОМ. Предложена усовершенствованная модель представления работы электрического контура с времязависимыми параметрами. Выявлено нестационарный характер функций напряжения зарядки, что является положительным показателем, а так же лояльность к отклонению параметров внешней сети. Предложены зависимости для инженерных расчетов подобных систем заряда. Проведена экспериментальная апробация использования нагрева в технологиях МИОМ и технологиях ремонта транспортных средств. Выделено положительный эффект от применения нагрева в операциях бесконтактной рихтовка кузовных элементов и прогрева резьбовых соединений для их демонтажа. Разработка система индукционного нагрева прошла апробацию и испытания на предприятиях «Веда Авто Сервис» (г.Киев) и АО «ЭЛЕВАТОРМЛИНМАШ» (г.Харьков).

Результаты диссертационной работы используются при подготовке бакалавров и магистров на кафедре автомобильной электроники Харьковского национального автомобильно - дорожного университета.

Ключевые слова: моделирование сильных электрических и магнитных полей, электротехнические системы, индукционный нагрев, магнитно-импульсная установка, преобразователь уровней напряжения.

Sabokar O. S. Improvement of the Magnetic Pulse Equipment for the Repair Vehicles Technologies. –Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences for specialty 05.09.13 "Equipment of strong electric and magnetic fields" – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv, 2019.

The thesis is dedicated to the solution of the problem of the technical performance of magnetic-impulse metal processing equipment improving for use in metal-working technologies and vehicle repair technologies. The paper presents the development of an

alternative design for the capacitive energy storage charge system and the development of an induction heating system. The numerical heating indicators was given with a variation of the time parameters of the exciting current and the design parameters of the inductor tool. The system model of inductor current excitation in the mode of current resonance was considered and supplemented by experimental studies of the system in voltage resonance mode. The use of a modified time form of the bipolar meander of the excitation signal to reduce the number of spectral components was proposed. The induction heating system designed that operates in the voltage resonance mode has shown its efficiency. It was proposed to perform the excitation of current oscillations by voltage pulses of the modified form with a frequency lower than 20% of the resonant frequency, which ensures acceptable efficiency in the system operation without load. The development of the induction heating system has been tested and implicated at the enterprises of «Veda Auto Service» (Kyiv) and «Elevatormlinmash» (Kharkiv).

The results of the thesis are used in the preparation of bachelors and masters degree at the department of automobile electronics of the Kharkiv National Automobile and Highway University.

Key words: simulation of strong electric and magnetic fields, electrical systems, induction heating, magnetic-pulse installation, voltage level converter.

Відповідальний за випуск
вчений секретар д.т.н. проф. Заковоротний О.Ю.

Підписано до друку р. Формат 60x84/16.

Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення №

Надруковано

Свідоцтво № 04058841 Ф0050331 від 21.03.2001 р.
61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16
