

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Чаплигін Євген Олександрович

УДК 621.318

**РОЗРОБКА ЦИЛІНДРИЧНИХ ІНДУКЦІЙНИХ ІНДУКТОРНИХ
СИСТЕМ ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО ПРИТЯГНЕННЯ ТОНКИХ
МЕТАЛЕВИХ ЛИСТІВ**

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних
електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Харків – 2009

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автомобільної електроніки в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Батигін Юрій Вікторович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
професор кафедри автомобільної електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Баранов Михайло Іванович,
Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
головний науковий співробітник

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Жекул Василь Григорович,
Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України,
завідувач відділу

Захист відбудеться “ 7 ” жовтня 2009 р. о 14.30 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий “ _____ ” _____ 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Аналіз сучасного стану магнітно-імпульсних технологій показує, що сучасне промислове виробництво вимагає подальшого розширення переліку технологічних процесів, де магнітно-імпульсні методи мають незаперечні переваги в порівнянні з відомими механічними або хімічними аналогами. Особливе місце тут займають виробничі операції по магнітно-імпульсному притягненню заданих ділянок плоских металевих поверхонь. Магнітно-імпульсні технології усунення вм'ятин у металевих обшивках кузовів автомобілів і літаків без яких-небудь механічних контактів з ними та пошкодження їх можливого захисного покриття представляються перспективними та складають напрямок обробки деталей без механічного втручання. Розробка джерел потужності та конструкцій дієвих інструментів індукторних систем дозволяє практичну реалізацію виробничих програм з безпосереднього притягнення полем заданих ділянок металу оброблювального об'єкта. Однією з таких актуальних науково-практичних задач є дослідження електромагнітних процесів що протікають в системі індуктор-заготовка та створення ефективних інструментів для видалення, тобто зовнішнього рихтування, вм'ятин в металевих тонкостінних конструкціях, що складає напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету та пов'язана з участю здобувача як виконавця у держбюджетній науково-дослідній темі МОН України: «Теоретичне обґрунтування методу імпульсної обробки тонких листових металевих заготовок» (ДР №0107U004556).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження особливостей електромагнітних процесів в тонкостінних металах та розробка ефективних циліндричних індукторних систем для магнітно-імпульсного притягнення заданих ділянок металевих поверхонь.

Для досягнення поставленої мети поставлені задачі:

- провести аналіз існуючих методів магнітно-імпульсного притягнення заданих ділянок поверхонь тонких металевих листів та конструкцій індукторних систем, що дозволяють реалізувати вказану виробничу операцію;
- провести теоретичні дослідження особливостей електромагнітних процесів, зокрема, процесів збудження вихрових струмів у одновитковій циліндричній індукторній системі з тонкостінною листовою заготовкою при інтенсивній дифузії магнітного поля;
- провести теоретичне дослідження електромагнітних процесів у циліндричній індукційній індукторній системі з додатковим допоміжним екраном,

що призначений для притягнення заданої ділянки тонкостінної металевої заготовки;

- розробити силовий блок та комплект узгоджувальних пристроїв експериментального стенду для моделювання електромагнітних процесів у достатньо широкому діапазоні робочих частот діючих полів (1...50 кГц) та розробити методику «прямого адекватного виміру струмів», індукованих у тонкостінному металі;

- сформулювати та обґрунтувати науково-технічне рішення з конструктивного виконання, визначити резерви підвищення ефективності інструмента на базі одновиткової індукторної системи для притягнення заданих ділянок поверхні тонких металевих листів;

- провести експериментальну апробацію реальної діючої конструкції індукторної системи-інструмента для магнітно-імпульсного притягнення.

Об'єкт дослідження - електродинамічні процеси в одновиткових циліндричних індукторних системах та системах з додатковим допоміжним екраном для притягнення заданих ділянок поверхні тонкостінних металевих листів силами імпульсних полів.

Предмет дослідження – циліндричні індукторні системи у режимі інтенсивного проникнення діючих імпульсних магнітних полів, циліндричні індукторні системи з додатковим допоміжним екраном для притягнення заданих ділянок поверхні тонкостінних листових металів, принцип дії яких заснований на законі Ампера.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження електродинамічних процесів в індукторних системах проводилися на основі положень теорії електромагнітного поля та технічної електродинаміки. Рішення поставлених крайових задач здійснювалося аналітичними методами математичної фізики з наступною комп'ютерною обробкою отриманих результатів. Експериментальні дослідження проводилися на розробленому стенді моделювання електромагнітних процесів в інструментах для магнітно-імпульсної обробки тонкостінних листових металів. Практична силова апробація модельних конструкцій індукторних систем з додатковим допоміжним екраном здійснювалася на діючій магнітно-імпульсній установці НТУ «ХП». Вірність проведених досліджень підтверджена граничними переходами до відомих результатів і результатами проведених експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- проведені дослідження особливостей електромагнітних процесів збудження вихрових струмів у тонкостінних листових металевих заготовках. Для оцінки збуджуваних пондеромоторних сил. Доказано, що при досить низьких робочих частотах електродинамічні зусилля пропорційні добутку струму індуктора і його похідній за часом, але не квадрату струму індуктора;

- вперше теоретично та експериментально встановлено, що при зниженні робочих частот діючих полів часова залежність вихрових струмів прямує до похідної струму індуктора. Для гармонійного процесу зсув за фазою між збуджувальним та індуктованими вихровими струмами складає $\pi/2$;
- теоретично та експериментально досліджені електромагнітні процеси в плоскій циліндричній індукційній індукторній системі з допоміжним додатковим екраном, що призначена для притягнення заданої ділянки тонкостінної металевої заготовки;
- викладено та апробовано в експерименті конструктивне виконання додаткового допоміжного екрана циліндричної індукційної індукторної системи, що дозволяє підвищити ефективність силової дії на задану ділянку оброблювального об'єкту;
- сформульовано конструктивне виконання циліндричної індукційної індукторної системи, що дозволяє підвищити ефективність силового впливу на задану ділянку оброблюваного об'єкта;
- запропонована методика «прямого адекватного виміру індуктованих струмів» в плоских листових заготовках індукторних систем для магнітно-імпульсної обробки металів, перевагами якої є пряма пропорційність струму, що вимірюється, до сигналу, який знімається, за відсутності будь-яких додаткових перетворюючих пристроїв.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в практичних розробках інструментів-індукторних систем для електромагнітного штампування тонкостінних металів, які знаходять використання в авіаційній, автомобільній та приладобудівній галузях. На кафедрі автомобільної електроніки ХНАДУ створено експериментальний стенд з комплектом погоджувальних пристроїв. У сукупності з методикою «прямого адекватного виміру індуктованих струмів» у плоских листових заготовках можливо адекватне моделювання електромагнітні процесів для широкого діапазону робочих частот діючих полів.

Проведено успішну експериментальну апробацію модельного варіанта конструкції інструмента для практичного здійснення магнітно-імпульсного рихтування вм'ятин на елементі кузова автомобіля фірми «Mitsubishi» (патент України № 31751).

Результати роботи використано при виконанні наукової теми та впроваджено в навчальний процес на кафедрі опору матеріалів НТУ «ХПІ» при викладанні навчальних дисциплін з міцності тонкостінних металевих конструкцій.

Особистий внесок здобувача. Всі добутки дисертаційної роботи здобувачем отримані одноосібно, серед них: формулювання завдань дослідження

особливостей електромагнітних процесів в індукторних системах з тонкостінними заготовками при інтенсивній дифузії діючих полів та в індукційних індукторних системах циліндричної геометрії для притягання заданих ділянок листових металів; рішення завдань і аналіз електродинамічних процесів як при низьких, так і при довільних робочих частотах в одновиткових системах із плоскими тонкостінними заготовками; рішення завдань і аналіз процесів у циліндричних індукційних індукторних системах для притягання в низькочастотному наближенні; розробка силового блоку з комплектом погоджувальних пристроїв для експериментального стенда; розробка методики «прямого адекватного виміру індуктованих струмів»; проведення експериментів; обробка отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Физические и компьютерные технологии», (Харків, 2007 р.); «Современное состояние использования импульсных источников энергии в промышленности», (Харків, 2007 р.); а також на міжнародному симпозіумі «Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика (SIEMA'2007)», (Харків, 2007 р.) та на семінарах кафедри автомобільної електроніки ХНАДУ та кафедри електрофізики НТУ «ХПІ».

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 11 наукових праць, серед них 9 у фахових виданнях ВАК України, 1 патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 190 сторінки. Серед них 30 рисунків за текстом та 20 рисунків на окремих 13 сторінках, 3 додатки на 32 сторінках, список використаних джерел із 121 найменувань на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, подані об'єкти дисертаційного дослідження. Викладено основні наукові та практичні результати. Наведено дані щодо апробації результатів роботи.

У першому розділі проведено аналіз літератури за проблемою магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металів (МІОМ), виникаючі особливості і проблеми у порівнянні з традиційними засобами обробки металів тиском, особливу увагу приділено використанню МІОМ у машинобудівній та транспортній промисловості.

Значний внесок у розробку загальнотеоретичних та інженерно-прикладних проблем, пов'язаних з використанням МІОМ у різних галузях про-

мисловості належить багатьом дослідникам: О. М. Андрєєв, М. М. Балтаханов, М. І. Баранов, Ю. В. Батигін, О. М. Батієнко, І. В. Бєлий, В. М. Боев, В. М. Бондалетов, О. Ю. Бондаренко, С. С. Вдовін, В. О. Глущенко, В. О. Говорков, Л. Д. Горкін, П. М. Дащук, Ю. П. Ємець, В. І. Золотих, Є. Г. Іванов, П. Л. Калантаров, В. П. Карасик, Т. Кнопфель, В. П. Князєв, П. М. Колєсніков, С. Ю. Кулемза, В. І. Лавінський, В. В. Лєдньов, В. М. Михайлов, Д. Монтгомері, Дж. Мет'юз, Ш. А. Немсадзе, О. Л. Новгородцев, Д. Паркінсон, Л. В. Півоваров, О. Д. Подольцев, В. В. Решетніков, Р. Уокер, С. М. Фертик, Л. Т. Хіменко, Л. О. Цейтлін, Г. А. Шнеєрсон, В. Б. Юферов, та інші.

Аналіз наявних напрямків технічної реалізації магнітно-імпульсних технологій, у тому числі при обробці металів, ступеню їх теоретичного обґрунтування та фізико-математичного осмислення свідчить, що на сучасному етапі існує достатньо розвинута галузь наукових знань, підкріплена відповідно експериментальною базою та різноманітними реальними втіленнями технологій у різних галузі промислового виробництва.

Разом з тим, існує наявна потреба у подальшому розвитку технологій МІОМ. Так, певне відставання спостерігається у виявленні природи процесів, що відбуваються при магнітно-імпульсній обробці металів, у їх фізико-математичному обґрунтуванні.

Існують можливості для вдосконалення технічних рішень з виготовлення інструментів з використанням магнітно-імпульсних систем, як шляхом розширення діапазону використовуваних струмів, так і з боку застосування нових конструктивних варіантів, здатних підвищувати ефективність використовуваного методу.

Недостатньо дослідженні процеси, що відбуваються за умови низькочастотного впливу у системі індуктор – заготовка та заготовка – індуктор – екран, коли у якості оброблювального об'єкту виступає тонкостінний метал.

У якості аналогів для аналітичного аналізу, що визначені об'єктом і предметом дослідження, у дисертації використані методи вирішення крайових задач електродинаміки, у тому числі тих, що стосуються ферромагнітних середовищ. Фізичну основу МІОМ складає силова взаємодія зовнішнього магнітного поля індуктора з вихровими струмами, що індукуються у металі оброблювальної заготовки. Технічний бік представлений циліндричною одновитковою індукторною системою з плоскими металевими листовими заготовками у вигляді тонкостінних пластин.

Проведені аналітичні обчислення підтверджують гіпотезу про те, що за умови проникнення поля крізь заготовку змінюється характер індуктованих струмів, що повинно привести до зміни величини і часової форми сил магнітного тиску у порівнянні з режимом, коли поле крізь оброблювальний об'єкт практично не проникає. Низькочастотний імпульс, у свою чергу, приводить до зсуву

по фазі на $\pi/2$ індукованого струму відносно струму в індукторі, а також при цьому більш виразно виявляє себе ефект притягнення заготовки до індуктора, аніж це є за класичним використанням технології МІОМ.

Вдосконалюються не тільки оптимальні режими протікання струмів і магнітних полів, але й розробляються різні типи магнітно-імпульсних систем. Індуктори виготовляються у вигляді одновиткових чи багатовиткових соленоїдів, конструкцій із спареними струмопроводами, гіперболічної чи плоскої асиметричної геометрії. Крім того, важливим є при використанні різних конструктивних рішень індукторних систем усунення негативних впливів, що виникають за умов використання тих чи інших конструктивних змін. Так, з метою нівелювання негативного впливу проникнення електромагнітних полів крізь заготовку використовують так звані «супутники» з металу або еластичних прокладок. Найбільш ефективним для подолання виникаючого при цьому значення ефективності дії електромагнітного поля є запропоноване проф. Ю. В. Батигіним створення певного просторово-часового розподілу дотичної складової напруженості магнітного поля по товщині деталі, що обробляється.

Це відкриває нові конструктивні можливості для виготовлення індукторів-інструментів нового покоління, придатних для виконання операцій з виготовлення та ремонту деталей кузовів автомобілів. Зокрема, перспективною виглядає розробка індукційної індукторної системи, що охоплює такі складові, як екран – індуктор – заготовка, причому екран може бути розміщений у внутрішньому просторі циліндричного індуктора.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про необхідність дослідження циліндричних індукційних індукторних систем для магнітно-імпульсного притягнення тонких металевих листів та розподілу індукованих токів і магнітних полів у тонкій металевій заготовці з метою створення дієздатного інструменту для видалення вм'ятин та зовнішнього рихтування.

У другому розділі наведені результати розрахунків електромагнітних полів та струмів в плоских листових металах, що індуковані полем одновиткового індуктора на низьких частотах та частотах довільної часової структури. Прийнята розрахункова модель в циліндричній системі координат, максимально наближена до реальної індукторної системи (рис.1), містить одновитковий соленоїд, як джерело імпульсного магнітного поля, та розташовану зверху нього тонкостінну листову заготовку.

Для рішення поставлених задач були прийняті допущення та виділено такі області: а) півпростір зовні листової заготовки збоку індуктора, $z \in (-\infty, 0]$; б) простір метала листової заготовки, $z \in [0, d]$; в) вільний півпростір з зовнішнього боку листової заготовки, $z \in [d, \infty)$.

Використовується рівняння Максвелла для збуджувальних нетривіальних складових вектору електромагнітного поля ($E_\varphi \neq 0, H_{r,z} \neq 0$), перетворених за

Лапласом з урахуванням нульових початкових умов, які в загальній формі мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z); \quad (3)$$

де p – параметр перетворення Лапласа; $E=L\{E_\varphi(t, r, z)\}$ – азимутова компонента напруженості електричного поля; $H_{r,z}(p, r, z)=L\{H_{r,z}(t, r, z)\}$ – компонента напруженості магнітного поля; $j_\varphi(p, r, z)=L\{j_\varphi(t, r, z)\}$, у загальному випадку $j_\varphi(p, r, z)=(p \cdot \varepsilon_0 + \gamma) \cdot E_\varphi(p, r, z) + j_{\varphi i}(p, r, z)$, $j_{\varphi i}(t, r, z)$ – густина стороннього струму у індукторі, $j_{\varphi i}(p, r, z)=j(p) \cdot f(r) \cdot \delta(z+h)$, $j(p)=\frac{I(p)}{R_2 - R_1}$; $f(r)$ – функція радіального розподілення струму у вітку індуктора; $\delta(z+h)$ – дельта функція Дірака.

Рис.1. Схема індукторної системи: 1 – одновитковий соленоїд; 2 – пласка листовна заготовка; $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ – направляючі орти циліндричної системи координат

Умовам обмеженості радіального розподілення $E_\varphi(p, r, z)$ з отриманих рівнянь при $r=0$ та $r=\infty$ задовільняє інтегральне перетворення Фур'є-Бесселя

$$E_\varphi(p, r, z) = \int_0^\infty E_\varphi(p, \lambda, z) \cdot J_1(\lambda \cdot r) \cdot \lambda \cdot d\lambda, \quad (4)$$

де $J_1(\lambda \cdot r)$ – функція Бесселя першого порядку.

Підставлення інтегрального вираження (4) в рівняння в часних похідних для $E_\varphi(p, r, z)$ приводяться до звичайних неоднорідних диференціальних рівнянь другого порядку. Після відповідних розрахунків та перетворень отримаємо результати розподілення компонент поля, тангенційної H_r та нормальної H_z складових:

$$H_r(p, r, z) = \int_0^{\infty} \frac{j(p) \cdot q(p, \lambda) \cdot A_1(p, \lambda, z)}{B(p, \lambda)} \cdot f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (5)$$

$$H_z(p, r, z) = \int_0^{\infty} \frac{j(p) \cdot A_2(p, \lambda, z)}{B(p, \lambda)} \cdot f(\lambda) \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda h} \cdot J_0(\lambda r) d\lambda. \quad (6)$$

Перевірка граничними переходами підтвердила достовірність отриманих результатів.

Попередній аналіз магнітного поля у металі заготовки дозволив дійти висновку про те, що магнітне поле розповсюджується рівномірно по товщині листа, його часова і радіальна залежності співпадають з аналогічними характеристиками струму, що збуджується, амплітуда напруженості визначається половиною значення струму індуктора.

Доведено, що різниця прояву поля у крайніх позиціях ($\gamma \rightarrow \infty$ та $\gamma \rightarrow 0$) полягає в тому, що магнітне поле не проникає, а витискується на поверхню листа (скін-ефект). Амплітуда напруги визначається повною амплітудою струму індуктора, а його поле цілком сконцентровано у просторі між листом і робочою поверхнею індуктора. Часова і радіальна залежності (як і раніше) співпадають з аналогічними характеристиками струму, що збуджується.

За умови достатньо великої електропровідності металу оброблювального листа напруженість магнітного поля тяжіє до 0. Це відповідає формулюванню межової умови для нормальної складової магнітного поля на поверхні ідеального провідника.

Специфіка індукованих струмів також виявлялась шляхом попередніх аналітичних розрахунків. Густина порушуваних вихрових струмів у просторі зображень по Лапласу було знайдено множенням азимутальної компоненти напруженості електричного поля в металі листа на його питому електропровідність. Інтегруючи за змінною $z \in [0, d]$, отримано формулу для радіального розподілення лінійної густини струму, який індукований в металі об'єкту обробки

$$J_{\varphi}(r, p) = -\mu_0 \gamma \cdot \int_0^{\infty} \frac{p \cdot j(p) \cdot A_3(p, \lambda)}{B(p, \lambda)} \cdot f(\lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot h} \cdot J_1(\lambda \cdot r) d\lambda. \quad (7)$$

Отримані формули (5 – 7) є основними для подальшого розгляду електродинамічних процесів, зокрема на низьких частотах. Особливості вихрових струмів, що індуковано низькочастотними полями, розглянуто при декількох ідеалізаціях. Ідеальна провідність металу ($\gamma \rightarrow \infty$), достатня тонкостінність листової заготовки ($\omega \cdot \tau \ll 1$). У першому випадку в металі заготовки збуджується струм, спрямований протилежно току індуктора. У другому індукований струм також спрямований протилежно, але пропорційний першій похідній (тобто

швидкості наростання) струму індуктора. Виявилося, що між струмом, індуктованим у режимі різкого скін-ефекту, і струмом, індуктованим у режимі істотної дифузії поля, має місце зрушення по фазі, що наближається до значення $\pi/2$.

Для більш повного уявлення про електродинамічні процеси при низьких частотах були проведені відповідні оцінки компонент вектора магнітної напруженості, які показали, що радіальний розподіл дотичної компоненти вектора напруженості магнітного поля зосереджено в області витка індуктора так само, як і у випадку різкого поверхневого ефекту, коли відсутнє проникнення поля крізь заготовку.

Встановлено, що у низькочастотному режимі збуджується потужна нормальна складова напруженості магнітного поля. При різкому поверхневому ефекті (досить високих частотах діючих полів) вона відсутня. Поява нормальної компоненти напруженості обумовлено дифузійними процесами крізь оброблювану заготовку.

На відміну від тангенційної компоненти напруженості магнітного поля, радіальний розподіл нормальної складової не обмежено шириною витка індуктора. В центрі індуктора нормальна компонента має досить високе ненульове значення.

Дослідження електромагнітних процесів при низьких частотах доповнено розрахунками основних показників для довільного частотного діапазону діючих полів, результати яких показали, що у діапазоні низьких робочих частот має місце істотне перевертання тимчасової форми індукваного сигналу в порівнянні зі струмом індуктора. Це відбувається в початковий період, коли різко падає час наростання сигналу до свого амплітудного значення. Збільшення декременту загасання в імпульсі струму індуктора приводить до помітного загострення фронту індукваного сигналу.

Виявлено, що при зниженні робочої частоти часова та просторова форми струмів, індукваних у тонкостінних металах, претерпають істотних змін в порівнянні з випадком ідеального провідника.

Так, при інтенсивній дифузії поля крізь провідник (низькі частоти) часова форма індукваного сигналу являє собою похідну від часової функції збуджуваного струму. Крім того, у режимі різкого поверхневого ефекту (високі частоти, наближення до «ідеальної провідності») часова форма індукваного сигналу збігається з часовою формою збуджуваного струму (рис.2).

а

б

Рис.2 Залежність індукваного струму від фази для робочої частоти $f = 0,75$ кГц та декрементів згасання (величини за осями ординат нормовані)

на особисті максимуми): а – $\delta = 0,3$; б – $\delta = 0,9$; 1 – струм індуктора; 2 – індукований струм

Особливості процесів порушення вихрових струмів при досить низьких робочих частотах діючих полів обумовлені появою потужного нормального компонента напруженості магнітного поля в металі оброблюваного об'єкта.

У третьому розділі досліджено електромагнітні процеси в циліндричних індукційних індукторних системах для притягання плоскої листової заготовки. Розглянуто принцип дії та фізика процесів, що протікають у конструкції, схема якої наведена на рис.3.

У досліджуваній системі попередньо заряджений ємнісний накопичувач енергії C після спрацьовування комутатора K розряджається в колі з підключеним індуктором I . Протікання струму у витку індуктора збуджує вихрові струми в екрані та листовій заготовці. Напрямки цих струмів однакові. Відповідно до закону Ампера при фіксованому положенні індуктора та екрана заготовка повинна притягатися в напрямку до робочої поверхні індуктора.

Рис. 3. Індукційна індукторна система: C – ємнісний накопичувач енергії; K – комутатор; I – індуктор; 2 – екран; 3 – заготовка

У роботі розглянута ефективність різних варіантів індукційної індукторної системи з ідентичним тонкостінним плоским екраном і листовою заготовкою. Вони доповнюють їх, оскільки крім експериментальної апробації, обґрунтування працездатності індукційних індукторних систем раніше не проводилося. Для аналізу електромагнітних процесів була прийнята розрахункова модель у циліндричній системі координат.

При вирішенні задачі прийняті такі допущення:

– амплітудно-часові параметри струму індуктора $I(t)$ такі, що справедливо квазістаціонарне наближення по Ландау;

– виток індуктора має циліндричну форму, а товщина настільки мала, що метал витка не здійснює помітного впливу на електромагнітні процеси, що протікають;

– має місце аксіальна симетрія ($\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$, φ – азимутальний кут) і симетрія

системи щодо площини витка індуктора;

– екран і заготовка однакові листові метали з досить великими поперечними розмірами, досить малою товщиною d та електропровідністю γ , вони розташовані на однаковій відстані від витка індуктора.

Для збуджуваних складових вектора електромагнітного поля ($E_\varphi \neq 0, H_{r,z} \neq 0$), перетворених по Лапласу, з урахуванням нульових початкових умов, з використанням симетрії досліджуваної системи також як і раніше були виділені області з однорідними електрофізичними характеристиками. У цих областях були знайдені основні показники електромагнітних процесів, аналіз яких дозволив зробити такі висновки:

1) радіальний розподіл сил притягання в симетричній індукційній системі при варіації її геометричних параметрів має максимальні значення на краях індуктора, у той час як залежність інтегральної сили притягання від розміру внутрішнього отвору витка індуктора має дещо інший вид, як показано на рис. 4, а залежність максимуму розподіленої сили притягання від величини зазору між екраном і листовою заготовкою представлено на рис. 5;

2) виявлено, що фізичний механізм зміни сил притягнення при варіації радіальних розмірів витка індуктора або його ширини визначається збільшенням або зменшенням області, яку займають індуквані струми. Варіація величини зазору між екраном і листовою заготовкою означає зміну рівня електромагнітного зв'язку між цими елементами, що, як відомо, веде до зростання або падіння сил електродинамічної взаємодії.

У цілому, розглянута індукційна індукторна система з одним витком циліндричної геометрії й двома однаковими металевими листами (один із яких є допоміжним екраном, а другий – заготовкою) дозволяє розвивати механічні зусилля, достатні для практичної реалізації магнітно-імпульсного притягнення заданих ділянок оброблюваного об'єкта.

а

б

Рис. 4. Залежність інтегральної сили притягання від розміру внутрішнього отвору витка індуктора: а - $2h = 0,002$ м; б - $2h = 0,003$ м; 1 - $R_2 = \frac{1}{0,8} \cdot R_1$; 2 -

$$R_2 = \frac{1}{0,9} \cdot R_1; 3 - R_2 = \frac{1}{0,9} \cdot R_1$$

Рис.5. Залежність максимуму розподіленої сили притягання від величини зазору між екраном і листовою заготовкою для $R_1 = 0,035$ м, $R_2 = \frac{1}{0,9} \cdot R_1$

Істотним недоліком індукційної індукторної системи із двома однаковими металевими екранами є те, що між ними в зоні притягання повинна бути більша

величина зазору. Даний факт обумовлений реальними конструктивними можливостями виконання системи: виток індуктора повинен розташовуватися між симетричними екранами.

Виявлено, що цей недолік можна нівелювати, якщо допоміжний екран, необхідний для збудження сил притягнення, помістити в площині внутрішнього отвору витка індуктора. Його товщина та питома електропровідність металу зберігаються тими ж, що й заготовки. Така геометрія дозволяє удвічі збільшити ефективність індукційної індукторної системи за рахунок зменшення відстані між екраном та заготовкою.

Практична працездатність пропонованої індукторної системи визначається її геометрією, електрофізичними, геометричними характеристиками екрана та заготовки, а також амплітудно-тимчасовими параметрами струмового імпульсу в їхньому взаємозв'язку.

Для аналізу електромагнітних процесів прийнята розрахункова модель у циліндричній системі координат з додатковим екраном у площині індуктора. Вирішуючи рівняння Максвелла в межах прийнятих допущень, отримані результати обчислень розподілених сил притягання (рис. 6) та індукованих струмів.

Рис.6. Радіальний розподіл сил притягання

Розташування допоміжного екрана в площині внутрішнього отвору витка індуктора приводить до істотного зниження ефективності даної конструкції інструмента. У середньому амплітуди, що розвиваються силами притягання, на порядок нижче, аніж у випадку розташування допоміжного екрана симетрично листовій заготовці щодо площини витка індуктора.

Проте, узагальнення результатів обчислень і висновків аналізу процесів у розглянутих індукційних індукторних системах (з «зовнішнім» і «внутрішнім» допоміжними екранами) дозволяє сформулювати пропозицію по конструктивному виконанню інструмента магнітно-імпульсного притягання, що поєднує переваги першого та другого варіантів.

Розрахунки та узагальнюючі фізичні міркування показали, більш ефективною є конструкція індукційної індукторної системи з тонким допоміжним екраном, що представляє собою геометричну поверхню «циліндр на площині».

Площина екрана розташована поза витком на його зовнішній поверхні, а циліндрична опуклість входить у порожнину внутрішнього вікна (рис.7).

Рис.7. Індукторна система з тонким допоміжним екраном

Принципова сутність сформульованої пропозиції захищена патентом України на корисну модель, одним зі співавторів якого є здобувач.

У четвертому розділі наводиться опис експериментальних досліджень електромагнітних процесів у плоских одновиткових індукторних системах, які проводилися у дисертаційній роботі. Для підтвердження теоретичних результатів розрахунків були проведені експерименти на модельній установці та апробація в реальних умовах.

Для проведення модельних експериментів було створено експериментальний стенд, що складається з енергетичного блоку, погоджувальних пристроїв для варіації частот та індукторної системи, де було проведено вимір вихрових струмів та компонент вектора напруженості магнітного поля (рис. 8).

Рис. 8. Схема вимірювання компонент напруженості магнітного поля на поверхні листової заготовки

Виміри радіального розподілу індуктованих струмів у металі оброблюваного об'єкта проводилися за допомогою традиційних датчиків індукційного типу та за допомогою, так званої, «схеми прямого виміру».

Принципова схема прямого виміру показана на рис. 9.

Зокрема, було визначені особливості низькочастотного збудження циліндричної індукційної індукторної системи з тонкостінною заготовкою, проведені модельні виміри та апробація ефекту силового притягання об'єкту обробки.

Розрахунки показали, що у випадку різкого поверхневого ефекту (при наявності масивного провідника) індукований струм є дзеркальним відбиттям струму в індукторі, за напрямками ці струми – протилежні. У випадку експоненційно загасаючого гармонійного сигналу це відповідає зсуву по фазі π .

а

б

Рис.9. Принципова схема прямих вимірів радіального розподілу індуктованих струмів: а - схематичне розташування вимірювальних елементів на листовій заготовці; б - практичне виконання листової заготовки з розрізом і перемичками

В проведеному дослідженні даний факт є ілюстрацією, яка відтіняє особливість електромагнітних процесів, що існує при роботі з низькими частотами діючих полів і досить тонкостінними металами. У цьому випадку часова залежність індукovanого струму трансформується в похідну струму індуктора. Для

експоненційно загасаючої синусоїди зсув по фазі між ними скорочується до величини $\pi/2$.

Експерименти на різних частотах повністю підтвердили раніше отримані теоретичні результати: було отримано очікуваний зсув за фазою на низьких частотах (рис. 10).

а

б

Рис. 10. Осцилограма струмів у індукторній системі при частоті 1,33 кГц: а – струмовий імпульс у індукторі; б – струмовий імпульс, що індукований в металі листової заготовки

Результати вимірів і розрахунків, виконаних у відповідності з фізико-математичним аналізом для радіальних розподілів вихрових струмів, індукованих у металі листової заготовки, істотних змін у порівнянні з розрахунковими даними не виявили.

Експериментально були визначені компоненти вектора магнітної напруженості (дотична H_τ і нормальна H_n складові) на поверхні листового металу. Дослідження проводилися на експериментальному стенді з використанням описаних вище методик.

На рис.11 у відносних одиницях дані графічні залежності радіального розподілу складового вектора напруженості магнітного поля на поверхні листового металу з боку індуктора. Нормування виконувалось на максимальне значення вимірюваної величини.

Із проведених експериментів виходить, що при низьких робочих частотах збуджується інтенсивна нормальна складова напруженості магнітного поля, амплітуда якої порівняна з тангенціальним компонентом.

Так само, висвітлені результати експериментальних досліджень індукційної індукторної системи із двома листовими металами, призначеної для притягання заданих ділянок оброблюваного об'єкта.

Основні виміри проводилися з використанням модельного варіанта джерела потужності. Апробацію силового впливу було проведено шляхом підключенні системи до реальної магнітно-імпульсної установки – МІУ-10 із запасом енергії 10 кДж.

а

б

Рис.11. Радіальні розподіли компонента напруженості на поверхні тонкостінного листового металу при частоті 1,33 кГц; а – тангенціальна компонента для індуктора з $R1=57$ мм, $R2=64$ мм; б – нормальна компонента для індуктора з $R1=57$ мм, $R2=64$ мм; 1 – експеримент; 2 – розрахунок

Об'єктом дослідження була індукційна індукторна система із плоским циліндричним одновитковим соленоїдом і двома ідентичними листами з нержавіючої сталі. Останні були розташовані компланарно та симетрично щодо площини витка індуктора. Один з них виконував роль додаткового допоміжного екрана, інший – листової заготовки, що підлягає силовому впливу.

Як і слід було сподіватися з феноменологічних міркувань, зниження робочої частоти веде до зниження амплітуд збуджуваних вихрових струмів. Цей висновок також був врахований при виборі проектних параметрів індукційних індукторних систем, призначених для притягання заданих ділянок оброблюваного листового металу.

Як показав проведений аналіз, для збільшення електродинамічних зусиль і усунення вм'ятин необхідно зменшити відстань між взаємодіючими об'єктами. Частину екрана в робочій зоні індукторної системи (це внутрішнє вікно витка) було варто виконати опуклою та частково виступаючою над площиною витка. Запропоноване конструктивне рішення для інструмента магнітно-імпульсного притягання було апробовано на практиці (рис.12).

а

б

Рис.12. Одновиткова індукційна індукторна система з опуклим допоміжним екраном: а - елементи: індуктор (угорі), екран (знизу); б - система у складі

У листовому зразку з обшивки кузова автомобіля фірми «Mitsubishi» товщиною 0,8 мм були виконані дві ідентичних вм'ятини (магнітно-імпульсний тиск – «відштовхування»). Одна з них є контрольною, другу потрібно було усунути за допомогою магнітно-імпульсного впливу – «притягання».

Проведені експерименти дали позитивні результати. Ефективність притягання істотно зростає (рис.13).

Рис. 13. Експериментальний зразок листової сталі кузова автомобіля фірми «Mitsubishi»: №1 - вихідна контрольна вм'ятинка; №2 - результат усунення

Із проведених експериментів випливає, що виготовлення допоміжного екрана індукційної індукторної системи опуклої форми дозволяє зменшити відстань між взаємодіючими струмами та збільшити ефективність магнітно-імпульсного притягання листових металів.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу з вдосконалення, підвищення ефективності та розробки циліндричних індукційних індукторних систем для магнітно-імпульсного притягнення тонких металевих листів. У процесі досліджень зроблені такі висновки:

1. Проведено аналіз існуючих методів магнітно-імпульсного притягнення заданих ділянок поверхонь тонких металевих листів та конструкцій індукторних систем, що дозволяють реалізувати операції по зовнішньому рихтуванню без механічного втручання.

2. Теоретично показано, що на високих частотах діючих полів для заготовок із матеріалів з високою електропровідністю індукований сигнал повторює форму струму в індукторі, але має протилежний напрямок, або, що те саме - має зсув по фазі щодо струму в індукторі на величину близьку до π . На низьких частотах індукований сигнал має часову форму, функціонально близьку до похідної струму індуктора. Для гармонійних процесів це відповідає зсуву по фазі між ними менше $\pi/2$. У низькочастотному режимі збуджується потужна нормальна складова напруженості магнітного поля, відсутня при різкому поверхневому ефекті (досить високих частотах діючих полів). Поява нормальної компоненти напруженості обумовлена дифузією поля крізь заготовку, що обробляється.

4. Теоретичні дослідження індукційних індукторних систем, принцип дії яких заснований на притягненні паралельних провідників з однаково спрямованими струмами, показали, що в низькочастотному режимі діючих полів сили притягання досягають значних амплітуд і прямопропорційні квадрату робочої частоти, питомої електропровідності екрана та листової заготовки, а інтегральна в часі величина сил магнітного відштовхування мала.

5. Розташування допоміжного екрана в площині внутрішнього отвору витка індуктора приводить до деякого падіння ефективності даної конструкції інструмента. Амплітуди сил притягнення у кілька разів нижче, ніж у випадку розташування допоміжного екрана симетрично листовій заготовці щодо площини витка індуктора. Теоретично показано, що підвищення ефективності індукційної індукторної системи можливо, якщо допоміжний екран виконаний опуклим убік металевої поверхні, що притягається, тобто, площа екрана розташована поза витком на його зовнішній поверхні, а циліндрична опуклість входить у порожнину внутрішнього вікна індуктора. Принципова сутність пропозиції захищена патентом України на корисну модель.

6. Розроблено силовий блок експериментального стенда з набором погоджувальних пристроїв, що дозволяє проводити дослідження характеристик електромагнітних процесів у широкому діапазоні робочих частот розрядного струму та достатньо для якісних вимірів амплітуди сигналу, що генерується.

7. Запропонована та апробована методика «прямого адекватного виміру індукованого струму» у листовій заготовці. Розбіжність між її даними і даними традиційних вимірювальних систем не перевищує 10 %.

8. Експерименти підтверджено теоретичні висновки про змінювання тимчасової форми індукованих сигналів у порівнянні зі струмом індуктора при зниженні робочих частот діючих полів. Дійсно, часова залежність вихрових струмів прагне до похідній струму індуктора за часом. А для гармонійного процесу зсув по фазі між збудженими та індукованим сигналами становить біля $\pi/2$. Також експерименти підтвердили висновки теорії про зростання нормальної компоненти напруженості магнітного поля в системі при низьких значеннях робочих частот. Підтверджено, що радіальний розподіл нормальної компоненти напруженості істотно відрізняється від аналогічної характеристики дотичної складової. А саме: поле тангенціальної компоненти практично зосереджено під витком індуктора, у той час як поле нормальної складової, хоча й досягає екстремуму в зоні витка, розподілено по всій області його внутрішнього вікна. При зниженні робочої частоти індукований струм «усе більше розтікається» по заготовці до геометричного центра системи. Даний результат говорить про можливе збільшення області силових взаємодій, тобто «робочої» зони індукційних індукторних систем з додатковими допоміжними екранами, і, отже, про зростання їхньої ефективності на низьких частотах.

9. Сформульовану та апробовану пропозицію на вибір форми допоміжного екрана можна розглядати як одне з можливих конструктивних рішень по виконанню реального робочого інструмента для виконання виробничої операції по магнітно-імпульсному притяганню заданої ділянки металевої поверхні. Силкові експерименти показали, що виконання допоміжного екрана індукційної індукторної системи опуклим дозволяє зменшити відстань між взаємодіючими струмами та, як наслідок, збільшити ефективність магнітно-імпульсного притягання листових металів.

10. Результати дисертаційної роботи впровадженні на кафедрі автомобільної електроніки ХНАДУ при електромагнітній рихтовці тонких металевих частин кузова автомобіля, та у навчальний процес НТУ «ХП» на кафедрі опору матеріалів при викладанні дисциплін з міцності тонкостінних металевих конструкцій та використані.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Чаплыгин Е. А. Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности / А. В. Бажинов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин // Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков: ХНАДУ, – 2005. – Выпуск 16. – С.349–

353. *Здобувач провів підбір матеріала з літературних джерел, його компонування та оформлення для видавництва.*

2. Чаплыгин Е. А. Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Е. А. Чаплыгин // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2005. – №3. – С.69–73. *Здобувачем запропоновано модель та розраховано струми індуковані низькочастотним полем одновиткового соленоида в плоских листових металах.*

3. Чаплыгин Е. А. Реализация и перспективы магнитно-импульсных методов в развитии передовых технологий современности / Ю. В. Батыгин, Г. С. Сериков, Е. А. Чаплыгин // *Автомобильный транспорт / Сб. науч. Трудов.* – Харьков: ХНАДУ, 2006. – Вып. 18. – С.83–87. *Здобувачем проведено аналіз сучасної наукової періодики за темою статті, підготовка матеріалів статті до видання.*

4. Чаплыгин Е. А. Вихревые токи в плоских листовых металлических заготовках / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – №5. – С.54–59. *Здобувачем проведено вибір розрахункової моделі, аналітичне інтегрування рівнянь Максвелла, числові оцінки вихрових струмів в плоских листових заготовках.*

5. Чаплыгин Е. А. Магнитное поле в тонкостенной листовой заготовке при низких значениях рабочих частот / Е. А. Чаплыгин // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – №6. – С.71–73.

6. Чаплыгин Е. А. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, Е. А. Чаплыгин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2007. – №11/47. – С.109–117. *Здобувачем запропоновано конструктивний варіант індукторної системи, проведено числові оцінки основних електродинамічних характеристик.*

7. Чаплыгин Е. А. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования / А. Ю. Бондаренко, Г. С. Сериков, Е. А. Чаплыгин // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2007. – №6. – С.66–69. *Здобувачем проведена розробка та описання силовій частини низьковольтного генератора імпульсів струму широкого частотного діапазону для фізичного моделювання.*

8. Чаплыгин Е. А. Экспериментальное исследование процессов возбуждения вихревых токов в плоских листовых металлах / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2008. – №5. – С.52–54. *Здобувачем проведено вибір та практична апробація методики проведення експерименту з дослідження процесів збудження вихрових струмів у плоских листових металах.*

9. Чаплыгин Е. А. Эксперименты с индукционными индукторными системами для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин, Т. Т. Черногор // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2008. – №6. – С.64–67. *Здобувачем проведена розробка елементів експеримен-*

тального устаткування. Проведення експериментів з індукційними індукторними системами для магнітно-імпульсного притягнення та аналіз результатів.

10. Пат. 31751 України, В 21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок методом притягання до індуктора / Батигін Ю. В., Бондаренко О. Ю., Чаплигін Є. О.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200712252; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. №8. (Розробка конструктивних рішень з практичної реалізації способу).

11. Чаплыгин Е. А. Возможности магнитно-импульсной технологии для рихтовки кузовных элементов автомобилей / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Г. С. Сериков, Е. А. Чаплыгин // Труды 13-й международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии», 19–20 апреля 2007 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007. – С.352–355. *Здобувачем проведено аналіз результатів проведених робіт в даному напрямку, компонування матеріалів та підготовка до видання.*

АНОТАЦІЯ

Чаплигін Є. О. Розробка циліндричних індукційних індукторних систем для магнітно-імпульсного притягання тонких металевих листів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 - техніка сильних електричних і магнітних полів. - Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2009.

В дисертації розглянуті історичні аспекти розвитку та використання магнітно-імпульсної обробки металів у різних галузях промисловості, здійснено аналіз наявних теоретичних та експериментальних напрацювань у досліджуваній сфері. Проведено фізико-математичне обґрунтування протікання вихрових струмів і магнітних полів у плоских листових тонкостінних металевих заготовках. Теоретично виявлена специфіка індуктованих струмів та магнітних полів у режимах їх високочастотного та низькочастотного протікання. Також був проведений аналіз, що дозволив виявити принцип дії і фізику процесів, що вивчаються. Теоретично доведена перспективність переваги практичного використання низькочастотних струмів перед високочастотними.

Розроблена та виготовлена індукційна індукторна система для експериментальних досліджень реальних електромагнітних процесів у широкому діапазоні робочих частот струмів, достатніх для якісних вимірів амплітуди генеруючи сигналів та індуктованих полів і струмів.

Запропонована і апробована методика «прямого адекватного виміру індуктованих струмів» у листових заготовках, перевагами якої є пряма пропорційність між струмом та вимірюваним сигналом, що знімається за відсутності додаткових вимірювальних пристроїв.

Експериментальна перевірка результатів теоретичного аналізу підтвердила отримані попередні висновки.

Теоретично та експериментально досліджені можливості варіанта циліндричної індукторної системи з додатковим екраном, що забезпечує притягнення визначеної ділянки тонкостінної металеві заготовки. Було виготовлено і використано варіант моделі-інструмента для вирівнювання вм'ятин в кузовних деталях автомобіля фірми «Mitsubishi».

Сформульовані практичні рекомендації щодо можливостей використання технології магнітно-імпульсної обробки металів і галузях автомобілебудування та ремонту автотранспорту.

Ключові слова: електромагнітні процеси, електрофізичне обладнання, циліндрична індукторна система, магнітно-імпульсне притягання.

АНОТАЦІЯ

Чаплыгин Е. А. Разработка цилиндрических индукционных индукторных систем для магнитно-импульсного притяжения тонких металлических листов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, 2009.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов с использованием цилиндрической индукционной индукторной системы с дополнительным вспомогательным экраном в режимах протекания низкочастотных токов и полей.

Указанная технология обладает неоспоримыми преимуществами перед традиционными механическими или химическими аналогами. Особое значение имеют производственные операции по магнитно-импульсному притяжению заданных участков плоских металлических поверхностей. В диссертации рассмотрены исторические аспекты развития магнитно-импульсных технологий в различных отраслях отечественной и зарубежной промышленности, осуществлен анализ имеющихся теоретических наработок в исследуемой сфере. За основу была принята расчетная модель, включающая одновитковый соленоид, как источник импульсного магнитного поля, а также расположенную над ним тонкостенную листовую заготовку. Осуществлено физико-математическое обоснование протекания вихревых токов и магнитных полей в плоских листовых тонкостенных металлических конструкциях. Теоретически выявлена специфика индуцированных токов и магнитных полей при высокочастотных и низкочастотных режимах. Обнаружено, что существуют различия в показателях, харак-

терных для указанных режимов. При высоких частотах индуцированный сигнал повторяет форму тока в источнике, имея сдвиг по фазе на $\Delta\varphi \sim \pi$, при низких – этот сдвиг составляет $\Delta\varphi < 0,5\pi$. В последнем случае наблюдается возникновение большой нормальной составляющей напряженности магнитного поля, а силы притяжения достигают значительных амплитуд и прямопропорциональны квадрату рабочей частоты, идеальной электропроводности экрана и листовой заготовки. Также был проведен анализ, позволяющий выявить принцип действия и физику изучаемых процессов. Тем самым теоретически доказано, что использование низкочастотных токов, в отличие от высокочастотных для практического использования обнаруженных эффектов.

Разработана и изготовлена индукционная индукторная система, состоящая из емкостного накопителя энергии, коммутатора, индуктора, экрана заготовки, для экспериментальных исследований реальных характеристик электромагнитных процессов в широком диапазоне рабочих частот тока, достаточных для качественных измерений амплитуды генерирующих сигналов и индуцированных полей и токов.

Экспериментальная проверка результатов теоретического анализа реальной эффективности индукционных индукторных систем в режиме низкочастотного возбуждения токов и магнитных полей в тонкостенных металлических заготовках подтвердила сделанные ранее выводы, об изменении временной формы индуцированного сигнала, о возрастании идеальной компоненты индуцированного магнитного поля.

Предложена и апробирована методика «прямого адекватного» измерения индуцированных токов в листовых заготовках, преимуществами которой является прямая пропорциональность тока измеряемому сигналу, который снимается при отсутствии дополнительных измерительных устройств.

Теоретически и экспериментально исследованы возможности варианта цилиндрической индукционной индукторной системы с вспомогательным дополнительным экраном, обеспечивающей притяжение заданного участка тонкостенной металлической листовой заготовки. Был изготовлен вариант модели-инструмента для использования при выравнивании вмятин в кузовных деталях автомобиля.

Основные результаты исследования доведены до количественных значений, методик, алгоритмов решения задач на ЭВМ, используются в научных исследованиях и в учебном процессе.

Сформулированы практические рекомендации, расширяющие существующие варианты использования технологий магнитно-импульсной обработки металлов в областях автомобилестроения и ремонта автотранспорта.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, электрофизическое оборудование, цилиндрическая индукторная система, магнитно-импульсное притяжение.

ABSTRACT

Chaplygin E. O. The Development of Cylindrical Induction System for Magnetic-pulse Attraction of Thin Metal Sheets. Manuscript.

Thesis for competition of scientific degree of candidate technical science on specialty 05.09.13 – the Technik for strong electric and magnetic fields. Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2009.

Historical aspects of the development and application of magnetic-pulse metal processing in different branches of industry have been considered in the thesis. The analysis of existing theoretical and experimental developments in the investigated sphere has been carried out. Physical and mathematical substantiation of eddy currents and magnetic fields in flat sheet thin-walled metal bullet has been executed specificity of induction currents and magnetic fields in models of their high-frequency and low frequency course has been theoretically revealed. The analysis that enables to discover the principle of action and physics of processes that are studied has also been carried out. Perceptivity of advantage of practical use of low-frequency currents in comparison with high-frequency ones has been theoretically proved.

The induction system for experimental researches of real electromagnetic processes in a wide range of working frequency of currents, sufficient for exact measuring of the amplitude of generating signals and induction fields of currents has been developed.

The method of “direct adequate” induction currents measuring in sheet bullet, whose advantage is direct proportionality to the current of the measured signal that is registered due to the lack of supplementary measuring devices has been offered and approved.

Experimental check of theoretical analysis results proved preliminary conclusions.

Possibilities of cylinder induction system variant with an additional screen that provides the attraction of a certain part of thin-walled metal preparation have been theoretically investigated.

The model-tool variant for alignment of body details dents of “Mitsubishi” automobile has been produced and applied successfully.

Practical recommendations concerning the possibilities of magnetic-pulse metal processing technology application in automobile building and motor transport repair branches have been formulated.

Key words: electromagnetic processes, electrophysics equipment, cylinder induction system, magnetic-pulse attraction.