

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ВАСЮК ВЯЧЕСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 620.179:621.373.5

**ЛІНІЙНИЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ В СИСТЕМАХ  
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**

05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор технічних наук, доцент  
**Жильцов Андрій Володимирович**,  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
завідувач кафедри електричних машин  
і експлуатації електрообладнання

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Гребеніков Віктор Володимирович**,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
провідний науковий співробітник  
відділу електромеханічних систем

кандидат технічних наук, доцент  
**Голенков Геннадій Михайлович**,  
Київський національний університет  
будівництва і архітектури,  
доцент кафедри електротехніки і електроприводу

Захист відбудеться «14» червня 2017 року о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розісланий «12» травня 2017 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

А. В. Петренко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Якість нероз'ємних зварних з'єднань значною мірою визначається через прояви термодформаційних явищ у зоні зварного шва. В окремих випадках, зварювальні напруження і деформації зумовлюють руйнування зварної конструкції і, як наслідок, впливають на надійність та довговічність роботи технологічного обладнання.

Задача зниження зварювальних залишкових напружень може бути вирішена різними способами подальшої обробки: прокатка, проковка, термічна обробка, вібраційна обробка, ультразвукова обробка, ударного і вибухового навантаження та інші. Переліченим способам обробки зварного шва притаманні певні недоліки, до яких можна віднести необхідність створення енерго- та металомісткого технологічного обладнання, обмеження під час обробки великогабаритних конструкцій та значні витрати енергії.

Перспективним шляхом підвищення ресурсу зварних з'єднань, який характеризується відносною простотою застосування та низькими витратами енергії, є електродинамічна обробка. При цьому, за умови, коли густина струму в металі досягає величини більше, ніж  $10^9$  А/м<sup>2</sup> та при накладанні стискаючих зусиль на рівні 20 кН, виявляється ефект електропластичності, який полягає в релаксації напружено-деформованого стану металевих матеріалів. Досліджували даний ефект Ю. В. Баранов, І. Л. Батаронов, І. П. Кондратенко, Л. М. Лобанов, А. М. Рощупкін, В. І. Спіцин, О. О. Троїцький, Н. Conrad та інші вчені.

Електротехнічну систему для здійснення електродинамічної обробки можливо конструктивно виконати як лінійний електромеханічний перетворювач індукційного типу ударної дії, який дає змогу одночасно забезпечити як силову дію, так і передати через контактний електрод імпульс струму в зону обробки. Але поєднання двох функцій в одному пристрої зумовлює одночасний розгляд як процесів електродинаміки, так і процесів у розрядному колі.

Значний вклад у розвиток теорії і практики побудови лінійних електромеханічних перетворювачів внесли такі дослідники, як А. А. Афонін, В. Ф. Болюх, Ю. М. Васьковський, Г. М. Голенков, В. В. Гребеніков, А. Г. Гурін, В. Г. Данько, В. І. Мілих, К. В. Татмишевський, В. Т. Чемерис, Ю. Г. Ямпольський, А. Balıkcı, A. Bissal, X. Hongjun, W. J. Jeon, M. Mehran, V. D. Skurdal, E. Spahn, H. Yongxia, W. Li та ін.

Однак, на сьогодні, розв'язок коло-польової задачі, характерної для електродинамічної обробки зварних з'єднань металевих неферромагнітних конструкцій із застосуванням лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії, не розглядався.

Таким чином, розробка методів розрахунку взаємопов'язаних електрофізичних процесів у системах електродинамічної обробки зварних з'єднань металевих неферромагнітних конструкцій та забезпечення необхідних з технологічних міркувань параметрів – зусиль та густини струму – актуальне наукове завдання, яке має суттєве значення для розвитку теорії і практики

імпульсних електромагнітних систем у складі джерел живлення та електромеханічних перетворювачів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи становлять результати досліджень, проведені автором упродовж 2011–2017 років. Робота відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема, п. 6 статті 7 «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» та спрямованості тематики науково-дослідних робіт кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України, Інституту електродинаміки Національної академії наук України, у виконанні яких здобувач брав безпосередню участь як співвиконавець, а саме:

- у межах науково-дослідної роботи 110/422-пр «Розробка методологічних засад управління якістю енергозабезпечення та енергоефективністю технологічних процесів АПК» (номер державної реєстрації 0111U003694);

- у межах проекту Р.7.3.2 «Визначити характеристики та створити джерела живлення і виконавчі інструменти для електроімпульсної і магнітоімпульсної обробки зварних тонколистових конструкцій» у межах цільової програми наукових досліджень НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання і споруд» (Ресурс-2) та договором № Р.7.3.2-2016/797-16 Інституту електродинаміки НАН України (номер державної реєстрації 0116U006588).

**Мета та завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи – встановлення взаємозв'язків конструктивних, електричних і режимних характеристик лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії з ефективністю електродинамічної обробки зварних з'єднань.

Для досягнення поставленої мети розв'язано такі завдання:

- обґрунтувати необхідність розробки нових, раціональних з точки зору затрат енергії, електротехнічних систем для електродинамічної дії на зварні з'єднання в неферомагнітних металевих конструкціях;

- розробити систему електродинамічної дії на зварні з'єднання в неферомагнітних металевих конструкціях;

- розробити на основі інтегро-диференційних рівнянь коло-польову математичну модель нестационарних електромагнітних процесів у неоднорідних середовищах для систем електродинамічної дії на зварні з'єднання в неферомагнітних металевих конструкціях;

- застосувати розроблені математичні моделі для аналізу розподілу струмів та електродинамічних зусиль в електромагнітній системі «електрод-зварне з'єднання», та обґрунтувати параметри системи електродинамічної дії на зварні з'єднання для забезпечення місцевої релаксації зварювальних залишкових напружень у металевих неферомагнітних конструкціях;

- перевірити на достовірність та адекватність розроблену математичну модель нестационарних електромагнітних процесів у неоднорідних середовищах шляхом порівняння розрахункових та експериментальних даних,

які отримано на фізичній моделі системи електродинамічної дії на зварні з'єднання.

*Об'єкт дослідження* – нестационарні електрофізичні процеси в лінійному електромеханічному перетворювачі індукційного типу ударної дії.

*Предмет дослідження* – взаємозв'язок конструктивних, електричних і режимних характеристик лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії з ефективністю електродинамічної обробки зварних з'єднань.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

Набув подальшого розвитку метод інтегро-диференціальних рівнянь для моделювання електрофізичних процесів в електротехнічній системі для електродинамічної обробки в напрямі декомпозиції тривимірного електромагнітного поля на схрещені електромагнітні поля з вісьовою симетрією, що дало змогу суттєво зменшити області пошуку розв'язку, і, як наслідок, раціонально використовувати ресурси обчислювальної техніки.

Розроблено нову двовимірну коло-польову математичну модель перехідного процесу розрядження ємності на розгалужене електричне коло з котушкою, індуктивність якої динамічно змінюється, що дає змогу за рахунок регулювання геометричних розмірів електромеханічної системи досягти необхідних за технологічними вимогами характеристик електродинамічної дії.

Уперше обґрунтовано доцільність використання зворотного діода паралельно ємності в генераторі імпульсів струму, що дає змогу зменшити від'ємну електродинамічну силу притискання і, як наслідок, зменшення загрози розриву електричного контакту електрода зі зварним з'єднанням.

Уперше визначено величину та форму струму в перехідному процесі розряду ємнісного накопичувача, шунтованого зворотнім діодом, на котушку індуктивності з урахуванням вихрових струмів у неферромагнітному масивному диску, який розташований біля неї, що дає змогу підвищити адекватність визначення величини динамічної характеристики електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії.

На основі розробленої математичної моделі нестационарного електрофізичного процесу вперше обґрунтовано розмір площі контакту електрода електромеханічного перетворювача зі зварним з'єднанням, яка дає змогу забезпечити максимальний об'єм металу, де створюються умови для електропластичної деформації.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати роботи знайшли практичне використання в розробці електротехнічної системи для електродинамічної обробки зварних з'єднань із регульованими параметрами розрядного кола, яка є передумовою до створення системи автоматичного зварювання в Інституті електродинаміки НАН України. Запропоновано технічне рішення електротехнічного комплексу для електродинамічної обробки, яке мінімізує силу відштовхування електрода при зміні знака похідної кривої розрядного струму кола.

Результати дисертаційної роботи як відповідна методика розрахунку параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу

використовуються в лекційних курсах «Сучасна теорія електромеханічного перетворення енергії», «Математичне моделювання електромагнітних пристроїв і електромеханічних перетворювачів енергії» для студентів Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Практичне значення для електротехнічної галузі має запропонований алгоритм розрахунку характеристик електромеханічного перетворювача індукційного типу, на основі якого написано програму на мові *Fortran*, яка дає змогу за рахунок регулювання параметрів електромеханічної системи досягти необхідних за технологічними вимогами характеристик електродинамічного впливу. Розроблені методики розрахунків електричних параметрів розрядного кола дозволять підвищити показники електромеханічних перетворювачів індукційного типу ударної дії і можуть бути застосовані в прискорювачах масивних виконавчих елементів та ударно-силових пристроях. Практичне значення розроблених засобів підтверджується актами впровадження.

Слід зауважити, що застосування зазначеного вище електродинамічного впливу на зварне з'єднання, відкриває нові можливості в напрямі розробки неруйнівних методів визначення залишкових напружень.

Наукове завдання роботи полягає в подальшому розвитку методу інтегро-диференційних рівнянь для розрахунку характеристик електромагнітного поля в частині врахування динамічної індуктивності та втрат на вихрові струми.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням. Основні результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка математичних моделей, алгоритмів і програмних засобів, планування й участь у проведенні експериментів, аналіз і узагальнення результатів теоретичних, а також експериментальних досліджень.

У наукових публікаціях, виданих у співавторстві, автору дисертації належать: розробка коло-польової математичної моделі процесу розрядження ємності на електромагнітну систему з послідовно з'єднаних котушки індуктивності, електрода та неферромагнітної пластини [1, 3, 5, 8–10, 14–16]; аналіз методів визначення та способи зниження зварювальних залишкових напружень і деформацій [2, 6, 11, 12]; розрахунок параметрів контуру для створення притискаючого зусилля в електротехнічному комплексі для зниження залишкових напружень [4, 13, 17]; дослідження нестационарних електрофізичних процесів у системах оперативного неруйнівного визначення залишкових напружень [7]. Зі спільних публікацій здобувач використав, за згодою співавторів, лише власну частину результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи було викладено в доповідях та обговорено на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2011 р.); конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників і аспірантів «Підсумки науково-дослідних робіт 2011 року» (м. Київ, 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми підвищення

ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах» (м. Севастополь, 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених, присвяченій 80-й річниці заснування факультету енергетики і автоматики Національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні питання сталого розвитку сільськогосподарського виробництва» (м. Бережани, 2014 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах» (м. Київ, 2014 р.); семінарі наукової ради з проблем «Наукові основи електроенергетики» (м. Київ, 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні тенденції та перспективи розвитку збалансованого природокористування в агропромисловому комплексі» (м. Ніжин, 2015 р.); XVI Міжнародній конференції «Обчислювальні проблеми електротехніки» – «Computational Problems of Electrical Engineering» (СРЕЕ) (м. Львів, 2015 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування» (м. Київ, 2015 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (м. Київ, 2016 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи викладено у 17 наукових працях, з яких 2 статті у наукових фахових виданнях України, 4 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних, стаття в іншому науковому виданні та 9 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатка. Загальний обсяг дисертації становить 140 сторінок комп'ютерного тексту. Список використаних джерел налічує 179 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, її зв'язок з науковими програмами і темами, сформульовано мету й завдання роботи, вказано об'єкт та предмет дослідження, викладено наукову новизну, описано методи дослідження, дані про практичне значення одержаних результатів, апробацію, публікації.

У першому розділі «**Аналіз електрофізичних процесів та методів математичного моделювання в системах електродинамічної обробки зварних з'єднань**» наведено огляд способів запобігання зварювальним напруженням та їх зниженню, наведено їх переваги та недоліки, проаналізовано загальні характеристики і основні типи лінійних електромеханічних перетворювачів. Запропоновано перспективний шлях зниження зварювальних залишкових напружень та підвищення ресурсу зварних з'єднань із

застосуванням методу їх обробки імпульсами електричного струму різної тривалості та інтенсивності з одночасною динамічною локальною дією.

Запропоновано конструкцію електротехнічної системи для здійснення зазначеного імпульсного електромагнітного впливу виконати як електромеханічний перетворювач індукційного типу та джерело імпульсів струму. Обґрунтування параметрів і характеристик електротехнічної системи вимагає розробки математичної моделі нестационарного електромагнітного процесу електродинамічної обробки зварних з'єднань та встановлення на її основі конструктивних, електричних і режимних характеристик для забезпечення параметрів струмових імпульсів, достатніх для ефективного впливу на залишковий напружений стан металевих конструкцій.

На підставі аналізу сучасних вимог до методів дослідження нестационарних електрофізичних процесів у системах електродинамічного впливу, встановлено невідповідність цим вимогам існуючих методів, таких як метод скінечних елементів, метод скінечних різниць, і обґрунтовано актуальність та необхідність розробки нових, сформованих на основі інтегродиференціальних рівнянь, математичних моделей для аналізу електромагнітних процесів у таких системах.

У другому розділі «**Електротехнічна система для електродинамічної обробки зварних ферромагнітних з'єднань**» розроблено конструкцію електротехнічної системи, призначеної для зниження зварювальних залишкових напружень, за допомогою проведення електродинамічної обробки. До її складу входять: електромеханічний перетворювач індукційного типу ударної дії та джерело імпульсів струму (рис. 1). Електромеханічний перетворювач індукційного типу забезпечує, з одного боку, електричний контакт між електродом, через який вводиться імпульс струму, згенерований джерелом та зварним з'єднанням, а з іншого – силову дію.

Конструктивними елементами *електромеханічного перетворювача індукційного типу* для електродинамічної обробки металу є котушка індуктивності 1 і масивний електропровідний диск 4, що розміщується співвісно з котушкою. У центрі диска жорстко закріплено мідний стержень 5, на кінці якого встановлюється вольфрамовий електрод 6. Котушка індуктивності 1 і диск 4 розміщені в корпусі 2 та закриваються знизу кришкою 3. Кінець електрода має поліровану закруглену поверхню. Електромагнітна система під прямим кутом розміщується по відношенню до об'єкта 7. Для створення надійного початкового електричного контакту «електрод-зразок» на корпусі приладу зверху закріплено вантаж 9. Для підведення до електродного пристрою струму використовуються виводи котушки 8, 10 та контакт зі зразком 11. Живиться електромеханічний перетворювач від джерела імпульсів струму.

*Джерело імпульсів струму* побудовано на основі накопичення заряду через великий опір  $R_3$  конденсатором  $C$  від стабілізованого джерела постійної напруги  $E_0$  та наступного швидкого розрядження цього конденсатора через електромеханічний перетворювач індукційного типу. Котушка 1 забезпечує створення притискаючого зусилля електрода 6 до поверхні зразка 7. Таке

притискання виникає в момент проходження імпульсу струму за рахунок взаємного відштовхування струмів у котушці 1 та вихрових струмів, що виникають у масивному диску 4. Як швидкодіючий комутуючий елемент використовується керуючий тиристор  $VS$ .

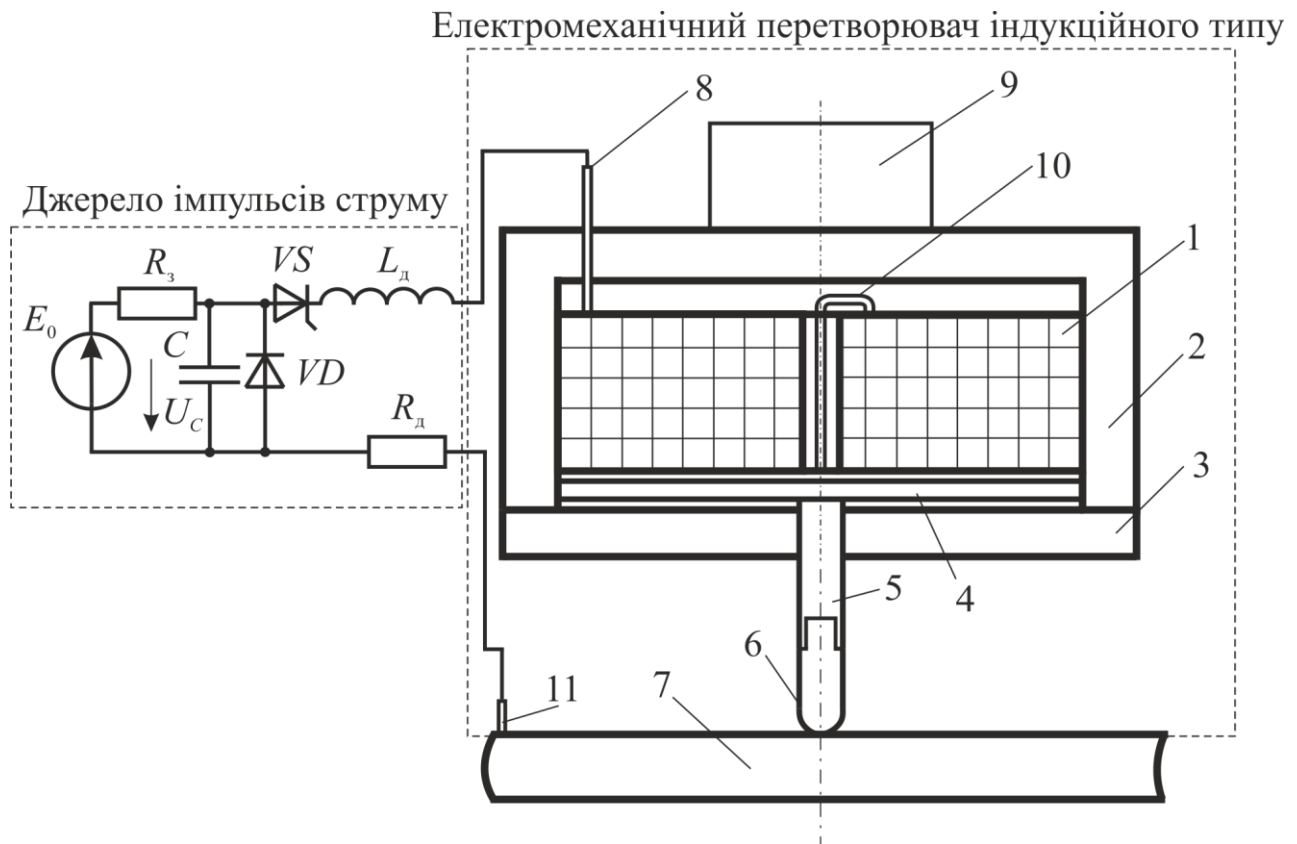


Рис. 1. Електротехнічна система для електродинамічної обробки зварних з'єднань

У зв'язку з тим, що під час здійснення процесу розрядження сила електродинамічного притискання згодом переходить у від'ємне значення (диск 4 притягується до котушки 1), виникає загроза розриву електричного контакту електрода зі зварним з'єднанням. Це може призвести до виникнення електродугових процесів із виділенням теплової енергії в зоні контакту, що є неприпустимим. Для усунення такого явища необхідно якомога більше знизити від'ємну електродинамічну силу. Запропоновано цю задачу розв'язувати засобами перетворювальної техніки. Найпростіше це реалізується встановленням зворотного діода  $VD$  паралельно ємності  $C$ . При цьому певний час, до моменту переходу напруги на конденсаторі через нуль, діод знаходиться в закритому стані, а потім він відкривається і продовження перехідного процесу відбувається вже в колі, до якого входять лише індуктивність та активний опір.

Розробка електротехнічної системи передбачає математичне моделювання нестационарних електрофізичних процесів, що дасть змогу встановити конструктивні, електричні й режимні параметри, що забезпечуватимуть ефективність застосування електродимічного впливу на зварювальні залишкові напруження, а саме: параметри електричного кола  $C$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $U_C$ , які забезпечують, з одного боку, задану силу притискання  $F(t)$

електрода на дослідний зразок та час її дії, а з іншого – забезпечують густину струму  $\delta(Q,t)$  в області дослідного зразка для зменшення залишкових напружень у ньому.

Нехай ємність  $C$ , заряджена до напруги  $U_c$ , замикається на систему з послідовно з'єднаних додаткової індуктивності  $L_d$ , додаткового опору  $R_d$  та котушки індуктивності  $L_k$  з опором  $R_k$ , масивних провідників, що займають об'єм  $D=D_1 \cup D_2 \cup D_3$ , який обмежений гладкою поверхнею  $S=S_{10} \cup S_{20} \cup S_{30} \cup S_{12} \cup S_{23}$  (рис. 2).

У загальному випадку розв'язок задачі потребує розв'язання тривимірної крайової задачі для системи рівнянь Максвелла в необмеженій області, яка зводиться до крайової задачі в термінах векторний магнітний потенціал та скалярний електричний потенціал. Далі, з використанням теорії потенціалів та методу вторинних джерел, задача редукується до системи інтегро-диференціальних рівнянь для густини вихрових струмів і густини простого шару електричних зарядів:

$$\frac{\vec{\delta}_q(Q,t)}{\gamma_q \lambda} + \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{\vec{\delta}(M,t)}{r_{QM}} dV_M - \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0 s} \int \sigma(M,t) \frac{\vec{r}_{QM}}{r_{QM}^3} dS_M = - \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{\vec{\delta}_w(M,t)}{r_{QM}} dV_M, \quad Q \in D_q, \quad q=1,2,3; \quad (1)$$

$$\frac{\chi(Q) \mu_0 \epsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{(\vec{\delta}(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M + \sigma(Q,t) + \frac{\chi(Q)}{2\pi s} \int \sigma(M,t) \frac{(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q)}{r_{QM}^3} dS_M =$$

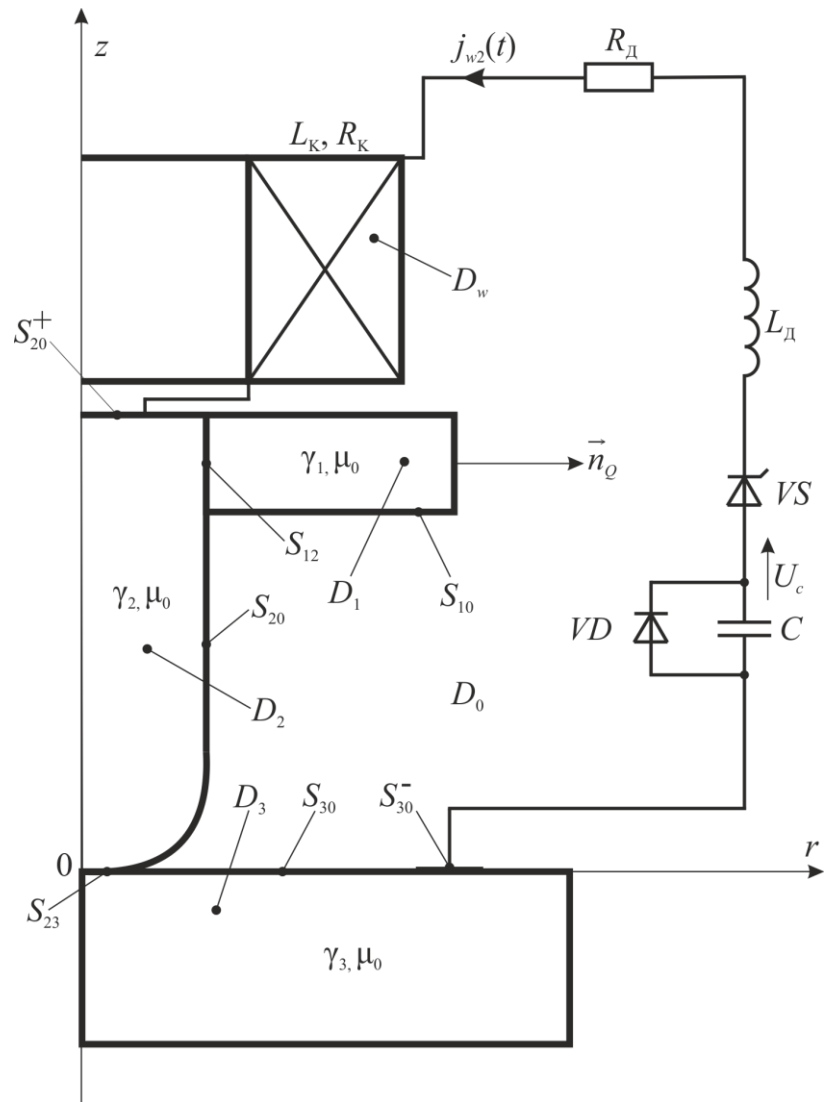


Рис. 2. Меридіанний переріз електромагнітної системи із зображенням зовнішнього електричного кола

$$= -\frac{\chi(Q)\mu_0\varepsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{D_w} \frac{(\vec{\delta}_w(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M - F(Q,t), Q \in S \cup S_{20}^+ \cup S_{30}^-, \quad (2)$$

$$\vec{\delta}_w(M,t) = \vec{\delta}_w^{(0)}(M), \quad \vec{\delta}(M,t) = \vec{\delta}^{(0)}(M), \quad \sigma(M,t) = \sigma^{(0)}(M), \quad (3)$$

де  $\vec{\delta}_q(Q,t)$  – миттєва густина вихрових струмів у точці  $Q \in D_q, q=1,2,3$ ;  $\gamma_q$  – питома провідність матеріалу масивного тіла  $D_q, q=1,2,3$ ;  $\lambda_s = \mu_0/(2\pi)$ ;  $\vec{\delta}(M,t)$  – миттєва густина струму в точці  $M \in D, D = D_1 \cup D_2 \cup D_3$ ;  $\vec{r}_{QM}$  – радіус-вектор, спрямований з точки  $Q$  в точку  $M$ ;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична постійна;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна постійна;  $\sigma(M,t)$  – миттєве значення густини простого шару електричних зарядів у точці  $M \in S$ ;  $\delta_w(M,t)$  – миттєва густина струму в обмотці  $D_w$ ;  $t$  – час;  $\delta_\alpha^{(0)}(M), \delta_{w\alpha}^{(0)}(M)$  – густина вихрових струмів у масивних провідниках та котушці в початковий момент часу;  $\vec{n}_Q$  – зовнішня нормаль у точці  $Q$  до границі  $S$  масивного тіла (див. рис. 2).

$$\chi(Q) = \begin{cases} \frac{\gamma^+(Q) - \gamma^-(Q)}{\gamma^+(Q) + \gamma^-(Q)}, & \text{якщо } Q \in S; \\ 1, & \text{якщо } Q \in S_{20}^+ \cup S_{30}^-; \end{cases} \quad F(Q,t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } Q \in S; \\ \frac{2\varepsilon_0}{\gamma_1} \delta_{n_Q}^+(t), & \text{якщо } Q \in S_{20}^+; \\ \frac{2\varepsilon_0}{\gamma_3} \delta_{n_Q}^-(t), & \text{якщо } Q \in S_{30}^-. \end{cases} \quad (4)$$

Тут  $\gamma^+(Q)[\gamma^-(Q)]$  – питома провідність середовища в точці  $Q \in S$  при наближенні її до границі  $S$  масивного тіла з внутрішнього [зовнішнього] боку.

Систему рівнянь (1) – (4) потрібно доповнити рівняннями електричного кола за другим законом Кирхгофа для миттєвих значень струму і напруги в контурі:

$$R_d j_w(t) + L_d \frac{dj_w(t)}{dt} + R_k j_w(t) + \frac{d\Psi(t)}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t j_w(t) dt + u_c(0_+) = 0, \quad 0 < t < t_1, \quad (5)$$

$$\Psi(0_+) = \Psi(0_-) = 0 \quad \text{або} \quad j_w(0_+) = j_w(0_-) = 0, \quad u_c(0_+) = u_c(0_-); \quad (6)$$

після моменту  $t_1$  спрацювання діода  $VD$ ,

$$R_d j_w(t) + L_d \frac{dj_w}{dt} + R_k j_w(t) + \frac{d\Psi(t)}{dt} = 0, \quad t_1 < t, \quad (7)$$

$$\Psi(t_{1+}) = \Psi(t_{1-}) \quad \text{або} \quad j_w(t_{1+}) = j_w(t_{1-}). \quad (8)$$

Тут  $j_w(t) = \delta_w(t) \Delta S_w$  – струм у котушці  $D_w$ ;  $\Delta S_w = \Delta r \times \Delta z$  – площа витка;  $\Psi(t)$  – миттєве потокозчеплення магнітного поля, що створює як струм у витках котушки, так і наведені ними вихрові струми в масивному диску, зі струмом котушки;  $u_c(0_-)$  – початкове значення напруги на ємності  $C$ ;

$R_d$ ,  $R_k$ , – додатковий активний опір кола та активний опір котушки;  
 $L_d$  – додаткова індуктивність електричного кола.

Розв'язавши систему рівнянь (1) – (8) числовими методами, знаходимо густину струму в кожному масивному провіднику, знаючи, яку густину джерел теплоти в масивних провідниках, електромагнітну силу, що діє на електрод із диском та ін. можна розрахувати. Таким чином, розроблено нову двовимірну коло-польову математичну модель перехідного процесу розрядження ємності на розгалужене електричне коло з котушкою, індуктивність якої динамічно змінюється, що дає змогу за рахунок регулювання геометричних розмірів електромеханічної системи досягти необхідних за технологічними вимогами характеристик електродинамічної дії.

Третій розділ «**Математичне моделювання електрофізичних процесів в електротехнічній системі для електродинамічної обробки зварних з'єднань**» присвячено математичному моделюванню електрофізичних процесів в електротехнічній системі для електродинамічної обробки зварних з'єднань. Якщо припустити, що котушка, електрод і пластина являють собою циліндричні масивні тіла, які мають спільну вісь обертання, з якою надалі сполучається вісь  $z$  циліндричної системи координат  $r$ ,  $\alpha$ ,  $z$  (див. рис. 2), то тривимірну задачу можна редукувати до двох двовимірних із перехрещеними вісесиметричними електромагнітними полями. Результуюче електромагнітне поле знаходимо накладенням електромагнітних полів, визначених у кожній постановці завдання окремо.

У першій підзадачі для компонентів електромагнітного поля й вихрових струмів у масивних провідниках мають місце співвідношення:

$$\vec{E}(r, z, t) = \vec{e}_\alpha E_\alpha(r, z, t), \quad (9)$$

$$\vec{\delta}(r, z, t) = \delta_\alpha(r, z, t) \vec{e}_\alpha, \quad (10)$$

$$\vec{A}(r, z, t) = A_\alpha(r, z, t) \vec{e}_\alpha, \quad (11)$$

$$\vec{B}(r, z, t) = B_r(r, z, t) \vec{e}_r + B_z(r, z, t) \vec{e}_z. \quad (12)$$

У другій підзадачі:

$$\vec{E}(r, z, t) = E_r(r, z, t) \vec{e}_r + E_z(r, z, t) \vec{e}_z, \quad (13)$$

$$\vec{\delta}(r, z, t) = \delta_r(r, z, t) \vec{e}_r + \delta_z(r, z, t) \vec{e}_z, \quad (14)$$

$$\vec{A}(r, z, t) = A_r(r, z, t) \vec{e}_r + A_z(r, z, t) \vec{e}_z, \quad (15)$$

$$\vec{B}(r, z, t) = B_\alpha(r, z, t) \vec{e}_\alpha, \quad (16)$$

де  $\vec{E}$  – напруженість електричного поля;  $\vec{\delta}$  – густина струму, А/м<sup>2</sup>;  
 $\vec{A}$  – векторний магнітний потенціал;  $\vec{B}$  – магнітна індукція;  $r, z$  – координати циліндричної системи координат;  $\vec{e}_z, \vec{e}_\alpha, \vec{e}_r$  – орти циліндричної системи координат.

Для кожної з цих задач сформульовано крайові задачі в термінах векторний магнітний потенціал та скалярний електричний потенціал, які з використанням теорії потенціалу та концепції вторинних джерел редукуються

до системи інтегро-диференціальних рівнянь із наступним їх числовим розв'язком.

Розрахунок параметрів контуру для створення притискаючого зусилля з урахуванням впливу вихрових струмів у ферромагнітному провідному диску (перша підзадача). Розрахуємо параметри електричного кола з умови забезпечення заданої сили тиску електрода  $D_2$ , який жорстко з'єднаний з провідним диском  $D_1$ , та заданого часу її дії на зварне з'єднання  $D_3$  (див. рис. 2). При аналізі перехідного процесу в електричному колі врахуємо наявність поблизу котушки диска  $D_1$ . Впливом вихрових струмів в інших металевих провідниках знехтуємо, оскільки ці тіла екрануються диском  $D_1$ .

Параметри електротехнічної системи (рис. 3) для електродинамічної обробки зварних з'єднань наведені в табл. 1.

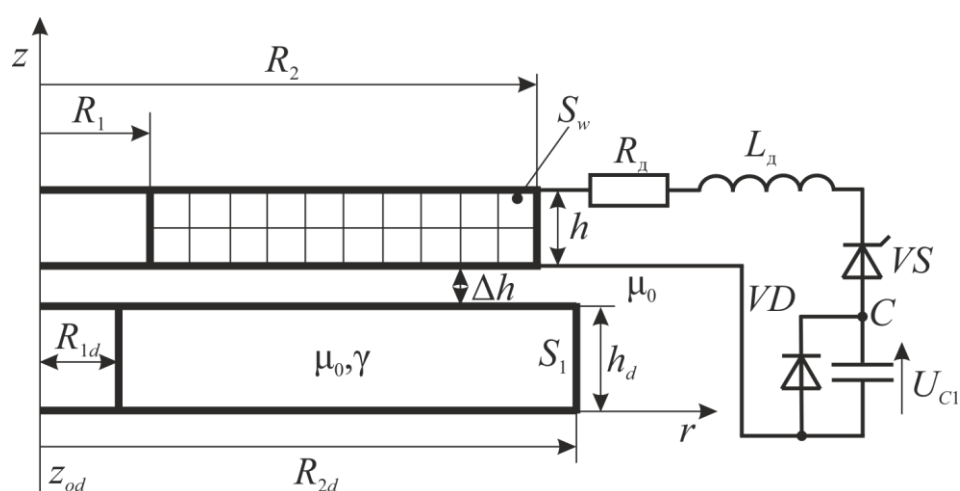


Рис. 3. Контур для створення притискаючого зусилля з урахуванням впливу вихрових струмів у ферромагнітному провідному диску

У задачі, що розглядається, густина струму  $\delta_w(t)$  у котушці невідома, але відома напруга на ємності, яка розряджається на котушку. У зв'язку з цим, рівняння (1) після інтегрування за азимутальним кутом

$$\frac{\delta_\alpha(Q,t)}{\gamma\lambda_s} + \frac{\partial}{\partial t_s} \int \delta_\alpha(M,t) T(Q,M) dS_M = - \frac{\partial}{\partial t_{S_w}} \int \delta_{w\alpha}(M,t) T(Q,M) dS_M, \quad Q \in S, \quad (17)$$

$$\delta_\alpha(M,t) = \delta_\alpha^{(0)}(M), \quad \delta_{w\alpha}(M,t) = \delta_{w\alpha}^{(0)}(M), \quad (18)$$

доповнюється другим законом Кірхгофа для миттєвих значень струму і напруги в контурі (5) – (8).

У рівнянні (17):

$$T(Q,M) = \sqrt{\frac{r_M}{r_Q}} f(k). \quad (19)$$

Потокозчеплення  $\Psi(t)$  магнітного поля, що створює як струм у витках котушки, так і наведені ними вихрові струми в масивному диску, зі струмом  $i$ -го витка,  $i=1,2,\dots,w$ , котушки визначається в такий спосіб:

$$\Psi_i(t) = \int_S \vec{B}(Q,t) d\vec{S}_Q = \int_S \text{rot} \vec{A}(Q,t) d\vec{S}_Q = \int_l A(Q,t) dl_Q = 2\pi A_\alpha(Q_i,t) r_{Q_i}, i=1,2,\dots,w,$$

де  $S$  – площа витка зі струмом;  $l$  – його контур;  $r_{Q_i}$  – радіус  $i$ -го витка котушки,  $i=1,2,\dots,w$ ;  $A_\alpha(Q_i,t)$  – миттєве значення  $\alpha$ -компоненти векторного магнітного потенціалу в точці  $Q_i$ , що розташована у центрі  $i$ -го витка котушки,  $i=1,2,\dots,w$ ;  $w$  – кількість витків у котушці.

Таблиця 1

### Параметри електротехнічної системи

Генератор імпульсів струму		
Ємність конденсатора	$C$	5140 мкФ
Напруга на ємності	$U_C$	500 В
Додаткова індуктивність	$L_d$	9 мкГн
Опір провідників	$R_d$	15 мОм
Електромеханічний перетворювач індукційного типу		
Внутрішній радіус котушки	$d_{win} = 2R_1$	20 мм
Зовнішній радіус котушки	$d_{wext} = 2R_2$	92 мм
Висота котушки	$h_w$	6 мм
Кількість витків в обмотці котушки	$w$	18
Геометричний розмір провoda, з якого виконано обмотку котушки	$S_{пр.} = a \times b$	1,5 × 5,5 мм <sup>2</sup>
Коефіцієнт заповнення	$K_3$	0,7
Проміжок між котушкою та диском	$\Delta h$	0,5 мм
Діаметр диска	$d_{2d} = 2R_{2d}$	97 мм
Товщина диска	$h_d$	8 мм
Діаметр електрода	$d_e$	8 мм
Висота електрода	$h_e$	40 мм
Діаметр контактної площадки електрода з металом	$S_{конт.}$	2 мм <sup>2</sup>
Опір котушки	$R_k$	5,46 мОм

Тут враховано, що векторний потенціал має тільки кутову складову:

$$A_\alpha(Q,t) = \frac{\mu_0}{2\pi S_1} \int \delta_\alpha(M,t) T(Q,M) dS_M + \frac{\mu_0}{2\pi S_w} \int \delta_{w\alpha}(M,t) T(Q,M) dS_M. \quad (20)$$

Тоді, потокозчеплення зі струмом  $i$ -го витка котушки дорівнює

$$\Psi_i(t) = 2\pi A_\alpha(Q_i,t) r_{Q_i}.$$

Потокозчеплення з усіма витками котушки знаходиться як:

$$\begin{aligned} \Psi(t) &= \sum_{i=1}^w \Psi_i(t) = 2\pi \sum_{i=1}^w A_\alpha(Q_i,t) r_{Q_i} = \\ &= \mu_0 \sum_{i=1}^w r_{Q_i} \int_{S_1} \delta_\alpha(M,t) T(Q_i,M) dS_M + \mu_0 \sum_{i=1}^w r_{Q_i} \int_{S_w} \delta_{w\alpha}(M,t) T(Q_i,M) dS_M. \end{aligned} \quad (21)$$

Сумісний розв'язок системи рівнянь (17), (18) та (5) – (8) з урахуванням (21) дає змогу визначити струм у котушці індуктивності, густину струму в масивному диску  $D_1$  та силу взаємодії його з вихровими струмами, що виникають під його дією в масивному диску  $D_1$ :

$$\vec{f}(Q,t) = \vec{e}_r \delta_\alpha(Q,t) B_z(Q,t) - \vec{e}_z \delta_\alpha(Q,t) B_r(Q,t). \quad (22)$$

Адекватність і достовірність математичного моделювання нестационарного процесу в електромагнітній системі було підтверджено експериментальними дослідженнями, виконаними на дослідному зразку розробленого пристрою. На рис. 4, як приклад, наведено графіки залежності струму від часу за параметрів кола:  $U_C=500$  В,  $C=5140$  мкФ,  $L_d=9$  мкГн. Сумарний активний опір кола  $R$  складається з опору провідників  $R_d=15$  мОм та опору котушки  $R_k=5,46$  мОм.

На рис. 5 наведено графік залежності електродинамічної сили, що передається через контактну площадку на дослідний зразок. Як видно з наведених графіків, експериментальні й розрахункові результати з визначення величини струму в перехідному процесі розрядного кола добре узгоджуються (середньоквадратична похибка становить  $<3\%$ ), а сила електродинамічного притискання при досягненні максимального значення в 22 кН у момент, що збігається з максимумом величини струму, спадає майже до нульового значення.

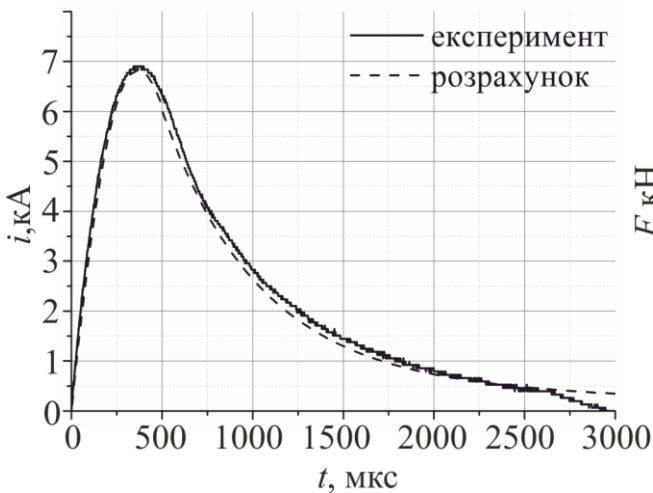


Рис. 4. Результати розрахунку та експериментального визначення сили струму в розрядному колі

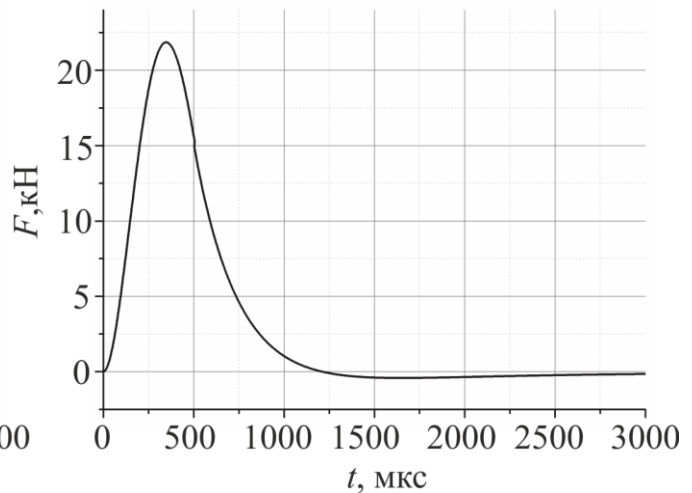


Рис. 5. Результати розрахунку електромагнітної сили взаємодії струму в обмотці котушки з вихровими струмами у масивному диску

*Розрахунок параметрів контуру для забезпечення необхідної густини струму в зоні контакту електрода зі зварним з'єднанням (друга підзадача). Система інтегро-диференціальних рівнянь (1) – (3) після інтегрування за азимутальним кутом у циліндричній системі координат набуває вигляду:*

$$\frac{\delta_r(Q,t)}{\gamma(Q)\lambda_L} + \frac{\partial}{\partial t_s} \int \delta_r(M,t) \sqrt{\frac{r_M}{r_Q}} f(k) dS_M - \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0 L} \int \sigma(M,t) \xi_r(Q,M) dL_M = 0,$$

$$Q \in S, S = S_1 \cup S_2 \cup S_3, \quad (23)$$

$$\frac{\delta_z(Q,t)}{\gamma(Q)\lambda_L} + \frac{\partial}{\partial t_s} \int \delta_z(M,t) \sqrt{\frac{r_M}{r_Q}} K(k) k dS_M - \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0 L} \int \sigma(M,t) \xi_z(Q,M) dL_M = 0,$$

$$Q \in S, S = S_1 \cup S_2 \cup S_3, \quad (24)$$

$$\frac{\chi(Q)\mu_0\varepsilon_0}{\pi} \frac{\partial}{\partial t_s} \int (\vec{\delta}(M,t) \cdot \vec{n}_Q) \sqrt{\frac{r_M}{r_Q}} K(k) dS_M + \sigma(Q,t) + \frac{\chi(Q)}{\pi L} \int \sigma(M,t) (\vec{\xi}(Q,M) \cdot \vec{n}_Q) dL_M =$$

$$= -\frac{\chi(Q)\mu_0\varepsilon_0}{\pi} \frac{\partial}{\partial t_{S_w}} \int (\vec{\delta}_w(M,t) \cdot \vec{n}_Q) \sqrt{\frac{r_M}{r_Q}} K(k) dS_M - F(Q,t), Q \in L \cup L_{10}^+ \cup L_{30}^-, \quad (25)$$

$$\vec{\delta}_w(M,t) = \vec{\delta}_w^{(0)}(M), \vec{\delta}(M,t) = \vec{\delta}^{(0)}(M), \sigma(M,t) = \sigma^{(0)}(M), \quad (26)$$

$$\delta_{n_Q}^+(t) = \frac{j_w(t)}{S_{10}^+}, \delta_{n_Q}^-(t) = \frac{j_w(t)}{S_{30}^-}. \quad (27)$$

Розв'язавши систему рівнянь (23) – (27) сумісно із системою рівнянь (17), (18) та (5) – (8), яка дає змогу визначити струм в електричному колі  $j_w(t)$  та тим самим визначити граничні умови (27), знаходимо розподіл густини вихрових струмів у масивних провідниках, у тому числі в зоні контакту електрода  $D_2$  з дослідним зразком  $D_3$ .

Таким чином, розроблено інтегро-диференціальну математичну модель взаємопов'язаних електрофізичних процесів – розряду ємності на розгалужене електричне коло з напівпровідниковими елементами та створення необхідних із технологічних міркувань електродинамічних зусиль і густини струму розтікання в зоні контакту електрода та оброблюваного зразка. Модель побудована на основі декомпозиції тривимірного електромагнітного поля на схрещені електромагнітні поля з осьовою симетрією, що дало змогу враховувати геометричні особливості системи, суттєво зменшити області пошуку розв'язку невідомих, і як наслідок, зумовило раціональне використання ресурсів обчислювальної техніки.

Четвертий розділ «Обґрунтування параметрів електротехнічної системи для електродинамічної обробки зварних з'єднань» присвячено дослідженню взаємозв'язку конструктивних, електричних і режимних характеристик лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії з ефективністю електродинамічної дії на зварні з'єднання.

Величина розрядного струму та його тривалість визначаються електричними параметрами розрядного кола: активним опором, індуктивністю, ємністю та напругою на ній. Електродинамічна сила притискання електрода до поверхні металу визначається величиною розрядного струму, на значення якого впливають співвідношення конструктивних розмірів елементів розрядного кола – котушки індуктивності й масивного диска.

До геометричних параметрів котушки індуктивності належать: внутрішній діаметр, зовнішній діаметр, висота, кількість витків, коефіцієнт заповнення обмотки. До геометричних параметрів диска належать: внутрішній діаметр, зовнішній діаметр, товщина. Залежно від даних параметрів, змінюється характер перехідного процесу в електричному колі, що, у свою чергу, впливає на характер електродинамічної сили притискання електрода до пластини та на розподіл струмів розтікання. Обмеження на розміри котушки та диска визначаються габаритними розмірами пристрою.

Завданням подальших досліджень було: а) визначення геометричних параметрів диска, відстані між котушкою та диском, які забезпечують означену вище силу взаємодії струму в котушці та викликаних ним вихрових струмів у масивному диску; б) визначення оптимальної площі контакту електрода зі зварним швом за умови забезпечення максимального об'єму в зварному з'єднанні, у якому створюються струми розтікання з густиною більшою за  $10^9 \text{ A/m}^2$ , та відбуваються процеси зниження залишкових напружень.

На рис. 6. наведено сімейство кривих рівних значень амплітуди електродинамічної сили (в кН), з якою масивний електропровідний диск відштовхується від котушки зі струмом залежно від товщини диска та його діаметра. Розрахунок виконано за таких незмінних параметрів електротехнічної системи для електродинамічної обробки, що наведені в табл. 1.

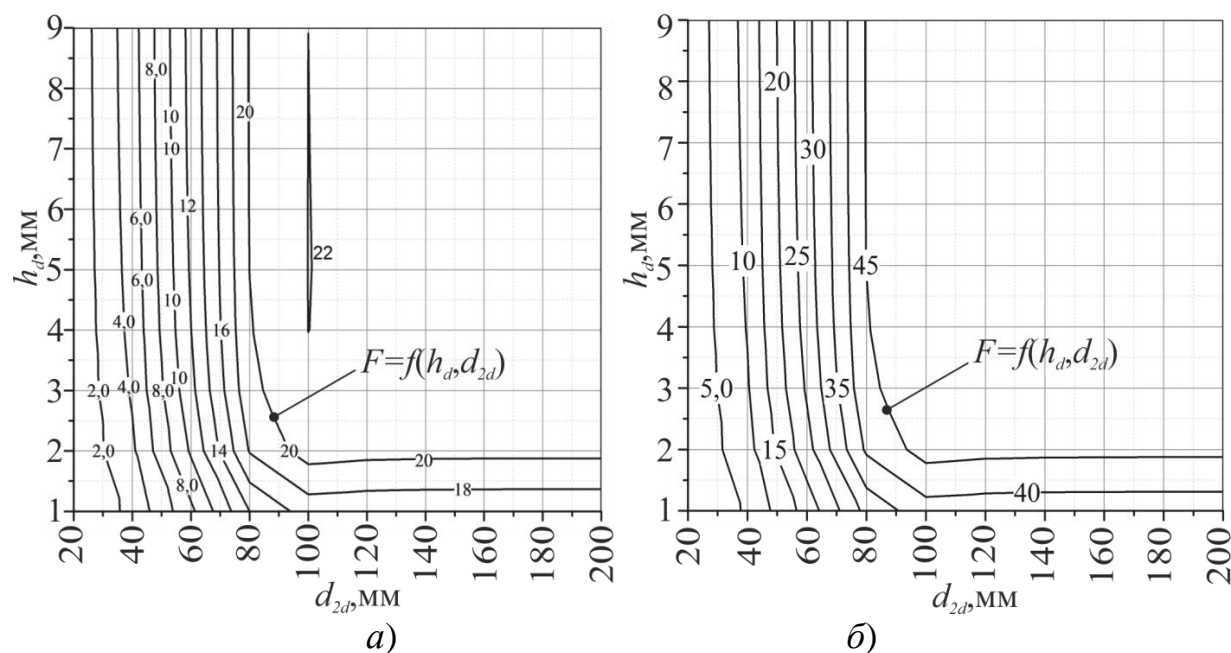


Рис. 6. Сімейство залежностей амплітудного значення електромагнітної сили (кН), що діє на масивний ферромагнітний диск, від його товщини та діаметра:  $h_d$  – товщина масивного диска;  $d_{2d}$  – його зовнішній діаметр (а – за напруги на ємності 500 В; б – за напруги на ємності 750 В).

Аналіз залежностей, які наведено на рис. 6, свідчить, що величина електродинамічної сили залишається незмінною після досягнення товщини диска більше, ніж 4 мм. Недоцільним також є збільшення діаметра диска більше, ніж до 100 мм, тобто, можна стверджувати, що вибір діаметра диска,

більшого за розміри котушки, не призводить до зростання електродинамічної сили. Необхідно також відзначити, що зростання величини амплітуди електродинамічної сили від величини напруги на ємності відбувається швидше за квадратичний закон.

Амплітуда електродинамічної сили значною мірою залежить від величини проміжку, що розділяє електропровідний диск і котушку. На рис. 7 наведено графіки залежності амплітуди  $z$ -компоненти електромагнітної сили, що діє на масивний диск, залежно від відстані між котушкою та диском для двох, як і вище, значень напруги на ємності – 500 В (рис. 7, а) та 700 В (рис. 7, б). У будь-якому випадку, спостерігається зменшення амплітуди електродинамічної сили за одночасного зменшення амплітуди імпульсного струму в розрядному колі, що зумовлюється зростанням індуктивності котушки.

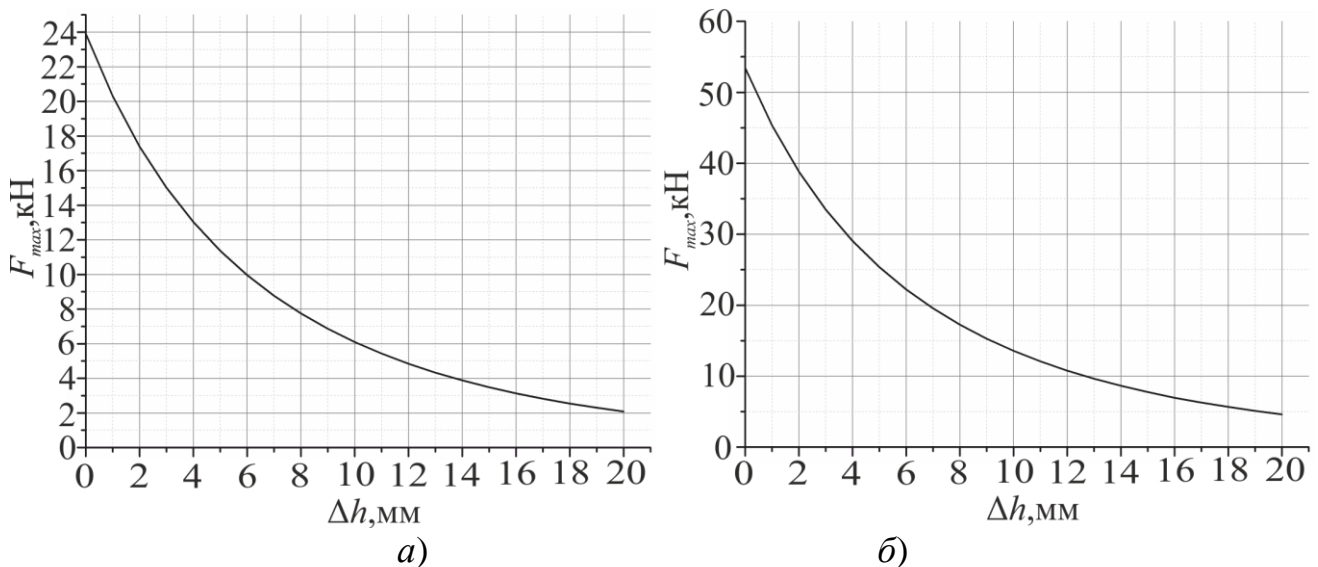


Рис. 7. Графік залежності амплітудного значення  $z$ -компоненти електромагнітної сили, що діє на ферромагнітний масивний диск, від зазору між диском та котушкою, за напруги на ємності а) 500 В; б) 750 В

*Залежність густини струму розтікання від площі контакту електрода зі зварним з'єднанням.* Однією з найважливіших конструктивних характеристик електромеханічного перетворювача індукційного типу є геометричні та електрофізичні параметри електрода.

Враховуючи те, що ефективність електродинамічної обробки визначається, у першу чергу, не самою величиною розрядного струму, а його густиною в зоні контакту електрода з основним матеріалом, постає необхідність у дослідженні цих процесів.

На рис. 8, як приклад, у вигляді кривих рівної величини ( $\times 10^9 \text{ А/м}^2$ ) наведено розподіл густини модуля струму в дослідному зразку в зоні контакту для моменту часу, що відповідає максимальному значенню струму в розрядному колі за наведених вище параметрів для низки значень площі контактної площадки. Криві 8, а – г відповідають контакту у вигляді кола, діаметрами послідовно 0,5 мм, 1, 2, та 3 мм. Наведені залежності дають змогу

визначити об'єм областей з густиною струму, що перевищує значення  $10^9$  А/м<sup>2</sup>, за якого відбувається зниження залишкових напружень у зварному шві.

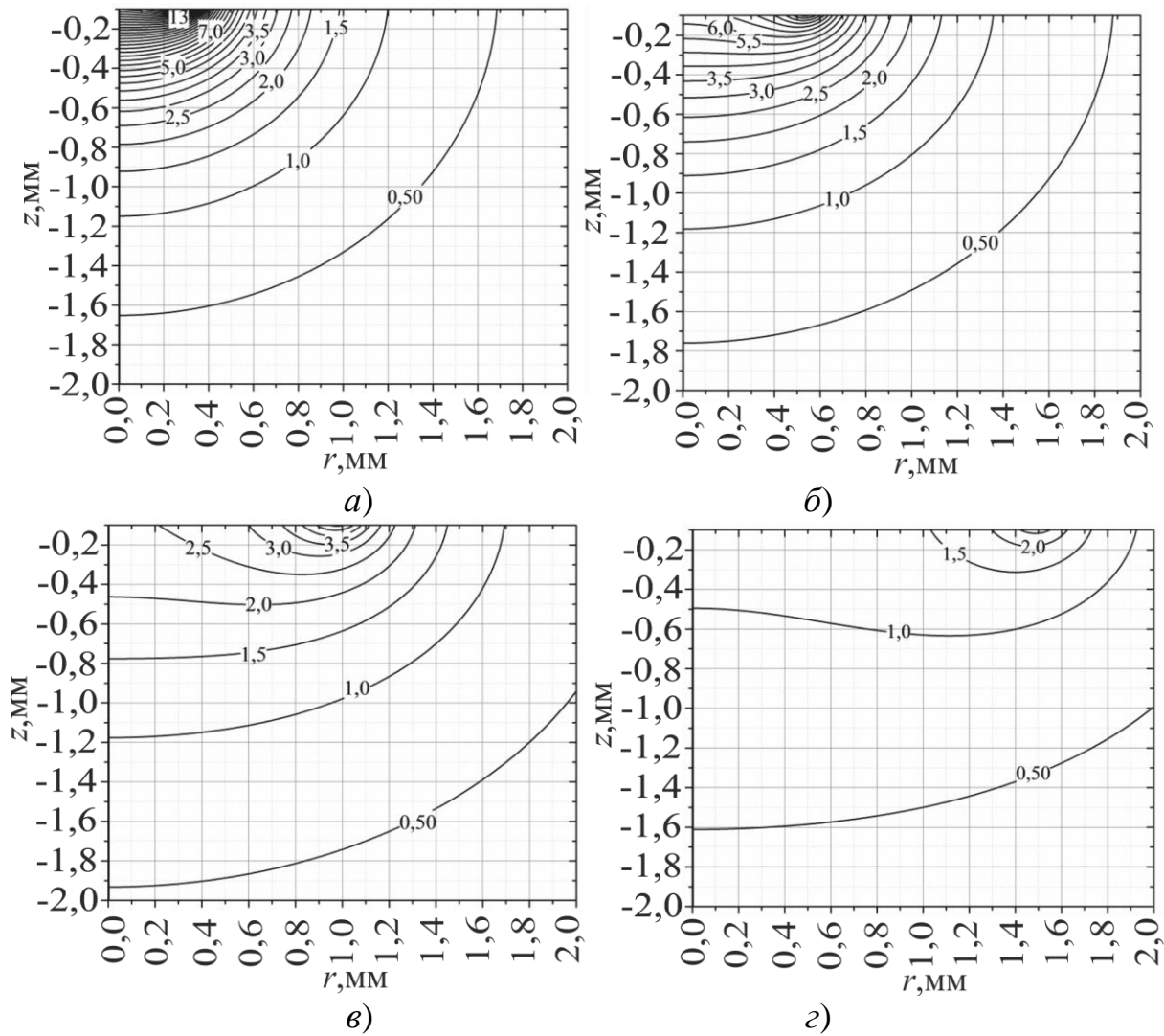


Рис. 8. Криві рівня густини струму  $i=f(z,r)$  ( $\times 10^9$  А/м<sup>2</sup>) у перерізі зварного шва за діаметра площі контакту: а) 0,5 мм; б) 1 мм; в) 2 мм; з) 3 мм.

На рис. 9 наведено графіки залежності об'єму області основного матеріалу, де густина модуля струму перевищує значення  $10^9$  А/м<sup>2</sup>, від діаметра площі контакту електрода зі зварним швом за різних значень початкової напруги на ємності (250 В, 500, 750 В). Виявляється, що за діаметра контакту  $d_k=2,25$  мм, об'єм області, в якій створюються умови для перетворення механічного стану конструкційних матеріалів, має максимальне значення. Слід також відзначити, що за діаметра площі контакту більш, ніж  $4 \div 4,5$  мм, об'єм області, в якій модуль густини струму перевищує значення  $10^9$  А/м<sup>2</sup>, наближається до нуля. На основі математичного моделювання електрофізичних процесів в електромеханічному перетворювачі індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань обґрунтовано геометричні параметри масивного диска та площі контакту, за яких створюються необхідні умови для зниження залишкових напружень у зварному шві.

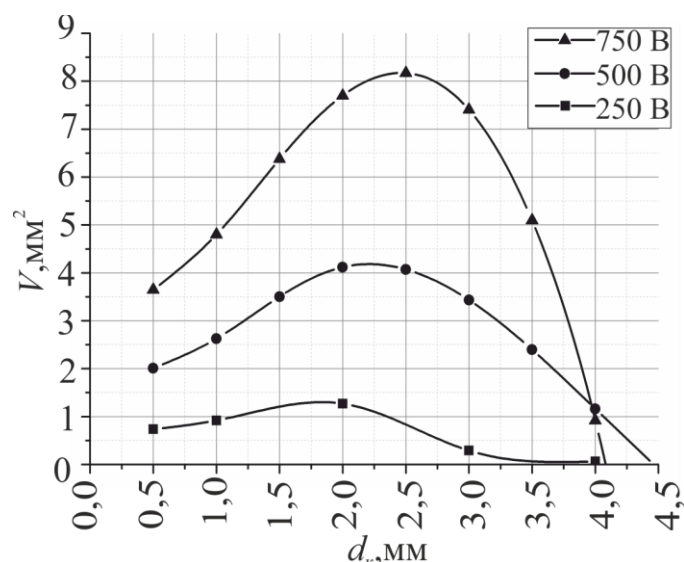


Рис. 9. Графіки залежності об'єму  $V$  області зварного шва, де густина модуля струму перевищує значення  $10^9 \text{ А/м}^2$ , від діаметра  $d_k$  площі контакту електрода зі зварним швом

Зовнішній вигляд електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії зображено на рис. 10.

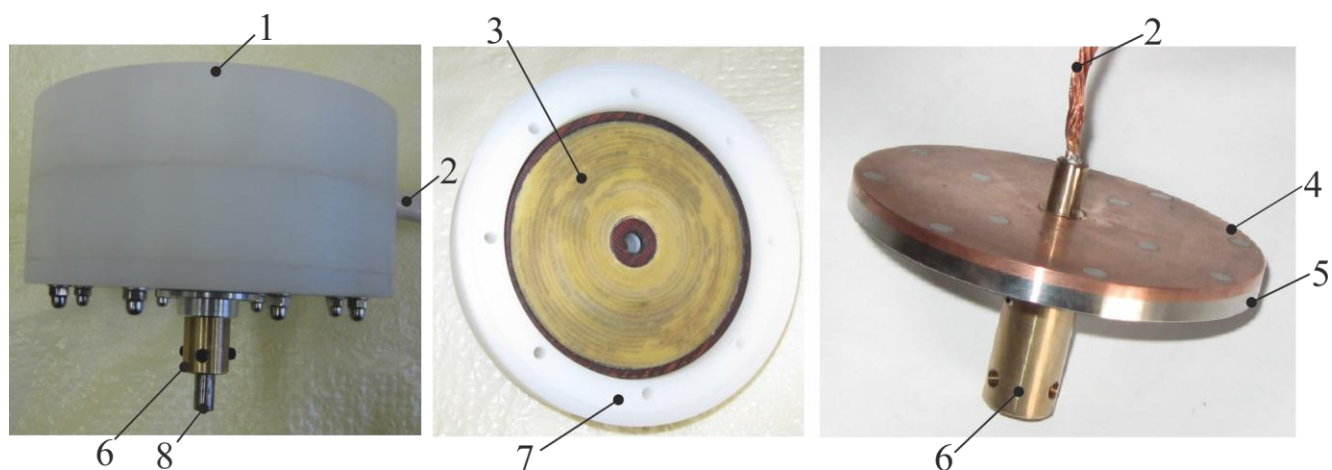


Рис. 10. Зовнішній вигляд електромеханічного перетворювача індукційного типу: 1 – корпус з ізоляційного матеріалу; 2 – виводи котушки і електрода; 3 – котушка; 4 – мідний шар диска; 5 – диск з нержавіючої сталі; 6 – мідний стержень; 7 – нижня кришка; 8 – вольфрамовий електрод.

У *додатку* наведено акти впровадження результатів наукових досліджень.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання розробки методів розрахунку взаємопов'язаних електрофізичних процесів у системах електродинамічної обробки зварних з'єднань металевих неферромагнітних конструкцій та забезпечення необхідних з технологічних міркувань параметрів – зусиль та густини струму, що має суттєве значення для

розвитку теорії і практики імпульсних електромагнітних систем у складі джерел живлення та електромеханічних перетворювачів. Основні результати, отримані в роботі, полягають у наступному.

1. Аналіз літературних джерел свідчить, що існуючі способи зниження залишкових напружень у зварних металевих з'єднаннях (прокатка, проковка, термічна обробка, вібраційна обробка, ультразвукова обробка, ударне і вибухове навантаження та інші) мають суттєві недоліки: необхідність створення енерго- та металомісткого технологічного обладнання; обмеження під час обробки великогабаритних конструкцій та значні витрати енергії. Перспективним шляхом підвищення ресурсу зварних з'єднань є метод електродинамічної обробки на основі застосування ефекту електропластичної деформації, для якого характерна простота реалізації, скорочення часу технологічного процесу в декілька разів, можливість здійснення локальної дії, невеликі витрати енергії та призводить до зниження залишкових напружень на 50–65 %)

2. Розроблено електротехнічну систему, що складається з джерела імпульсів струмів та електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії. Джерело імпульсів струму побудовано на основі ємнісного накопичувача енергії, який складається з двох імпульсних конденсаторів ( $2 \times 2570$  мФ, 900 В), що заряджаються від регульованого джерела постійної напруги (200–900 В). Розряд ємнісного накопичувача енергії здійснюється на розрядне коло, яке складається зі стаціонарної індуктивності 11 мкГн, розміщеної в корпусі джерела імпульсів струму та індуктивності, що встановлена в електродній системі над диском діаметром 97 мм який складається з мідного шару в 3 мм, який закріплений на диску з нержавіючої сталі завтовшки 5 мм. У розрядне коло входять опори провідників та контактний опір між електродом і металевою конструкцією, що обробляється. Діаметр площі контакту приймається рівним 2 мм, а електричний опір кола, в який входить електричний опір відкритого тиристора, становить 20,46 мОм. Комутація здійснюється тиристором відповідного класу напруги і струму. Тиристор шунтовано зворотнім діодом, який, з одного боку, виконує функцію запобігання перезаряду ємнісного накопичувача енергії напругою зворотного знака, а з іншого – перетворення форми розрядного струму, що характерна для аперіодичного розряду конденсатора.

3. Розроблено інтегро-диференціальну коло-польову математичну модель взаємопов'язаних нестационарних електрофізичних процесів, яка складається з трьох взаємопов'язаних блоків: а) розрахунку перехідного процесу в електричному колі, що включає до свого складу індуктивність, яка динамічно змінюється; б) розрахунку складових електричного кола системи «котушка-диск»; в) розрахунку густини струмів розтікання в точці дотику електрода до зварного з'єднання. Перший блок розрахунку складається з двох частин, перша з яких описується неоднорідними диференціальними рівняннями з нульовими початковими умовами, а друга – однорідними диференціальними рівняннями з початковими умовами, що відповідають стану, за якого напруга на ємнісному накопичувачі енергії досягає нуля. Математична модель дає змогу розрахувати

величину потокозчеплення струмів котушки, індуктивність якої динамічно змінюється, з урахуванням струмів розрядного кола і вихрових струмів, що індукуються в електропровідному диску. Особливістю другого блоку є припущення про існування лише азимутальних складових струму, що змінюються за радіусом і висотою. А третього блоку – що струми розтікання мають тільки  $r$  і  $z$ -компоненту струмів. Таке представлення дозволило редукувати задачу з тривимірної до двох двовимірних, що дало змогу враховувати геометричні особливості системи, суттєво зменшити області пошуку невідомих, і, як наслідок, зумовило раціональне використання ресурсів обчислювальної техніки.

4. На основі математичного моделювання електрофізичних процесів в електротехнічній системі, для електродинамічної обробки зварних з'єднань визначено силу струму (амплітудою до 7 кА) у перехідному процесі розряду ємнісного накопичувача, шунтованого зворотнім діодом, електродинамічну силу тиску (амплітудою більше, ніж 22 кН) електрода на зварне з'єднання, та розподіл густини струму в перерізі зварного шва. Визначено границі області (зона, наближена до половини еліпсоїда обертання з великою віссю 3, 4 мм та малою напіввіссю 1, 2 мм) у зварному з'єднанні, що відповідають умовам виникнення електропластичного ефекту. Це дало змогу обґрунтувати геометричні параметри електромеханічного перетворювача індукційного типу, за яких створюються необхідні умови для зниження залишкових напружень у зварних швах.

5. Достовірність і обґрунтованість наукових результатів забезпечена коректним і послідовним використанням методу інтегро-диференціальних рівнянь для аналізу нестационарних електромагнітних процесів у складних електротехнічних системах, збігом отриманих результатів у граничних випадках з відомими результатами, узгодженням математичного моделювання з експериментальними даними (середньоквадратична похибка становить <3 %).

6. Результати роботи знайшли практичне використання в розробці електротехнічного обладнання для електродинамічної обробки зварних з'єднань із регульованими параметрами розрядного кола, яке є передумовою створення системи автоматичного зварювання в Інституті електродинаміки НАН України. Результати дисертаційної роботи як відповідна методика розрахунку параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу, використовуються в лекційних курсах «Сучасна теорія електромеханічного перетворення енергії», «Математичне моделювання електромагнітних пристроїв і електромеханічних перетворювачів енергії» для студентів Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Кондратенко І. П., Жильцов А. В., Васюк В. В. Тривимірний математичний модель процесу розрядження ємності на електромагнітну систему з послідовно з'єднаних котушки індуктивності, електрода і неферромагнітної

пластини // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2013. Вип. 184. Ч. 1. С. 94–104. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

2. Кондратенко І. П., Божко І. В., Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Методи визначення залишкових напружень // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. 2013. Вип. 13. Т. 2. С. 127–135. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

**Статті у наукових фахових виданнях України,  
включених до міжнародних наукометричних баз даних:**

3. Кондратенко І. П., Божко І. В., Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Математичне моделювання електрофізичних процесів в системах оперативного неруйнівного визначення залишкових напружень // Технічна електродинаміка. 2012. № 3. С. 1–22. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

4. Жильцов А. В., Кондратенко І. П., **Васюк В. В.** Розрахунок параметрів контура для створення притискаючого зусилля в електротехнічному комплексі для зниження залишкових напружень // Енергетика і автоматика. 2014. № 4. С. 53–64. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/eia\\_2014\\_4\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/eia_2014_4_8). *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

5. Kondratenko I. P., **Vasyuk V. V.**, Zhiltsov A. V. Modeling of electromagnetic processes in electro-technical complexes for reducing residual stresses // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – № 3/2014 (27). С. 61–67. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

6. Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Способи зниження зварювальних залишкових напружень і деформацій // Енергетика і автоматика. 2016. № 4. С. 168–175. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/eia\\_2016\\_4\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/eia_2016_4_18). *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

**Стаття у науковому виданні України,  
включеному до міжнародних наукометричних баз даних**

7. Лобанов Л. М., Кондратенко І. П., Жильцов А. В., Карлов О. М., Пашин М. О., **Васюк В. В.**, Ящук В. Я. Нестационарні електрофізичні процеси в системах зниження залишкових напружень зварних з'єднань // Технічна електродинаміка. 2016. № 6. С. 10–19. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

**Стаття в іншому науковому виданні**

8. Кондратенко І. П., Божко І. В., Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Дослідження електрофізичних процесів у електродній системі неруйнівного визначення залишкових напружень // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин». Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр.

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2012. С. 420–425. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

#### **Тези наукових доповідей:**

9. Кондратенко І. П., Божко І. В., Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Електрофізичні процеси в системах оперативного неруйнівного визначення залишкових напружень // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика: XV Міжнародна науково-технічна конференція, м. Кременчук, 2014 року: тези доповіді. 2014. Вип. 1/2011 (1). С. 234–235. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

10. Кондратенко І. П., Божко І. В., Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Розробка пристрою для таврування і кернення виробів // Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електро-енергетичних системах: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Севастополь, 17–20 вересня 2012 року: тези доповіді. Севастополь, 2012. С. 131–133. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

11. Кондратенко І. П., Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Використання електропластичного ефекту для зниження залишкових напружень // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 14–26 жовтня 2013 року: тези доповіді. К., 2013 С. 60–62. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

12. Кондратенко І. П., Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Електропластичний ефект як метод зниження залишкових напружень // Відновлювальна енергетика, новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК: Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, м. Київ, 6–7 листопада 2013 року: тези доповіді. К., 2013 С. 30–31. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

13. Кондратенко І. П., Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Розрахунок параметрів контуру для створення притискаючого зусилля в електротехнічному комплексі для зниження залишкових напружень // Problems and prospects of power engineering, electrotechnology and automation in agriculture: II Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 15–16 жовтня 2014 року: тези доповіді. К., 2014 С. 65–66. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

14. Кондратенко І. П., Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Моделирование электрофизических процессов в электротехническом комплексе для снижения остаточных напряжений // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Международная научно-техническая конференция, г. Москва, Российская Федерация, 21–22 мая 2014 года: тезисы доклада. М., 2014. Ч. 3 «Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной

енергетике». С. 89–97. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

15. Kondratenko I. P., **Vasyuk V. V.**, Zhiltsov A. V. Modeling of electromagnetic processes in electro-technical complexes for reducing residual stresses // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика: XV Міжнародна науково-технічна конференція, м. Кременчук, 2014 року: тези доповіді. Кременчук, 2014. № 1/2014 (2). С. 136–138. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

16. Kondratenko I. P., Zhiltsov A. V., **Vasyuk V. V.** Simulation of discharge capacity axle symmetric systems «coil – non-ferromagnetic massive disk» by the method of integral equations // Обчислювальні проблеми електротехніки (СРЕЕ – 2015): 16 Міжнародна конференція, м. Львів, 2–5 вересня 2015 року: тези доповіді. 2015. С. 71–73. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

17. Жильцов А. В., **Васюк В. В.** Розрахунок параметрів контура для створення притискаючого зусилля в електротехнічному комплексі для зниження залишкових напружень // Актуальні проблеми наук про життя та природокористування: III Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 28–31 жовтня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 247–248. *(Здобувач брав участь у проведенні досліджень, аналізі їх результатів і написанні статті).*

## АНОТАЦІЯ

**Васюк В. В. Лінійний електромеханічний перетворювач в системах електродинамічної обробки зварних з'єднань.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено встановленню взаємозв'язків характеристик електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії з параметрами та якісними показниками електродинамічного впливу на зварні з'єднання.

Розроблено двовимірну коло-польову математичну модель перехідного процесу розрядження ємності на розгалужене електричне коло з котушкою, індуктивність якої динамічно змінюється, що дає змогу за рахунок регулювання параметрів електромеханічного перетворювача досягти необхідних за технологічними вимогами характеристик електродинамічної обробки. На основі математичного моделювання електрофізичних процесів в електромеханічному перетворювачі індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань, обґрунтовано геометричні параметри масивного диска та площі контакту, за яких створюються необхідні умови для зниження залишкових напружень у зварному шві.

Результати дисертаційної роботи загалом розв'язують актуальне наукове завдання розробки методів розрахунку взаємопов'язаних електрофізичних процесів в системах електродинамічної обробки зварних з'єднань металевих неферомагнітних конструкцій та забезпечення необхідних з технологічних міркувань параметрів – зусиль та густини струму.

**Ключові слова:** залишкові зварювальні напруження, електропластична деформація, електромеханічний перетворювач, метод інтегро-диференціальних рівнянь.

## АННОТАЦІЯ

**Васюк В. В. Линейный электромеханический преобразователь в системах электродинамической обработки сварных соединений.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы та системы». – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена установлению взаимосвязей характеристик электромеханического преобразователя индукционного типа ударного действия с параметрами и качественными показателями электродинамического воздействия на сварные соединения.

Разработана двумерная цепно-полевая математическая модель переходного процесса разрядки емкости на разветвленную электрическую цепь с катушкой, индуктивность которой динамично меняется, что позволяет за счет регулирования параметров электромеханического преобразователя достичь необходимых по технологическим требованиям характеристик электродинамической обработки. Обоснована целесообразность использования обратного диода параллельно емкости в генераторе импульсов тока, что позволяет уменьшить отрицательную электродинамическую силу прижима и, как следствие, уменьшить угрозу разрыва электрического контакта электрода со сварным соединением. На основе математического моделирования электрофизических процессов в электромеханическом преобразователе индукционного типа для электродинамической обработки сварных соединений обоснованы геометрические параметры массивного диска и площади контакта, при которых создаются необходимые условия для снижения остаточных напряжений в сварном шве. Результаты работы нашли практическое использование в разработке электротехнической системы для электродинамической обработки сварных соединений с регулируемыми параметрами разрядной цепи, что является предпосылкой к созданию системы автоматической сварки. Практическое значение для электротехнической отрасли имеет предложенный алгоритм расчета характеристик электромеханического преобразователя индукционного типа, на основе которого написана программа на языке *Fortran*, позволяющая за счет регулирования геометрических размеров электромеханической системы

достичь необходимых по технологическим требованиям характеристик электродинамического воздействия. Разработанные методики расчетов электрических параметров разрядной цепи позволят повысить показатели электромеханических преобразователей индукционного типа ударного действия и могут быть применены в ускорителях массивных исполнительных элементов и ударно-силовых устройствах.

Результаты диссертационной работы в совокупности решают актуальную научную задачу по разработке методов расчета взаимосвязанных электрофизических процессов в системах электродинамической обработки сварных соединений металлических неферромагнитных конструкций и обеспечения необходимых по технологическим соображениям параметров – усилий и плотности тока, что имеет существенное значение для развития теории и практики импульсных систем в составе источников питания и электромеханических преобразователей.

**Ключевые слова:** остаточные сварочные напряжения, электропластическая деформация, электромеханический преобразователь, метод интегро-дифференциальных уравнений.

## ANNOTATION

**Vasyuk V. V. Linear electromechanical transducer in the systems of welded joints of electrodynamic processing.** – The manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 «Electrotechnical Complexes and Systems». – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2017.

Research is dedicated to establishing characteristics relationships between the induction type impact electromechanical transducer and parameters and quality indicators of electrodynamic effects on the welded joints.

Developed two-dimensional circle-field mathematical model of transient discharge capacity at the branched electrical circuit with the coil inductance which changes dynamically, allowing by adjusting the parameters of the electromechanical transducer to achieve the necessary technological requirements for the characteristics of electrodynamic processing. Based on mathematical modeling of electrophysical processes in electromechanical transducers induction type for electrodynamic processing of welded joints, reasonably geometrical parameters massive disk and the contact area in which the necessary conditions are created to reduce residual stresses in the weld joints.

The results generally solve actual scientific task of developing methods of calculation interrelated electro electrodynamic processes in the systems of processing of welded joints nonferromagnetic metal structures and provide the necessary parameters of technological reasons – the efforts and current density.

**Key words:** welding residual stress, electroplastic deformation, electromechanical transducer, integro-differential equations method.