

СТАТОР

**РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ТАВРУВАННЯ І КЕРНЕННЯ
МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ**

Розробка пристрою для таврування і кернення металевих виробів

Представлене дослідження присвячено встановленню взаємозв'язків характеристик електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії з параметрами та якісними показниками механічного впливу на метал.

Розробка та впровадження методів розрахунку взаємопов'язаних електрофізичних процесів у системах механічного впливу на метал з метою забезпечення необхідної величини силового впливу – представляється актуальним науковим завданням, що має суттєве значення для подальшого розвитку теорії і практики імпульсних електромагнітних систем у складі джерел живлення та електромеханічних перетворювачів.

Метою дослідження представляється – встановлення взаємозв'язків конструктивних, електричних і режимних характеристик лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії з ефективністю механічного впливу на метал.

З огляду на вище названа для втілення поставленої мети розглядаються та вирішуються такі завдання:

- розробити систему механічного впливу на метал на основі застосування лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу;

- розробити на основі інтегро-диференційних рівнянь коло-польову математичну модель нестационарних електромагнітних процесів для систем механічного впливу на метал;

- застосувати розроблені математичні моделі для аналізу розподілу динамічних зусиль в електромагнітній системі «кернер-метал», та обґрунтувати конструктивні параметри системи.

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

Предмет дослідження – взаємозв'язок конструктивних, електричних і режимних характеристик лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії з ефективністю механічного впливу на метал.

Теоретичним фундаментом розробки інтегро-диференціальної математичної моделі взаємопов'язаних електрофізичних процесів – розряду ємності на розгалужене електричне коло з напівпровідниковими елементами та створення необхідного з технологічних міркувань механічного впливу, базується на основі теорії електромагнітного поля, векторного аналізу, концепції вторинних джерел, теорії інтегральних рівнянь, теорії та прикладних аспектах числового диференціювання та інтегрування, числового розв'язання інтегро-диференціальних рівнянь, числового розв'язання систем алгебраїчних рівнянь, з використанням комп'ютерних технологій.

Розроблено двовимірну коло-польову математичну модель перехідного процесу розрядження ємності на розгалужене електричне коло з котушкою, індуктивність якої варіюється, що дає змогу за рахунок регулювання параметрів електромеханічного перетворювача досягти необхідних за технологічними вимогами характеристик механічної обробки. На основі математичного моделювання електрофізичних процесів в електромеханічному перетворювачі індукційного типу, обґрунтовано геометричні параметри масивного диска.

Ключові слова: механічна обробка, електромеханічний перетворювач, метод інтегро-диференційних рівнянь.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОСНОВНІ ТИПИ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ УДАРНОЇ ДІЇ	7
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ	10
РОЗДІЛ 3 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА СИСТЕМА МЕХАНІЧНОГО ВПЛИВУ НА МЕТАЛ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІНДУКЦІЙНОГО ТИПУ	16
РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІНДУКЦІЙНОГО ТИПУ	26
ВИСНОВКИ.....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	31

ВСТУП

Ударні пристрої виконують вагому частину технологічних операцій в різних галузях металообробної промисловості, зокрема, в ремонтних цехах та дільницях для виконання таврування, кернення та механічної обробки металів. Вимоги до якості та ефективності таких пристроїв, а також рівень їх автоматизації диктують необхідність вирішення проблеми підвищення їх техніко-економічного рівня. Відповідно, розробка нових автоматизованих пристроїв для механічної обробки металів є актуальним і практично важливим завданням.

Особливої гостроти це завдання набуває в умовах необхідності переведення виробничих процесів на цехах та дільницях на базу автоматизованих інтенсивних технологій з огляду на те що подібні технологічні операції зазвичай виконуються в ручну.

Зазначений механічний вплив може здійснюватися за допомогою гідравлічних та пневматичних пристроїв та систем. Переліченим системам обробки металу притаманні певні недоліки, до яких можна віднести необхідність створення енерго- та металомісткого технологічного обладнання, обмеження під час обробки великогабаритних конструкцій та значні витрати енергії, низькі динамічні показники та ККД тощо. Перспективним шляхом здійснення механічного впливу на метал, є застосування лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії, який позбавлений зазначених недоліків.

Розробка вище зазначених систем включає в себе розробку їх конструкції та визначення енергетичних характеристик. Відповідно розробка методів розрахунку взаємопов'язаних електрофізичних процесів у системах механічного впливу на метал з метою забезпечення необхідної величини силового впливу – актуальне наукове завдання, яке має суттєве значення для розвитку теорії і практики імпульсних електромагнітних систем у складі джерел живлення та електромеханічних перетворювачів.

Мета дослідження – встановлення взаємозв'язків конструктивних, електричних і режимних характеристик лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу ударної дії з ефективністю механічного впливу на метал.

Для досягнення поставленої мети розв'язано такі завдання:

– розробити систему механічного впливу на метал на основі застосування лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу;

– розробити на основі інтегро-диференціальних рівнянь коло-польову математичну модель нестационарних електромагнітних процесів для систем механічного впливу на метал;

– застосувати розроблені математичні моделі для аналізу розподілу динамічних зусиль в електромагнітній системі «кернер-метал», та обґрунтувати конструктивні параметри системи.

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 механічного впливу на метал.

Результати роботи можуть знайти практичне використання в розробці електротехнічної системи для механічної обробки металу із регульованими параметрами.

Результати 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 механічного 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.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОСНОВНІ ТИПИ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ УДАРНОЇ ДІЇ

Лінійні електромеханічні перетворювачі ударної дії – це клас пристроїв, призначених для безпосереднього перетворення електричної енергії джерела в механічну енергію лінійного переміщення рухомих елементів. Джерелом енергії в даних пристроях є імпульсні ємнісні накопичувачі енергії з електронною системою управління.

За принципом дії можна виокремити лінійні електромеханічні перетворювачі ударної дії магнітоелектричного, електромагнітного, електродинамічного, рельсотронного та індукційного типів [1–8]. Високі якісні показники електромеханічних перетворювачів зумовили їх широке застосування в промисловості та сільському господарстві.

Принцип дії *лінійного електромеханічного перетворювача магнітоелектричного типу* полягає у взаємодії постійного магніту з магнітним полем обмотки індуктора. Постійні магніти можуть встановлюватися як на статорі, так і на рухомому роторі, як одна або кілька секцій. Суттєвим недоліком даних перетворювачів є використання постійних магнітів, які не дають змоги імпульсно підвищувати струм в обмотці індуктора вище за певний рівень, що призводить до деякого обмеження показників даних перетворювачів [9].

Лінійний електромеханічний перетворювач електромагнітного типу побудований на основі взаємодії магнітного поля, що імпульсно створюється обмоткою індуктора від джерела енергії з рухомим феромагнітним якорем. Обмотка індуктора виготовлюється як декілька послідовно встановлених секцій, що послідовно збуджуються і в які якір втягується, чим і забезпечується його рух. Недоліками перетворювачів даного типу є необхідність використання електронної системи, яка здійснюватиме комутацію секцій обмоток індуктора та низький ККД [5].

Лінійний електромеханічний перетворювач рельсотронного типу

представляє собою електропровідний якір, розміщений між двома нерухомими електродами. Імпульсний струм, що збуджується джерелом енергії, протікає як по електродах, так і по якорю, що й призводить до його руху. Однак, при цьому виникає великий струм, який призводить до виникнення термічних процесів на контактних ділянках, що і обмежує сфери його застосування [10–12].

Принцип дії *лінійного електромеханічного перетворювача електродинамічного типу* полягає у взаємодії магнітних полів, створених рухомою обмоткою якоря і нерухомою обмоткою індуктора при живленні їх від одного джерела енергії. У процесі руху між обмотками змінюється взаємна індуктивність, що впливає на величину електродинамічних зусиль і, як наслідок, призводить до зміни ефективності лінійного перетворювача залежно від взаємного розташування обмоток. Однак, комутація між обмотками великого імпульсного струму при переміщенні обмотки якоря є проблемою перетворювачів такого типу [13–15].

Лінійний електромеханічний перетворювач індукційного типу

побудований на взаємодії магнітного поля, яке збуджується змінним струмом обмотки індуктора, з індукованим струмом в електропровідному якорі. Електромеханічний перетворювач даного типу може бути коаксіального, бокового дискового виконання або як кільцевий прискорювач. Зазвичай електромеханічний перетворювач даного типу виконується без магнітопроводу та має нерухому обмотку індуктора і рухомий електропровідний якір, що являє собою короткозамкнену багатовиткову обмотку або масивний електропровідний елемент у вигляді диска [16–18].

Коаксіально установлений з обмоткою індуктора якір при електродинамічній взаємодії з обмоткою індуктора переміщується в аксіальному напрямку. Виконання електропровідного якоря як масивного елемента у вигляді диска легше, оскільки він має більшу механічну жорсткість і максимальний коефіцієнт заповнення. Однак нерівномірний розподіл індукованого струму призводить до нерівномірного використання його об'єму.

Принцип дії лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу полягає в наступному. При збудженні обмотки індуктора від ємнісного накопичувача енергії в якорі виникає струм, який призводить до виникнення електродинамічних зусиль вздовж осі преміщення якоря.

Можливо виокремити такі переваги лінійного електромеханічного перетворювача індукційного типу: не примхливий до параметрів імпульсного джерела енергії; можливість виконання струмопроводів обмотки індуктора на відносно низькі струми; можливість безконтактного переміщення якоря по відношенню до обмотки індуктора; прискорення якоря будь-яких розмірів і форм із забезпеченням високих стартових прискорень; можливість розподілу електродинамічних зусиль по всій довжині уздовж якоря; можливість проходження струму через якір як від стороннього джерела, так і від одного джерела з обмоткою збудження.

Враховуючи вищезазначені переваги лінійних електромеханічних перетворювачів індукційного типу, можна стверджувати, що застосування перетворювачів даного типу є найбільш доцільним. Нині роботи в області розробки лінійних електромеханічних перетворювачів індуктивного типу виконуються переважно в напрямі розробки різноманітних конструктивних схем, метою яких було підвищення їх динамічних характеристик та КПД.

Найбільш загальний підхід до вирішення завдань в електротехнічній системі, яка включає електромеханічний перетворювач, полягає у визначенні взаємодії тіл, які несуть струм або заряд, в електромагнітному полі. Цей підхід спирається на розв'язок рівнянь електродинаміки – рівнянь Максвелла.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

Моделювання електромагнітних процесів, що відбуваються в даній електромеханічній системі, зводиться до розв'язку тривимірних крайових задач для системи рівнянь Максвелла в необмеженій області й доповнене граничними і початковими умовами, формулює початково-крайову задачу, вирішення якої зводиться до моделювання електромагнітних процесів в електротехнічних пристроях з масивними провідниками. У ряді випадків вирішення такого завдання припустимо в плоскопаралельному або вісесиметричному наближенні.

При фізичному моделюванні відповідні величини оригіналу і моделі мають однакову фізичну природу. Аналогові методи базуються на аналогії рівнянь, що описують процеси в оригіналі й моделі. При цьому відповідні величини, що характеризують оригінал і модель, мають різну фізичну природу. У багатьох випадках аналогові методи мають переваги: велика універсальність порівняно з аналітичними методами, наочність отриманих результатів, можливість моделювати процеси в реальному масштабі часу. До недоліків аналогових методів належать: трудомісткість розробки аналогових моделей; для забезпечення умов подібності необхідні попередні розрахунки, які складно піддаються автоматизації та потребують підвищеної уваги.

Аналітичні методи дають змогу знайти розв'язок невеликої кількості типів рівнянь, що й обмежує їх область застосування. Шукану функцію представляють як явну залежність від вихідних даних. Даним методам характерна простота вихідного виразу та можливість отримання точного значення результату в будь-якій точці розрахункової області. До недоліків належать: громіздкість аналітичних перетворень і вузька область застосування.

З розвитком цифрової обчислювальної техніки дедалі більшого поширення набули числові методи моделювання електромагнітних полів, засновані на просторовій і просторово-часовій дискретизації. Переваги числових методів полягають у тому, що вони дають змогу отримати шуканий

результат з урахуванням реальних властивостей матеріалів і геометрії всіх вхідних у розрахункову область елементів. Але ці методи, як правило, потребують значного часу рахунку і на виході мають дискретний спектр значень.

Для моделювання електромагнітних процесів може бути використаний один із обчислювальних методів: метод інтегральних рівнянь, метод кінцевих різниць, метод кінцевих елементів, комбіновані методи та ін.

Широке використання й розвиток обчислювальних методів почалися з методів кінцевих різниць (МКР) (або метод сіток). Метод засновано на заміні диференціальних операторів у рівняннях математичної фізики звичайно-різницевиими операторами відповідно до побудованої сітки (просторова дискретизація області та її границь полягає в побудові сітки, що складається з вузлів і ребер). Шляхом такої заміни диференціальні рівняння в похідних перетворюються на систему алгебраїчних рівнянь щодо вузлових величин. Особливості побудови і властивості систем кінцево-різницевиких рівнянь розглянуті в [19]. У разі однорідного середовища, перехід до різницевиких рівнянь здійснюється шляхом простого застосування кінцево-різницевиких операторів. Для уточнення апроксимації часткових похідних до складу цих операторів можуть включатися кінцеві різниці вищих порядків.

У разі кусково-неоднорідного середовища, до вузлів, що належать поверхням розділу середовищ, замість звичайних різницевиких операторів застосовуються умови сполучення, що відображують стрибкоподібні зміни часткових похідних. Апроксимація часткових похідних по обидві сторони від границі розділу середовищ виражається також через кінцеві різниці. Граничні умови Дирихле враховуються простим завданням шуканих величин у граничних вузлах. Граничні умови Неймана або Коші апроксимуються за допомогою кінцево-різницевиких операторів. Головним недоліком МКР є складність в аналізі непрямолінійних границь (які мають місце в пакетах програм спеціалізованого застосування) [20].

Основною властивістю отриманих систем кінцево-різницевих рівнянь є стрічкова або профільна структура матриці коефіцієнтів. Ширина стрічки або профілю визначається нумерацією вузлів, регулярністю сітки, максимальним порядком кінцевих різниць, використовуваних для апроксимації часткових похідних. Як правило, матриця коефіцієнтів характеризується слабкою заповненістю всередині стрічки або профілю навіть за оптимальної нумерації вузлів, тому для її зберігання в пам'яті ЕОМ часто застосовується технологія розріджених матриць.

Методи розв'язання систем сіткових рівнянь визначаються їх властивостями. Методи матричної прогонки засновані на Гаусовому виключенні або факторизації стосовно до стрічкових матриць. Інші прямі методи засновані на різних видах розкладання на множники стосовно до розріджених матриць. Переваги методу сіток особливо яскраво виявляються при розрахунку поля в анізотропних і неоднорідних середовищах, а також у середовищах, яким притаманна шарувата структура. Сталість рішення задачі методом кінцевих різниць залежить від побудови стійких швидкодіючих ітераційних схем розв'язання систем алгебраїчних рівнянь. Основним недоліком прямих методів є погана пристосованість їх до компактних схем зберігання розріджених матриць (при факторизації відбувається їх заповнення). Тому доводиться використовувати ітераційні методи, що призводить до збільшення кількості розрахунків.

Крім кінцево-різницевих методів розв'язання задач математичної фізики існують методи, що мають властивості як числових, так і аналітичних: методи інтегральних рівнянь, варіаційні та проєкційні методи (методи зважених нев'язок та пов'язані з ними методи кінцевих елементів (МКЕ) і граничних елементів).

Метод кінцевих елементів заснований на інтегральному формулюванні граничної задачі. Замість диференціальних рівнянь із частковими похідними встановлюються відповідні функціонали. Область дослідження, залежно від розмірності задачі, ділиться на плоскі або об'ємні елементи, в яких невідомий

розподіл поля апроксимується поліномами. Використання методу Релея-Рітца дає змогу отримати систему лінійних алгебраїчних рівнянь. Оскільки деякі з виділених елементів включають границі досліджуваної області, отримана система рівнянь може бути вирішена для внутрішніх точок. Метод кінцевих елементів має деяку перевагу перед методом кінцевих різниць у гнучкості, оскільки за його допомогою легко враховуються складні границі. Порядок апроксимуючих поліномів дає додаткову свободу при числовому розрахунку. Недоліком методу є велика необхідна пам'ять ЕОМ.

Метод кінцевих елементів складніший за метод кінцевих різниць у реалізації. Однак даному методу властиві суттєві переваги: довільна форма оброблюваної області, сітку можна зробити більш рідкою в тих місцях, де особлива точність не потрібна. Слід додати, що впродовж тривалого часу широкому поширенню МКЕ заважала відсутність алгоритмів автоматичного розбиття області на «майже рівносторонні» трикутники (похибка, залежно від варіації методу, обернено пропорційна синусу або найгострішого або найбільш тупого кута в розбитті). Та це завдання вдалося успішно вирішити (алгоритми засновані на триангуляції Делоне), що уможливило створення повністю автоматичних кінцевоелементних САПР.

Як відомо, методи кінцевих різниць і кінцевих елементів мають ряд недоліків. По-перше, в усіх числових розрахунках передбачається та чи інша дискретизація як області визначення розглянутих операторів, так і області їх результатів, при цьому виникають похибки і це є головним недоліком всіх числових методів. Однак дискретизація функцій, що описують розподіл джерел, завжди призводить до більш гладких розподілів, ніж дискретизація самих полів [21]. По-друге, використання зазначених методів диктує необхідність штучно обмежувати область, в якій досліджується поле, вводити додаткові умови, які замінюють вплив неврахованих областей [22]. По-третє, при використанні розглянутих методів особливо складною є апроксимація диференційних операцій поблизу границь розділу середовищ, саме там, де

розподіл поля в більшості практичних завдань становить найбільший інтерес. Складнощі виникають і при врахуванні особливостей у кутових точках [23].

Методи кінцевих елементів і кінцевих різниць інтенсивно розвивалися в працях Г. Стренга і Дж. Фікса [24], Л. Сегерлінда [25], Ж. Обена [26], П. Сильвестера і Р. Феррарі [27], Ю. А. Бахвалова і А. І. Бондаренко [28], А. А. Самарського [29], К. С. Демерчана і Н. І. Солнишкіна [30], В. Л. Чечуріна [31], В. П. Ільїна [32] та ін.

На основі методу кінцевих елементів розроблено ряд числово-програмних комплексів (*Comsol, Ansys, Elcat, Maxwell, FEMM*, та ін.). Вони потребують значних витрат обчислювальних ресурсів ЕОМ на розрахунок одного варіанта при розгляді тривимірних задач. Відсутні функціональні можливості вирішення ще більш ресурсоємних завдань оптимального проектування. За наявності істотних локальних особливостей поля, що розраховується, застосування згаданих пакетів дає недостовірні результати [33].

Одним із перспективних є метод інтегральних та інтегро-диференціальних рівнянь. Зумовлено це тим, що в розглянутому класі електромеханічних пристроїв зазвичай мають місце сильні електромагнітні поля розсіювання. Метод інтегральних рівнянь у даному випадку є більш ефективним, оскільки шукані величини розподілені тільки в об'ємі масивних тіл (вихрові струми), на їх границі (електричні заряди) і на границі феромагнітних тіл (струми намагніченості). Таким чином, область пошуку рішення істотно менша, ніж у методах кінцевих різниць і кінцевих елементів, коли необхідно шукати рішення в усій, необмеженій, області.

Початковий варіант інтегральних рівнянь стосовно задач електро- і магнітостатики запропонував Г. А. Грінберг [34]. Інтерес до методу інтегральних рівнянь виник після появи наприкінці 60-х – початку 70-х років робіт О. В. Тозоні, І. Д. Маєргойза, Є. І. Петрушенка, Є. В. Колеснікова [35–36], в яких метод інтегральних рівнянь був представлений у фізичній інтерпретації як метод вторинних джерел. У цих працях було здійснено побудову й теоретичне обґрунтування математичних моделей електромагнітного поля в

кусово-однорідних, неоднорідних, нелінійних середовищах, а також математичних моделей для розрахунку вихрових струмів у масивних провідниках, на основі інтегральних рівнянь, а також впровадження методу в практику електротехнічних розрахунків приладів і пристроїв.

Подальші дослідження, пов'язані з розрахунком електромагнітних полів на основі методу інтегральних рівнянь проводили О. В. Тозоні, І. Д. Маєргойз, Є. І. Петрушенко, С. С. Романович, С. Т. Толмачев, Є. В. Колесніков, В. М. Михайлов, Б. Н. Сипливий, В. І. Астахов, І. П. Стадник, А. В. Жильцов, І. І. Пеккер, П. А. Курбатов, С. А. Арінчін, А. Г. Кірсанов, В. Г. Тракай, А. Д. Подольцев та ін. [37–40].

Таким чином, математичне моделювання взаємопов'язаних електрофізичних процесів – розряду ємності на розгалужене електричне коло з напівпровідниковими елементами та створення необхідних з технологічних міркувань електродинамічних зусиль у зоні контакту електрода і оброблюваного зразка, доцільно виконувати із застосуванням методу інтегральних та інтегро-диференційних рівнянь, що є актуальною науково-прикладною задачею, вирішення якої має суттєве значення для надійності та довговічності роботи технологічного обладнання.

РОЗДІЛ 3 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА СИСТЕМА МЕХАНІЧНОГО ВПЛИВУ НА МЕТАЛ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІНДУКЦІЙНОГО ТИПУ

Розроблено конструкцію електротехнічної системи для механічного впливу на метал, до її складу входять: електромеханічний перетворювач індукційного типу ударної дії та джерело імпульсів струму (рис. 1). Електромеханічний перетворювач індукційного типу забезпечує, силовий вплив на метал та живиться від джерела імпульсів струму.

Конструктивними елементами електромеханічного перетворювача індукційного типу для механічного впливу на 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 кернер 6. Котушка індуктивності 1 і диск 4 розміщені в корпусі 2 та закриваються знизу кришкою 3. Електромагнітна система під прямим кутом розміщується по відношенню до металу 7. Для створення надійного початкового електричного контакту «кернер-зразок» на корпусі приладу зверху закріплено вантаж 9. Для підведення до електродного пристрою струму використовуються виводи котушки 8, 10. 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 кернера 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.

Електромеханічний перетворювач індукційного типу

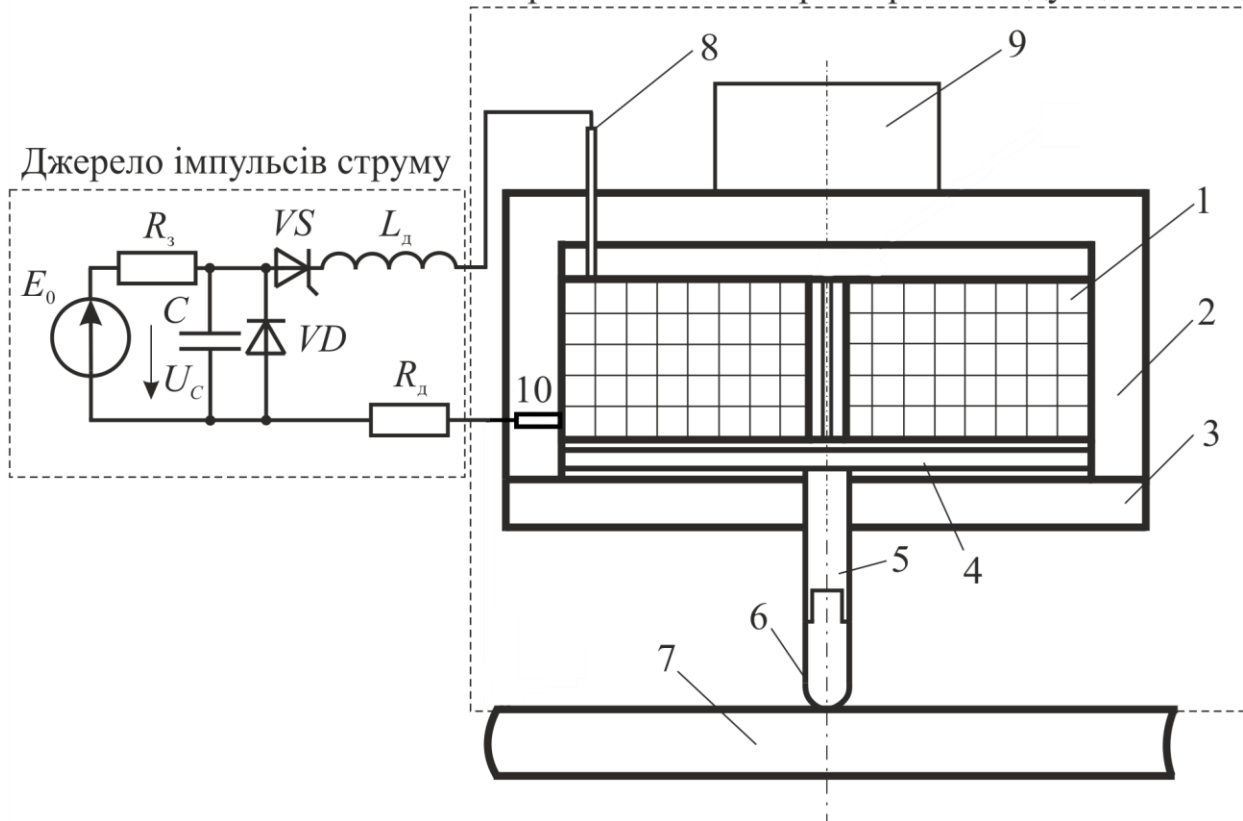


Рис. 1. Електротехнічна система для механічного впливу на метал

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 механічного впливу на метал, а саме: параметри електричного кола C , R , L , U_C , які забезпечують, з одного боку, задану силу впливу $F(t)$.

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:

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

$$\begin{aligned} & \frac{\chi(Q) \mu_0 \epsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_D \frac{(\vec{\delta}(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M + \sigma(Q,t) + \frac{\chi(Q)}{2\pi} \int_S \sigma(M,t) \frac{(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q)}{r_{QM}^3} dS_M = \\ & = - \frac{\chi(Q) \mu_0 \epsilon_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{D_w} \frac{(\vec{\delta}_w(M,t), \vec{n}_Q)}{r_{QM}} dV_M - F(Q,t), Q \in S \cup S_{20}^+ \cup S_{30}^-, \end{aligned} \quad (2)$$

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

де $\vec{\delta}_q(Q,t)$ – миттєва густина вихрових струмів у точці $Q \in D_q, q=1,2,3$; γ_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 ; $\epsilon_0=8,85\cdot 10^{-12}$ 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).

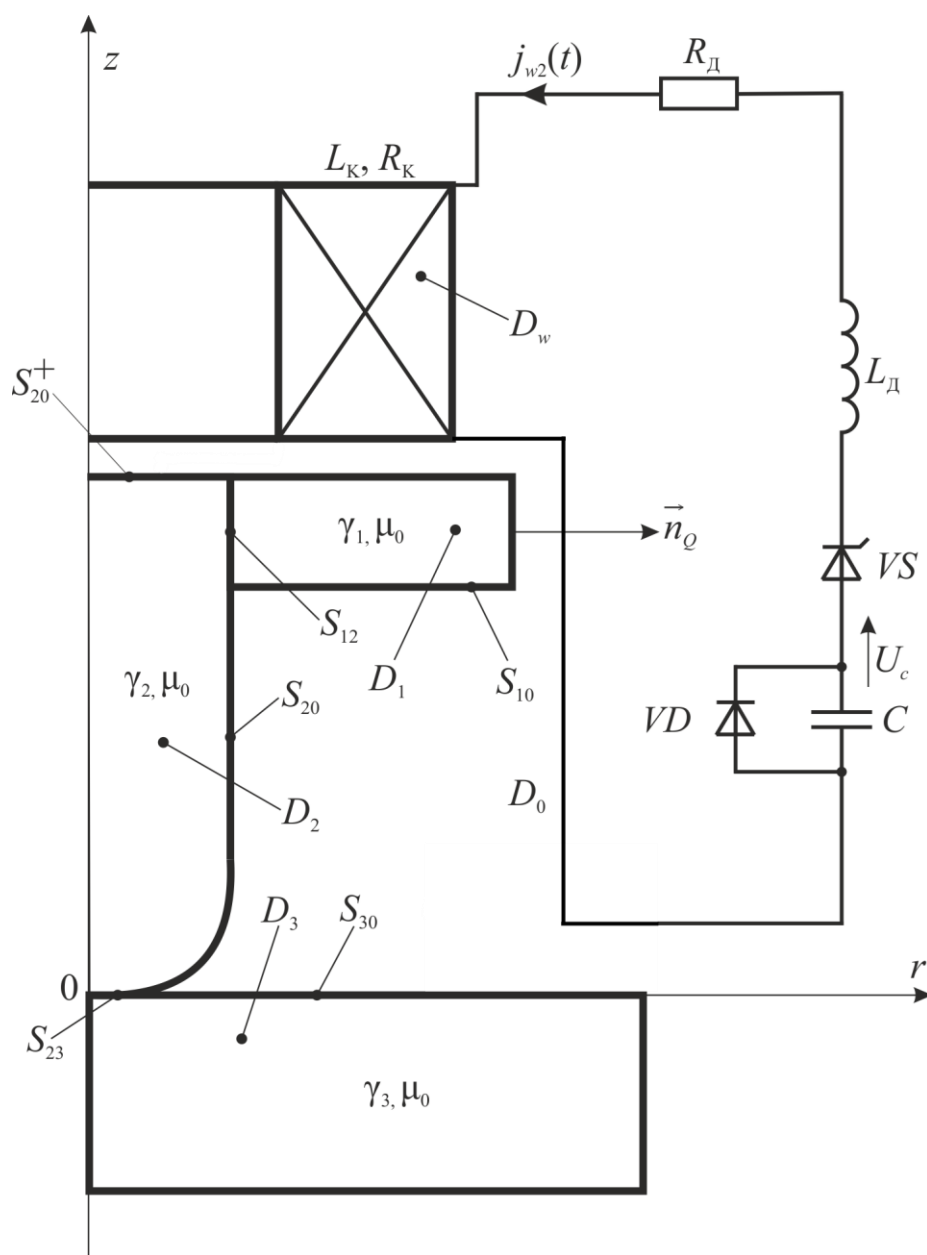


Рис. 2. Меридіанний переріз електромагнітної системи із зображенням зовнішнього електричного кола

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

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 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 механічної дії.

Для компонентів електромагнітного поля й вихрових струмів у масивних провідниках мають місце співвідношення:

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

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

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

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

де \vec{E} – напруженість електричного поля; $\vec{\delta}$ – густина струму, А/м²; \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.

Сформульовано крайова задача в термінах векторний магнітний потенціал та скалярний електричний потенціал, яка з використанням теорії потенціалу та концепції вторинних джерел редукується до системи інтегро-диференційних рівнянь із наступним їх числовим розв'язком.

Розрахуємо параметри електричного кола з умови забезпечення заданої сили тиску кернера D_2 , який жорстко з'єднаний з провідним диском D_1 , та заданого часу її дії на метал 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 механічного впливу на метал наведені в табл. 1.

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 ²
Коефіцієнт заповнення	K_3	0,7
Проміжок між котушкою та диском	Δh	0,5 мм
Діаметр диска	$d_{2d}=2R_{2d}$	97 мм
Товщина диска	h_d	8 мм
Діаметр кернера	d_e	8 мм
Висота кернера	h_e	40 мм
Опір котушки	R_k	5,46 МОм

Тут враховано, що векторний потенціал має тільки кутову складову:

$$A_\alpha(Q,t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{S_1} \delta_\alpha(M,t) T(Q,M) dS_M + \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{S_w} \delta_{w\alpha}(M,t) T(Q,M) dS_M. \quad (16)$$

Тоді, поточозчеплення 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:

$$\begin{aligned} \Psi(t) &= \sum_{i=1}^w \Psi_i(t) = 2\pi \sum_{i=1}^w A_\alpha(Q_i, t) r_{Q_i} = \\ &= \mu_0 \sum_{i=1}^w r_{Q_i} \int_{S_1} \delta_\alpha(M, t) T(Q_i, M) dS_M + \mu_0 \sum_{i=1}^w r_{Q_i} \int_{S_w} \delta_{w\alpha}(M, t) T(Q_i, M) dS_M. \end{aligned} \quad (17)$$

Сумісний розв'язок системи рівнянь (13), (14) та (5) – (8) з урахуванням (17) 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 :

$$\vec{f}(Q, t) = \vec{e}_r \delta_\alpha(Q, t) B_z(Q, t) - \vec{e}_z \delta_\alpha(Q, t) B_r(Q, t). \quad (18)$$

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.

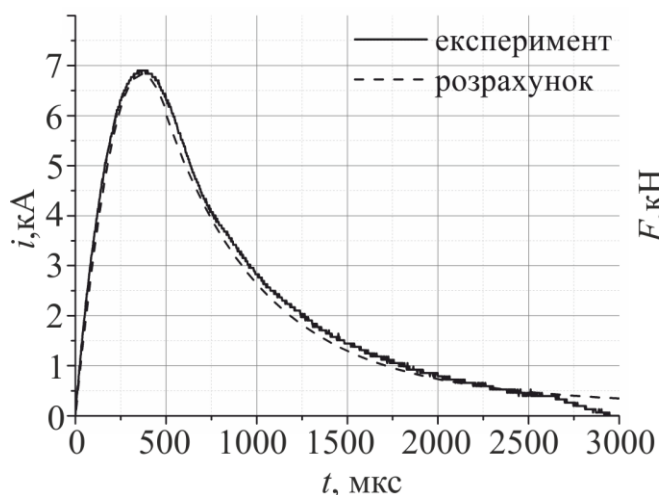


Рис. 4. Результати розрахунку та експериментального визначення сили струму в розрядному колі

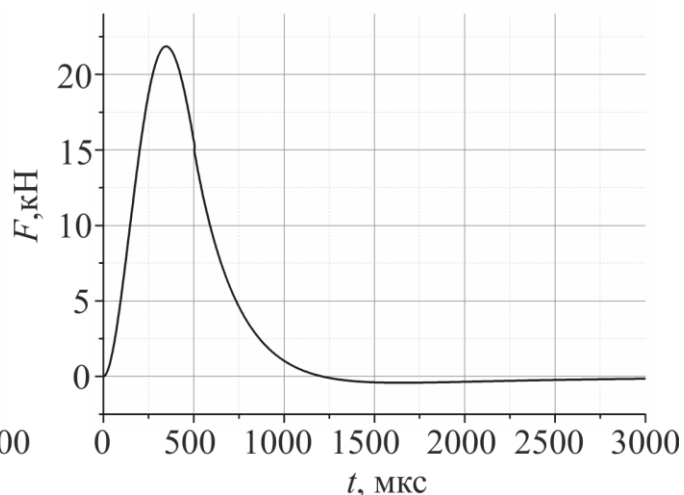


Рис. 5. Результати розрахунку електромагнітної сили взаємодії струму в обмотці котушки з вихровими струмами у масивному диску

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 механічних зусиль на метал. 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.

РОЗДІЛ 4 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІНДУКЦІЙНОГО ТИПУ

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 кернера до металу. Обмеження на розміри котушки та диска визначаються габаритними розмірами пристрою.

Завданням подальших досліджень було: 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; 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.

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.

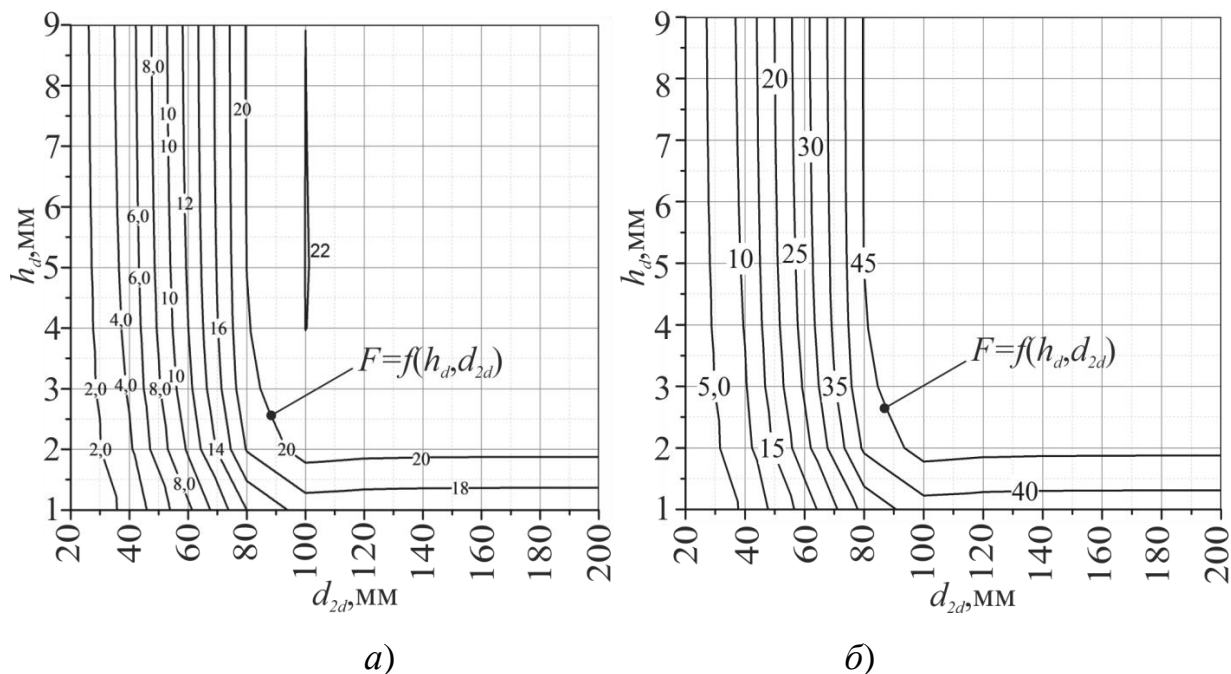


Рис. 6. Сімейство залежностей амплітудного значення електромагнітної сили (кН), що діє на масивний неферромагнітний диск, від його товщини та діаметра: h_d – товщина масивного диска; d_{2d} – його зовнішній діаметр (а – за напруги на ємності 500 В; б – за напруги на ємності 750 В).

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.

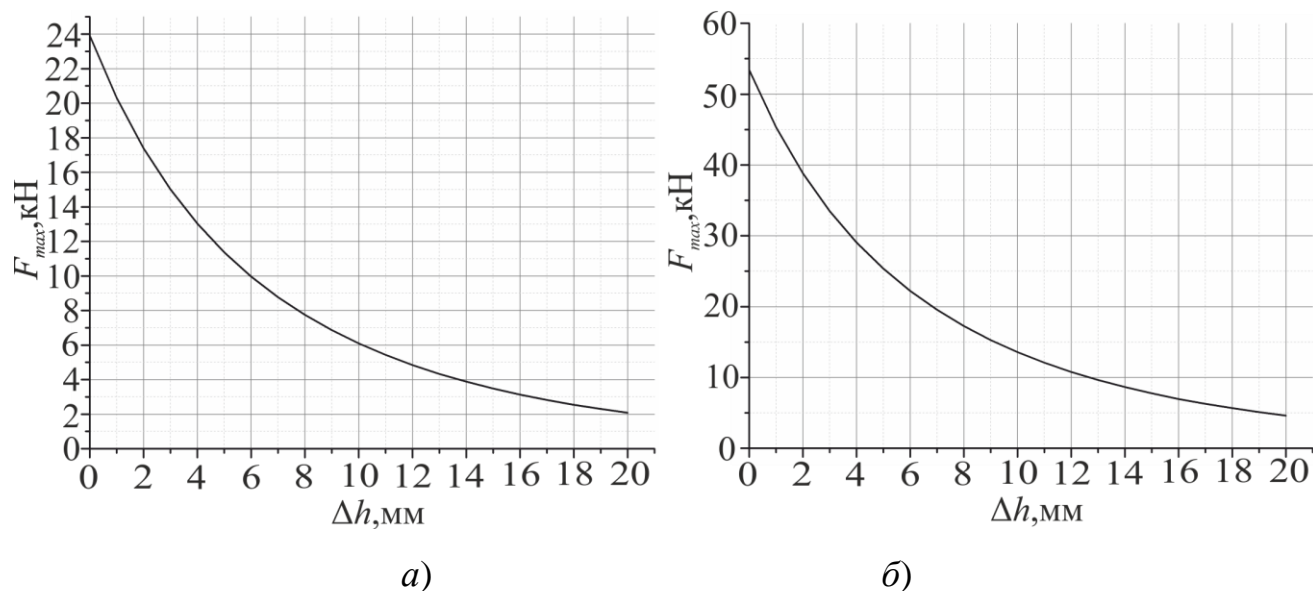


Рис. 7. Графік залежності амплітудного значення z -компоненти електромагнітної сили, що діє на ферромагнітний масивний диск, від зазору між диском та котушкою, за напруги на ємності а) 500 В; б) 750 В

ВИСНОВКИ

Представлені дослідження присвячені вирішенню актуального наукового завдання – розробки методів розрахунку взаємопов'язаних електрофізичних процесів у системах механічного впливу на метал та забезпечення необхідних з технологічних міркувань параметрів – зусиль, 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. 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 (2×2570 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.

2. Розроблено інтегро-диференціальну коло-польову математичну модель взаємопов'язаних нестационарних електрофізичних процесів, яка присвячена

розрахунку перехідного процесу в електричному колі, що включає до свого складу індуктивність, яка варіюється. Математична модель дає змогу розрахувати величину потокозчеплення струмів котушки, індуктивність якої змінюється, з урахуванням струмів розрядного кола і вихрових струмів, що індукуються в електропровідному диску.

3. 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) кернера на метал. Це дало змогу обґрунтувати геометричні параметри електромеханічного перетворювача індукційного типу.

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 %).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Исмагилов Ф. Р. Введение в конструирование электромеханических преобразователей энергии : учеб. пособие / Ф. Р. Исмагилов, Ю. В. Афанасьев, А. В. Стыскин. – М. : МАИ, 2006. – 130 с.
2. Афонин А. А. Линейные двигатели с концентраторами магнитного потока / А. А. Афонин, В. В. Гребеников // Proceedings of the 3rd international scientific and technical conference «Unconventional electromechanical and electrical systems». – Alushta, Ukraine. – 1997. – Vol. 2. – P. 189–194.
3. Олексенко С. В. Оценка показателей линейных электромеханических преобразователей ударного действия с высокой магнитной совместимостью: дис. кандидата техн. наук : 05.09.01 / Олексенко Сергей Владимирович. – Харьков., 2016. – 205 с.
4. Флора В. Д. Специальные электромагнитные и электромеханические преобразователи энергии / В. Д. Флора ; под ред. доц., к. т. н. Ю. С. Коробкова. – Запорожье., 2012. – 196 с.
5. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях : монография / [К. М. Усанов, В. И. Мошкин, В. А. Каргин, А. В. Волгин]. – Курганск : Курганский гос. ун-т, 2015. – 202 с.
6. Driga M. D. Electromagnetic induction launchers / M. D. Driga, W. F. Weldon // IEEE Transactions on Magnetics. – 1986. – Vol. 22. – P. 1453–1458.
7. Федоров В. К. Уравнения рабочего процесса электродинамического двигателя возвратно-поступательного движения / В. К. Федоров // Электромашиностроение и электрооборудование. – 1995. – Вып. 47. – С. 78–83.
8. Jeon W. J. Propulsive characteristics of a novel linear hybrid motor with both induction and synchronous operations / W. J. Jeon, S. Katoh, T. Iwamoto et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – Vol. 35. – P. 4025–4027.

9. Кецарис А. А. Магнитоэлектрические машины электрооборудования автотранспортных средств / А. А. Кецарис, В. В. Лохнин. – М. : Университет машиностроения, 2014. – 310 с.

10. Yamori A. Development of an induction type railgun / A. Yamori, Y. Ono, H. Kubo et al. // IEEE Transactions on magnetics. – 2001. – Vol. 37. – No 1. – P. 470–472.

11. Угаров Г. Г. Основные принципы и пути повышения силовых и энергетических показателей линейных электромагнитных двигателей для импульсных технологий / Г. Г. Угаров // Механика горных пород, технология горных работ. – Новосибирск, 1993. – С. 107–110.

12. Галанин М. П. Квазистационарные электромагнитные поля в неоднородных средах: математическое моделирование / М. П. Галанин, Ю. П. Попов. – М. : Наука. Физматлит, 1995. – 320 с.

13. Мишкин В. Н. Сравнительная оценка арретирующих устройств на электродинамическом и электромагнитном принципе действия / В. Н. Мишкин, А. И. Толстик // Электромагнитные импульсные системы. – Новосибирск : Наука. – 1989. – С. 114–117.

14. Буль Б. К. Электромеханические аппараты автоматики / Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. А. Азанов, В. Н. Шоффа. – М. : Высшая школа, 1988. – 303 с.

15. Ямпольский Ю. Г. О проектировании оптимальных линейных импульсных электродинамических двигателей возвратно-поступательного движения / Ю. Г. Ямпольский // Электротехника. – 1990. – № 2. – С. 51–55.

16. Пульер Ю. М. Индукционные электромеханические функциональные преобразователи / Ю. М. Пульер, Ю. А. Колесов, Э. Н. Асиновский. – М. : Энергия, 1969. – 112 с.

17. Bose B. K. Modern power electronics and AC drivers / B. K. Bose. – Prentice Hall PTR. 2002. – 711 p.

18. Тюков В. А. Электромеханические системы / В. А. Тюков. – Новосибирск : НГТУ, 2006. – 182 с.

19. Самарский А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. – М. : Наука, 1978. – 592 с.

20. Чермошенцев С. Ф. Информационные технологии электромагнитной совместимости электронных средств / С. Ф Чермошенцев. – Казань : Казан. гос. техн. ун-т, 2000. – 152 с.

21. Жданов М. С. Математическое моделирование электромагнитных полей в трехмерно-неоднородных средах / М. С. Жданов, В. В. Спичак // Акад. наук СССР. Ин-т земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн. – М. : Недра, 1992. – 188 с.

22. Лустенберг Г. Е. Ослабление влияния границы на решение внешних электродинамических задач методом конечных элементов / Г. Е. Лустенберг // Известия вузов. Электромеханика. – 1993. – № 3. – С. 12–18.

23. Арушанян И. О. Применение метода граничных интегральных уравнений для численного решения задачи Дирихле в областях с угловыми точками / И. О. Арушанян // Вычислительные методы и программирование. – 2000. – Т. 1. – С. 1–7.

24. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М. : Мир, 1977. – 349 с.

25. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М. : Мир, 1986. – 320 с.

26. Обэн Ж. П. Приближенное решение эллиптических краевых задач / Ж. П. Обэн. – М. : Мир, 1977. – 383 с.

27. Сильвестер П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков / П. Сильвестер, Р. Феррари. – М. : Мир, 1986. – 229 с.

28. Бахвалов Ю. А. Решение внешних краевых задач при расчете электромагнитных полей методом конечных элементов / Ю. А. Бахвалов, А. И. Бондаренко // Известия вузов. Электромеханика. – 1983. – № 6. – С. 5–10.

29. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1971. – 552 с.

30. Демирчан К. С. Расчет трехмерных магнитных полей методом конечных элементов / К. С. Демирчан, Н. И. Солнышкин // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1975. – № 5. – С. 39–49.

31. Чечурин В. Л. Метод магнитных зарядов и его приложение для расчета стационарных электромагнитных полей : автореф. дисс. на соискание учен. степени докт. техн. наук : спец. 05.09.05 «Теоретическая электротехника» / В. Л. Чечурин. – Ленинград, 1983. – С. 69–73.

32. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрофизики / В. П. Ильин. – М. : Наука, 1985. – 336 с.

33. Астахов В. И. Математическое и компьютерное моделирование электромагнитного поля как основа для решения задач в электротехнике и электроэнергетике / В. И. Астахов // Известия вузов. Электромеханика. – 2004. – № 6. – С. 4–6.

34. Гринберг Г. А. Избранные вопросы теории электрических и магнитных явлений. – М. : АН СССР, 1984. – 727 с.

35. Тозони О. В. Метод вторичных источников в электротехнике / О. В. Тозони. – М. : Энергия, 1975. – 295 с.

36. Петрушенко Е. И. Расчет распределения плотности тока в закрытых токопроводах / Е. И. Петрушенко // Известия вузов. Электромеханика. – 1964. – № 6. – С. 647–656.

37. Петрушенко Е. И. Моделирование процесса разрядки емкости на осесимметричную немагнитную систему двух массивных закрепленных индукторов на основе суммарных схем. Случай больших зазоров между индукторами / Петрушенко Е. И. – К. : Ин-т проблем моделирования в энергетике АН УССР, 1992. – 40 с. – (Препринт / АН УССР, Ин-т проблем моделирования в энергетике; 52–54).

38. Петрушенко Е. И. Моделирование процесса разряда емкости на осесимметричную немагнитную систему двух массивных индукторов, один их

которых закреплен, второй поступательно перемещается вдоль оси системы / Е. И. Петрушенко // Методы математического моделирования в энергетике : сб. научных трудов. – К. : Наукова думка, 1992. – С. 116–124.

39. Петрушенко-Кубала И. Е. Метод элементарных соленоидов моделирования трехмерных магнитных полей в устройствах с ферромагнитными сердечниками и обмотками с током / И. Е. Петрушенко-Кубала, Е. И. Петрушенко // Электронное моделирование. – 2003. – Т. 25, № 5. – С. 15–31.

40. Петрушенко-Кубала И. Е. К расчету магнитного поля цилиндрического индукционного перемешивателя на основе векторных интегральных уравнений для токов намагниченности / И. Е. Петрушенко-Кубала, Е. И. Петрушенко // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці. – К., 2001. – Вып. 13. – С. 3–19.