ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

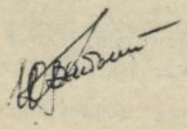
На правах рукопису

Батигін Юрій Вікторович

АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ В ДОСЛІДЖЕННЯХ СИЛОВОЇ ДІЇ ПРОНИКАЮЧИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ПРОВІДНИКИ ТА ДІЕЛЕКТРИКИ

05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук



Харків – 1993

Ав 29.295

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00777879 (2)

Дисертація є рукопис.

Робота виконана у Харківському політехнічному інституті.

Науковий консультант – доктор технічних наук Хіменко Лев Тимофійович

Офіційні опоненти: 1. Доктор технічних наук, професор Бондалетов Володимир Миколайович
2. Доктор технічних наук, професор Фінкельштейн Володимир Борисович
3. Доктор технічних наук Титко Олексій Іванович

Провідне підприємство: Інститут імпульсних процесів та технології АН України, м.Миколаїв

Захист дисертації відбудеться "17" березня 1994 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.02 у Харківському політехнічному інституті /м.Харків, 310002, МСП, вул. Фрунзе, 21/.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського політехнічного інституту.

Автореферат розісланий "3" лютого 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Батигін Ю.В.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

В-29.293

Актуальність роботи. Прискорення науково-технічного прогресу забезпечується упровадженням у народне господарство нових технологій: електронно-промінних, плазмових, імпульсних та ін., які дозволяють значно підвисити продуктивність праці, ефективність використання ресурсів та понизити матеріалоємкість виробництва. Окрім поліпшення показників виробництва, усякий новий сучасний технологічний процес повинен забезпечити більш високі показники екологічної чистоти у зрівнянні з раніше звісними та дючими у промисловості.

Використання досягнень фізики та техніки великих імпульсних струмів та електромагнітних полів відкриває виключні можливості та дозволить у ближчому майбутньому перевести значний ряд трудомістких та шкідливих для навколишнього середовища промислових виробництв на якісно новий рівень, відповідний вимогам нашого часу. Привабливою особливостю практичного використання процесів взаємодії електромагнітних полів з речовиною є можливість "безконтактного" силового тиску на різні матеріали, їх деформування та виготовлення, в кінцевій справі, виробів заданної форми.

Фізичний механізм виникнення зусиль під час взаємодії поля з речовиною, в першу чергу, визначається електрофізичними властивостями речовини /тобто належністю до провідників чи диелектриків/. В основі цього механізму для провідників лежить збудження лоренцових сил, для диелектриків - поляризаційні ефекти. Таким чином, деформування провідників можливо тільки з допомогою перемінних потужних магнітних полів. Для деформування диелектричних матеріалів необхідні короткочасні електричні поля з високою напруженістю.

До передових імпульсних технологій, які були визнані у останні 20÷30 років і які використовують ефекти взаємодії магнітного поля

з достатньо добрими провідниками, ставиться магнітноімпульсна обробка металів /МІОМ/. У наш час МІОМ використовується на підприємствах машинобудівної, авіаційної, електротехнічної, автомобільної та інших галузей промисловості.

Як звісно, деформуванню тонкостінних чи, так званих, "поганих" провідників за допомогою традиційних схем МІОМ перешкоджують процеси проникнення полів крізь заготівлі. Запобігти негативних наслідків дифузії можна, якщо тучним чином створити визначені межні умови для вектора магнітного поля на поверхнях провідника, який деформується /з однієї сторони - амплітуда, з другої - нуль поля/. На практиці ця задача має рішення, наприклад, за допомогою, так званих, складних індукторних систем, де суперпозиція полів декількох джерел дозволяє синтезувати магнітне поле заданої геометрії.

Слід відзначити, що у фізиці плазми формування інтенсивних згустків часток здійснювалось за допомогою комбінації з двох малоіндуктивних соленоїдів. У МІОМ подібні конструкції індукторних систем не звісні.

Ідея синтезу спеціальних межних умов для вектора напруженості магнітного поля, з нашої точки зору, має велике майбутнє. Окрім практичного застосування в наш час для обробки токостінних та поганих провідників, складні індукторні системи з декількох джерел магнітного поля у недалекому майбутньому дозволять реалізувати безматричне програмоване деформування металевих заготівель та одержання виробів заданої форми.

Серед сировинних матеріалів, які застосовуються у сучасному промисловому виробництві, значне місце посідають пластичні діелектрики. Однак, у сучасній науковій літературі зовсім немає ніякої інформації про використання імпульсних полів у технологічних процесах по обробці діелектриків.

Одна з причин відсутності робіт в цьому напрямку є гадана безперспективність використання електричних полів /слід підкреслити, диелектрики взаємодіють з електричними полями/внаслідок малої щільності енергії.

З нашої точки зору, досить велику імпульсну щільність електричної енергії можна одержати у системах, принцип дії яких має характер "ударного" збудження /в основі явище електромагнітної індукції/. Різні модифікації систем "ударного" збудження використовуються для прискорення електронів у фізиці високих енергій.

В цілому, як показує аналіз сучасної наукової періодики, дослідження, спрямовані на створювання нових та удосконалення звісних способів силового тиску електромагнітних полів на провідники та диелектрики, є актуальні та перспективні. В цьому зв'язку слід підкреслити важливість робіт з розвитку фізико-математичних моделей у теорії електродинамічних процесів взаємодії полів з поганими провідниками та диелектриками. Спрощені моделі явищ, які досліджуються, дають можливість прогнозувати найбільш ефективні технічні рішення та напрямки розвитку імпульсної технології з використанням електромагнітних полів в різних галузях виробництва.

Комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, поданих у дисертаційній роботі, був виконаний на кафедрах вищої математики та інженерної електрофізики Харківського політехнічного інституту в період 1980-1990р.р. Узагальнення результатів за весь час робіт було зроблено в межах держтеми "Теорія силової дії проникаючих електромагнітних полів на провідники та диелектрики в техніці великих струмів". Підставою для виконання цієї теми була постанова ДКНТ СРСР від 30.10.85р. по Загальносоюзній науково-технічній програмі п.04.72.06 "Создание новых технологических процессов и оборудования для получения и обработки материалов высоким давлением".

Мета роботи. Мета даної роботи є розвиток аналітичних методів теорії для якісного прогнозування перспективних напрямків у створенні технічно реальних індукторних систем, які дозволяють синтезувати електромагнітні поля заданої геометрії; теоретичне та експериментальне дослідження процесів у індукторних системах для деформування тонкостінних металевих заготівель силами магнітного тиску /в умовах значного проникнення полів крізь заготівлі/; теоретичне дослідження процесів взаємодії високочастотних /чи достатньо короткочасних/ полів з діелектричними середовищами, спрямоване на з'ясування фізичних особливостей пробою ізоляції пристроїв з високою напругою та обґрунтування можливих засобів силового тиску на пластичні діелектрики у техніці великих імпульсних струмів та електромагнітних полів.

Наукова новизна. Запропоновані фізико-математичні моделі для теоретичних досліджень індукторних систем, синтезуючих магнітні поля з заданою просторово-часною геометрією.

Запропоновані реальні конструкції індукторних систем для деформування металевих заготівель при значному проникненні електромагнітних полів.

Запропоновані способи магнітноімпульсного деформування поганих провідників чи достатньо тонкостінних металевих пластин та оболонок.

Проведено дослідження електромагнітних процесів, напруженого та температурного стану біметалевих соленоїдів у складних індукторних системах – системах з декількома джерелами магнітних полів. Сформульовані рекомендації для значного поліпшення технічних характеристик біметалевих індукторів.

У адекватному наближенні досліджена проблема підвищення міцності соленоїдів циліндричної геометрії. За допомогою різних моделей

було показано, що використання бМметалевих обмоток Індукторів при певних умовах дає ефект, звІсний в теорІї мІцності складових цІлІндричних конструкцій як ефект натяга чи ефект академІка А.В. ГадолІна. ДанІ рекомендацІї по пІдвищенню мІцності Індукторів.

ВиконанІ теоретичнІ дослІдження "крайнІх" можливостей складних Індукторних систем для деформування тонких чи поганопроводячих металІв у порІвняннІ з сучасними традицІйними схемами практичноІ реалІзацІї магнІтноІмпульсного метода.

Здобули розвиток аналІтичнІ методи дослІдження електродинамІчних процесІв при силовІй дІї проникаючих полІв на тонкостІннІ металевІ заготІвлІ рІзноІ фІзичноІ природи /феро- та неферомагнетики/. Обгрунтована математична та фІзична достовІрнІсть прийнятих аналІтичних методІв обчислення.

ПроведенІ експериментальнІ дослІдження електромагнІтних процесІв у Індукторних системах, якІ дозволяють одержання полІв з заданим простІрно-часним розподІлом вектора напруженостІ. СформульованІ рекомендацІї з практичного використання таких систем у штамповочному виробництвІ рІзних виробІв.

ПроведенІ теоретичнІ дослІдження процесІв "ударного" збудження електричних полІв та можливих механІзмІв руйнування ІзоляцІї Імпульсних пристроІв з високою напругою. Запропоновано способ ІмпульсноІ обробки диелектричних матерІалІв.

РозробленІ та упровадженІ у промислове виробництво ефективнІ конструкцІї Індукторних систем для виконання рІзних технологічних операцій.

Практична цІннІсть та упровадження результатІв. Здобули розвиток аналІтичнІ моделІ для теоретичних дослІджень Індукторних систем, синтезуючих магнІтнІ поля з заданою простІрно-часною геометрІєю, та обчислення динамІчних ефектІв пІд час руху //деформування// про-

відмінів за дією проникаючих магнітних полів.

Запропоновані конструкції індукторних систем зі значно поліпшеними електромагнітними показниками.

Здійснено практичне дефектування металевої фольги, товщина якої значно менше ефективної глибини проникнення поля /у 10 разів!/, силами магнітного тиску без використання явилось промінних /перемінних зусиль/ середовищ.

Запропоновані та захищені авторськими свідоцтвами способи обробки тонкостінних /чи поганопровідних/ металевих заготівель.

За допомогою апробованих модельних підходів теоретично досліджені процеси у діелектриках від час дії короткочасних полів; запропоновано та захищено авторським свідоцтвом спосіб обробки діелектричних матеріалів.

У цілому, результати досліджень, одержані автором дисертації, знайшли практичне використання у роботах /у межах госпдоговірної тематики/ між Харківським політехнічним інститутом та Харківським заводом транспортного обладнання у період 1982-1990р.

Відповідно до технічних завдань та прийнятої програми досліджень була розроблена серія високоефективних індукторних систем для виконання різних технологічних операцій.

Розрахунки високодобротних індукторів з концентраторами магнітного потоку для складальних та інших операцій продовжуються за нашого часу.

Упровадження вищеперелічених розробок підтверджується документами, які є у додатку до дисертації. Сумарний економічний ефект від їх запровадження у промислове виробництво товарів народного споживання склав 229,424 тис.рублів /згідно з курсом 1991р./.

Апробація роботи. Головні результати дисертаційної роботи доповідались на II Всесоюзній науково-технічній конференції "Исполь-

зование импульсных источников энергии в промышленности" /ХаркІв, І985р./, ВсесоюзнІй науково-технІчнІй конференцІІ "Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении" /Іваново, І989р./, ВсесоюзнІй конференцІІ "Создание комплексов электротехнического оборудования высоковольтной, преобразовательной, сильноточной и импульсной техники" /Москва, І990р./, ВсесоюзнІй нарадІ "Теоретические и технологические аспекты создания и применения силовых импульсных систем" /Караганда, І990р./, ВсесоюзнІй нарадІ з сучасних методІв обробки металІв тиском /Куйбишев, І990р./, на семІнарах Інституту математики МІшкольцкого УнІверситету важкоІ промисловостІ /УНР, МІшкольц, І986р./, Високовольтного науково-дослІдницького центру /ФІлІя ВЕІ Ім.В.І.ЛенІна, Істра-2, Московська область, І99Ір./, Інституту Імпульсних процесІв та технологІй /МиколаІв, І99Ір./, а також щорІчних конференцІях професорсько-викладачського складу ХаркІвського полІтехнІчного Інституту.

ПублІкацІІ. За темою дисертацІІ надруковано 28 наукових праць, одержано 8 авторських свІдоцтв на винаходи.

До захисту подаються:

- аналІтичнІ моделІ та теоретичнІ дослІдження, спрямованІ на з'ясування принципових умов практичноІ дІйностІ Індукторних систем, якІ дозволяють здІйснити синтез полІв заданоІ простірно-часноІ геометрІІ;

- аналІтичнІ моделІ, Іх достовІрнІсть та фІзичне обґрунтованнІсть, а також вІдповІднІ результати дослІджень електродинамІчних процесІв пІд час силовоІ дІІ проникаючих полІв на тонкостІннІ метали рІзноІ фІзичноІ природи /феро- та неферомагнетики/;

- результати експериментальних дослІджень процесІв у Індукторних системах, якІ дозволяють одержати поля заданоІ геометрІІ; висновки

та практичні рекомендації з використання таких систем у штамповочному виробництві виробів різної номенклатури;

- результати теоретичних досліджень процесів взаємодії короткочасних полів з діелектриками, спрямовані на з'ясування фізичних особливостей механізму пробою ізоляції в імпульсних пристроях з високою напругою та обґрунтування можливих методів силової дії на діелектрики;

- способи обробки тонкостінних чи поганопроводячих металів силами магнітного тиску без застосування проміжних передаючих середовищ, а також спосіб деформування діелектричних матеріалів за допомогою "ударного" збудження потужних короткочасних електромагнітних полів.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступної частини, чотирьох глав з висновками, закінчення та додатків. Робота викладана на 299 сторінках машинописного тексту, має 50 малюнків та список цитованої літератури з 187 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ.

Вступна частина має короткий огляд літератури, обґрунтування актуальності роботи, її новизни та значення.

Перша глава дисертації посвячена аналізу електромагнітних процесів у складних /синтезуючих магнітні поля заданої просторово-часової геометрії/ індукторних системах з нерухомими провідниками.

Первісний розгляд вузлових конструктивних елементів дозволив виявити пріоритетні напрямки досліджень і перейти до створювання спрощених фізико-математичних моделей індукторних систем з двох соленоїдів, розділених тонкостінними провідниками /один з них - матриця, другий - заготівля/.

У найпростішому наближенні "заданого поля" /не враховуючи взаємний вплив джерел/ знайдені головні умови працездатності складних

Індукторних систем. Було показано, що тучне створювання межних умов, таких що на однІй поверхнІ тонкостІнноІ заготІвлІ поле є нуль, на практицІ найбІльш просто здІйснити у низькочастотному режимІ, коли $\omega\tau_{1,2} \ll 1 / \tau_{1,2}$ - час дифузІІ поля в провІдник/, при прямопропорцІональнІй залежностІ мІж напруженностями магнІтних полІв у робочих зонах ІндукторІв:

$$\frac{H_2(t)}{H_1(t)} = - \frac{\gamma_2 \cdot d_2}{\gamma_1 \cdot d_1},$$

де $\gamma_{1,2}$ та $d_{1,2}$ - електрична проводимІсть та товщина провІдникІв.

Подальше ускладнення моделей розрахункІв дозволило провести кІлькІснІ оцІнки головних характеристик електромагнІтних процесІв та обчислити взаємний вплив джерел поля у "крайнІх" випадках конструктивного виконання ІндукторІв /обмотки - абсолютно "прозорІ" для дІючих полІв та, навпаки, обмотки - не"прозорІ", тобто виконанІ з Ідеальних провІдникІв/. Було показано, якщо робочІ поверхнІ ІндукторІв - суцІльнІ та Ідеально проводячІ, зниження амплІтуд полІв у робочих зонах за рахунок взаємного впливу - максимальне. Якщо Індуктори "прозорІ" для дІючих полІв, взаємний вплив - дуже малий, зниження напруженностей магнІтних полІв у робочих зонах соленоІдІв практично немає.

БІльш суворІ розрахунки за допомогою моделей, бІльш близьких до реальних конструкцІй соленоІдІв /обмотки яких мають кІнцеву товщину/, дозволили кІлькІсно уточнити ранІше здобутІ результати та виявити особливостІ у роботІ складних цІлиндричних Індукторних систем.

Так, для плоских конструкцІй знайденІ межІ застосування результатІв, якІ були одержанІ у наближеннІ "заданого поля". Були

встановленІ умови, використання яких дозволяє замІнити зв'язок мІж напруженностями полІв у робочих зонах, необхІдний для створювання нулевого поля на внутрІшнІй поверхнІ заготІвлІ, на аналогІчну прямопропорцІональну залежнІсть мІж струмами у обмотках соленоІдІв, а саме:

$$\frac{I_2(t)}{I_1(t)} = -\frac{\gamma_2 \cdot d_2}{\gamma_1 \cdot d_1}.$$

СлІд пІдкреслити, для реальних конструкцІй Індукторних систем цей результат бІльш корисний нІж зв'язок мІж напруженностями.

Розрахована вІдносна змІна напруженностей полІв у робочих зонах соленоІдІв , обмотки яких виконанІ з реальних провІдникІв. У крайньому випадку низьких частот / $\omega \to 0$ / вІдносна змІна напруженностей визначається достатньо простою аналІтичною залежностю:

$$\sigma = \frac{1}{\left(1 + \frac{1 + Z_0 \cdot \gamma_н \cdot d_н}{2 \cdot Z_0 \cdot \gamma \cdot d}\right)},$$

де

Z_0 - хвильовий опІр вакууму, $(\gamma_н, \gamma)$ та $(d_н, d)$ - - електричнІ проводимостІ та товщини провІдникІв.

У лІнІйному наближеннІ знайдено доданка, визначаючого рІзницю в умовах працездатностІ складних цІлиндричних та площинних конструкцІй. Величина доданка - $\left(\omega\tau \cdot \frac{r_{ен}}{2 \cdot d}\right)^{-1}$/ $r_{ен.}$ - внутрІшнІй радІус внутрІшнього соленоІдУ/.

У цІлому, результати дослІджень електромагнІтних процесІв у складних Індукторних системах дозволили обгрунтувати способи обробки металевих заготІвель, за допомогою яких стає можливим штампування тонких пластинок за формою матриць , розподІл бІметалевих провІдникІв та Інше.

Серед дослідженъ першої глави слід видІлити розрахунки електродинамІчних та теплових процесІв у бІметалевих обмотках соленоІдІв. ЦІ розрахунки показали, що використання бІметалІв для виготовлення ІндукторІв у площинних конструкціях дозволяє значно їх змІцнити, збІльшити крайнІй струм, значно зменшити сумарний активний опІр обмоток І таким чином пІдвищити добротнІсть розрядного кола всІєї магнІтноІмпульсноІ установки.

НаприкІнцІ першої глави описанІ дослідження процесІв збудження растягуючих напруг у цІлиндричних Індукторах. ЦІ дослідження дозволили запропонувати та обгрунтувати фІзичний механІзм зниження таких напруг при використаннІ складових обмоток /декІлька шарІв/. Було показано, що дІя ефекту дифузІІ при вІдповІдних умовах еквІвалентна дІІ натягу у складових цІлиндричних конструкціях механІчного призначення /пропозиція акад. ГадолІна А.В./.

У другІй главІ дисертацІІ поданІ аналІтичнІ методи теоретичного дослідження руху та деформування провІдникІв пІд тиском магнІтних полІв. ЦІ методи заснованІ на виборІ достатньо малого параметру з послідуючою лІнеарІзацІєю рІвнянь стану. За допомогою даного методу було знайдено аналІтичне рІшення рІвняння магнІтного поля у провІднику, який рухається. Таким достатньо малим параметром було обрано вІдношення максимальноІ швидкостІ руху до середньоІ швидкостІ дифузІІ поля крІзь провІдник. Обчислення показали, якщо цей параметр менше чи рІвняється 0.I+0.I2, лІнІйний вираз для напруженостІ магнІтного поля у провІднику, який рухається, є цІлком справедливим. Знайдено умови, за яких обурення поля пІд час руху має рІвномІрну залежнІсть по товщинІ провІдника. Це обурення збІльшує сумарну напруженнІсть поля на його границях. Показано, що цей факт не суперечить законам збереження І тодІ,

коли причиною руху являється дІя сил магнІтного тиску. Обчислення повноІ роботи лоренцових сил у цьому випадку дає нульовий результат.

ДалІ, дослІджено процесІв руху та деформування провІдникІв у магнІтних полях. ОбчисленІ швидкостІ руху при вІдсутностІ опору, визначенІ швидкостІ деформування цІлиндричних оболонок. Показано, що швидкостІ деформування оболонок мають екстремуми, якІ обумовленІ дІею сил опору.

За допомогою методІв обурення знайдено аналІтичне рІшення задач про простІрно-часний розподІл напруженостІ та ІндукцІІ магнІтного поля у достатньо тонких феромагнІтних пластинах. Параметром розкладу обрано вІдношення характерного часу дифузІІ у шар провІдника з товщиною d та електричною проводимІстю γ до характерного часу змІни зовнІшнього поля /це може бути "середнІй" перІод гармонІк спектрального розкладу у полосІ частот, де зосереджена енергІя сигналу/.

ОдержанІ аналІтичнІ рІшення проІлюстрованІ чисельними розрахунками /схема першого порядку точностІ, аналогІчна методу ЕйлЕра/, якІ пІдтверджують справедливІсть лІнІйного наближення при обчисленнІ характеристик електромагнІтних процесІв.

Для кІлькІсноІ оцІнки впливу феромагнІтних властивостей на внутрІшнІ процеси формування полІв у тонкостІнних провІдниках запроваджений, так званий, "еквІвалентний" час дифузІІ поля крІзь проводячий шар з нелІнІйною проницаємостю. Ця характеристика дозволила кІлькІсно визначити рІвнозначнІсть екрануючих властивостей феромагнІтних та нефероМагнІтних провІдникІв. Даний результат можна використати на практицІ для запису Інтегральних умов працездатностІ складних Індукторних систем з феромагнетиками.

На закінчення аналітично досліджені особливості динаміки феромагнетиків під дією сил магнітного тиску. Обчислені швидкості руху з урахуванням збудження внутрішніх полів, визначені кількісні критерії внеску феромагнітних властивостей матеріалу пластин на динамічні характеристики процесу пересування. Визначені критерії сильних полів, для яких не проявляє нелінійності властивості середовища. Тобто в цьому випадку взаємодія з зовнішнім полем та швидкість руху такі ж як і для неферомагнітного провідника.

Третя глава дисертації посвячена експериментальним дослідженням процесів взаємодії проникаючих електромагнітних полів з тонкостінними провідниками.

Виконані експерименти умовно можна розподілити на дві групи. Перша з них включає до себе розробку та створювання спеціального стенду для моделювання електромагнітних процесів у складних індукторних системах з нерухомими провідниками. Друга група експериментів об'єднує створювання дійових макетів індукторних систем, синтезуючих магнітні поля з заданою просторово-часною геометрією, та власно дослідження процесів деформування тонкостінних провідників.

Розроблений стенд діяв у частотному диапазоні 0.68÷20 кГц збуджених магнітних полів з амплітудами напруженностей 0.14÷ ÷2.7·10^5 А/м. Вимірювальний комплекс, в цілому, забезпечував точність визначення полів під час експерименту не гірше ±10%.

В експериментах були використані пластини з електротехнічної сталі - 1Х18НТ, алюмінія - АМГ, міді - МІ.

За допомогою розробленого стенду були проведені вимірювання просторово-часного розподілу напруженностей магнітних полів у плоскій складній індукторній системі, досліджено взаємного впливу

соленоїдів та інше. Результати вимірювання відносних напруженостей у робочих зонах індукторів добре узгоджуються з розрахунковими даними, одержаними за допомогою формул першої глави дисертації. Важливим експериментальним результатом являється висновок про незначний взаємний вплив джерел полів при достатньо великих ізолюючих проміжках у індукторній системі. Як показали вимірювання, при $h \geq \frac{3 \cdot d}{\omega \cdot \tau}$ коефіцієнт проникнення зовнішнього поля /тобто поля протилежного джерела/ в робочу зону соленоїда практично рівний нулю. Даний висновок цілком узгоджується з якісним прогнозом раніше розвинутої теорії.

Дослідження процесів деформування тонких металевих пластин /фольга з міді товщиною $5 \cdot 10^{-5}$м/ проводились за допомогою індукторних систем двох типів: одновитковий соленоїд - диелектрична матриця та складна конструкція з двох паралельних соленоїдів, між якими знаходились дві пластини.

Ці дослідження проводились на магнітноімпульсній установці МІУ-24 у диапазоні напруг 6.0÷10.5 кВ.

Перший варіант індукторної системи відповідає задачі про проникнення магнітного поля крізь тонкий екран у вільний простір. Оцінки, виконані в першій главі дисертації, показують, що товщина екрану з реального провідника, який знижує зовнішнє поле на один порядок, складає приблизно $2 \cdot 10^{-8}$м. Тобто в індукторній системі "плоский індуктор-диелектрична матриця" умови ефективного деформування тонкостінних провідників /чи інакше - межні умови для напруженості магнітного поля на поверхнях заготівлі/ створюються природним чином.

За допомогою даної індукторної системи пробивались отвори у фользі згідно формі заглиблень у матриці. При використанні масивної мідної матриці замість диелектричної, ефективність /візуальна/

силовоІ дІІ магнІтного поля Індуктора значно зменшувалась. Отвори не пробивались, на експерІментальних взІрцях було видно результат вІдштовхування дІлянок фольги над заглибленнями вІд металевоІ матрицІ /так званий ефект"магнІтноІ подушки"/.

Частотний диапазон струмових ІмпульсІв за умовами експериментІв складав 22÷25 кГц з амплІтудами сигналІв I30÷I50 кА.

Другий варІант ІндукторноІ системи, яка дозволяла тучне створювання потрІбних межних умов для вектора напруженностІ магнІтного поля, був виконаний з двох плоских одновиткових соленоІдІв. ЦІ соленоІди розмІщувались паралельно. МІж ними ставились двІ пластини з мІдноІ фольги.

За допомогою даноІ системи також пробивались отвори у пластинах згІдно формІ заглиблень у диелектрику мІж ними. При виконаннІ умов, одержаних раніше у главІ першІй, мала мІсце достатньо висока ефективнІсть здІйснення модельованноІ технологІчноІ операцІІ.

АмплІтуда струму в ІмпульсІ - I25 кА, частота - I8.52 кГц.

В цІлому, здІйсненІ експериментальнІ дослІдження пІдтвердили головнІ висновки теорІІ І продемонстрували високІ потенцІйнІ можливостІ дослІджених Індукторних систем для штампування виробІв з заготІвель, якІ являютья"прозорими" для дІючих полІв.

У четвертІй главІ дисертацІІ теоретично дослІдженІ поля та сили у диелектриках пІд час дІІ струмових ІмпульсІв малоІ тривалостІ.

ЦІ дослІдження мають наукове та практичне значення з слІдуючих причин: а/необхІднІсть пІдвищення електричноІ мІцностІ ІзоляцІІ високовольтного обладнання; б/ створювання нових методІв обробки диелектричних матерІалІв /аналогІчних магнІтноІмпульсним для металІв/.

У своІх роботах акад.Іоффе А.Ф. вІдзначав, що пластичне дефор-

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

мування чи механічне руйнування є найбільш вірогідний процес, який попереджує електричний пробій твердих диелектриків. Подалі ця гипотеза знайшла експериментальне підтвердження у роботах його учнів.

При проведенні теоретичних досліджень, саме ця, особливість ефекту взаємодії короткочасних потужних електричних полів з диелектриками визивала найбільший інтерес, тому що у перспективі ця особливість, на нашу думку, може відкрити принципово нові можливості для створювання методів виробництва різних деталей з диелектричних матеріалів.

У даній главі освічені результати теоретичних досліджень "ударного" збудження короткочасних потужних імпульсів електричного поля /час дії менше статичного часу запізнення при розвитку пробою у диелектрику/.

Одержані аналітичні вирази для напруженностей збуджених полів та, відповідно, електродинамічних зусиль.

Розраховані головні характеристики процесів у електротехнічних системах різної конструкції, де принципово може мати місце ефект "ударного" збудження електричного поля, а саме: а/диелектрична пластина на металевій підложці; б/ площинні провідники, між якими розміщені різні диелектрики.

Показано, що тиск випробують диелектрики, які поляризуються. Найбільші напруженності та максимальні зусилля, діючі на диелектрик, мають місце при збігу частот зовнішнього поля та "власних" частот поля, збудженного у диелектрику /частотний резонанс/.

Чисельні оцінки досліджених процесів показали можливість появи значних сил тиску, які обумовлені електричним навантаженням. Під дією цих сил можлива пластична деформація чи руйнування диелектричних взірців.

Результати проведених дослідженнь лягли у основу запропонованого та захищеного авторським свідоцтвом способу обробки матеріалів за допомогою "ударного" збудження електричних полів малої тривалості.

ЗАКІНЧЕННЯ.

Головний результат дисертаційної роботи є пропозиція, теоретичне обгрунтування та експериментальне підтвердження нового напрямку у розвитку магнітноімпульсної технології обробки тонкостінних та поганопроводячих металевих виробів, який містить формування заданого простірно-часного розподілу напруженності магнітного поля у заготівлі, з якої формується виріб.

Більш детально, сукупність висновків дисертаційної роботи можна подати слідуючими положеннями.

1. Розвинуті спрощені теоретичні моделі, які дозволяють опис електроманітних процесів у складних індукторних системах з двох соленоідів, між якими розміщені тонкостінні провідники. Одержані умови практичної реалізації ефективних режимів для складних індукторних систем. Показана доцільність використання низькочастотних полів. Проведена оцінка взаємного впливу джерел поля.

2. Запропоновано та обгрунтовано способи магнітноімпульсної обробки тонкостінних та поганопроводячих металів.

3. Сформульовані рекомендації з підвищення ефективності складних індукторних систем. Показано, що використання соленоідів, "прозорих" для діючих полів, значно підвищує сили магнітного тиску.

4. Розвинуті аналітичні наближення у розрахунках, адекватно подаючі електромагнітні процеси у реальних конструкціях складних індукторних систем різної геометрії. Проведено уточнення головних положень, які були одержані за допомогою ідеалізованих модельних подань.

ДослІдженІ особливостІ систем, якІ мають цІлиндричну геометрІю. У лІнІйному наближеннІ одержана аналІтична оцІнка доданка, що вІдрІзняє розрахунковІ результати для площинних та цІлиндричних конструкцІй.

5. Запропоновано та обгрунтовано використання бІметалевих обмоток соленоІдІв у складних Індукторних системах, що дозволяє значно пІдвисити ефективнІсть магнІтноІмпульсного методу дІ на металевІ заготІвлІ.

6. ПроведенІ оцІнки "крайнІх" можливостей складних Індукторних систем. Зроблено порІвняння з показниками дІйностІ традицІйних схем реалІзацІІ МІОМ. СформульованІ переваги методу, який припускає синтез полІв з заданою формою розподІлу.

7. Запропонований та обгрунтований спосІб, що дозволяє роздІлити бІметалевІ провІдники за допомогою складних Індукторних систем.

8. РозвинутІ аналІтичнІ методи теоретичного дослІдження електродинамІчних процесІв при пересуваннІ тонкостІнних провІдникІв за дІєю магнІтного поля. ЗробленІ оцІнки справедливостІ використання лІнІйного наближення у виразу напруженностІ магнІтного поля, збудженого пІд час руху провІдника.

9. За допомогою методу обурення проаналІзовано проникнення поля крІзь тонкІ феромагнІтнІ пластини. ОдержанІ умови, якІ визначають однаковІсть екрануючих властивостей феромагнІтних та неферомагнІтних провІдникІв.

Умова однаковостІ дозволяє у розрахунках складних Індукторних систем для деформування феромагнІтних заготІвель використовувати спІввІдношення, якІ були одержанІ для неферомагнІтних металІв.

У лІнІйному наближеннІ дослІджена динамІка тонкостІнних феромагнетикІв за дІєю проникаючих полІв. СвІченІ особливостІ процесу.

10. Розроблено стенд для експериментальних дослІджень електромагнІтних процесІв у площинних складних Індукторних системах з нерухомими провІдниками. Експерименти, якІ були проведенІ за допомогою цього стенду, пІдтвердили головнІ положення теорІІ про шляхи пІдвищення ефективностІ складних Індукторних систем для деформування "прозорих" металевих заготІвель.

11. ПроведенІ експериментальнІ дослІдження штампування виробІв з мІдноІ фольги, товщиною $5 \cdot 10^{-5}$ м, за допомогою Індукторних систем, синтезуючих магнІтнІ для заданоІ простІрно-часноІ геометрІІ. ПоказанІ високІ потенцІйнІ можливостІ та сформульованІ рекомендацІІ з використання запропонованих конструкцІй Індукторних систем для штампування виробІв з заготІвель, "прозорих" для дІючих полІв.

12. ВиконанІ теоретичнІ дослІдження процесІв "ударного" збудження короткочасних електричних полІв у диелектриках. Показано, що у випадку частотного резонансу зовнІшнього та збудженого полІв можлива поява достатньо високих електричних напруженностей та, як слІдство, значних механІчних зусиль у диелектриках, якІ поляризуються.

ЗробленІ оцІнки показали, що зусилля, якІ обумовленІ електричним навантаженням, за визначними умовами можуть привести до пластичноІ деформацІІ та навІть руйнування диелектрикІв. ОдержанІ результати мають значення для аналІзу умов роботи ІзоляцІІ типових струмоведучих елементІв високовольтних Імпульсних пристроІв.

13. Запропонований та обгрунтований спосІб обробки диелектричних матерІалІв за допомогою сил тиску короткочасних електромагнІтних полІв. Розроблений варІант технІчного використання /виконання/ запропонованого способу. ДанІ рекомендацІІ з удосконалення можливих технІчних рІшень для практичного здІйснення способу обробки диелектрикІв.

14. По результатам проведених дослідженнь розробленІ та упровадженІ у виробництво ефективнІ конструкцІї індукторних систем для здійснення технологічних операцій з виготовлення виробів різної номенклатури.

Характер результатів дисертації. На погляд автора, одержанІ результати можна кваліфікувати як науково обґрунтованІ технічнІ рішення, впровадження яких вносить значний вклад в прискорення науково-технічного прогресу.

Особистий внесок. ГоловнІ результати дисертації одержанІ особисто її автором.

Так, у публікаціях із співавторами /скрім [1]/ особисто автором дисертації запропоновані фізико-математичні моделі процесів, схеми практичної реалізації експериментів, особисто виконанІ всі обчислення та сформульованІ висновки по розрахункам та вимірюванням, особисто написанІ тексти публікацій. В [1] автору дисертації належить огляд польових методів розрахунку.

У винаходах /скрім [27,28]/ автором дисертації обґрунтована працездатність предметів винаходів. В [27] автору належить обґрунтування можливості підвищення к.к.д. індуктора, в [28] - розрахунки головних вузлів установки.

Автор дисертації брав безпосередню участь у всіх експериментах, поданих у дисертаційній роботі.

Основні матеріали дисертаційної роботи освічені в наступних публікаціях:

1/ Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ф., Горин Л.Д., Решетников В.В., Хименко Л.Т. Технические характеристики, области применения и инструмент магнитноимпульсных установок.- Деп. ЦНТИ "Поиск", ПТО, 1990, №1.

2/ Батыгин Ю.В., Хименко Л.Т. Электромагнитные процессы в материалах с низкой электропроводностью при силовом воздействии импульсного поля.- Тезисы докл. II Всесоюзной научно-технической

конф. "Использование импульсных источников энергии в промышленности", Харьков, 1985, с.218-219.

3/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Решетников В.В., Хименко Л.Т. Анализ и синтез магнитных полей в специальных индукторных системах.- Деп. ЦНТИ "Поиск", ПТО, 1988, №7.

4/ Батыгин Ю.В., Лопатко И.Д., Пряницкая В.В. Решение некоторых задач теории проникновения и силового воздействия магнитных полей на тонкостенные проводники.- Библ.указатель ВИНИТИ. Депонированные научные работы. 1988, №11/205/, с.246.

5/ Батыгин Ю.В., Хименко Л.Т., Цетинская И.И. Магнитное поле в системе из двух соленоидов, разделенных тонкостенными проводниками.- Техническая электродинамика, 1990, с.3-8.

6/ Батыгин Ю.В., Легеза А.В., Решетников В.В., Хименко Л.Т. Взаимное влияние тонких параллельных соленоидов, разделенных тонкими металлическими экранами.- Деп.ЦНТИ "Поиск", ПТО, 1989, №7.

7/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Хименко Л.Т. Способ магнитноимпульсной обработки металлических заготовок.- А.с. № 1490792.

8/ Батыгин Ю.В., Решетников В.В., Хименко Л.Т. Расширение и сжатие тонкостенных металлических оболочек в поле коаксиальных соленоидов.- Деп.ЦНТИ "Поиск", ПТО, 1989, №7.

9/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Хименко Л.Т. О разделении биметаллических проводников с помощью магнитных полей.- Тез.докл. Всесоюзной конф. "Современное состояние и проблемы, перспективы энергетики и технологии в энергостроении", г.Иваново, 1989, т.1, с.45-46.

10/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Хименко Л.Т. Способ обработки металлических заготовок.- А.с. № 1557790.

11/ Батыгин Ю.В., Решетников В.В., Ушаков В.М., Хименко Л.Т. Электромагнитные процессы в цилиндрической индукторной системе

из двух коаксиальных соленоидов, разделенных тонкостенными проводящими оболочками.– Деп. ЦНТИ "Поиск", ПТО, 1990, №4.

12/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Очеретный В.М., Решетников В.В., Хименко Л.Т. Способ обработки металлических заготовок.– А.с. № 1605376.

13/ Батыгин Ю.В., Сапелкин С.А., Хименко Л.Т. Электродинамические и тепловые процессы в тонких биметаллических рабочих соленоидов.– Техническая электродинамика, 1991, №1, с.3-8.

14/ Батыгин Ю.В. Движение и деформирование проводников в магнитном поле.– Техническая электродинамика, 1989, №3, с.15-21.

15/ Батыгин Ю.В., Демидова С.А., Хименко Л.Т. Аналитическое интегрирование уравнений поля в движущемся тонкостенном проводнике. – Техническая электродинамика, 1990, №1, с.9-15.

16/ Батыгин Ю.В., Хименко Л.Т., Шетинская И.И. Аналитическое описание электродинамических явлений в неподвижных и движущихся тонкостенных ферромагнитных проводниках.– Библ. указатель ВИНИТИ. Депонированные научные работы. 1989, №5/281/, с.185.

17/ Батыгин Ю.В. Расчет распределения магнитного поля в тонкостенной ферромагнитной пластине методом возмущений.– Электричество, 1990, №2, с.78-81.

18/ Батыгин Ю.В., Изотов О.В., Решетников В.В., Хименко Л.Т. Аналитическое решение задачи о распределении магнитного поля в тонкостенной ферромагнитной пластине.– Деп. ЦНТИ "Поиск", ПТО, 1988, №12.

19/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Легеза А.В., Решетников В.В., Хименко Л.Т. Стенд для экспериментальных исследований процессов диффузии электромагнитных полей сквозь проводящие экраны.– Деп. ЦНТИ "Поиск", ПТО, 1989, №4.

20/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Легеза А.В., Решетников В.В., Хименко Л.Т. Экспериментальные исследования возможностей магнитно-

импульсного метода для деформирования тонких металлических пластин.- Техническая электродинамика, I990, №5, с.I5-I9.

2I/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Хименко Л.Т. Экспериментальные исследования процессов деформирования тонкостенных проводников магнитноимпульсным методом.- Тез.докл. Всесоюзного совещания "Теоретические и технологические аспекты создания и применения силовых импульсных систем", "Импульс-90", г.Караганда, I990, с.I77-I79.

22/ Батыгин Ю.В. Механические усилия в твердых диэлектриках при воздействии быстроизменяющихся магнитных полей.- Электричество, I989, №8, с.84-86.

23/ Батыгин Ю.В., Сапелкин С.А. Поля и силы в диэлектриках при воздействии токовых импульсов малой длительности.- Библ.указатель ВИНИТИ. Депонированные научные работы.I988, №II/205/, с.245.

24/ Батыгин Ю.В., Хименко Л.Т., Давление на диэлектрик в быстроизменяющемся магнитном поле.- Тез. докл. Всесоюзной конф. "Современное состояние и проблемы,перспективы энергетики и технологии в энергостроении", г.Иваново, I989, т.I, с.45-46.

25/ Батыгин Ю.В., Сапелкин С.А. Электрическое поле между плоскими параллельными проводниками, разделенными разнородными диэлектриками.- Электричество, I989, №2, с.5I-55.

26/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Хименко Л.Т. Способ обработки материалов.- А.с. № I36I8I5.

27/ Батыгин Ю.В., Михайлов В.М., Хименко Л.Т. Индуктор для магнитноимпульсной обработки металлов.- А.с. № 44I750.

28/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Горкин А.Л., Лысенко И.М., Хименко Л.Т. Магнитномипульсная установка с выносным индуктором.- А.с. № I478480.

29/ Батыгин Ю.В., Коган В.И., Токарев Е.В., Химснко Л.Т. Магнитное поле концентратора с короткой деталью.-//Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1974, №4, с.112-117.

30/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Решетников В.В., Химснко Л.Т. Диффузия встречных магнитных полей в биметаллические проводники.-//Деп. ЦНТИ "Поиск", ПТО, 1988, №7.

31/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Химснко Л.Т. Деформирование тонкостенных металлов силами импульсного магнитного поля в сложных индукторных системах.- Тез. докл. Всесоюзного совещания "Вопросы теории и практики МИОМ", Самара, октябрь 1991, с.4-5.

32/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Решетников В.В., Химснко Л.Т. Способ магнитноимпульсной обработки металлических заготовок.-А.с. № 1771126.

33/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Решетников В.В., Химснко Л.Т. Способ магнитноимпульсной обработки металлических заготовок.-А.с. № 1741354.

34/ Батыгин Ю.В., Химснко Л.Т. Эффективность деформирования металлических оболочек в специальных индукторных системах.- В сб. "Современное состояние и перспективы развития МИОМ". Изд. КУАИ, Самара, 1991, с.4-10.

35/ Батыгин Ю.В., Горкин Л.Д., Решетников В.В., Химснко Л.Т. Экспериментальное обоснование перспективности магнитноимпульсного метода для производства печатных плат в электротехнике.- //Техническая электродинамика, 1992, №6, с.44-49.

36/ Батыгин Ю.В. Проникновение поля сквозь тонкие листовые заготовки в индукторных системах магнитноимпульсных установок.-//Техническая электродинамика, 1993, №1, с.20-26.

ВІдповІдальний випусковий – к.ф-м.н., доц. Геворкян Ю.Л.

ПІдп. до друку 22.12.93. Формат 60х84 1/16. ПапІр друк. Друк офсетний. Умовно друк. арк. 2.0. Умовно фарб.- вІдб. 2.0. ОблІк. вид. арк. 2.0. Тираж 120 прим. Зам. № 138. Безплатно.

Ротапринт ІРЕ АН УкраЇни
Харків-85, вул. Ак. Проскури, 12.

46034

Ав 29.295