

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Панасенко Олесь Тарасович

УДК 621.318.37 : 537.856

**УДОСКОНАЛЕННЯ ІНДУКТОРІВ-СТРУМОПРОВОДІВ
НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ЗУСИЛЬ**

Спеціальність 05.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2003

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі інженерної електрофізики Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Михайлов Валерій Михайлович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри інженерної електрофізики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Подольцев Олександр Дмитрович
Інститут електродинаміки НАН України, м.Київ,
провідний науковий співробітник;

доктор технічних наук, професор
Кононов Борис Тимофійович
Харківський військовий університет
Міністерства оборони України,
професор кафедри електропостачання.

Провідна установа: Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”
Міністерства освіти і науки України, м. Київ

Захист відбудеться “18” грудня 2003 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “30” жовтня 2003 р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради

Набока Б.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Масивні спіральні індуктори, розташовані над оброблюваною пластиною, є навантаженням електрофізичних установок для одержання сильних імпульсних магнітних полів. Технологічні застосування спіральних індукторів включають магнітно-імпульсну обробку металів (МІОМ) і пресування порошків, прискорення провідників і виробництво друкованих плат, використання в системах протизлединіння, пристроях індукційно-динамічного привода й одноударної клепки, для одержання отворів у товстолістових заготівках і пакетах, а також при магнітно-еластоімпульсному штампуванню й індукційному загартуванню. На практиці потрібно виконувати операції за схемою “листо́ве формування” (складальні, розділові і зварювальні операції, формування, калібрування, відбортовка, подовжня і поперечна зігвка, комбіновані операції) вузьких пластин прямокутної форми значної довжини. Виконання операцій формування і прискорення вузьких протяжних пластин за допомогою спіральних плоских індукторів звичайної конструкції викликає труднощі. Спіральні індуктори повинні мати в цьому випадку форму кола, що описує протяжний прямокутник, що робить їх громіздкими, важкими, дорогими і малоефективними. Площа оброблюваних спіральними індукторами заготівок у залежності від енергоємності магнітно-імпульсної установки (МІУ) не перевищує $0,2 \text{ м}^2$. Тому запропоновано застосування спеціальної індукторної системи, що раніше не використовувалася, названої індуктором-струмопроводом. Індуктор-струмопровід виконаний із протяжних масивних струмопроводів, з’єднаних між собою таким чином, що струм у них протікає по спіралі. Викликає інтерес дослідження розподілу імпульсного електромагнітного поля й електродинамічних зусиль, створюваних в оброблюваній пластині спіральним індуктором-струмопроводом, з метою одержання рекомендацій з конструктивного виконання як одновиткових, так і багатовиткових індукторів-струмопроводів, що забезпечують ефективне магнітно-імпульсне формування.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася відповідно до науково-дослідної роботи “Розробка технічної документації електрофізичної технологічної лінії для пресування з вугільного пилу брикетів і створення дослідного зразка лінії” (держ. реєстр. № 0103U005347). При проведенні науково-дослідної роботи безпосередньо здобувачем виконано: обґрунтування вибору магнітно-імпульсного методу для пресування вугільного пилу на базі аналізу конструкцій існуючих електрофізичних установок для пресування порошкових матеріалів; обґрунтування можливості пресування й одержання брикетів високої щільності з вугільного пилу за допомогою розрахунку просторово-часового розподілу імпульсних електродинамічних зусиль у пластині, що є пуансоном; вибір матеріалів шин індуктора-струмопровода, що підвищують його ресурс; запропонована конструкція індуктора, що забезпечує необхідний рівень зусиль у

пластині, технологію зборки і розташування його в технологічній лінії.

Дисертація виконувалася відповідно до діючого координаційного плану “Наукові основи створення нових енергозберігаючих технологій, машин і апаратів для харчової промисловості” Міністерства освіти і науки України (держ. реєстр. № 0197U001890).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення індукторів-струмопроводів на основі аналізу імпульсного електромагнітного поля й електродинамічних зусиль, що діють на провідну пластину, з урахуванням початкових умов, неоднорідної структури матеріалу і конструкції, складної форми перерізу шин індуктора і параметрів ємнісного нагромаджувача енергії, що розряджується на індуктор.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих конструкцій індукторних систем для плоского штампування і методів розрахунку розподілу електромагнітного поля в індукторах і струмопроводах;

- сформулювати і вирішити задачу розрахунку імпульсного електромагнітного поля в системі індуктор-струмопровід – пластина з урахуванням початкових умов, неоднорідної структури матеріалу і конструкції, складної форми перерізу шин індуктора і параметрів ємнісного нагромаджувача енергії, що розряджається на індуктор;

- дослідити вплив зазорів між індуктором і пластиною і витками індуктора на розподіл струму в індукторі-струмопроводі й електродинамічних зусиль у пластині;

- дослідити вплив форми перерізу шин індуктора на імпульсне розподілення струму й зусиль в системі індуктор-струмопровід – пластина;

- дослідити вплив неоднорідної структури матеріалу і конструкції індуктора-струмопровода на розподіл струму в ньому, а також електродинамічних зусиль, що діють на пластину;

- виконати експериментальну перевірку методики розрахунку імпульсного електромагнітного поля в системі одновитковий індуктор-струмопровід – пластина;

- розробити практичні рекомендації з вибору розмірів і форми перерізу шин і зазорів у системі індуктор-струмопровід – пластина, а також структури матеріалу і конструкції індуктора-струмопровода.

Об’єкт дослідження – розрядний контур магнітно-імпульсної установки з ємнісним нагромаджувачем енергії і навантаженням у виді системи індуктор-струмопровід – пластина.

Предмет дослідження – електромагнітне поле й електродинамічні зусилля в системі індуктор-струмопровід – пластина.

Методи дослідження. Перехідні процеси в розрядному контурі МІУ розраховувалися методами теорії електромагнітного поля і теорії кіл, інтегродиференціальні рівняння розв’язувалися аналітичними і чисельними

методами. Експериментальні дослідження проводилися на фізичній моделі, імпульсне магнітне поле вимірялося індукційним перетворювачем.

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблено методику розрахунку імпульсного електромагнітного поля й електродинамічних зусиль у системі індуктор-струмопровід – пластина на основі використання імпульсної і перехідної провідності. Для системи з одновитковим індуктором отримане аналітичне рішення інтегродиференціального рівняння щільності струму шляхом застосування зображень по Лапласу і формули Шмідта.

Встановлено і вивчено можливість формування заданого просторового розподілу зусиль у пластині за допомогою складеного індуктора-струмопровода, окремі шини якого виконані з матеріалів з різною електропровідністю. У результаті дослідження розподілу електродинамічних зусиль, створюваних у пластині, показана можливість збільшення поверхневої щільності повної сили в 2,5 рази за рахунок використання індуктора, виконаного із шин П-подібного перерізу.

Практичне значення одержаних результатів. Результати, отримані в роботі, знайшли практичне застосування у розробці електрофізичної технологічної лінії для пресування брикетів з вугільного пилу, а також в лабораторії МІОМ кафедри інженерної електрофізики НТУ “ХПІ” при розробці спеціальних індукторних систем, призначених для формування протяжних плоских заготовок.

Результати дисертаційної роботи використовуються на кафедрі інженерної електрофізики НТУ “ХПІ” для навчальної підготовки фахівців за спеціальностями “Техніка і електрофізика високих напруг” і “Нетрадиційні джерела енергії” у дисциплінах: “Методи моделювання електричних і магнітних полів” та “Розрахунок інструмента електрофізичних технологічних установок”.

Результати дисертаційної роботи можуть бути застосовані для аналізу розподілу електромагнітного поля й електродинамічних зусиль, що виникають у протяжних системах провідників складної просторової конфігурації при розряді ємнісного нагромаджувача енергії.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем особисто зроблений аналіз конструкцій і методик розрахунку індукторних систем для листового формування протяжних прямокутних пластин; розроблена методика розрахунку електродинамічних зусиль у системі індуктор-струмопровід – пластина, виконана її алгоритмізація і складена програма на сучасній мові програмування Fortran-95; винайдена і досліджена можливість формування необхідного просторового розподілу зусиль за допомогою складеного індуктора-струмопровода; досліджений вплив зазорів і форми перерізу шин на розподіл поверхневої щільності сили на поверхні пластини; отримані і проаналізовані усі чисельні результати, наведені в роботі; проведена експериментальна перевірка методики розрахунку зусиль; сформульовані практичні рекомендації з конструювання індукторів-струмопроводів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи повідомлені й обговорені на наступних науково-технічних конференціях:

- “Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці” (Львів, 1999р.);
- “Проблеми сучасної електротехніки” (Київ, 2000 і 2002р.).

Публікації. Результати дисертації надруковано у 6 публікаціях, серед яких 2 виконано без співавторів, у тому числі: 4 статті у наукових фахових журналах і 2 статті у збірниках наукових праць.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, та двох додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 174 сторінки, 28 ілюстрації по тексту і 12 ілюстрацій на 12 сторінках; 4 таблиці по тексту і 14 таблиць на 14 сторінках; список використаних літературних джерел з 112 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета і задача досліджень. Викладено основні наукові результати, що отримані в роботі.

У першому розділі проведений огляд конструкцій індукторних систем для плоского штампування й аналіз найбільш ефективних математичних моделей, призначених для розрахунку електромагнітного поля індукторних систем і струмопроводів. Показано технологічні можливості плоских індукторних систем для виконання операцій листового формування і пресування порошків.

Проведений аналіз моделей одно- і двомірного електромагнітного поля індукторних систем дозволив припустити, що для формулювання задачі розрахунку плоского електромагнітного поля в системі індуктор-струмопровід – пластина (ІСП) краще за інші підходить математична модель, котра базується на інтегродиференціальному рівнянні щільності струму.

На рис. 1 показаний переріз і розміри одновиткової системи, призначеної для деформації протяжних прямокутних пластин. Система являє собою струмопровід 1 у виді двох паралельних шин прямокутного перерізу з прямим і зворотним струмом, замкнених на одному кінці і підключених на іншому до ємнісного нагромаджувача енергії (ЄНЕ). Тому надалі індуктори подібного типу будемо називати індукторами-струмопроводами. Така назва виправдана також і прийнятою в даній роботі розрахунковою моделлю. Індуктор-струмопровід розташовується над оброблюваною провідною заготовкою 2 (пластиною), у якій індуктуються вихрові струми.

Вирази для індуктивності й внутрішнього перехідного опору провідника прямокутного перерізу, розташованого поряд із провідною площиною, при ризькому поверхневому ефекті наведені в монографії Г.А. Шнеерсона, а математична модель

провідника прямокутного перерізу, з відомим законом зміни струму, над провідною пластиною – у монографії О.Д. Подольцева.

Проведений аналіз дозволив зробити висновок про необхідність дослідження розподілу імпульсного електромагнітного поля і зусиль у системі ІСП з метою вироблення рекомендацій з конструювання індукторів-струмопроводів, призначених для деформації протяжних пластин прямокутної форми завтовшки до 5 міліметрів.

У другому розділі описана математична модель плоскопаралельного електромагнітного поля системи індуктор-струмопровід – пластина.

Основні допущення, прийняті в роботі: довжина індуктора-струмопроводу l значно більше його ширини, тому магнітне поле системи ІСП близьке до плоского усюди, за винятком країв, вплив яких не враховуємо; співвідношення геометричних розмірів системи ІСП і тривалість у ній імпульсів, що генеруються, дозволяє прийняти умови квазістаціонарності для електромагнітних процесів; провідники системи є немагнітними, нерухомими і мають незмінні в часі електрофізичні характеристики.

Рис. 1. Розрахункова конструкція системи одновитковий ІСП:

1 – індуктор-струмопровід;

2 – пластина.

Інтегродиференціальне рівняння, що описує розподіл напруженості електричного поля в системі ІСП, має вигляд:

$$E(P,t) + \frac{\mu_0}{2\pi} \int_S \gamma(M) \frac{\partial E(M,t)}{\partial t} \ln \frac{1}{r_{PM}} dS_M = \begin{cases} \frac{u(t)}{2l}, & P \in S_1; \\ 0, & P \in S_2, \end{cases} \quad (1)$$

де $u(t)$ – напруга, що подана на індуктор-струмопровід;

r_{PM} – відстань між точкою спостереження P і поточною точкою M ;

S – сумарний переріз системи: $S = S_1 + S_2 + S'_1 + S'_2$;

S_1, S_2 – симетричні щодо осі Oy праві половини перерізу відповідно індуктора-струмопроводу і пластини;

S'_1, S'_2 – ліві половини тих же перерізів;

l – довжина системи ІСП;

μ_0 – магнітна проникність вакууму.

Сума $S_1 + S_2$ утворює розрахункову область перерізу системи.

Подібні інтегродиференціальні рівняння використовувались раніше у роботах О.В. Тозоні, Е.В. Колеснікова, Є.І. Петрушенко та інших для аналізу електромагнітного поля струмопроводів, що з'єднують джерело напруги з навантаженням.

Початкова умова:

$$E(P,0) = 0. \quad (2)$$

У роботі запропонована методика, що дозволяє виконувати розрахунок поля

системи ІСП в два етапи завдяки використанню інтегральних електромагнітних характеристик.

На першому етапі інтегродиференціальне рівняння (1) (після симетризації ядра) на просторовій сітці перетворюється в систему звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР), що, у свою чергу, перетворюється в систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) із симетричною матрицею в просторі зображень по Лапласу. Для рішення СЛАР застосована формула Шмідта. Потім, у результаті переходу від зображень до оригіналу, отриманий наступний вираз, що описує розподіл напруженості електричного поля в провідниках системи ІСП:

$$E^*(P_i, t^*) = \frac{u_1^*}{2l^*} \left[C_P - \frac{1}{\sqrt{\gamma^*(P_i) \Delta S^*(P_i)}} \sum_{k=1}^N b'_k \varphi_k(P_i) \exp\left(-t^*/\lambda_k\right) \right], \quad (3)$$

де $u_1^* = u_1/U_\delta$;

$$C_P = \begin{cases} 1, & P \in S_1; \\ 0, & P \in S_2; \end{cases}$$

$\lambda_k, \varphi_k(P_i)$ – відповідно власні значення і проекції власних векторів, що

задовольняють системі рівнянь $\sum_{k=1}^{k=N} a_{ik}^* \varphi_k(M_k) - \lambda_k \varphi_k(P_i) = 0, \quad i = \overline{1, N}$; a_{ik}^* –

елементи квадратної матриці коефіцієнтів розміром $N \times N$.

З викладеного випливає, що на відміну від відомих методик, зроблене послідовне перетворення вихідного інтегродиференціального рівняння (8) спочатку в систему ЗДР на просторовій сітці, а потім у СЛАР із симетричною матрицею в просторі зображень по Лапласу, для рішення якої застосована формула Шмідта. Вираз (3) є аналітичним рішенням інтегродиференціального рівняння (1) з нульовою початковою умовою (2).

Використано три інтегральні характеристики: операторна провідність $Y(p)$, імпульсна провідність $y(t)$ і перехідна провідність $i_1(t)$. Безрозмірна перехідна провідність $i_1^*(t^*) = i_1(t^*)/G$ (G – провідність індуктора-струмопровода постійному струму) розраховується за формулою:

$$i_1^*(t) = \frac{R^2}{b_1 \cdot d_1} \sum_{k=1}^N \left(b'_k \right)^2 \left[1 - \exp\left(-t^*/\lambda_k\right) \right], \quad (4)$$

а імпульсна провідність $y^*(t^*)$ [$y_\delta = U_\delta / (R \cdot \mu_0)$] – за формулою:

$$y^*(t^*) = \frac{u_1^*}{2l^*} \sum_{k=1}^N \frac{\left(b'_k \right)^2}{\lambda_k} \exp\left(-t^*/\lambda_k\right). \quad (5)$$

Вирази для складових вектора магнітної індукції знаходяться шляхом диференціювання векторного магнітного потенціалу і потім приводяться до безрозмірного виду з використанням базисних величин напруги, питомої електропровідності і відстані. Базисна величина індукції магнітного поля описується

формулою $B_6 = \mu_0 u_6 \gamma_6 / (2\pi)$.

$$B_x^*(P, t^*) = \int_S \gamma^*(M) E^*(M, t^*) \frac{l_y^* \overline{r_{PM}^*} - \overline{r_{PM'}^*}}{\overline{r_{PM}^*} \cdot \overline{r_{PM'}^*}} dS_M^* ; \quad (6)$$

$$B_y^*(P, t^*) = \int_S \gamma^*(M) E^*(M, t^*) \frac{l_x^* \overline{r_{PM'}^*} - \overline{r_{PM}^*}}{\overline{r_{PM}^*} \cdot \overline{r_{PM'}^*}} dS_M^* , \quad (7)$$

де $l_y^* = (y_P - y_M)/R$, $l_x^* = (x_P - x_M)/R$;

x_P, y_P – координати точки спостереження P ;

x_M, y_M – координати поточної точки M .

Багатовитковий індуктор-струмопровід являє собою $2w$ довгих рівнобіжних шин незмінного перерізу (w – число витків індуктора), з'єднаних між собою таким чином, що струм протікає по спіралі (рис. 2).

Рис.2. Розрахункова конструкція системи багатовитковий ІСП:
1-5 – шини багатовиткового індуктора-струмопровода;
6 – пластина.

Уведемо напруги на витках u_i , $i=1,2,..w$. Повний переріз системи S є сумою правих та лівих, відносно Oy , перерізів шин індуктора S_1, S'_1 і пластини S_2, S'_2 .

Задача визначення $E^*(P, t^*)$ в системі ІСП при підключенні індуктора до джерела одиничного імпульсу напруги, формулюється у вигляді системи рівнянь, що приведена до безрозмірного виду

$$E^*(P, t^*) + \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\partial E^*(M, t^*)}{\partial t^*} \gamma^*(M) \ln \frac{r_{PM'}^*}{r_{PM}^*} dS_M^* = \begin{cases} \frac{u_i^*}{2l^*}, & P \in S_1; \\ 0, & P \in S_2; \end{cases} \quad (8)$$

$$\int_{S_i} \gamma^*(M) E^*(M, t^*) dS_M^* - \int_{S_l} \gamma^*(Q) E^*(Q, t^*) dS_Q^* = 0; \quad (9)$$

$$l, i=1,2,..w; i \neq l; M \in S_i; Q \in S_l;$$

$$\sum_{i=1}^{i=w} u_i^* = 1. \quad (10)$$

Початкова умова (2) зберігається. Співвідношення (9) має смисл послідовного з'єднання витків і було сформульовано у роботі В.Н. Бондалетова із співробітниками.

На першому етапі розрахунку електромагнітного поля конструкції з багатовитковим індуктором-струмопроводом система рівнянь (8)-(10) після інтегрування по членах рівняння (8) за часом перетворюється на просторовій сітці в СЛАР $N+w$ порядку. Після знаходження $E^*(M, t^*)$ значення перехідної провідності системи розраховуємо по формулі

$$i_1^*(t^*) = w \frac{R^2}{b_1 \cdot d_1} \int_{S_i} \gamma^*(M) E^*(M, t^*) dS_M^* , \quad (11)$$

де інтегрування виконується по перерізу будь-якого витка. Збіг значень $i_1^*(t^*)$,

розрахованих для кожного витка індуктора-струмопроводу свідчить про правильність отриманих значень $E^*(M, t^*)$.

Другий етап запропонованої методики є спільним для одновиткових та багатовиткових систем ІСП. Він починається з розрахунку процесу розряду ЄНЕ на індуктор-струмопровід, розташований над пластиною (рис. 1), і описується системою двох рівнянь для струму і напруги на індукторі

$$r_c^* i^*(t^*) + L_c^* \frac{di^*(t^*)}{dt^*} + \frac{1}{C^*} \int_0^{t^*} i^*(\tau^*) d\tau^* - U_0^* + u^*(t^*) = 0 \quad (12)$$

$$i^*(t^*) - \int_0^{t^*} y^*(t^* - \tau^*) u^*(\tau^*) d\tau^* = 0 \quad (13)$$

або

$$i^*(t^*) - i_1^*(t^*) u^*(0) - \int_0^{t^*} i_1^*(t^* - \tau^*) \frac{du^*(\tau^*)}{dt^*} d\tau^* = 0, \quad (14)$$

де r_c^*, L_c^*, C^*, U_0^* , – приведені до безрозмірного виду параметри ЄНЕ, відповідно, його активний опір, індуктивність, ємність і початкова напруга, до якої заряджені конденсатори. Інші змінні такі: $i^*(t^*)$, $u^*(t^*)$ - струм у розрядному контурі і напруга на індукторі; $u^*(0)$ - напруга на індукторі в початковий момент часу; $y^*(t^*)$, $i_1^*(t)$ - імпульсна і перехідна провідність системи ІСП. Базисні величини для активного опору, індуктивності та ємності ЄНЕ мають вид $r_\delta = 1/(R\gamma_\delta)$; $L_\delta = R\mu_0$; $C_\delta = R^3\mu_0\gamma_\delta^2$; $E_\delta = U_\delta/R$, а для струму в розрядному контурі – $I_\delta = u_\delta R\gamma_\delta$.

По отриманим у результаті вирішення системи рівнянь значенням струму і напруги за допомогою інтеграла Дюамеля розраховані розподіл напруги по витках індуктора-струмопроводу і розподіл напруженості електричного поля в товщі провідників $E_c^*(P, t^*)$:

$$E_c^*(P, t^*) = u^*(t^*) E_1^*(P, 0) + \int_0^{t^*} u^*(\tau^*) \frac{dE_1^*(P, t^* - \tau^*)}{dt^*} d\tau^*. \quad (15)$$

де $E_1^*(P, t^*)$ – знаходиться за формулою (3), або є рішенням СЛАР (8) – (10).

У третьому розділі досліджене електромагнітне поле в індукторі-струмопроводі й електродинамічні зусилля в пластині при розряді ємнісного нагромаджувача енергії.

При розряді ЄНЕ *у-складову* повної сили, що діє на пластину, розташовану під індуктором, можна розрахувати за формулою

$$F_y(t) = 2l \int_{-d_2}^0 \int_0^{b_2} \gamma(P) E_c(P, t) B_x(P, t) dx dy. \quad (16)$$

Для дослідження розподілу зусиль, створюваних у пластині індуктором-струмопроводом, аналізується поверхнева щільність (ПЩ) *у-складової* повної сили, що характеризує інтегральне значення сили F_y по товщині, приведене до граничної поверхні пластини. Ця поверхнева щільність повної сили у безрозмірному

виді знаходиться за формулою

$$dF_y^*(x^*, t^*) = \int_{-d_2/d_1}^0 \gamma^*(P) E_c^*(P, t^*) B_x^*(P, t^*) dy^* . \quad (17)$$

Базисна величина ПЩ повної сили $P_0 = \mu_0 \gamma_0^2 U_0^2 / 2\pi$ має розмірність Н/м².

При магнітно-імпульсній обробці металів, як правило, використовуються індуктори-струмопроводи, що складаються із суцільних шин прямокутного перерізу. Були досліджені зусилля в системах ІСП з коробчатим і П-подібним профілем індуктора. На рис. 3 показані розміри перерізу системи П-подібний ІСП. Відносна товщина стінки шини дорівнювала відповідно $a/d_1=0,2$. Інші розміри системи такі: $b_1/d_1=2,0$; $b_2/d_1=5,0$; $d_2/d_1=0,5$; $h_1/d_1=0,1$. Індуктор-струмопровід П-подібного перерізу сприяє економії матеріалу і, разом з тим, є більш технологічним, тому що виготовляється з листа невеликої товщини.

Розташування індуктора-струмопровода П-подібного перерізу відповідно до рис. 3 сприяє збільшенню ПЩ повної сили на поверхні пластини в 2,5-1,4 рази при малих зазорах між шинами індуктора ($h/d_1 = 0,1-0,5$). На рис. 4 наведені графіки, що ілюструють збільшення ПЩ повної сили під П-подібним індуктором-струмопроводом (стовщені криві) порівняно з суцільним (тонкі криві). Пари кривих 1 відповідають відстані між шинами індуктора-струмопровода $h/d_1=0,1$; 2 – 0,5; 3 – 1,0; 4 – 2,0; 5 – 5,0. Інші розміри системи провідників залишилися незмінними. Усі величини на графіках, позначені символом *, є безрозмірними.

Рис. 3. Переріз розрахункової конструкції з П-подібним індуктором:

- 1 – П-подібний індуктор-струмопровід;
- 2 – пластина.

Рис. 4. Розподіл ПЩ повної сили, створюваної П-подібним індуктором

У четвертому розділі досліджений вплив провідності шин індуктора-струмопровода на розподіл електромагнітного поля й електродинамічних зусиль, що діють на пластину. У цьому розділі розглянуті складені і біметалічні індуктори-струмопроводи.

Складені індуктори-струмопроводи виконані з шин різної електропровідності. На відміну від відомих спіральних індукторів для плоского штампування, конструкція складеного індуктора-струмопровода є його особливістю. Розглядалися варіанти використання наступних матеріалів для виготовлення шин індуктора: титановий сплав ВТ5-1, сталі Ст3, Ст65Г, бронзи БрА5, КМц3-1 і латуні Л63, Л68, ЛК80-3, Л90, а також мідь. Розрахунки проводилися при наступних розмірах системи: $b_1/d_1=2,0$; $h/d_1=5,0$; $h_1/d_1=0,1$; $h_w/d_1=0,1$; $b_2/d_1=20,0$ і $d_2/d_1=0,5$.

Технологічно важливо при МІОМ, щоб розподіл ПЩ повної сили під індуктором-струмопроводом мав вигляд якомога більш близький до прямокутного, тому що саме в цьому випадку може бути забезпечена рівномірна обробка пластини в

робочій зоні індуктора.

У таблиці приведені відповідні рис. 5 значення відхилень ПЩ повної сили у відсотках для кожного витка від середнього значення по ширині індуктора-струмопроводу. Негативні значення відхилень свідчать про те, що ПЩ повної сили під витком нижче середньої по ширині індуктора, а позитивні – навпаки.

З метою досягнення найменшої осциляції ПЩ повної сили й, разом з тим, створення індуктора-струмопроводу з ресурсом більше чотирьох тисяч розрядів, була проаналізована значна кількість комбінацій матеріалів, дані з ресурсних випробувань яких наведені в роботах А.К. Талалаєва. У результаті пошуку такої оптимальної конфігурації складеного індуктора підвищеного ресурсу був обраний набір матеріалів шин, для яких показана крива 4 на рис. 5 і наведені відповідні значення відхилень ПЩ повної сили в таблиці.

Таблиця

Зміна середнього значення dF_y^* під витками складеного індуктора (%)*

Номер витка	Номер кривої							
	1		2		3		4	
1	Мідь	-17,17	Л90	-7,67	Л90	-5,03	Л68	-2,21
2	Мідь	6,91	БрА5	-0,63	БрА5	2,47	КМц	-0,05
3	Мідь	14,36	БрА5	9,06	Ст3	-2,83	Ст65Г	-1,57
4	Мідь	9,05	БрА5	1,67	БрА5	4,95	ЛК80	2,09
5	Мідь	-13,16	Л90	-2,42	Л90	0,44	Л63	1,74

* у порівнянні із середнім значенням по ширині індуктора ($x^*=2,5..7,9$)

В пластині під біметалевим індуктором-струмопроводом спостерігається незначне (до 8%) збільшення електродинамічних зусиль.

У п'ятому розділі описане виконання експериментальної перевірки методики розрахунку.

Описана в розділі 2 методика дозволяє розрахувати розподіл індукції магнітного поля не тільки в провідниках системи індуктор-струмопровід – пластина, але й у навколишнім просторі. Для перевірки розробленої методики розрахунку електромагнітного поля було проведено фізичне моделювання, у ході якого виконано вимір x - і y -складової індукції магнітного поля поблизу поверхні шини одновиткового індуктора-струмопроводу, розташованого над добре провідною пластиною.

Для виміру y -складової індукції магнітного поля (B_y) із трьох довгих мідних шин з розмірами перерізу $d_1 = 6$ мм, $b_1 = 60$ мм виготовлена система ІСП. Зазори в системі були такі $h = 30$ мм, $h_1 = 0,6$ мм. Індуктор підключався до генератора експонентно загасаючих синусоїдальних імпульсів (ГЗСІ).

Функціональна схема експериментальної установки показана на рис. 7, а. Параметри ГЗСІ були підібрані таким чином, щоб генератор видавав короткі

імпульси напруги з частотою 500 кГц і амплітудою 1000 В, безупинно з частотою повторення 10 Гц. У ГСЗІ комутацію забезпечено тиристорним ключем ТК.

Для виміру *x*-складової індукції магнітного поля (B_x) ті ж мідні шини індуктора були розміщені горизонтально над алюмінієвою пластиною. Зазори в системі були такі $h = 10$ мм, $h_1 = 11,8$ мм.

Рис.5. Розподіл ПЩ повної сили на поверхні пластини під складеним індуктором-струмопроводом

а б

Рис. 7. Функціональна схема установки і розміщення вимірювальних точок

Для виміру індукції магнітного поля виготовлений і прокалібрований індукційний перетворювач, що при частоті вимірюваного сигналу 500 кГц є самоінтегруючим.

Виміри струму в розрядному контурі проводилися за допомогою шунта, а сигнали з датчика і шунта реєструвалися одночасно на двох каналах цифрового осцилографа FLUKE 105B і потім зчитувалися з нього у вигляді текстового файлу. Під час вимірів живлення осцилографа здійснювалося від убудованих акумуляторних батарей. Розрахунок похибки вимірів показав, що вона не перевищує 10%.

Проведено виміри *y*-складової індукції магнітного поля в 20 точках (по 10 з кожної сторони, рис. 7, б) поблизу поверхні шини одновиткового індуктора-струмопровода, і *x*-складової індукції магнітного поля в 10 точках між шиною індуктора і пластиною. Середньоквадратичне відхилення експериментальних і розрахункових значень індукції складає 7,33% у першому випадку і 6,80% – у другому. Таким чином, підтверджена правильність запропонованої в роботі методики розрахунку.

Проведені в роботі дослідження дозволили розробити *практичні рекомендації* з конструювання індукторів-струмопроводів, що сформульовані виходячи з міркувань створення максимальних електродинамічних зусиль у пластині.

1. Для одновиткових індукторів-струмопроводів (рис. 1): ширину внутрішнього витка h/d_1 варто вибирати в межах від 1,0 до 5,0; висоту шини варто вибирати в 2 рази менше її ширини ($b_1/d_1 \leq 0,5$); при використанні біметалічної шини товщина мідного покриття повинна складати не більш 20% висоти витка; при необхідності використання індуктора з малою шириною внутрішнього витка ($h/d_1 \leq 0,5$) варто використовувати шину П-подібного перерізу, орієнтовану так, як показано на рис. 3.

2. Для багатовиткових індукторів-струмопроводів (рис. 2): рекомендації щодо ширини внутрішнього витка і товщини мідного покриття шин біметалічного індуктора зберігаються; висота шини повинна перевищувати в 2 і більше разів її

ширину ($b_1/d_1 \geq 2,0$); ширина міжвіткового зазору h_w/d_1 повинна бути настільки малої, наскільки це дозволить електрична міцність і товщина ізоляції витків; при використанні складеного індуктора-струмопроводу питома електропровідність матеріалів витків повинна зменшуватися від периферійних витків до центрального, при цьому електропровідність у сусідніх витків не повинна відрізнятися більше ніж у 2..3 рази.

На рис. 8, 9 показані можливі варіанти компонування індукторної системи з одновитковим і багатовитковим індуктором-струмопроводом.

ВИСНОВКИ

У дисертації на основі аналізу імпульсного електромагнітного поля й електродинамічних зусиль з урахуванням початкових умов, неоднорідності структури матеріалу, форми перерізу шин удосконалені конструкції індукторів-струмопроводів для магнітно-імпульсної обробки протяжних металевих пластин, що дозволяють створити заданий просторовий розподіл електродинамічних зусиль і збільшити їх у 2,5 рази.

1. Відомі конструкції індукторних систем недостатньо пристосовані для виконання листового формування протяжних прямокутних пластин. Відомі алгоритми розрахунку електромагнітного поля індукторних систем і струмопрово

Рис. 8. Конструкція системи з одновитковим індуктором-струмопроводом:

- 1 – струмопровід;
- 2 – ізоляція струмопровода;
- 3 – епоксидний компаунд;
- 4 – пластина;
- 5 – матриця;
- 6 – основа;
- 7 – стяжна шпилька;
- 8, 9 – діелектричні пластини.

Рис. 9. Конструкція системи з багатовитковим індуктором-струмопроводом:

- 1 – струмопровід;
- 2 – ізоляція струмопровода;
- 3 – захисна ізоляція;
- 4 – діелектрична пластина;
- 5 – оброблювана пластина;
- 6 – матриця;
- 7 – основа.

дів, сформульовані на основі рівнянь Максвелла в диференціальній формі, вимагають попереднього завдання інформації про закон зміни стороннього струму, що протікає в індукторі. Разом з тим, рішення задач у диференціальній постановці вимагає завдання граничних умов, що в ряді випадків викликає утруднення.

2. Запропоновано методику розрахунку імпульсного електромагнітного поля системи індуктор-струмопровід – пластина, що дозволяє знайти струморозподілення у всіх провідниках, струм у розрядному контурі і напругу на індукторі і визначити інтегральні електромагнітні характеристики. Розрахунок виконується в два етапи. Для системи з одновитковим індуктором отримане аналітичне рішення інтегродиференціального рівняння щільності струму. Достоїнством методики є те, що при зміні параметрів джерела перший етап розрахунку не повторюється, а за допомогою інтегральних електромагнітних характеристик відразу розраховується розподіл поля, струм у розрядному контурі і напруга на індукторі-струмопроводі.

3. У результаті дослідження впливу зазорів системи суцільний індуктор-струмопровід – пластина на розподіл електродинамічних зусиль встановлено, що для збільшення електродинамічних зусиль у пластині необхідно збільшити ширину внутрішнього витка h/d_1 і зменшити міжвитковий зазор h_w/d_1 у системі з багатовитковим індуктором-струмопроводом. Вплив висоти витка b_1/d_1 на розподіл електродинамічних зусиль у пластині виявляється для одновиткових і багатовиткових індукторів-струмопроводів у протилежний спосіб.

4. Розташування індуктора-струмопровода П-подібного перерізу відповідно до рис. 3 сприяє збільшенню ПЩ повної сили на поверхні пластини в 2,5-1,4 рази при

малих зазорах між шинами індуктора ($h/d_1 = 0,1-0,5$).

5. Встановлено і вивчено можливість формування заданого просторового розподілу зусиль у пластині за допомогою складеного індуктора-струмопроводу, окремі шини якого виконані з матеріалів з різною електропровідністю. Продемонстровано можливість ослаблення просторової осциляції зусиль під індуктором до одиниць відсотків шляхом підбора матеріалу витків і наближення розподілу ПЩ повної сили на поверхні пластини до прямокутного. Показано, що збільшення електродинамічних зусиль у пластині під біметалічним індуктором-струмопроводом незначне і складає одиниці відсотків.

6. Правильність запропонованої методики розрахунку зусиль у системі ІСП підтверджена шляхом експериментального дослідження просторового розподілу індукції магнітного поля. Середньоквадратичне відхилення експериментальних значень від розрахункових не перевищує 7,5%.

7. Сформульовано практичні рекомендації з конструювання індукторів-струмопроводів, що дозволяють досягти в пластині максимальної щільності повної сили. Для одновиткових індукторів зазначені оптимальні розміри і форма перерізу шин індуктора, для багатовиткових індукторів надані рекомендації з вибору міжвиткових зазорів і провідності шин у складених індукторах.

8. Матеріали дисертаційної роботи впроваджені в науково-дослідній роботі “Розробка технічної документації електрофізичної технологічної лінії для пресування з вугільного пилу брикетів і створення дослідного зразка лінії” і використовуються в навчальній підготовці інженерів за спеціальностями “Техніка і електрофізика високих напруг” і “Нетрадиційні джерела енергії”. Методика розрахунку імпульсних електродинамічних зусиль, а також розроблені алгоритми і програми прийняті до використання в лабораторії МІОМ НТУ “ХП”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Михайлов В.М., Панасенко О.Т. Распределение импульсных токов и интегральные характеристики системы индуктор-токопровод – пластина// Технічна електродинаміка. – 1999. – № 4. – С. 4 – 9.

Здобувач запропонував застосувати інтегральні електромагнітні характеристики для розрахунку розподілу імпульсного струму в системі індуктор-струмопровід – пластина, склав алгоритм рішення інтегродиференціального рівняння й отримав усі числові результати.

2. Панасенко О.Т. Электродинамические усилия, действующие на пластину в импульсном магнитном поле индуктора-токопровода// Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Сер. Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2000. – № 403. – С. 120-125.

3. Панасенко О.Т. Влияние проводимости индуктора-токопровода на распределение усилий, действующих на пластину// Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2000. – Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – Ч. 7. – С. 7-10.

4. Лучкин О.В., Панасенко О.Т. Метание биметаллической пластины в импульсном магнитном поле индуктора-токопровода// Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 100. – С. 138-141.

Здобувач запропонував частину математичної моделі, що описує розподіл електродинамічних зусиль у пластині.

5. Лучкин О.В., Михайлов В.М., Панасенко О.Т. О вычислении диагональных элементов матриц, аппроксимирующих интегральные операторы в уравнениях плотности тока// Электронное моделирование. – Київ: Інститут проблем моделювання в електроенергетиці НАНУ. – 2001. – Т. 23, № 3. – С. 116-123.

Здобувач дослідив похибку обчислень елементів матриць, що апроксимують інтегральні оператори рівнянь щільності струму в провідниках у випадку плоского поля.

6. Панасенко О.Т., Кулемза С.Ю. Усовершенствование индукторов-токопроводов для магнитно-импульсной обработки на основе анализа распределения электромагнитного поля// Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2002. – Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – Ч. 9. – С. 7-10.

Здобувач виконав всі необхідні зміни в алгоритмі розрахунку, дослідив вплив форми перетину шин індуктора-струмопровода на розподіл електродинамічних зусиль у пластині і знайшов оптимальну орієнтацію шини П-подібного перетину одновиткового індуктора-струмопровода для малої відстані між шинами.

АНОТАЦІЇ

Панасенко О.Т. Удосконалення індукторів-струмопроводів на основі аналізу імпульсних електродинамічних зусиль. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2003.

Дисертація присвячена удосконаленню індукторів-струмопроводів на основі аналізу імпульсного електромагнітного поля й електродинамічних зусиль, що діють на провідну пластину, з урахуванням початкових умов, неоднорідної структури матеріалу і конструкції, складної форми перерізу шин індуктора і параметрів ємнісного нагромаджувача енергії, що розряджається на індуктор.

У роботі запропоновано методику розрахунку імпульсного поля і зусиль в системі індуктор-струмопровід – пластина з використанням інтегральних електромагнітних характеристик. Встановлено і вивчено можливість формування заданого розподілу зусиль у пластині за допомогою складеного індуктора-струмопровода. Знайдено спосіб наближення розподілу поверхневої щільності повної сили на поверхні пластини до прямокутного. Встановлено, що використання П-подібного індуктора сприяє збільшенню поверхневої щільності повної сили на поверхні пластини в 2,5-1,4 рази. Правильність запропонованої

методики розрахунку підтверджена експериментально. Сформульовано практичні рекомендації з конструювання індукторів-струмопроводів.

Ключові слова: індуктор-струмопровід, електромагнітне поле, електродинамічні зусилля.

Панасенко О.Т. Усовершенствование индукторов-токопроводов на основе анализа импульсных электродинамических усилий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. –Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2003.

Диссертация посвящена усовершенствованию индукторов-токопроводов на основе анализа импульсного электромагнитного поля и электродинамических усилий, действующих на проводящую пластину, с учетом начальных условий, неоднородной структуры материала и конструкции, сложной формы сечения шин индуктора и параметров емкостного накопителя энергии, который разряжается на индуктор.

Предложена методика расчета импульсного электромагнитного поля системы индуктор-токопровод – пластина, которая позволяет найти токораспределение во всех проводниках, ток в разрядном контуре и напряжение на индукторе и определить интегральные электромагнитные характеристики. Расчет выполняется в два этапа. На первом этапе находятся импульсная или переходная проводимости системы и распределение напряженности импульсного электрического поля в проводниках при включении на индуктор-токопровод источника единичного напряжения. Для системы с одновитковым индуктором получено аналитическое решение интегродифференциального уравнения плотности тока. На втором этапе в случае разряда емкостного накопителя энергии рассчитывается ток в разрядном контуре и напряжение на индукторе, а затем находится распределение тока и индукции магнитного поля в проводниках. Достоинством методики является то, что при изменении параметров источника первый этап расчета не повторяется, а с помощью интегральных электромагнитных характеристик сразу рассчитывается распределение поля, ток и напряжение. Импульсное токораспределение в системах с индукторами-токопроводами сложным образом зависит от наложения краевых эффектов в проводниках и эффекта близости между ними. Преобладание того или иного эффекта зависит от относительных размеров проводников и относительных зазоров между индуктором-токопроводом и пластиной и шинами индуктора.

В результате исследования влияния зазоров системы сплошной индуктор-токопровод – пластина на распределение электродинамических усилий установлено, что для их увеличения в пластине необходимо увеличить ширину внутреннего витка и уменьшить междувитковый зазор в системе с многовитковым индуктором-токопроводом. Использование индуктора-токопровода П-образного

сечения способствует увеличению поверхностной плотности y -составляющей полной силы на поверхности пластины в 2,5-1,4 раза при малых зазорах между шинами индуктора ($h/d_1 = 0,1-0,5$).

Установлена и изучена возможность формирования заданного пространственного распределения усилий в пластине с помощью составного индуктора-токопровода, отдельные шины которого выполнены из материалов с различной электропроводностью. Продемонстрирована возможность ослабления пространственной осцилляции поверхностной плотности полной силы под индуктором до единиц процентов путем подбора материала витков и приближения распределения поверхностной плотности силы на поверхности пластины к прямоугольному. Предложен оптимальный набор материалов шин составного индуктора-токопровода, обладающего повышенным ресурсом. Показано, что увеличение электродинамических усилий в пластине под биметаллическим индуктором-токопроводом незначительно и составляет единицы процентов.

Достоверность предложенной методики расчета электромагнитного поля и электродинамических усилий в системе индуктор-токопровод – пластина подтверждена путем экспериментального исследования пространственного распределения x - и y -составляющих индукции магнитного поля вблизи шины индуктора-токопровода и в зазоре между индуктором-токопроводом и пластиной. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений от расчетных составляет 7,33% в первом случае и 6,80% – во втором.

Сформулированы практические рекомендации по конструированию индукторов-токопроводов, позволяющие достичь в пластине максимальной плотности силы.

Ключевые слова: индуктор-токопровод, электромагнитное поле, электродинамические усилия.

Panasenko O.T. An Improvement of inductor-wireways on the basis of the analysis of pulse electrodynamic forces. - Manuscript.

The thesis is for technical science candidate's degree, speciality 05.09.13 – technics of strong electrical and magnetic fields. – National technical university "Kharkov polytechnical institute", Kharkov, 2003.

The thesis is devoted to improvement inductor-wireways on the basis of the analysis of a pulse electromagnetic field and electrodynamic forces pressing on a conducting plate, in view of the beginning conditions, non-uniform structure of a material and design, complex form of crosssection of inductor's bus and parameters of the capacitor store of energy, which is discharged on inductor.

The calculation technique a pulse electromagnetic field of inductor-wireway – plate system is offered which allows to find current distribution in all conductors, a discharge current and voltage on inductor and to determine integral electromagnetic characteristics.

The possibility of creation the rectangular space distribution of electrodynamic force

using composite inductor-wireway is examined. The increase of a current density in 1.5 times in the system with a U-beam single-turn inductor-wireway situated over the plate is examined. The force pressing on a plate is augmented in 2.5 times under the specially oriented U-beam inductor-wireway at small relative gap between his buses.

Key words: – inductor-wireway, electromagnetic field, electrodynamic forces.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ГЗСІ – генератор експонентно загасаючих синусоїдальних імпульсів.
- ЄНЕ – ємнісний нагромаджувач енергії.
- ЗДР – звичайне диференціальне рівняння.
- ІСП – індуктор-струмопровід – пластина.
- МІОМ – магнітно-імпульсна обробка металів.
- МІУ – магнітно-імпульсна установка.
- ПЩ – поверхнева щільність.
- СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь.

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Ісакова А.В.

Підп. до друку 29.10.2003 р. Формат видання 145x215.
Формат паперу 60x90/16. Папір Caritan. Друк – ризографія.
Обсяг 0,9 авт. арк. Наклад 100 прим. Зам. № 499.

Видавничий центр НТУ “ХП”. Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.
Друкарня НТУ “ХП”, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
