

УДК 620.179:621.373.5

**РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОНТУРА ДЛЯ СТВОРЕННЯ
ПРИТИСКАЮЧОГО ЗУСИЛЛЯ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОМУ
КОМПЛЕКСІ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ**

І.П. Кондратенко, доктор технічних наук

А.В. Жильцов, доктор технічних наук

В.В. Васюк, асистент

Розраховані параметри електричного контура для створення заданого притискаючого зусилля і часу його дії в електротехнічному комплексі для зниження залишкових напружень.

Електромагнітні процеси, вихрові струми, метод інтегральних рівнянь, котушка індуктивності, неферромагнітний провідний диск.

Задача зниження залишкових напружень під час технологічного процесу виробництва та експлуатації є актуальною для забезпечення надійності, необхідних механічних характеристик, довговічності, працездатності та безпеки експлуатації обладнання різних галузях агропромислового комплексу.

Одним з перспективних методів зниження залишкових напружень є метод електропластичної деформації, принцип якого поляє у дії на метал електричним струмом, густина якого перевищує певне граничне значення порядку $10^5 \div 10^6$ А/см² і обумовлює пружне розвантаження залишкових напружень в металі [1].

Спільно з Інститутом електродинаміки та Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України було розроблено експериментальний комплекс для зниження залишкових напружень (рис. 1).

До складу якого входять: генератор імпульсів струму (ГІС), електродна система, зразок, що досліджується (балка однієї пружності з алюмінієвого

сплаву АМг6), вимірювальний комплекс для визначення залишкових напружень методом електронної спекл-інтерферометрії.

Широке застосування методу електропластичної деформації для зниження залишкових напружень стримується відсутністю інформації про необхідні параметри струмових імпульсів необхідних для розвантаження залишкових напружень які залежать від конструктивних параметрів електротехнічного комплексу.

Мета дослідження – розрахунок параметрів контура для створення притискаючого зусилля в електротехнічному комплексі для зниження залишкових напружень

Матеріал і методика досліджень. Електротехнічний комплекс для зниження залишкових напружень який складається з двох незалежних контурів – контур 1 та контур 2, кожен з яких складається з послідовно з'єднаних ємності, індуктивності та активного опору (рис. 1).

Перший з них призначений для забезпечення заданої сили тиску на неферомагнітний провідний диск D_1 , який жорстко зв'язаний з електродом D_2 . Другий контур забезпечує заданий імпульс струму в дослідному зразку.

В загальному випадку задача вимагає розв'язання рівнянь Максвелла в тривимірній області, однак як що зробити ряд допущень, задачу можливо звести до двовимірної. Тобто якщо котушка, електрод і пластина являють собою циліндричні масивні тіла, що мають спільну вісь обертання, з якої надалі сполучається вісь z циліндричної системи координат r, α, z (рис. 2), то задача розглядається в вісесиметричній постановці [2, 3, 4].

В ході моделювання [5] розроблено вісесиметричну математичну модель розрахунку миттєвої густини струму в електродній системі, що є складовою частиною електротехнічного комплексу для зниження залишкових напружень.

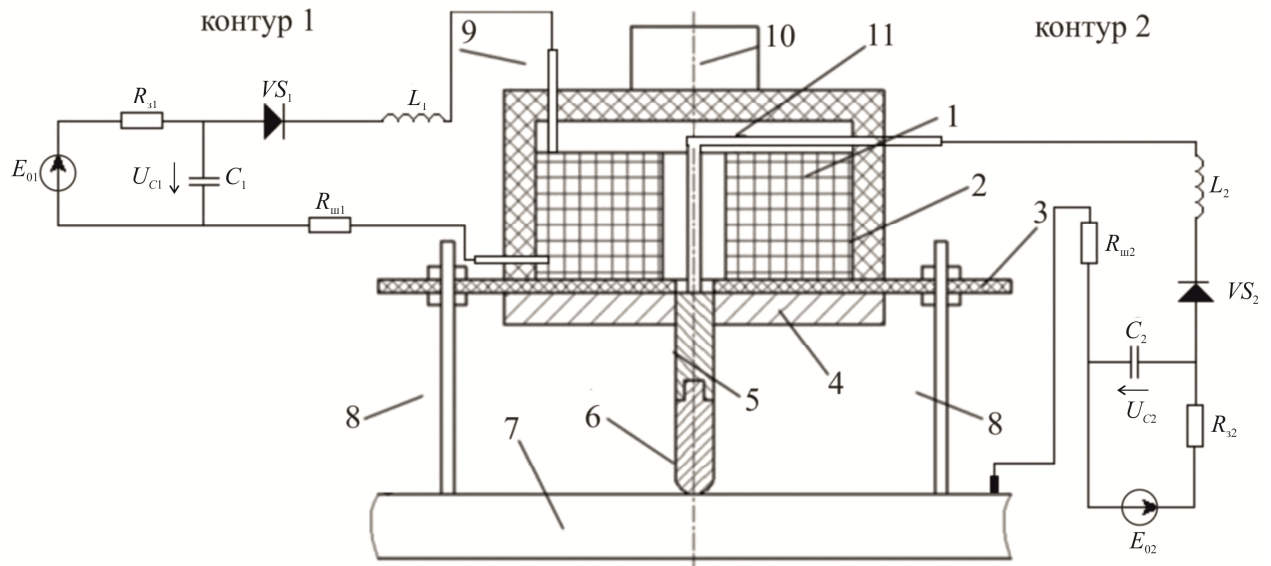


Рис. 1. Електротехнічний комплекс для зниження залишкових напружень:

1 – котушка індуктивності; 2 – корпус; 3 – площадка; 4 – алюмінієвий диск; 5 – мідний стержень; 6 – змінний електрод; 7 – зразок; 8 – тримачі; 9, 11 – виводи; 10 – вантаж; E_{01} , E_{02} – стабілізоване джерело постійної напруги; C_1 , C_2 – конденсатор; R_{31} , R_{32} – опір; L_1 , L_2 – індуктивність; VS_1 , VS_2 – керуючий тиристор; $R_{ш1}$, $R_{ш2}$ – шунт

Результати дослідження. Розрахуємо параметри першого електричного кола (ємність C_1 , опір R_1 , індуктивність L_1 , напругу на ємності U_C) із умови забезпечення сили тиску електроду, який жорстко зв'язаний з провідним диском D_1 , та часу її дії на неферомагнітну пластину D_3 (рис. 2). Вважаємо, що індуктивність та активний опір цього електричного кола визначається тільки котушкою D_W , тобто індуктивністю та активним опором проводів з'єднання знехтуємо. Індуктивність та активний опір котушки D_W приймаємо, що залежить від її геометричних параметрів: внутрішнього радіусу R_{1in} , зовнішнього радіусу R_{2ex} , висоти h , діаметру проводу намотування без ізоляції d_W , с ізоляцією – $d_{iz.w}$, кількості витків w , коефіцієнту заповнення k (рис. 3).

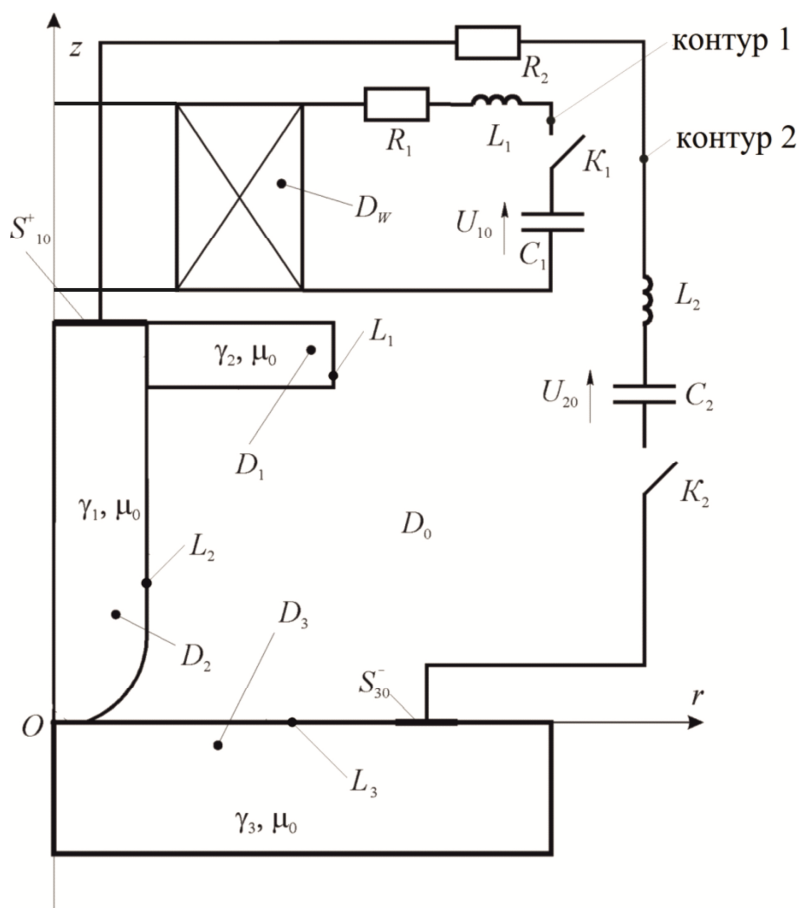


Рис. 2. Меридіанний переріз електродної системи із зображенням зовнішнього електричного ланцюга:

D_1 – неферромагнітний провідний диск; D_2 – неферромагнітний електрод; D_3 – неферромагнітна провідна пластина, в якій необхідно зменшити залишкові напруження; D_0 – зовнішній простір; D_w – котушка індуктивності

Розрахунок активного опору котушки. Активний опір R_l котушки розрахуємо за допомогою формули:

$$R_l = \rho \frac{l}{S_1}, \quad (1)$$

де ρ – питомий опір матеріалу проводу, з якого виконано обмотку котушки; l – довжина проводу; S_1 – площа поперечного перерізу проводу.

Довжину одного вітка, радіуса r_i (радіус вітка визначається відстанню між віссю Oz та центром i -го вітка), $i = 1, 2, \dots, w$, знаходимо по формулі

$$l_i = 2\pi r_i. \quad (2)$$

Площа поперечного перерізу одного вітка визначається так

$$S_1 = \frac{\pi d_w^2}{4}. \quad (3)$$

Тоді, активний опір одного вітка знаходимо наступним чином

$$R_i = \rho \frac{2\pi r_i}{\pi d_w^2/4} = \rho \frac{8r_i}{d_w^2}, \quad (4)$$

Активний опір обмотки котушки заходиться визначається формулою

$$R_1 = \frac{8\rho}{d_w^2} \sum_{i=1}^w r_i. \quad (5)$$

Розрахунок індуктивності котушки. Магнітний потік Φ_1 через тонкий виток радіуса r визначається формулою [6]:

$$\Phi_1 = \int_{S_1} \vec{B} d\vec{s} = \int_{S_1} \text{rot} \vec{A} d\vec{s} = \oint_{l_1} \vec{A} d\vec{l} = 2\pi r A_\alpha, \quad (6)$$

де S_1 – площа витка; l_1 – контур, що обмежує S_1 ; A_α – азимутальна проекція векторного потенціалу; $\vec{B}$ – вектор магнітної індукції; $\vec{A}$ – векторний потенціал магнітного поля.

Якщо знехтувати впливом вихрових струмів, що виникають в диску D_1 , власна індуктивність L витка зі струмом i може бути знайдена відповідно за формулою

$$L = \frac{\Phi_1}{i}, \quad (7)$$

де Φ_1 розраховується за формулою (6).

Розрахуємо індуктивність L_1 котушки. Уважаємо заданими внутрішній R_{win} , зовнішній R_{wex} радіуси й висоту h_w котушки, число витків у шарі w_r вздовж осі Oz й число шарів w_z вздовж осі Oz (рис. 3). Кожен виток котушки вважаємо тором круглого перерізу.

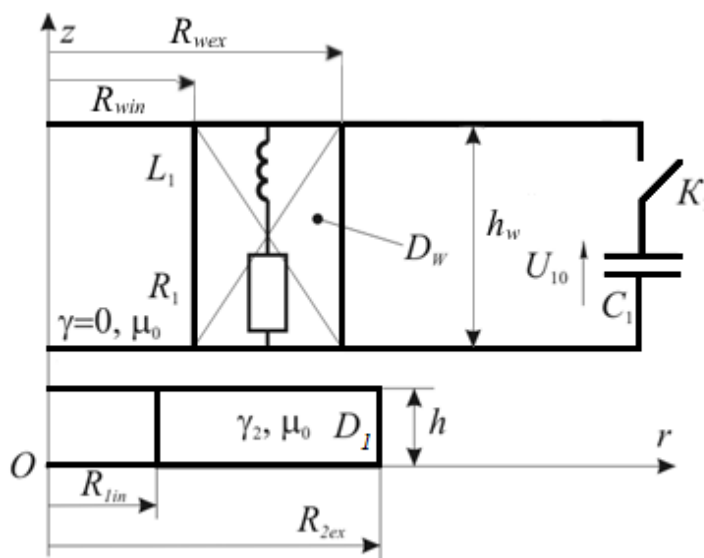


Рис. 3. Перший контур та неферомагнітний провідний диск

Потокозчеплення з кожним окремим витком котушки може бути розраховане в такий спосіб

$$\Psi_{ij} = 2\pi r_{ij} A_{\alpha}^{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, w_r, \quad j = 1, 2, \dots, w_z, \quad (8)$$

де A_{α}^{ij} – значення векторного потенціалу в середній точки перерізу відповідного витка; r_{ij} – радіус вітка. Вважаємо густину струму в кожному витку рівною δ_w , тоді векторний потенціал, обумовлений струмом у котушці, може бути знайдений по формулі [7]

$$A(Q) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{S_w} \delta_w \sqrt{\frac{r_M}{r_Q}} f(k) ds_M = \frac{\mu_0 \delta_w}{2\pi} \int_{S_w} \sqrt{\frac{r_M}{r_Q}} f(k) ds_M, \quad (9)$$

де

$$f(k) = \left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k); \quad (10)$$

$$k^2 = \frac{4r_Q r_M}{(r_Q + r_M)^2 + (z_Q - z_M)^2}; \quad (11)$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\alpha}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha}}, \quad E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha} d\alpha \quad (12)$$

– є повні еліптичні інтеграли відповідно першого й другого роду модуля k ; r_M , z_M – координати в циліндричній системі координат точки M ; r_Q , z_Q – аналогічно точки Q .

Індуктивність котушки, з урахуванням виразів (7) і (9), може бути представлена у вигляді

$$L_1 = \frac{\Psi}{i} = \frac{\sum_{j=1}^{w_z} \sum_{i=1}^{w_r} 2\pi r_{i,j} \frac{\mu_0 \delta_w}{2\pi} \int_{S_w} \sqrt{\frac{r_M}{r_{i,j}}} f(k) ds_M}{\delta_w S_1} = \frac{\mu_0}{S_1} \sum_{j=1}^{w_z} \sum_{i=1}^{w_r} \int_{S_w} \sqrt{r_M r_{i,j}} f(k) ds_M. \quad (13)$$

Заміняючи інтеграл сумою, приходимо до розрахунку індуктивності наступним чином

$$L_1 = \frac{\mu_0}{S_1} \sum_{j=1}^{w_z} \sum_{i=1}^{w_r} r_{i,j} \sum_{m=1}^{w_z} \sum_{k=1}^{w_r} \sqrt{\frac{r_{k,m}}{r_{i,j}}} f(k) S_1 = \mu_0 \sum_{j=1}^{w_z} \sum_{i=1}^{w_r} \sum_{m=1}^{w_z} \sum_{k=1}^{w_r} \sqrt{r_{k,m} r_{i,j}} f(k). \quad (14)$$

Реалізація формул (5) та (14) для розрахунку активного опору та індуктивності котушки проведено в системі комп'ютерної математики *MathCad* [8].

Вибір параметрів першого контуру із умови забезпечення заданого зусилля з боку електрода на неферромагнітну пластину та часу її дії виконувався методом параметричної оптимізації [9]. Параметрами для варіювання було обрано внутрішній R_{win} , зовнішній R_{wex} радіуси котушки та її висота h , ємність C_1 , напруга на ємності U_{C_1} . Обмеження на ці параметри наступні:

$$d_{iz.w} < R_{win} < R_{wex} < R_{max}; \quad (15)$$

$$d_{iz.w} < h_w < h_{max}; \quad (16)$$

$$C_{1min} < C_1 < C_{1max}; \quad (17)$$

$$U_{C_1 min} < U_{C_1} < U_{C_1 max}, \quad (18)$$

де R_{max} , h_{max} – максимально можливі радіус та висотка котушки; C_{1min} , C_{1max} – мінімальне та максимальне можливе значення ємності; $U_{C_1 min}$, $U_{C_1 max}$ – мінімальне та максимальне можливе значення напруги на ємності.

Вказані параметри обираються із умов:

$$F_{min} < F < F_{max}; \quad (19)$$

$$t_{imp\ min} < t_{imp} < t_{imp\ max}, \quad (20)$$

де F_{min} , F_{max} – мінімальне та максимальне значення сили, з якою котушка D_W с током діє на неферромагнітний диск D_1 ; $t_{imp\ min}$, $t_{imp\ max}$ – мінімальний та максимальний час її дії.

Цільова функція – енергія зарядженого конденсатора

$$\frac{C_1 U_{C_1}^2}{2} \rightarrow \min. \quad (21)$$

Задача розв'язувалась наступним чином. Спочатку задавалися обмеження на варійовані параметри та границі зміни для сили та часу її дії (табл. 1), та крок зміни по габаритним параметрам котушки, ємності та напруги на ній.

Для кожного випадку розраховувався миттєвий струм в обмотці $i_W(t)$, знаючи який розв'язувалось рівняння для вихрових струмів у неферромагнітному провідному диску D_I :

$$\frac{\delta_\alpha(Q,t)}{\gamma\lambda_s} + \frac{\partial}{\partial t} \int \delta_\alpha(M,t) T(Q,M) dS_M = - \frac{\partial}{\partial t} \int \delta_{W\alpha}(M,t) T(Q,M) dS_M, Q \in D. \quad (22)$$

Після чого розраховувалася z -компонента сили взаємодії струмів в обмотці та вихрових струмів в диску D_I на підставі співвідношення:

$$\vec{F}(Q,t) = -\vec{e}_r \int_{D_1} \delta_z(Q,t) B_\alpha(Q,t) dS_Q + \vec{e}_z \int_{D_1} \delta_z(Q,t) B_\alpha(Q,t) dS_Q. \quad (23)$$

1. Границі зміни параметрів

$C_{min}=100$ мкФ	$C_{max}=100$ мкФ
$U_{min}=100$ В	$U_{max}=500$ В
$t_{min}=900$ мкс	$t_{max}=1100$ мкс
$F_{min}=400$ Н	$F_{max}=500$ Н

Визначалось амплітудне значення сили та час її дії та перевірялось виконання умов (19) та (20). Якщо ці умови виконувались, формувався набір відповідних параметрів. Після чого залишався тій варіант, що задовольняє умові (21). За допомогою описаного алгоритму було розраховано наступні параметри електричного контура для створення притискаючого зусилля електротехнічного комплексу для зниження залишкових напружень, які наведені в таблиці 2.

2. Результати оптимізації параметрів контура для створення притискаючого зусилля

Внутрішній радіус котушки	d_1	10 мм
Зовнішній радіус котушки	d_2	47,4 мм
Висота котушки	h	4,32 мм
Число витків уздовж радіуса	w_r	26
Число витків уздовж висоти котушки	w_z	6
Число витків у котушці	w	156
Опір котушки	R	0,597 Ом
Індуктивність котушки	L	521 мкГн
Ємність конденсатора	C	400 мкФ
Час, що відповідає максимальному значенню струму	$t_{\max}$	618 мкс
Коефіцієнт загасання	δ	573 c^{-1}
Частота струму	ω	2120 c^{-1}
Час імпульсу струму	t_{impi}	1485 мкс
Час імпульсу сили	$t_{\text{imp}F}$	937 мкс
Напруга на ємності	U_C	300 В
Діаметр проводу $d_w=0,7 \text{ мм}^2$, с ізоляцією $d_{\text{із}w}=0,72 \text{ мм}^2$.		

На рис 4. наведено графік залежності сили, з якою котушка, параметри якої наведено в табл. 2, зі струмом діє на ферромагнітний провідний диск D_1 , від прикладеної напруги на ємності, якій дозволяє визначити необхідну напругу заряду ємності для обраного значення силової дії на електрод.

На рис. 5 наведено залежність струму в обмотці котушки D_w та z -компоненти сили, з якою котушка зі струмом діє на неферромагнітний провідний диск D_I , від часу t . З нього бачимо, що під час процесу розряджання z -компонента сили електродинамічного притискання згодом пререходить у від'ємне значення та електрод прагне відштовхнутися від пластини. Це призводить до того, що площа контактної поверхні електрода з неферромагнітною пластиною зменшується і, як наслідок, збільшується опір контакту, що може призвести до оплавлення місця контакту. Тому необхідно обмежити час дії сили моментом зміни її напрямку.

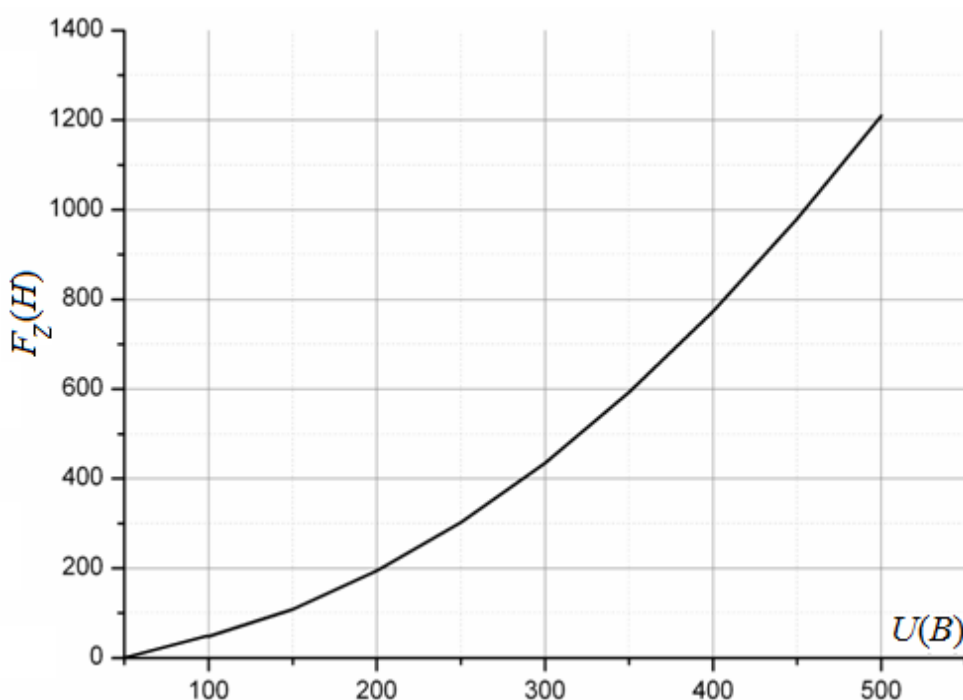


Рис. 4. Залежність максимального значення z -компоненти сили, з якою котушка зі струмом діє на неферромагнітний провідний диск D_I , від прикладеної напруги на ємності

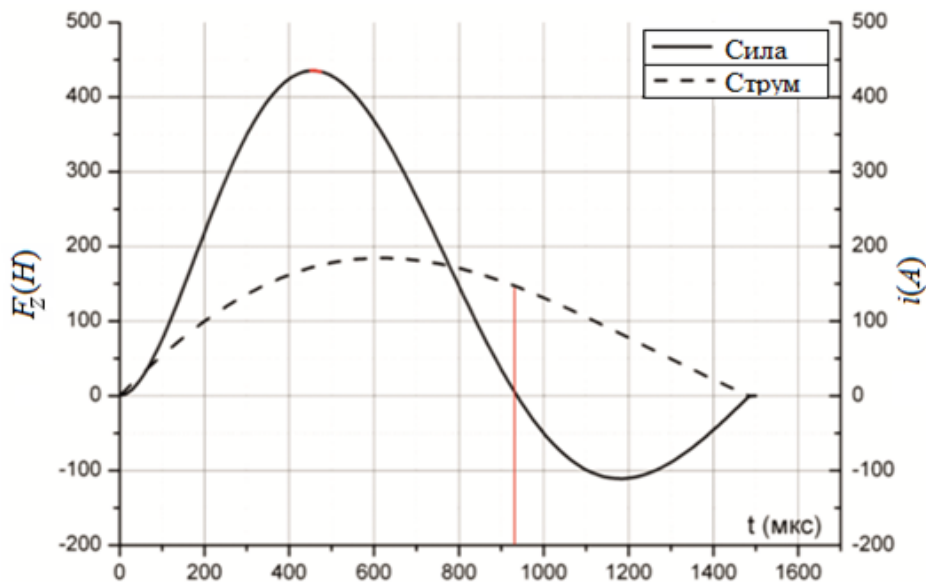


Рис. 5. Залежність струму в обмотці котушки D_w та z -компоненти сили, з якою котушка зі струмом діє на неферромагнітний провідний диск D_I , від часу t та ємності $U_{C_I}=300$ В

Висновки

Розроблено вісесиметричну математичну модель нестационарного електродифузійного процесу в системі зниження залишкових напружень, що дозволило визначити параметри контура для створення притискаючого зусилля із умови заданого його значення та часу дії.

Список літератури

1. Баранов Ю.В. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
2. Тозони О.В. Расчет переходных процессов в токопроводах / О.В. Тозони, Е.И. Петрушенко. Теоретическая электротехника. – Львов: Львов. ун-т, 1966. – Вып. 2. – С. 144 – 147.
3. Бинс К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон. – М.: Энергия, 1970. – 376 с.

4. Тозони О.В. Расчет трехмерных электромагнитных полей / О.В. Тозони, И.Д. Маергойз. – К.: Техніка, 1974. – 352 с.

5. Васюк В.В. Моделирование электрофизических процессов в электротехническом комплексе для снижения остаточных напряжений / В.В. Васюк, И.П. Кондратенко, А.В. Жильцов // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 9-й Международной научно-технической конференции (21 – 22 мая 2014 года, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5-ти частях. Часть 3. Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2014. – С. 89.

6. Стадник И.П. Электродинамика. Лекции с вопросами и задачами. / И.П. Стадник. – К.: Техника, 2012. – 336 с.

7. Тозони О.В. Расчет электромагнитных полей на вычислительных машинах. / О.В. Тозони. – К.: Редакция литература по энергетике, электронике, кибернетике и связи, 1967. – 252 с.

8. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. / В.Ф. Очков. СПб.: BHV, 2009. – 512 с.

9. Курбатов П.А. Численный расчет электромагнитных полей / П.А. Курбатов, С.А. Аринчин. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

Рассчитаны параметры электрического контура для создания заданного прижимного усилия и времени его действия в электротехническом комплексе для снижения остаточных напряжений.

Электромагнитные процессы, вихревые токи, метод интегральных уравнений, катушка индуктивности, неферромагнитный проводящий диск.

The parameters of the electric circuit to generate a given time and efforts clutching his actions in the electrical sector to reduce residual stresses.

Electromagnetic processes, eddy current, method of integral equations, inductor, non-ferromagnetic conductive disk.