

УДК 621.3

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЮЮЧОЇ ПРОГРАМИ «ELCUT» ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНДУКТОРНИХ СИСТЕМ

Черемис В. Т., канд. техн. наук, доц., Марінченко Г. Є., канд. техн. наук, доц.

Національний авіаційний університет

Int2080@ukr.net

У статті досліджено індукторні системи соленоїдного типу, що застосовуються в імпульсних приводах поступального руху і в пристроях магнітно-імпульсної обробки металовиробів роботі при різних взаємних розташуваннях первинного соленоїда і вторинної системи, що складалася з центральної феромагнітної оправи та насадженої на неї електропровідної труби (заготовки), із застосуванням зовнішніх електромагнітних екранів різного типу для зниження шкідливого впливу розсіяних магнітних полів. Показано, що екранування індуктора мало змінює питому електромагнітну силу осьової взаємодії між первинною і вторинною системами, проте істотно змінює величину радіального магнітного тиску, що впливає на заготовку. Наведено порівняльні показники екранів, виконаних із сталі, міді або алюмінію у поєднанні зі сталлю.

Ключові слова: індукторна система, імпульсне магнітне поле, моделювання, електродинамічні сили, магнітний екран.

Induction systems of solenoid type used in pulse drives of translational motion and in magnetic-pulse devices for processing of metal products have been researched in the paper at different relative positions of primary solenoid and secondary system, consisting of a central ferromagnetic core and conductive tubes (workpieces) stands on it, at using of external electromagnetic screens of different types for reducing of the harmful effects of scattered magnetic fields. It is shown that screening of inductor slightly changes relative electromagnetic force of axial interaction between the primary and secondary systems, but it has significant affect on the magnitude of the radial magnetic pressure, which exerts on the workpiece. Comparative parameters of screens made of steel, copper or aluminum in combination with steel are presented.

Keywords: induction system pulsed magnetic field, modeling, electrodynamic forces, magnetic screen.

Вступ

Індукторна система у вигляді імпульсного соленоїда, у порожнині якого вміщене вторинне тіло, що є предметом впливу магнітного поля, яке створюється соленоїдом при живленні його обмотки імпульсного струму, є основним елементом силових імпульсних пристроїв. Такі індукторні системи використовуються в промислових установках для магнітно-імпульсної обробки металовиробів (МІОМ) [1] і в різних електроприводах ударної дії з поступальним рухом якоря [2].

Залежно від призначення індукторна система повинна забезпечувати необхідний рівень радіальних електродинамічних сил для деформування електропровідної заготовки, як у випадку МІОМ, або створювати необхідну осьову силу для прискорення провідного якоря, у разі двигуна ударної дії. Отже, в одному і в другому випадках до індукторних систем можуть ставитися зовсім різні вимоги і їх розробка може проводитися з урахуванням абсолютно різних критеріїв, тим не менш індукторні системи для одного або іншого застосування мають багато спільного, оскільки їхні робочі властивості пов'язані зі структурою імпульсного магнітного поля в системі соленоїд — вторинне провідне тіло [3]. У разі необхідності захистити працюючий пер-

сонал від шкідливого впливу розсіяних магнітних полів, індукторні системи можуть мати зовнішній електромагнітний екран, який вносить свої особливості в структуру поля в робочому зазорі системи. Під час аналізу електромагнітних характеристик індукторних систем іноді користуються методами теорії кіл із зосередженими параметрами, однак при цьому неможливо уникнути використання результатів польового розгляду системи, хоча б тому, що для опису розподілу струмів у первинному і вторинному контурах системи необхідно знати параметри власної та взаємної індуктивності струмоведучих елементів системи [4].

Визначення цих параметрів значно ускладнюється, якщо в системі наявні елементи з нелінійними магнітними властивостями. Це передусім феромагнітна оправа для деталі, що оброблюється, або сталева серцевина якоря в ударному двигуні.

Третє тіло, яке необхідно враховувати — це зовнішній захисний екран, який також може мати у своєму складі феромагнітні елементи.

Для аналізу імпульсного магнітного поля в індукторній системі, яка містить нелінійні елементи, була застосована професійна версія моделюючої програми «Elcut» v.5.7, розробленої ПК

«Тор» у м. Санкт-Петербург, Росія. Типова схема перерізу досліджуваних індукторних систем показана на рис. 1 і 2.

Рис. 1 зображує індукторну систему при осьовому суміщенні вторинного контура 1 з котушкою соленоїда 2. Зовнішній екран має середню циліндричну частину 4, концентричну відносно

котушки соленоїда, і торцеві ділянки 5, що поліпшують екрануючу дію циліндричної частини. Котушка 2 має для зміцнення бандаж 3 з непровідного немагнітного матеріалу.

На рис. 2 показано можливе осьове зміщення вторинного елемента 1 системи щодо котушки соленоїда 2.

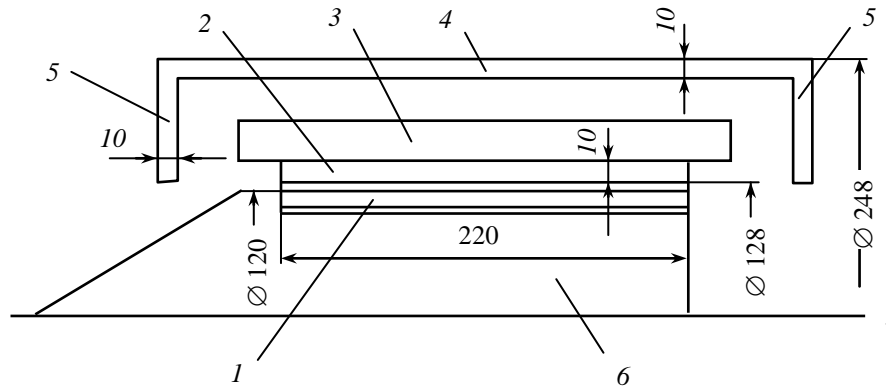


Рис. 1. Схема розрахункової моделі в базовому положенні

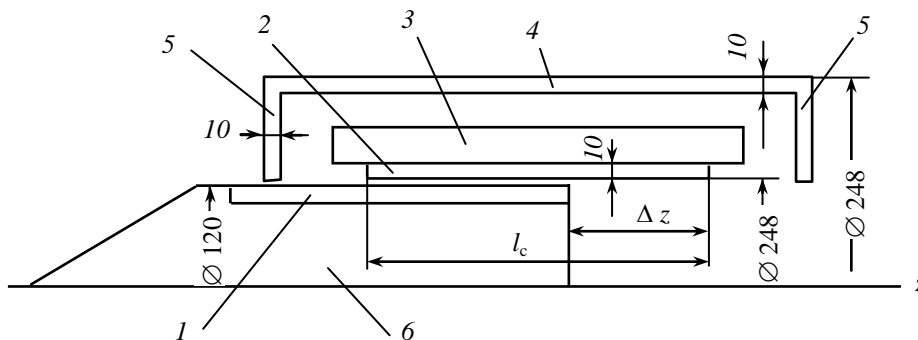


Рис. 2. Схема розрахункової моделі з варіацією осьового зміщення якоря

Характеристикою такого осьового зсуву є безрозмірна величина $Dz = \Delta z / l_c$, де Δz — відстань уздовж осі між однойменними торцями котушки 2 і вторинного елемента 1; l_c — осьовий розмір котушки соленоїда (220 мм).

Під вторинним елементом мається на увазі труба 1 з електропровідного металу (мідь), насаджена на сталеву оправу 6. У цілому трубу разом з оправою будемо називати якорем системи.

1. Дослідження індукторної системи при різних положеннях вторинного елемента. Було виконано моделювання імпульсного магнітного поля в системі при збудженні котушки соленоїда прямокутним імпульсом струму тривалістю 1 мс з відомою амплітудою ампервитків (до 20 МА). Сітка триангуляції в кінцево-елементній моделі нараховувала від 25 до 35 тис. вузлів. Було отримано картини розподілу магнітного поля з загальмованим якорем при зміні параметра Dz від 0 до 1,5. Амплітуда магнітної індукції в зазорі

над поверхнею вторинного елемента сягала 90 — 100 Тл.

Для базового положення якоря з $Dz = 0$ картини поля були отримані як без зовнішнього екрана, так і за наявності екрана, виготовленого зі сталі, міді або алюмінію у поєднанні зі сталлю. Для кожного з положень якоря щодо котушки соленоїда за допомогою інтегрального калькулятора програми «ELCUT» вимірювалися повний струм, індукований в якорі, і осьова електродинамічна сила, що діє на загальмований якор. Ці величини були виміряні для різних моментів часу з кроком 0,1 від тривалості імпульсу.

За результатами вимірювань обчислювалася похідна коефіцієнта взаємної індуктивності між первинним і вторинним контурами системи $\partial M / \partial z = -F_z / (i_1 i_2)$, де i_1, i_2 — струми первинного та вторинного контуру системи відповідно. Величина $\partial M / \partial z$ є основним вихідним параметром при розрахунках двигунів ударної дії.

За результатами моделювання поля з урахуванням наявності нелінійних елементів цей параметр визначений для ряду положень загальмованого якоря при картині індукованих струмів, що відповідає робочому режиму, і може бути використаний для розрахунку динамічних характеристик ударного двигуна.

Вимірювання показали, що, незважаючи на наявність феромагнітної осердя якоря, здатної насичуватися в сильних полях, похідна коефіціє-

нта взаємної індуктивності при фіксованому положенні якоря практично не залежить від часу, тобто певний перерозподіл магнітних потоків у процесі встановлення імпульсного поля практично не впливає на цей найважливіший параметр.

Графіки залежності величини $\partial M / \partial z$ за відсутності зовнішнього екрана для різних положень якоря в межах $Dz = 0 \dots 1$ показані на рис. 3 і 4.

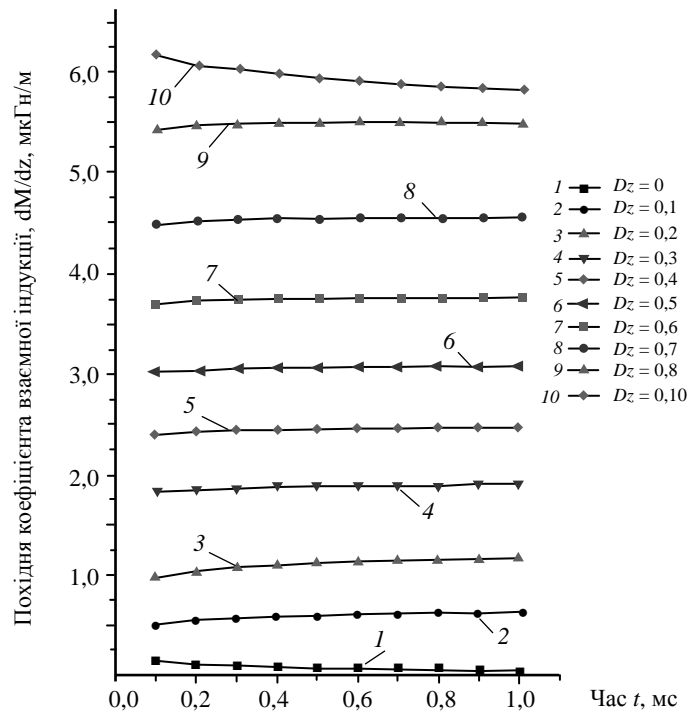


Рис. 3. Результати вимірювань похідної коефіцієнта взаємної індукції за часом

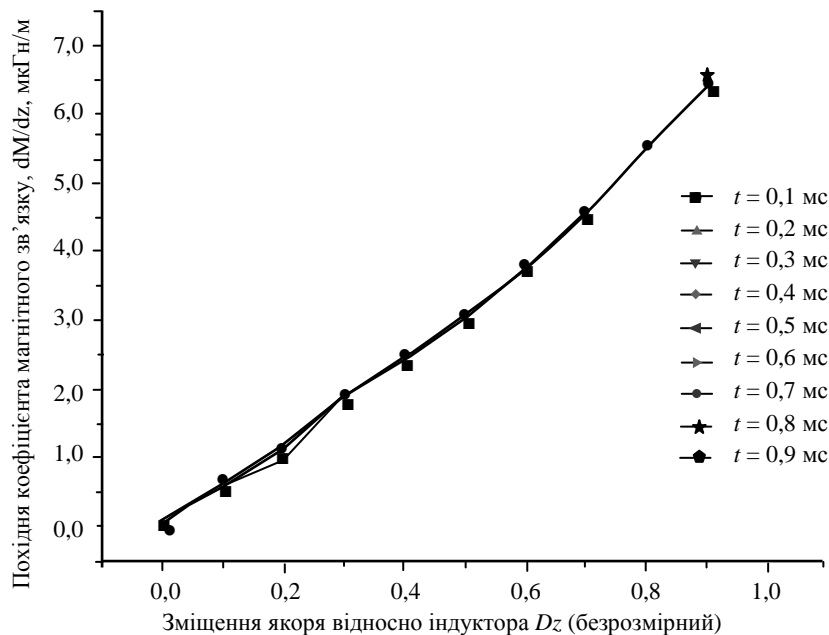


Рис. 4. Залежність похідної коефіцієнта взаємної індукції від зміщення якоря

Одним з питань, що потребували з'ясування, була роль магнітного або немагнітного осердя якоря у формуванні осьового зусилля в імпульсному магнітному полі. Для цього проводилося моделювання перехідного процесу при завданні різних магнітних властивостей осердя.

Одним з варіантів був вибір осердя зі слабомагнітної сталі, у якого магнітна проникність не перевищує величини $5 \mu_0$ при електропровідності 10^6 (Ом м) $^{-1}$.

Результати вимірювань, виконаних на розрахунковій моделі за допомогою інтегрального калькулятора, наведені в табл. 1 і 2 для системи без зовнішнього екрана і відображені на графіках рис. 5. Тут порівняно дані, отримані для мідної оболонки якоря (заготовки) і слабомагнітного осердя (в табл. 1 виділено жирним шрифтом, позначення величин мають індекс «заг»), і дані при повністю немагнітному непровідному осерді (табл. 2).

Таблиця 1

Dz	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$I_{2\text{заг}}$, МА	18,39	17,87	16,93	15,74	14,39	12,92	11,37	9,77	8,15	6,55
i_{2a} , МА	17,8	17,3	16,4	15,22	13,9	12,43	10,9	9,33	7,73	6,2
$F_{\text{заг}}$, e+08 Н	0,14	2,212	4,078	5,323	6,58	7,018	7,565	8,17	8,324	7,52
$F_{\text{за}}$, e+08 Н	1,72	2,25	4,3	5,71	6,9 6	7,42	8,32	9,18	9,13	8,32
$V_{\text{серзаг}}$, Тл	10,19	8,14	7,88	6, 87	6,78	6,344	5,95	5,52	4,9	4,2
$V_{\text{сера}}$, Тл	46,1	54,8	52,34	44,08	40,45	35,78	31,0	29,87	22,5	12,34
$P_{\text{заг}}$, e+10 Вт	1,72	1,73	1,749	1,73	1,676	1,582	1,459	1,3	1,10	0,835
P_a , e+10 Вт	1,693	1,7	1,725	1,705	1,646	1,55	1,426	1,267	1,0	0,81
$\left \frac{\partial M}{\partial z} \right _{\text{заг}}$, 10^{-6} Гн/м	0,038	0,619	1,204	1,69	2,286	2,716	3,327	4,18	4,745	5,74
$\left \frac{\partial M}{\partial z} \right _a$, 10^{-6} Гн/м	0,48	0,65	1,31	1,88	2,5	2,99	3,8	4,9	5,9	6,7

Таблиця 2

Dz	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
I_2 , МА	17,82	17,5	16,57	15,4	14,08	12,63	11,1	9,53	7,93	6,35
F , $1e + 08 N$	0,31	2,142	3,83	5,177	6,155	6,456	7,1	7,442	7,81	7,11
$V_{\text{сер}}$, Тл	51,606	49,8	47,15	46,0	38,18	31,63	28,69	23,86	19,4	14,67
P , $1e + 10$ Вт	1,7	1,728	1,747	1,729	1,672	1,575	1,45	1,386	1,076	0,8
$\left \frac{\partial M}{\partial z} \right $, $1e - 06$ Гн/м	0,087	0,6	1,15	1,68	2,19	2,556	3,2	3,9	4,92	5,6

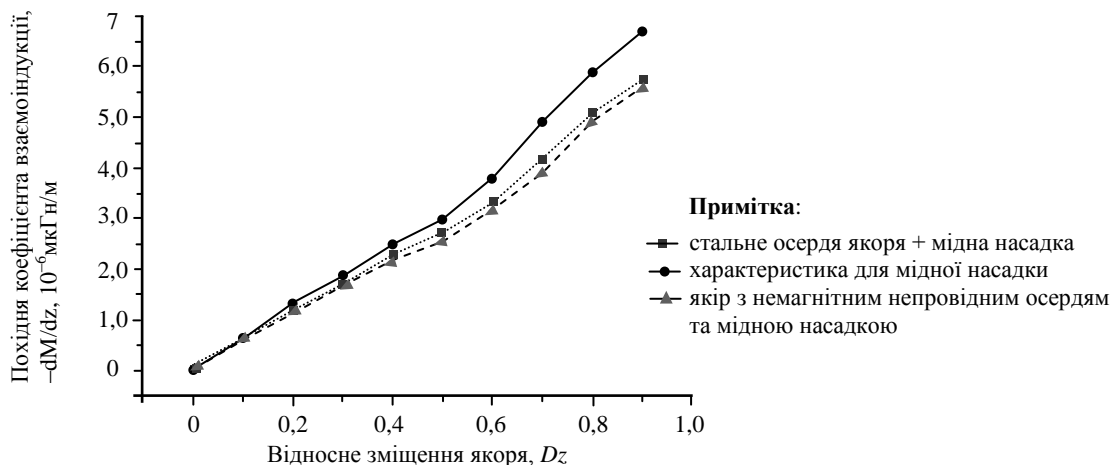


Рис. 5. Порівняльні характеристики питомої осьової сили для різних типів якорів

Крім вимірювань повного струму $I_{2\text{за}}$ і осьових зусиль $F_{z\text{за}}$, що діють на весь якір, у табл. 1 окремими рядками виділені результати вимірювань струму і зусиль, що діють окремо на мідну насадку якоря (I_{2a} і F_{za} відповідно), вони показані звичайним шрифтом, позначення величин мають індекс «а». Величина $B_{\text{паб}}$ — середня індукція за обсягом вторинного тіла, $P = I_2^2 R$ — це потужність тепловиділення, що дає змогу оцінити, як змінюється активний опір вторинного контуру при зміні його координати Dz . Згідно з даними графіків рис. 6, сталеве, слабомагнітне осердя знижує корисне осьове зусилля, що виникає при взаємодії струму індуктора зі струмом, індуктованим у мідній насадці. Застосування осердя з більш високими магнітними властивостями може трохи покращити ситуацію.

З рис. 3 видно, що мідна насадка на непровідному немагнітному осерді здатна створювати дещо менші зусилля, ніж на сталевому слабомагнітному осерді. Наявність сталевого осердя породжує при $Dz > 0,1$ силу магнітного тяжіння,

яка знижує виштовхувальну дію осьової сили взаємодії струмів.

2. Дослідження впливу зовнішнього екрана на індуктивний зв'язок між первинним і вторинним контурами. Попередні дослідження, проведені на розрахунковій моделі, показали, що зовнішній екран при виконанні його зі сталі з типовою кривою намагнічування насичується в сильних полях настільки, що його відносна магнітна проникність знижується до 3 ... 5 одиниць. Тому вплив екранування системи на зміну похідної коефіцієнта взаємоіндукції досліджувався при завданні наступних властивостей екрана: магнітна проникність $\mu_{\text{Fe}} = 5\mu_0$, коефіцієнт електропровідності $\sigma_{\text{Fe}} = 10^6 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$. Результати вимірювання параметра $\partial M / \partial z$ у кінці струмового імпульсу показані на рис. 7. Видно, що під час переміщення якоря в межах $Dz = 0 \dots 0,9$ залежність $\partial M / \partial z = f(Dz)$ практично однакова для екранованої і неекранованої системи, і тільки при виході якоря з порожнини індуктора (коли $Dz = 1,0 \dots 1,5$) видно суттєву різницю між цими залежностями.

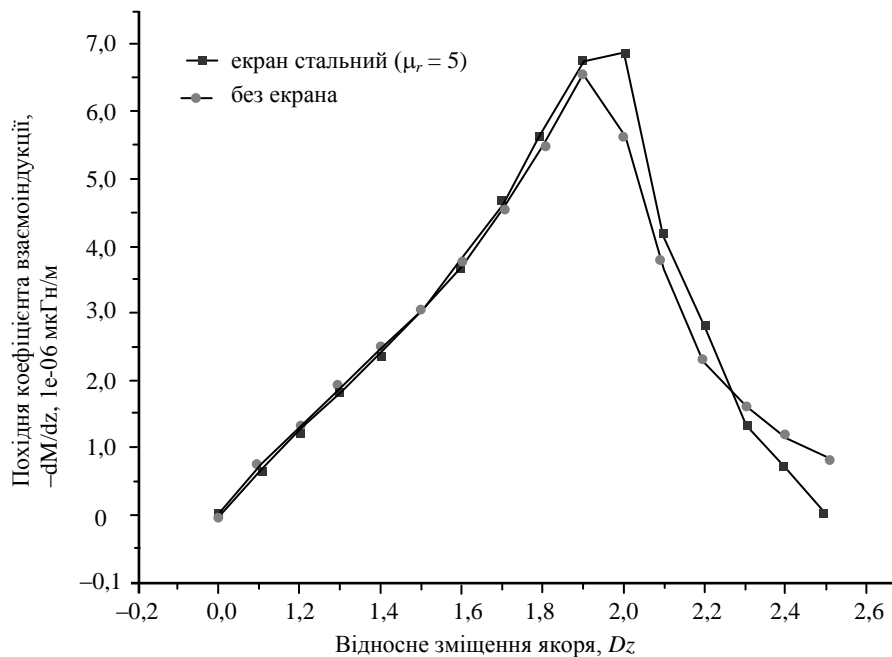


Рис. 6. Вплив зовнішнього екрана на похідну коефіцієнта взаємоіндукції

Моделювання дало змогу встановити, що сталевий екран не забезпечує достатньо ефективного захисту від зовнішніх полів.

Як видно з рис. 7, індукція поля розсіяння на відстані 0,5 м від поверхні екрана досягає 0,25 Тл. Більш ефективного екранування досягається при збільшенні електропровідності матеріалу екрана. Оцінці ефективності екранів та їх впливу на радіальний магнітний тиск присвячено наступний розділ статті.

3. Дослідження впливу зовнішнього екрана на радіальний магнітний тиск, який здатна створювати індукторна система. Радіальний тиск магнітного поля індуктора на трубчасту заготовку вивчався на тій же розрахунковій моделі при $Dz = 0$. Як матеріал екрана розглядалися сталь з нелінійною кривою намагнічування або мідь (згідно з ескізом, що представлений на рис. 1). Третій тип екрана, показаний на рис. 8, був дво-

шаровим, він складався з внутрішнього шару 1, виконаного з алюмінію, і зовнішнього шару 2, виконаного з такої самої сталі, як і осердя якоря, з нелінійною кривою намагнічування.

Товщина алюмінієвого шару становила 8 мм, решта розмірів та сама, що на рис. 1. З кожним типом екрана і без екрана за допомогою інтегрального калькулятора програми «ELCUT» вимірювався магнітний тиск у поверхневому шарі трубчастої заготовки $P_{\text{сн\ddot{a}d}}$, усереднений по всій площі поверхні, далі магнітний тиск $P_{\text{вн\ddot{a}d}}$, сере-

дній за площею поперечного перерізу заготовки, а також магнітний тиск на внутрішній $P_{\text{Квн}}$ та зовнішній $P_{\text{Кс\ddot{a}}}$ поверхнях котушки індуктора.

Різниця значень $P_{\text{Квн}} - P_{\text{Кс\ddot{a}}} = P_{\Sigma}$ дає величину внутрішнього магнітного тиску P_{Σ} , що розпирає витки котушки.

Результати вимірювань у відносному обчисленні відносно даних системи без екрана наведено в табл. 3 при одній і тій самій величині ампервитків котушки індуктора (20 мА).

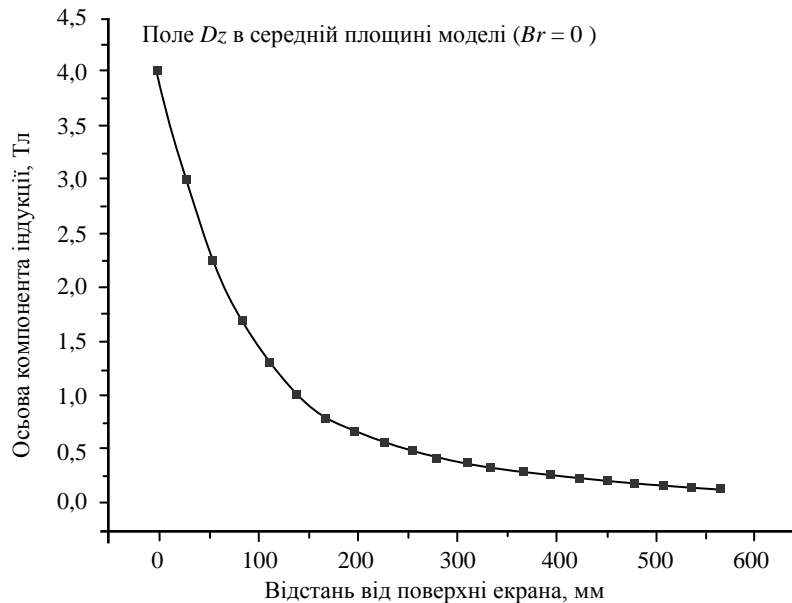


Рис. 7. Індукція поля розсіювання для сталюого екрана

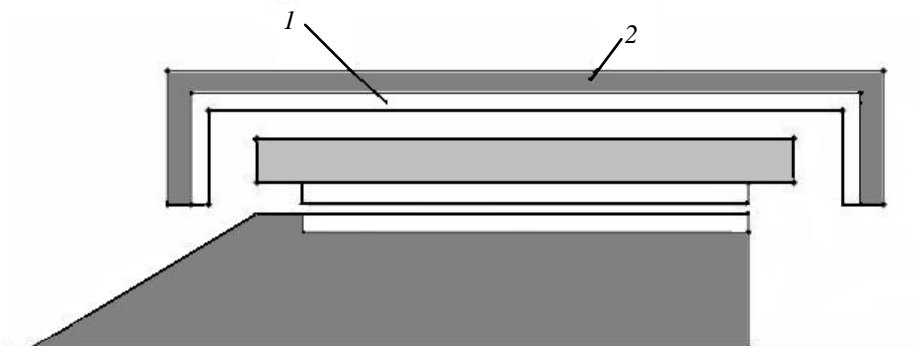


Рис. 8. Схема розрахункової моделі з двошаровим екраном:
1 — алюміній; 2 — сталь з нелінійною кривою намагнічування

Таблиця 3

№ з/п	Тип екрана	$P_{\text{ср}} / P_{\text{1ср}}$	$P_{\text{вср}} / P_{\text{1вср}}$	$P_{\Sigma} / P_{\text{1}\Sigma}$
1	Без екрану	1	1	1
2	Сталевий екран	0,735	0,792	0,788
3	Мідний екран	0,64	0,674	0,69
4	Алюміній + сталь	0,573	0,55	0,592

Дані табл. 3 показують, що найбільший радіальний тиск на заготовку створює система без зовнішнього екрана. При повному струмі котушки індуктора 20 мА магнітний тиск на поверхні мідної заготовки становить 4400 МПа. З поліпшенням екрануючих властивостей екранів (поз. 2 ... 4 в табл. 3) радіальний тиск знижується, проте разом з цим знижується внутрішній магнітний тиск, що «розпирає» витки котушки індуктора. Про екрануючі властивості розглянутих екранів можна судити за вимірним у розрахунковій моделі розподілом індукції магнітного поля зовні

від екрана, цей графік показано на рис. 9. Видно, що рівень індукції зовнішнього поля на поверхні екрана (0,28 Тл) мінімальний у комбінованого екрана «Алюміній + Сталь». Поле на поверхні мідного екрану нижче, ніж у сталевого екрана, однак воно швидко спадає до нуля з віддаленням від поверхні всього на 12 мм. Сталевий екран має на поверхні більш низьку індукцію, ніж мідний, проте його поле поширюється більш ніж на 0,5 м і зменшується до нуля на тому самому віддаленні (біля 1 м), як і поле неекранованої системи.

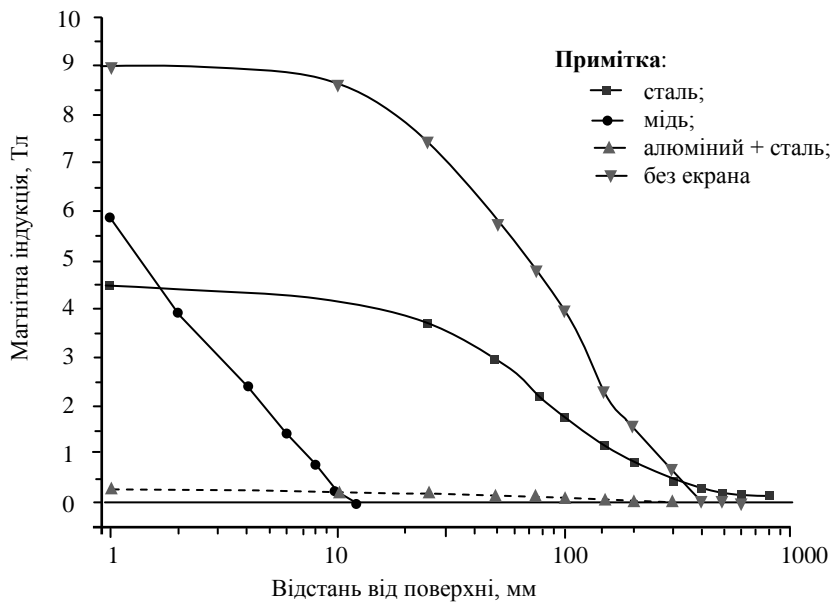


Рис. 9. Поле розсіювання для різних екранів залежно від віддалення від поверхні

Результати моделювання та їх аналіз дають змогу зробити такі висновки.

1. Дослідження струмів, магнітних полів і електродинамічних зусиль при загальмованому якорі дозволяє отримати характеристики магнітного зв'язку між котушкою індуктора і якорем залежно від переміщення якоря. Незважаючи на значний перерозподіл магнітних потоків в індукторній системі при зміні осьової координати вторинного елемента щодо котушки індуктора, характер залежності похідної коефіцієнта взаємодукції між котушкою індуктора і якорем лінійно залежить від переміщення якоря.

Характеристики $\partial M / \partial z = f(Dz)$, отримані для фіксованих моментів часу в частках від тривалості струмового імпульсу, практично однакові. Для інженерних розрахунків при проектуванні лінійних двигунів ударної дії ці характеристики можуть бути апроксимовані з достатньою достовірністю лінійною функцією координати переміщення вигляду $\partial M / \partial z = -kz$, якщо як початок координат на осі z обрати базове положення

якоря, при якому $Dz = 0$. Це означає, що за абсолютною величиною коефіцієнт взаємодукції при зміні аргументу z у межах від 0 до l_c повинен бути описаний функцією

$$M(z) = M_0 \left(1 - k \frac{z^2}{2} \right),$$

де $M_0 = M(0)$.

Це сильно відрізняється від прийнятого у багатьох роботах припущення, що коефіцієнт взаємодукції між котушкою індуктора і якорем має ділянку експоненціального спаду залежно від переміщення. Насправді має місце більш крутий спад цієї величини в квадратичній залежності від відстані.

2. Для зниження шкідливих полів розсіювання та захисту працюючого персоналу від впливу імпульсного магнітного поля з успіхом можуть бути застосовані електромагнітні екрани, серед яких найбільш ефективними можна вважати двошарові екрани, у яких внутрішній шар вико-

наний з якісного провідника (достатньо взяти алюміній), а зовнішній шар виконаний зі звичайної сталі такої якості, як лита сталь, яка використовується для виготовлення полюсних наконечників машин постійного струму.

Згідно з результатами моделювання, такий екран знижує поле розсіювання до 0,2—0,3 Тл, яке згасає до нуля на відстані 0,3 м, у той час як амплітуда поля в робочому зазорі індукторної системи становить 85 Тл.

3. Екранування зовнішніх полів розсіювання веде до того, що в індукторній системі на 45 ... 50 % знижується радіальний магнітний тиск на заготовку, що оброблюється, причому це зниження тим більше, чим вище якість екранування. Водночас електромагнітні екрани не знижують осьове зусилля на якорі при його зміщенні від базового положення, що сприяє застосуванню екранованих індукторних систем у лінійних приводах ударної дії.

4. Завдяки можливості моделювання імпульсних магнітних полів у середовищах з нелінійни-

ми магнітними властивостями програма «ELCUT» може служити ефективним інструментом для попереднього аналізу електромагнітних характеристик сильно навантажених індукторних систем при рівні магнітної індукції в робочому зазорі до 100 Тл.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Белый И. В.* Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертник, Л. Т. Хищенко. — Харьков : Изд-во ХГУ, 1977. — 168 с.
2. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. — М. : Мир, 1972. — 392 с.
3. *Михайлов В. М.* Импульсные магнитные поля / В. М. Михайлов. — Харьков : Изд-во ХГУ, 1979. — 140 с.
4. *Шнеерсон Г.А.* Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. — 2-е изд. / Г. А. Шнеерсон. — М. : Энергоатомиздат, 1992. — 416 с.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2011.