

В.Ф. БОЛЮХ, д.т.н., проф., НТУ "ХПИ"
ОМАР БЕНАЙССА, к.т.н., доц., Universite M'hamed Bougara
de Boumerdes, Бумердес, Алжир
С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспирант, НТУ "ХПИ"

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Предложен метод выбора геометрических параметров ферромагнитного сердечника индукционно-динамического устройства, основанный на введении комплексного критерия эффективности и оптимизационном подходе, при котором учитываются электродинамические показатели, массогабаритные параметры и магнитные поля рассеяния. Установлены оптимальные геометрические параметры ферромагнитного сердечника.

Ключевые слова: геометрические параметры, ферромагнитный сердечник, индукционно-динамическое устройство.

Запропоновано метод вибору геометричних параметрів феромагнітного осердя індукційно-динамічного пристрою, заснованому на введенні комплексного критерію ефективності та оптимізаційному підході, при якому враховуються електродинамічні показники, масогабаритні параметри та магнітні поля розсіяння. Визначені оптимальні геометричні параметри феромагнітного осердя.

Ключові слова: геометричні параметри, феромагнітний сердечник, індукційно-динамічний пристрій.

A method of choosing the geometric parameters of the ferromagnetic core of an induction-dynamic device, based on the introduction of systematic criteria and optimization-dimensional approach, which takes into account electromagnetic indicators, weight and dimension parameters and magnetic stray field is proposed. The optimum geometrical parameters of the ferromagnetic core have been found.

Key words: geometrical parameters, the ferromagnetic core, induction-dynamic device.

Введение. Индукционно-динамические устройства (ИДУ) широко используются в промышленных и научно-технических системах, где необходимы ударные механические нагрузки, при относительно незначительных перемещениях исполнительного ударного элемента. Возбуждаемый от емкостного накопителя энергии индуктор ИДУ

в электропроводящем массивном якоре индуцирует ток, обуславливающий возникновение электродинамических усилий (ЭДУ), передаваемых от якоря на исполнительный ударный элемент. Применение ферромагнитного сердечника (ФС) позволяет увеличить силовые показатели и уменьшить поля рассеяния ИДУ. Однако при этом ухудшаются массогабаритные показатели устройства. Поэтому задача выбора параметров ФС требует комплексного рассмотрения с учетом различных разнородных факторов ИДУ.

Анализ литературы. ИДУ используются во многих отраслях промышленности, науки и техники для механической обработки поверхностей, деформации объектов, проведения вибрационных и ударных испытаний и т.д. [1-4]. Однако традиционные ИДУ в основном функционируют без ФС, что обусловлено ограничениями по массо-габаритным показателям и импульсным характером электромагнитных процессов. Известны различные подходы, направленные на повышение удельных силовых показателей ИДУ, например, использование криогенного охлаждения, применение якоря специальной конфигурации, использование многосекционного индуктора с последовательной коммутацией секций, применение подвижного индуктора, взаимодействующего с двумя охватывающими якорями и др., которые требуют существенного усложнения конструкции и условий работы [5, 6]. При этом вопрос о применении относительно простого и недорогого ФС в рассматриваемых ударных устройствах с обоснованием его основных параметров практически не исследован.

Целью работы является разработка методики и определение оптимальных геометрических параметров ФС при ограничении массово-габаритных показателей и обеспечении максимальных силовых параметров при минимальных полях рассеяния ИДУ.

Математическая модель ИДУ. Для расчета рабочего цикла ИДУ при фиксированных параметрах ФС было проведено компьютерное моделирование в программном пакете *COMSOL Multiphysics 4.3*, основанное на дифференциальных уравнениях в частных производных, в основу которого заложен метод конечных элементов.

С использованием условия Дирихле на границах расчетной области в цилиндрической системе координат рассчитывается векторный магнитный потенциал A

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где $\mu(B)$ – магнитная проницаемость материала ФС, γ – электропроводность материала активных элементов ИДУ.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{d(rA)}{dr}; B_r = -\frac{dA}{dz}. \quad (2)$$

Локальная плотность тока в каждом конечном элементе якоря определяется по известному выражению

$$j = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (3)$$

Сила, действующая на якорь, рассчитывается по формуле:

$$f_z = 0,5 \oint (H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)) dS, \quad (4)$$

где S – поверхность, ограничивающая якорь в пространстве $\{r, z\}$.

Для ферромагнитного материала сердечника используется нелинейная кривая намагничивания $B=f(H)$.

Импульс ЭДУ, действующий на якорь, определяется выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt. \quad (5)$$

При расчете переходных электромагнитных, электродинамических и тепловых процессов ИДУ предполагается отсутствие механических перемещений и деформации элементов. При этом рассчитывается пространственное распределение индуцированного тока в якоря на каждом временном шаге.

Геометрические параметры ИДУ. Основные параметры базового варианта ИДУ без ФС представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные параметры базового варианта ИДУ без ФС.

Показатель	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора	D_{ex1}	100 мм
Внутренний диаметр индуктора	D_{in1}	10 мм
Высота индуктора	H_1	10 мм
Внешний диаметр якоря	D_{ex2}	100 мм
Внутренний диаметр якоря	D_{in2}	10 мм
Высота якоря	H_2	3 мм
Расстояние между индуктором и якорем	δ	1 мм
Количество витков индуктора	N_1	46 шт
Сечение шины индуктора	$a \times b$	$1 \times 4,8 \text{ мм}^2$
Емкость ЕНЭ	C	2850 мкФ
Зарядное напряжение ЕНЭ	U_0	400 В

Коаксиальный ФС 3 можно представить состоящим из дискового основания 3а, охватывающего индуктор 1 снизу, наружной обечайки 3b и внутреннего цилиндра 3с (рис. 1). Якорь 2 взаимодействует с немагнитными диском и бойком 4, выполненными, например, из нержавеющей стали.

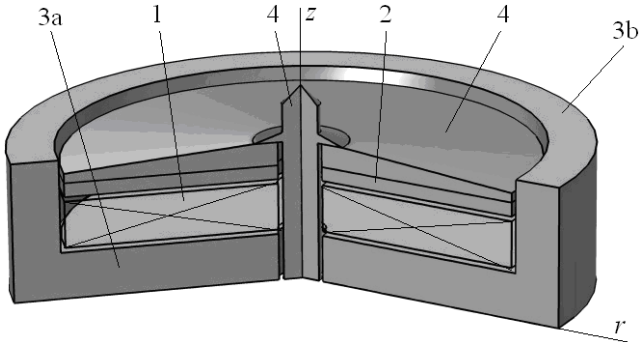


Рис. 1 – Общий вид ИДУ с ФС.

На рис. 2 показано поперечное сечение рассматриваемого ИДУ с указанием геометрических параметров ФС и распределением магнитного поля в момент максимума ЭДУ.

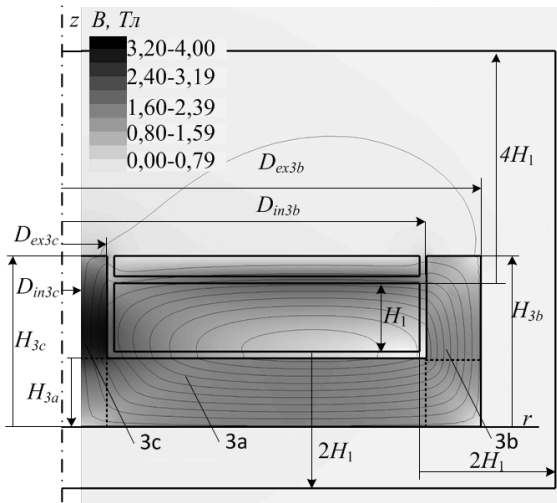


Рис. 2 – Сечение ИДУ с указанием геометрических параметров ФС.

На расстоянии $2H_1$ от нижней и боковой и на расстоянии $4H_1$ от верхней стенок индуктора жирной линией очерчена область, на которой определяется усредненное значение полей рассеяния ИДУ.

ФС, представляемый совокупностью i -ых цилиндрических участков, где $i=\{a, b, c\}$, описывается внешним диаметром D_{ex3i} , внутренним диаметром D_{in3i} и высотой H_{3i} каждого участка. Расстояние между смежно расположенными сторонами индуктора и ФС заполнено изоляцией толщиной $\delta=1$ мм. Геометрические параметры ФС опишем следующими безразмерными параметрами:

$$\chi = \frac{H_{3a}}{H_1}; \quad \varepsilon = \frac{H_{3b}}{H_1}; \quad \psi = \frac{D_{in3c}}{D_{in1}}; \quad \theta = \frac{D_{ex3b}}{D_{ex1}}. \quad (6)$$

Рассмотрим шихтованный ФС, выполненный из стали Ст. 10 (AISI 1010, UNS G10100), при отсутствии в нем вихревых токов.

Введем относительные параметры и показатели ИДУ:

$$F_{zm}^* = \frac{F_{zmi}}{F_{zm0}} - 1; \quad m_3^* = \frac{m_0}{m_i} - 1; \quad j_{1m}^* = \frac{j_{1mi}}{j_{1m0}} - 1; \quad (7)$$

$$B^* = \frac{B_0}{B_1} - 1; \quad G_H^* = \frac{H_{3mi}}{H_1} - 1; \quad G_D^* = \frac{D_{ex3bi}}{D_{ex2}} - 1,$$

где F_{zm0} , m_0 , j_{1m0} , B_0 – соответственно максимальное значение импульса ЭДУ, масса ИДУ, максимальное значение плотности тока в индукторе и среднее значение индукции магнитного поля рассеяния базового ИДУ; F_{zmi} , m_i , j_{1mi} , B_1 – соответственно максимальное значение импульса ЭДУ, масса ИДУ, максимальное значение плотности тока в индукторе, среднее значение индукции магнитного поля рассеяния i -й конфигурации ИДУ с ФС; $H_{3m} = \max\{H_{3b}, H_{3c}, (H_1 + \delta + H_2)\}$ – максимальные аксиальные габариты ИДУ.

Полученные при изменении геометрических параметров ФС силовые (F_{zm}^*), массо-габаритные (m_3^* , G_H^* , G_D^*), экологические (B^*) и токовые (j_{1m}^*) параметры приведены к базовому варианту и представлены на рис. 3 в виде функциональных зависимостей от соответствующего безразмерного геометрического параметра.

Для оценки эффективности ФС с учетом разнородных показателей используем оптимизационный подход [7].

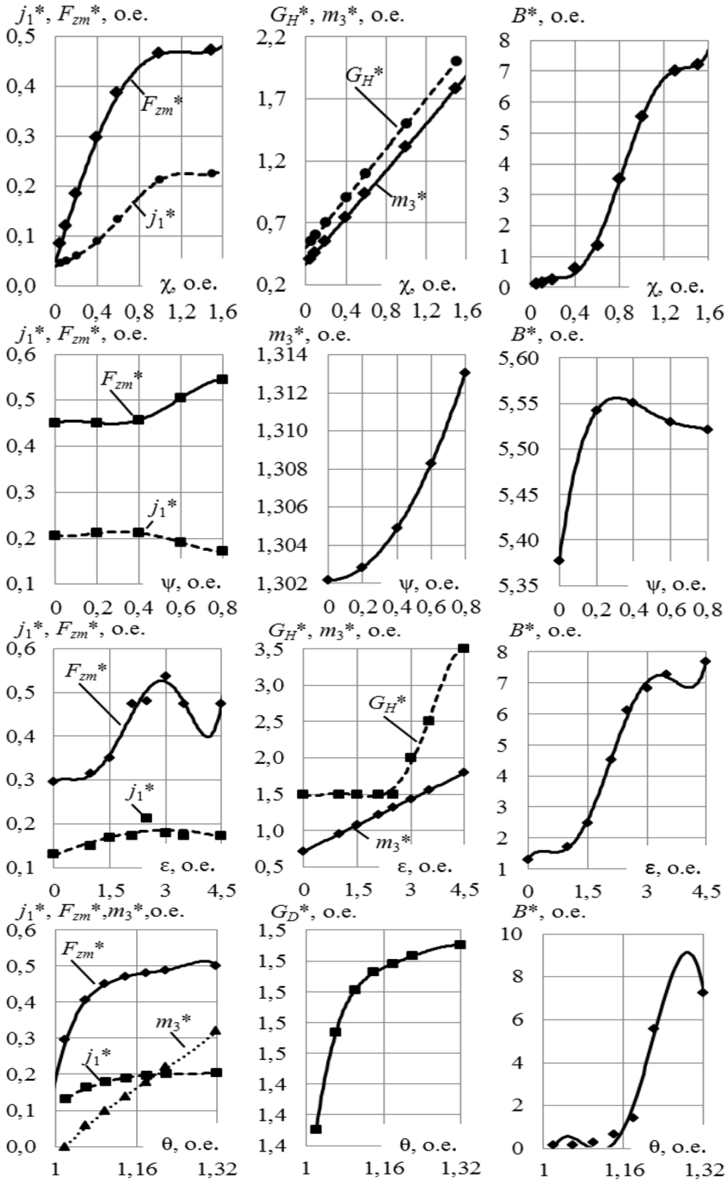


Рис. 3 – Зависимость относительных показателей ИДУ от геометрических параметров ФС.

Критерии эффективности ФС ИДУ. Для анализа введем комплексный критерий эффективности ФС ИДУ

$$\eta^* = 0,25 \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^6 \beta_i K_{ji} \quad (8)$$

где K_{ji} – i -ый частичный критерий эффективности при j -м вариационном безразмерном параметре ψ , θ , χ , ε ; K_{j1} – критерий импульса ЭДУ F_{zm}^* ; K_{j2} – критерий массы ИДУ m_3^* ; K_{j3} – критерий максимальной плотности тока в индукторе j_{1m}^* ; K_{j4} – критерий магнитного поля рассеяния; $K_{j5,6}$ – критерии аксиальных и радиальных габаритов ИДУ G_H^* , G_D^* ; β_i – весовые коэффициенты частичных критериев, удовлетворяющие соотношению

$$\sum_{i=1}^5 \beta_i = 1. \quad (9)$$

Каждый из частичных критериев описывается полиномиальной функцией n -го порядка от соответствующего геометрического параметра ФС:

$$\begin{aligned} K_{1,1} &= FI^*_{\chi} = 0,3507\chi^4 - 0,8763\chi^3 - 0,0417\chi^2 + 1,4465\chi + 0,1085; \\ K_{1,2} &= m^*_{\chi} = 0,5292\chi + 0,2043; \\ K_{1,3} &= j^*_{\chi} = 1,0972\chi^5 - 3,7555\chi^4 + 3,6807\chi^3 - 0,7191\chi^2 + 0,4628\chi + 0,1818; \\ K_{1,4} &= B^*_{\chi} = 3,5687\chi^5 - 13,718\chi^4 + 17,692\chi^3 - 8,2867\chi^2 + 1,558\chi - 0,0563; \\ K_{1,5} &= G_H^*_{\chi} = 0,5\chi + 0,25; \\ K_{1,6} &= G_D^*_{\chi} = \text{const}; \\ K_{2,1} &= FI^*_{\psi} = -3,7517\psi^4 + 5,7696\psi^3 - 2,2684\psi^2 + 0,2583\psi + 0,8184; \\ K_{2,2} &= m^*_{\psi} = 0,013\psi^2 + 0,994; \\ K_{2,3} &= j^*_{\psi} = 5,6081\psi^4 - 8,66\psi^3 + 3,2755\psi^2 - 0,1968\psi + 1,198; \\ K_{2,4} &= B^*_{\psi} = -0,397\psi^4 + 0,95\psi^3 - 0,8097\psi^2 + 0,2755\psi + 0,9689; \\ K_{2,5} &= G_H^*_{\psi} = \text{const}; \\ K_{2,6} &= G_D^*_{\psi} = \text{const}; \\ K_{3,1} &= FI^*_{\varepsilon} = -0,0206\varepsilon^3 + 0,1122\varepsilon^2 - 0,0171\varepsilon + 0,5252; \\ K_{3,2} &= m^*_{\varepsilon} = 0,133\varepsilon + 0,3969; \\ K_{3,3} &= j^*_{\varepsilon} = 0,0152\varepsilon^4 - 0,1393\varepsilon^3 + 0,3658\varepsilon^2 - 0,1737\varepsilon + 0,6012; \\ K_{3,4} &= B^*_{\varepsilon} = 0,0106\varepsilon^5 - 0,1086\varepsilon^4 + 0,3397\varepsilon^3 - 0,269\varepsilon^2 + 0,0682\varepsilon + 0,1697; \\ K_{3,5} &= G_H^*_{\varepsilon} = -0,0061\varepsilon^5 + 0,058\varepsilon^4 - 0,1673\varepsilon^3 + 0,1801\varepsilon^2 - 0,0611\varepsilon + 0,4283; \\ K_{3,6} &= G_D^*_{\varepsilon} = \text{const}; \\ K_{4,1} &= FI^*_{\theta} = 52,203\theta^3 - 190,58\theta^2 + 231,73\theta - 92,888; \\ K_{4,2} &= m^*_{\theta} = -56,306\theta^4 + 271,64\theta^3 - 491,08\theta^2 + 394,37\theta - 117,74; \\ K_{4,3} &= j^*_{\theta} = 24,511\theta^3 - 91,908\theta^2 + 115,02\theta - 47,055; \\ K_{4,4} &= B^*_{\theta} = 7466,8\theta^5 - 44799\theta^4 + 107106\theta^3 - 127539\theta^2 + 75642\theta - 17877; \\ K_{4,5} &= G_H^*_{\theta} = \text{const}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$K_{4,6}=G_D^*0=-1,38620^2+6,49390-5,1623.$$

Алгоритм поиска оптимальных параметров ФС. Для решения поставленной задачи используем симплекс-метод с ограничениями:

$$A_1x_1+A_2x_2+A_3x_3+A_4x_4+A_5x_5+A_6x_6=A_0. \quad (11)$$

где A_1, \dots, A_6 – множество линейно независимых векторов (совокупность геометрических параметров ФС).

Тогда уравнение:

$$A_1x_1^*+A_2x_2^*+A_3x_3^*+A_4x_4^*+A_5x_5^*+A_6x_6^*=A_0. \quad (12)$$

определяет базисное решение x_1^*, \dots, x_6^* .

Если решение допустимо, т.е. $x_1^* \geq 0, \dots, x_6^* \geq 0$, то базис $\{A_1, \dots, A_6\}$ образует 6-мерное пространство, в котором каждый из векторов A_1, \dots, A_6 единственным образом выражается через этот базис. Если A_r не входит в базис, то:

$$A_1x_{1r}+A_2x_{2r}+A_3x_{3r}+A_4x_{4r}+A_5x_{5r}+A_6x_{6r}=A_r. \quad (13)$$

где x_{ir} – соответствующие коэффициенты ($i=1, \dots, 6$).

Решение уравнения (11) обозначим как $\{x'_1, x'_2, x'_3, x'_4, x'_5, x'_6\}$, тогда:

$$A_1x'_1+A_2x'_2+A_3x'_3+A_4x'_4+A_5x'_5+A_6x'_6=A_0. \quad (14)$$

Умножив уравнение (13) на x_r и вычтя полученное уравнение из уравнения (12), получим:

$$A_1(x'_1+x_r x_{1r})+A_2(x'_2+x_r x_{2r})+\dots+A_6(x'_6+x_r x_{6r})=A_0-x_r A_0. \quad (15)$$

Находим связь нового решения x'_1, \dots, x'_6 с базисным решением x_1^*, \dots, x_6^* :

$$x'_1=x_1^*-x_r, x'_2=x_2^*-x_r, \dots, x'_3=x_3^*-x_r, x_r. \quad (16)$$

Чтобы новое решение оставалось допустимым выбираем значение x_r таким, чтобы ни одна из величин $x'_i=x_i^*-x_r$ ($i=1, \dots, 6$) не стала меньше нуля. Максимальное значение переменной x_r определяется соотношением:

$$x_{r \max} = \min_i \left\{ \frac{x_i^*}{x_{ir}} \right\}. \quad (17)$$

где $x_{ir} > 0$.

Чтобы сделать новое решение базисным выводим соответствующий вектор из базиса. Новое решение приобретает вид:

$$x_1^*-x_{r \max} x_{1r}, \dots, x_5^*-x_{r \max} x_{5r}, x_r x_{r \max}. \quad (18)$$

а новый базис – $\{A_1, \dots, A_5, A_r\}$. Для перехода от текущего решения к новому, которому отвечает большее значение целевой функции, используется критерий симплекс-разности. Новому допустимому базисному решению:

$$x_1^* - x_r, x_{1r}, \dots, x_1^* - x_r, x_{1r}, x_r. \quad (19)$$

соответствует следующее значение целевой функции:

$$z_1 = c_1(x_1^* - x_r, x_{1r}) + \dots + c_5(x_5^* - x_r, x_{5r}) + c_6 x_r = z_0 + x_r(c_6 - c_1 x_{1r} - \dots - c_5 x_{5r}). \quad (20)$$

где z_0 – значение целевой функции для начального допустимого базисного решения; $c_6 - c_1 x_{1r} - c_2 x_{2r} - \dots - c_5 x_{5r}$ – симплекс-разность для переменной x_r .

Симплекс-разность вычисляется для каждой переменной, не входящей в базисное решение, и выбирается такая небазисная переменная x_r , для которой симплекс-разность положительна и максимальна.

Расчетный алгоритм состоит из следующих этапов:

- 1) находим начальный базис и связанное с ним допустимое базисное решение;
- 2) вычисляем симплекс-разность для каждой переменной, не входящей в базисное решение;
- 3) вводим в базис наиболее "выгодную" переменную с максимальной положительной симплекс-разностью; ее значение $x_{r \max}$ определяют из соотношения (17) для всех $x_{ir} > 0$;
- 4) выводим из базисного решения переменную x_i , соответствующую значению:

$$\min_i \left\{ \frac{x_i^*}{x_{ir}} \right\} = \frac{x_j^*}{x_{jr}}. \quad (21)$$

а из базиса – вектор A_j ;

- 5) переходим к новой итерации.

Этапы 2-4 повторяют до тех пор, пока симплекс-разности для всех переменных, не входящих в базис, не станут отрицательными, что и будет признаком оптимальности решения.

В табл. 2 в зависимости от весовых коэффициентов частичных показателей эффективности β представлены рассчитанные оптимальные геометрические параметры ФС ε , χ , θ и ψ с указанием величины комплексного критерия эффективности ИДУ η^* .

Таблица 2 – Рассчитанные оптимальные геометрические параметры ФС.

№	β_1	β_2	β_3	β_4	$\beta_{5,6}$	ε	χ	θ	ψ	η^*
1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2,80	1,13	1,30	0,38	1,35
2	0,4	0,15	0,15	0,15	0,15	2,83	1,13	1,30	0,79	1,98
3	0,15	0,4	0,15	0,15	0,15	2,61	1,01	1,30	0,36	0,13
4	0,15	0,15	0,4	0,15	0,15	2,73	1,16	1,30	0,32	1,98
5	0,15	0,15	0,15	0,4	0,15	3,03	1,50	1,30	0,36	1,99
6	0,15	0,15	0,15	0,15	0,4	2,67	1,07	1,28	0,38	0,74

На рис. 4 представлены синтезированные с использованием данного оптимизационного подхода конфигурации ФС для вариантов 1 и 6 из табл. 2.

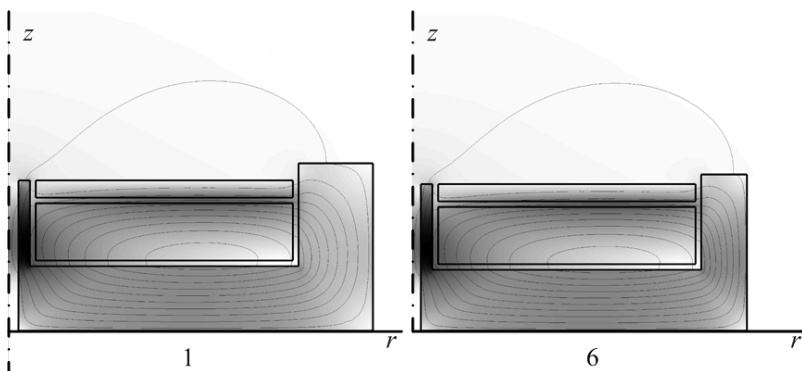


Рис. 4 – Конфигурации ФС для варианта 1 и 6 (см. табл. 2) и распределение магнитных полей ИДУ для этих вариантов.

Выводы. Предложен метод выбора геометрических параметров ФС индукционно-динамического устройства, основанный на введении комплексного критерия эффективности и оптимизационном подходе, при котором учитываются электродинамические показатели, массогабаритные параметры и магнитные поля рассеяния. Установлены оптимальные геометрические параметры ФС в зависимости от соотношения весовых коэффициентов частных критериев эффективности.

Список литературы: 1. Эффективность методов прессования корундоциркониевых порошков различной дисперсности / Анненков Ю.М., Иванов В.В., Иваиутенко А.С. и др. // Изв. Томского политехн. ун-та. 2005. Т. 308. № 7. – С. 39-42. 2. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубки-пробивки тонколистовых материалов / Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С. и др. // Металлообработка. – 2001. – №2. – С. 28-32. 3. Иваиин В.В., Иваиников Н.А., Кривонос Ю.И. Использование энергии импульсного магнитного поля для привода инструмента штамповочных машин // Прогрессивные технологии обработки материалов: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск: УНПЦ "Метолит" БГПА, 1998. – С. 61-62. 4. Пат. РФ 2248589, МПК G01V1/02. Устройство для возбуждения сейсмических волн / Чуркин И.М., Сафонон В.Н. Заявка № 2003136117/28 от 11.12.2003. – Опул. 20.03.2005. 5. Болюх В.Ф., Щужкин И.С. Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа // Электротехника і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 5-11. 6. Патент України № 56568. Кріогенний імпульсний електромеханічний перет-

воровач індукційного типу / *Болюх В.Ф., Любимова Л.О.* № 2002076134; Заявлено 23.07.02; Надрук. 15.05.03, Бюл. № 5. **7. Болюх В.Ф., Назаренко С.А.** Системный подход к мультидисциплинарной оптимизации электромеханических преобразователей ударного действия // Интегровані технології та енергозбереження. – 2010. – № 2. – С.28-36.



Болюх Владимир Федорович, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Криогенная техника" в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.



Омар Бенансса, к.т.н., доцент факультета научной инженерии UMVB, Бумердес, Алжир. Защитил диплом инженера по специальности электрические машины и аппараты Запорожского машиностроительного института в 1980 г. Диссертацию по специальности электрические машины и аппараты защитил в 1984 г. в Харьковском политехническом институте. Научные интересы связаны с электрическими машинами.



Олексенко Сергей Владимирович. Защитил диплом магистра в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" в 2011 г. Аспирант кафедры общей электротехники НТУ "ХПИ". Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия.

Поступила в редколлегию 26.11.2012