

**В. Ф. БОЛЮХ, С. В. ОЛЕКСЕНКО**

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОСЕКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ С НАРУЖНЫМ ЭКРАНОМ

Разработана компьютерная модель многосекционного линейного индукционно-динамического ускорителя (ЛИДУ) массивного исполнительного элемента, которая учитывает взаимосвязанные электромагнитные, механические и тепловые процессы. Синтезированы параметры многосекционного ЛИДУ, обеспечивающего максимальную эффективность при минимальном уровне магнитных полей рассеяния. Проведен анализ многосекционных ЛИДУ при отсутствии экрана, с использованием ферромагнитного (ФЭ) и комбинированного экрана. Наименьшая скорость обеспечивается ЛИДУ без экрана, а наибольшая – при использовании ФЭ. ВЛИДУ без экрана уровень полей рассеяния в 1,6 раза ниже, чем в односекционном ускорителе с ФЭ. При наличии ФЭ уровень полей рассеяния в ЛИДУ уменьшается в 2,3 раза, а при наличии комбинированного экрана – в 7,2 раза.

**Ключевые слова:** линейный индукционно-динамический ускоритель, многосекционный ЛИДУ, электромагнитные, механические и тепловые процессы, ферромагнитный и комбинированный экраны.

**Вступление.** Линейный индукционно-динамический ускоритель (ЛИДУ) применяется для высокоскоростного разгона массивного исполнительного элемента (ИЭ) до высокой скорости на коротком активном участке [1]. В качестве импульсного источника питания в этих ускорителях, как правило, используется емкостной накопитель энергии (ЕНЭ).

При возбуждении неподвижного индуктора от ЕНЭ в электропроводящем якоре индуцируется импульсный ток, взаимодействие которого с магнитным полем индуктора приводит к возникновению электродинамических усилий (ЭДУ), под действием которых осуществляется линейное перемещение якоря с массивным ИЭ.

Интерес представляют коаксиальная конфигурация ЛИДУ, в которой якорь с ИЭ линейно перемещается относительно индуктора сквозь его внутреннюю полость. Такая пролетная конфигурация ЛИДУ может эффективно использоваться для дополнительного ускорения якоря с ИЭ, предварительно ускоренного неэлектромагнитными силами, например химическими, пневматическими, гидравлическими и др.

Особый интерес представляет ЛИДУ пролетной конфигурации, в котором обеспечивается последовательное возбуждение по ходу движения якоря секций индуктора, распределенных в пространстве вдоль оси перемещения. Однако при этом практически не исследованы вопросы оптимального распределения энергии между секциями ЕНЭ, которые обеспечивают питание секций индуктора, и моменты их подключения в зависимости от положения ускоряемого якоря. Поскольку в ЛИДУ пролетной конфигурации возникают сильные импульсные поля, то возникает вопрос по выбору конструкции наружного экрана.

**Анализ литературы.** ЛИДУ, обеспечивающие разгон массивных ИЭ до высокой скорости, применяются во многих областях науки и техники [1]. Для авиационной, ракетно-космической и оборонной техники разрабатываются пусковые устройства и ускорители массивных объектов [2, 3]. ЛИДУ используются для ударно-конденсаторной сварки, импульсной штамповки, клепально-сборочных работ, для электро-

динамической сепарации и измельчения порошков, для магнитно-импульсного уплотнения порошков входящих в композитные составы и др. [4-6]. Для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты используются научно-технологические пусковые установки [7-8]. Высокоскоростные устройства применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в защитных электрических аппаратах, в топливной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки и т.д. [9-11]. ЛИДУ применяются для очистки вагонов, трюмов, фильтров и иных емкостей от остатков продуктов и налипших материалов, в противообледенительных системах самолетов, ЛЭП и иных ответственных объектов [12]. Перспективными сферами использования ЛИДУ являются устройства дополнительного ускорения подвижных объектов, защита помещений и ответственных объектов от нежелательного в них проникновения, уничтожение информации на цифровых носителях при несанкционированном доступе, баллистическая гравиметрия и др. [13-15].

На основе анализа можно выделить дисковую и пролетную конфигурацию ЛИДУ. В дисковой конфигурации ЛИДУ якорь представляет собой электропроводящий диск, индукционно взаимодействующий с дисковым индуктором. Такой ЛИДУ имеет относительно малые аксиальные и значительные радиальные размеры. Вся энергия ЕНЭ разряжается на индуктор в начале рабочего процесса, вследствие чего магнитный и силовой импульсы достигают больших величин. При этом радиальные размеры ИЭ не ограничены.

В пролетной конфигурации ЛИДУ якорь представляет собой электропроводящий цилиндр, который перемещается во внутренней полости секций индуктора. Как правило, секции индуктора выполняются в форме вытянутых полых цилиндров, каждая из которых возбуждается от соответствующей секции ЕНЭ при определенном положении движущегося якоря. ЛИДУ пролетной конфигурации имеет относительно большие аксиальные и незначительные радиальные размеры. Энергия ЕНЭ последовательно порционно

подається на секції індуктора, внаслідок чого магнітні і силові імпульси виникають в різні моменти часу, не досягаючи великих значень. При цьому радіальні розміри ІЕ обмежені діаметром внутрішньої порожнини секцій індуктора.

Учитывая значительный уровень импульсных магнитных полей, в ЛИДУ необходимо использовать наружный экран, обеспечивающий уменьшение полой рассеяния в окружающее пространство. Необходимо учитывать, что тонкостенный электропроводящий экран уменьшает, а ферромагнитный экран (ФЭ) – усиливает магнитные поля в активной зоне ускорителя. ФЭ для эффективной работы в импульсных магнитных полях должен обладать минимальной электропроводностью, что реализуется выполнением его, например из магнитодиэлектрика [16].

В качестве импульсного источника целесообразно использовать ЕНЭ с электронной схемой, формирующей аperiodический импульс тока в индукторе (индуктор шунтирован обратным диодом), что позволяет применять электролитические конденсаторы с высокими удельными параметрами [17].

**Целью работы** является синтез параметров и анализ эффективности многосекционного коаксиального ЛИДУ пролетной конфигурации с наружным экраном.

**Математическая модель ЛИДУ.** Для расчетов рабочих процессов ЛИДУ проведено компьютерное моделирование в программном пакете *COMSOL Multiphysics* 4.4, основанное на дифференциальных уравнениях в частных производных, в основу которого заложен метод конечных элементов. Указанные преобразователи имеют осевую симметрию, что позволяет использовать двумерную осесимметричную математическую модель [18].

Электромагнитный процесс описан системой дифференциальных уравнений в системе координат  $(rz)$  в зависимости от комплексного векторного магнитного потенциала  $\bar{A} = (\bar{A}_r, \bar{A}_{phi}, \bar{A}_z)$ :

для немагнитных материалов:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\mu_0^{-1} \cdot \mu_r^{-1} \cdot \bar{B}) - \sigma \cdot \bar{V} \times \bar{B} = \bar{j}_e, \quad (1)$$

для ферромагнетиков:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \bar{H} - \sigma \cdot \bar{V} \times \bar{B} = \bar{j}_e, \quad (2)$$

$$\text{индукция магнитного поля } \bar{B} = \nabla \times \bar{A}, \quad (3)$$

напряженность магнитного поля для ФЭ

$$\bar{H} = f(\bar{B}), \quad (4)$$

где  $\sigma$  – электрическая проводимость, адаптивно учитывающая текущую температуру материала;

$\mu_0, \mu_r$  – абсолютная и относительная магнитная проницаемость;

$V$  – скорость якоря с ИЭ;

$j_e$  – плотность тока в узле.

Уравнение (1) для многосекционного индуктора можно представить следующим образом

$$\sigma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\mu_0^{-1} \cdot \mu_r^{-1} \cdot \bar{B}) - \sigma \cdot \bar{V} \times \bar{B} = \frac{i_1 \cdot N}{S_1}, \quad (5)$$

где  $i_1$  – ток в индукторе;

$N$  – число витков индуктора;

$S_1$  – сечение витка индуктора.

Значение аксиальных электродинамических сил, действующих на якорь, определяется посредством тензора натяжения Максвелла ( $T$ ):

$$\bar{f}_z = 2 \cdot \pi \cdot r \int_{\Omega} \bar{n} \cdot T ds; \quad (6)$$

где  $\bar{n}$  – вектор внешней нормали к поверхности интегрирования  $\Omega$ .

Система уравнений (1)-(6) содержит начальные условия:

$$\bar{A}_{t=0}(\bar{A}_r, \bar{A}_z) = \bar{A}(0,0) \quad (7)$$

и граничные условия:

$$\bar{n} \times \bar{A} = 0. \quad (8)$$

Сопротивление среды для ускоряемого якоря с ИЭ описывается уравнением Навье-Стокса для движущегося поля  $\bar{u} = (u, v)$  и давлением  $p$  для деформируемой подвижной системы координат:

$$\rho \frac{d\bar{u}}{dt} - \nabla \left[ -p\bar{I} + \eta \left( \nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right) \right] + \rho \left( (\bar{u} - \bar{u}_m) \nabla \right) \bar{u} = \bar{F}; \quad (9)$$

$$-\nabla \cdot \bar{u} = 0; \quad (10)$$

где  $\bar{I}$  – единичная диагональная матрица;

$\bar{F}$  – объёмная сила, действующая на среду;

$u_m$  – координатная скорость системы;

$P$  – плотность среды.

Структурные изменения твёрдого тела описываются при помощи эластичной и нелинейной деформации согласно уравнению:

$$\bar{F}_T = -\bar{n} \cdot \left( -p\bar{I} + \eta \left( \nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right) \right), \quad (11)$$

где  $\bar{n}$  – вектор внешней нормали.

Система уравнений (9)-(11) содержит начальные условия:

$$\bar{u} = 0, \frac{d\bar{u}}{dt} = 0, p = 0 \quad (12)$$

и граничные условия:

$$\bar{u} = 0. \quad (13)$$

Тепловые процессы в ЛИДУ описываются уравнением:

$$\rho_m C_p \frac{dT}{dt} + \rho_m C_p \bar{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (14)$$

где  $C_p$  – теплоемкость;

$\rho_m$  – плотность материала;

$T$  – температура;

$Q$  – энергия тепловыделений;

$k$  – теплопроводность.

Уравнение (14) содержит начальное условие:

$$T = T_0 \quad (15)$$

и граничные условия:

$$-\bar{n} \cdot (-k \nabla T) = 0, \quad (16)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды.

Решения системы уравнений (1)-(16) произведено методом BDF (backward differentiation formula) с фик-

сированным шагом по времени и использованием решателя PARDISO.

**Постановка задачи параметрического синтеза многосекционного ЛИДУ пролетной конфигурации.** Рассмотрим четырехсекционный ЛИДУ, у которого индуктор (индекс 1) содержит начальную дисковую секцию (а) и три последующие полые цилиндрические секции (b, c, d). Якорь (индекс 2) ускорителя выполнен в виде полого цилиндра с основанием, обращенным к дисковой секции индуктора. Секции индуктора могут быть охвачены наружным экраном. Этот экран может быть ФЭ (индекс 3) или комбинированным. Последний состоит из ФЭ, охваченного снаружи электропроводящим экраном (индекс 4) [19].

Основные параметры ЛИДУ:

**Геометрические параметры i-й секции индуктора:** внешний диаметр  $D_{ex-i}$ , внутренний диаметр  $D_{in-i}$  и высота  $H_i$ , площадь сечения медной шины  $S_i$ , количество витков  $N_i$ .

**Геометрические параметры якоря:** внешний диаметр  $D_{ex2}$ , внутренний диаметр цилиндрической стенки  $D_{in2}$ , внутренний диаметр основания  $D_{in2-2}$ , высота цилиндрической стенки  $H_2$  и высота основания  $H_{2-2}$ .

**Геометрические параметры наружного экрана:** высота дискового основания  $H_{3a}$ , высота внутренней обечайки для дисковой секции индуктора  $H_{3b}$ , высота внешней обечайки  $H_{3c}$ , внешний  $D_{ex3a}$  и внутренний  $D_{in3a}$  диаметры основания, внешний  $D_{ex3b}$  и внутренний  $D_{in3b}$  диаметры внутренней обечайки, внешний  $D_{ex3c}$  и внутренний  $D_{in3c}$  диаметры внешней обечайки. ФЭ 3 выполнен из магнитоэлектрика с магнитными свойствами стали Ст. 10. Электропроводящий экран 4 выполнен из технической меди.

**Параметры ЕНЭ:** емкость  $C_i$  и зарядное напряжение  $U_{0i}$  i-ой секции ЛИДУ.

Для параметрического синтеза многосекционного ЛИДУ используем постоянные, зависимые и варьируемые параметры при заданных ограничениях, которые обеспечивают основные показатели работы.

**Постоянные параметры:** масса ИЭ  $m_e=0,104$ кг; общая энергия ЕНЭ  $E=180$  Дж; коэффициент заполнения секций индуктора  $K_v=0,88$ ,  $D_{ex2}=6$  мм,  $D_{in2}=4$  мм,  $D_{in2-2}=1$  мм,  $H_2=11$  мм,  $H_{2-2}=2$  мм, индукция магнитного поля рассеяния  $B<0,4$  Тл на заданной границе (граница расчета магнитного поля рассеяния в радиальном направлении составляет 18 мм, в аксиальном – 9 мм от основания).

**Зависимые параметры:**

$$N_{1-i} = \left\lfloor 0,5(D_{ex1-i} - D_{in1-i})H_{1-i}K_vS_i^{-1} \right\rfloor; \quad (17)$$

$$D_{in3c} = \max_{i=1}^4(D_{ex-i}); \quad (18)$$

$$D_{ex3b} = D_{ex-1}; \quad (19)$$

**Ограничения варьируемых параметров:**  $D_{ex-i}<18$  мм;  $D_{ex3b}<18$  мм;  $D_{ex3c}<18$  мм;  $D_{in-i}<D_{ex-i}$ ;  $H_1<18$  мм;  $H_{3a}<9$  мм;  $H_{3b}<3 \cdot 18$  мм;  $D_{ex3b}>D_{in3b}$ ;  $D_{ex3c}>D_{in3c}$ .

**Основные показатели работы:** максимальное значение скорости на выходе ускорителя  $V$  и усредненное значение магнитного поля рассеяния  $B$  на границе расчета.

Для выбора параметров многосекционного ЛИ-

ДУ использован метод Нелдера-Мида [20].

Рассмотрим многосекционные ЛИДУ-1 без наружного экрана, ЛИДУ-2 с ФЭ и ЛИДУ-3 с комбинированным экраном. В качестве базового варианта используем односекционный ЛИДУ-0 с ФЭ (рис.1).

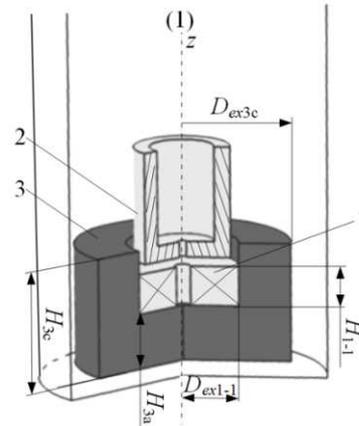


Рис. 1 – Конфигурация базового варианта ЛИДУ-0

На рис. 2 представлены конфигурации и указаны геометрические параметры многосекционных ЛИДУ. На рис. 2 ФЭ выделен темным тоном. Индуктор 1 состоит из начальной дисковой секции а и трех последующих секций b, c, d, выполненных в форме полых цилиндров. Якорь 2 выполнен в форме стакана (цилиндрическая стенка с основанием). ФЭ 3 охватывает секции индуктора, а электропроводящий экран 4 – охватывает ФЭ с наружной поверхности.

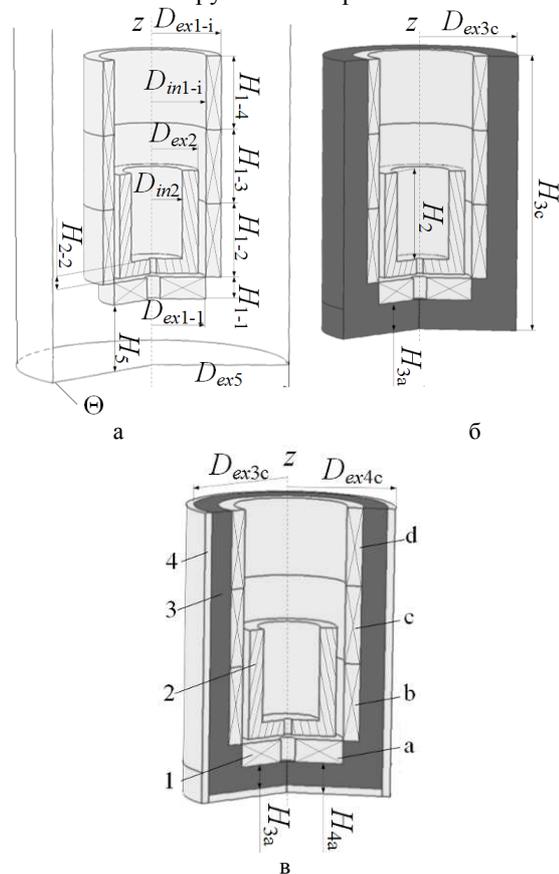


Рис. 2 – Геометрические параметры многосекционных ЛИДУ: а – ЛИДУ-1, б – ЛИДУ-2, в – ЛИДУ-3; Θ – расчетная область поля рассеяния

В табл. 1 представленны параметры синтезированных секций ЕНЭ и индуктора многосекционных ЛИДУ. Индуктор базового варианта ЛИДУ-0 выполнен с параметрами  $N=25$ ,  $S=1,0 \text{ мм}^2$  и возбуждается от ЕНЭ с  $U_0=600 \text{ В}$ ,  $C=1000 \text{ мкФ}$ .

Таблица 1 – Параметры секций ЕНЭ и индуктора многосекционных ЛИДУ

Параметр	Секция индуктора			
	a	b	c	d
$U_{0i}$ , В	400	600	600	800
$C_{i}$ , мкФ	400	272	272	155
$N_i$ , шт	18	35	35	26
$S_i$ , мм <sup>2</sup>	0,88	0,50	0,50	0,66

В многосекционных ЛИДУ параметры средних секций **b** и **c** индуктора и ЕНЭ одинаковы, в то время как параметры начальной **a** и конечной **d** секций существенно отличаются. В начальной секции **a** индуктора емкость ЕНЭ наибольшая (400 мкФ), а его напряжение – наименьшее (400 В); число витков этой секции наименьшее (18), а сечение провода – наибольшее (0,88 мм<sup>2</sup>). В конечной секции **d** индуктора емкость ЕНЭ наименьшая (155 мкФ), а его напряжение – наибольшее (800 В); число витков этой секции наибольшее (26), а сечение провода – наименьшее (0,66 мм<sup>2</sup>).

На рис. 3 представлено изменение скорости ИЭ на протяжении рабочего процесса для базового и многосекционных ЛИДУ. После каждого силового импульса, возникающего при возбуждении соответствующей секции индуктора, наблюдается некоторое снижение скорости. Это объясняется, в основном, наличием тормозной электродинамической силы, обусловленной более коротким импульсом индуцированного тока в якоре, по сравнению с током секции индуктора.

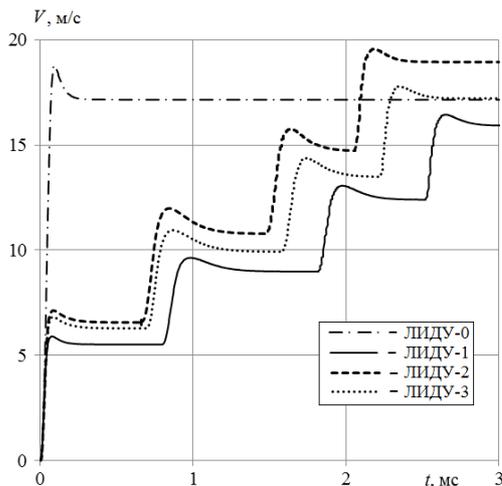


Рис. 3 – Изменение скорости якоря с ИЭ в течение рабочего процесса ЛИДУ

В базовом варианте ЛИДУ-0 возникает короткий и мощный силовой импульс в начале рабочего процесса, вызывающий повышение скорости якоря с ИЭ до 18 м/с за 0,1 мс. В многосекционных ЛИДУ скорость якоря с ИЭ возрастает последовательно по мере

перемещения якоря и возбуждения последующих секций индуктора от секций ЕНЭ. На выходе из ускорителя его скорость существенно зависит от наружного экрана. Наименьшая скорость обеспечивается ЛИДУ-1 без экрана, а наибольшая – ЛИДУ-2 с ФЭ. При этом ЛИДУ-3 с комбинированным экраном обеспечивает такую же скорость, как и базовый вариант ЛИДУ-0.

В табл. 2 представлены параметры эффективности ЛИДУ, получаемые после последовательного возбуждения каждой секции индуктора (**a-d**), так и результирующую эффективность ( $\Sigma$ ) ускорителя.

Таблица 2 – Эффективность ЛИДУ  $\eta$ , %

Ускоритель	a	b	c	d	$\Sigma$
ЛИДУ-0	8,65	-	-	-	8,65
ЛИДУ-1	4,95	5,35	7,75	10,38	7,32
ЛИДУ-2	6,74	7,98	10,56	14,79	10,35
ЛИДУ-3	6,28	6,41	8,86	12,05	8,60

Эффективность ЛИДУ оцениваем соотношением:

$$\eta = (m_2 + m_e) \cdot V^2 C^{-1} U_0^{-2}. \quad (20)$$

где  $m_2$  – масса якоря.

Как видно из полученных данных, наименьшую эффективность обеспечивает начальная секция индуктора **a**. При этом эффективность каждой последующей секции индуктора возрастает. На выходе ЛИДУ-2 развивается наибольшая скорость ИЭ 18,9 м/с, что обеспечивает эффективность 10,31 %. Для ЛИДУ-3 конечная скорость и эффективность составляют, соответственно 17,3 м/с и 8,58 %, что практически совпадает с показателями базового ЛИДУ-0. ЛИДУ-1 развиваются наиболее низкие показатели скорости и эффективности, составляющие, соответственно 15,9 м/с и 7,31 %.

Эффективность многосекционного ЛИДУ существенно зависит от конструкции его наружного экрана. Так при отсутствии экрана результирующая эффективность ЛИДУ-1 ниже, чем эффективность базового варианта ЛИДУ-0, в то время как при наличии ФЭ эффективность ЛИДУ-2 – заметно выше.

Наружный экран, помимо влияния на эффективность ЛИДУ, существенно влияет на магнитные поля рассеяния. На рис. 4 представлено изменение усредненного уровня полей рассеяния на поверхности расчетной области во время рабочего процесса для исследуемых типов ЛИДУ.

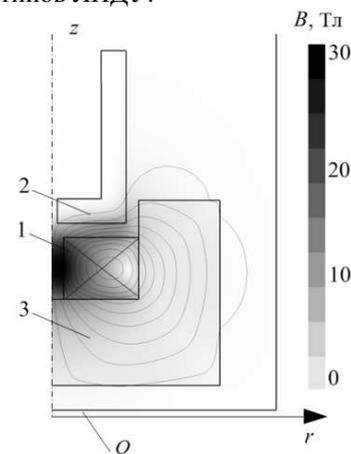


Рис. 4 – Распределение магнитных полей в ЛИДУ-0 в момент максимума ЭДУ

Очевидно, что наибольшие поля рассеяния возникают в базовом варианте ЛИДУ-0, где действует один мощный импульс возбуждения индуктора в начале рабочего процесса. На рис. 4 показано распределение магнитных полей в ЛИДУ-0 в момент максимума ЭДУ, действующих между индуктором 1 и якорем 2 при наличии ФЭ 3. Указанный уровень импульсных магнитных полей в активной зоне ЛИДУ-0 существенно превышает уровень магнитного поля насыщения ФЭ. Более того, при таком уровне магнитных полей возможны серьезные проблемы, связанные с механической надежностью, прежде всего, многovitкового индуктора, на внутренней поверхности которого возникают максимальные поля.

Важнейшим фактором снижения величины магнитного поля рассеяния является уменьшение величины токовых импульсов. Так, в ЛИДУ-1, в котором отсутствует наружный экран, уровень максимальных полей рассеяния 1,6 раза ниже, чем в базовом варианте ЛИДУ-0 с ФЭ. Еще большее снижение полей рассеяния обеспечивается при наличии экрана. Так, в ЛИДУ-2 по сравнению с базовым вариантом максимальный уровень полей рассеяния уменьшается в 2,3 раза, а в ЛИДУ-3 – в 7,2 раза. Для всех многосекционных ЛИДУ наибольшее импульсное значение магнитного поля возникает во время работы первой секции индуктора **a**. При возбуждении последующих секций индуктора уровень магнитных полей рассеяния уменьшается (табл. 3). Магнитные поля рассеяния имеют форму аperiodических импульсов с коротким передним и удлиненным задним фронтом (рис. 5).

Таблица 3 – Максимальные значения индукции магнитного поля рассеяния ЛИДУ, Тл

Ускоритель	a	b	c	d
ЛИДУ-0	0,72	-	-	-
ЛИДУ-1	0,44	0,35	0,34	0,36
ЛИДУ-2	0,31	0,20	0,19	0,21
ЛИДУ-3	0,10	0,09	0,07	0,07

Таким образом, принимая во внимание эффективность ускорителя и уровень магнитных полей рассеяния предпочтение отдается многосекционному ЛИДУ-3 с комбинированным экраном.

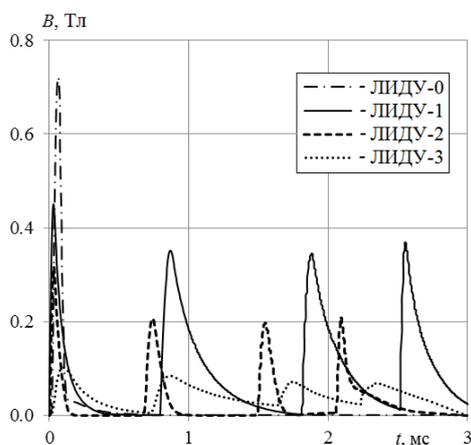


Рис. 5 – Изменение уровня полей рассеяния во время рабочего процесса ЛИДУ

**Анализ результатов работы ЛИДУ-3.** Рассмотрим электромеханические и магнитные процессы многосекционного ЛИДУ-3. На рис. 6 показано изменение плотностей тока в якоре (**Я**) и секциях индуктора (**a, b, c, d**) ЛИДУ-3. Смежные секции индуктора возбуждаются импульсами противоположной полярности. Поскольку каждая секция индуктора, подключаемая к соответствующей секции ЕНЭ, шунтирована диодом, то при возбуждении последующей секции индуктора в также ней наводится ток. Применение чередующегося полярности секций ЕНЭ для возбуждения смежных секций индуктора позволяет добиться эффекта, при котором величина тока в последующей секции индуктора больше, чем в предыдущей секции. Таким образом, компенсируется негативное тормозное воздействие на якорь последующей секции индуктора.

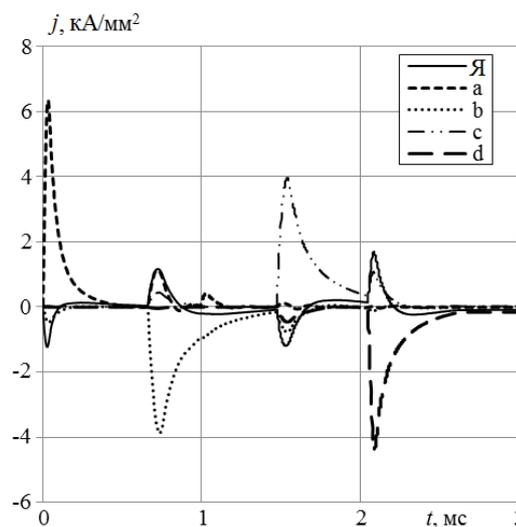


Рис. 6 – Изменение плотностей тока в якоре (Я) и секциях индуктора (a-d) ЛИДУ-3

Наибольшая величина плотности тока возбуждается в начальной секции индуктора **a**. Секция индуктора **b** возбуждается плотностью тока уменьшенной примерно на треть. После чего в последующих секциях индуктора плотность тока несколько возрастает. При этом можно отметить, что в якоре **Я** импульс тока имеет противоположную полярность к соответствующей секции индуктора. Однако длительность такого импульса более чем в 2 раза короче импульса секции индуктора. После этого ток в якоре, меняя полярность, плавно затухает.

На рис. 7 показаны силовые и магнитные характеристики ЛИДУ-3. В качестве силовых характеристик показаны величина  $f_z$  и импульс  $F_z$  ЭДУ, а в качестве магнитной характеристики – поле рассеяния  $B$  на расчетной поверхности ЛИДУ. Вследствие изменения полярности токов в якоре величина ЭДУ после короткого и мощного положительного (толкающего) импульса, сила принимает отрицательное (тормозное) значение значительно меньшей величины. При этом величина первого импульса ЭДУ  $f_z$  примерно в 4 раза превышает величину последующих импульсов.

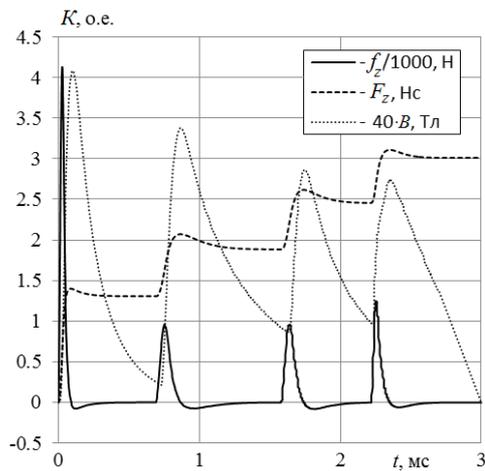


Рис. 7 – Силовые и магнитные характеристики ЛИДУ-3

Каждый из силовых импульсов повышает величину импульса ЭДУ  $F_z$ . Некоторое уменьшение импульса ЭДУ обусловлено наличием тормозных ЭДУ. Можно отметить, что величины импульсов полей рассеяния  $B$  последовательно уменьшаются, не уменьшаясь до нуля между возбуждением смежных секций индуктора.

На рис. 8 показано распределение плотностей тока в активных элементах ЛИДУ-3 в различные моменты времени, при которых импульсы ЭДУ максимальны. При возбуждении последующей секции индуктора в предыдущей секции сохраняется ток. Более того, ток наводится в части наружного электромагнитного экрана 4, находящейся напротив возбуждаемой секции индуктора. В якоре 2 наибольшая плотность тока наводится в угловой части, смежной с цилиндрическим участком и плоским основанием.

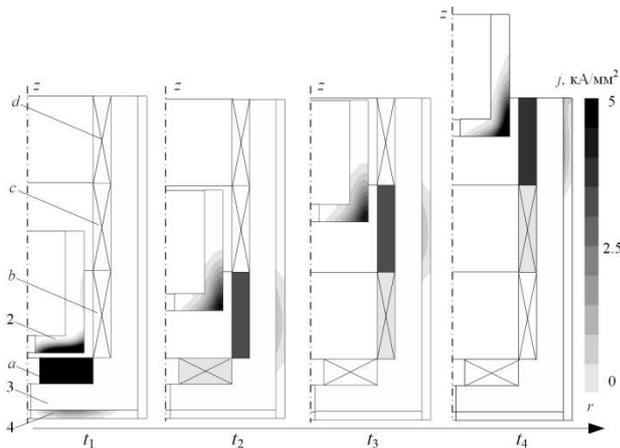


Рис. 8 – Распределение плотностей тока в активных элементах ЛИДУ-3 в различные моменты времени

На рис. 9 показаны распределения магнитных полей в активной зоне ЛИДУ-3 для представленных на рис.8 моментов времени. Наибольшие уровни магнитных полей (~15 Тл) создаются при возбуждении начальной секции **a** индуктора в момент  $t_1$ .

Наружный электромагнитный экран практически экранирует поле рассеяния. При возбуждении последующих секций индуктора **b**, **c**, **d** возбуждаются меньшие уровни магнитных полей, максимальные значения которых не превышают 8-9 Тл.

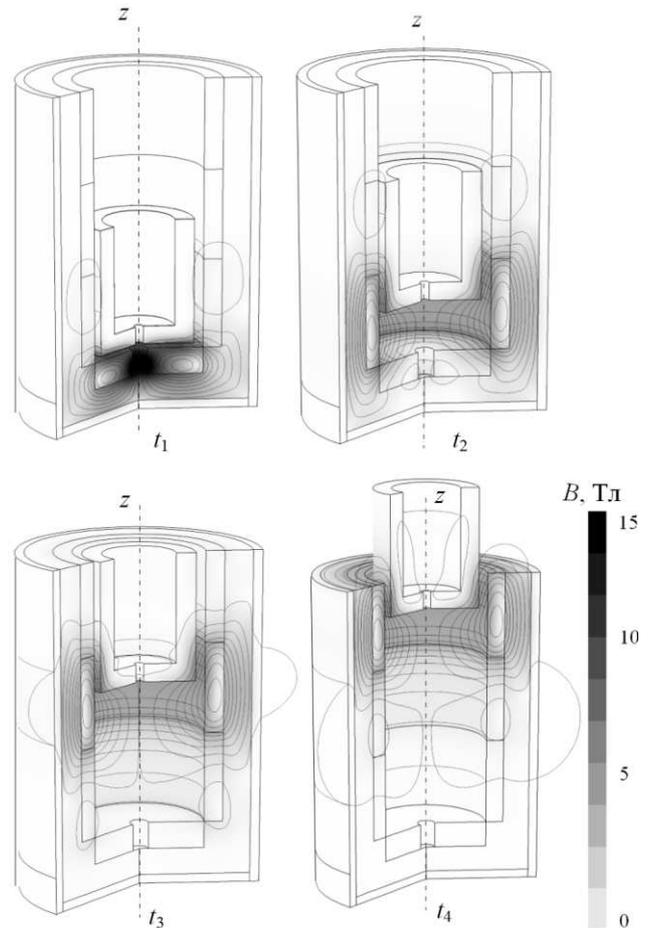


Рис. 9 – Распределение магнитных полей в ЛИДУ-3 в различные моменты времени

Таким образом, для уменьшения магнитных полей рассеяния наиболее эффективен комбинированный экран. Эффективность такого экрана обусловлена тем, что магнитные поля в основном экранируются ФЭ. Но поскольку ФЭ при этом находится в состоянии насыщения, то проходящие через него магнитные поля дополнительно экранируются индуцированными токами в электропроводящем экране.

**Выводы.** На основании математической модели разработана компьютерная модель многосекционного линейного индукционно-динамического ускорителя массивного ИЭ, которая учитывает взаимосвязанные электромагнитные, механические и тепловые процессы. Проведен синтез параметров многосекционного ЛИДУ, обеспечивающего максимальную эффективность при минимальном уровне магнитных полей рассеяния.

Проведен анализ эффективности ЛИДУ при отсутствии наружного экрана, с использованием ФЭ и комбинированного экрана. Наименьшая скорость обеспечивается ускорителем без экрана, а наибольшая – при использовании ФЭ. В ЛИДУ без экрана уровень максимальных полей рассеяния 1,6 раза ниже, чем в односекционном ускорителе с ФЭ. При наличии ФЭ уровень полей рассеяния уменьшается в 2,3 раза, а при наличии комбинированного экрана – в 7,2 раза. В многосекционных ускорителях наибольшее значение магнитного поля возникает во время работы первой секции индуктора.

**Список литературы:** 1. *Болюх В.Ф., Щужин И.С.* Линейные индукционно-динамические преобразователи. – Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing – 2014. – 496 с. (<https://www.lap-publishing.com>). 2. *Fair H.D.* Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era // *IEEE Trans. Magnetics*. – 2005. – № 1, Vol. 41. – P. 158-164. 3. *Reck B.* First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range // *IEEE Trans. Magnetics*. – 2003. – № 1, Vol. 39. – P. 310-313. 4. *Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Меркулов Р.В.* Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом // Сварочное производство. – 2009. – № 2. – С. 33-35. 5. *Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S.* High-efficiency impact electromechanical converter // *Russian electrical engineering*. – 2011. – Vol. 82, № 2. – P. 104-110. 6. *Туманов И.Е.* Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы многофракционных жидких продуктов // *Электротехника*. – 2013. – № 8. – С. 48-52. 7. *Upshaw J.L., Kajs J.P.* Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator // *IEEE Trans. Magnetics*. – 1991. – № 1, Vol. 27. – P. 607-610. 8. *Косцов Э.Г.* Микроэлектромеханический ускоритель твердотельных объектов // *Автометрия*. – 2012. – Т. 48, № 4. – С. 93-103. 9. *Bolyukh V.F., Katkov I.I.* Cryogenic cooling system "Krioblast" increased efficiency and lowered the operation time of protective electrical induction-induced devices // *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. – Volume 8 B, 2013. – November 15-21, 2013. – San Diego, CA, USA. – Code105847. – 10 pgs. 10. *Bissal A., Magnusson J., Engdahl G.* Comparison of two ultra-fast actuator concept // *IEEE Trans. Magnetics*. – 2012. – Vol. 48, №11. – P. 3315-3318. 11. *Татмышевский К.В., Козлов С.А.* Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2005. – № 12. – С. 52-57. 12. *Тюткин В.А.* Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налиплих материалов // *Электротехника*. – 2002. – № 11. – С. 24-28. 13. *Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V.* The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring // *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. – 2010. – № 1 (7). – С. 22-28. 14. *Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щужин И.С.* Устройство защиты компьютерной информации от несанкционированного доступа на основе индукционно-динамического двигателя // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – № 2. – С. 5-10. 15. *Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I.* Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter // *Measurement Techniques*. – 2014. – № 1, Vol. 56. – Issue 10. – P. 1098-1104. 16. *Болюх В.Ф., Олексенко С.В.* Влияние параметров ферромагнитного экрана на эффективность линейного индукционно-динамического преобразователя // *Электротехника*. – 2015. – № 7. – С. 66-72. 17. *Bolyukh V.F., Shchukin I.S.* The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // *Russian electrical engineering*. – 2012. – Vol. 83, № 10. – P. 571-576. 18. *Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щужин И.С.* Эффективность линейных импульсных электромеханических преобразователей, предназначенных для создания ударных нагрузок и высоких скоростей // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №3. – С.31-40. 19. *Болюх В.Ф., Олексенко С.В.* Влияние параметров наружного экрана на эффективность индукционно-динамического преобразователя // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2014. – № 2. – С. 24-35. 20. *Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G.* Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters

// *Russian Electrical Engineering*. – 2004. – Vol. 75. – № 12. – P. 1-11.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Bolyukh V.F., Shchukin I.S.* Linear-induction-dynamic converters. *Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing*. 2014. 496 p. ([www.lap-publishing.com](http://www.lap-publishing.com)). 2. *Fair H.D.* Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era. *IEEE Trans. Magnetics*. 2005. No 1. Vol. 41. 158-164. Print. 3. *Reck B.* First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range. *IEEE Trans. Magnetics*. 2003. No 1. Vol. 39. 310-313. Print. 4. *Strizhakov E.L., Neskoromnyi S.V., Merkulov R.V.* Impact capacitor welding with pulsed magnetic drive. *Welding Engineering*. 2009. No 2. 33-35. Print. 5. *Bolyukh V.F., Luchuk V.F., Rassokha M.A., Shchukin I.S.* High-efficiency impact electromechanical converter. *Russian electrical engineering*. 2011. Vol. 82, No 2. 104-110. Print. 6. *Tumanov I.E.* Parametric electromagnetic exciter low frequency mechanical vibrations for monitoring, measuring and dispensing multifractional liquid products mass. *Electrical Engineering*. 2013. No 8. 48-52. Print. 7. *Upshaw J.L., Kajs J.P.* Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator. *IEEE Trans. Magnetics*. 1991. No 1. Vol. 27. 607-610. Print. 8. *Kossov E.G.* A microelectromechanical accelerator solid objects. *Avtometriya*. 2012. No 4. Vol. 48. 93-103. Print. 9. *Bolyukh V.F., Katkov I.I.* Cryogenic cooling system "Krioblast" increased efficiency and lowered the operation time of protective electrical induction-induced devices. *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Vol. 8 B, 2013. November 15-21, 2013. San Diego, CA, USA. Code105847. 10 p. Print. 10. *Bissal A., Magnusson J., Engdahl G.* Comparison of two ultra-fast actuator concept. *IEEE Trans. Magnetics*. 2012. Vol. 48. No 11. 3315-3318. Print. 11. *Tatmyshevsky K.V., Kozlov S.A.* Magnetic pulse installation for testing products for aerospace shock effects. *Aerospace Instrument*. 2005. No 12. 52-57. Print. 12. *Tyutkin V.A.* Magnetic pulse method for breaking arches and cleaning of process equipment from adhering materials. *Electrical Engineering*. 2002. No 11. 24-28. Print. 13. *Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V.* The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring. *Modern information technology in the field of security and defense*. 2010. No 1 (7). 22-28. Print. 14. *Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Shchukin I.S.* Device protecting computer information against an unauthorized access on the basis of induction-dynamic motor. *Electrical engineering & electromechanics*. 2008. No 2. 5-10. Print. 15. *Bolyukh, V.F., Vinnichenko A.I.* Concept of an induction-dynamic catapult for a ballistic laser gravimeter. *Measurement Techniques*. 2014. No 1. Vol. 56. Issue 10. 1098-1104. Print. 16. *Bolyukh V.F., Oleksenko S.V.* Influence of parameters of ferromagnetic screen on the efficiency of the linear induction-dynamic converter. *Electrical Engineering*. 2015. No 7. 66-72. Print. 17. *Bolyukh V.F., Shchukin I.S.* The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode. *Russian electrical engineering*. 2012. Vol. 83. No 10. 571-576. Print. 18. *Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S.* Efficiency of linear pulse electromechanical converters for creating the shock loads and high speeds. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2015. No 3. 31-40. Print. 19. *Bolyukh V.F., Oleksenko S.V.* Of parameters of external screen for efficiency on induction-dynamic converter. *Integrated technologies and energy efficiency*. 2014. No 2. 24-35. Print. 20. *Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G.* Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*. 2004. Vol. 75. No 12. 1-11. Print.

Поступила (received) 25.08.2015



**Болюх Владимир Федорович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры "Общей электротехники", тел.: (057) 70-76-427; e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

**Bolyukh Vladimir Fedorovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of "General electrical engineering", tel.: (057) 70-76-427; e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua



**Олексенко Сергей Владимирович** – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", аспирант кафедры "Общей электротехники", тел.: (057) 70-76-427; e-mail: s.v.oleksenko@gmail.com

**Oleksenko Sergey Vladimirovich** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", PhD student at the Department of "General electrical engineering", tel.: (057) 70-76-427; e-mail: s.v.oleksenko@gmail.com