

Болюх В.Ф., Назаренко С.А., Рассоха М.О.

### МУЛЬТИПОЛЕВАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**Введение.** Исследование взаимосвязанных полей различной природы является актуальной научной и прикладной задачей для повышения эффективности и снижения энергетических затрат в различных электромеханических устройствах. В импульсных электромеханических преобразователях (ИЭМП), которые позволяют развивать значительную кинетическую энергию на коротком активном участке и ударное силовое действие на объект, возникает комплекс взаимосвязанных механических, электромагнитных, тепловых и термочувствительных полей [1,2]. Эти поля проявляют существенные пространственно-временные неравномерности, обуславливая изменение электрофизических параметров материалов преобразователя. Из-за различной скорости изменения и несогласованности между полями различной природы эффективность импульсных преобразователей оказывается недостаточно высокой [3]. При этом исследователи ИЭМП анализируют лишь отдельные аспекты мультифизичной задачи, что не позволяет эффективно решить проблему энергосбережения и повышения эффективности для этих преобразователей.

**Целью статьи** является формализация и разработка математических моделей ИЭМП индукционного типа на принципах интегрированной технологии учета взаимосвязанных полей различной природы.

**Общие соображения по формализации полевых моделей.** Практическое решение задач электромеханики, как правило, сводится к решению систем дифференциальных уравнений в частных производных. Обобщенное уравнение движения элементов ИЭМП, от одномерной до трехмерной, можно записать следующим образом

$$U \begin{bmatrix} \vec{V} \\ \vec{V} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \vec{V} \\ \vec{V} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} \vec{V} \\ \vec{V} \end{bmatrix} - \vec{f} = 0, \quad (1)$$

где  $U$  – оператор приведенных «жесткостных» характеристик, структура и параметры которого зависят от типа исследуемого объекта, состава системы, граничных условий и условий сопряжения;  $P$  – приведенный «инерционный» оператор;  $R$  – оператор диссипативных сил;  $\vec{f} = \vec{f}(\vec{x}, t)$  – вектор нагрузок (может быть заданным, зависящим от взаимодействия объекта с окружающей средой (газом, жидкостью) или с внешним полем, случайным);  $\vec{V}(\vec{x}, t)$  – обобщенный вектор перемещений;  $\vec{x}$  – координатный вектор;  $t$  – время.

Конкретный вид оператора  $R$  зависит от принятой модели трения: линейной, амплитудно- и частотно-независимой, амплитудно-зависимой гистерезисной.

Дифференциальные уравнения движения точек сплошной материальной среды в условиях действия электромагнитных полей запишем в виде [4]:

$$\text{Div} \sigma + \rho \omega \vec{E} + \mu_c (\rho \omega \vec{v} + \vec{j}) \times \vec{H} + \vec{F} = \rho \dot{\vec{v}}, \quad (2)$$

где  $\sigma = \sigma_{ij}$  тензор напряжений;  $\vec{u}$  – вектор перемещений;  $\rho, \omega$  – массовая плотность

материала и плотность электрических зарядов, отнесенная к единице объема подобласти;  $\mu_c, \epsilon_c$  – магнитная и электрическая проницаемость;  $\vec{j}, \vec{E}, \vec{H}$  – плотность тока, напряженности электрического и магнитного полей в подобласти;  $\vec{F}$  – вектор объемных нагрузок, отнесенный к единице объема;  $\vec{v} = \dot{\vec{u}}$  – вектор скорости точки.

Напряженность электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей удовлетворяют уравнениям Максвелла для расчета поля в медленно движущейся среде

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \epsilon_c \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \rho \omega \vec{v} + \vec{j}, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu_c \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \vec{H} = 0, \quad \epsilon_c \operatorname{div} \vec{E} = \rho \omega. \quad (3)$$

Эти уравнения можно дополнить материальными соотношениями:

$$\vec{D} = \epsilon_c \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_c \vec{H}, \quad \vec{j} = \gamma_c \vec{E} + \gamma_c \left[ \dot{\vec{u}} \times \vec{B} \right], \quad (4)$$

где  $\vec{D}, \vec{B}$  – векторы индукции электрического и магнитного полей в подобласти;  $\gamma_c$  – удельная электрическая проводимость материала.

Согласно гипотезе Дюамеля-Неймана обобщенные уравнения состояния приняты в виде тензорно-линейных соотношений:

$$\epsilon_{ij} = A_{ijkl} \sigma_{kl} + \alpha_{ij} T, \quad (5)$$

где  $A_{ijkl}, \alpha_{ij}$  – компоненты, которыми описываются особенности деформирования и температурного расширения материала;  $\epsilon = \epsilon_{ij}$  – тензор деформаций;  $T$  – приращение температур, зависящее от пространственных координат.

Математическая модель импульсного электромеханического преобразователя, в полной мере учитывающая взаимосвязь процессов с учетом изменчивости механических, теплофизических и электрофизических свойств материала, существенно нелинейная и достаточно сложна. Поэтому при практических расчетах целесообразно использовать линеаризованные модели. Однако при создании адекватной математической модели должен быть соблюден разумный баланс между степенью линеаризации (нелинейности) и возможностью ее практического применения в расчетных исследованиях. Процессы в электромеханическом преобразователе описываются уравнениями Лагранжа–Максвелла, имеющими структуру уравнений механики. Так, в случае, когда токи проводимости замкнуты и в электрических ветвях отсутствуют конденсаторы, электромеханические системы описываются уравнениями, аналогичными уравнениям Рауса в механике [5].

Исходя из выше сказанного, для расчета рабочих процессов ИЭМП принята модель, которая базируется на решении пространственных начально-краевых взаимосвязанных задач электромагнетизма, механики, теплопроводности и термоупругости в вариационных постановках с использованием метода конечных элементов. При решении задачи для учёта существенно нелинейных зависимостей параметров и определения нестационарных полей на каждом временном шаге используются эффективные итерационные алгоритмы.

**Особенности мультиполевой модели ИЭМП.** Рассмотрим импульсный электромеханический преобразователь с ограниченными массогабаритными параметрами,

обеспечивающий значительные механические импульсы для деформирования массивного объекта, при возбуждении от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). ИЭМП содержит неподвижный индуктор с обмоткой 1, которая намотана медной шиной и уложена в стеклотекстолитовый кожух 2 (рис. 1,а). Индуктор прикреплен к каркасу 3. Напротив обмотки установлен медный дисковый якорь 4, который прикреплен к силовой пластине 5.

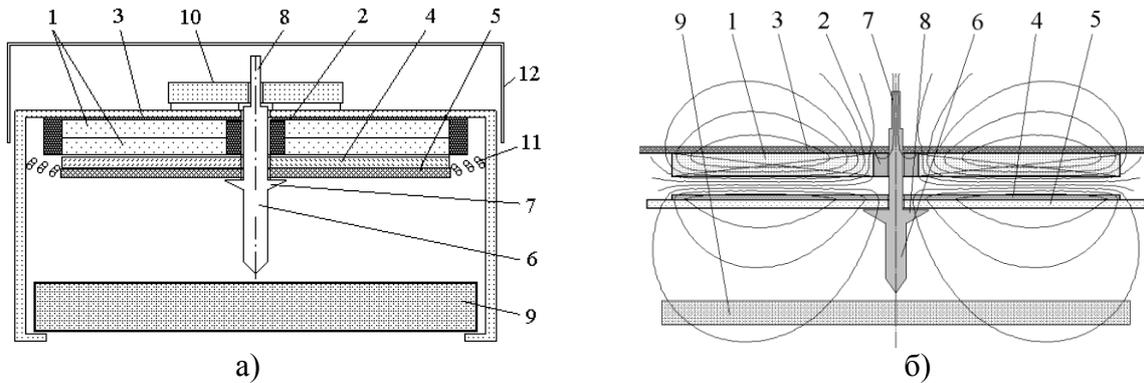


Рисунок 1 – Схематическое устройство (а) и магнитные поля (б) ИЭМП

В центре индуктора, якоря и силовой пластины выполнено отверстие, в котором расположен подвижный боек 6, имеющий заостренную часть, упорный выступ 7 и концевую часть 8. Заостренная ударная часть бойка установлена напротив объекта деформирования 9, зафиксированного относительно каркаса 3, концевая часть 8 – установлена в зазоре оптического датчика положения 10, а упорный выступ 7 механически взаимодействует с силовой пластиной 5. Пружина 11, прикрепленная к каркасу 3 и силовой пластине 5, обеспечивает плотное прижатие якоря 3 к обмотке индуктора 1 до и после силового импульса. Сверху установлен защитный кожух 12.

При возбуждении неподвижного индуктора в электропроводящем якоре наводятся пространственно-временное поле вихревых токов, взаимодействие которых с магнитным полем индуктора приводит к возникновению результирующей аксиальной электродинамической силы, осуществляющей отталкивание якоря от индуктора. Для учета пространственного поля индуцированных токов в массивном ускоряемом якоре последний можно представить совокупностью  $N$  элементарных короткозамкнутых контуров, равномерно распределенных по поверхности диска и имеющих изменяемую магнитную связь с первичным контуром – индуктором, подключаемым к ЕНЭ. В таком случае электрические процессы в ИЭМП можно описать системой дифференциальных уравнений [6]:

$$\begin{aligned}
 &R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \times \\
 &\quad \times \frac{di_k}{dt} + V(t) \left( i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0; \\
 &R_1(T_1) \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} + \\
 &\quad + V(t) \left( i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0;
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \times \\ \times \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \left( i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,$$

где  $i_0, L_0, R_0$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление индуктора;  $i_k, L_k, R_k$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление элементарного короткозамкнутого  $k$ -го контура якоря, перемещающегося со скоростью  $V(t)$  вдоль оси  $z$  относительно индуктора;  $M_{kp}$  – взаимоиндуктивность между соответствующими токовыми контурами ( $k \neq p$ );  $T_k$  – температура  $k$ -го токового контура;  $C, U_0$  – соответственно емкость и напряжение ЕНЭ.

Аксиальное перемещение  $\Delta Z$  якоря с исполнительным элементом возникает под действием поля пространственно-временных электродинамических сил

$$f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k^N i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz}(z), \quad (7)$$

и их скорость можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - K_P \times \\ \times \Delta Z(t_n) - K_T \cdot V(t_n) - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 V^2(t_n), \quad (8)$$

где  $m_1, m_2$  – масса якоря и исполнительного элемента, соответственно;  $K_P$  – коэффициент упругости пружины;  $K_T$  – коэффициент динамического сопротивления;  $\gamma_a$  – плотность воздуха;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{2m}$  – наружный диаметр силовой пластины.

Для определения пространственно-временных полей температур индуктора и якоря используется нелинейное уравнение теплопроводности

$$c^*(T) \cdot \gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_w(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + j^2(t) \cdot k_z \cdot \rho(T), \quad (9)$$

где  $c^*(T)$  – усредненная удельная теплоемкость;  $\gamma$  – усредненная плотность материала;  $j(t)$  – плотность тока;  $\lambda_w(T)$  – коэффициент теплопроводности;  $k_z$  – коэффициент заполнения индуктора;  $\rho(T)$  – удельное сопротивление.

Рассматриваемый импульсный преобразователь работает в циклическом режиме, обеспечивая возвратно-поступательное движение якоря с силовой пластиной, которая осуществляет перемещение бойка вглубь объекта деформирования. При этом ход и характер перемещения якоря изменяется для каждого последующего рабочего цикла. На рис. 2 представлены изменяемые во времени электрические (а), механические (б) и тепловые (в) характеристики ИЭМП для различных рабочих циклов: при отсутствии зазора между бойком и объектом деформирования в начальном положении (жирные линии), при наличии небольшого (5 мм) зазора (тонкие линии), при отсутствии взаимодействия между бойком и объектом деформирования (линии с круглыми метками). В качестве электрических параметров представлены плотность тока в индукторе  $j_1$ , усредненная плотность тока в якоре  $j_2$  и напряжение ЕНЭ  $u_c$ , а в качестве тепловых –

превышения температур индуктора  $\theta_1$  и якоря  $\theta_2$ . Как следует из полученных нелинейных зависимостей, характер процессов ИЭМП претерпевает существенные изменения в зависимости от последовательности и изменения характера силовых импульсов, обеспечивающих циклическое ударное пробивание объекта деформирования.

Можно отметить пространственную неравномерность распределения поля электродинамических сил по поверхности якоря. Аксиальные силы  $f_z$  значительно превосходят радиальные  $f_r$ , причем максимальная их величина приходится на внешние участки якоря. Такое соотношение аксиальных и радиальных удельных электродинамических сил объясняется характером распределения

результатирующего магнитного поля в активной зоне ИЭМП, поскольку в зазоре между обмоткой индуктора и якорем магнитное поле в основном имеет радиальное направление (рис. 1,б).

**Экспериментальные исследования ИЭМП.** Для проверки математических моделей были проведены экспериментальные исследования электрических и силовых характеристик ИЭМП. В установке гетинаксовая пластина, к которой прикреплен ИЭМП, закрепляется между двумя массивными стальными плитами бойком вверх (рис. 3,а).

К верхней плите, которая ограничивает движение бойка, сверху прикреплен пьезоэлектрический виброизмерительный преобразователь ДН-4-М1. Последний присоединен к измерителю шума и вибраций ВШВ-003, который выдает сигнал в величинах виброускорения  $a_{vib}$  и виброскорости  $v_{vib}$ . Сигнал с измерителя поступает на цифровой осциллограф RIGOL DS 522M, который одновременно регистрирует и ток в индукторе. На рис. 3,б показаны формы аperiodического импульса тока (канал 1) и виброускорения (канал 2) при начальных следующих условиях: емкость ЕНЭ  $C = 4000$  мкФ, зарядное напряжение  $U_0 = 200$  В, ход бойка (расстояние до упора)  $Z_{end} = 10$  мм. При помощи осциллограммы можно измерить время задержки между началами импульсов каналов и рассчитать скорость якоря. Виброускорение  $a_{vib}(t)$  пропорционально мгновенной результирующей механической силе  $F_z(t)$ , действующей на якорь, а виброскорость  $v_{vib}(t)$  – им-

пульсу силы  $FI = \int_0^{t_{y0}} F_z(t)dt$  при ударе:

$$FI \sim \int_0^{t_{y0}} a_{vib}(t)dt ; \quad v_{vib}(t_{y0}) \sim \int_0^{t_{y0}} a_{vib}(t)dt \sim FI .$$

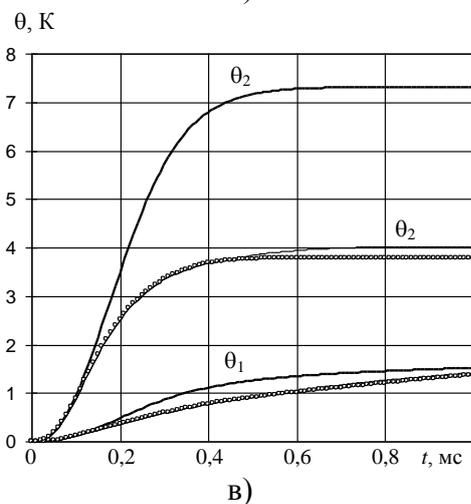
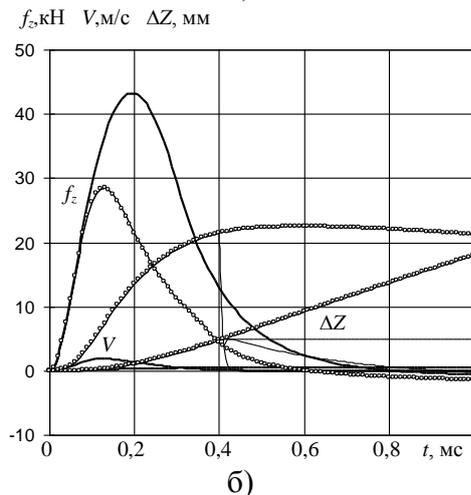
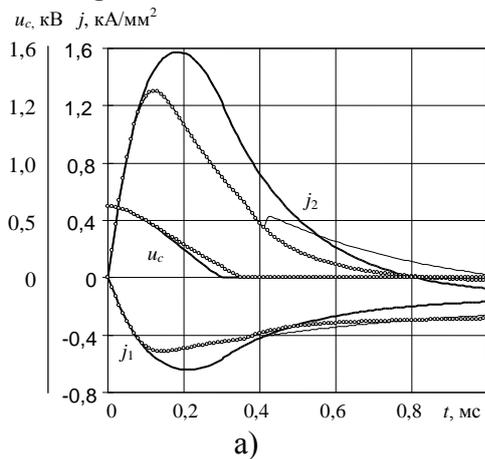


Рисунок 2 – Характеристики ИЭМП

На рис. 4 показаны токи в индукторе  $i_1$  с и без якоря при использовании ЕНЭ:  $C=2850$  мкФ,  $U_0=400$  В. Тонкие линии соответствуют расчетным, а жирные – экспериментальным значениям. Таким образом, якорь посредством магнитного поля “поджигает” во времени ток в индукторе  $i_1$ , делая его более крутым и с большей амплитудой.

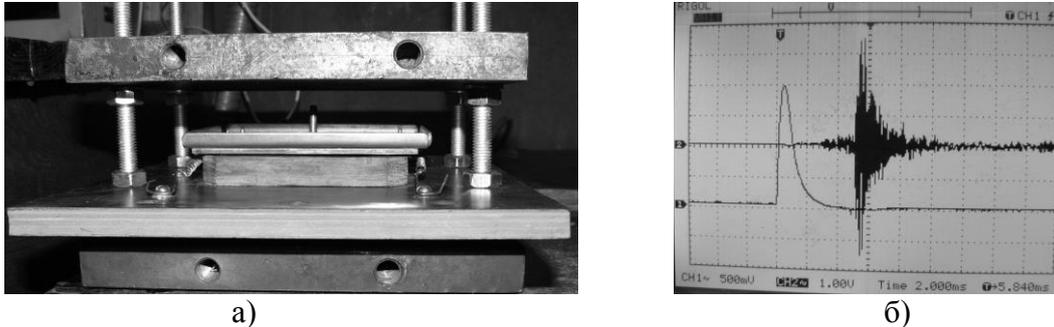


Рисунок 3 – Экспериментальная установка (а) и осциллограмма (б) ИЭМП

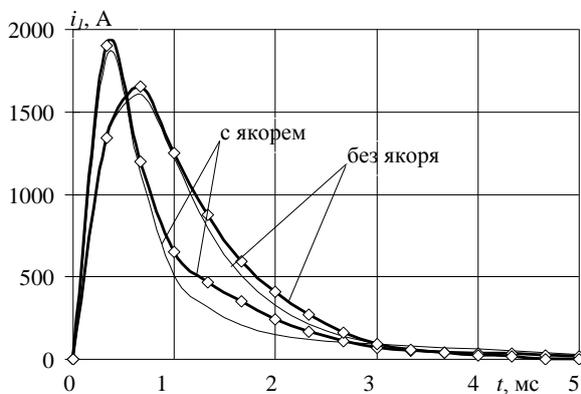


Рисунок 4 – Токи индуктора

На основании экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- поскольку измененный ток в индукторе удовлетворительно совпадает с расчетным можно констатировать адекватность математической модели, описывающей электромагнитные процессы преобразователя;

- поскольку измеренная средняя скорость перемещения якоря удовлетворительно совпадает с расчетной, можно сделать вывод о адекватности математической модели, описывающей механические и электродинамические процессы;

- поскольку измеренный импульс силы совпадает с расчетным можно говорить об адекватности мультиполевой модели, учитывающей взаимосвязь механических, электромагнитных и тепловых полей ИЭМП.

**Выводы.** Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель ИЭМП, основанная на использовании интегрированной технологии структурно-связанных полей различной физической природы, обеспечивающая повышение их эффективности. На базе анализа мультифизических полевых моделей различной степени связанности предложен расчетный алгоритм, учитывающего декомпозицию комплексной проблемы энергоэффективности ИЭМП на ряд отдельных физических задач. Анализ структуры и типов связей между отдельными моделями служит основой схемы для последовательного решения подобных задач. Дальнейшим направлением исследований является применение математического аппарата для исследования жизненного цикла ИЭМП, а также его развитие на проблемы оптимизации и анализа чувствительности, обеспечивая энергосбережение всей электронно-электромеханической системы.

#### Литература

1. Novac B.M., Senior P., Smith I.R. Studies of a very high efficiency cryogenic launcher // IEEE Trans. Magnetics. – 2001. – vol. 37, № 1. P. 123–128.

2. Татмышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – №12. – С. 52–57.

3. Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – № 3. – С. 44–52.

4. Механика связанных полей в элементах конструкций: В 5 т. / Под общ.ред. А.Н. Гузя. – Киев: Наук.думка, 1987–1989.

5. Назаренко С.А. Анализ чувствительности конструкций при воздействии физических полей различной природы // Вестник НТУ «ХПИ». 2006. № 32. С. 119–122.

6. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Синтез параметров высокоэффективного электромеханического преобразователя ударного действия // Техн. електродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки.– 2008.– Ч. 2.– С. 63–68.

УДК 621.313:536.2.539.3

Болюх В.Ф., Назаренко С.О., Рассоха М.О.

### **МУЛЬТИПОЛЬОВА МОДЕЛЬ ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА**

Розглядаються проблемні питання, що виникають при розробці математичних моделей складних конструкцій за наявності дії полів різної природи. Для імпульсного електромеханічного перетворювача індукційного типу запропонована мультипольова модель, що базується на рішенні взаємопов'язаних нестационарних польових задач електромагнетизму, механіки та теплопровідності з урахуванням нелінійних параметрів з використанням методу скінчених елементів та ітераційних алгоритмів. Проведено експериментальні дослідження, які узгоджуються з розрахованими характеристиками та параметрами електромеханічного перетворювача.

Bolyukh V.F., Nazarenko S.A., Rassoha M.O.

### **THE MULTI-FIELDS MODEL OF PULSED ELECTROMECHANICAL CONVERTER**

Problem-solving questions emerging during the development of mathematical models of complex construction, in the availability of action electromagnetic fields of the different nature, are considered in article. For pulsed inductive electromechanical converter is offered multi-fields model, which is based on decision interconnected unsteady field problems of the electromagnetism, mechanic and thermal conductivity, taking into consideration for nonlinear parameters with use the method by final element and iterative algorithms. They experimental studies are organized, well concordant with features and parameters of the electromechanical converter.