

Болух В.Ф., Назаренко С.А.

## **СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ**

**Общий подход к мультидисциплинарной оптимизации.** Как показывает опыт проектирования, наличие математических моделей не является достаточным условием успешной реализации сложных устройств. Одним из путей решения представляется интеграция математических моделей с такими поисковыми методами, которые бы давали ряд альтернативных технических решений, неуплучшаемых по всей совокупности показателей эффективности. Для решаемой задачи необходимо использовать мультидисциплинарные модели со своими критериями качества [1]. При разработке системного подхода к оптимизации сложных устройств необходимо учитывать этапы жизненного цикла, сочетать принципы композиции, декомпозиции и иерархичности, обеспечивать взаимосвязь математических, эвристических и экспериментальных методов.

Задача оптимизации устройства заключается в нахождении варьируемых параметров, принадлежащих допустимой области  $U$  и минимизирующих целевую функцию. Целевая функция представляет суперпозицию критериев качества с весовыми функциями, использующих неопределенные множители Лагранжа. На проектные переменные могут накладываться как явные двусторонние ограничения, задаваемые из конструктивно-технологических соображений, так и функциональные ограничения типа равенств и неравенств, наложенные на функционалы, неявным образом сужающие поисковую область. Значения функционалов определяются из решения задач анализа, описываемых уравнениями состояния. Структуру уравнений, характеризующих математические связи между заданными  $h$  и искомыми величинами, определяет тип исследуемого процесса, состав системы, граничные условия, нагрузки и условия сопряжения. Вектор переменных состояния, образующих пространство решений, может определять перемещения, температуры, потенциалы электрического и магнитного поля и др. Выбор класса переменных (непрерывные функции, кусочно-непрерывные функции, вектор дискретных параметров) во многом определяет метод оптимизации и оптимальное решение.

Математические модели сложных устройств должны учитывать взаимодействие элементов разной мерности многокомпонентной структуры в условиях действия полей разной физической природы. Задача анализа сводится к решению систем дифференциальных уравнений в частных производных.

Основные уравнения для изменяющихся во времени процессов могут быть получены из обобщенного вариационного принципа Гамильтона-Остроградского, составляющие которого кинетическая энергия, потенциальная энергия (является наиболее важной энергетической характеристикой, выраженной через компоненты выбранного пространства состояний), работа приложенных сил. Вариационные методы приводят к матричной алгебраической задаче и служат основой для построения расчетных схем.

Связанные задачи теории поля сводятся к системе уравнений, решаемых методом конечных элементов.

Предполагается, что связь между подсистемами каждого поля однозначна, алгоритмизируема и корректна, что дает возможность формализовать процесс анализа и синтеза. Моделирование структурными уравнениями, ориентированными на конкретный тип полей, может включать большое количество методов с применением апробированных CAD/CAM/CAE-систем. Применение математического обобщения, реализуемого в едином информационном пространстве устройства, приведет к повышению точности расчетов, минимизации затрат времени на подготовку модели и трансляции промежуточных данных.

**Основные этапы мультидисциплинарной оптимизации.** Для полных моделей устройств решать задачу оптимизации математически строго не позволяют противоречивость критериев, большое число разнополевых переменных, неформализуемость ряда ограничений, различная точность и детерминированность моделей, требования унификации. Поэтому основной концепцией проектирования сложных устройств представляется многоуровневый иерархический подход, при котором результаты предыдущего уровня используются в качестве исходных данных для последующего. Построение системы уровней осуществляется методом экспертных оценок. Характер критериев зависит от уровня проектирования. На верхних уровнях это, как правило, стоимостные, а на нижних – разнородные технические показатели.

Конструктивные параметры разделяются на группы, варьируемые на каждом этапе с целью выбора соответствующих функционалов. Параметры  $h_0$  определяются из решения задачи более высокого уровня. Предварительный анализ распределения коэффициентов чувствительностей позволяет разделить параметры по степени влияния на величины целевых функций. На первом этапе решается задача оптимизации параметров  $h_1$  по критериям и функциональным ограничениям, характеризующим рабочий процесс. На втором этапе производится выбор параметров  $h_2$ , определяющих прочностные и вибрационные характеристики. На третьем этапе варьируются параметры "смешанного" типа  $h_{12}$ , влияние которых на рабочие и прочностные характеристики соизмеримо.

Введем категории задач мультидисциплинарной оптимизации: последовательная (при независимом рассмотрении 1 и 2 этапов); полная (при наличии только 3 этапа и увеличении размерности и ширины системы разрешающих уравнений; весь набор оптимальных параметров достигается за одну итерацию); слабосвязанная (при этом выполняются итерации между различными этапами до тех пор, пока не будет достигнут желаемый уровень сходимости). После «сшивания» подмоделей формируется иерархическая система мультидисциплинарной оптимизации.

Для численной реализации задачи снижение времени может достигаться как за счет распараллеливания вычислений "внутри" математической модели, так и за счет организации процесса оптимизации, когда осуществляется параллельный расчет критериев для заданного набора векторов варьируемых переменных. Первый путь предполагает использование математических моделей, приспособленных для расчета с использованием параллельных процессоров. Второй путь вызывает необходимость разработки соответствующих методов оптимизации, позволяющими связать в едином проекте за-

дачи, рассчитываемые различными программными средствами на различных процессах, объединенных в локальную сеть.

Анализ чувствительности представляет информацию о направлении и скорости изменения функционалов качества конструкций при изменении варьируемых параметров без модификации всей модели [2]. Переменные проектирования можно разделить на глобальные параметры, описывающие конструкцию в целом, и локальные, описывающие геометрические и физические параметры части конструкции.

При выборе варьируемых параметров необходимо учитывать: требование взаимной независимости, преимущества аддитивного и локального характера зависимости гамильтониана от проектных переменных; согласование дискретизации конструкции со схемой варьирования ее формы; конструктивные ограничения; сохранение в пространстве допустимых параметров математических моделей и др.

Методы поиска оптимальных технических решений можно разделить на следующие группы: алгоритмы, основанные на априорных представлениях о свойствах устройства; методы математического программирования; методы, использующие условия глобальной и локальной оптимальности.

Стратегия нахождения минимума целевой функции в поисковом пространстве заключается в совместном использовании глобального метода оптимизации, осуществляющего случайный поиск параметров в заданном пространстве, предотвращая попадание в локальный экстремум, и локального метода, стягивающего область параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров.

В качестве метода глобальной оптимизации эффективны генетические алгоритмы, реализующие случайный поиск с централизованным управлением с использованием отбора и генетических механизмов воспроизводства. Опираясь совокупностью решений, обрабатывается набор параметров, структурированный в виде цепочки, а последующие поколения популяции решений генерируются с помощью генетических операторов отбора, кроссовера и мутации.

В качестве метода локальной оптимизации при решении задач, характеризующихся высокими размерностью вектора варьируемых параметров и числом функциональных ограничений, предпочтителен метод последовательной линеаризации. На каждом шаге метода последовательной линеаризации осуществляется следующий набор вычислительных этапов: решение исходной и сопряженной задач; вычисление функциональных производных или градиентов критериев целей и функциональных ограничений по варьируемым переменным; построение области линеаризации; решение задачи линейного программирования.

Область линеаризации должна быть достаточно малой, чтобы формулы первого порядка с приемлемой точностью описывали приращения функционалов, и в то же время достаточно большой, чтобы процесс оптимизации не был слишком медленным. Область должна быть построена так, чтобы она целиком содержалась в глобальной области геометрических ограничений, при этом должна быть обеспечена возможность изменения ее конфигурации по любому возможному направлению в  $n$ -мерном пространстве варьируемых параметров.

**Электромеханический преобразователь ударного действия.** Электромеханические преобразователи ударного действия (ЭПУД), работающие в импульсном режиме

с быстрым изменением полей различной природы, позволяют развивать интенсивное силовое воздействие на объект и используются во многих технических системах [3,4]. Однако известные ударные преобразователи характеризуются низкой эффективностью работы (до 10–15 %), что обусловлено неоптимальными параметрами, несогласованием пространственно-временных электрических, магнитных, газодинамических, механических (упругих и деформационных) и тепловых характеристик [5].

ЭПУД включает многовитковый индуктор 1, возбуждаемый аperiodическим импульсом от емкостного накопителя (ЕН), коаксиально установленных массивного электропроводящего якоря 2, в котором индуцируются вихревые токи, и стального бойка 4 (исполнительный элемент), движение которого ограничено стальной плитой 5 (объект воздействия). На рис.1 показана конструктивная схема ЭПУД с основными геометрическими параметрами и возбуждаемым магнитным полем.

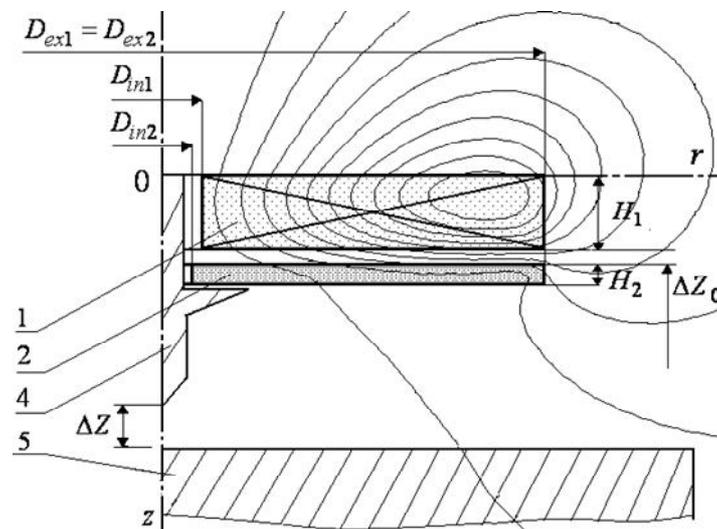


Рисунок 1

При работе в якоре возникает существенная пространственная неравномерность распределения индуцированного тока. Для учета этого в математической модели якорь представляется совокупностью элементарных короткозамкнутых контуров, равномерно распределенных по поверхности диска, а многовитковый индуктор – первичным контуром, подсоединенным к емкостному накопителю. В таком случае электрические процессы в ЭПУД можно описать системой дифференциальных уравнений [6]:

$$R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \frac{di_k}{dt} + \\ + V(t) \left( i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0;$$

$$\begin{aligned}
 &R_1(T_1) \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} + \\
 &+ V(t) \left( i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0; \\
 &R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \frac{di_{k-1}}{dt} + \\
 &+ V(t) \left( i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,
 \end{aligned}$$

где  $i_0, L_0, R_0$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление обмотки 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;  $M_{kp}$  – взаимоиנדуктивность между соответствующими токовыми контурами ( $k \neq p$ );  $T_k$  – температура  $k$ -го токового контура;  $C, U_0$  – соответственно емкость и напряжение ЕН.

Аксиальное перемещение якоря  $\Delta Z$  с исполнительным элементом возникает под действием электродинамической силы

$$f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz}(z).$$

Скорость якоря можно представить в виде рекуррентного соотношения:

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

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

Для определения изменяемых и пространственно распределенных температур индуктора или якоря используется нелинейное уравнение теплопроводности

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

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.

В качестве ЕН выбрана батарея низковольтных электролитических конденсаторов, обладающих высокими удельными показателями. Наличие полярных конденсаторов обусловило схему возбуждения с обратным шунтирующим диодом, при которой обеспечивается аperiodический полярный импульс тока в индукторе.

**Методика синтеза параметров электромеханического преобразователя.** Процесс синтеза параметров ЭПУД заключается в нахождении совокупности параметров, обеспечивающих максимальные значения кинетической энергии и силовых импульсов при минимальных потерях с заданными ограничениями. Целевую функцию можно записать следующим образом

$$\zeta = \sum_{j=1}^J \alpha_j \eta_j; \quad \sum_{j=1}^J \alpha_j = 1,$$

где  $J$  – количество функциональных параметров  $\eta_j$ , изменяемых в диапазоне  $[0, 1]$ ;  $\alpha_j$  – весовой коэффициент соответствующего параметра;

$$\eta_1 = \frac{\sum_{n=1}^2 \int i_n^2(t) R_n(T_n) dt}{0,5 \cdot (m_1 + m_2) \cdot V^2(t) + \sum_{n=1}^2 \int i_n^2(t) R_n(T_n) dt}; \quad \eta_2 = 1 - \frac{1}{C \cdot U_0^2 (m_1 + m_2)} \left( \int f_z(t) dt \right)^2;$$

$$\eta_3 = 1 - \frac{2 \cdot i_1(t) \cdot i_2(t) \cdot \Delta Z}{C \cdot U_0^2} \frac{dM_{12}}{dz}; \quad \eta_4 = 1 - \frac{V^2(t) (m_1 + m_2)}{C \cdot U_0^2}; \quad \eta_5 = (\zeta_1 \theta_1 + \zeta_2 \theta_2) T_0^{-1},$$

где  $\zeta_{1,2}$  – весовые коэффициенты;  $T_0$  – температура окружающей среды.

Функциональные параметры характеризуют эффективность преобразователя:  $\eta_1$  – по минимуму потерь;  $\eta_2$  – по максимуму импульса электродинамической силы;  $\eta_3$  – по амплитуде электродинамической силы при ограниченном перемещении якоря  $\Delta Z$ ;  $\eta_4$  – по максимуму кинетической энергии;  $\eta_5$  – по минимальной температуре.

Для глобальной оптимизации использованы генетические алгоритмы, а для локальной оптимизации – метод деформируемого многогранника. По этому методу в пространстве параметров случайным образом иницируется популяция точек  $x_i, i=1, \dots, n+1$  (вершины многогранника), при этом каждая точка представляет собой вектор параметров  $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_n)$ . Они отображаются на пространство целевой функции  $\eta(\mathbf{x})$  и на текущем шаге  $t$  определяются вершины с наибольшим и наименьшим значениями целевой функции. Новая точка  $z^1$  формируется путем отражения вершины с максимальным значением целевой функции относительно центра масс всех остальных вершин. В новой точке вычисляется значение целевой функции и, в зависимости от сравнения полученной величины со значением целевой функции в вершине с минимальным значением целевой функции, многогранник деформируется относительно своего исходного состояния. Поскольку процедура деформации многократно повторяется, то многогранник

адаптируется к локальному рельефу целевой функции и сжимается, обеспечивая сходимость алгоритма.

Вычислительный алгоритм включает в себя следующие шаги [7].

Шаг 1. Задается генетическое представление многогранника набором  $N+1$  параметров – векторами переменных проектирования  $P^0 = (\mathbf{x}_1^0, \dots, \mathbf{x}_{N+1}^0)$ ,  $\mathbf{x}(x_1, \dots, x_N) \in \mathfrak{R}^N$ .

Шаг 2. Из  $K$  исходных многогранников  $P_i^0 = (\mathbf{x}_{i,1}^0, \dots, \mathbf{x}_{i,N+1}^0)$ ,  $i = 1, \dots, K$  случайным образом формируется популяция  $D_i (P_i^0)$ .

Шаг 3. К каждому многограннику  $P_i^0$  применяются операторы отражения, растяжения, сжатия и редукции для осуществления заданного числа шагов  $s$  в поисковом пространстве.

Шаг 4. Определяются величина целевой функции  $F^t(\mathbf{x}_{i,j}^t)$ ,  $i = 1, \dots, K$ ,  $j = 1, \dots, N+1$  в каждой вершине многогранника и его «лучшая» вершина  $\mathbf{x}_{i,b}^t$ ,  $i = 1, \dots, K$ .

Шаг 5. Осуществляется ранжирование многогранников относительно величины целевой функции их лучших вершин  $F_b^t(\mathbf{x}_{i,b}^t)$ ,  $i = 1, \dots, K$ .

Шаг 6. Исключается многогранник с наихудшими параметрами.

Шаг 7. Формируется новый многогранник  $P_K^t$  путем применения генетических операторов кроссовера и мутации, действующих с вероятностью  $\rho_{\text{МУТ}}$ , к двум случайно выбранным многогранникам из оставшихся  $(K-1)$ .

Шаг 8. Определяется величина целевой функции  $F(\mathbf{x}_{K,j}^t)$ ,  $j = 1, \dots, N+1$  и «лучшая» вершина многогранника  $P_K^t$ .

Шаг 9. Осуществляется ранжирование многогранников  $P_i^t$  по размеру  $\sigma(P_i^t)$ ,  $i = 1, \dots, K$ .

Шаг 10. Определяется пороговое значение  $\sigma^t$  для попадания в группу поиска по размеру  $h$ -ой популяции  $\sigma(P_h^t)$ .

Шаг 11. К  $(K-h)$  популяциям применяются операторы отражения, растяжения, сжатия и редукции.

Шаг 12. Осуществляется возврат к шагу 4.

На основании представленной методики можно определить параметры высокоэффективного ЭПУД. Однако, учитывая конструктивные и технологические ограничения, при выборе параметров важно знать их влияние на эффективность ЭПУД. На рис.2,а показано распределение параметра эффективности  $\eta = (1 - \zeta) \cdot 100$ , % при различной энергии  $W$  и емкости  $C$  ЕН, откуда следует, что целесообразно выбирать источник с повышенной энергией, но меньшей емкостью конденсаторов, при которых обеспечивается короткий, но мощный электромагнитный импульс.

При увеличении массы исполнительного элемента  $m_2$  эффективность преобразователя понижается, причем этот эффект более сильно проявляется при малых емкостях,

а значит повышенных напряжениях ЕН (рис.2,б). В этом случае возрастает несогласованность между переходными электромагнитными и механическими процессами.

Разработанный на основе мультидисциплинарной оптимизации ЭПУД с повышенной эффективностью, параметры которого представлены в табл., позволяет эффективно интегрироваться в технологии, где традиционно используются механические, гидравлические, химические, пневматические и др. исполнительные устройства [8], обеспечивая снижение энергопотребления при пониженных массо-габаритных показателях.

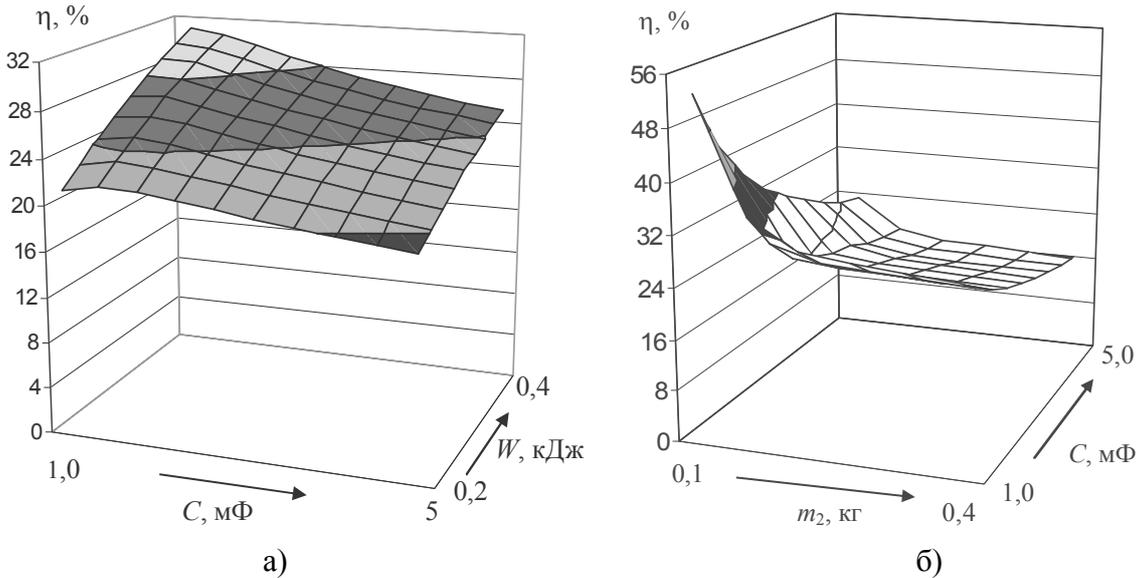


Рисунок 2

Таблица

$D_{ex1,2}$ мм	$D_{in1}$ мм	$H_1$ мм	$D_{in2}$ мм	$H_2$ мм	$\Delta Z_0$ мм	$\Delta Z$ мм	$N$ шт	$a \times b$ мм <sup>2</sup>	$K_p$ кН/м	$m_2$ кг	$C$ мкФ	$U_0$ В
100	10	10	6	2,25	0,5	15	46	1,8×4,8	7,5	0,35	2850	400

**Выводы.** Разработан формализованный подход к мультидисциплинарной оптимизации сложных устройств, который характеризуется: комплексной математической моделью, включающей геометрические, электромагнитные, аэродинамические, вибро-механические и теплофизические параметры и характеристики; использованием методов и алгоритмов оптимизации, ориентированных на значительное число варьируемых параметров и функциональных ограничений; использованием ряда критериев, учитывающих различные аспекты функционирования устройства.

Разработанный подход реализован для электромеханического преобразователя ударного действия, в котором используются пространственно-временные поля различной природы (электрические, магнитные, газодинамические, механические (упругие и деформационные) и тепловые). Преобразователь характеризуется ограниченными массогабаритными параметрами и повышенной эффективностью работы.

Литература

1. Flager F., Welle B., Bansal P. et al. [Multidisciplinary process integration and design optimization of a classroom building](#) // Journal of Information Technology in Construction. – 2009. – Vol. 14. – P. 595–612.
2. Назаренко С.А. Математические модели мультифизического анализа конструкций для CALS технологий // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 47. – С. 125–132.
3. Гурин А.Г., Набока Б.Г., Гладченко В.Я. Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 2. – С. 3–6.
4. Тюткин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 24–28.
5. Alotto P.G., Eranda C., Brandstatter B. et al. Stochastic algorithms in electromagnetic optimization // IEEE Transactions on Magnetics. – 1998. – Vol. 34, №5. –P. 3674–3684.
6. Болюх В.Ф., Назаренко С.А., Рассоха М.А. Мультиполевая модель импульсного электромеханического преобразователя // Интегровані технології та енергозбереження. – 2009. – № 3. – С. 34–40.
7. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. –Харків: НТУ «ХПИ». – 2006. – 260 с.
8. Ушаков Л.С., Котылев Ю.Е., Кравченко В.А. Гидравлические машины ударного действия. – М.: Машиностроение. – 2000. – 416 с.

УДК 621.313:536.2.539.3

Болюх В.Ф., Назаренко С.О.

**СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО МУЛЬТИДИСЦИПЛІНАРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ УДАРНОЇ ДІЇ**

Розроблено формалізований підхід до мультидисциплінарної оптимізації складних пристроїв, який реалізований для електромеханічного перетворювача ударної дії. На базі математичної моделі, яка враховує просторово-часові поля різної природи (електричні, магнітні, пружно-деформаційні механічні і теплові) з використанням оптимізаційних генетичних алгоритмів і методу деформованого багатогранника, розроблено перетворювач, який характеризується обмеженими масогабаритними параметрами і підвищеною ефективністю роботи.

Bolyukh V.F., Nazarenko S.A.

**SYSTEMATIC APPROACH TO MULTIDISCIPLINARY OPTIMIZATION  
OF ELECTROMECHANICAL IMPACT CONVERTERS**

A formal approach to multidisciplinary optimization of complex devices is developed, and it is implemented for the electromechanical impact transducer. On the basis of a mathematical model that takes into account the spatial and temporal fields of different nature (electrical, magnetic, elastic deformation, mechanical and thermal) with use of optimization genetic algorithms and the flexible polyhedron method, the converter is developed, which is characterized of reduced weight and size and high efficiency.