

В.Ф. Болух, И.С. Щукин

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИНДУКЦИОННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Розроблений оптимізаційний підхід до вибору параметрів лінійного імпульсного індукційного електромеханічного перетворювача (ЛШЕП) з базатовитковим короткозамкненим якорем. Він полягає у знаходженні максимуму інтегрального критерію ефективності, який враховує максимальну швидкість та кінетичну енергію в перетворювачі швидкісного призначення, амплітуду та величину імпульсу електродинамічних зусиль в перетворювачі силового призначення при мінімальних значеннях струму індуктора, перевищеннях температур та масі активних елементів. При цьому використовується ланцюгова математична модель, яка враховує взаємопов'язані електричні, магнітні, теплові та механічні процеси ЛШЕП. Розроблена методика пошуку максимуму інтегрального критерію ефективності ЛШЕП в пошуковому просторі з використанням глобального та локального методів оптимізації. В якості глобального методу використовуються генетичні алгоритми, а в якості локального – метод Нелдера-Міда. Визначені електричні параметри ємнісного накопичувача енергії та геометричні параметри ЛШЕП, які забезпечують найбільші значення інтегрального критерію ефективності в залежності від прийнятого варіанту стратегії оцінки ефективності. В оптимізованих перетворювачах швидкісного та силового призначення інтегральні критерії ефективності в середньому в 2,2 рази вище, ніж у ЛШЕП основного виконання. Бібл. 14, табл. 6, рис. 2.

Ключові слова: лінійний імпульсний індукційний електромеханічний перетворювач, ланцюгова математична модель, інтегральний критерій ефективності, оптимізаційний підхід, генетичні алгоритми, метод Нелдера-Міда.

Разработан оптимизационный подход к выбору параметров линейного импульсного индукционного электромеханического преобразователя (ЛИИЭП) с многовитковым короткозамкнутым якорем. Он состоит в нахождении максимума интегрального критерия эффективности, учитывающего максимальную скорость и КПД преобразователя скоростного назначения, амплитуду и величину импульса электродинамических усилий в преобразователе силового назначения при минимальных превышениях температур, массе активных элементов и токе индуктора. При этом используется цепная математическая модель, которая учитывает взаимосвязанные электрические, магнитные, тепловые и механические процессы ЛИИЭП. Разработана методика поиска максимума интегрального критерия эффективности ЛИИЭП в поисковом пространстве с использованием глобального и локального методов оптимизации. В качестве глобального метода используются генетические алгоритмы, а в качестве локального – метод Нелдера-Миды. Установлены электрические параметры емкостного накопителя энергии и геометрические параметры ЛИИЭП, обеспечивающие наибольшие значения интегрального критерия эффективности в зависимости от принятого варианта стратегии оценки эффективности. В оптимизированных преобразователях скоростного и силового назначения интегральные критерии эффективности в среднем в 2,2 раза выше, чем в ЛИИЭП основного исполнения. Библ. 14, табл. 6, рис. 2.

Ключевые слова: линейный импульсный индукционный электромеханический преобразователь, цепная математическая модель, интегральный критерий эффективности, оптимизационный подход, генетические алгоритмы, метод Нелдера-Миды.

Введение. Линейные импульсные электромеханические преобразователи широко используются для разгона исполнительного элемента (ИЭ) до высокой скорости на коротком активном участке и/или для создания мощных силовых импульсов на объект воздействия при незначительном перемещении ИЭ, выполненного, например, в виде бойка [1-4]. Такие преобразователи скоростного и силового назначения используются во многих отраслях науки и техники в качестве электромеханических ускорителей и ударно-силовых устройств [5].

Наиболее широко применяются преобразователи индукционного типа, которые имеют коаксиальную дисковую конфигурацию. Такие линейные импульсные индукционные электромеханические преобразователи (ЛИИЭП) содержат ускоряемый электропроводящий якорь, который магнитно взаимодействует с неподвижным индуктором [6-8]. При возбуждении индуктора от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) в электропроводящем якоре индуцируются ток. Взаимодействие магнитного поля индуктора с индуцированным током приводит к возникновению электродинамических усилий (ЭДУ), вызывающих аксиальное перемещение якоря с ИЭ. При этом считается целесо-

образным возбуждать индуктор полярным аперриодическим импульсом, что позволяет использовать для ЕНЭ электролитические конденсаторы с повышенными удельными энергетическими показателями [5].

Однако при работе с быстрым изменением электромагнитных, механических и тепловых параметров эффективность силовых и скоростных показателей ЛИИЭП недостаточно высока. Одним из путей повышения указанных показателей является использование оптимизационного подхода к выбору основных параметров ЛИИЭП. При таком выборе целесообразно использовать интегральный критерий эффективности, который должен включать основные скоростные или силовые показатели ЛИИЭП при учете его электрических, тепловых и массогабаритных показателей.

Целью статьи является выбор основных параметров ЛИИЭП скоростного и силового назначения с использованием оптимизационного подхода, обеспечивающего повышение скоростных и силовых показателей при ограниченных электрических, тепловых и массогабаритных показателях.

Для увеличения быстродействия расчетного алгоритма будем использовать цепную математическую

© В.Ф. Болух, И.С. Щукин

модель ЛИИЭП, в которой используются сосредоточенные параметры индуктора и якоря [9, 10]. Указанная модель учитывает взаимосвязанные электрические, магнитные, тепловые и механические процессы. Чтобы исключить влияние поверхностного эффекта будем рассматривать якорь, выполненный в виде короткозамкнутой многовитковой обмотки, плотно намотанной относительно тонким медным проводом.

Параметры и показатели ЛИИЭП. Процесс оптимизации состоит в нахождении совокупности параметров, обеспечивающих максимальные значения скорости и кинетической энергии в ЛИИЭП скоростного назначения и максимальные значения амплитуды и величины импульса ЭДУ в ЛИИЭП силового назначения. Указанные показатели должны обеспечиваться при минимальных превышениях температур и массе n -ых активных элементов ($n = 1, 2$ – индексы индуктора и якоря соответственно) и минимальном токе индуктора, что важно для системы управления.

Основные параметры ЛИИЭП

Электрические параметры ЕНЭ:

• U_0, W_0 – напряжение и энергия ЕНЭ соответственно.

Геометрические параметры ЛИИЭП для n -ого активного элемента:

• w_n – количество витков провода;
 • d_{0n} – диаметр провода круглого сечения;
 • h_{zn}, h_{rn} – высота и ширина провода прямоугольного сечения;

• D_{exn}, D_{inn} – наружный и внутренний диаметры;
 • H_n – аксиальная высота.

Дополнительные параметры ЛИИЭП:

• m_2, m_e – масса якоря и ИЭ соответственно;
 • $\Delta z_0 = 0,5 \cdot (H_1 + H_2) + \Delta_0$ – начальное аксиальное смещение между центрами n -ых активных элементов, где Δ_0 – начальный зазор между активными элементами;

• форма преобразователя: дисковая или цилиндрическая проходная (якорь внутри индуктора или наоборот);
 • тип якоря (многовитковый, массивный, комбинированный);

• схема формирования токового импульса в индукторе при возбуждении от ЕНЭ;

• начальная температура T_{0n} n -ого активного элемента;

• механические факторы: силы противодействия движению якоря, трения и др.;

• параметры подводящих проводов и соединительных элементов.

На эти параметры накладываются параметрические и функциональные ограничения:

для источника энергии

$U_0 \leq U_{0\max}$ – по напряжению ЕНЭ;

$W_{0\min} \leq 0,5 \cdot C \cdot U_0^2 \leq W_{0\max}$ – по энергии ЕНЭ,

где $C = 2W_0U_0^{-2}$ – емкость ЕНЭ;

для нагрузки

$0 \leq m_e \leq m_{e\max}$ – по массе ускоряемого ИЭ;

$f_{c\min} \leq f_c \leq f_{c\max}$ – по тормозным и противодействующим силам;

для электронной системы управления

$i_1 \leq i_{1\max}$ – ограничение по амплитуде тока возбуждения индуктора;

для геометрических параметров

$1 \leq w_n \leq Ent\left(0,5 \frac{D_{exn} - D_{inn}}{h_{rn} + 2h_s}\right) \cdot Ent\left(\frac{H_n}{h_{zn} + 2h_s}\right)$ – для

числа витков провода прямоугольного сечения, где $Ent(f)$ – наибольшее целое число, не превосходящее f ; h_s – толщина изоляции проводника обмотки;

$1 \leq Ent\left(0,5 \frac{D_{exn} - D_{inn}}{h_{rn} + 2h_s}\right) \leq K_{wn\max}$ – для количества

слоев провода прямоугольного сечения;

$0 \leq \Delta z_0 \leq 0,5 \cdot (H_1 + H_2)$; $0 \leq D_{in2} \leq D_{in2\max}$;

$D_{in2} + 2 \cdot (h_{r2} + 2 \cdot h_s) \leq D_{ex2} \leq D_{in1} - \Delta_0$ – для цилиндрического проходного преобразователя, где $D_{in2\max}$ – максимальное значение внутреннего диаметра якоря;

При использовании провода круглого сечения в параметрических ограничениях вместо h_{rn} и h_{zn} необходимо использовать его диаметр d_{0n} ;

$i_1(t)i_2(t)\frac{dM_{12}}{dz}(z) \leq f_{z\max}$ – по амплитуде ЭДУ, действующих вдоль оси z ; где $i_n(t)$ – ток n -ого активного элемента, M_{12} – взаимдуктивность между активными элементами;

$F_{z\min} \geq \int_0^{t_p} f_z dt \geq F_{z\max}$ – по величине импульса ЭДУ, где t_p – длительность действия ЭДУ;

$W_{kin\min} \geq 0,5 \cdot (m_2 + m_e) V_p^2 \geq W_{kin\max}$ – по кинетической энергии, где V_p – скорость якоря в конце рабочего процесса; $V_{\min} \geq v \geq V_{\max}$ – по скорости перемещения якоря с ИЭ; $\theta_n \leq \theta_{n\max}$ – по максимально допустимому превышению температуры n -ого активного элемента.

ЛИИЭП основного исполнения. В качестве основного исполнения рассмотрим ЛИИЭП со следующими параметрами [11]:

Индуктор: внешний диаметр $D_{ex1}=100$ мм, внутренний диаметр $D_{in1}=10$ мм, высота $H_1 = 10$ мм. Индуктор выполнен в виде двухслойной обмотки с внешними электрическими выводами; сечение провода прямоугольного сечения $h_{z1} \times h_{r1}=1,8 \times 4,8$ мм², количество витков провода $w_1=46$ шт.

Якорь: внешний диаметр $D_{ex2}=100$ мм, внутренний диаметр $D_{in2}=6$ мм, высота $H_2=2,5$ мм. Якорь выполнен в виде многослойной короткозамкнутой обмотки, сечение медного провода прямоугольного сечения $h_{z2} \times h_{r2}=1,0 \times 1,2$ мм², количество витков провода $w_2=80$ шт.

ЕНЭ: емкость $C_0=3$ мФ, напряжение $U_0=0,4$ кВ. Исходное расстояние между индуктором и якорем $\Delta_0=1$ мм.

В ЛИИЭП скоростного назначения коэффициент упругости возвратной пружины $K_p=50$ кН/м. Масса ИЭ $m_e=0,5$ кг. Полагаем, что в ЛИИЭП силового назначения противодействующая сила значительна и перемещение ИЭ отсутствует.

В ЛИИЭП основного исполнения скоростного назначения реализуются следующие показатели: амплитуда тока индуктора $i_{1m}=2,57$ кА, максимальная плотность тока в проводнике индуктора $j_{1m}=297,5$ А/мм², максимальная плотность тока в якоре $j_{2m}=764,56$ А/мм², амплитуда ЭДУ $f_{zm}=13,983$ кН, величина импульса ЭДУ $F_z=5,674$ Нс, максимальная скорость якоря с индуктором $V_m=8,43$ м/с, КПД $\eta = 10,32$ %, превышение температуры индуктора $\theta_1=0,37$ °С, превышение температуры якоря $\theta_2 = 0,97$ °С. Масса меди в индукторе $m_1 = 0,69$ кг, масса меди в якоре $m_2 = 0,17$ кг.

В ЛИИЭП основного исполнения силового назначения реализуются следующие показатели: амплитуда тока индуктора $i_{1m} = 2,953$ кА, максимальная плотность тока в проводнике индуктора $j_{1m}=341,78$ А/мм², максимальная плотность тока в якоре $j_{2m}=893,51$ А/мм², амплитуда ЭДУ $f_{zm}=20,171$ кН, величина импульса ЭДУ $F_z=9,076$ Нс, превышение температуры индуктора $\theta_1=0,4$ °С, превышение температуры якоря $\theta_2=1,45$ °С.

Интегральный критерий эффективности. Поскольку эффективность работы ЛИИЭП скоростного или силового назначения характеризуется рядом разносторонних показателей, введем интегральный критерий эффективности, который учитывает максимальные скоростные или силовые показатели при минимальных значениях амплитуды тока индуктора, превышения температур и суммарной массе медного провода активных элементов. В безразмерном виде его можно записать следующим образом

$$K^* = \frac{\beta_1}{i_{1m}^*} + \beta_2 A^* + \beta_3 B^* + \frac{\beta_4}{\theta_1^*} + \frac{\beta_5}{\theta_2^*} + \frac{\beta_6}{m_\Sigma^*}; \quad \sum_{j=1}^J \beta_j = 1,$$

где β_j – весовые коэффициенты соответствующего показателя; $J = 6$ – количество функциональных показателей, нормированных относительно ЛИИЭП основного исполнения (отмечены звездочками);

$$m_\Sigma = 0,5\pi\gamma_{Cu} \sum_{n=1}^2 (D_{exn} + D_{inn}) h_{rn} h_{zn} w_n \quad - \text{ суммарная}$$

масса медного провода в n -ых активных элементах, где γ_{Cu} – плотность медного провода;

$A=f_{zm}$, $B=F_z$ – для ЛИИЭП силового назначения;
 $A=V_{zm}$, $B=\eta$ – для ЛИИЭП скоростного назначения;
 f_{zm} – амплитуда ЭДУ;

V_{zm} – максимальная скорость якоря с ИЭ;

$$\eta = 100 \frac{(m_2 + m_e) v_z^2 + K_p \Delta z^2}{C_0 U_0^2}, \% \quad - \text{ КПД ЛИИЭП.}$$

Заметим, что у ЛИИЭП основного исполнения скоростного или силового назначения $K^*=1$. Оптимальным будет преобразователь с максимальным значением K^* , показывая во сколько раз он эффективнее ЛИИЭП основного исполнения.

Методика поиска максимума целевой функции. Интегральный критерий эффективности ЛИИЭП K^* представляет собой целевую функцию оптимизационного процесса. Стратегия нахождения максимума целевой функции m переменных в поисковом пространстве заключается в совместном использовании глобального метода оптимизации, осуществляющего случайный поиск параметров ЛИИЭП в заданном

пространстве, предотвращая попадание в локальный экстремум, и локального метода, обеспечивающего стягивание области параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров.

В качестве глобального метода оптимизации используем генетические алгоритмы, основанные на механизмах популяционной генетики [12, 13]. По данному методу каждому атрибуту объекта в фенотипе соответствует один ген в генотипе, представляющий собой битовую строку фиксированной длины. Признак разбивается на тетрады, преобразуемые по коду Грея. При кодировании бинарной строкой из l битов переменной x_k , которая принадлежит отрезку $[x_{\min}, x_{\max}]$, каждая строка s_k выражает значение переменной x_k :

$$x_k = x_{\min} + s_k(x_{\max} - x_{\min}) / 2^l,$$

где s_k – значение бинарного числа, кодируемого этой строкой.

Оперируя совокупностью (популяцией) возможных решений $P = (x_1, \dots, x_m)$, обрабатывается набор параметров x_i , структурированный определенным образом в виде цепочки конечной длины, а последующие поколения популяции решений генерируются с помощью генетических операторов. Таким образом реализуется случайный поиск с централизованным управлением, использующий отбор и генетические механизмы воспроизводства, при произвольном выборе точек приложения операторов.

Генетические алгоритмы можно представить следующим образом:

$$GA = (P^0, m, l, S, Q, t, \xi),$$

где $P^0 = (a_1^0, \dots, a_m^0)$ – исходная популяция; a_i^0 – решение задачи в виде хромосомы, $i = \overline{1, m}$; m – размер популяции; l – длина каждой хромосомы популяции; S – оператор отбора; Q – отображение, определяющее рекомбинацию (кроссовер, мутация); l – функция оптимальности; ξ – критерий останова.

Работа генетических алгоритмов представляет итерационный процесс, который продолжается до выполнения заданного условия, например замедления роста критерия эффективности $K^*=1$ до заданной величины. P^0 является случайно сгенерированной начальной популяцией. На каждом цикле итерации реализуются операторы отбора, кроссовера и мутации. Оператор отбора S порождает промежуточную популяцию R^t из популяции P^t посредством отбора и генерации новых копий элементов P^t : $R^t = S(P^t)$. Функция оптимальности l , обеспечивающая обратную связь от результатов оптимизации в течение поколения t , используется для отбора индивидуумов популяции. Отбор производится на основании вероятностей $p_S(a_i^t)$, вычисленных для каждого индивида:

$$p_S(a_i^t) = \frac{l(a_i^t)}{\sum_{j=1}^m l(a_j^t)}.$$

После завершения отбора элементу $a_i^t \in R^t$ выбирается партнер из R^t для рекомбинации и строится новая хромосома.

Кроссовер с вероятностью p_C выполняется следующим образом:

- случайный выбор партнеров для скрещивания

$$a_1 = (a_{1,1} \dots a_{1,l}) \in R^t, \quad a_2 = (a_{2,1} \dots a_{2,l}) \in R^t;$$

- случайный выбор точки кроссовера $x \in \{1, \dots, l-1\}$;

- формирование двух новых индивидуумов

$$a_1' = (a_{1,1} \dots a_{1,x} \ a_{2,x+1} \dots a_{2,l}),$$

$$a_2' = (a_{2,1} \dots a_{2,x} \ a_{1,x+1} \dots a_{1,l}).$$

Мутация представляет собой случайное изменение биты хромосомы:

- случайный выбор с вероятностью p_M позиций $\{x_1, \dots, x_k\} \subseteq \{1, \dots, l\}$ внутри битовой строки

$a = (a_1 \dots a_l) \in R^t$, подверженной мутации;

- формирование нового индивидуума

$$a = (a_1 \dots a_{x_1-1} \ \overline{a_{x_1}} \ a_{x_1+1} \dots a_{x_i-1} \ \overline{a_{x_i}} \ a_{x_i+1} \dots a_l), \quad (i = \overline{1, k}).$$

В качестве метода локальной оптимизации для поиска максимума критерия оптимальности $K^*(X)$ в n -мерном евклидовом пространстве R^n

$$\max K^*(X) = K^*(X^*), \quad X \in R^n$$

используется метод Нелдера-Мида, осуществляющий изменение текущего симплекса [14].

В результате отражения k -й вершины симплекса с координатами вершин $X_i^r, i \in [1, n+1]$, образуется симплекс с координатами вершин

$$X_i^{r+1} = X_i^r, \quad i \in [1, n+1], \quad i \neq k, \quad X_k^{r+1} = 2X_C^r - X_k^r,$$

где $X_C^r = \frac{1}{n} \sum_{i=1, i \neq k}^{n+1} X_i^r$ – вектор координат центра тяжести остальных вершин симплекса.

В результате выполнения редукции вершин симплекса X_i^r к вершине X_k получаем симплекс с координатами вершин

$$X_i^{r+1} = X_k^r + \gamma(X_i^r - X_k^r), \quad i \in [1, n+1], \quad i \neq k, \quad X_k^{r+1} = X_k^r,$$

где $\gamma \in (0, 1)$, $\gamma \approx 0,5$ – коэффициент редукции.

После операции сжатия симплекса X_i^r в направлении $(X_k^r - X_C^r)$ получаем симплекс с координатами вершин

$$X_i^{r+1} = X_k^r, \quad i \in [1, n+1], \quad i \neq k, \quad X_k^{r+1} = X_C^r + \beta(X_k^r - X_C^r),$$

где $\beta \in (0, 1)$, $\beta \approx 0,4 - 0,6$ – коэффициент сжатия.

В результате растяжения симплекса X_i^r в направлении $(X_k^r - X_C^r)$ получаем симплекс с координатами вершин

$$X_i^{r+1} = X_i^r, \quad i \in [1, n+1], \quad i \neq k, \quad X_k^{r+1} = X_C^r + \alpha(X_k^r - X_C^r),$$

где $\alpha \approx 2,8 - 3,0$ – коэффициент растяжения.

Поскольку процедура деформации многократно повторяется, то многогранник адаптируется к локаль-

ному рельефу целевой функции и сжимается, обеспечивая сходимость алгоритма в локальном максимуме, позволяя по размерам многогранника σ_i судить о стадии поиска параметров преобразователя.

Реализация задачи выбора параметров ЛИИЭП. Рассмотрим ЛИИЭП дисковой конфигурации с многовитковым якорем, который возбуждается полярным апериодическим импульсом (ЕНЭ шунтирован обратным диодом). В качестве независимых переменных, входящих в вектор переменных проектирования ЛИИЭП, используются: наружный диаметр $D_{\text{вн}}$ и внутренний диаметр $D_{\text{ин}}$ индуктора, высота H_n , число витков w_n , высота h_{zn} и ширина h_m провода прямоугольного сечения n -ого активного элемента; напряжение U_0 и энергия W_0 ЕНЭ. Ограничения на эти параметры накладывают границы поискового пространства (табл. 1).

Таблица 1

Функциональные и параметрические ограничения параметров ЛИИЭП

Параметр	Величина
Энергия ЕНЭ W_0 , Дж	150...500
Напряжение ЕНЭ U_0 , В	150...500
Внешний диаметр n -ых активных элементов $D_{\text{вн}}$, мм	50...100
Внутренний диаметр индуктора $D_{\text{ин1}}$, мм	10...20
Внутренний диаметр якоря $D_{\text{ин2}}$, мм	2...20
Высота индуктора H_1 , мм	5...22
Высота якоря H_2 , мм	1...10
Количество слоев индуктора K_{w1} , шт.	2
Число витков индуктора w_1 , шт.	30...75
Высота провода индуктора h_{z1} , мм	1...2
Ширина провода индуктора h_{r1} , мм	2...10
Количество слоев якоря K_{w2} , шт.	1...8
Число витков якоря w_2 , шт.	20...200
Высота провода якоря h_{z2} , мм	0,5...1,5
Ширина провода якоря h_{r2} , мм	1,0...3,0
Толщина изоляции провода h_s , мм	0,1
Начальный зазор между n -ыми активными элементами Δ_0 , мм	1,0

Для оптимизационных расчетов был применен вычислительный алгоритм, который включает в себя следующие этапы [7].

1. задается генетическое представление многогранника набором $N+1$ параметров – векторами переменных проектирования $P^0 = (x_1^0, \dots, x_{N+1}^0)$, $x(x_1, \dots, x_N) \in \mathcal{R}^N$.

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

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

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

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

6. Исключается многогранник с наихудшими параметрами.

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

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

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

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

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

12. Осуществляется возврат к этапу 4.

Результаты выбора параметров ЛИИЭП скоростного назначения. Выбор параметров во многом определяется принятым вариантом стратегии оценки эффективности ЛИИЭП. Рассмотрим четыре варианта стратегии (табл. 2).

Таблица 2

Весовые коэффициенты вариантов стратегии оценки эффективности ЛИИЭП, о.е.

Варианты стратегий	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
I	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
II	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1
III	0,05	0,5	0,2	0,1	0,1	0,05
IV	0,05	0,2	0,5	0,1	0,1	0,05

В варианте I все показатели ЛИИЭП оцениваются равнозначно (суммарная величина показателя превышений температур равна 0,2). В варианте II наиболее высоко и равнозначно оцениваются максимальная скорость V_m и КПД η преобразователя. В варианте III наиболее высоко оценивается максимальная скорость V_m , а в варианте IV – КПД η .

В результате расчетов для каждого из вариантов стратегии оценки эффективности получены относительные параметры ЛИИЭП скоростного назначения: энергия W_0^* , напряжение U_0^* и емкость C^* ЕНЭ; наружный D_{ex1} и внутренний D_{in1} диаметры, высота H_1^* , число витков w_1^* , толщина h_{z1} и ширина провода h_{r1} индуктора; наружный D_{ex2} и D_{in2} внутренний диаметры, высота H_2^* , число витков w_2^* и количество слоев K_{w2} , толщина h_{z2} и ширина провода h_{r2} якоря (табл. 3).

Работа ЛИИЭП оценивается следующими относительными показателями: амплитудой тока индуктора i_{1m}^* , максимальной плотностью тока в проводниках индуктора j_{1m}^* и якоря j_{2m}^* , максимальной скоростью V_m^* и КПД η^* , превышениями температуры индуктора θ_1^* и якоря θ_2^* в конце рабочего процесса, суммарной массой провода m_Σ^* и критерием эффективности K^* (табл. 4).

В табл. 3 и табл. 4 представлены и усредненные значения параметров и показателей ЛИИЭП скоростного назначения.

Таблица 3

Относительные параметры ЛИИЭП скоростного назначения

Параметр	Варианты стратегии оценки эффективности ЛИИЭП				Усредненное значение
	I	II	III	IV	
D_{ex1}^*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
D_{in1}^*	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
H_1^*	0,62	0,62	0,82	0,66	0,68
w_1^*	1,63	1,39	0,87	0,95	1,21
h_{z1}^*	0,55	0,67	1,11	1,11	0,86
h_{r1}^*	0,625	0,625	0,830	0,662	0,686
D_{ex2}^*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
D_{in2}^*	1,2	1,3	1,1	1,0	1,15
H_2^*	4,8	6,8	1,6	2,52	3,93
w_2^*	2,2	2,1	1,2	1,5	1,75
K_{w2}^*	2,0	2,0	1,0	1,5	1,63
h_{z2}^*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
h_{r2}^*	2,08	3,33	1,5	1,66	2,14

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. Индуктор ЛИИЭП должен иметь максимальный внешний $D_{ex1}=0,1$ м и минимальный внутренний $D_{in1}=0,01$ м диаметры. Якорь должен иметь максимальный внешний диаметр $D_{ex2}=0,1$ м, а толщина его провода должна быть минимальной $h_{z2}=1$ мм. Эти параметры принимают предельные функциональные ограничения (табл. 1) и соответствуют параметрам ЛИИЭП основного исполнения во всех вариантах стратегии оценки эффективности.

Высота индуктора должна быть меньше, чем у ЛИИЭП основного исполнения и, в зависимости от варианта стратегии, составляет в среднем $H_1=6,8$ мм. При этом число витков индуктора в вариантах стратегии I и II должны быть больше, а в вариантах III и IV меньше, чем у ЛИИЭП основного исполнения, составляя в среднем $w_1=56$ витков провода сечением $h_{z1} \times h_{r1}=1,5 \times 3,3$ мм². Якорь оптимизированного преобразователя должен быть выполнен с большим внутренним диаметром $D_{in2}=7$ мм и существенно большей высотой $H_2=9,8$ мм, с большими количеством витков $w_2=140$ и шириной провода $h_{r2}=2,6$ мм.

Таблица 4

Относительные показатели ЛИИЭП скоростного назначения

Показатель	Варианты стратегии оценки эффективности ЛИИЭП				Усредненное значение
	I	II	III	IV	
W_0^*	0,729	0,937	2,08	1,458	1,301
U_0^*	0,437	0,562	1,25	1,25	0,875
C^*	3,8	2,96	1,33	0,933	2,256
i_{1m}^*	0,345	0,565	1,553	1,3	0,941
j_{1m}^*	0,992	1,268	1,677	1,754	1,423
j_{2m}^*	0,141	0,12	0,958	0,568	0,447
V_m^*	0,449	0,516	1,592	1,257	0,965
η^*	0,537	0,727	1,403	1,573	1,061
θ_1^*	1,953	2,834	4,1	3,712	3,15
θ_2^*	0,053	0,037	0,86	0,34	0,323
m_Σ^*	1,456	1,856	0,976	1,03	1,33
K^*	2,858	3,331	1,3	1,376	2,216

ЕНЭ оптимального ЛИИЭП должен иметь меньшую энергию в вариантах стратегии I и II в то время как ее средняя величина должна быть выше, чем у ЛИИЭП основного исполнения и составлять $W_0=312$ Дж. Напряжение ЕНЭ в вариантах стратегии I и II невысокое и составляет в среднем $U_0=200$ В, а в вариантах III и IV

Таблица 5

Относительные параметры ЛИИЭП силового назначения

Параметр	Варианты стратегии оценки эффективности ЛИИЭП				Усредненное значение
	I	II	III	IV	
D_{ex1}^*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
D_{in1}^*	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
H_1^*	1,04	1,04	1,06	0,86	1,0
w_1^*	0,87	1,39	1,09	0,91	1,07
h_{z1}^*	1,11	0,66	0,89	1,11	0,94
h_{r1}^*	1,04	1,04	1,06	0,88	1,01
D_{ex2}^*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
D_{in2}^*	1,2	1,2	1,3	1,4	1,275
H_2^*	5,0	5,0	6,0	3,84	4,96
w_2^*	2,1	2,3	2,2	2,2	2,2
K_{w2}^*	2	2	2	2	2
h_{z2}^*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
h_{r2}^*	2,5	2,5	2,9	1,92	2,46

Таблица 6

Относительные показатели ЛИИЭП силового назначения

Показатель	Варианты стратегии оценки эффективности ЛИИЭП				Усредненное значение
	I	II	III	IV	
W_0^*	0,625	2,08	1,875	2,08	1,665
U_0^*	0,375	1,25	1,125	1,2	0,988
C^*	4,444	1,333	1,481	1,45	2,177
i_{1m}^*	0,818	0,993	1,234	1,616	1,165
j_{1m}^*	0,703	1,43	1,333	1,662	1,282
j_{2m}^*	0,146	0,288	0,243	0,428	0,276
f_{zm}^*	0,382	1,47	2,018	1,361	1,308
F_z^*	0,891	3,147	2,918	3,318	2,568
θ_1^*	1,062	3,382	3,181	4,198	2,956
θ_2^*	0,051	0,19	0,125	0,291	0,164
m_{Σ}^*	1,832	1,832	2,032	1,456	1,788
K^*	2,664	2,147	2,159	2,047	2,254

– максимальное $U_0=500$ В. Усредненные значения максимальных плотностей токов по сравнению с ЛИИЭП основного исполнения в проводниках индуктора увеличены до $j_{1m}=423$ А/мм², а в проводниках якоря уменьшены до $j_{2m}=342$ А/мм².

Максимальная скорость и КПД снижены в вариантах стратегии I и II и увеличены в вариантах III и IV. Так в варианте стратегии III максимальная скорость $V_m=13,4$ м/с, а КПД в варианте IV КПД составляет $\eta=16,2$ %.

По сравнению с ЛИИЭП основного исполнения в оптимизированных преобразователях превышение температуры индуктора возрастает, а якоря – уменьшается, составляя в среднем $\theta_1=1,17$ °С и $\theta_2=0,31$ °С. Масса медного провода возрастает в среднем до $m_{\Sigma}=1,14$ кг. По сравнению с ЛИИЭП основного исполнения интегральные критерии эффективности оптимизированных преобразователей возрастают в среднем до величины $K^*=2,2$.

На рис.1 показаны электромеханические характеристики ЛИИЭП скоростного назначения, оптимального в варианте стратегии IV. Особенностью этих характеристик является то, что максимальные значения плотностей токов в обмотках индуктора и якоря возникают практически одновременно, что обуславливает и характер изменения ЭДУ f_z . Перемещение якоря с ИЭ начинается через 0,2 мс после начала рабочего процесса.

Результаты выбора параметров ЛИИЭП силового назначения. Рассмотрим четыре варианта стратегии оценки эффективности ЛИИЭП силового назначения (табл. 2). В варианте II наиболее высоко и равнозначно оцениваются амплитуда f_{zm} и величина импульса F_z ЭДУ. В варианте III наиболее высоко оценивается амплитуда ЭДУ f_{zm} . В варианте IV наиболее высоко оценивается величина импульса ЭДУ F_z .

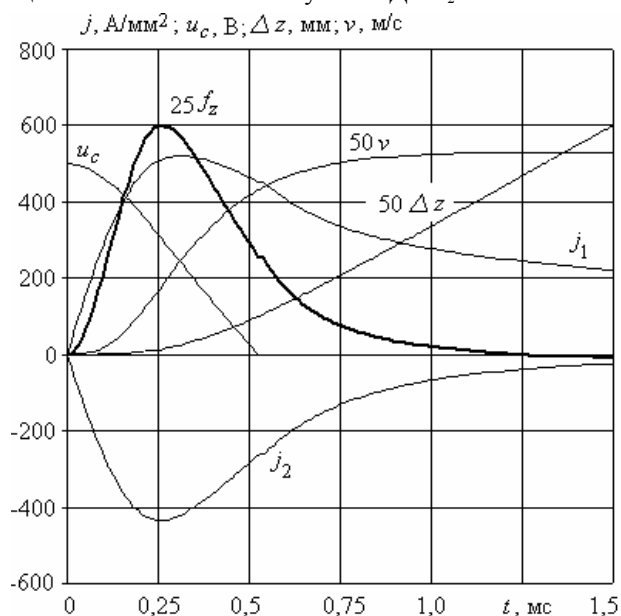


Рис. 1. Электромеханические характеристики оптимального ЛИИЭП скоростного назначения (вариант стратегии IV)

В табл. 5 и табл. 6 представлены усредненные значения параметров и показателей ЛИИЭП силового назначения.

Высота индуктора этого преобразователя должна быть практически такой же, как у ЛИИЭП основного исполнения, и составлять в среднем $H_1=10$ мм. При этом число витков индуктора в вариантах стратегии I и IV должны быть меньше, а в вариантах стратегии II и III больше, чем у ЛИИЭП основного исполнения, составляя в среднем $w_1=50$ витков. Практически таким же должно быть сечение провода индуктора $h_{z1} \times h_{r1}=1,7 \times 4,8$ мм². Якорь должен быть выполнен с несколько большим внутренним диаметром $D_{m2}=7,6$ мм и существенно большей высотой $H_2=12,4$ мм. У этого якоря должно быть большее количество витков провода $w_2=176$, которые должны быть уложены в 4 слоя, и большая ширина провода $h_{r2}=3,0$ мм.

ЕНЭ ЛИИЭП силового назначения должен иметь меньшую энергию только в варианте стратегии I, в котором все показатели оцениваются равнозначно. Средняя величина энергии ЕНЭ должна быть выше, чем у ЛИИЭП основного исполнения и составлять $W_0=400$ Дж. Напряжение ЕНЭ в варианте стратегии I пониженное и составляет $U_0=150$ В, а в остальных вариантах повышенное и составляет $U_0=450-500$ В. Емкость ЕНЭ возрастает во всех вариантах стратегии, составляя в среднем $C=6530$ мкФ.

Усредненные значения максимальных плотностей токов по сравнению с ЛИИЭП основного исполнения в проводниках индуктора в среднем увеличены до $j_{1m}=438$ А/мм², а в проводниках якоря уменьшены

до $j_{2m}=246 \text{ А/мм}^2$. Амплитуда и величина импульса ЭДУ увеличены за исключением варианта стратегии I. Так в варианте стратегии III амплитуда ЭДУ составляет $f_{zm}=40,7 \text{ кН}$, а в варианте стратегии IV величина импульса ЭДУ составляет $F_z=30,11 \text{ Н}\cdot\text{с}$. Во всех вариантах стратегии по сравнению с ЛИИЭП основного исполнения превышение температуры индуктора возрастает, а якоря – уменьшается, составляя в среднем $\theta_1=1,18 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\theta_2=0,24 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно. Масса медного провода увеличивается в среднем до $m_\Sigma=1,54 \text{ кг}$. По сравнению с ЛИИЭП основного исполнения интегральные критерии эффективности оптимизированных преобразователей силового назначения возрастают в среднем до величины $K^*=2,25$.

На рис. 2 показаны электродинамические характеристики ЛИИЭП силового назначения, оптимального в варианте стратегии IV. По сравнению с ЛИИЭП скоростного назначения в данном преобразователе электродинамические процессы протекают с большим затягиванием во времени, с большими амплитудами плотностей токов в индукторе и якоре, а также ЭДУ.

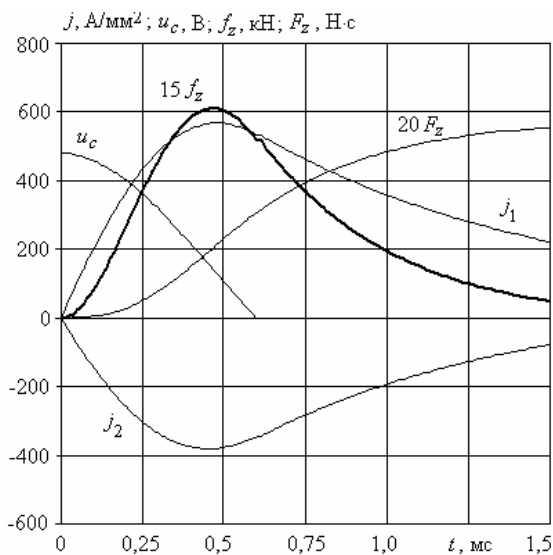


Рис. 2. Электродинамические характеристики оптимального ЛИИЭП силового назначения (вариант стратегии IV)

Выводы

1. Разработан оптимизационный подход к выбору параметров ЛИИЭП с многовитковым короткозамкнутым якорем, который состоит в нахождении максимума интегрального критерия эффективности, учитывающего максимальную скорость и КПД преобразователя скоростного назначения, амплитуду и величину импульса ЭДУ преобразователя силового назначения при минимальных превышениях температур, массе активных элементов и токе индуктора. При оптимизации используется цепная математическая модель, которая учитывает взаимосвязанные электрические, магнитные, тепловые и механические процессы ЛИИЭП.

2. Разработана методика поиска максимума интегрального критерия эффективности ЛИИЭП в поисковом пространстве с использованием глобального метода оптимизации, осуществляющего случайный поиск параметров, предотвращая попадание в локальный максимум, и локального метода, обеспечивающе-

го стягивание области параметров с глобальным максимумом до минимальных размеров. В качестве глобального метода оптимизации используются генетические алгоритмы, а в качестве локального – метод Нелдера-Мида.

3. Установлены величины электрических параметров емкостного накопителя энергии и геометрические параметры ЛИИЭП, обеспечивающие наибольшие значения интегрального критерия эффективности в зависимости от принятого варианта стратегии оценки эффективности. В оптимизированных преобразователях скоростного и силового назначения интегральные критерии эффективности в среднем в 2,2 раза выше, чем в ЛИИЭП основного исполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Balikci A., Zabar Z., Birenbaum L., Czarkowski D. Improved performance of linear induction launchers // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – vol.41. – no.1. – pp. 171-175. doi: 10.1109/tmag.2004.839283.
- Томашевский Д.Н., Кошкин А.Н. Моделирование линейных электродвигателей импульсного действия // Электротехника. – 2006. – №1. – С. 24-27.
- Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008. – №3. – С. 44-52.
- D.-K. Lim, D.-K. Woo, I.-W. Kim, D.-K. Shin, J.-S. Ro, T.-K. Chung, H.-K. Jung. Characteristic Analysis and Design of a Thomson Coil Actuator Using an Analytic Method and a Numerical Method // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – vol.49. – no.12. – pp. 5749-5755. doi: 10.1109/tmag.2013.2272561.
- Болюх В.Ф., Щукин И.С. Линейные индукционные преобразователи. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 496 с.
- Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Сравнительный анализ линейных импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного и индукционного типов // Технічна електродинаміка. – 2016. – №5. – С. 46-48.
- Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – vol.48. – no.11. – pp. 3315-3318. doi: 10.1109/tmag.2012.2198447.
- Young-woo J., Hyun-wook L., Seok-won L. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD // Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution». – 2013, 10-13 June, Stockholm - Paper 608.
- Li W., Koh C.S. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method // Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation. – May 2010. – pp. 1-9. doi: 10.1109/cefc.2010.5481673.
- Болюх В.Ф., Кочерга А.И., Щукин И.С. Исследование линейного импульсно-индукционного электромеханического преобразователя при различных схемах питания индуктора // Электротехника і електромеханіка. – 2018. – №1. – С. 21-28. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.03.
- Болюх В.Ф., Щукин И.С. Исследование тепловых процессов в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе циклического действия // Электротехніка і електромеханіка. – 2017. – № 5. – С. 14-22. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.02.
- Nolan R., Pillay P., Naque T. Application of genetic algorithms to motor parameter determination // Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – Baltimore, USA. – 1994. – pp. 42-54. doi: 10.1109/ias.1994.345500.
- 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. – pp. 1-11.

14. Nelder J.A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization // The Computer Journal. 1965. – vol.7. – no.4. – pp. 308-313. doi: 10.1093/comjnl/7.4.308.

REFERENCES

1. Balicki A., Zabar Z., Birenbaum L., Czarkowski D. Improved performance of linear induction launchers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol.41, no.1, pp. 171-175. doi: 10.1109/tmag.2004.839283.
2. Tomashevsky D.N., Koshkin A.N. Modeling of linear impulse electric motors. *Russian Electrical Engineering*, 2006, no.1, pp. 24-27. (Rus).
3. Chemerys V.T., Bolyukh V.F. Prospectives of new coilgun design development. *Artillery and small arms*, 2008, no.3, pp. 44-52.
4. D.-K. Lim, D.-K. Woo, I.-W. Kim, D.-K. Shin, J.-S. Ro, T.-K. Chung, H.-K. Jung. Characteristic Analysis and Design of a Thomson Coil Actuator Using an Analytic Method and a Numerical Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol.49, no.12, pp. 5749-5755. doi: 10.1109/tmag.2013.2272561.
5. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Lineinye induktsionno-dinamicheskie preobrazovateli* [Linear induction-dynamic converters]. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2014. 496 p. (Rus).
6. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. Comparative analysis of linear pulse electromechanical converters electromagnetic and induction types. *Technical Electrodynamics*, 2016, no.5, pp. 46-48. (Rus).
7. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, vol.48, no.11, pp. 3315-3318. doi: 10.1109/tmag.2012.2198447.
8. J. Young-woo, L. Hyun-wook, L. Seok-won. High-speed AC circuit breaker and high-speed OCD. *Proceeding of the conf. «22-th international conference on electricity distribution»*. 2013, 10-13 June, Stockholm. - Paper 608.
9. Li W., Koh C.S. Parametric analysis of Thomson-coil actuator using adaptive equivalent circuit method. *Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, May 2010, pp. 1-9. doi: 10.1109/cefc.2010.5481673.
10. Bolyukh V.F., Kocherga A.I., Schukin I.S. Investigation of a linear pulse-induction electromechanical converter with different inductor power supply circuits. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.1, pp. 21-28. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.03.
11. Bolyukh V.F., Schukin I.S. Investigation of thermal processes in a linear pulse-induction electromechanical converter of cyclic action. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 14-22. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.02.
12. Nolan R., Pillay P., Haque T. Application of genetic algorithms to motor parameter determination. *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Baltimore, USA, 1994, pp. 42-54. doi: 10.1109/ias.1994.345500.
13. 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, pp. 1-11.
14. Nelder J.A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 1965, vol.7, no.4, pp. 308-313. doi: 10.1093/comjnl/7.4.308.

Поступила (received) 04.09.2018

Болюх Владимир Федорович¹, д.т.н., проф.,
Шукин Игорь Сергеевич^{1,2}, к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +38 057 7076427, e-mail: vfbolyukh@gmail.com

²ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +38 057 7076427, e-mail: tech@tetra.kharkiv.com.ua

V.F. Bolyukh¹, I.S. Schukin^{1,2}

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Firm Tetra, LTD,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

An optimization approach to the choice of parameters of linear pulse induction electromechanical converter.

Purpose. The purpose of the paper is to select the main parameters of the linear pulse induction electromechanical converters (LPIEC) for high-speed and power use with the use of the optimization approach, which provides an increase in speed and power indicators with limited electric, thermal and mass-dimensions. **Methodology.** A technique for finding the maximum of the integral efficiency criterion of LPIEC in the search space using a global optimization method that randomly searches for parameters, preventing entry into a local maximum, and a local method ensuring the contraction of the range of parameters with a global maximum to minimum dimensions is developed. As a global optimization method, genetic algorithms are used, and the Nelder-Mead method is used as the local method. **Results.** The LPIEC inductor should have a maximum external and minimum internal diameter, and its height should be less than that of the LPIEC of the basic design. The armature should have a maximum outer diameter, and the thickness of its wire should be minimal. The armature should be made with a significantly higher height, a greater number of turns and a wider wire. The height of the LPIEC inductor for power purposes should be almost the same as that of the LPIEC of the basic design. In this case, the number of turns of the inductor and the cross section of its wire should be approximately the same. The armature should be made with a slightly larger inner diameter and a significantly higher height. This armature should have a larger number of turns of wire, which must be stacked in 4 layers, and a large width of the wire. The average energy value and voltage of the capacitive energy storage for the LPIEC for high-speed and power applications should be higher than for the LPIEC of the basic design. **Originality.** An optimization approach to the choice of LPIEC parameters with a multi-turn squirrel arm is developed, which consists in finding the maximum of an integral efficiency criterion that takes into account the maximum speed and efficiency in a high-speed converter, the amplitude and magnitude of the electrodynamic force pulse in a power converter, with minimum temperature excesses, the mass of active elements and current of the inductor. The optimization uses a chain mathematical model that takes into account the interconnected electrical, magnetic, thermal and mechanical processes of the LPIEC. **Practical value.** The electric parameters of the capacitive energy storage device and the geometric parameters of the LPIEC are determined, which ensure the largest values of the integral efficiency criterion depending on the adopted version of the efficiency evaluation strategy. In optimized speed and power transfer converters, the integral efficiency criteria are 2.2 times higher on average than in the basic performance of the LPIEC. References 14, tables 6, figures 2.

Key words: linear pulse induction electromechanical converter, chain mathematical model, integral efficiency criterion, optimization approach, genetic algorithms, Nelder-Mead method.