

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ

Болух В.Ф., д.т.н., проф.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Общая электротехника"

тел. (057) 70-76-427, e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua

Розглянуті шляхи і напрями підвищення ефективності лінійних електромеханічних перетворювачів імпульсної дії за рахунок конструктивних удосконалень, кріогенного охолодження рідким азотом, синтезу оптимальних параметрів і конфігурацій активних елементів та застосування багатосекційних конструкцій з послідовною комутацією секцій індуктора. Запропонована класифікація цих перетворювачів по конструктивним ознакам.

Рассмотрены и проанализированы пути и направления повышения эффективности линейных электромеханических преобразователей импульсного действия за счет конструктивных усовершенствований, криогенного охлаждения жидким азотом, синтеза оптимальных параметров и конфигураций активных элементов и применения многосекционных конструкций с последовательной коммутацией секций индуктора. Предложена классификация этих преобразователей по конструктивным признакам.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений развития электромеханики являются линейные электродвигатели, обеспечивающие разгон массогабаритных объектов до высокой скорости [1,2]. Особенность их конструктивных схем состоит в том, что двигатель и ускоряемый исполнительный элемент (ИЭ), как правило, объединены в единую систему, образуя электро-механический преобразователь линейного движения. В качестве ИЭ может выступать как активная часть механической системы, в которую встроены преобразователь, например, поршень, клапан, замыкающий контакт, ударник и т.д., так и отдельный объект, например, испытательное устройство, пусковой предмет и др. Непосредственное соединение якоря двигателя с ИЭ лишает электро-механический преобразователь универсальности, поскольку данный элемент в силу функциональных особенностей и характера нагрузки определяет величину рабочего хода, силу ударного воздействия и скорость линейного перемещения, что требует особого внимания при его проектировании. Одними из наиболее перспективных в данном классе устройств являются линейные электро-механические преобразователи импульсного действия (ЛЭПИД). Однако при работе в импульсном режиме с быстрым изменением электромагнитных, механических и тепловых характеристик в течение рабочего цикла, эффективность известных преобразователей недостаточно высока [3].

Целью статьи является обобщение путей совершенствования и повышения эффективности ЛЭПИД.

В качестве направлений совершенствования ЛЭПИД можно выделить: конструктивный, криогенное охлаждение, синтез оптимальных параметров и конфигураций активных элементов, применение многосекционных конструкций, использование различных систем возбуждения и источников энергии. Рассмотрим основные технические реализации указанных подходов.

КРИОГЕННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных путей совершенствования ЛЭПИД является криогенное охлаждение индуктора и якоря [4,5]. Для этих целей целесообразно использовать жидкий азот, который обладает высокими диэлектрическими показателями и является безопасным, относительно дешевым и доступным хладагентом, позволяя многократно понизить активное сопротивление токовых элементов. За счет этого обеспечивается повышение добротности электромагнитной системы ЛЭПИД и происходит возрастание токов в индукторе и якоре в импульсном режиме. Как результат – понижаются потери, увеличиваются электродинамические усилия (ЭДУ), действующие на якорь, и повышается его скорость.

Эффективность электро-механического преобразователя целесообразно оценивать параметрами η_p и η_f , которые учитывают, соответственно, кинетическую энергию и потери, а также импульс ЭДУ и энергию емкостного накопителя [5]:

$$\eta_p(t) = \frac{(m_2 + P)v^2(t)}{(m_2 + P)v^2(t) + 2 \sum_{n=1}^2 \int_0^{t_p} i_n^2(t) R_n(T_n, B_n) dt} ;$$

$$\eta_f(t) = \frac{1}{U_0^2 C \cdot (m_2 + P)} \left(\int_0^{t_p} f_z(t) dt \right)^2 ;$$

где m_2 – масса якоря; P – масса ускоряемого ИЭ; V – скорость якоря вдоль оси z ; i_n , R_n , T_n , B_n – ток, сопротивление, температура и индукция магнитного поля n -ого элемента ($n=1, 2$ – индексы индуктора и якоря); U_0 , C – напряжение и емкость источника энергии; t_p – продолжительность импульса ЭДУ; f_z – ЭДУ, действующие на якорь, равные

$$f_z(t, z) = i_1(t) \cdot i_2(t) \frac{dM_{12}}{dz}(z) ;$$

$M_{12}(z)$ – взаимоиנדуктивність между индуктором и якорем.

На рис.1 показана динамика изменения параметров η_p и η_f в течение рабочего цикла, откуда следует,

что криогенное охлаждение существенно повышает эффективность преобразования энергии в ЛЭПИД.

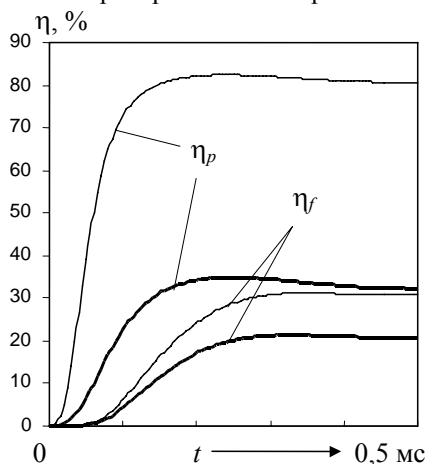


Рис.1. Показатели эффективности ЛЭПИД при комнатной температуре (жирные линии) и при криогенном охлаждении (тонкие линии)

Однако наличие низкотемпературного хладагента обуславливает применение специального криостата, что усложняет конструкцию ЛЭПИД и требует новых конструктивных решений. Криостат должен быть выполнен из немагнитного слабо проводящего материала и не испытывать механических нагрузок от ЭДУ. В качестве примера использования криогенного ЛЭПИД рассмотрим конструктивную схему технологической установки, предназначенной для очистки оборудования, например трюма, от остатков налипших материалов повышенной вязкости (рис.2).

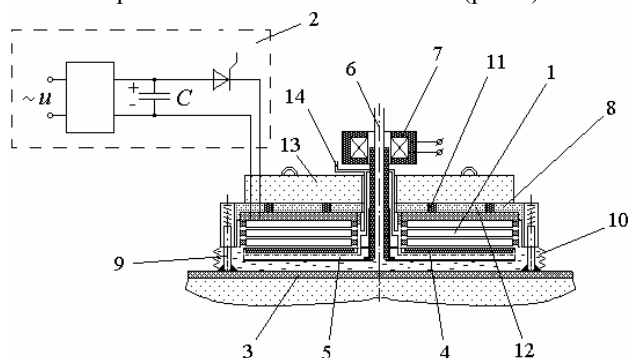


Рис.2. Схема технологической установки для очистки оборудования от остатков вязких материалов

Установка содержит индуктор 1 с радиальными каналами для охлаждения, возбуждаемый от импульсного источника 2. Между индуктором 1 и поверхностью очищаемого оборудования 3 расположен подвижный якорь 4, к внешней поверхности которого присоединена ударная пластина 5. Направляющий стержень 6 соединяет якорь 4 с электромагнитом 7 возвратного механизма. Внешний корпус 8 выполнен из теплоизоляционного материала, например пенопласта, покрытого тонким листом нержавеющей стали. Контактные элементы подпружиненного цилиндра 9 соединены с корпусом криостата внешним гофрированным кожухом 10, выполненным, например, из герметичного стекловолокна или металлического

сильфона. В корпусе 8 установлены упорные теплоизоляционные элементы 11, которые соединяют опорную пластину 12 криостата с внешним диском 13, находящемся при температуре окружающей среды. Через центральное отверстие направляющего стержня 6 в установку подается криогенный хладагент, а выход использованного газа осуществляется через патрубок 14. В целом представленная криогенная установка довольно конструктивна и технологична, что делает ее не намного сложнее аналогичной охлаждаемой "теплой" установки, работающей при температуре окружающей среды.

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ И КОНФИГУРАЦИЙ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Иным эффективным путем повышения эффективности ЛЭПИД является синтез параметров его активных элементов, обеспечивающих для заданной нагрузки и энергии источника максимальную эффективность работы при определенных условиях, например, минимальных превышениях температур и заданном объеме проводникового материала для индуктора и якоря. Синтез параметров осуществляется путем применения оптимизационного алгоритма, в котором используется нахождение минимума целевой функции m переменных в поисковом пространстве. В алгоритме совместно используется глобальный метод оптимизации, осуществляющий случайный поиск параметров преобразователя в заданном пространстве, предотвращая попадание в локальный экстремум, и локальный метод, обеспечивающий стягивание области параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров. В качестве метода глобальной оптимизации применяются генетические алгоритмы, относящиеся к методам оптимального проектирования нового поколения [6]. По данному методу, оперируя совокупностью (популяцией) возможных решений $P = (x_1, \dots, x_m)$, обрабатывается набор параметров x , структурированный определенным образом в виде цепочки конечной длины, а последующие поколения популяции решений генерируются с помощью генетических операторов. Здесь реализуется случайный поиск с централизованным управлением, использующий отбор и генетические механизмы воспроизводства, при произвольном выборе точек приложения операторов. Формально используемый генетический алгоритм можно записать в виде

$$P_{k+1} = \Gamma A(P_k, N, S^*, C^*, M^*, I_\Lambda, \Lambda, t^*),$$

где P_k - популяция на k -ом шаге; N - размер популяции; S^* - оператор отбора; C^* - оператор кроссовера; M^* - оператор мутации; Λ - метод локальной оптимизации; I_Λ - критерий включения локального метода; t^* - критерий окончания.

Операторы S^* , C^* и M^* используют вероятностное распределение. При использовании оператора отбора S^* в каждой итерации алгоритма популяция P_k сортируется в порядке возрастания целевой функции $f(x_i^k)$. Затем два отобранные варианта ("особи") обрабатываются операторами мутации M^* и кроссовера C^* . При использовании оператора кроссовера C^* на линии

раздела двух цепочек варьируемых параметров случайным образом выбирается точка раздела и части, расположенные, например, слева от этой точки, меняются местами, образуя два новых варианта ("потомка"), каждый из которых содержит части первоначальных ("родительских") цепочек параметров, замещающая варианты с низкими показателями. Для предотвращения преждевременного стягивания вариантов в локальном экстремуме используется оператор мутации M^* , который действует на цепочки параметров, выбранные случайным образом, изменяя случайным образом выбранный небольшой фрагмент.

В качестве метода локальной оптимизации параметров преобразователя используется метод деформируемого многогранника [7]. По этому методу в пространстве параметров \mathfrak{R}^n случайным образом иницируется популяция точек $x_i, i=1, \dots, n+1$ (вершины многогранника), при этом каждая точка представляет собой вектор параметров $x=(x_1, \dots, x_n)$. Они отображаются на пространство целевой функции $f(x)$ и на текущем шаге t определяются вершины с наибольшим и наименьшим значениями целевой функции, $f_{\max}(x'_{\max})$ и $f_{\min}(x'_{\min})$. Новая точка z^t формируется путем отражения наихудшей вершины $w^t = x'_{\max}$ с максимальным значением целевой функции относительно центра масс s всех остальных вершин. В новой точке $y^t = 2c^t - w^t$ вычисляется значение целевой функции $f(y^t)$ и, в зависимости от сравнения полученной величины со значением целевой функции в наилучшей вершине с минимальным значением целевой функции, многогранник деформируется относительно своего исходного состояния: он претерпевает либо растяжение к точке $z^t = 2y^t - c^t$, либо сжатие к точке $z^t = 0,5(c^t + w^t)$, либо редукцию, когда его вершины заменяются точками $0,5(x'_i + x'_{\min})$. Поскольку процедура деформации многократно повторяется, то многогранник адаптируется к локальному рельефу целевой функции и сжимается, обеспечивая сходимость алгоритма в локальном минимуме, позволяя по размерам многогранника σ , судить о стадии поиска параметров оптимального преобразователя.

При синтезе параметров требуем, чтобы потери в индукторе и якоре ЛЭПД при фиксированной энергии источника были минимальными, обеспечивая максимальную эффективность ускорения, минимальные превышения температур обмоток θ_n и наименьшую массу индуктора. В таком случае при заданных критериальных ограничениях запишем

$$f_1(x) = \frac{2 \sum_{n=1}^2 \int_0^t i_n^2(t) \cdot R_n(T_n, B_n) dt}{(m_2 + P) \cdot V^2 + 2 \sum_{n=1}^2 \int_0^t i_n^2(t) \cdot R_n(T_n, B_n) dt} \rightarrow \min_{x \in \mathfrak{R}^m}$$

$$f_2(x) = 1 - \frac{1}{C \cdot U_0^2 (m_2 + P)} \left(\int_0^t f_z(t, z) dt \right)^2 = f_{2\min}^* ;$$

$$f_3(x) = 1 - \frac{m_2^2 V^2}{C \cdot U_0^2 [m_2 + 0,25 \cdot \pi \cdot H_1 \cdot \gamma_1 \cdot (D_{ex1}^2 - D_{in1}^2)]} = f_{3\min}^* ;$$

$$\theta_1 = \theta_{1\min}^* ; \quad \theta_2 = \theta_{2\min}^* ; \quad \mathfrak{R}^m \in \{a_i, b_i\}, \quad i = 1, \dots, m ,$$

где $x = (H_1, H_2, D_{in1}, D_{in2}, k_{w1}, k_{w2}, U_0)$ - вектор переменных проектирования; H_n - высота n -ой обмотки; D_{exn}, D_{inn} - внешний и внутренний диаметр n -ой обмотки; k_{w1} - количество слоев n -ой обмотки; a_i и b_i - границы области поискового пространства \mathfrak{R}^m .

При решении задачи синтеза используется иерархический подход, что позволяет обрабатывать критерии с определенными физическими значениями и контролировать процесс оптимизации. В иерархической последовательности установлен приоритет критериев, понижающийся с увеличением индекса

$$U_1(x) = \sum_{i=1}^6 (\max\{0; a_i - x_i\} + \max\{0; x_i - b_i\}) ; \quad U_2(x) = |f_2(x) - f_{2\min}^*| ;$$

$$U_3(x) = |f_3(x) - f_{3\min}^*| ;$$

$$U_4(x) = \min\{\theta_1(x) - \theta_{1\min}^*\} ; \quad U_5(x) = \min\{\theta_2(x) - \theta_{2\min}^*\} ;$$

$$U_6(x) = f_1(x) .$$

Решение $x = x^*$ считается оптимальным, если выполняются следующие равенства:

$$U_1(x^*) = U_2(x^*) = U_3(x^*) = U_4(x^*) = U_5(x^*) = 0 ; \quad U_6(x^*) = \min f_1 .$$

Для расчетов используются функциональные зависимости, описывающие электромагнитные, механические и тепловые процессы с учетом нелинейных параметров [8]:

$$i_n = f(U_0, C, R_n, L_n, M_{12}, V, t) ;$$

$$\Delta Z = f(i_n, M_{12}, P, m_2, K_T, \beta_a, \gamma_a, t) ;$$

$$R_n = f(T_n, B_n, \delta^*) ;$$

$$T_n = f(j_n, \rho_n, c_n, \gamma_n, \lambda_n, k_{\dot{K}} \alpha_{Tn}, t) ,$$

где L_n - индуктивность n -ой обмотки; K_T - коэффициент динамического трения; β_a - коэффициент аэродинамического сопротивления; γ_a - плотность среды перемещения; δ^* - эффективная величина скин-слоя; $j_n, c_n, \lambda_n, \rho_n, \alpha_{Tn}$ - соответственно, плотность тока, усредненная удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, удельное сопротивление, коэффициент теплоотдачи n -ой обмотки.

В табл.1 в зависимости от объема проводникового материала VOL представлены полученные параметры высокоэффективных криогенных ЛЭПД. Помимо указанных выше параметров в табл.1 показаны d_0 - диаметр медного проводника; i_{m1} - максимальный ток индуктора; FI - импульс ЭДВ; w - удельная энергия преобразователя; относительная высота n -ой обмотки $\varepsilon_{Hn} = H_n / (D_{exn} - D_{inn})$.

Отметим, что полученные параметры эффективности преобразователей существенно превышают аналогичные параметры известных устройств.

Помимо выбора электромагнитных и геометрических параметров широкие возможности открывает подход по выбору конфигурации индуктора и якоря. Так на рис.3,а показан ЛЭПД с якорем комбинированной формы, а на рис.3,б - изменение его относительной эффективности в зависимости от параметров формы якоря $\alpha_1 = c/e$; $\alpha_2 = c/d$.

Таблица 1

Параметры высокоэффективных ЛЭПИД

Параметр	Значения			
$VOL \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3$	0,125	0,25	0,5	1,5
$C, \text{ мкФ}$	140	260	190	150
$D_{ex1}, \text{ м}$	98	154	232	266
$D_{ex}, \text{ о.е.}$	1,15	1,20	1,10	0,98
$\varepsilon_{H1}, \%$	19,8	10,9	4,4	13,8
$\varepsilon_{H2}, \%$	3,5	1,6	2,5	1,8
$d_0, \text{ мм}$	3,0	3,4	2,8	3,8
$i_{m1}, \text{ кА}$	11,74	7,77	6,03	1,80
$f_{zm}, \text{ кГц}$	428,2	385,0	640,0	186,2
$FI, \text{ Н}\cdot\text{с}$	56,5	83,0	158,1	115,9
$V, \text{ м/с}$	40,5	45,9	34,5	31,2
$\eta_p, \%$	84	84	89	89
$\eta_{fz}, \%$	23	38	55	36
$w, \text{ Дж/кг}$	688,0	476,1	327,5	75,7

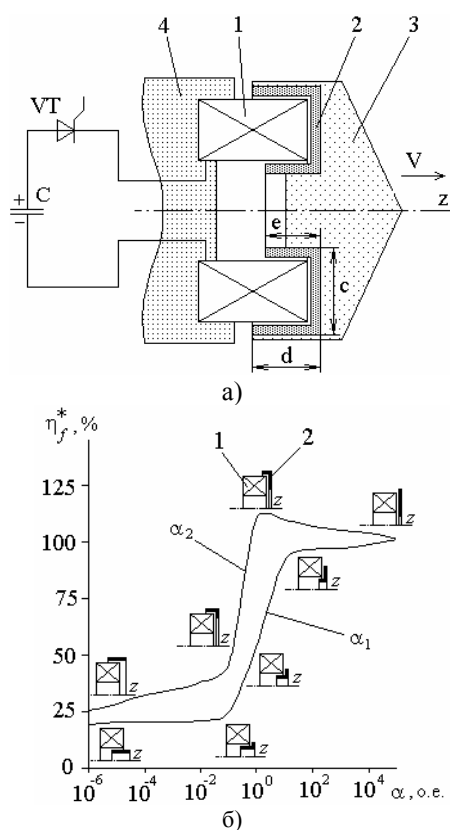


Рис.3. Структурная схема (а) и эффективность (б) ЛЭПИД с комбинированным якорем:
1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – ИЭ; 4 – упор

На рис.3,а в качестве базовой принята дисковая конфигурация якоря. Как следует из полученных зависимостей, отсутствие дискового участка якоря существенно снижает эффективность преобразователя. Однако дисковая конфигурация якоря, обеспечивая более высокую эффективность ЛЭПИД по сравнению с цилиндрической формой, оказывается не лучшей. Наибольшую эффективность проявляет преобразователь, у которого, помимо дискового участка якоря, имеется наружный аксиальный участок, длина которого составляет примерно 0,4 от длины радиального участка.

Широкие возможности открывают конструктивные усовершенствования ЛЭПИД. В качестве наиболее эффективных технических решений можно отметить преобразователи, использующие:

- подвижный индуктор;
- квазистационарный якорь;
- форсирующую обмотку статора;
- ферромагнитный сердечник;
- наружный электромагнитный экран.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ПОДВИЖНЫМ ИНДУКТОРОМ

Преобразователь с подвижным индуктором содержит дополнительный вторичную обмотку статора, которая установлена коаксиально с индуктором и взаимодействует с неподвижным упором. При возбуждении подвижного индуктора, установленного между якорем и дополнительной обмоткой, возникают электродинамические силы, вследствие чего происходит ускорение индуктора, сообщаящего дополнительное ускорение якорю с ИЭ. На рис.4 показана электрическая схема замещения этого преобразователя, где указаны взаимосвязи между подвижным индуктором (индекс 1), якорем (индекс 2) и дополнительной статорной обмоткой (индекс 3). Здесь обозначены: V_{13} – скорость индуктора относительно дополнительной обмотки; V_{12} – скорость якоря относительно индуктора; a, b – подвижные токовые контакты индуктора.

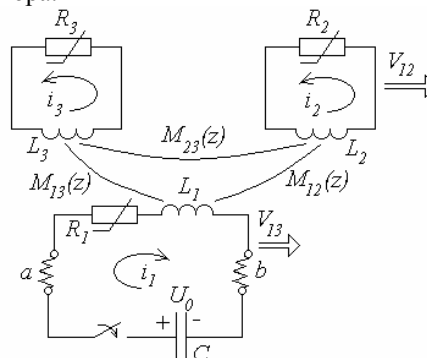


Рис.4. Схема замещения ЛЭПИД с подвижным индуктором

Как показывают исследования основные электромеханические показатели ЛЭПИТ с подвижным индуктором по сравнению с традиционным вариантом, содержащим неподвижный индуктор, заметно повышаются. Об этом свидетельствует рис.5, где представлено распределение параметра эффективности η_f преобразователя с подвижным индуктором при различном соотношении геометрических параметров ускоряемого якоря ε_{H2} и дополнительной статорной обмотки ε_{H3} . Вариант $\varepsilon_{H3}=0$ соответствует параметрам преобразователя традиционной конструкции.

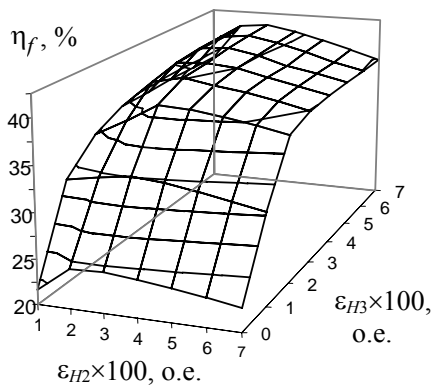


Рис.5. Распределение параметра эффективности преобразователя с подвижным индуктором в зависимости от геометрических параметров якоря и статорной обмотки

Для рассматриваемого преобразователя целесообразно выбирать вторичные обмотки с параметрами $\varepsilon_{H2,3}=0,02...0,03$. Заметим, что идея рассмотренного преобразователя близка к концепции многодисковых электрических машин, характеризующихся высокой степенью использования активного объема за счет устранения пассивных участков, не принимающих участие в процессе электромеханического преобразования энергии.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С КВАЗИСТАЦИОНАРНЫМ ЯКОРЕМ

Концепция преобразователя с квазистационарным якорем состоит в следующем. ЭДУ $f_z(t,z)$, действующие на якорь, зависят как от взаимодействия токов в индукторе $i_1(t)$ и якоря $i_2(t)$, так и от градиента взаимной индуктивности $dM/dz(z)$ между ними. При этом необходимо учесть, что все эти параметры во времени и в пространстве имеют ярко выраженный импульсный характер. Исходя из этого, для повышения эффективности ЛЭПВД необходимо обеспечить оптимальное взаимодействие между этими пространственно-временными параметрами. Иными словами, максимум токов индуктора $i_1(t)$ и якоря $i_2(t)$ должен возникать в то время, когда якорь находится на определенном расстоянии относительно индуктора, где градиент взаимной индуктивности $dM/dz(z)$ имеет максимальное значение. Для обеспечения указанного условия предлагается конструкция якоря, у которого при его ускорении токовая зона остается неподвижной на начальном этапе работы. Токовая зона реализуется путем размещения в разрезах якоря неподвижных контактных элементов. На рис.6 показана принципиальная схема преобразователя с квазистационарным якорем и распределение градиента взаимной индуктивности между индуктором и токовой зоной якоря. На этом рисунке обозначены: 1 - индуктор; 2 - якорь высотой H_2 ; 3 - разрезы в якоря; 4 - неподвижные контактные элементы; 5 - диэлектрический бандаж; I - центральная плоскость индуктора; II - центральная плоскость токовой зоны якоря; H_2^* - длина токовой зоны якоря.

Данная концепция преобразователя с квазистационарным якорем, реализующая улучшенные про-

странственно-временные характеристики, несмотря на определенное усложнение конструкции по сравнению с традиционным вариантом ЛЭПВД с массивным якорем, обеспечивает надежное перемещение якоря относительно индуктора при малом зазоре между ними и позволяет существенно повысить скоростные, силовые и энергетические показатели. Как показывают исследования, за счет применения квазистационарного якоря удается повысить механические показатели преобразователя на 40...80 %, а параметр эффективности η_f - в 1,5...2,4 раза.

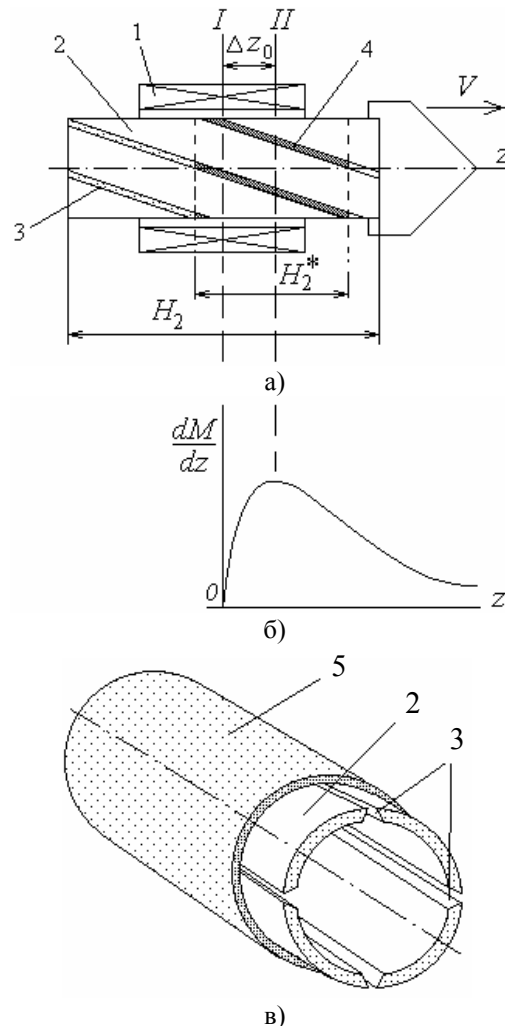


Рис.6. Принципиальная схема ЭИПВД с квазистационарным якорем (а), распределение градиента взаимной индуктивности (б) и конструкция якоря (в)

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ФОРСИРУЮЩЕЙ ОБМОТКОЙ

Введение в магнитную цепь преобразователя неподвижной форсирующей обмотки (ФО) позволяет существенно влиять на его эффективность [9]. Так, на рис.7 показано влияние расположения ФО относительно индуктора на относительную эффективность η_f^* коаксиального ЛЭПВД (в качестве базового используется преобразователь без ФО), где обозначены: 1 - индуктор; 2 - ускоряемый якорь; 3 - ФО; 4 - ИЭ.

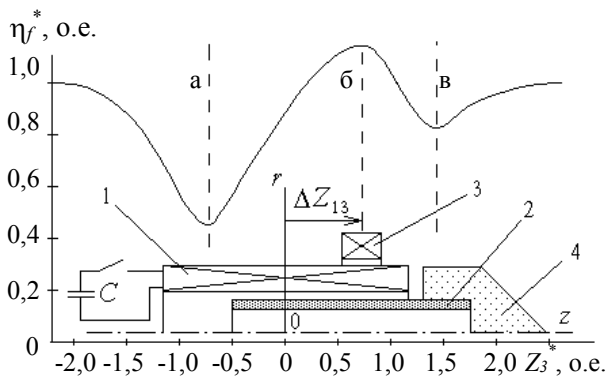


Рис.7. Схема и относительная эффективность коаксиального ЛЭПИД

Как показывают расчеты, наименьшее ускорение якоря с ИЭ обеспечивается при осевом смещении ФО $Z_3^* = 2 \cdot \Delta Z_{13} / (H_1 + H_3) = -0,33$ (положение *a* на рис.7). При этом амплитуда токов в индукторе и якоре повышается, соответственно на 27% и 15%, а длительность периода колебаний уменьшается почти на треть. Воздействие ФО можно объяснить тем, что полярность токи в этой обмотке и якоре имеют одинаковую полярность при незначительном фазовом сдвиге, а ФО расположена против направления движения якоря, то между ними возникает сила, тормозящая якорь.

Если ФО сместить вперед по ходу движения якоря на величину $Z_3^* = 0,66$ (положение *б* на рис.7), то эффективность преобразователя повышается на 8,5% по сравнению с базовым вариантом. При этом величина первого пика аксиальной силы $f_z(t)$ увеличивается на 7%, а второго пика - на 13%. Такое воздействие ФО можно объяснить тем, что полярность токов обмоток в начале переходного процесса одинакова, т.е. между ними действует сила притяжения f_{z23} . Но так как ФО смещена относительно центральной плоскости якоря в сторону движения, то обеспечивается дополнительное его ускорение.

Если ФО переместить вперед на расстояние $Z_3^* = 1,29$ (положение *в* на рис.7), где проявляется локальный минимум эффективности ЛЭПИД, то здесь происходит изменение полярности тока ФО на противоположное. Данный факт можно объяснить тем, что здесь образуется более сильная магнитная связь ФО с якром, чем с индуктором, а значит и индукционное воздействие якоря является превалирующим. Но так как токи обмоток находятся в противофазе, т.е. между ними действует сила отталкивания, а ФО находится впереди по ходу движения якоря, то она создает тормозную силу f_{z23} . Дальнейшее перемещение ФО вдоль оси *z* снижает магнитное взаимодействие ее с остальными обмотками, что приводит к ослаблению тормозного воздействия. Таким образом, за счет расположения ФО относительно индуктора можно обеспечить дополнительное ускорение, либо торможение якоря.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Ферромагнитный сердечник вызывает изменение скоростных, силовых и энергетических показателей

ЛЭПИД за счет перераспределения магнитного поля в активной зоне. На рис.8 схематично показан коаксиальный преобразователь с сердечником и распределение векторов индукции магнитного поля ($B_m = 4,23$ Т) в момент максимума тока индуктора. Так, амплитуда тока возбуждения снижается на 16 %, а его длительность повышается на такую же величину по сравнению с аналогичной немагнитной конструкцией, в результате чего амплитуда ЭДУ возрастает на 25 %, а скорость - на 35 %. При этом нагрев индуктора несколько снижается, а якоря - повышается.

Введение сердечника в магнитную систему позволяют повысить ряд электромеханических показателей "теплого" ЛЭПИД, хотя их влияние не столь значительно из-за насыщения; при этом все удельные показатели преобразователя ухудшаются. При использовании криогенного охлаждения влияние сердечника будет еще менее существенным из-за возрастания токов в обмотках и общего уровня магнитных полей в активной зоне устройства. Если же учесть затраты хладагента на охлаждение ферромагнетика, усложнение конструкции криостата, увеличение веса и др., можно сделать вывод о нецелесообразности применения сердечников в магнитной системе легких и высокоэффективных криогенных преобразователей.

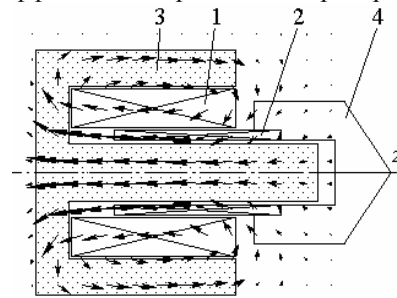


Рис.8. Распределение векторов индукции ЛЭПИД: 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – сердечник; 4 - ИЭ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С НАРУЖНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЭКРАНОМ

Традиционные ЛЭПИД не содержат специальных устройств снижения внешних магнитных полей, вследствие чего возникает проблема электромагнитной совместимости. Оценим влияние наружного электромагнитного экрана (НЭЭ) с учетом, как внешнего магнитного поля, так и основных рабочих показателей криогенного преобразователя коаксиальной конфигурации. В общем случае НЭЭ может содержать заднюю *3a* и переднюю *3b* дисковые части и соединяющую их центральную цилиндрическую часть *3* (рис.9). Исходя из размеров криостата, расположим заднюю дисковую часть экрана *3a* на расстоянии $\Delta z_1 = 0,25H_1$, а его внешний диаметр выполним, равным $D_{ex3} = 1,25D_{ex1}$.

НЭЭ существенно перераспределяет магнитное поле как в активной зоне ЛЭПИД, так и в окружающем пространстве. Помимо перераспределения магнитного поля, экран изменяет характеристики преобразователя (рис.10).

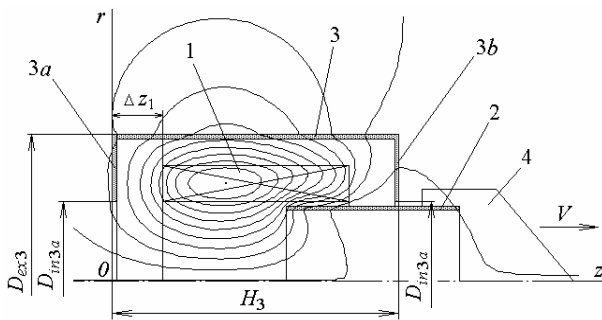


Рис.9. Распределение силовых линий магнитного поля при максимуме силы f_z в ЛЭПИД:
1 – индуктор; 2 – яркорь; 3 – НЭЭ; 4 – ИЭ

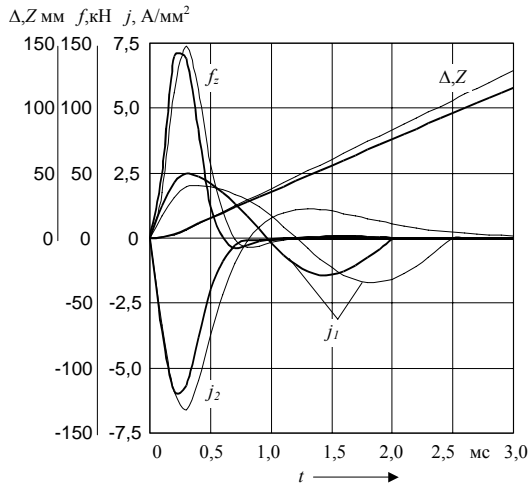


Рис.10. Электромеханические характеристики незранированного (тонкие линии) и экранированного (жирные линии) ЛЭПИД

За счет появления НЭЭ происходит укорочение рабочего импульса тока возбуждения (представленного в виде плотности тока в индукторе j_1) с одновременным увеличением его амплитуды в первом полупериоде и уменьшением - во втором. Величина усредненной плотности тока в яркоре j_2 снижается, и ток затухает сильнее. Аналогичный характер оказывает экран на электродинамическую силу f_z , вызывая понижение основных механических показателей: скорости V и перемещения ΔZ яркора с ИЭ. В результате изменения токов за счет наличия НЭЭ уменьшается величина усредненного превышения температуры в индукторе θ_1 и яркоре θ_2 , особенно сильно в последнем. При этом наблюдается существенный прирост температуры экрана θ_3 , находящегося при температуре окружающей среды.

Наружный экран приводит к уменьшению скорости яркора – до 11 %, увеличению амплитуды тока возбуждения – до 22 %, понижению превышений температуры индуктора – до 19 % и яркора – до 41 %. При этом магнитное поле в ближней зоне (на расстоянии $r = 2D_{ex1}$) понижается – до 60 %, а в дальней зоне (на расстоянии $r = 2D_{ex1}$) – до 64 %.

Для оценки эффективности ЭИПИТ введем комплексный критерий, который учитывает как его рабочие показатели, так и возбуждаемое при этом магнитное поле в окружающем пространстве

$$K_e^* = \eta_f^* / B_{cp}^*$$

где B_{cp} – усредненное магнитное поле в окружающем пространстве:

$$-0,75H_1 \leq z \leq 2,25H_1; 2D_{ex1} \leq r \leq 4D_{ex1}$$

в момент максимума электродинамического воздействия на ускоряемый яркорь.

Наибольшую эффективность ($K_e^* \approx 2,1$) проявляет преобразователь с конфигурацией НЭЭ, представленной на рис.9. Заметим, что у незранированного ЛЭПИТ данный показатель составляет $K_e^* = 1,0$. Таким образом, за счет оптимальной конфигурации НЭЭ более, чем в 2 раза повышается комплексный критерий эффективности преобразователя.

МНОГОСЕКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Широкие возможности по повышению эффективности открывает преобразователь с многосекционным индуктором, у которого последовательное возбуждение секций осуществляется по мере перемещения яркора с ИЭ [10]. На рис.11,а представлен трехсекционный ЛЭПИД, индуктор и яркорь которого имеют независимое охлаждение. Секции 1, 2, 3 индуктора расположены в немагнитном криостате 4 с жидким азотом 5 и закреплены между собой при помощи перфорированных опорных элементов 6. Яркорь 7 соединен с ИЭ 8 и охлаждается азотом, находящимся в специальной опорной перфорированной полости 9. Секции индуктора по направлению движения установлены с зазорами, величины которых h_1 и h_2 выбираются в зависимости от параметров преобразователя. Начальное центрирование яркора осуществляется при помощи направляющего элемента 10, прикрепленного к массивному упору 11. До начала работы внутреннее отверстие для яркора на выходе криостата 4 закрывается теплоизоляционной вставкой 12.

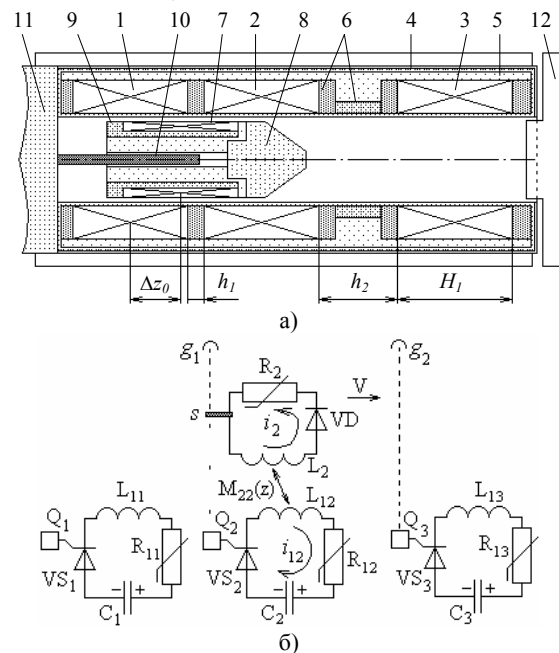


Рис.11. Конструктивная (а) и электрическая (б) схемы криогенного ЛЭПИД с последовательным возбуждением секций индуктора

На рис.11,6 показана принципиальная электрическая схема этого преобразователя, где обозначены: R_{1p}, L_{1p} - сопротивление и индуктивность p -ой секции индуктора; R_2, L_2 - сопротивление и индуктивность якоря, перемещаемой со скоростью V ; VS_p - тиристор с блоком управления Q_p , обеспечивающий возбуждение секций индуктора от секции емкостного накопителя C_p ; VD - диод, обеспечивающий полярность импульса индуцированного тока в якоре.

После подачи импульса на первый блок управления Q_1 тиристора VS_1 за счет электродинамического взаимодействия между магнитным полем первой секции индуктора и индуцированным током в якоре осуществляется перемещение якоря вместе с ИЭ. Возбуждение последующих секций осуществляется автоматически при помощи оптоэлектронной системы, содержащей неподвижные, направленные на датчики блоков управления $Q_{2,3}$, источники света $g_{1,2}$, закрываемые светозащитной шторкой s , которая соединена с ускоряемым якорем. Коммутация каждой последующей секции осу-

ществляется после прекращения тока в предыдущей.

Как показывают расчеты, рассредоточенный и последовательный подвод энергии к секциям индуктора обеспечивает повышение его выходной скорости на 45...55 % при комнатной и на 25...30 % при азотной температурах, увеличение КПД, соответственно, более, чем в 2,2 и 1,6 раза по сравнению с сосредоточенным и одномоментным подводом энергии, что происходит в односекционном ЛЭПИД. В многосекционной обмотке индуктора динамические нагрузки рассредоточиваются, что способствует повышению ее надежности, а суммарные потери снижаются на 30...40 % по сравнению односекционным вариантом.

Таким образом, за счет совокупности конструктивных усовершенствований, криогенного охлаждения жидким азотом, синтезом оптимальных параметров и конфигураций активных элементов и применением многосекционных конструкций можно существенно повысить эффективность линейного электромеханического преобразователя импульсного действия.

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ

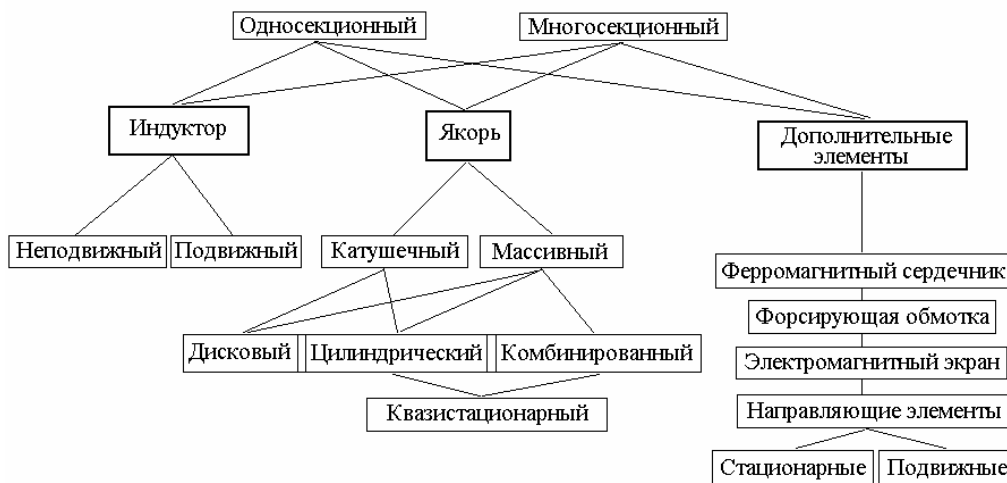


Рис.12. Классификация конструкций ЛЭПИД

На основе проведенных исследований и обобщений предлагается классификация ЛЭПИД по конструктивным признакам (рис.12).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тюткин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. - 2002. - № 11. - С. 24-28.
- [2] A. Balıkcı, Z. Zabar, L. Birenbaum et al., "Improved performance of linear induction launchers", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 41, № 1, pp. 171-175, 2005.
- [3] Mayer D., Ulrych B., Skopek M. et al., Dynamic characteristics of non-ferromagnetic pulse electromechanical accelerator // Техн. электродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. - 2000. - Ч. 9. - С. 18-23.
- [4] B.M. Novac, P. Senior, I.R. Smith et al., "Studies of a very high efficiency cryogenic launcher", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, № 1, pp. 123-128, 2001.
- [5] Болюх В.Ф. Эффективность электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа. Критерии и анализ // Электротехніка і електромеханіка. - 2004. - № 3. - С. 13-18.
- [6] L.I. Lysenko, V.I. Omelyanenko, S.A. Sergeev, "Parallel genetic algorithm and its application to linear synchronous motor optimization", *Inter. Journal Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 9, № 3, pp. 303-314, 1998.
- [7] Голоскоков Е.Г., Северин В.П. Модификация метода деформируемого многогранника для оптимизации иерархической последовательности критериев // Техн. кибернетика и ее приложения. - Харьков: Выща школа. - 1986. - С. 27-30.
- [8] Болюх В.Ф. Переходные процессы в электромагнитной системе возбуждения с криорезистивными нелинейностями и магнитными связями // Известия РАН. Энергетика. - 2001. - № 5. - С. 103-113.
- [9] Болюх В.Ф. Влияние короткозамкнутой катушки на работу линейного импульсно-индукционного криогенного двигателя // Изв. вузов. Электромеханика. - 2000. - № 2. - С. 45-53.
- [10] S. Barmada, A. Musolino, M. Raugi et al., "Analysis of performance of a multi-stage pulsed linear induction launcher", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, № 1, pp. 111-115, 2001.

Поступила 25.02.2006