

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Болюх В.Ф., Щукин И.С.

Введение

Электромеханические индукционные преобразователи ударного действия (ЭИПУД) находят применение во многих отраслях науки, техники и технологии. Они используются для очистки технологического оборудования, бункеров и танкеров от остатков сыпучих грузов, испытаний ответственных изделий и устройств на ударные воздействия, обработки и формовки металлических конструкций, применяются в горнодобывающей промышленности и геологоразведке, в машиностроении при магнитно-импульсной сварке, штамповке, перфорации и иных операциях [1-5].

Во многих технических системах ЭИПУД должен обеспечивать непрерывную последовательность силовых импульсов с заданной частотой [6-8]. В таком преобразователе в каждом рабочем цикле реализуется кратковременный период нагрузки, при которой в активных элементах (индуктор и якорь) возбуждаются интенсивные токовые импульсы, и совершается механическая работа, и продолжительная пауза. Хотя такой режим напоминает повторно-кратковременный с малой ПВ для традиционных электрических машин, он обладает существенными особенностями [9]. Импульсная нагрузка столь непродолжительна, что нарастание температуры в активных элементах в период нагрузки происходит практически в адиабатических условиях. При циклическом режиме работы подлежат исследованию:

- превышения температур активных элементов, выдерживающих заданный цикл силовых импульсов;

- пауза, в течение которой активные части охлаждаются до наперед заданного состояния;
- допустимое число циклов при заданной частоте следования импульсов и интенсивности охлаждения.

В ЭИПУД при прямом ходе неподвижный индуктор, возбуждаемый от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), посредством импульсного магнитного поля индуцирует токи в электропроводящем якоре, который под действием электродинамических сил обеспечивает стремительное перемещение ударного элемента, оказывающего импульсное силовое воздействие на объект деформирования. При обратном ходе, осуществляемом, например, возвратной пружиной, якорь возвращается в первоначальное положение в зону максимальной магнитной связи с индуктором, после чего следует пауза, во время которой осуществляется заряд ЕНЭ для последующего рабочего цикла. Таким образом, в рассматриваемых преобразователях с возвратно-поступательным движением протекают сложные пространственно-временные, зависящие друг от друга импульсные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы [10, 11].

Поскольку импульсные токовые нагрузки в ЭИПУД многократно превышают аналогичные показатели электромеханических устройств продолжительного действия, то в циклическом режиме работы особую роль приобретают тепловые процессы, которые в значительной степени обуславливают мощность, условия и время работы преобразователя. В свою очередь, тепловое состояние ЭИПУД существенно зависит от:

- параметров и конструктивного выполнения индуктора, якоря и ЕНЭ;
- формы тока обмотки индуктора, определяемой электронной схемой возбуждения;
- частоты (периода) следования импульсов;
- характера движения якоря;
- интенсивности охлаждения активных элементов и т.д.

Однако до настоящего времени указанные тепловые процессы практически не исследованы, что можно объяснить сложным и взаимосвязанным характером процессов различной физической природы, которые, к тому же, зависят от конкретного конструктивного выполнения, назначения и условий работы ЭИПУД.

Целью статьи является установление особенностей тепловых процессов и основных факторов, оказывающих влияние на тепловое состояние активных элементов ЭИПУД в циклическом режиме работы.

Конструктивное выполнение ЭИПУД

В качестве объекта исследования выбран ЭИПУД дисковой конфигурации с естественным воздушным охлаждением и схемой возбуждения индуктора, обеспечивающей серию однополярных апериодических импульсов (с резким начальным фронтом и последующим плавным затуханием), что позволяет использовать для ЕНЭ электролитические конденсаторы с высокими удельными параметрами [12].

ЭИПУД содержит неподвижный индуктор с двухслойной обмоткой дисковой формы, которая намотана прямоугольной медной шиной, замонтирована эпоксидной смолой и уложена либо в толстостенный изоляционный (стеклотекстолитовый), либо в тонкостенный стальной каркас [13] (рис.1). Коаксиально с индуктором установлен медный дисковый якорь, который соединен с силовой пластиной, обеспечивающей перемещение бойка в сторону объекта деформирования. К силовой пластине присоединена возвратная пружина, обеспечивающая плотное прижатие якоря к индуктору до и после силового импульса. Основные параметры исследуемого ЭИПУД представлены в таблице.

Математическая модель ЭИПУД

Математическая модель ЭИПУД при прямом ходе рабочего цикла учитывает изменяемую магнитную связь между якорем и обмоткой индук-

тора, возбуждаемой от ЕНЭ, неравномерность распределения индуцированного тока в дисковом якоре, изменение сопротивления обмотки индуктора и якоря из-за нагрева импульсным током, и комплекс сил, действующих на якорь.

Для учета распределения тока якорь представляется совокупностью элементарных короткозамкнутых контуров, упорядоченно распределенных по поверхности диска, а многовитковый индуктор – первичным контуром, подсоединенным к ЕНЭ. В таком случае электрические процессы в ЭИПУД, индуктор которого шунтирован обратным диодом электронной схемы возбуждения, можно описать системой дифференциальных уравнений [12]:

$$\begin{aligned}
 & R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \frac{di_k}{dt} + V(t) \times; \\
 & \quad \times \left(i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0, \quad t \in (0, t^*); \\
 & [R_0(T_0) + R_d] i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \frac{di_k}{dt} + V(t) \times; \\
 & \quad \times \left(i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = 0, \quad t \in (t^*, \infty); \tag{1} \\
 & R_1(T_1) \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} + V(t) \times \\
 & \quad \times \left(i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0; \\
 & \dots\dots\dots \\
 & R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \times \\
 & \quad \times \left(i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,
 \end{aligned}$$

где i_0, L_0, R_0 – ток, индуктивность и сопротивление обмотки индуктора соответственно; i_k, L_k, R_k – ток, индуктивность и сопротивление элементарно-

го короткозамкнутого k -го контура якоря, перемещающегося со скоростью $V(t)$ вдоль оси z относительно индуктора соответственно; M_{kp} – взаимоиндуктивность между соответствующими токовыми контурами ($k \neq p$); T_k – температура k -го токового контура; C , U_0 – емкость и зарядное напряжение ЕНЭ соответственно; t^* – время, при котором напряжение ЕНЭ достигает значения $u_c=0$; R_d – прямое сопротивление обратного диода, шунтирующего индуктор.

При прямом ходе рабочего цикла аксиальное перемещение якоря ΔZ с исполнительным элементом, представляющим собой силовую пластину с бойком, возникает под действием импульса электродинамической силы:

$$FI = \int_0^t f_z(t, z) dt, \quad (2)$$

где $f_z(t, z) = i_0(t) \cdot \sum_{k=1}^K i_k(t) \frac{dM_{0k}}{dz}(z)$ – мгновенное значение силы.

Скорость якоря с исполнительным элементом удобно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - K_p \cdot \Delta Z(t_n) - K_T \cdot V(t_n) - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 V^2(t_n), \quad (3)$$

где m_1 , m_2 – масса якоря и исполнительного элемента соответственно; K_p – коэффициент упругости возвратной пружины; K_T – коэффициент динамического сопротивления; γ_a – плотность воздуха; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления; D_{2m} – наружный диаметр силовой пластины.

Для определения температуры обмотки индуктора и якоря ЭИПУД, имеющего осевую симметрию, используется схемно-полевая модель [14]. Полевая модель в полярной системе координат $\{r, z, \varphi\}$ позволяет на каждом временном шаге учесть пространственное распределение температур в активных и пассивных элементах ЭИПУД [15]:

$$c_n(T) \cdot \gamma_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \lambda_n(T) \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_n}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right) + j_n^2(t) \cdot k_z \cdot \rho_n(T), \quad (4)$$

$$c_m(T) \cdot \gamma_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m(T) \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

где $n=1,2$ – индексы обмотки индуктора и якоря соответственно; $m = 3,4$ – индексы каркаса и силовой пластины соответственно; $c(T)$ – усредненная удельная теплоемкость; γ – усредненная плотность материала; $j(t)$ – плотность тока активного элемента; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности; k_z – коэффициент заполнения индуктора; $\rho(T)$ – удельное сопротивление активного элемента.

Эта система уравнений дополняется граничными условиями на поверхностях ξ . На охлаждаемых поверхностях используются граничные условия третьего рода, описывающие процесс теплоотдачи:

$$-\frac{\partial T_\xi}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_\xi - T_0), \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; n – нормаль к поверхности.

На границе контакта индуктора с каркасом и якоря с силовой пластиной – граничные условия четвертого рода:

$$T_n(r_\xi, z_\xi, t) = T_m(r_\xi, z_\xi, t); \quad \lambda_n \frac{\partial T_{n\xi}}{\partial n} = \lambda_m \frac{\partial T_{m\xi}}{\partial n}. \quad (7)$$

На оси симметрии ЭИПУД – граничное условие второго рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_\xi = 0. \quad (8)$$

Для описания переходных процессов целесообразно использовать так называемую схемную модель [14, 16], построенную на основе эквивалентных схем замещения, в которой основные параметры определяются из полевой модели путем усреднения по сечению. В схемной модели температуры n -ых активных элементов при наличии теплового контакта между

ними через изоляционную прокладку (пассивный элемент), можно описать рекуррентным соотношением [11]:

$$\begin{aligned}
 T_n(t_{k+1}) = & T_n(t_k) \cdot \exp \left[\frac{-\Delta t}{c_n(T_n) \gamma_n H_n} \left(\frac{P_n \alpha_{T_n}(V)}{\pi(D_{ex}^2 - D_{in}^2)} + \frac{\lambda_{\dot{e}}(T)}{d_a + \Delta Z} \right) \right] + \\
 & + \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\Delta t}{c_n(T_n) \gamma_n H_n} \left(\frac{P_n \alpha_{T_n}(V)}{\pi(D_{ex}^2 - D_{in}^2)} + \frac{\lambda_{\dot{e}}(T)}{d_a + \Delta Z} \right) \right] \right\} \times \\
 & \times \frac{i_n^2(t_k) R_n(T_n) + T_0 P_n \alpha_{T_n}(V) + T_r(t_k) \zeta}{\alpha_{T_n}(V) F_{an} + \zeta}, \tag{9}
 \end{aligned}$$

где $\zeta = \pi \lambda_{\dot{e}}(T) (D_{ex}^2 - D_{in}^2) (d_a + \Delta Z)^{-1}$; $\lambda_{\dot{e}}(T)$ - коэффициент теплопроводности изоляционной прокладки; R_n - сопротивление активного элемента; d_a - толщина прокладки; P_n - площадь поверхности охлаждения активного элемента; D_{ex} , D_{in} - внешний и внутренний диаметры активных элементов соответственно; ΔZ - величина перемещения якоря; V - скорость перемещения якоря; $r = 2, 1$ при $n=1, 2$ соответственно.

Такая схемно-полевая тепловая модель позволяет обеспечить высокую скорость расчета всех основных рабочих процессов ЭИПУД, что важно для исследования различных режимов со значительным числом рабочих циклов. На основании выражений (1) – (9) разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитать электромеханические характеристики и температурные зависимости преобразователя в различных рабочих режимах.

Результаты математического моделирования ЭИПУД

Исследованы три режима работы ЭИПУД, функционирующего при температуре окружающей среды с естественным охлаждением, в которых реализуется кратковременный период нагрузки и продолжительная пауза:

Режим I – «холостой ход», при котором якорь выведен из зоны магнитной и тепловой связи с индуктором;

Режим II – «заторможенный», при котором якорь находится в зоне максимальной магнитной связи с индуктором и между ними имеется тепловая связь;

Режим III – «движение», при котором якорь совершает возвратно поступательное перемещение относительно индуктора.

На рис.2,а представлены результаты расчета плотности тока в индукторе j_1 , усредненной плотности тока по сечению якоря j_2 , превышения температур индуктора θ_1 и якоря θ_2 в период нагрузки рабочего цикла. В режиме I, при котором якорь не имеет ни магнитной, ни тепловой связи с индуктором, рассчитанное значение тока индуктора удовлетворительно совпадает с измеренным значением (рис.2,б), что свидетельствует об адекватности математической модели. Токовый импульс с максимальной величиной плотности тока 165 А/мм^2 обуславливает превышение температуры индуктора на незначительную величину $\theta_1=0,28 \text{ К}$. Поскольку период нагрузки рабочего цикла кратковременен, то превышение температур активных элементов происходит практически в адиабатических условиях и каркас индуктора слабо влияет на тепловое состояние активных элементов преобразователя.

В режиме II, при котором якорь постоянно находится в зоне максимальной магнитной и тепловой связи с индуктором, величина импульса тока в индукторе по сравнению с режимом I возрастает, но в последующем затухает сильнее. Индуцированный импульс тока в якоре вначале резко возрастает до плотности 650 А/мм^2 , но затем быстро затухает с изменением полярности. Такое перераспределение энергии вызывает изменение теплового состояния активных элементов: превышение температуры индуктора уменьшается до $\theta_1=0,17 \text{ К}$, в то время как превышение температуры якоря более существенно и составляет $\theta_2=0,78 \text{ К}$ за 5 мс.

В режиме III, при котором якорь имеет изменяемую магнитную и тепловую связь с индуктором, часть энергии поступает на механическое движение. В результате за 5 мс превышение температуры индуктора со-

ставляет $\theta_1=0,19$ К, в то время как превышение температуры якоря $\theta_2=0,67$ К, что находится между значениями аналогичных параметров в режимах I и II.

В циклическом режиме работы ЭИПУД превышения температур индуктора и якоря начинают существенно возрастать и зависят от частоты следования импульсов, конструкции каркаса и эффективности охлаждения индуктора и/или якоря. Как показывают расчеты с использованием полевой модели, пространственный градиент температур практически отсутствует в якоре и силовой пластине, незначителен в обмотке индуктора при наличии стального каркаса и несколько возрастает в обмотке, уложенной в изоляционный каркас.

На рис.3 представлены превышения температур обмотки индуктора θ_1 и якоря θ_2 при работе в рассматриваемых режимах с периодом следования импульсов $T_f=0,5$ с и естественном охлаждении. Здесь период нагрузки длительностью 15 мс в каждом цикле представлен растянутым по отношению к периоду паузы. При работе в режимах I и II во время периода нагрузки якорь нагревается практически скачком, в то время как обмотка индуктора нагревается плавно. Во время паузы рабочего цикла превышение температуры якоря уменьшается, причем с увеличением количества циклов этот эффект становится более выраженным. Поскольку превышение температуры якоря больше, чем обмотки индуктора, то якорь, передавая часть энергии, несколько увеличивает превышение температуры обмотки индуктора.

В режиме I, при котором якорь выведен из зоны тепловой связи с индуктором, указанный эффект отсутствует. Здесь обмотка индуктора нагревается сильнее, так как вся электрическая энергия ЕНЭ превращается в тепловую, и во время паузы рабочего цикла температура обмотки практически не понижается.

Результаты экспериментальных исследований показали, что на электродинамические характеристики ЭИПУД рассматриваемые каркасы ин-

дуктора не оказывают существенного влияния [13]. Но тонкостенный стальной каркас неподвижного индуктора можно легко охладить с внешней поверхности, например, циркулирующей водой. В зависимости от интенсивности охлаждения стального каркаса индуктора изменяется тепловое состояние не только заторможенного, но и подвижного якоря, поскольку тепловое взаимодействие осуществляется на протяжении продолжительной паузы через тонкую изоляционную прокладку (рис.4).

Превышение температуры якоря θ_2 больше, чем у индуктора θ_1 , но разность между ними практически не зависит от интенсивности охлаждения. При увеличении коэффициента теплоотдачи индуктора α_1 в 4 раза от (от 500 до 2000 Вт/(м²К)) превышение температуры индуктора θ_1 уменьшается в 3,6 раз, а у якоря θ_2 – в 2,2 раза.

Таким образом, путем интенсификации охлаждения неподвижного стального каркаса индуктора, например при помощи воды, можно стабилизировать превышение температур обмотки индуктора и якоря на допустимом уровне. Заметим, что при отсутствии водяного охлаждения превышение температуры обмотки индуктора таково, что при аналогичном рабочем цикле эпоксидная смола, компаундирующая обмотку в каркасе, размягчается, и преобразователь может выйти из строя.

Иным фактором, влияющим на тепловое состояние ЭИПУД в циклическом режиме работы, является частота или период следования импульсов T_f . На рис. 5 в зависимости от периода следования импульсов представлены превышения температур индуктора θ_1 и якоря θ_2 при интенсивном охлаждении первого ($\alpha_1=2000$ Вт·м⁻²К⁻¹) и естественном охлаждении второго ($\alpha_2=20$ Вт·м⁻²К⁻¹), полученные за 150 рабочих циклов. Превышения температур индуктора и якоря практически одинаково уменьшаются с увеличением периода следования импульсов T_f , причем режим работы ЭИПУД не оказывает существенного влияния на данный процесс. При увеличении T_f в 4 раза (с 0,25 до 1,0 с) превышение температуры индуктора θ_1 уменьшается в 3,3 раза, а у якоря θ_2 – в 3,6 раза.

Были проведены экспериментальные исследования электрических, механических [12] и тепловых процессов ЭИПУД. Температура основных элементов (обмотка, каркас, якорь) измерялась термопарой мультиметра M890G (рис.1б). В целом полученные данные удовлетворительно совпадают с расчетными результатами, что свидетельствует о достоверности предложенной математической модели.

Заключение

Показано, что в ЭИПУД, у которого в каждом рабочем цикле реализуется кратковременный период нагрузки со значительными плотностями токов в активных элементах и продолжительная пауза, особое внимание следует уделять тепловым процессам, которые в значительной степени обуславливают мощность, условия и время работы преобразователя.

Разработана математическая модель ЭИПУД, учитывающая изменяемую магнитную связь между якорем и обмоткой индуктора, неравномерность распределения индуцированного тока в якоре, изменение сопротивления обмотки индуктора и якоря из-за нагрева импульсным током и комплекс сил, действующих на якорь.

Исследованы режимы работы ЭИПУД, при которых якорь выведен из зоны магнитной и тепловой связи с индуктором, якорь находится в зоне максимальной магнитной связи с индуктором и между ними имеется тепловая связь и якорь совершает возвратно поступательное перемещение относительно индуктора.

Показано, что путем интенсивного охлаждения стального каркаса обмотки индуктора и увеличением периода следования импульсов можно обеспечить стабилизацию превышений температуры активных элементов при значительном числе рабочих циклов.

Список литературы

1. Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубкис-пробивки тонколистовых материалов // *Металлообработка*. – 2001. – №2. – С. 28–32.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
3. Kaye Ronald J. Operational requirements and issues for coilgun electromagnetic launchers // *IEEE Transactions on Magnetics*. - 2005. – Vol. 41, № 1. – P.194 – 199.
4. Стрижаков Е.Л., Хахин Н.А., Бацемакин Д.С. Автоматизированная установка для магнитно-импульсной сварки // *Автоматическая сварка*. – 2004. – № 2. – С. 53-55.
5. Глушечков В.А., Юсупов Р.Ю. Технологические установки нового поколения для магнитно-импульсной обработки материалов. – В сб.: *Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования и образование*. – С-Петербург: СПГПУ. – 2007. – Т.9. – С.138-139.
6. 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.
7. Татмышевский К.В., Марычев С.Н., Козлов С.А. Магнитно-импульсные метательные средства поражения для систем активной защиты объектов особой важности // *Современные технологии безопасности*. – 2005. – №4. – С.8-11.
8. Татмышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2005. – №12. – С. 52–57.

9. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. - № 2. – С. 9-14.
10. Bolyukh V.F. Electrodynamics processes in the linear impulse-induction motor with the mobile cryoresistive exciting winding // *Nuclear Fusion and Plasma Physics*. – 1998. - Vol. 18, № 4 - P. 3-10.
11. Болух В.Ф. Исследование индукционно-динамического двигателя // *Электротехника*. - 2000. - № 10. - С. 28-35.
12. Болух В.Ф., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукин И.С. Высокоэффективный электромеханический преобразователь ударного действия // *Электротехника*. – 2011. - № 2. – С. 46-53.
13. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Рассоха М.А., Щукин И.С. Экспериментальные и теоретические исследования ударного электромеханического преобразователя индукционного типа с различными индукторами // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. - № 5. – С. 17-24.
14. Птах Г.К. Методологические аспекты разработки компьютерных моделей электромеханических преобразователей // *Известия вузов. Электромеханика*. 2003. - № 1. – С. 7-11.
15. Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. – Л.: Энергия, 1974. – 384.
16. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.

Параметры ЭИПУД

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр обмотки индуктора, мм	D_{ex1}	100
Внутренний диаметр обмотки индуктора, мм	D_{in1}	10
Высота обмотки индуктора, мм	h_1	10
Внешний диаметр якоря, мм	D_{ex2}	100
Внутренний диаметр якоря, мм	D_{in2}	6
Высота якоря, мм	h_2	2
Толщина изоляции между обмоткой индуктора и якорем, мм	ΔZ_0	1
Число витков обмотки индуктора, шт	w_1	42
Сечение витка обмотки индуктора, мм ²	$a \times b$	1,8×4,8
Коэффициент упругости возвратной пружины, кН/м	K_p	7,5
Масса силовой пластины с бойком, кг	m_2	0,35
Емкость ЕНЭ, мкФ	C	1500
Зарядное напряжение ЕНЭ, В	U_0	310

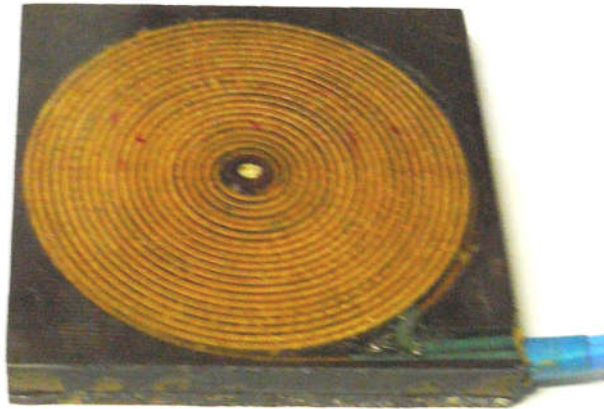
Подрисуночные подписи

к статье

Болюх В.Ф., Щукин И.С.

**ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ
В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ**

- Рис.1** - Индуктор с обмоткой, уложенной в изоляционный (а) и тонкостенный металлический (б) каркас.
- Рис.2** - Рассчитанные плотности тока и превышения температур обмотки индуктора и якоря в режимах I, II и III (а) и измеренный ток обмотки в режиме I (б) за один рабочий цикл.
- Рис.3** - Превышения температур обмотки индуктора θ_1 и якоря θ_2 при работе с периодом следования импульсов $T_f=0,5$ с за 4 рабочих цикла при $\alpha_1=\alpha_2=20$ Вт/(м²К)
- Рис.4** - Превышения температур обмотки индуктора θ_1 и якоря θ_2 при работе в режиме II с периодом следования импульсов $T_f=0,5$ с при $\alpha_2=20$ Вт/(м²К) и α_1 , Вт/(м²К): 1 – 500; 2 – 1000; 3 – 1500; 4 – 2000.
- Рис.5** - Превышения температур обмотки индуктора θ_1 и якоря θ_2 за 150 рабочих циклов в зависимости от периода следования импульсов T_f .

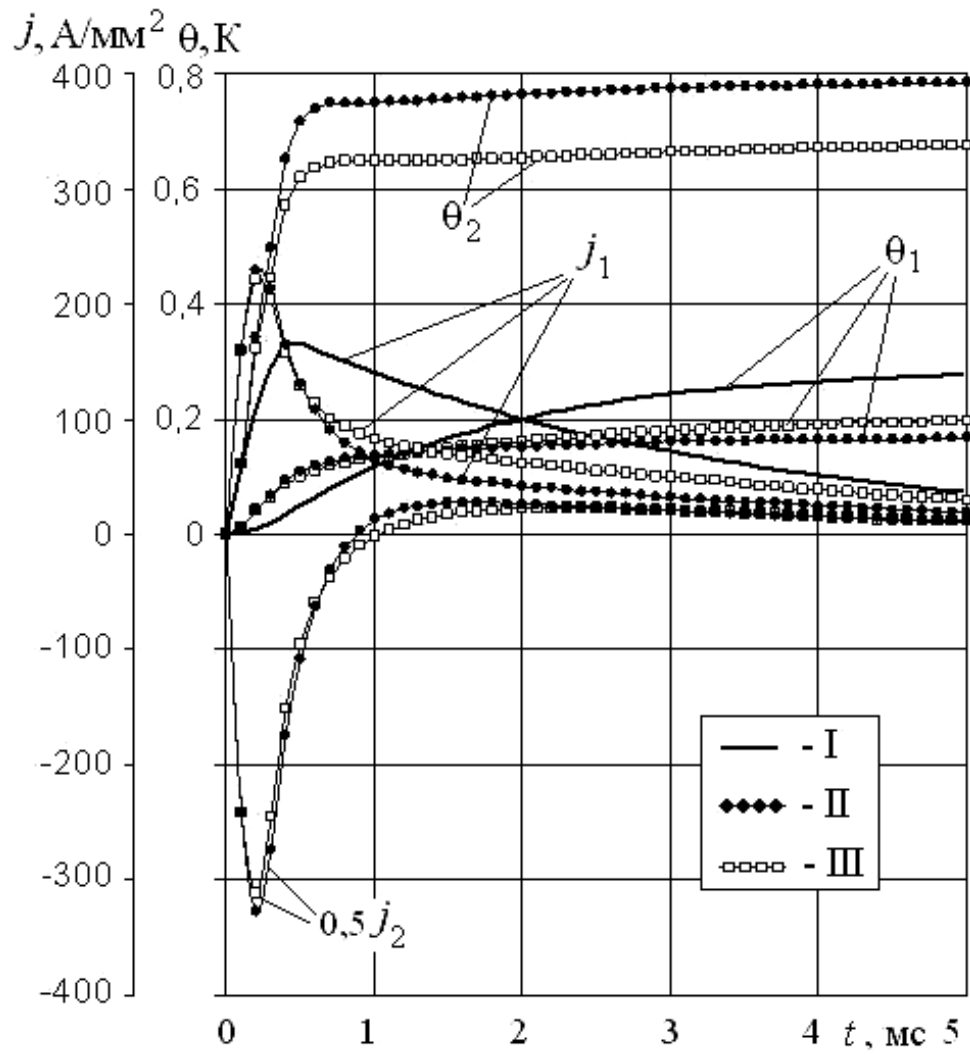


а)

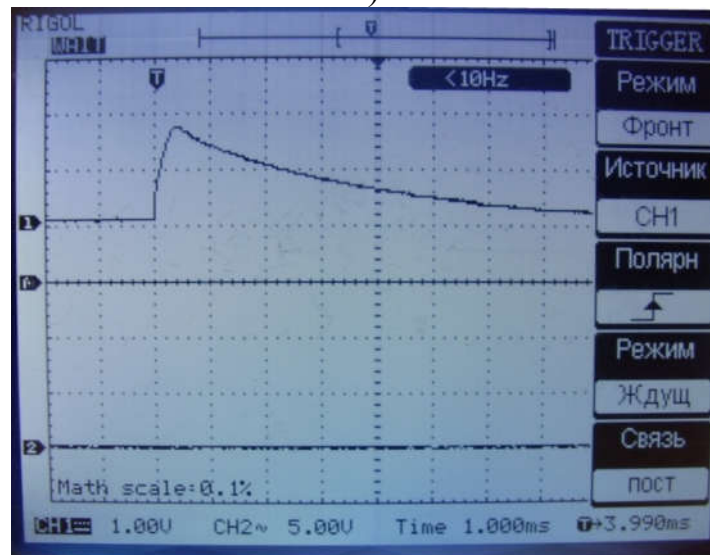


б)

Рис.1



а)



б)

Рис.2

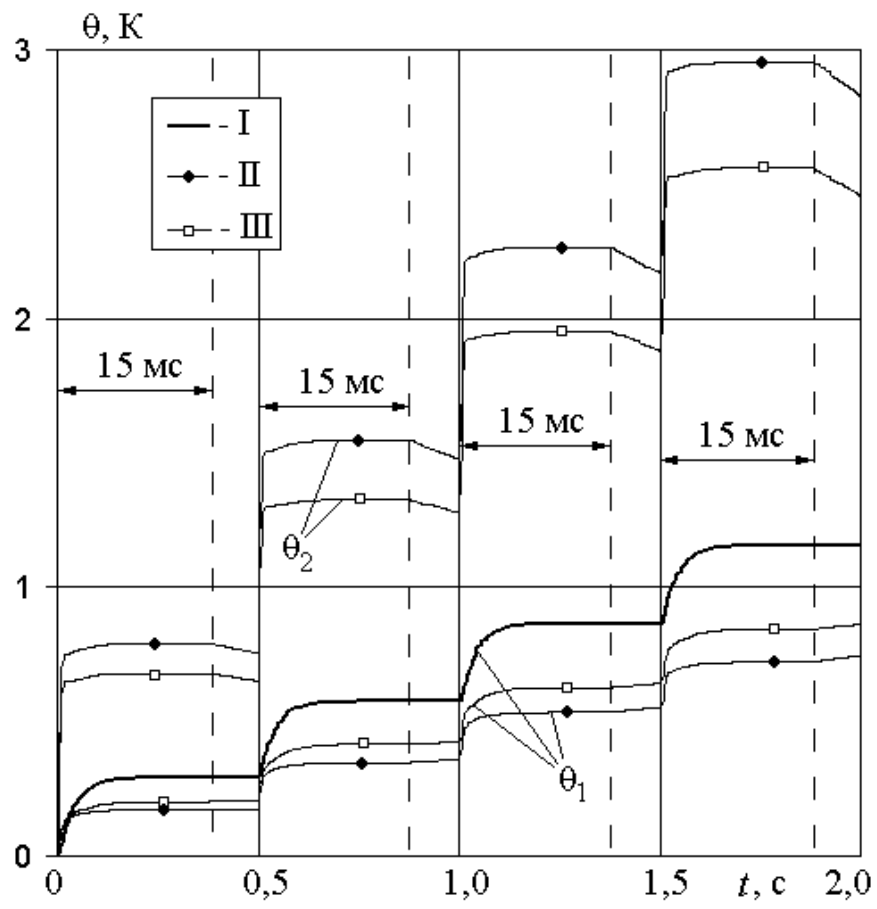


Рис.3

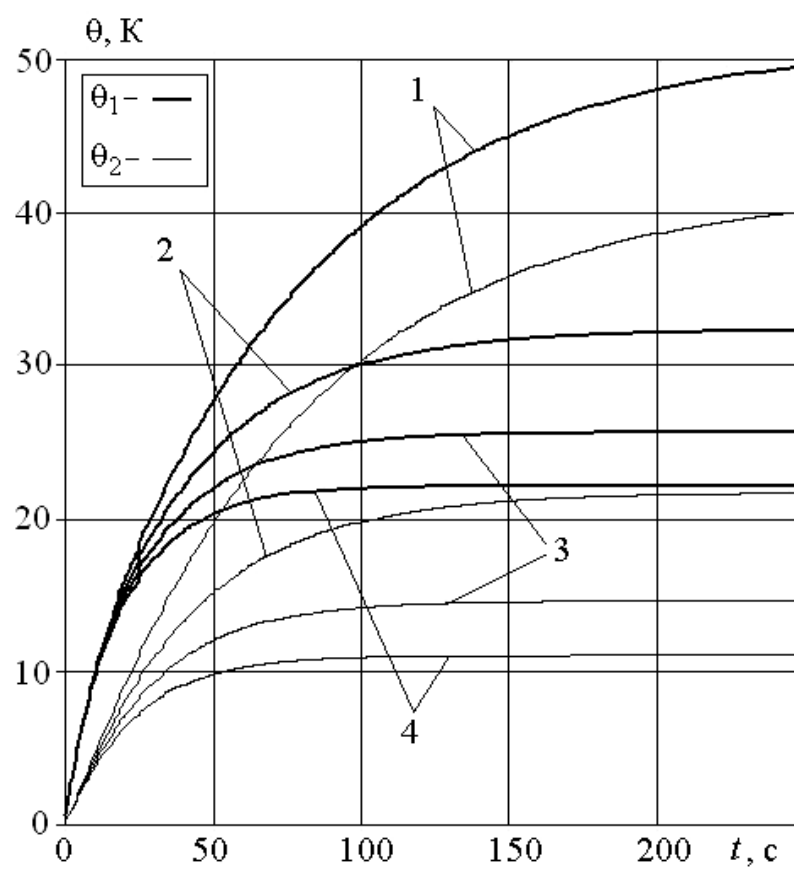


Рис. 4

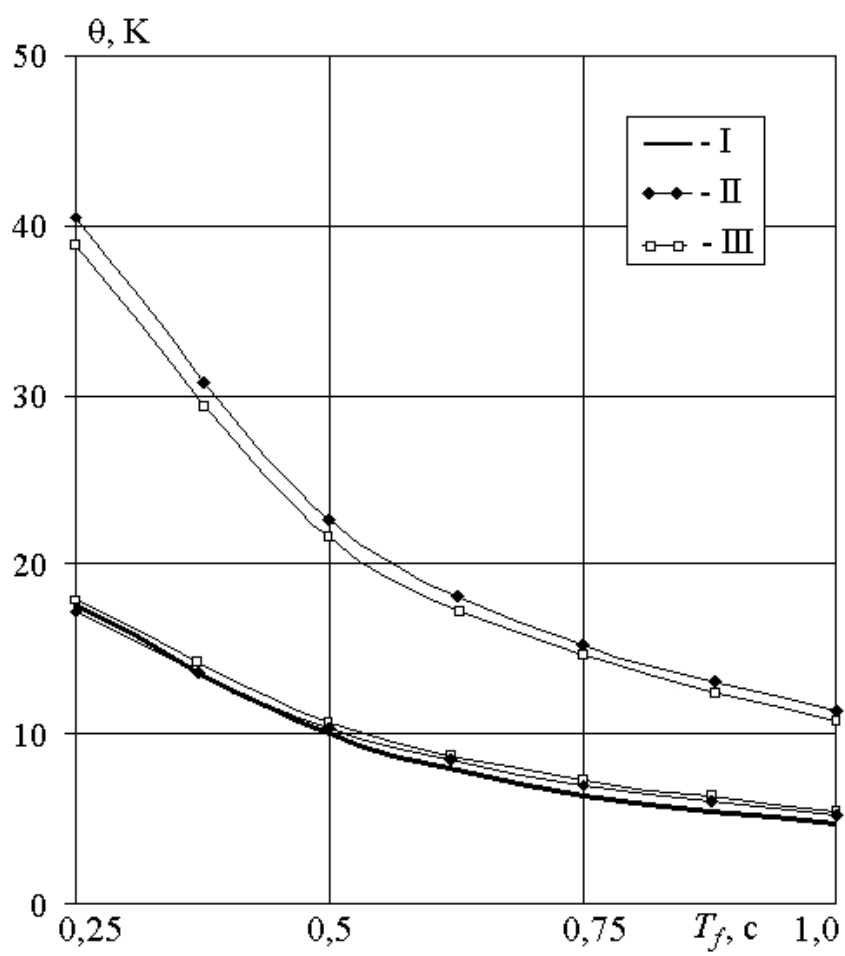


Рис.5

АННОТАЦИЯ

к статье

Болюх В.Ф., Щукин И.С.

**ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ
В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ**

Показано, что в электромеханическом индукционном преобразователе ударного действия, обеспечивающего последовательность силовых импульсов, у которого в каждом рабочем цикле реализуется кратковременный период нагрузки и продолжительная пауза, особое внимание следует уделять тепловым процессам, которые в значительной степени обуславливают мощность, условия и время работы преобразователя. Разработана математическая модель и исследованы режимы работы преобразователя. Показано, что путем интенсивного охлаждения стального каркаса обмотки индуктора и увеличением периода следования импульсов можно обеспечить стабилизацию превышений температуры активных элементов при значительном числе рабочих циклов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромеханический индукционный преобразователь ударного действия, циклический режим, тепловые процессы.

Abstract

Bolyukh V.F., Shchukin I.S.

**THERMAL STATE OF
ELECTRO-MECHANICAL INDUCTIVE PERCUSSION
TRANSFORMER
DURING CYCLIC OPERATION MODE**

It is shown that in the electro-mechanical inductive percussion transformer which providing a power pulse sequence and where each working cycle the short period of load and a long pause are realized, thermal processes take on special significance which largely cause the power, the operating conditions and working time of the transformer. The mathematic model is elaborated and operation modes of the transformer are investigated. It is shown that by intensive cooling of steel carcass of the inductor coil and increase the period of pulse succession can stabilize the temperature rise of active elements with a considerable number of working pulses.

Keys: electro-mechanical inductive percussion transformer, cyclic operation mode, thermal process.

Сведения об авторах статьи

Болюх В.Ф., Щукин И.С.

**ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ
В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ**

БОЛЮХ Владимир Федорович – профессор кафедры общей электротехники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ»), бывший Харьковский политехнический институт (ХПИ). Ученая степень - доктор технических наук. Ученое звание - профессор. Окончил физико-технический факультет ХПИ по специальности «Криогенная техника» в 1979 г.

Защитил докторскую диссертацию в НТУ «ХПИ» на тему «Научно-технические основы создания электромеханических импульсных преобразователей индукционного типа с криорезистивными обмотками» в 2003 г.

Дом. адрес: 61120, Украина, г. Харьков-120, ул. Гвардейцев Широнинцев, 18-Г, кв. 82. Дом. тел. (0572) 63-76-19; Раб. тел. (057) 707-64-27;

E-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua
vfboiyukh@gmail.com

ЩУКИН Игорь Сергеевич – доцент кафедры электрических машин НТУ «ХПИ». Ученая степень - кандидат технических наук. Ученое звание – доцент. Окончил физико-технический факультет ХПИ по специальности «Инженерная электрофизика» в 1984 г. Защитил кандидатскую диссертацию в ХПИ на тему «Моделирование и исследование тепловых процессов в двигателях постоянного тока для привода механизма подачи угольных комбайнов при детерминированных и случайных режимах работы» в 1990.

Дом. адрес: 61136, Украина, г. Харьков-136, ул. Командарма Уборевича, 30-В, кв. 147.

Раб. тел. (057) 720-22-13; (057) 714-09-43

E-mail: tech@tetra.kharkiv.com

Просьба переписку по статье вести по адресу:

61120, Украина, г. Харьков-120, ул. Гвардейцев Широнинцев, 18-Г, кв. 82, Болюх В.Ф.

E-mail: : bolukh@kpi.kharkov.ua; и/или vfboiyukh@gmail.com