

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Розроблена математична модель, яка описує тепловий стан індукційно-динамічного двигуна циклічної дії. Для визначення нагріву активних елементів, що змінюються на протязі робочого процесу, використовуються схемна та польова моделі. Встановлено вплив на тепловий стан двигуна режимів неробочого ходу, руху та гальмування якоря. В режимі руху якоря досліджені залежності від частоти слідування імпульсів, висоти якоря, площі охолодження активних елементів та інтенсивності охолодження індуктора. Проведені експериментальні дослідження підтвердили достовірність математичної моделі та результатів розрахунків.

Разработана математическая модель, описывающая тепловое состояние индукционно-динамического двигателя циклического действия. Для определения нагрева активных элементов, изменяемых в течение рабочего процесса, используются схемная и полевая модели. Установлено влияние на тепловое состояние двигателя режимов холостого хода, движения и торможения якоря. В режиме движения якоря исследованы зависимости превышенной температур активных элементов от частоты следования импульсов, высоты якоря, площади охлаждения активных элементов и интенсивности охлаждения индуктора. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили достоверность математической модели и результатов расчетов.

ВВЕДЕНИЕ

Индукционно-динамические двигатели (ИДД) находят широкое применение во многих отраслях науки, техники и технологии. Они используются для горнодобывающей промышленности, очистки технологического оборудования и танкеров от остатков хранимых грузов, испытаний изделий и устройств на ударные воздействия, для обработки и формовки металлических конструкций, в геологоразведке, в магнитно-импульсной сварке, штамповке и иных операциях, используемых в машиностроении [1, 2].

В ИДД неподвижный многовитковый индуктор, возбуждаемый от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), посредством импульсного магнитного поля индуцирует токи в массивном электропроводящем якоря, который под действием электродинамических сил обеспечивает линейное перемещение якоря с ударным элементом, оказывающим силовое воздействие ударного типа на объект деформирования.

В рассматриваемых линейных двигателях возвратно-поступательного движения протекают сложные пространственно-временные, зависящие друг от друга импульсные электрические, магнитные, механические и тепловые процессы [3, 4].

Во многих технологических системах ИДД должны работать в циклическом режиме, обеспечивая непрерывную последовательность силовых импульсов. В таком двигателе на каждом рабочем цикле реализуется кратковременная фаза нагрузки, при которой в активных элементах (индуктор и якорь) создаются интенсивные токовые импульсы, и продолжительная пауза. Хотя такой режим напоминает повторно-кратковременный с малой ПВ, он обладает существенными особенностями [5]. Импульсная нагрузка столь непродолжительна, что нарастание температуры в активных частях за рабочий период происходит практически в адиабатических условиях. Кроме того, в отличие от повторно-кратковременного режима, в данном случае чаще всего подлежат исследованию:

- нагрев активных элементов, выдерживающих последовательно ряд циклов с известными временными

и нагрузочными характеристиками;

- пауза, в течение которой активные части охлаждаются до наперед заданного состояния;
- допустимое число циклов при заданных длительностях импульса и паузы.

В ИДД циклического действия на первый план выступают тепловые процессы, которые существенно зависят от остальных параметров и процессов, в том числе, от параметров ЕНЭ, индуктора и якоря, от конструктивного выполнения, от частоты следования импульсов, от характера движения якоря и времени его взаимодействия с индуктором, от режима работы и др. Однако до настоящего времени они не исследованы, что можно объяснить сложным и взаимосвязанным характером процессов различной физической природы, которые зависят от конкретного конструктивного выполнения и назначения ИДД.

Целью статьи является установление особенностей тепловых процессов в ИДД циклического действия и основных факторов, оказывающих на них влияние.

КОНСТРУКТИВНАЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМЫ

В качестве объекта исследования выбран ИДД дисковой конфигурации с естественным охлаждением (температура воздуха $T_0 = 20^\circ\text{C}$), и схема возбуждения индуктора серией однополярных аperiodических импульсов, позволяющая использовать ЕНЭ на базе высокоэнергетичных электролитических конденсаторов [6].

ИДД содержит неподвижный индуктор 1 с двухслойной обмоткой, которая намотана прямоугольной медной шиной и уложена в стеклотекстолитовый каркас 2 (рис. 1). Индуктор прикреплен к корпусу 3. Напротив индуктора 1 установлен дисковый якорь 4, который прикреплен к силовой пластине 5. Внутри обмотки индуктора установлена направляющая втулка 6 для обеспечения хода бойка 7, имеющего заостренную часть, упорный выступ 8 и концевую часть 9.

Заостренная часть бойка установлена напротив объекта деформирования 10, фиксированного относительно каркаса 3, концевая часть 9 – установлена в зазоре оптического датчика положения 11, а упорный

выступ 8 взаимодействует с силовой пластиной 5. Возвратная пружина 12, прикрепленная к каркасу 3 и силовой пластине 5, обеспечивает плотное прижатие якоря 3 к индуктору 1 до и после силового импульса. Сверху установлен защитный кожух 13.

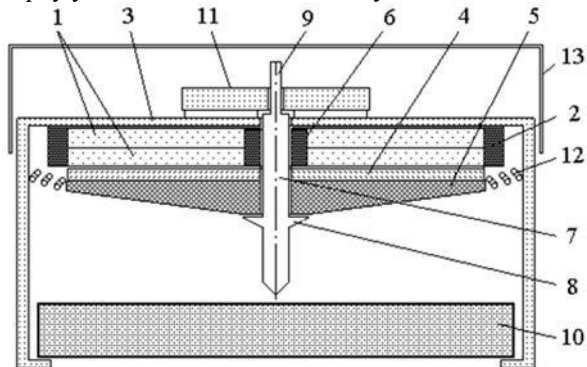


Рис. 1. Схематическое устройство ИДД

Параметры исследуемого ИДД, принятого в качестве базового варианта, представлены в табл.

Таблица

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора, мм	D_{ex1}	100
Внутренний диаметр индуктора, мм	D_{in1}	10
Высота 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 индуктором и якорем, мм	ΔZ_0	1
Число витков индуктора, шт	n_1	42
Сечение витка медной шины, мм ²	$a \times b$	1,8 × 4,8
Коэффициент упругости возвратной пружины, кН/м	K_p	7,5
Масса ударного элемента, кг	m_2	0,35
Емкость ЕНЭ, мкФ	C	1980
Зарядное напряжение ЕНЭ, В	U_0	310
Частота импульсов, Гц	f_n	1
Мощность источника, Вт	P_1	95,14
Мощность в импульсе, кВт	P_2	7,92

На рис. 2 представлен экспериментальный образец и индуктор базового ИДД, обмотка которого монолитична эпоксидной смолой и размещена в стеклотекстолитовом каркасе.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

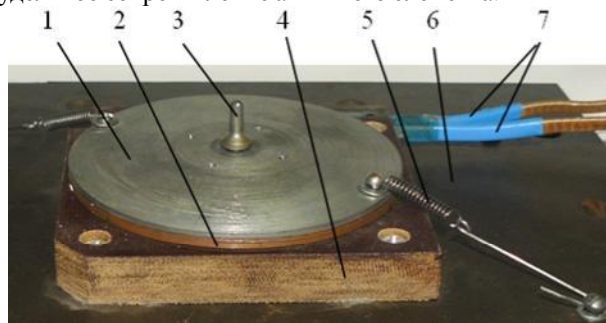
Расчет электромеханических характеристик ИДД производится по известной методике [7].

Для определения температур индуктора и якоря ИДД, изменяемых в течение рабочего процесса, используется схемно-полевая модель [8]. Полевая модель позволяет на каждом временном шаге учесть пространственное распределение температур в активных (токовых) и пассивных элементах ИДД:

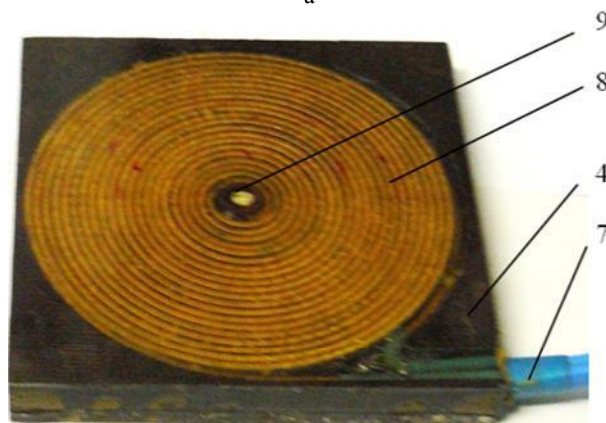
$$c_n(T) \cdot \gamma_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \lambda_n(T) \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_n}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right) + j_n^2(t) \cdot k_z \cdot \rho_n(T),$$

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

где $n = 1, 2$ – индексы индуктора и якоря соответственно; $m = 3, 4$ – индексы изоляционного каркаса с направляющей втулкой и ударной стальной 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.



а



б

Рис. 2. ИДД (а) и его индуктор (б): 1 – ударная пластина; 2 – якорь; 3 – боек; 4 – каркас индуктора; 5 – возвратные пружины; 6 – опорная пластина; 7 – тоководы индуктора; 8 – обмотка индуктора; 9 – втулка направляющая

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

$$-\frac{\partial T_f}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_f - T_0),$$

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

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

$$T_n(r_f, z_f, t) = T_m(r_f, z_f, t);$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_{nf}}{\partial n} = \lambda_m \frac{\partial T_{mf}}{\partial n}.$$

На оси симметрии ИДД – граничное условие второго рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_f = 0.$$

Коэффициент теплопроводности индуктора вдоль соответствующих осей определяется как

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_n \lambda_u \lambda_k (h_n + 2h_u + h_k)}{h_n \lambda_u \lambda_k + 2h_u \lambda_n \lambda_k + h_k \lambda_n \lambda_u},$$

где $\lambda_n, \lambda_u, \lambda_k$ – коэффициенты теплопроводности проводника, изоляции и эпоксидного компаунда соответственно; h_n, h_u, h_k – толщина проводника, изоляции и компаунда в соответствующем направлении.

Для описания переходных процессов целесообразно использовать так называемую схемную модель [8], построенную на основе эквивалентных схем замещения, в которой основные параметры и характеристики элементов схемы замещения определяются из полевой модели.

В схемной модели усредненные по сечению температуры n -ого активных элементов при наличии теплового контакта между ними через изоляционную прокладку, можно описать рекуррентным соотношением [9]

$$T_n(t_{k+1}) = T_n(t_k) \cdot \exp\left[\frac{-\Delta t}{c_n(T_n)\gamma_n H_n} \left(\frac{P_n \alpha T_n(V)}{\pi(D_{ex}^2 - D_{in}^2)} + \frac{\lambda_u(T)}{d_a + \Delta Z}\right)\right] + \left\{1 - \exp\left[\frac{-\Delta t}{c_n(T_n)\gamma_n H_n} \left(\frac{P_n \alpha T_n(V)}{\pi(D_{ex}^2 - D_{in}^2)} + \frac{\lambda_u(T)}{d_a + \Delta Z}\right)\right]\right\} \times \frac{i_n^2(t_k) R_n(T_n) + T_0 P_n \alpha T_n(V) + T_r(t_k) \zeta}{\alpha T_n(V) F_{cm} + \zeta},$$

где $\zeta = \pi \lambda_u(T) (D_{ex}^2 - D_{in}^2) (d_a + \Delta Z)^{-1}$; $\lambda_u(T)$ – коэффициент теплопроводности изоляционной прокладки; R_n – сопротивление индуктора ($n = 1$) и якоря ($n = 2$); 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.

В схемной модели все параметры считаются сосредоточенными и представляют собой усредненные значения, полученные из полевой модели. Такая схемно-полевая модель позволяет обеспечить высокую скорость расчета переходных процессов с учетом пространственного распределения температур по активным элементам ИДД.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА БАЗОВОГО ИДД

При работе ИДД его электромеханические и тепловые процессы во многом зависят от режима работы. Можно выделить следующие режимы:

- режим холостого хода (РХ), при котором якорь выведен из магнитного взаимодействия с индуктором, возбуждаемым от ЕНЭ;
- режим движения (РД), при котором подвижный якорь магнитно взаимодействует с индуктором и ускоряет боек с ударной пластиной, т.е. электродинамическая сила превышает тормозные силы;
- режим торможения (РТ), при котором якорь не-

подвижен и находится в зоне максимальной магнитной связи с индуктором, т.е. тормозная сила многократно превышает электродинамические силы.

В зависимости от режима работы существенно меняются токовые характеристики ИДД в фазе нагрузки (рис. 3). Так в режиме РХ однополярный импульс тока в индукторе имеет резкий фронт с относительно медленным затуханием. В режимах РД и РТ за счет возникновения импульса тока в якоре изменяемой полярности фронт тока в индукторе обостряется, возрастает величина импульса и происходит быстрое его затухание.

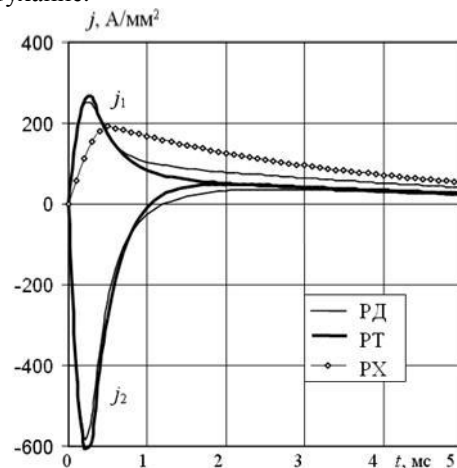


Рис. 3. Плотности токов индуктора j_1 и якоря j_2 в фазе нагрузки при работе ИДД в режимах РД, РТ, РХ

В режиме РТ энергия ЕНЭ $W_0 = 0,5CU_0^2$ поступает на нагрев активных элементов

$$W_n = \int i_n^2(t) R_n(T_n) dt, \quad n = 1, 2;$$

в режиме РХ – только на нагрев индуктора; в режиме РД энергия распределяется на нагрев индуктора и якоря, на движение якоря массой m_2 с ударным элементом массой m_g

$$W_{kin} = 0,5(m_2 + m_g) \cdot V^2(t),$$

на сжатие возвратной пружины

$$W_{pr} = 0,5K_p \Delta Z^2(t),$$

и на аэродинамическое сопротивление воздуха.

При работе в циклическом режиме РД характер токов практически сохраняется при условии, что последующий импульс возникает после полного затухания предыдущего (рис. 4,а). Отличие в характере импульсов возникает из-за изменения сопротивления активных элементов, обусловленное их нагревом, однако это проявляется в последующем.

Под действием электродинамических сил якорь с ударным элементом перемещается на расстояние ΔZ со скоростью V в прямом направлении, а под действием возвратной пружины – в обратном направлении до соприкосновения с индуктором (рис. 4,б). Механические процессы на начальных циклах работы ИДД практически повторяются, но с течением времени приобретают меньшую амплитуду из-за возрастающего сопротивления активных элементов.

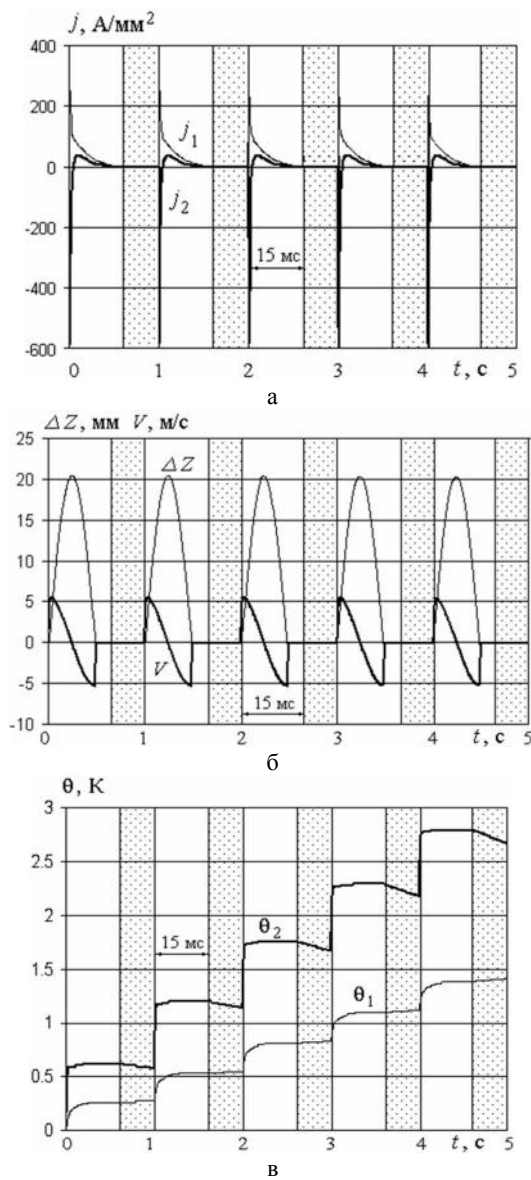


Рис. 4. Электрические (а), механические (б) и тепловые (в) временные зависимости при работе ИДД с частотой 1 Гц в режиме РД

На рис. 4,в показаны превышения температур активных элементов $\theta = T_0 - T_n$ за первые рабочие циклы. Превышение температуры якоря на начальных рабочих циклах возрастает примерно в 2 раза быстрее, чем у индуктора. При этом в течение фазы нагрузки рабочего цикла (продолжительностью 15 мс) температура индуктора возрастает плавно, а в якоре – практически мгновенно. В течение фазы нагрузки между активными элементами отсутствует тепловое взаимодействие за счет перемещения якоря на расстояние ΔZ , а за счет скорости V возникает перемещение находящегося между ними воздуха, что влияет на величину коэффициента теплоотдачи $\alpha(V)$ [10].

В течение паузы рабочего цикла (от 15 мс до 1 с) якорь находится в контакте с индуктором, что влияет на их тепловое состояние: нагрев индуктора повышается, а якоря уменьшается. Причем интенсивность этого процесса возрастает с числом рабочих циклов ИДД, что объясняется возрастающими перепадами температур между активными элементами.

При работе ИДД достаточно продолжительное время (до 5 мин) с частотой следования импульсов 1 Гц тепловая энергия в активных элементах возрастает практически линейно, но существенно зависят от режима работы. На рис. 5 представлены зависимости выделенной тепловой энергии W_1 в индукторе и якоре W_2 . В режиме РХ вся энергия ЕНЭ поступает на нагрев индуктора. В режиме РТ – эта энергия перераспределяется между индуктором и якром, причем в последнем выделяется меньшая часть. А в режиме РД, где присутствуют другие связанные с движением энерговыделения, в якоре и индукторе выделяется наименьшее количество тепловой энергии.

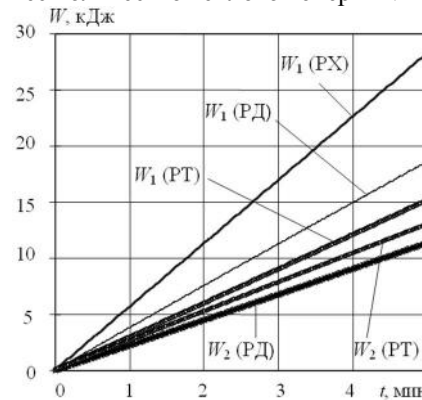


Рис. 5. Зависимости тепловой энергии в индукторе W_1 и якоре W_2 от времени работы ИДД с частотой 1 Гц

Указанное распределение энергии приводит к тому, что рост превышения температуры индуктора существенно зависит от режима нагрузки (рис. 6). Наиболее напряженным в тепловом отношении для индуктора является режим РХ, а наиболее благоприятным – режим РД. Температурные зависимости имеют тенденцию замедления роста, но превышения температур за 5-7 мин достигают предельной величины 110-120 °С, при котором начинает размягчаться эпоксидная смола, компаундирующая обмотку индуктора.

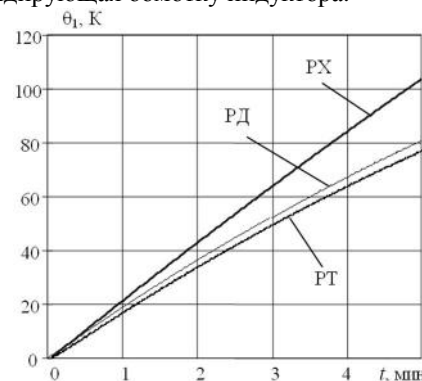


Рис. 6. Зависимости превышения температуры индуктора от времени работы ИДД с частотой 1 Гц

Рассмотрим пространственные распределения температур в поперечном сечении ИДД в зависимости от режима работы за одно и то же время – 10 с. На рис. 7 показаны: проводники обмотки индуктора 1, междувитковая изоляция 2, стеклотекстолитовый каркас 3, внутренняя текстолитовая направляющая втулка 4, центральное отверстие 5, якорь 6, ударная пластина 7, зазор между якром и индуктором 8, линии равных

температур 9. Здесь же представлены шкала температур и их распределения по участкам ИДД.

Наиболее нагретым элементом конструкции является медный якорь со стальной ударной пластиной, на участках которых практически одинаковая температура. Градиент температур на обмотке индуктора незначительный, и в основном он возникает в каркасе и втулке, выполненных из непроводящих материалов.

В режиме РТ температура как якоря, так и индуктора выше, чем в режиме РД, а в режиме РХ температура индуктора наибольшая.

Представленные зависимости обосновывают использование усредненных температур для индуктора и якоря при расчете переходного процесса в схемной модели и позволяют определить реальные тепловые потоки через различные поверхности ИДД с уточненными коэффициентами теплоотдачи.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИДД В РЕЖИМЕ РД НА ЕГО ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Рассмотрим влияние частоты $f_{и}$ следования импульсов на нагрев индуктора и якоря. На рис. 8 показано, как с увеличением периода следования импульсов $T_{и} = 1/f_{и}$ происходит уменьшение нагрева индуктора θ_1 и якоря θ_2 за 300 рабочих циклов. С уменьшением частоты $f_{и}$ от 5 до 1 Гц ($T_{и}$ увеличивается от 0,2 до 1,0 с) нагрев индуктора уменьшается на 15 %, в то время как нагрев якоря уменьшается на 33 %. При этом нагрев якоря превышает нагрев индуктора, но с увеличением периода $T_{и}$ эта разность уменьшается. Это объясняется более продолжительным временем теплового контакта индуктора и якоря, а значит и более эффективным теплообменом между ними.

На рис. 9 показан рост нагрева индуктора θ_1 и якоря θ_2 при работе ИДД с частотами 1 и 5 Гц от количества рабочих импульсов N .

При работе с частотой 1 Гц нагрев якоря не значительно превышает нагрев индуктора, причем разность между ними с ростом количества импульсов уменьшается. При работе с частотой 5 Гц нагрев якоря значительно больше, чем у индуктора, причем разность между ними с ростом количества импульсов практически неизменна. Поскольку при работе ИДД с частотой 1 Гц 300 импульсов реализуется за 5 мин, а при работе с частотой 5 Гц – за 1 мин, то очевидно последний режим работы значительно более напряжен в тепловом отношении. Фактически представленные зависимости показывают допустимое число рабочих импульсов, при которых не происходит повреждение элементов ИДД.

Одним из путей уменьшения тепловой нагрузки якоря представляется увеличение его высоты (рис. 10). При увеличении высоты якоря от 2 до 3 мм эффективность ИДД, оцениваемая соотношением

$$\eta = (m_2 + m_g) \cdot V^2 C^{-1} \cdot U_0^{-2},$$

возрастает на 22 %. При этом происходит перераспределение тепловой энергии: в якоряе тепловая энергия W_2 уменьшается, а в индукторе W_1 – возрастает. В результате этого разность между нагревом якоря и индуктора уменьшается, и, что важно, уменьшаются, хотя и незначительно, и сами нагревы.

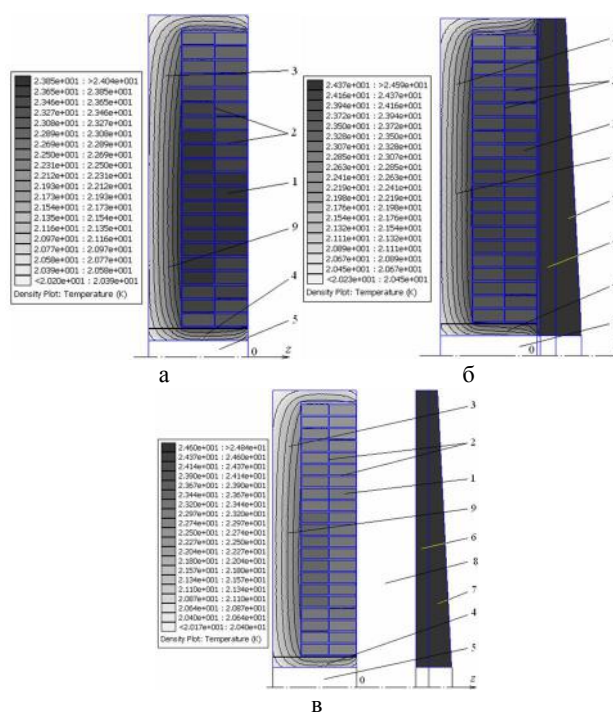


Рис. 7. Распределения температур по сечению на $10^{0й}$ секунде при работе ИДД в режиме: а) РХ; б) РТ; в) РД

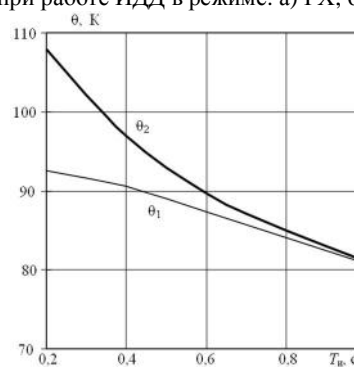


Рис. 8. Зависимость превышения температур индуктора и якоря за 300 циклов от периода следования импульсов

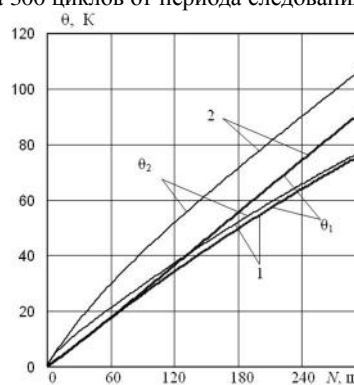


Рис. 9. Зависимость превышения температур индуктора и якоря от количества рабочих циклов при работе ИДД с частотой: 1 – 1 Гц; 2 – 5 Гц

Другим конструктивным элементом ИДД, влияющим на нагрев активных элементов, является площадь поверхности охлаждения индуктора P_1 (неконтактируемая с каркасом и внутренней направляющей втулкой). На рис. 11 показаны превышения температур индуктора θ_1 и якоря θ_2 ИДД, работающего с частотой 1 Гц, у которого изменяется площадь поверхности охлаждения индуктора.

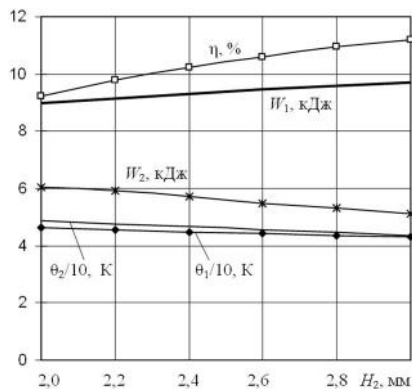


Рис. 10. Зависимость энергетических и тепловых параметров от высоты якоря за 150 с при работе ИДД с частотой 1 Гц

Очевидно, что с увеличением площади поверхности P_1 нагрев индуктора уменьшается, хотя и незначительно (на 5,5 % при увеличении площади поверхности в 4 раза), но при этом также снижается и нагрев якоря (на 4,3 %) из-за теплового взаимодействия между ними во время паузы рабочего цикла.

Необходимо отметить довольно сильную тепловую связь между индуктором и якорем. На рис. 12 показаны превышения температур индуктора и якоря для базового ИДД, для двигателя, у которого площадь поверхности охлаждения индуктора уменьшена в 2 раза, и для двигателя, у которого площадь поверхности охлаждения якоря уменьшена в 2 раза. Из представленных зависимостей следует, что уменьшение площади поверхности охлаждения индуктора или якоря вызывает увеличение нагрева как данного элемента, так и элемента, у которого площадь поверхности охлаждения остается неизменной.

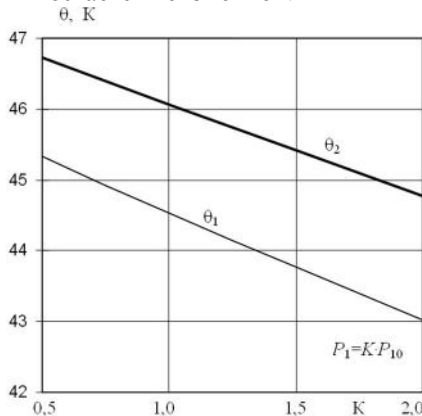


Рис. 11. Зависимость превышения температур индуктора и якоря от площади поверхности охлаждения индуктора P_1 по отношению к базовому варианту P_{10} за 150 рабочих циклов

Таким образом, увеличение площади поверхности охлаждения любого из активных элементов радикально не решает проблему нагрева рассматриваемого ИДД, работающего с частотой 1 Гц.

В качестве достижения устойчивой температуры активных элементов при длительной работе ИДД в циклическом режиме предлагается интенсификация охлаждения, например за счет обеспечения вентиляции воздуха или использования водяного охлаждения [10].

Учитывая тепловую связь между активными элементами ИДД, предлагается интенсивное охлаждение

только неподвижного индуктора. На рис. 13 представлены превышения температур индуктора и якоря ИДД при интенсивном охлаждении индуктора с различными коэффициентами теплоотдачи.

С повышением интенсивности охлаждения индуктора уменьшается нагрев обоих активных элементов, но разность температур между ними возрастает. При этом обеспечивается стабилизация температур, что позволяет не ограничивать время работы рассматриваемого ИДД циклического действия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки основных теоретических положений были проведены измерения температуры на поверхности индуктора 1 базового ИДД со стеклотекстолитовым каркасом и индуктора 2 со стальным каркасом, у которого отвод тепла осуществляется со всей его поверхности при работе с частотой 1 Гц (рис. 14). В экспериментах использовался режим РХ.

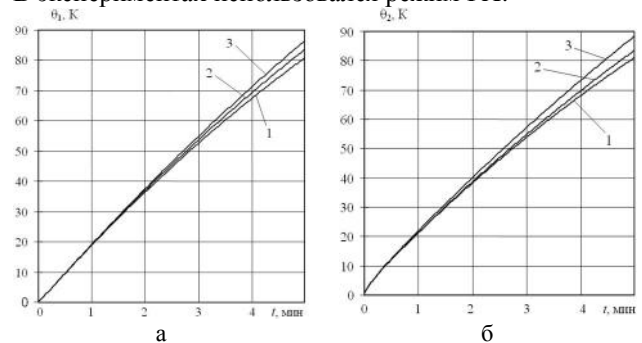


Рис. 12. Зависимость превышения температур индуктора (а) и якоря (б): 1 – базовый вариант; 2 – поверхность охлаждения индуктора уменьшена в 2 раза; 3 – поверхность охлаждения якоря уменьшена в 2 раза

Измерение проводилось прибором М 890G, снабженного термодарой. Участок измерения температуры индукторов расположен на расстоянии 20 мм от оси. Показано, что индуктор 2 со стальным каркасом нагревается несколько медленнее, чем индуктор 1 со стеклотекстолитовым каркасом, благодаря улучшенному теплоотводу (рис. 15).

Экспериментальные зависимости с точностью до 6 % совпадают с расчетными результатами, что подтверждает достоверность математических моделей.

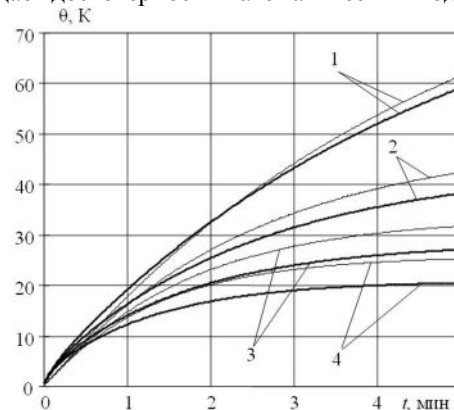


Рис. 13. Зависимость превышения температур индуктора (тонкие линии) и якоря (жирные линии) от времени работы ИДД при охлаждении индуктора с коэффициентом теплоотдачи α , Вт/(м²К): 1 – 50; 2 – 100; 3 – 150; 4 – 200

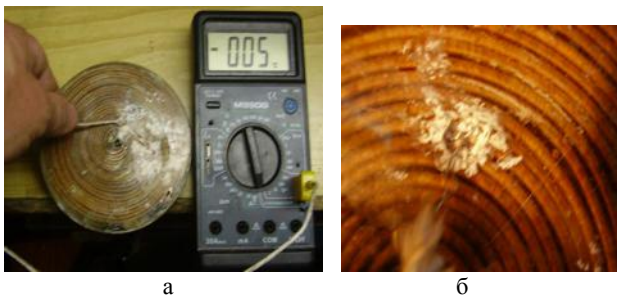


Рис. 14. Способ измерения температуры поверхности индуктора со стальным каркасом: а) измерительный прибор и индуктор; б) участок измерения температуры индуктора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель, описывающая тепловое состояние индукционно-динамического двигателя циклического действия. Для определения изменяемых в течение рабочего процесса температур индуктора и якоря ИДД, используются схемно-полевая модель. Установлено влияние режимов холостого хода, при котором якорь выведен из магнитного взаимодействия с возбуждаемым индуктором, движения и торможения якоря на нагрев активных элементов. В режиме движения якоря исследованы зависимости превышений температур активных элементов от частоты следования импульсов, высоты якоря, площади охлаждения активных элементов и интенсивности охлаждения индуктора.

Проведенные экспериментальные исследования тепловых процессов подтвердили достоверность математической модели и результатов расчетов.

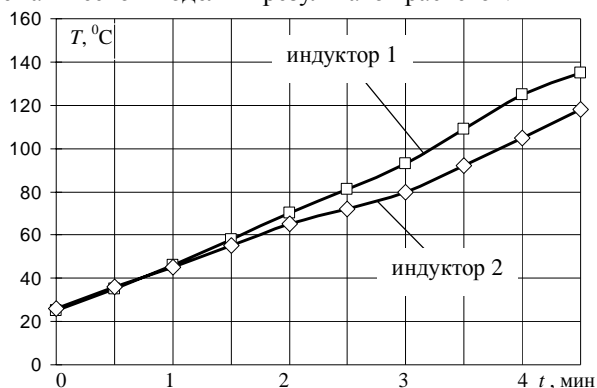


Рис. 15. Экспериментальные зависимости температуры на поверхности индуктора ИДД при работе с частотой 1 Гц

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития: Труды междунауч.-техн. конф. МИОМ-2007. – Самара, 18-19 сентября 2007. – Самара: СГАУ, 2007. – 280 с.
2. Field J.E.. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies// Int. J. Imp. Eng. – Vol. 30, 2004. – P. 725-775.
3. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Энергетические процессы и эффективность индукционно-динамического преобразователя ударного действия // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 9-14.
4. Болух В.Ф., Назаренко С.А., Рассоха М.А. Мультиполевая модель импульсного электромеханического преобразователя // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2009. – № 3. – С. 34-40.
5. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.

6. Болух В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. Синтез параметров высокоэффективного электромеханического преобразователя ударного действия // Технічна електродинаміка. Тем. випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч. 2. – С. 63-68.
7. Болух В.Ф. Влияние длительности токов обмотки возбуждения и якоря на эффективность индукционно-динамического электродвигателя // Электротехника. – 2001. – № 11. – С. 27-31.
8. Птах Г.К. Методологические аспекты разработки компьютерных моделей электромеханических преобразователей // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. – № 1. – С. 7-11.
9. Болух В.Ф. Электродинамические процессы в линейном импульсно-индукционном двигателе с подвижной криореактивной обмоткой возбуждения // Электротехника. – 1999. – № 2. – С. 3-10.
10. Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. – Л.: Энергия, 1974. – 384 с.

Bibliography (transliterated): 1. Magnitno-impul'naja obrabotka materialov. Puti covershenstvovaniya i razvitiya: Trud'i mejd. nauch.-tehn. konf. MIOM-2007. - Samara, 18-19 sentyabrja 2007. - Samara: CGAU, 2007. - 280 s. 2. Field J.E.. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies// Int. J. Imp. Eng. - Vol. 30, 2004. - P. 725-775. 3. Boljuh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Schukin I.S. Energeticheskie protsess'i i effektivnost' induktsionno-dinamicheskogo preobrazovatelja udarnogo de'ctvija // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 2. - С. 9-14. 4. Boljuh V.F., Nazarenko S.A., Rassoha M.A. Multipolevaja model' impul'nogo elektromehaničeskogo preobrazovatelja // Інтегровані технології та енергозбереження. - 2009. - № 3. - С. 34-40. 5. Gurevich E.I., R'ibin JU.L. Perehodn'ie teplov'ie protsess'i v električeskix mashinah. - L.: Energoatomizdat, 1983. - 216 s. 6. Boljuh V.F., Markov A.M., Luchuk V.F., Schukin I.S. Sintez parametrov vi-cokoeffektivnogo elektromehaničeskogo preobrazovatelja udarnogo de'ctvija // Tehnična elektrodinamika. Tem. vipusk: Problemi sучасної електротехніки. - 2008. - Ч. 2. - С. 63-68. 7. Boljuh V.F. Vlijanie dlitel'nosti tokov obmotki vozbuždennija i jakorja na effektivnost' induktsionno-dinamicheskogo elektrodvigatelja // Elektrotehnika. - 2001. - № 11. - С. 27-31. 8. Ptah G.K. Metodologičeskie aspekti razrabotki kompjutern'ih modelej elektromehaničeskix preobrazovatel'ej // Izvestija vuzov. Elektromehanika. - 2003. - № 1. - С. 7-11. 9. Boljuh V.F. Elektrodinamicheskie protsess'i v line'nom impul'no-induktsionnom dvigatele s podvijno' kriorezistivno' obmotko' vozbuždennija // Elektrotehnika. - 1999. - № 2. - С. 3-10. 10. Filippov I.F. Osnovi teploobmena v električeskix mashinah. - L.: Energija, 1974. - 384 s.

Поступила 04.10.2010

Болух Владимир Федорович, д.т.н., проф.
Щукин Игорь Сергеевич, к.т.н., доц.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
ООО Фирма "ТЭТРА Ltd",
61002, Украина, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 7076427
e-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, tech@tetra.kharkiv.com

Bolyukh V.F., Schukin I.S.

Features of thermal conditions of an inductive dynamic cyclic motor.

A mathematical model describing thermal conditions of an inductive dynamic cyclic motor is developed. To determine the inductor and the armature temperatures which vary during the working process, a circuit and a field models are used. The effect of the armature idling, motion, and braking on the motor thermal conditions has been revealed. In the armature motion mode, the active elements temperature increase versus pulse repetition frequency, the armature height, the active elements cooling area, and the inductor cooling rate is studied. Experimental investigations conducted prove validity of the mathematical model and the calculation results.

Key words – inductive dynamic cyclic motor, mathematical model, thermal conditions, experimental investigations, inductor and armature temperatures.