

УДК 621.313

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Татевосян Андрей Александрович,

канд. техн. наук, доцент каф. «Электрическая техника» ФГБОУ ВПО
«Омский государственный технический университет»,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. E-mail: karo1@mail.ru

Татевосян Александр Сергеевич,

канд. техн. наук, доцент каф. «Теоретическая и общая электротехника»
ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет»,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. E-mail: karo1@mail.ru

В статье изложены основные вопросы теории, расчета и проектирования электромагнитных устройств, приведены оптимальные соотношения геометрических размеров конструкций электромагнитных устройств, исходя из условия минимума массы активных материалов, необходимых для их изготовления. Рассмотрены примеры задач проектирования электромагнитных устройств, отвечающие требованиям надежности производимых расчетов и достоверности полученных результатов. Представлен сравнительный анализ конструкций электромагнитных устройств по условию минимума массы активных материалов, имеющих магнитопроводы на основе Ш- и П-образного электротехнического железа с одной и двумя намагничивающими обмотками, а также цилиндрические броневые магнитопроводы, цилиндрический якорь и корпус в виде скобы при обеспечении заданных выходных параметров (тяговое усилие или мощность). Показано, что электромагнитные устройства на основе магнитопроводов с двумя намагничивающими обмотками имеют на 10–30 % меньшую массу по сравнению с однообмоточными. На примере задачи проектирования электромагнитного привода поршневого компрессора с помощью разработанного программного обеспечения проведено исследование режимов работы энергопреобразования электромагнитных устройств при обеспечении заданного закона движения якоря. В качестве критерия оптимальности при решении задачи принят максимум коэффициента полезного действия электромагнитных устройств. Влияние вихревых токов в стали на энергетические показатели привода учитывается путем синтеза многоконтурной схемы замещения электромагнитных устройств. Расчет магнитного поля при определении статических характеристик электромагнитных устройств проводится методом вероятных путей магнитного потока. Разработанные алгоритмы и программы по оптимальному проектированию электромагнитных устройств обладают новизной и практической значимостью.

Ключевые слова:

Электромагнитный привод, оптимизация, поршневой компрессор, электромагнит, многоконтурная схема замещения, максимум клд.

Электромагнитные устройства (ЭМУ) находят широкое применение в электромагнитных приводах различных механизмов, электромагнитных реле, контакторах, электромагнитных клапанах, в гидро- и пневмосистемах, тормозных электромагнитах, магнитных муфтах, электромагнитных молотах и т. п. [1]. Конструкции ЭМУ разнообразны и классифицируются по ряду признаков: по способу действия (удерживающие – для удержания грузов или деталей, например, электромагнитные столы станков, грузоподъемные электромагниты, магнитные железоотделители; притягивающие совершают механическую работу, притягивая свой якорь); по способу включения (с параллельной катушкой – ток в катушке определяется параметрами самого электромагнита и напряжения сети; с последовательной катушкой – ток в катушке определяется параметрами устройств, в цепь которых включена катушка); по роду тока (постоянный, переменный); по характеру движения якоря: (поворотные – якорь совершает поворот относительно некоторой фиксированной точки или оси; прямоходные – якорь перемещается поступательно) и др.

Расчет динамических характеристик ЭМУ сопровождается значительными трудностями, связанными с необходимостью построения математи-

ческой модели, описывающей переходный процесс в ЭМУ в виде системы нелинейных уравнений с переменными коэффициентами, и использования численных методов ее решения при принятых начальных и граничных условиях [2]. В рамках направления по исследованию динамических характеристик ЭМУ с использованием программно-аппаратных комплексов рассматриваются методы экспериментального определения интегральных характеристик линейного электромагнитного привода [3, 4].

Для обеспечения расчетов при составлении математической модели стремятся описать аналитически только основные процессы, связанные с энергопреобразованием в электрических и магнитных цепях и в механической системе ЭМУ [5]. Все другие процессы, хотя и зависящие от времени (например, неравномерное распределение магнитной индукции в сечении магнитопровода, обусловленное наличием вихревых токов в нешихтованных стальных массивах [6]; насыщение магнитопровода; рассеяния магнитного потока с учетом истинной геометрии элементов магнитной системы и т. п.) не учитываются. Для большинства встречающихся на практике случаев вихревыми токами в магнитопроводе (если он шихтован, то

есть набран из листов электротехнической стали) и магнитным сопротивлением ферромагнитных участков магнитной системы ЭмУ можно пренебречь. Если воспользоваться этими допущениями при построении математической модели для исследования динамики ЭмУ, то протекающие в нем процессы могут быть описаны следующей системой уравнений [7, 8]:

$$\begin{cases} iR_k + \frac{d\psi}{dt} = u(t), \\ m \frac{dV}{dt} = F_{\text{эм}} - \xi \frac{dX}{dt} - \chi X - F_0, \\ V = \frac{dX}{dt}, \end{cases}$$

при уравнениях связи

$$\psi = iL(X), \quad F_{\text{эм}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(X)}{dX},$$

$$R_k = R_{20} [1 + \alpha(\theta_{\text{ср}} - 20)], \quad \theta_{\text{ср}} = \theta(i, R_k, t),$$

при начальных и граничных условиях

$$\text{для } t=0: i=0, V=0, X=X_{\text{нач}}, X_{\text{нач}} \leq X \leq X_{\text{кон}},$$

где R_{20} – сопротивление обмотки при 20 °С; α – температурный коэффициент сопротивления материала провода обмотки; $\theta_{\text{ср}}$ – зависимость средней (по объему) температуры θ обмотки от тока, сопротивления и времени; ξ и χ – коэффициенты, определяющие противодействующие усилия, зависящие соответственно от скорости и перемещения якоря; F_0 – противодействующее усилие, не зависящее от хода якоря; $X_{\text{нач}}$ и $X_{\text{кон}}$ – соответственно начальное и конечное положения якоря.

При заданном питающем напряжении $u(t)$ и параметрах механической системы (ξ, χ), связанной с ЭмУ, его динамические характеристики определяются зависимостью индуктивности обмотки $L=L(x)$

от перемещения якоря (в случае ненасыщенной магнитной системы) и сопротивлением обмотки. Из решения системы уравнений динамическими характеристиками ЭмУ являются зависимости $X(t)$, $i(t)$, $F_{\text{эм}}(t)$, $V(t)$ и другие. Взаимосвязи между величинами, описываемые системой уравнений, можно представить в виде структурной схемы

(рис. 1) [9]. На схеме обозначены: $E_x = I \frac{dL(x)}{dX} V$ –

противо-ЭДС движения; $F_{\text{эм}} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL(x)}{dX}$ – усилие

тяги электромагнита; $T(X) = \frac{L(X)}{R_k}$ – постоянная

времени обмотки; $P = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования; F_c – сила сопротивления, приложенная к подвижным частям магнитной системы ЭмУ.

Из структурной схемы видно, что ЭмУ является достаточно сложным нелинейным объектом управления. Схема содержит блоки перемножения в прямом канале и каналах обратной связи по ЭДС движения E_x и силам сопротивления F , приложенным к подвижным частям ЭмУ, а также нелинейные функции постоянной времени и индуктивности обмотки от положения якоря [10]. Операторы, определяющие индуктивность обмотки электромагнита $L(x)$ и среднюю по объему обмотки температуру $\theta(i, R_k, t)$, конкретизируются при рассмотрении расчета соответствующих магнитных систем ЭмУ и теплового расчета обмотки. Операторы, определяющие противодействующие движению подвижных частей ЭмУ силы, зависят от конкретных характеристик и параметров устройства.

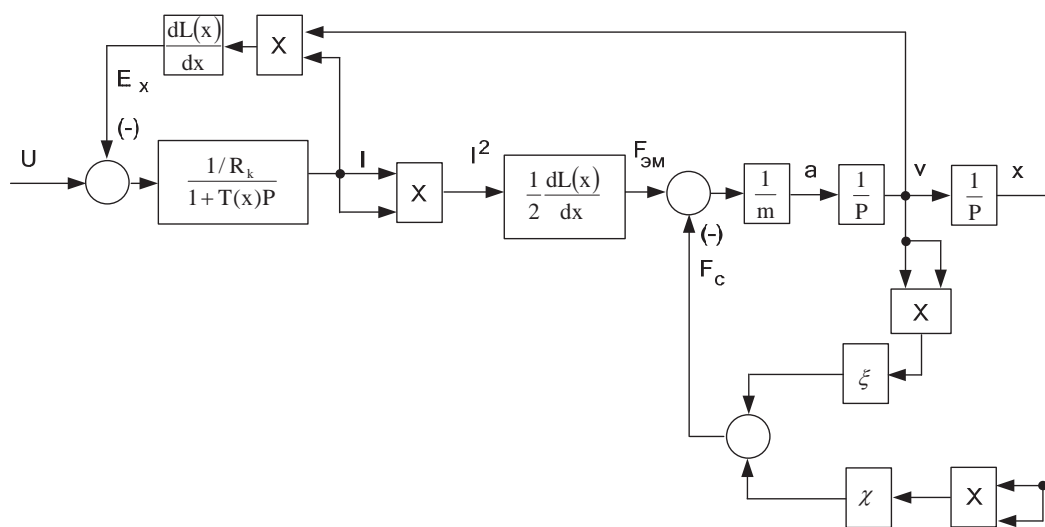


Рис. 1. Структурная схема для исследования динамических характеристик ЭмУ без учета влияния вихревых токов в магнитопроводе

Fig. 1. Block diagram for studying dynamic characteristics of electromagnetic device (EmD) without considering eddy currents in magnetic core

Учет влияния вихревых токов на процессы энергопреобразования и переходные процессы в электрических цепях с ЭмУ имеет важное значение при наличии в их конструкциях нешихтованных стальных массивов, пронизываемых изменяющимся во времени магнитным потоком. В отличие от тока в обмотке вихревые токи циркулируют не в каких-либо определенных контурах, а распределяются по всему объему нешихтованного магнитопровода. Поэтому определить активные сопротивления, собственные и взаимные индуктивности для контуров вихревых токов представляется затруднительным. Для облегчения расчетов целесообразно влияние вихревых токов учесть путем введения эквивалентной короткозамкнутой обмотки, сцепленной с полным магнитным потоком. В такой модели уравнения, описывающие процессы в обмотке, имеют вид:

$$iR_k + \frac{d\psi}{dt} = U; \quad 0 = i_{\text{B}}R_{\text{B}} + \frac{d\psi_{\text{B}}}{dt};$$

$$\psi = L(x)i + M(x)i_{\text{B}}; \quad \psi_{\text{B}} = L_{\text{B}}(x)i_{\text{B}} + M(x)i,$$

где ψ_b , L_b , R_b , i_b – соответственно потокоцепление, индуктивность, активное сопротивление и ток в эквивалентной короткозамкнутой обмотке; M – взаимная индуктивность между основной и короткозамкнутой обмотками. Если принять, что $L=M=L_b$, то структурная схема ЭМУ с короткозамкнутой обмоткой существенно упрощается (рис. 2). При этом, однако, возможны расхождения результатов расчета активного сопротивления R_b короткозамкнутой обмотки на порядок и более по различным методам и, как следствие этого, значительные отклонения в поведении математической модели и реального ЭМУ во временной области.

В связи с этим целесообразно использование цепно-полевого подхода к учету влияния вихревых токов на процессы в магнитных системах ЭМУ [11], основанного на совместном решении уравнений электромагнитного поля в проводящей среде (нешихтованные стальные массивы) и уравнения электрического состояния обмотки возбуждения при ее отключении от источника питания и зако-

рачивании накоротко. В ходе решения задачи при фиксированном положении якоря определяется зависимость тока обмотки возбуждения от времени и по ней синтезируется многоконтурная схема замещения ЭМУ, показанная на рис. 3. Параметры схемы замещения зависят от положения якоря, причем влияние ее каждой последующей параллельной ветви схемы на процессы энергопреобразования в ЭМУ уменьшается [12]. Из схемы замещения следует, что не весь ток i , потребляемый от источника питания, протекает через индуктивность $L=L(x)$, которая есть не что иное, как статическая индуктивность обмотки. Часть тока проходит через параллельные ветви схемы, содержащие активное сопротивление R_j ($j=1,2,...,n$), и является отражением воздействия вихревых токов на процессы энергопреобразования. На основе многоконтурной схемы замещения можно построить математическую модель ЭМУ для исследования его динамических характеристик, подобную той, что рассматривалась выше, но с использованием большего числа уравнений для описания электрического состояния цепи. Однако полученная модель не является универсальной и применяется только для ненасыщенных магнитных систем ЭМУ с последовательной магнитной цепью.

Для облегчения решения задачи оптимизации магнитной системы ЭМУ при заданных технических условиях при разработке программного обеспечения целесообразно предварительно вывести соотношения размеров катушечного окна и сечения магнитопровода, при которых масса активных материалов будет минимальной. Массу ЭМУ можно найти по выражению:

$$m_{\text{EMV}} = m_c + m_s + m_M, \quad (1)$$

где m_c – масса магнитопровода; $m_{\text{я}}$ – масса якоря;
 m_M – масса обмотки.

Исходя из условия обеспечения выходных параметров ЭМУ, будем полагать, что площади поперечных сечений катушечного окна под намагничивающую обмотку и магнитопровода заранее определены. Тогда в зависимости от типа магнитной системы и конструкции магнитопровода массу

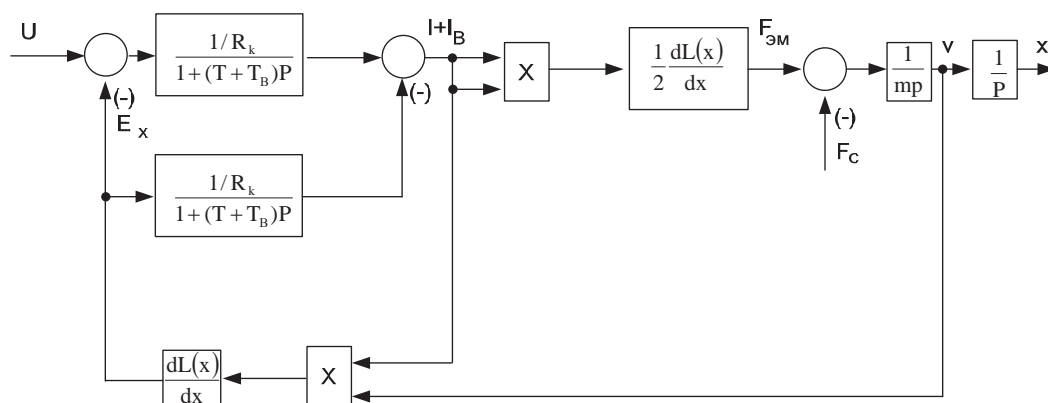


Рис. 2. Структурная схема для исследования динамических характеристик ЭМУ с учетом вихревых токов в магнитопроводе

Fig. 2. Block diagram for studying dynamic characteristics of EmD considering eddy currents in magnetic core

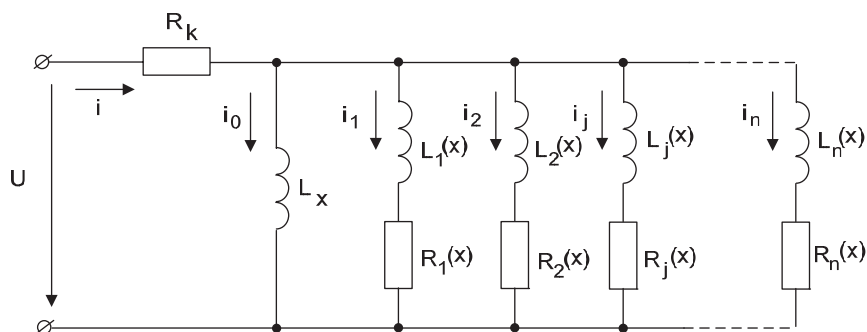


Рис. 3. Многоконтурная схема замещения ЭМУ с массивным якорем

Fig. 3. Multi stage equivalent circuit of EmD with solid anchor

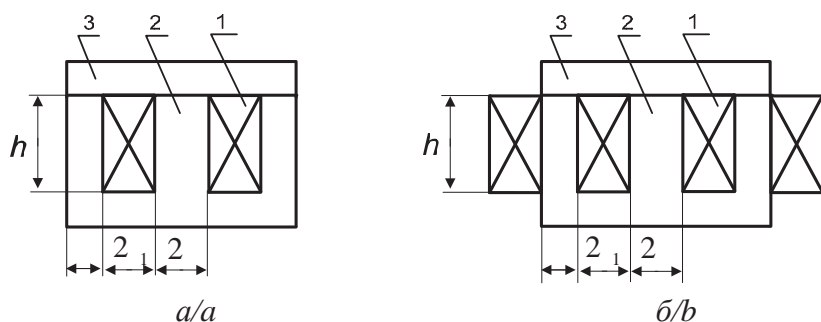


Рис. 4. Конструкция ЭМУ на основе Ш-образного магнитопровода: а) с одной; б) с двумя обмотками

Fig. 4. *EmD construction based on W-shaped magnetic core with: a) one; b) two windings*

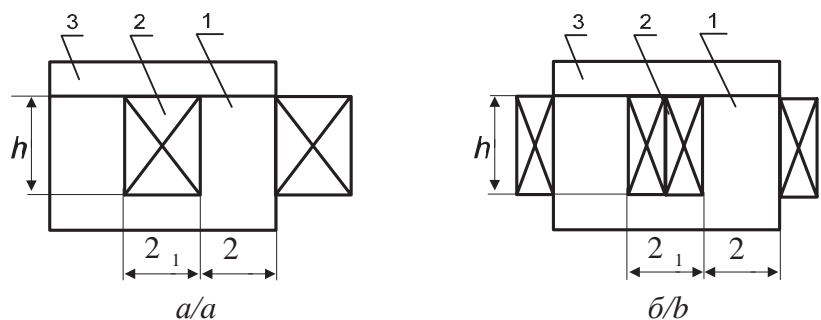


Рис. 5. Конструкция ЭМУ на основе П-образного магнитопровода: а) с одной; б) с двумя обмотками

Fig. 5. *EmD construction based on U-shaped magnetic core with: a) one; b) two windings*

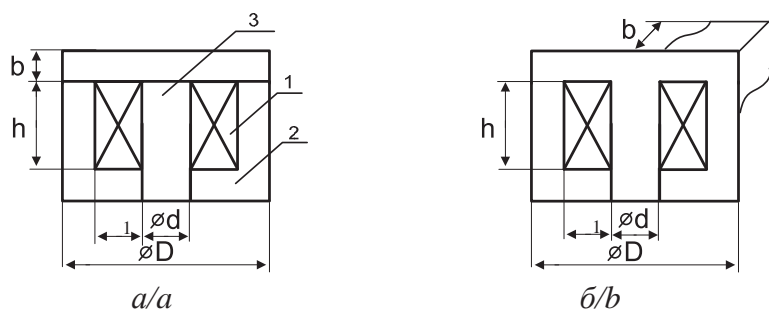


Рис. 6. Конструкция броневых ЭМУ: а) с цилиндрическим якорем и корпусом; б) с цилиндрическим якорем и корпусом в виде скобы

Fig. 6. Construction of shell-type EmD: a) with cylindrical anchor and body; b) U-shaped with cylindrical anchor and body

ЭМУ можно выразить через независимые переменные, определяющие отношение размеров катушечного окна и сечения магнитопровода. Для нахождения минимума массы ЭМУ необходимо опреде-

лить частные производные от выражения (1) по независимым переменным и приравнять их к нулю. В табл. 1. представлены соотношения составляющих минимальных масс конструкций ЭМУ для

Таблица 1. Минимальные по массе активных материалов конструкции ЭМУ**Table 1.** EmD constructions, minimal by weight of active materials

| Рисунок Figure | Составляющие массы ЭМУ EmD mass components | Оптимальные соотношения/Optimal ratios $n_{\text{опт}} = \frac{h}{2 \cdot l_1}; r_{\text{опт}} = \frac{b}{2 \cdot l}$ |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4, а | $m_c = 2S_c \gamma_c K_c (h + \ell + \ell_1),$ $m_{\text{я}} = 2S_c \gamma_c K_c (\ell + \ell_1),$ $m_m = 2S_{\text{окна}} \gamma_m K_3 (2\ell + b + \pi \cdot \ell_1)$ | $n_{\text{опт}} = \frac{h}{2 \cdot l_1} = 1 + \frac{\pi S_{\text{окна}} \gamma_m K_3}{2 S_c \gamma_c K_c},$ $r_{\text{опт}} = \frac{b}{2 \cdot l} = 1 + \frac{S_c \gamma_c K_c}{S_{\text{окна}} \gamma_m K_3}$ |
| 4, б | $m_c = S_c \gamma_c K_c (2h + \ell + \ell_1),$ $m_{\text{я}} = S_c \gamma_c K_c (2\ell + \ell_1),$ $m_m = 2S_{\text{окна}} \gamma_m K_3 (2\ell + 2b + \pi \cdot \ell_1)$ | $n_{\text{опт}} = \frac{h}{2 \cdot l_1} = 1 + \pi \frac{S_{\text{окна}} \gamma_m K_3}{S_c \gamma_c K_c},$ $r_{\text{опт}} = \frac{b}{2 \cdot l} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{S_c \gamma_c K_c}{S_{\text{окна}} \gamma_m K_3} \right]$ |
| 5, а | $m_c = 2S_c K_c \gamma_c (h + \ell + \ell_1),$ $m_{\text{я}} = 2S_c K_c \gamma_c (\ell_1 + 2\ell),$ $m_m = 2S_{\text{окна}} K_3 \gamma_m (2\ell + B + \pi \ell_1)$ | $n_{\text{опт}} = \frac{h}{2l_1} = 1 + \frac{\pi S_{\text{окна}} K_3 \gamma_m}{2 S_c K_c \gamma_c},$ $r_{\text{опт}} = \frac{B}{2l} = 1 + 2 \frac{S_c K_c \gamma_c}{S_{\text{окна}} K_3 \gamma_m}$ |
| 5, б | $m_c = 2S_c K_c \gamma_c (h + 2l + l_1),$ $m_{\text{я}} = 2S_c K_c \gamma_c (l_1 + 2l),$ $m_m = 2S_{\text{окна}} K_3 \gamma_m \left(2l + B + \frac{\pi l_1}{2} \right)$ | $n_{\text{опт}} = \frac{h}{2\ell_1} = 1 + \frac{\pi S_{\text{окна}} K_3 \gamma_m}{4 S_c K_c \gamma_c},$ $r_{\text{опт}} = \frac{B}{2\ell} = 1 + 2 \frac{S_c K_3 \gamma_c}{S_{\text{окна}} K_c \gamma_m}$ |
| 6, а | $m_c = S_c K_c \gamma_c (h + 3\ell + 2\ell_1),$ $m_{\text{я}} = S_c K_c \gamma_c (h + b),$ $m_m = S_{\text{окна}} K_3 \gamma_m (d + \ell_1)$ | $n_{\text{опт}} = \frac{h}{\ell_1} = 1 + \frac{\pi S_{\text{окна}} K_3 \gamma_m}{2 S_c K_c \gamma_c}$ |
| 6, б | $m_c = S_c K_c \gamma_c (h + 2b + 2\ell_1),$ $m_{\text{я}} = S_c K_c \gamma_c (h + b),$ $m_m = S_{\text{окна}} K_3 \gamma_m \pi (d + \ell_1)$ | $n_{\text{опт}} = \frac{h}{\ell_1} = 1 + \frac{\pi S_{\text{окна}} K_3 \gamma_m}{2 S_c K_c \gamma_c}$ |

прямоугольных (рис. 4 а, б; 5 а, б) и цилиндрических (рис. 6. а, б) магнитопроводов с одной и двумя намагничивающими обмотками.

На рис. 4–6 приняты обозначения: 1 – обмотка; 2 – магнитопровод; 3 – якорь; 2l – ширина среднего стержня; 2l₁ – ширина окна магнитопровода; h – высота катушечного окна; D – наружный диаметр магнитопровода; d – диаметр якоря; b – толщина диска полюса.

На рабочий процесс энергопреобразования в электромагнитном приводе возвратно-поступательного движения поршневого компрессора [13, 14] оказывают влияние многочисленные факторы, которые можно при оптимизации конструкций электромагнитных двигателей по максимуму КПД выразить через обобщенные параметры импульсного источника питания, электромагнитного двигателя и компрессора [15]. К ним относятся:

- для источника питания

максимальное значение напряжения на обмотке двигателя (U_n), угол укорочения импульса напряжения (α), фазовый угол сдвига между квадратом потокосцепления и законом движения якоря (ωt_k), частота питающего напряжения (f);

- для электромагнитного двигателя

значение инверсной индуктивности обмотки на середине хода якоря (a), глубина модуляции инверсной индуктивности обмотки (m), добротность двигателя ($\rho = Ra/\omega$, где R – постоянное активное сопротивление, отражающее тепловые потери в сердечнике и в обмотке, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

- для компрессора

среднее значение мощности, передаваемой в механическую подсистему (P_m), ход поршня ($2x_m$).

Использование в анализе процессов энергопреобразования в электромагнитном двигателе линейной зависимости инверсной индуктивности (величины обратной индуктивности) обмотки от хода якоря при отсутствии в первом приближении насыщения стали магнитопровода позволяет математически сформулировать задачу по отысканию оптимальных токов и напряжений в функции времени электромагнитного двигателя, обеспечивающих периодический режим его работы с максимальным КПД [16]. В ходе ее решения исследование функции относительных потерь P_r^* от параметра ωt_k ведет к получению следующих математических выражений, представленных в табл. 2.

Таблица 2. Решение задачи оптимального управления электромагнитным двигателем на заданный закон движения якоря
Table 2. Solution of a problem of electromagnetic motor optimal control on the desired law of anchor movement

| Величина Value | | Математическое описание Mathematical description | Примечание Note |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Функция квадрата потокосцепления Function of linkage square | | $\psi^2(t) = \psi_k^2 [1 + \cos k\omega(t - t_k)]$ | где $\psi_k = \sqrt{2 \cdot U_n / (k\omega)}$ – действующее значение потокосцепления linkage effective value; $k = \frac{\pi}{\pi - \alpha}$ – коэффициент скважности импульсов pulse ratio |
| Напряжение на Voltage across | индуктивности inductance | $u_L(t) = -\frac{k\omega \cdot \psi_k}{\sqrt{2}} \sin \frac{k\omega(t - t_k)}{2}$ | $x(t) = x_0 + \sum_{v=1}^N [x_{vs} \sin v\omega t] + \sum_{v=1}^N [x_{vc} \cos v\omega t]$ – разложение закона движения якоря в ряд Фурье по синусным x_{vs} и косинусным x_{vc} составляющим anchor movement law Fourier transformation in terms of sine x_{vs} and cosine x_{vc} components |
| | активном сопротивлении active resistance | $u_r(t) = \sqrt{2} \psi_k R a \left[1 + m \left(\frac{x(t)}{x_M} - 1 \right) \right] \cos \frac{k\omega(t - t_k)}{2}$ | |
| | зажимах обмотки двигателя motor winding terminal | $u(t) = u_L(t) + u_r(t)$ | |
| Ток Current | | $i(t) = \sqrt{2} \psi_k a \left[1 + m \left(\frac{x(t)}{x_M} - 1 \right) \right] \cos \frac{k\omega(t - t_k)}{2}$ | |
| Мощность Power | потребляемая двигателем consumed by a motor | $P_c(t) = 2\omega \psi_k^2 \left\{ \frac{R\Gamma(t)}{\omega} \cos^2 \frac{k\omega(t - t_k)}{2} - \frac{k}{4} \sin k\omega(t - t_k) \right\} \Gamma(t)$ | $0 \leq x(t) \leq 2x_M$ – граничные значения хода якоря anchor movement boundary values |
| | передаваемая в механическую подсистему transmitted to a mechanical subsystem | $P_a(t) = -\frac{1}{2} a m \psi_k^2 [1 + \cos k\omega(t - t_k)] \frac{x'(t)}{x_M}$ | $\Gamma(t) = a \left[1 + m \left(\frac{x(t)}{x_M} - 1 \right) \right] -$ зависимость инверсной индуктивности обмотки от хода якоря dependence of winding inverse inductance on anchor movement |
| | тепловых потерь of heat loss | $P_f(t) = i^2(t) R$ | |
| | поступающая в обмотку от внешнего источника from external source to a winding | $P_M(t) = -\frac{1}{2} \omega \psi_k^2 \Gamma(t) k \sin k\omega(t - t_k)$ | |
| | магнитного поля of magnetic field | $P_\mu(t) = P_M(t) - P_a(t)$ | |
| | | | |

Представленные в табл. 2 математические выражения величин справедливы на интервале времени $-\pi + \alpha + \omega t_k \leq \omega t \leq \pi - \alpha + \omega t_k$, вне этого интервала они обращаются в нуль. Для определения оптимального угла сдвига ωt_k по фазе между функциями квадрата потокосцепления $\psi^2(t)$ и хода якоря $x(t)$, при котором КПД электромагнитного двигателя

$$\eta = (1 + P_r^*)^{-1}$$

достигает максимума, необходимо выполнить условие $dP_r^*(\omega t_k)/d\omega t_k = 0$, или иначе

$$P_r'(\omega t_k) \cdot P_M(\omega t_k) - P_M'(\omega t_k) \cdot P_r(\omega t_k) = 0,$$

где

$$P_r'(\omega t_k) = \frac{b\omega}{2\pi} \psi_k^2 \cdot k^2 \times \\ \times \sum_{v=1}^n v(-1)^v \cdot [x_{vc} \cdot \cos v\omega t_k + x_{vs} \sin v\omega t_k] \cdot \frac{\sin v\alpha}{v^2 - k^2}, \\ P_r'(\omega t_k) = R \psi_k^2 \cdot \frac{k^2}{\pi} \times \\ \times \sum_{v=1}^{2n} (-1)^v \cdot [B_v \cdot \cos v\omega t_k - A_v \sin v\omega t_k] \cdot \frac{\sin v\alpha}{v^2 - k^2},$$

$$A_0 = a^2 \left[1 + m \left(\frac{x_0}{x_M} - 1 \right) \right]^2 + \frac{b^2}{2} \sum_{n=1}^N (x_{nc}^2 + x_{ns}^2), \\ A_v = 2 \cdot a \cdot b \cdot x_{vc} \left[1 + m \left(\frac{x_0}{x_M} - 1 \right) \right] + \\ + \frac{b^2}{2} \sum_{n=1}^{2N} \{ x_{ns} [x_{(n+v)s} + x_{(n-v)s}] + x_{nc} [x_{(n+v)s} + x_{(n-v)s}] \}, \\ B_v = 2 \cdot a \cdot b \cdot x_{vs} \left[1 + m \left(\frac{x_0}{x_M} - 1 \right) \right] + \\ + \frac{b^2}{2} \sum_{n=1}^{2N} \{ x_{nc} [x_{(n+v)s} + x_{(n-v)s}] - x_{ns} [x_{(n+v)s} + x_{(n-v)s}] \}.$$

Установленная решением задачи оптимизации в аналитическом виде взаимосвязь обобщенных параметров импульсного источника питания, электромагнитного двигателя и компрессора, доставляющая максимум КПД электромеханического преобразователя, была положена в основу алгоритма исследования процессов энергопреобразования в электромагнитном двигателе, который реализован в программе «Анализ» [17].

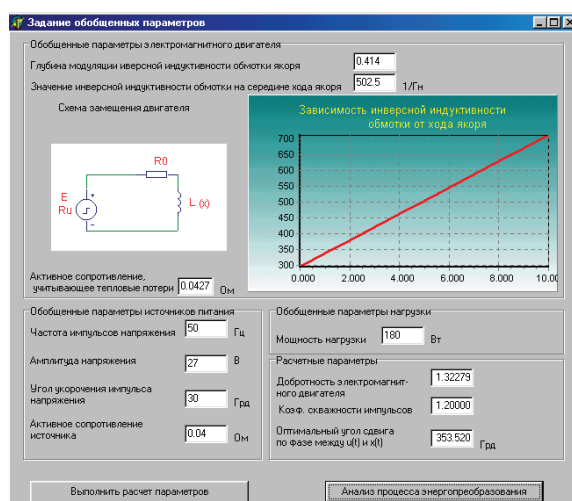


Рис. 7. Обобщенные параметры электромагнитного двигателя, источника питания и компрессора

Fig. 7. Generalized parameters of electromagnetic motor, supply source and compressor

Разработанная программа позволяет на стадии проектирования произвести поверочный расчет предварительно выбранных параметров, а также получить необходимый угол сдвига ωt_k между квадратом потокоцепления и ходом якоря, при котором обеспечивается максимум КПД привода.

На рис. 7 представлено окно ввода обобщенных параметров элементов электромагнитного приво-

да. Расчет для несинусоидального закона движения якоря осуществлялся при следующих исходных данных:

- для электромагнитного двигателя:

глубина модуляции инверсной индуктивности обмотки якоря, $m=0,414$; значение инверсной индуктивности обмотки на середине хода якоря, $a=502,5 \text{ Гн}^{-1}$; активное сопротивление, учитывающее тепловые потери, $R=0,043 \text{ Ом}$;

- для источника питания:

частота питающего напряжения $f=50 \text{ Гц}$; амплитуда напряжения $U_d=27 \text{ В}$; угол укорочения импульса напряжения $\alpha=30^\circ$; активное сопротивление источника $R=0,04 \text{ Ом}$;

- для компрессора:

мощность нагрузки $P_m=180 \text{ Вт}$.

На рис. 8 представлены результаты проведенного исследования процессов энергопреобразования электромагнитного привода. В данном окне осуществляется вывод расчетных значений мощности, передаваемой из электрической цепи в механическую подсистему, мощность тепловых потерь, максимально возможный КПД электромагнитного двигателя, а также действующее значение силы тока в цепи.

В табл. 3–5 представлены результаты исследования режимов работы электромагнитного привода при варьировании значений глубины модуляции инверсной индуктивности обмотки, угла укорочения импульсов питающего напряжения для различных законов движения якоря.

Таблица 3. Влияние глубины модуляции на параметры электромагнитного привода при $a=502,5$; $\alpha=30^\circ$; $U_d=27 \text{ В}$; $f=50 \text{ Гц}$; $R=0,083 \text{ Ом}$

Table 3. Influence of modulation depth on electromagnetic drive parameters at $a=502,5$; $\alpha=30^\circ$; $U_d=27 \text{ В}$; $f=50 \text{ Hz}$; $R=0,083 \text{ Ohm}$

| Закон движения якоря, $x(t) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (m) Anchor movement law | Параметры оптимального управления Optimal control parameters | Глубина модуляции инверсной индуктивности обмотки, m Modulation depth of winding inverse inductance, m | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
| $x(t)=5-5\sin\omega t$ синусоидальный ход якоря Anchor sinusoidal motion | $P_m, \text{ Вт}$ | 42,17 | 84,35 | 126,5 | 168,7 | 210,8 | 253 | 295,2 |
| | $\eta, \%$ | 19,04 | 31,69 | 40,41 | 46,66 | 51,22 | 54,57 | 57,05 |
| | $I, \text{ А}$ | 46,56 | 46,88 | 47,49 | 48,28 | 49,27 | 50,46 | 51,84 |
| $x(t)=4-5\sin\omega t-\cos 2\omega t$ несинусоидальный ход якоря Anchor nonsinusoidal motion | $P_m, \text{ Вт}$ | 42,47 | 84,94 | 127,4 | 169,8 | 212,3 | 254,8 | 297,2 |
| | $\eta, \%$ | 19,76 | 33,54 | 43,4 | 50,58 | 55,85 | 59,74 | 62,61 |
| | $I, \text{ А}$ | 45,65 | 45,1 | 44,81 | 44,79 | 45,05 | 45,56 | 46,33 |

Таблица 4. Влияние угла укорочения импульса напряжения на параметры электромагнитного привода при $a=502,5$; $m=0,414$; $U_d=27 \text{ В}$; $f=50 \text{ Гц}$; $R=0,083 \text{ Ом}$

Table 4. Influence of voltage pulse reduction angle on electromagnetic drive parameters at $a=502,5$; $m=0,414$; $U_d=27 \text{ В}$; $f=50 \text{ Hz}$; $R=0,083 \text{ Ohm}$

| Закон движения якоря, $x(t) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (m) Anchor movement law | Параметры оптимального управления Optimal control parameters | Угол укорочения импульса напряжения α , град Voltage pulse reduction angle α , deg | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| $x(t)=5-5\sin\omega t$ синусоидальный ход якоря Anchor sinusoidal motion | $P_m, \text{ Вт}$ | 220,3 | 197,8 | 174,6 | 151,2 | 128,3 | 106,4 | 86,06 |
| | $\eta, \%$ | 43,84 | 45,68 | 47,39 | 48,97 | 50,42 | 51,75 | 52,96 |
| | $I, \text{ А}$ | 58,4 | 53,33 | 48,41 | 43,65 | 39,05 | 34,63 | 30,4 |
| $x(t)=4-5\sin\omega t-\cos 2\omega t$ несинусоидальный ход якоря Anchor nonsinusoidal motion | $P_m, \text{ Вт}$ | 220 | 198 | 175,8 | 153,3 | 131,4 | 110,4 | 90,65 |
| | $\eta, \%$ | 47,69 | 49,59 | 51,42 | 53,17 | 54,86 | 56,49 | 58,06 |
| | $I, \text{ А}$ | 54,07 | 49,37 | 44,81 | 40,41 | 36,16 | 32,06 | 28,13 |

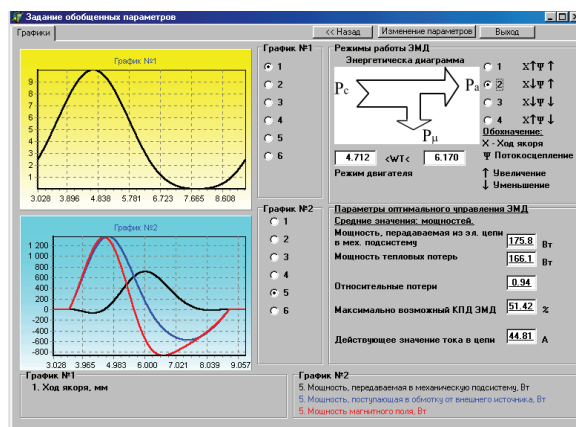


Рис. 8. Результаты исследования режимов работы электромагнитного привода

Fig. 8. Results of investigation of electromagnetic drive operation mode

Процесс энергопреобразования в электромагнитном двигателе по данным табл. 3 для несинусоидального закона движения якоря рассмотрен на рис. 9, 10.

На рис. 9 приведены временные зависимости: а) перемещения якоря; б) квадрата потокосцепления; в) потокосцепления обмотки двигателя; тока (кривая 1, г) и напряжения (кривая 2, г); мощно-

сти, передаваемой в механическую подсистему (кривая 1, д), мощности, потребляемой двигателем (кривая 2, д) и мощности магнитного поля (кривая 3, д); мощности, поступающей в обмотку (индуктивность) от внешнего источника (кривая 1, е) и мощности тепловых потерь (кривая 2, е).

Таблица 5. Влияние закона движения якоря на параметры электромагнитного привода при $a=502,5$; $m=0,414$; $\alpha=30^\circ$; $U_d=27$ В; $f=50$ Гц; $R=0,083$ Ом

Table 5. Influence of anchor movement law on electromagnetic drive parameters at $a=502,5$; $m=0,414$; $\alpha=30^\circ$; $U_d=27$ V; $f=50$ Hz; $R=0,083$ Ohm

| Закон движения якоря, $x(t) \cdot 10^{-3}$ м (m) Anchor movement law | Оптимальный угол управления ωk_i , град Optimum control angle $\omega \omega k_i$, deg | Мощность компрессора P_m , Вт Compressor power P_m , Wt | Тепловые потери P_r , Вт Heat loss P_r , Wt | Кпд двигателя η , % Motor efficiency | Ток I , А Current |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------|
| $x(t)=5-5\sin\omega t$ | 0,17 | 174,6 | 193,8 | 47,39 | 48,41 |
| $x(t)=4-5\sin\omega t - \cos 2\omega t$ | 353,5 | 175,8 | 166,1 | 51,42 | 44,81 |

На рис. 10 по полученным в результате расчета временным диаграммам электрических величин показано направление истоков энергии электро-

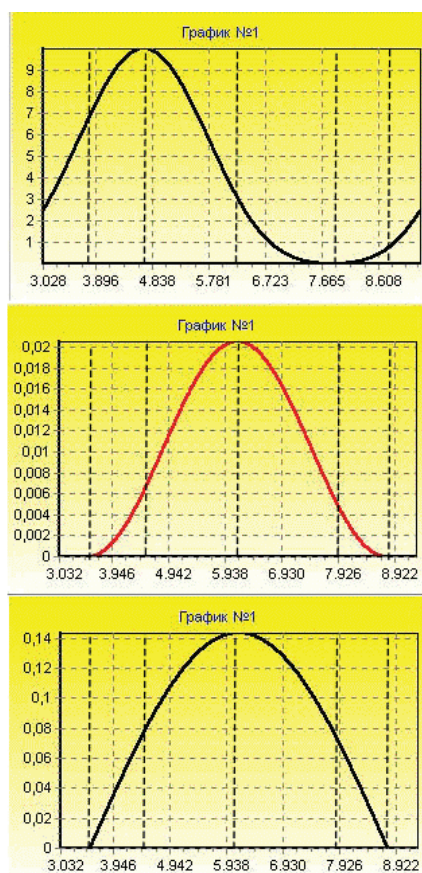
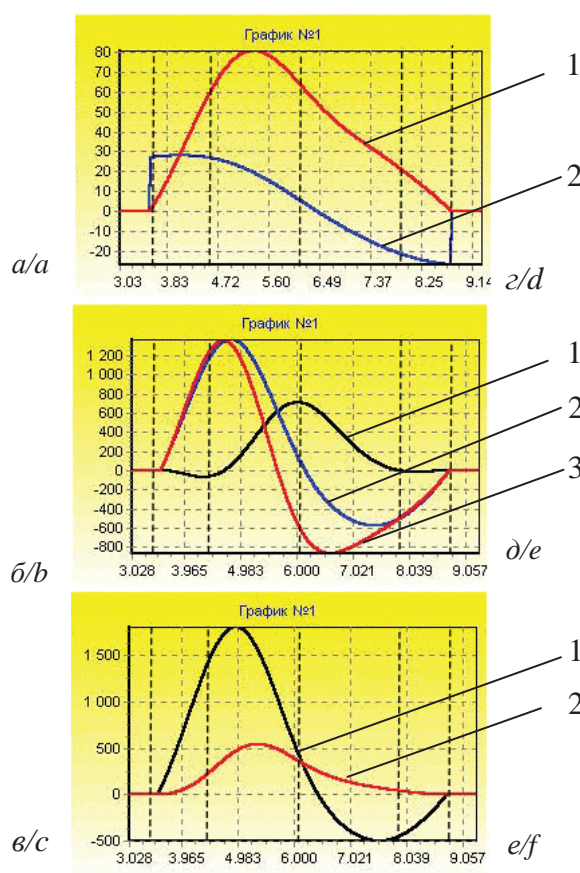


Рис. 9. Временные зависимости расчетных величин

Fig. 9. Time dependence of rated values



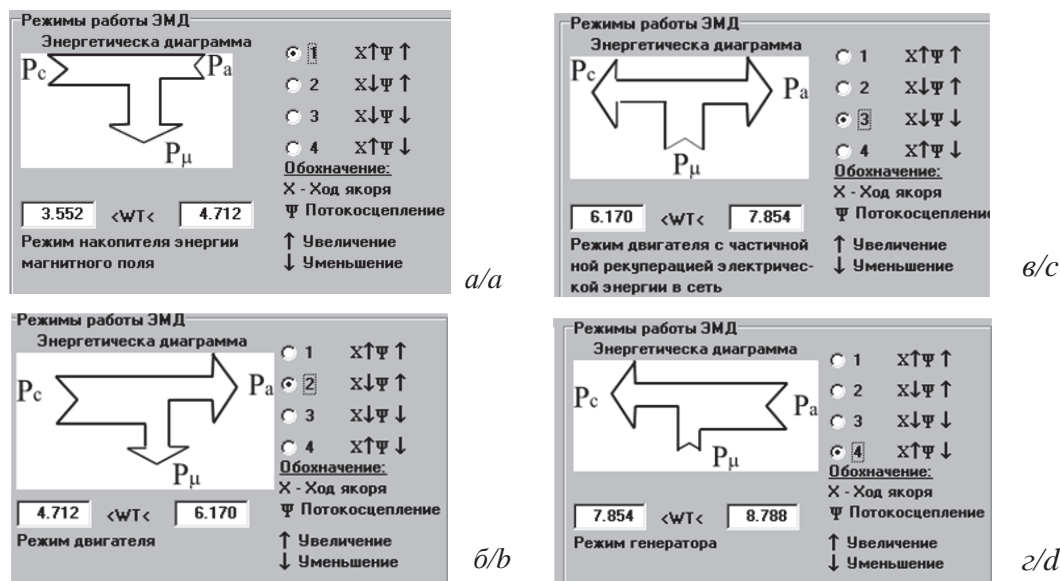


Рис. 10. Направление истоков энергии в электромагнитном приводе: а) режим накопителя энергии; б) двигательный режим; в) режим с частичной рекуперацией энергии в сеть; характеризуется потреблением не только механической энергии внешнего источника, но и электрической энергии из сети; г) генераторный режим.

Fig. 10. Energy source directions in electromagnetic drive: а) energy storage mode; б) motor operation; в) energy partial recovery mode; г) generator mode

магнитного двигателя в определенные интервалы времени соответствующие общим принципам электромеханического преобразования [18].

В режиме накопителя энергии механическая и электрическая энергии преобразуются в энергию магнитного поля и запасаются в магнитной системе. Двигательный режим обусловлен тем, что двигатель потребляет от источника питания электрическую энергию, которая за вычетом тепловых потерь частично или полностью преобразуется в механическую энергию. Режим с частичной рекуперацией энергии в сеть объединяет процессы, при которых совершается механическая работа под действием электромагнитной силы притяжения с преодолением внешних механических сил, но часть энергии магнитного поля, запасаемой в магнитной системе двигателя, возвращается источнику питания. Генераторный режим объединяет процессы, связанные с совершением работы внешних механических сил по преодолению электромагнитной силы притяжения, а уменьшение потокоосцепления свидетельствует об отдаче электрической энергии источнику питания

Заключение

В результате исследований, выполненных в работе, разработано алгоритмическое и программное обеспечение по выбору оптимальных электромагнитных параметров ЭМУ. Программное обеспечение учитывает оптимальное соотношение размеров однокатушечных и двухкатушечных магнитных систем ЭМУ, удовлетворяющих минимуму массы активных материалов и для случая использования ЭМУ в качестве привода электромагнитных механизмов макси-

мум коэффициента полезного действия. Представленные в алгоритмическом обеспечении ЭМУ расчетные соотношения устанавливают взаимосвязь обобщенных параметров импульсного источника питания, электромагнитного двигателя и поршневого компрессора на заданный закон движения якоря.

Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение позволяет:

«Статика ЭМУ»

- определить параметры зависимости инверсной индуктивности обмотки ЭМУ от хода якоря (глубину модуляции инверсной индуктивности обмотки, значение инверсной индуктивности обмотки на середине хода якоря) по заданным геометрическим размерам магнитной системы ЭМУ, учитывающей прямоугольные и цилиндрические магнитопроводы, различную форму рабочего зазора;
 - построить основные характеристики ЭМУ (статическую тяговую характеристику, зависимость индуктивности обмотки от хода якоря).
- #### «Синтез ЭМУ»
- вычислить амплитуды и показатели степени экспоненциальных составляющих тока обмотки ЭМУ при отключении ее от источника питания и закорачивании накоротко при фиксированном положении якоря;
 - определить параметры многоконтурной схемы замещения ЭМУ с массивным якорем по методу затухания постоянного тока в цепи обмотки в зависимости от величины рабочего зазора;
 - получить аппроксимирующее выражение параметров схемы замещения ЭМУ от величины рабочего зазора;

«Анализ ЭМУ»

- учесть влияние различных факторов (закон движения якоря, угол укорочения импульса, глубина модуляции инверсной индуктивности обмотки и др.) на показатели работы ЭМУ в качестве привода поршневых компрессоров при обеспечении максимума коэффициента полезного действия;
- построить временные диаграммы электрических величин (тока; напряжения на обмотке двигателя; мощности, потребляемой двигателем; мощности, передаваемой в механическую подсистему; мощности магнитного поля и др.), определяющих основные режимы энергопреоб-

разования в ЭМУ, направление истоков энергии электромагнитного двигателя в определенные интервалы времени (режим двигателя, режим генератора, режим двигателя с частичной рекуперацией электрической энергии и режим накопителя энергии магнитного поля).

Результаты численного расчета магнитного поля ЭМУ и теплопередачи могут быть использованы для корректировки геометрии магнитной системы и обмоточных данных в соответствии с техническим заданием по оптимальному проектированию [19, 20].

Разработанные алгоритмы и программы по оптимальному проектированию ЭМУ обладают новизной и практической значимостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
2. Анненков А.Н., Львович И.Я., Шиянов А.И. Электропривод на базе бессердечникового линейного двигателя с редкоземельными магнитами // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 4. – С. 20–23
3. Татевосян А.С., Пимонова У.В. Аппаратно-программный измерительный комплекс для исследования динамики электромагнита постоянного тока // Россия молодая: Передовые технологии – в промышленность! Матер. V Всеросс. молод. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск, 2013. – Кн. 2. – С. 329–332.
4. Медведев В.В., Батищев Д.В., Гуммель А.А. Экспериментальное определение интегральных характеристик линейного электромагнитного привода // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 22–25.
5. Моделирование электромеханических процессов в энергосберегающих электромагнитных приводах вибрационных установок / А.А. Черно, А.П. Гуров, А.С. Минчула, Д.Л. Безверхний // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 3. – С. 397–399.
6. Пуило Г.В., Насыпаная Е.П., Левин Д.М. Математическое моделирование электромагнитных характеристик электротехнических стелей // Электротехника и электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 29–32.
7. Нейман Л.А., Рогова О.В. К исследованию тяговых характеристик электромагнитных приводов с учетом зубчатости элементов магнитопровода // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2013. – № 1 (20). – С. 100–108.
8. Геча В.Я., Мильшин А.Ю. Определение тягового усилия и динамических характеристик цилиндрического электромагнита с различной формой штока // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 1. – С. 2–7.
9. Татевосян А.С., Татевосян А.А. Программное обеспечение по исследованию моделей электромагнитных устройств // Омский научный вестник. – 2001. – Вып. 14. – С. 133–135.
10. Дементьев Ю.Н. Математическое описание электроприводов переменного тока с вентильным преобразователем в нормальном и аварийном режимах. // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 131–136.
11. Jansen L. A semi-explicit formulation of a coupled electromagnetic field/circuit problem // Original Research Article Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2014, May. – V. 262. – P. 150–160.
12. Певчев В.П., Кудинов А.К. Составление схем замещения электромагнитных систем // Электротехника. – 2012. – № 03. – С. 32–36.
13. Nan-Chyuan Tsai, Chao-Wen Chiang. Design and analysis of magnetically-drive actuator applied for linear compressor // Original Research Article Mechatronics. – 2010, August. – V. 20. – Iss. 5. – P. 596–603.
14. Jong Kwon Kim, Ji Hwan Jeong. Dynamic response of a capacity-modulated linear compressor to supply voltage disturbances // Original Research Article International Journal of Refrigeration. – 2014, April. – V. 40. – P. 84–96.
15. Абдуллаев Я.Р. Минимизация потерь активной мощности в магнитных системах переменного тока // Электричество. – 2011. – № 12. – С. 26а–35.
16. An experimental and numerical study on dynamic characteristic of linear compressor in refrigeration system / Hyun Kim, Chul-gi Roh, Jong-kwon Kim, Jong-min Shin, Yujin Hwang, Jae-keun Lee // International Journal of Refrigeration. – 2009, November. – V. 32. – Iss. 7. – P. 1536–1543.
17. Татевосян А.С., Татевосян А.А., Захарова Н.В. Анализ процессов энергопреобразования в электромагнитных механизмах с массивным сердечником при заданном законе движения // Динамика систем механизмов и машин: Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Омск, 2002. – С. 205–207.
18. Ковалев Ю.З., Татевосян А.С., Татевосян А.А. Исследование рабочих процессов энергопреобразования в электромагнитном приводе на заданный закон движения якоря при обеспечении максимума КПД // Омский Научный вестник. – 2002. – Вып. 18. – С. 78–83.
19. Татевосян А.А., Осинина Е.В. Расчет оптимальных конструкций электромагнитов постоянного тока // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! Матер. V Всеросс. молод. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск, 2013. – № 2. – С. 336–340
20. Лысенко О.А., Мирошник А.И. Режимы энергосбережения электромеханического комплекса: центробежный насос – асинхронный двигатель // Омский научный вестник. – 2011. – № 2 (98). – С. 145–148.

Поступила 20.05.2014 г.

UDC 621.313

CALCULATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF OSCILLATION MOTION ELECTROMAGNETIC ACTUATOR

Andrey A. Tatevosyan,Cand. Sc., Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue,
Omsk, 644050, Russia. E-mail: karo1@mail.ru**Aleksandr S. Tatevosyan,**Cand. Sc., Omsk State Technical University, 11, Mira Avenue,
Omsk, 644050, Russia. E-mail: ast_51@mail.ru

This paper outlines the main problems in the theory, calculation and optimal design of electromagnetic device, gives optimal ratio of electromagnetic device structures based on conditions of mass minimum of active materials required for their manufacturing. The authors have considered the examples of optimum design of electromagnetic devices conforming the reliability requirements of the calculations carried out and the validity of the results obtained. The paper introduces a comparative analysis of electromagnetic device designs by the condition of mass minimum of active materials having magnetic cores based on the W- and U-shaped electrical iron with one and two field windings, and armored cylindrical magnetic cores, cylindrical body and an anchor in the form of staples while providing the set output parameters (traction or power). It is shown that the mass of electromagnetic devices based on magnetic cores with two field windings is by 10–30 % less than that with one coil. By the example of designing electromagnetic actuator of a piston compressor and using the software developed the authors studied optimum operating conditions for a given energy conversion of electromagnetic device armature law of motion. Maximum of electromagnetic device efficiency was accepted as the optimality criterion when solving the problem. The impact of eddy currents in steel on drive energy performance is accounted by synthesizing multi-loop equivalent circuits of electromagnetic device. Calculation of magnetic field in determining static characteristics of electromagnetic devices is carried out by the method of magnetic flux probable path. The developed algorithms and programs for optimal design of electromagnetic devices have novelty and practical significance.

Key words:

Electromagnetic drive, optimization, reciprocating compressor, electromagnet, multi stage equivalent circuit, maximum efficiency.

REFERENCES

- Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privoda dlya impulsnykh i vibroimpulsnykh tekhnologii [Electromagnetic drives for pulse and impulse technologies]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Elektromekhanika*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
- Annenkov A.N., Lvovich I.Ya., Shiyonov A.I. Elektroprivod na baze besserdechnikovogo lineynogo dvigatelya s redkozemelnymi magnitami [Actuator on the coreless linear motor with rare earth magnets]. *Elektrotekhnicheskiye komplekisy i sistemy upravleniya*, 2013, no. 4, pp. 20–23.
- Tatevosyan A.S., Pimonova U.V. Apparato-programmny izmeritelny kompleks dlya issledovaniya dinamiki elektromagnitnogo toka [Hardware and software measurement system for studying the DC electromagnet dynamics]. *Rossiia molodaya: Peredovye tekhnologii – v promyshlennost! Materialy V Vseros. molod. nauch.tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem* [Young Russia: advanced technologies into industry. Proc. V All-Russian youth scientific conference]. Omsk, 2013. Vol. 2, pp. 329–332.
- Medvedev V.V., Batishchev D.V., Gummel A.A. Eksperimentalnoye opredeleniye integralnykh kharakteristik lineynogo elektromagnitnogo privoda [Experimental determination of the integral characteristics of linear electromagnetic actuator]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Severo-Kavkazskiy region. Vol. Tekhnicheskkiye nauki*, 2014, no. 1, pp. 22–25.
- Cherno A.A., Gurov A.P., Minchula A.S., Bezverkhny D.L. Modelirovaniye elektromekhanicheskikh protsessov v energosberegayushchikh elektromagnitnykh privodakh vibratsionnykh ustanovok [Simulation of electromechanical processes in energy-efficient electromagnetic drives of vibrating machines]. *Elektrotekhnicheskiye i kompyuternyye sistemy*, 2011, no. 3, pp. 397–399.
- Puylo G.V., Nasypanaya E.P., Levin D.M. Matematicheskoye modelirovaniye elektromagnitnykh kharakteristik elektrotekhnicheskikh staley [Mathematical modeling of the electromagnetic properties electrical steels]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*, 2011, no. 6, pp. 29–32. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-elektromagnitnykh-kharakteristik-elektrotekhnicheskikh-staley> (accessed 15 May 2014).
- Neyman L.A., Rogova O.V. K issledovaniyu tyagovykh kharakteristik elektromagnitnykh privodov s uchetoм zubchatosti elementov magnitprovoda [On the investigation of the traction characteristics of electromagnetic actuators with the jagged edges of the magnetic elements]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly RF*, 2013, no. 1 (20), pp. 100–108.
- Gecha V.Ya., Milshin A.Yu. Opredeleniye tyagovogo usiliya i dinamicheskikh kharakteristik tsilindricheskogo elektromagnita s razlichnoy formoy shtoka [Determination of traction and dynamic performance of a cylindrical electromagnet with different forms stem]. *Elektrotekhnicheskiye komplekisy i sistemy upravleniya*, 2013, no. 1, pp. 2–7. Available at: <http://www.v-ite.ru/electrotech/2013/01/pdf/2013-01-01.pdf> (accessed 15 May 2014).
- Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A. Programmnnoye obespecheniye po issledovaniyu modeley elektromagnitnykh ustroystv [Software to study models of electromagnetic devices]. *Omsky nauchnyy vestnik*, 2001, vol. 14, pp. 133–135.
- Dementyev Yu.N. Matematicheskoye opisaniye elektropriwodov peremennogo toka s ventilyem preobrazovatelem v normalnom i avarnom rezhimakh [Mathematical description of AC drives with the converter in normal and emergency modes]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 131–136. Available at: <http://izvestiya.tpu.ru/ru/archive/new/article.html?id=252749&journalId> (accessed 15 May 2014).
- Jansen L. A semi-explicit formulation of a coupled electromagnetic field/circuit problem. *Original Research Article Journal of*

- Computational and Applied Mathematics*, 2014, May, vol. 262, pp. 150–160. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377042713005967> (accessed 15 May 2014).
12. Pevchev V.P., Kudinov A.K. Sostavleniye skhem zameshcheniya elektromagnitnykh sistem [Compilation of equivalent circuits of electromagnetic systems]. *Elektrotehnika*, 2012, no. 03, pp. 32–36.
13. Nan-Chyuan Tsai, Chao-Wen Chiang. Design and analysis of magnetically-drive actuator applied for linear compressor. *Original Research Article Mechatronics*, 2010, August, vol. 20, Iss. 5, pp. 596–603. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415810001030> (accessed 15 May 2014).
14. Jong Kwon Kim, Ji Hwan Jeong. Dynamic response of a capacity-modulated linear compressor to supply voltage disturbances. *Original Research Article International Journal of Refrigeration*, 2014, April, vol. 40, pp. 84–96.
15. Abdullayev Ya.R. Minimizatsiya poter aktivnoy moshchnosti v magnitnykh sistemakh peremennogo toka [Minimization of active power losses in magnetic AC systems]. *Elektrichestvo*, 2011, no. 12, pp. 26a–35.
16. Hyun Kim, Chul-gi Roh, Jong-kwon Kim, Jong-min Shin, Yujin Hwang, Jae-keun Lee. An experimental and numerical study on dynamic characteristic of linear compressor in refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 2009, November, vol. 32, Iss. 7, pp. 1536–1543. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014070071100106X> (accessed 15 May 2014).
17. Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A., Zakharova N.V. Analiz protsessov energopreobrazovaniya v elektromagnitnykh mekhanizмах s massivnym serdechnikom pri zadannom zakone dvizheniya [Analysis of energy conversion in electromagnetic mechanisms with a massive core for the law of motion]. *Dinamika sistem mekhanizmov i mashin: Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Dynamics of systems, mechanisms and machines]. Omsk, 2002. pp.205–207.
18. Kovalev Yu.Z., Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A. Issledovaniye rabochikh protsessov energopreobrazovaniya v elektromagnitnom privode na zadanny zakon dvizheniya yakorya pri obespechenii maksimuma KPD [The study of energy conversion workflows in an electromagnetic actuator for a given law of motion of the armature, while ensuring maximum efficiency]. *Omsky Nauchny vestnik*, 2002, Iss. 18, pp.78–83.
19. Tatevosyan A.A., Osinina E.V. Raschet optimalnykh konstruktsiy elektromagnitov postoyannogo toka [Calculation of the optimal designs electromagnets DC]. *Rossiia molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost!* [Young Russia: advanced technologies into industry]. Omsk, 2013. No. 2, pp. 336–340.
20. Lysenko O.A., Miroshnik A.I. Rezhimy energosberezheniya elektromekhanicheskogo kompleksa: tsentrobezhny nasos – asinkhronny dvigatel [Electromechanical power-saving modes in: pump – induction motor]. *Omsky nauchny vestnik*, 2011, no. 2 (98), pp. 145–148.

Received: 20 May 2014.