

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАШИНОЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ю.П. Филюшов, П.В. Зонов, Б.В. Малоземов, М.Е. Вильбергер

Рассмотрены функции энергетического состояния, на основании которых выявляются энергетически желаемые режимы работы электрической машины. Посредством применения функций энергетического состояния и принципа максимума, показан оптимальный синтез управляющих воздействий. Критерием оптимальности является время.

Ключевые слова: электропривод переменного тока, оптимальное управление, функции энергетического состояния, принцип Максимума.

Введение

Основной задачей управления электрической машиной является формирование электромагнитного момента, посредством которого осуществляется движение исполнительного механизма по заданной траектории.

Аналогично управлению машиной постоянного тока, существующие законы управления машиной переменного тока определены концепцией формирования электромагнитного момента при постоянном значении энергии магнитного поля, частным случаем которой является управление при стабилизации потокосцепления. Такое управление предполагает предварительное намагничивание магнитной системы электрической машины, являющейся взаимосвязанным и многоканальным объектом управления. Требования к повышению динамической точности и качеству переходных процессов достигаются посредством корректирующих устройств.

Несмотря на широкое применение, управление электрической машиной в условиях стабилизации потокосцепления статора или ротора имеет ряд недостатков. К ним относится низкая энергетическая эффективность режимов работы электропривода переменного тока при отклонении нагрузки от номинальной величины, большая мощность, подводимая к обмоткам двигателя для быстрого изменения электромагнитного момента. Ясно видна ограниченность ресурсов по управлению и сложность достижения больших скоростей движения.

Вместе с тем, являясь энергосиловой установкой, электропривод должен наилучшим образом отвечать энергетическим и динамическим требованиям, предъявляемым к системам управления технологическими процессами.

Исследование процессов преобразования энергии в обобщенной электрической

машине показало, что мощность, подводимую к обмоткам статора и ротора двигателя для быстрого изменения электромагнитного момента в условиях стабилизации энергии магнитного поля, можно уменьшить, а энергетическую эффективность работы электропривода, при различной нагрузке, существенно повысить [1].

Известные методы оптимального управления машиной переменного тока [2], в силу сложности математического описания и неоднозначности формальной части задачи управления, не нашли своего широкого применения. Трудности выбора критерия оптимальности объясняются тем, что требования, предъявляемые к работе электропривода, противоречивы, а сложность решения задачи управления зависит от сложности функционала. Если функционал отвечает большому количеству требований к электроприводу, то аналитический синтез управляющих воздействий практически не возможен [3]. Поэтому наилучшее управление в явном виде следует искать при наиболее полном использовании физических свойств электрической машины, применяя простые функционалы качества. Рассматривая в качестве функционала время, решение оптимальной задачи одновременно позволит решить задачу наибольшей области устойчивости системы управления [4], а, следовательно, и качества управления.

Постановка задачи управления

Задачей оптимального управления является определение воздействий, обеспечивающих регулирование электромагнитного момента в условиях энергетически желаемых режимов работы двигателя электропривода. Критерием оптимальности является время [5] переходных процессов. В качестве желаемых режимов работы электрической машины можно рассматривать предельные режимы,

обеспечивающие минимум напряжения или мощности, подводимой к обмоткам двигателя для изменения электромагнитного момента, максимум $\cos(\varphi)$ или минимум мощности тепловых потерь [6]. Учитывая многообразие объектов управления, в качестве электромеханического преобразователя энергии исследуется обобщенная электрическая машина. При решении поставленной задачи управления рассматриваются электромагнитные процессы формирования электромагнитного момента. Математическое описание представлено уравнениями Кирхгофа, описывающими вектор состояния обобщенной электрической машины в системе вращающихся со скоростью ротора ω координат d, q :

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} + Ri_d - \omega \Psi_q, \\ U_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} + Ri_q + \omega \Psi_d, \\ U_{rd} &= \frac{d\Psi_{rd}}{dt} + R_r i_{rd}, \\ U_{rq} &= \frac{d\Psi_{rq}}{dt} + R_r i_{rq}, \end{aligned} \quad (1)$$

где U_d, U_q, U_{rd}, U_{rq} – напряжения статора и ротора, подводимые к обмоткам двигателя, $i_d, i_q, i_{rd}, i_{rq}, \Psi_d, \Psi_q, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$ – соответствующие токи и потокосцепления статора и ротора в системе рассматриваемых координат, R, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора.

Взаимосвязь токов и потокосцеплений определена в векторной форме посредством следующих уравнений:

$$\mathbf{L}\mathbf{I} = \mathbf{\Psi}$$

где

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix},$$

$\mathbf{L}$ – матрица индуктивностей, матрица токов $\mathbf{I}$ и потокосцеплений $\mathbf{\Psi}$, L, L_r – индуктивности обмоток статора и ротора, L_m – взаимная индуктивность статора и ротора. В силу зависимости тока и потокосцепления, падение напряжений на активных сопротивлениях обмоток статора и ротора (1) определено вектором:

$$\mathbf{RI} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{\Pi}; \quad \mathbf{RI} = \begin{bmatrix} Ri_d \\ Ri_q \\ R_r i_{rd} \\ R_r i_{rq} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} L R^{-1} & 0 & L_m R_r^{-1} & 0 \\ 0 & L R^{-1} & 0 & L_m R_r^{-1} \\ L_m R^{-1} & 0 & L_r R_r^{-1} & 0 \\ 0 & L_m R^{-1} & 0 & L_r R_r^{-1} \end{bmatrix}$$

где $\mathbf{RI}$ – вектор падений напряжений на активных сопротивлениях обмоток двигателя, $\mathbf{T}$ – матрица параметров времени, характеризующих инерционность электромагнитных процессов. Для удобства анализа, в соответствии с рисунком 1, система вращающихся координат d, q ориентирована по току ротора $i_{rq} = 0, i_{rd} = i_r$. Выходной величиной системы управления (1) является электромагнитный момент m , значение которого зависит от векторного произведения переменных состояния статора или ротора:

$$m = \psi i \cos \varphi = \psi_r i_r \sin \beta_r, \quad (3)$$

где ψ, ψ_r, i, i_r – модули потокосцеплений и токов вектора состояний электрической машины, β, β_r – углы, определяют положение потокосцепления статора и ротора относительно тока ротора, μ – угол, определяет положение вектора тока статора относительно тока ротора, φ – угол, определяет положение вектора электродвижущей силы e от потокосцепления статора относительно тока статора. Косинус этого угла является одной из основных энергетических характеристик работы электрической машины [7].

Решение оптимальной задачи управления

Из уравнения баланса мощностей следует, что состояние электрической машины зависит от четырех независимых переменных. В качестве таких переменных могут быть выбраны электромагнитный момент m , угловая скорость вращения ротора ω и два аргумента β, φ , которых достаточно для определения положения всех изображающих векторов. Из приведенного числа переменных, m и ω заданы условиями технологической задачи. Варьируемыми величинами являются аргументы β, φ , посредством которых осуществляется поиск энергетически желаемых режимов работы электрической машины.

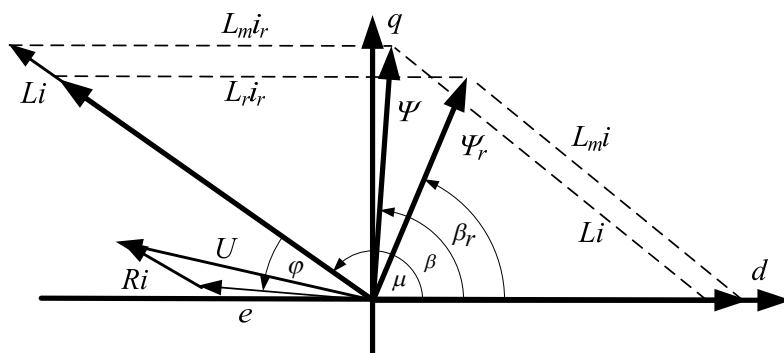


Рисунок 1 – Векторная диаграмма работы обобщенной электрической машины

Решение задачи оптимизации работы электрической машины разбито на два этапа. На первом этапе выявляются параметры установившегося режима, характеризующие положение изображающих векторов и соответствующие энергетически желаемым режимам работы. На втором этапе определяется вектор управления, под действием которого осуществляется оптимальный переход, при изменении нагрузки в условиях энергетически желаемых режимов работы, из одного состояния электрической машины в другое, за минимальное время.

Рассмотрим энергетически предельные режимы установившихся процессов, которые могут выступать в качестве желаемых режимов работы электрической машины [8]. Одной из основных энергетических характеристик является коэффициент полезного действия η , величина которого зависит от мощности потерь ΔP :

$$\Delta P = Ri^2 + R_r i_r^2.$$

$$\eta = \frac{\omega m}{\omega m + \Delta P} = \frac{\omega}{\omega + F(\beta, \varphi)};$$

где

$$F(\beta, \varphi) = \frac{\Delta P}{m} = \frac{1}{\cot(\beta) + \tan(\varphi)} \left[\frac{R}{L \cos(\varphi)^2} + \frac{R_r L}{L_m^2 \sin(\beta)^2} \right]. \quad (4)$$

$F(\beta, \varphi)$ – функция энергетического состояния. Условия, в которых работа электрической машины выполняется при абсолютном минимуме тепловых потерь, достигаются при минимуме функции (4) энергетического состояния:

$$F_{\min} = \frac{2\sqrt{R_r R}}{L_m}$$

и определенном положении изображающих векторов, которое можно характеризовать углами β, φ в области аргументов, где возможно сформировать положительный электромагнитный момент:

$$\begin{aligned}\beta &= \arcsin \left(L \sqrt{\frac{R_r}{R_r L^2 + R L_m^2}} \right); \\ \varphi &= \arccos \left(L \sqrt{\frac{R_r}{R_r L^2 + R L_m^2}} \right).\end{aligned}\quad (5)$$

При росте нагрузки, режим работы в условиях минимума потерь мощности связан с существенным изменением потокосцеплений и значительным ростом величины реактивной мощности. Поэтому такая энергетическая характеристика как $\cos(\varphi)$ играет значительную роль при выборе желаемого режима работы электрической машины. Положение изображающих векторов, при котором работа электрической машины осуществляется при минимуме энергии $W_{эм}$, накапливаемой в обмотках электрической машины, имеет определенные достоинства и определено посредством минимизации функции энергетического состояния $f(\beta, \varphi)$:

$$2W_{3M} = m f(\varphi, \beta),$$

где

$$W_{\Sigma M} = \frac{1}{2}(\Psi_d i_d + \Psi_q i_q + \Psi_{rd} i_r)$$

$$f(\varphi, \beta) = \frac{2W_{3M}}{m} = \frac{1}{(\cot \beta + \tan \varphi)} \cdot \left(\frac{1}{\cos \varphi^2} + L_r \frac{L}{L_m^2 \sin \beta^2} - 2 + 2 \tan \varphi \cdot \cot \beta \right). \quad (6)$$

Минимум функции энергетического состояния
(6)

$$f_{\min} = \frac{2\sqrt{L_r L - L_m^2}}{L_m}$$

достигается при другом положении изображающих векторов:

$$\beta = \frac{\pi}{2}, \quad \varphi = \arcsin \sqrt{\left(\frac{L_r L - L_m^2}{L_r L} \right)}. \quad (7)$$

Этот режим работы позволяет минимизировать мощность, подводимую к обмоткам двигателя для формирования электромагнитного момента электрической машины в динамических процессах. Вместе с тем, режим работы при минимуме энергии, накапливаемой в обмотках двигателя, осуществляется при более значительных токах и, следовательно, более высоких потерях. Существующие противоречия эффективности работы электрической машины разрешаются посредством установленной взаимосвязи между коэффициентом полезного действия η и параметром времени $T_{эм}$, характеризующем интенсивность процессов электрохимического преобразования энергии [9] в области аргументов, где возможно сформировать электромагнитный момент:

$$T_{эм} = \frac{2W_{эм}}{m\omega + \Delta P} = \frac{f(\beta, \varphi)}{\omega + F(\beta, \varphi)};$$

$$T_{эм} = \eta \frac{2W_{эм}}{m\omega} = \eta \frac{f(\beta, \varphi)}{\omega}. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, задаваясь потенциально реализуемыми режимами работы, отвечающими желаемым энергетическим характеристикам, всегда возможно определить положение изображающих векторов, при котором эти режимы осуществимы. Решение задачи минимизации функций энергетического состояния (4), (6) позволит определить конструктивные параметры электрической машины переменного тока, влияющие на предельные режимы работы, что дает возможность выявить наилучшие значения масса-габаритных показателей.

В качестве регулируемых переменных многоканальной динамической системы (1) выбраны потокосцепления статора и ротора, представленные на рисунке 1. В статических режимах зависимость вектора регулируемых переменных Ψ от модуля вектора потокосцепления статора ψ и положения изображающих векторов в пространстве состояний электрической машины представлена следующим образом:

$$\Psi = B \cdot \psi; \quad (9)$$

$$\Psi^T = \begin{vmatrix} \Psi_d & \Psi_q & \Psi_{rd} & \Psi_{rq} \end{vmatrix}$$

$$B^T = \begin{vmatrix} b_d & b_q & b_{rd} & b_{rq} \end{vmatrix},$$

где B – матрица взаимосвязанных коэффициентов отражающих, посредством аргументов β и φ , положение изображающих векторов в пространстве состояний электрической машины:

$$\begin{vmatrix} b_d \\ b_q \\ b_{rd} \\ b_{rq} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\beta) \\ \sin(\beta) \\ \frac{\cos(\beta) [(L_r L - L_m^2) \tan(\beta)^2 + L_m^2 \tan(\beta) \tan(\varphi) + L_r L]}{L_m L} \\ \frac{L_m \sin(\beta)}{L} \end{vmatrix}$$

На основании рисунка 1, в силу скалярной зависимости тока и потокосцепления:

$$\psi = Li \cos(\varphi) [\cot(\beta) + \tan(\varphi)],$$

значение электромагнитного момента (3) запишем следующим образом:

$$m = \frac{\psi^2}{L(\cot \beta + \tan \varphi)}.$$

Тогда, на основании (9), вектор регулируемых переменных можно представить в зависимости не только от положения изображающих векторов, но и от нагрузки (3):

$$\Psi = B \frac{L [\cot(\beta) + \tan(\varphi)]}{\psi} m, \quad (10)$$

где $\psi = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2}$ – модуль вектора потокосцепления статора.

Рассмотрим формирование управляющих воздействий, посредством которых осуществляется оптимальный переход, при изменении нагрузки, из одного состояния электрической машины, в другое. Критерием оптимальности является время.

Для этой цели, на основании (2), запишем систему уравнений (1) в векторной форме:

$$\frac{d\Psi}{dt} = V \Psi + U; \quad (11)$$

где $V = -T^{-1} + \Omega$ – матрица, отражающая свойства объекта управления,

$$\Omega = \begin{vmatrix} 0 & \omega & 0 & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \text{ матрица величин, харак-}$$

теризующих скорость вращения двигателя,

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix}, \text{ вектор напряжения, подводимого к}$$

обмоткам двигателя.

Полагая, что идентификатором состояния, посредством измерения токов, напряжений и угловой скорости вращения двигателя, достаточно точно вычисляется вектор Ψ , примем условие полной наблюдаемости регулируемых переменных. Вектор напряжения формируется таким образом, чтобы, в совокупности с обратными связями по регулируемым переменным, он отражал задание U_{ref} выходной величины (10) системы (11):

$$\mathbf{U} = -\mathbf{K} \Psi + \mathbf{B} \frac{L(\cot(\beta) + \tan(\varphi))}{T_s \psi} U_{ref}; \quad (12)$$

где $\mathbf{K}$ – матрица коэффициентов обратной связи размерностью, соответствующей размерности матрицы $\mathbf{V}$.

В результате, посредством уравнения (11), при управлении (12), состояние электрической машины представлено в зависимости от желаемого положения изображающих векторов, заданного матрицей $\mathbf{B}$, параметров обратных связей, заданных матрицей $\mathbf{K}$ и сигнала задания U_{ref} электромагнитного момента:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \mathbf{f} \quad (13)$$

$$\text{где } \mathbf{f} = (\mathbf{V} - \mathbf{K}) \Psi + \mathbf{B} \frac{L(\cot(\beta) + \tan(\varphi))}{T_s \psi} L U_{ref}.$$

Для определения элементов матриц $\mathbf{K}$ и $\mathbf{B}$, посредством которых формируется наилучшее управление (12), воспользуемся принципом максимума Л. С. Понтрягина и функциями энергетического состояния (4), (6). Определим взаимосвязь между оптимальным управлением, регулируемые переменными и координатами сопряженной системы, состояние которой определяется посредством функции Гамильтониана. Гамильтониан быстрого действия H динамической системы (11) имеет вид:

$$H = \mathbf{S}^T (\mathbf{V} - \mathbf{K}) \Psi + \mathbf{S}^T \mathbf{B} \frac{L(\cot(\beta) + \tan(\varphi))}{T_s \psi} L U_{ref}, \quad (14)$$

$$\mathbf{S}^T = [s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad s_4], \quad (15)$$

где координаты вектора $\mathbf{S}$ сопряженной системы:

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \Psi^T} = -(\mathbf{V} - \mathbf{K}) \mathbf{S}, \quad (16)$$

имеют довольно сложную зависимость во времени:

$$\mathbf{S}(t) = e^{-(\mathbf{V} - \mathbf{K}) t} \mathbf{S}(0),$$

$\mathbf{S}(0)$ – начальное значение координат вектора сопряженной системы.

Поскольку, при выбранной ориентации изображающих векторов (10) и отсутствии ограничения на управление, выходной величиной системы управления (13) является электромагнитный момент, задающим воздействием которого является сигнал U_{ref} , условия максимума Гамильтониана запишем следующим образом:

$$\frac{\partial H}{\partial U_{ref}} = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial H}{\partial U_{ref}} = \mathbf{S}^T \mathbf{B} \frac{L(\cot(\beta) + \tan(\varphi))}{T_s \psi}.$$

Из выражения (17) следует, что одним из обязательных требований достижения максимума Гамильтониана, независимо от величины модуля вектора потокосцепления статора ψ , является одинаковое изменение во времени координат вектора сопряженной системы (16). Выполнение этого требования позволяет сформировать матрицу $\mathbf{B}$ таким образом, чтобы сумма ее коэффициентов равнялась нулю:

$$(b_d + b_q + b_{rd} + b_{rq}) = 0.$$

Это решение для обобщенной электрической машины рассмотрено в [10]. При таком управлении максимальное значение Гамильтониана равняется нулю. Принципу максимума могут удовлетворять несколько, в том числе бесконечно много, различных форм управления. Среди всех управлений наилучшим является то, которому соответствует максимальное значение функции Гамильтониана. Вместе с тем, функция Гамильтониана быстрого действия не может быть больше единицы.

Так как критерием оптимальности является время, то оптимальное управление должно обеспечивать и наибольшую область устойчивости основной системы. Наибольшей областью устойчивости, а, следовательно, и качеством управления обладают системы, описываемые апериодическим звеном первого порядка. Для удовлетворения этих требований, желаемую зависимость от времени координат вектора сопряженной системы запишем следующим образом:

$$S(t) = S(0)e^{\frac{2t}{T_s}}, \quad (18)$$

T_s – параметр времени, характеризующий желаемый темп изменения координат вектора сопряженной системы. Решение (18) соответствует следующей системе уравнений:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{2}{T_s} S.$$

Желаемое выражение для сопряженной системы (16) может быть получено при выполнении равенства:

$$-(V - K) = E\Phi_s^{-1},$$

которое достигается посредством определенного выбора элементов матрицы обратных связей K :

$$K = (V + ET_s^{-1}), \quad (19)$$

где E – единичная матрица.

Определенный выбор коэффициентов матрицы обратных связей (19), при управлении (12), обеспечивает равное быстродействие контуров регулируемых переменных основной системы управления. При нулевых начальных условиях, регулируемые переменные изменяются одновременно и пропорционально. В этих условиях положение изображающих векторов, как в статических, так и динамических режимах изменяться не будет и будет соответствовать положению, заданному матрицей B . Умножив слева левую и правую часть уравнения (13) на модуль вектора потокосцепления и матрицу B^T , преобразуем его к виду:

$$B^T B \frac{d\psi^2}{dt} = -2B^T B \frac{\psi^2}{T_s} + 2B^T B \frac{(\cot(\beta) + \tan(\varphi))}{T_s} LU_{ref},$$

$$\frac{d\psi^2}{dt} = -2 \frac{\psi^2}{T_s} + 2 \frac{(\cot(\beta) + \tan(\varphi))}{T_s} LU_{ref}, \quad (20)$$

отражающему зависимость регулируемых переменных от сигнала задания U_{ref} . При равном быстродействии контуров регулируемых переменных (19) и нулевых начальных условиях, решение основной системы уравнений:

$$\psi^2(t) = U_{ref} L (\cot(\beta) + \tan(\varphi)) \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_s}} \right);$$

$$\Psi(t) = B\psi(t) = B \sqrt{U_{ref} L (\cot(\beta) + \tan(\varphi))} \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_s}} \right),$$

удовлетворяет желаемому решению сопряженной системы (18). Требования к управлению, при Гамильтониане равном единице, будут выполнены, если Гамильтониан быстродействия не будет зависеть от задающего воздействия системы управления. Выполнение этих условий возможно в том случае, если задание для основной системы уравнений связано с начальными условиями решений сопряженной системы уравнений:

$$S(0) = E \left(U_{ref} L \frac{(\cot(\beta) + \tan(\varphi))}{T_s} b \right)^{-1},$$

где $b = (b_d + b_q + b_{rd} + b_{rq})$.

Тогда решение сопряженной системы (18) можно записать следующим образом:

$$S = E \left(U_{ref} L \frac{(\cot(\beta) + \tan(\varphi))}{T_s} b \right)^{-1} e^{\frac{2t}{T_s}}. \quad (21)$$

Подставляя полученные решения основной и сопряженной системы уравнений (21) в функцию (14), получим значение Гамильтониана:

$$H = -e^{\frac{2t}{T_s}} \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_s}} \right) + e^{\frac{2t}{T_s}} = 1.$$

Из полученного выражения следует, что при управлении (12) и выполнении условий (19), Гамильтониан быстродействия не зависит от сигнала управления и всегда равен единице. Поэтому перевод вектора состояния электрической машины из положения, соответствующего нулевым начальным условиям, в положение, соответствующее заданию электромагнитного момента, является оптимальным по быстродействию. На основании (3), преобразуем выражение (20):

$$\frac{T_s}{2L(\cot(\beta) + \tan(\varphi))} \frac{d\psi^2}{dt} =$$

$$= - \frac{\psi^2}{L(\cot(\beta) + \tan(\varphi))} + U_{ref};$$

$$\frac{T_s}{2} \frac{dm}{dt} = m + U_{ref}.$$

Решение этого уравнения, не зависимо от положения изображающих векторов, представляет зависимость электромагнитного момента от времени при оптимизации электромагнитных процессов:

$$m = U_{ref} \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_s}} \right). \quad (22)$$

Таким образом, задаваясь желаемым быстродействием контуров регулируемых переменных, которое характеризуется пара-

метром времени T_s и достигается посредством определенного выбора коэффициентов матрицы обратных связей, зависимость электромагнитного момента от его задания описывается апериодическим звеном первого порядка, при оптимальной траектории перехода вектора состояния из одного положения в другое. Критерием оптимальности является время. Каждому положению изображающих векторов, заданному матрицей **B**, соответствует своя экстремаль. Существование множества экстремалей позволяет ввести дополнительные ограничения на управление, при оптимизации работы электрической машины. В качестве таких ограничений могут выступать режимы, не отвечающие энергетически желаемым режимам работы. Выбор энергетически желаемого режима, на основании (4), (6) и (8), может быть осуществлен путем задания положения изображающих векторов, посредством выбора взаимосвязанных коэффициентов матрицы **B**.

В работе [11] представлен частный случай реализации оптимального управления синхронной машиной с электромагнитным возбуждением, обеспечивающего наиболее быстрое формирование электромагнитного момента при минимизации тепловых потерь, в условиях минимума реактивной мощности.

Заключение

Показано, что оптимальное управление обобщенной электрической машиной должно осуществляться при одновременном и пропорциональном регулировании задаваемых переменных, что достигается путем синтеза управляющих воздействий. При этом формирование энергетически желаемых режимов работы электрической машины осуществляется посредством выбора ориентации изображающих векторов. Это ключевое положение справедливо для управляющих воздействий не только при оптимизации по быстродействию, но и при многокритериальной оптимизации работы машины переменного тока, обеспечивающей наилучшее сочетание энергетических и динамических свойств электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боченков, Б.М. Анализ законов управления быстродействующими электроприводами переменного тока / Б.М. Боченков, Ю.П. Филюшов // Электротехника. – 2009. – № 4. – С. 18-23.
2. Востриков, А.С. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 368 с.
3. Красовский, А.А. Справочник по теории автоматического управления. / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1987. – 712 с.
4. Петров, Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю.П. Петров. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 220 с.
5. Понtryгин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понtryгин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
6. Боченков, Б.М. Оптимизация электропривода переменного тока по векторному критерию качества / Б.М. Боченков, Ю.П. Филюшов // Электричество. – 2007. – № 8. – С. 13-17.
7. Филюшов, Ю.П. Оптимизация электромагнитных процессов асинхронной машины / Ю.П. Филюшов // Электричество. – 2011. – № 5.
8. Филюшов, Ю.П. Многокритериальная оптимизация работы электрической машины переменного тока / Ю.П. Филюшов / Дис. на соис. уч. ст. к.т.н.. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – 241 с.
9. Boris Bochencov, Yury Filushov. The Optimization of the work of the electric drive alternating current on vector criterion quality / IEEE: Strategic Technologies, IFOST 2008. Third International Forum. – P. 406-408.
10. Филюшов, Ю.П. Оптимизация работы обобщенной электрической машины / Ю.П. Филюшов // Электричество. – 2011. – № 2.
11. Филюшов, Ю.П. Электропривод с синхронным двигателем / Ю.П. Филюшов. Патент РФ № 2092967, 1997.

Филюшов Ю.П., инженер, к.т.н., Сиб. филиал ВНИКИ;

Зонов П.В., ассистент каф. «ЭиАПУ», Новосибирский государственный технический университет, E-mail: ispc_el-en-ag@ngs.ru;

Малоземов Б.В., доц. каф. «ЭТК», к.т.н., Новосибирский государственный технический университет, E-mail: mbv@emf.nstu.ru;

Вильбергер М.Е., доц. каф. «ЭТК», к.т.н., Новосибирский государственный технический университет, E-mail: berrger82@mail.ru.