

УДК 621.313.333.1

Г.М. Тутаев, М.А. Бобров

ЭКСТРЕМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

Для электротехнических комплексов с электроприводами крайне важными являются вопросы повышения их эффективности. Статья посвящена задаче экстремального управления электроприводами переменного тока, в частности, задаче экстремального по энергетическим критериям управления электроприводом на базе асинхронизированного вентильного двигателя (АВД). Энергетическими критериями являются минимум потребляемых обмотками токов или минимум суммарных потерь, что обеспечивает повышение КПД двигателя и ограничивает его нагрев. При задании условий технологического процесса компоненты вектора состояний представлены требуемым электромагнитным моментом и заданной угловой скоростью ротора. Варьируемыми величинами, образующими вектор управления, являются фаза вектора статорного тока, основной магнитный поток и частота возбуждения. Показано, что для решения экстремальных задач управления электроприводами с АВД возможно использование классического метода Эйлера. Рассмотренные постановки задач поиска экстремальных управлений машиной двойного питания по энергетическим критериям связаны с необходимостью изменения магнитного состояния двигателя, что неприемлемо для динамичных приводов. Поэтому в таких случаях целесообразно применение алгоритмов управления с постоянным магнитным потоком во избежание значительных форсировок выходного напряжения преобразователя частоты. С другой стороны, для обеспечения минимума суммарных потерь при низких нагрузках необходимо значительно уменьшать магнитный поток. Однако возникает опасность полного размагничивания двигателя. В связи с этим целесообразным является ограничение нижней границы магнитного потока до величины 10-20 % от номинального значения. При этом установлено, что зависимость магнитного потока от тока намагничивания носит нелинейный характер и при решении экстремальных задач возникает необходимость аппроксимации кривой намагничивания функцией, позволяющей однозначно поставить в зависимость току намагничивания значение магнитного потока.

Ключевые слова: асинхронизированный вентильный двигатель, вектор состояний, вектор управлений, критерий оптимальности, математическая модель, функция качества, экстремальное управление.

1. Введение

В теории целенаправленного функционирования систем существует понятие энергоэффективности [1], которое можно распространить на си-

стемы автоматизированного электропривода или, как более частный случай, на базовые электрические машины. В этом случае под энергетической эффективностью какого-либо закона управления следует понимать уровень соответствия фактического расходования энергоресурсов их рациональному расходованию при выполнении двигателем технологической задачи в составе электропривода (ЭП) [2].

Известно, что оптимизация режимов работы асинхронного двигателя по энергетическим критериям приводит к необходимости изменения магнитного состояния электрической машины в функции электромагнитного момента. При классическом частотном регулировании это обеспечивает электроприводам чрезвычайно низкие динамические характеристики. В связи с этим весьма актуальна задача синтеза алгоритмов управления, позволяющих в условиях ограничения ресурсов преобразователей частоты совместить статическую оптимизацию с приемлемым для общепромышленных ЭП быстродействием [3].

На практике решение задачи энергоэффективного управления обеспечивается реализацией заранее определенных оптимальных значений управляемых координат двигателя на базе текущей идентификации его переменных параметров [4].

II. Материалы и методы

Функционирование ЭП происходит в условиях выполнения им какой-либо технологической задачи и требует регулирования скорости при изменяющемся сопротивлении нагрузки на валу. Тогда каждому моменту времени будет соответствовать некоторое состояние производственного механизма с заданными значениями скорости ω_c и момента сопротивления m_c , которые образуют вектор состояния $\dot{X}_c = (m_c, \omega_c)$. Координаты этого вектора изменяют свои значения при выполнении механизмом технологической задачи. Так как кинематические цепи любого агрегата имеют ограниченную мощность, то, очевидно, существует некая область допустимых состояний Q_{Xc} по вектору состояний \dot{X}_c . В этой области существуют подмножества моментов сопротивлений Q_{mc} и угловых скоростей $Q_{\omega c}$, верхние и нижние границы которых представляют собой предельно допустимые значения координат вектора \dot{X}_c .

Работа механизма в заданной области допустимых состояний Q_{Xc} обеспечивается ЭП, состоящим из базового двигателя и управляемого преобразователя частоты (ПЧ).

Функциональную связь между входными воздействиями и управляемыми переменными в модели двигателя можно отразить соотношением $\dot{Y} = F(U, m_c, C)$, где $\dot{Y} = (y_1, \dots, y_k)$ – вектор состояния выходов модели. Его компонентами могут быть, например, электромагнитный момент m , токи фаз, угловая скорость ротора ω_r ; F – оператор преобразования модели; $\dot{U} =$

(u_1, \dots, u_n) – вектор состояния управляемых входов, например, напряжения U_s, U_r , скольжение, частота ω_s ; m_c – внешнее возмущение в виде момента сопротивления механизма; $\dot{C} = (c_1, \dots, c_m)$ – вектор параметров модели (активные сопротивления обмоток статора и ротора, взаимная индуктивность L_m , индуктивности рассеяния фаз).

В первом приближении можно считать, что вектор состояния управляемых входов модели двигателя $\dot{U} = (u_1, \dots, u_n)$ формируется ПЧ. Тогда, ограничив значения координат этого вектора областью допустимых управлений Q_U , мы учтем ограничение силового преобразователя по выходному напряжению.

Сформулируем условия выполнения электроприводом технологической задачи. Из компонент вектора состояний \dot{Y} сформируем вектор $\dot{X} = (m, \omega)$. Поскольку двигатель обладает ограниченной мощностью, то для него существует область допустимых состояний Q_X .

Тогда для всех значений $\dot{X}_c \in Q_{Xc}$ необходимым и достаточным условием выполнения задачи будет:

$$\begin{cases} Q_X \supseteq Q_{Xc}; \\ \dot{X} = \dot{X}_c. \end{cases} \quad (1)$$

Дополнительным условием решения технологической задачи с помощью ЭП является принадлежность компоненты управления, формируемой ПЧ, к допустимой области управлений – $\dot{U} \in Q_U$.

Для установившегося режима работы привода векторы управления \dot{U} и состояния \dot{X} двигателя связаны соотношением:

$$f = (\dot{U}, \dot{X}) = 0, \quad (2)$$

где f – скалярная функция [5].

Анализ последнего соотношения говорит о том, что для каждого управления \dot{U} из допустимой области Q_U существует множество $\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ значений вектора состояний двигателя \dot{X} , удовлетворяющих этому соотношению. Но и для каждого состояния $\dot{X} \in Q_X$ существует множество управлений $\{U_1, U_2, \dots, U_k\}$, которые также удовлетворяют этому соотношению. Таким образом, технологическая задача $\dot{X} = \dot{X}_c$ имеет множество решений при варьировании управлений \dot{U} .

Каждое такое решение, т.е. управление $\dot{U} \in Q_U$, обеспечивающее $\dot{X} = \dot{X}_c$, можно оценить некоторой совокупностью показателей качества $\{w_1, w_2, \dots, w_k\}$, которыми могут выступать КПД, потери в элементах привода,

потребляемые обмотками токи и т.д. Показатели качества w_i будут функциями координат векторов управления \dot{U} и состояний двигателя \dot{X} :

$$w_i = w_i(\dot{U}, \dot{X}), \quad i = \overline{1, k}. \quad (3)$$

Векторы \dot{U} и \dot{X} связаны соотношением $f = (f(\dot{U}, \dot{X})) = 0$. Показатели качества w_i можно считать компонентами вектора функции качества $\dot{W}(\dot{U}, \dot{X}) = (w_1, w_2, \dots, w_k)$, из числа которых можно выделить какую-то одну оценку в качестве основной. Причем на значения компонент вектора \dot{W} могут быть наложены ограничения типа $\min(\max)$.

Тогда обобщенная задача экстремального управления электроприводом, обеспечивающая наиболее полное использование энергетических ресурсов ПЧ формулируется следующим образом [5, с. 127]:

«Пусть силовая часть электропривода описывается соотношением $f = (f(\dot{U}, \dot{X})) = 0$ и по эффективности своего функционирования характеризуется некоторым числом k оценок качества $w_i = w_i(\dot{U}, \dot{X}), \quad i = \overline{1, k}$, среди которых имеется основная, минимизируемая или максимизируемая оценка. Требуется найти оптимальное управление $U_i^o(\dot{X})$, которое при ограничении одной или нескольких оценок качества обеспечивает в двигательном режиме верхнюю грань механической мощности $P_{\text{мех}} = m \cdot \omega$, а при снятии ограничений доставляет нижнюю (верхнюю) грань основной оценки качества»:

$$\begin{aligned} U_i^o(y) &= \arg \sup_U P_{\text{мех}}(U, y), U \in Q_U; \\ U_i^o(y) &= \arg \inf(\sup) w_i(U, y), U \in Q_U, \dot{X} = \dot{X}_c \in Q_{\dot{X}_c}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $y = X_c$ – одна из заданных составляющих вектора состояния – либо скорость, либо момент. В первом случае задача управления – получение максимального момента при заданной скорости, во втором – максимальной скорости при заданном моменте.

Поскольку в общем случае функция качества $\dot{W}(\dot{U}, \dot{X}) = (w_1, w_2, \dots, w_k)$ и ограничения являются нелинейными, то при изменении угловой скорости и нагрузки привода в широком диапазоне решение этой задачи необходимо искать численными методами. Их выбор определяется свойствами функций качества и признаками задачи экстремального управления, такими как число минимаксных функций качества, размерность вектора управлений \dot{U} , принадлежность наилучшего управления $U_i^o(\dot{X})$ к допустимой области управлений Q_U .

III. Асинхронизированный вентильный двигатель

Асинхронизированный вентильный двигатель (АВД) представляет собой вариант двигателя двойного питания (ДДП) со статическими преобразователями частоты в статоре и роторе (рис. 1) [6].

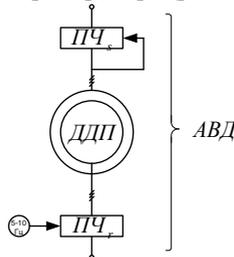


Рис. 1. Структурная схема АВД.

Обмотка статора, якорь АВД, питается от преобразователя частоты $ПЧ_s$, инвертор тока которого управляется по фазе напряжения якоря, чем имитируется положение щеток на коллекторе ДДП. Обмотка ротора – обмотка возбуждения – подключена к своему собственному преобразователю частоты $ПЧ_r$, с регулируемой вплоть до перехода на встречное вращение магнитного поля и ротора частотой. Это позволяет снизить потери в двигателе и преобразователях частоты.

При заданных условиях технологического процесса электромагнитном моменте и угловой скорости ротора $X = (m, \omega)$, АВД имеет три изменяемых переменных. Это фаза вектора тока статора относительно его вектора напряжения φ_1 (для тиристорного ПЧ – угол опережения коммутации β), намагничивание двигателя, определяемое главным магнитным потоком Ψ_δ , и частота возбуждения (частота токов ротора) ω_2 .

Выбор критериев оптимальности обусловлен выполняемой технологической задачей и условиями функционирования электропривода. Важное практическое значение имеет задача обеспечения минимальных значений потерь, что необходимо для повышения коэффициента полезного действия в широком диапазоне регулирования угловой скорости и изменении момента сопротивления на валу, а также в целях ограничения нагрева двигателя. Критериями также могут выступать и токи обмоток. Это позволяет получить достаточно близкие к минимуму потерь режимы двигателя.

IV. Задача экстремального управления приводом с АВД

В рамках изложенного выше подхода рассмотрим задачу экстремального управления приводом с АВД по критерию минимума суммарных потерь, которые представляют собой совокупность электромагнитных, механических и добавочных потерь.

$$\Delta P = P_{scop} + P_{sst} + P_{rscop} + P_{rst} + P_{mex} + P_{доб} = P_e + P_{mex} + P_{доб}, \quad (5)$$

где P_{scop} , P_{rscop} – потери в меди обмоток статора и ротора, P_{sst} , P_{rst} – потери в стали статора и ротора, P_{mex} , $P_{доб}$ – механические и добавочные потери.

Механические потери не могут быть оптимизированы, поскольку скорость ротора задана и не зависит от компонент вектора управлений. Добавочные потери при нагрузках не выше номинальных имеют незначительную величину.

Считаем, что электромагнитный момент и угловая скорость ротора заданы условиями технологического процесса и образуют компоненты вектора состояний $\dot{X} = \dot{X}_c = (m, \omega)$. Тогда, согласно концепции многоканального управления ЭП с АД [7], будем иметь три варьируемых переменных, образующих вектор управлений: фазу вектора статорного тока $\beta = \varphi_1$, основной магнитный поток Ψ_δ и частоту возбуждения ω_2 – $\dot{U} = (\beta = \varphi_1, \dot{\Psi}_\delta, \omega_2)$.

В векторной форме для установившегося режима работы уравнения математической модели АД [8] примут вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_s &= \dot{I}_s \cdot R_s + \omega_1 \cdot D \dot{\Psi}_s; & \dot{U}_r &= \dot{I}_r \cdot R_r + \omega_2 \cdot D \dot{\Psi}_r; & \omega_e &= \omega_1 - \omega_2; \\ \dot{\Psi}_s &= L_{ls} \cdot \dot{I}_s + \dot{\Psi}_\delta; & \dot{\Psi}_r &= L_{lr} \cdot \dot{I}_r + \dot{\Psi}_\delta; & D &= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \\ \dot{\Psi}_\delta &= L_m \cdot \dot{I}_m; & \dot{I}_m &= \dot{I}_s + \dot{I}_r; & & \\ M_{эм} &= m = D \dot{\Psi}_\delta \cdot \dot{I}_s; & M_{эм} &= m = m_c; & & \end{aligned} \quad (6)$$

В работе В.Н. Полякова и Р.Т. Шрейнера показана возможность уменьшения размерности вектора управлений при решении экстремальных задач [5]. Для АД при условии питания обмоток статора от инвертора тока и использовании вектора основного магнитного потока в качестве опорного целесообразно формировать вектор управлений в виде $\dot{V} = (\dot{I}_s, \omega_2)$.

Тогда уравнения проблемно-ориентированной модели для минимизации суммарных потерь в АД, в которой независимыми воздействиями будут вектор тока статора \dot{I}_s , частота возбуждения ω_2 и заданный технологической задачей вектор состояний $\dot{X} = \dot{X}_c$, примут вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{\Psi}_\delta &= \frac{m}{I_s}; & \dot{I}_m &= \frac{\dot{\Psi}_\delta}{L_m}; \dot{I}_r = \dot{I}_m - \dot{I}_s; \\
 \dot{\Psi}_s &= L_{ls} \cdot \dot{I}_s + \dot{\Psi}_\delta; & \dot{\Psi}_r &= L_{lr} \cdot \dot{I}_r + \dot{\Psi}_\delta; \\
 \dot{U}_s &= \dot{I}_s \cdot R_s + (\omega_e + \omega_2) \cdot D\dot{\Psi}_s; & \dot{U}_r &= \dot{I}_r \cdot R_r + \omega_2 \cdot D\dot{\Psi}_r,
 \end{aligned} \tag{7}$$

где составляющие вектора тока статора:

$$\begin{aligned}
 i_{sx} &= I_s \cdot \cos\left(\beta + \theta' + \frac{\pi}{2}\right); \\
 i_{sy} &= I_s \cdot \sin\left(\beta + \theta' + \frac{\pi}{2}\right);
 \end{aligned} \tag{8}$$

заданы модулем тока статора I_s и аргументом $\left(\beta + \theta' + \frac{\pi}{2}\right)$, который представляет собой угол между опорным вектором основного магнитного потока $\dot{\Psi}_\delta$ и вектором тока статора (рис. 2) [9].

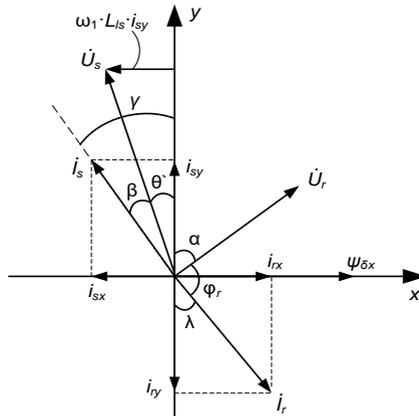


Рис. 2. Векторная диаграмма АВД:

θ' – угол нагрузки АВД; α – фаза вектора напряжения ротора, зависящая от частоты возбуждения; $\theta' + \alpha = \delta$ – угол сдвига фаз между векторами напряжения якоря \dot{U}_s и возбуждения \dot{U}_r , аналогичный углу нагрузки синхронной машины; λ – угол тока возбуждения; $\beta = \varphi_1$ – угол опережения коммутации силовых ключей инвертора тока, равный углу сдвига фаз первых гармоник напряжения и тока статора; $\gamma = \varphi_1 + \theta'$ – угол тока якоря; φ_r – фазовый угол сдвига вектора тока возбуждения

\dot{I}_r относительно вектора напряжения возбуждения \dot{U}_r .

При использовании этой модели электромагнитные потери будут функцией независимых воздействий \dot{I}_s , ω_2 и $\dot{X} = \dot{X}_c$:

$$P_e = (\dot{I}_s, \omega_2, \dot{X}_c) = \sum_{j=s,r} \Delta P_{jcop}(\dot{I}_s, m) + \sum_{j=s,r} \Delta P_{jst}(\dot{I}_s, m), \quad (9)$$

где потери в меди и в стали двигателя определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta P_{scop}(\dot{I}_s, m) &= R_s \cdot |\dot{I}_s|^2(\dot{I}_s, m); \\ \Delta P_{rcop}(\dot{I}_s, m) &= R_r \cdot |\dot{I}_s|^2(\dot{I}_s, m); \\ \Delta P_{sst}(\dot{I}_s, \omega_2, \omega_e) &= \Psi_\delta^2 \cdot k_{cs} \cdot (\omega_e + \omega_2)^{1,3}; \\ \Delta P_{rst}(\dot{I}_s, \omega_2) &= \Psi_\delta^2 \cdot k_{cr} \cdot \omega_2^{1,3}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда задача определения минимума суммарных потерь на безусловный экстремум ($\Delta P \rightarrow \min$) в принятых терминах может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c) \rightarrow \min_{V=(\dot{I}_s, \omega_2)} \Rightarrow V^o(\dot{X}), \dot{X}_c \in Q_c. \quad (11)$$

Анализ критерия оптимальности $\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c)$ показывает, что частота возбуждения оказывает влияние только на потери в стали. Изменение аргумента тока статора приводит к изменению его составляющих i_{sx} , i_{sy} и влияет на потери в меди. При условии $\beta = -\theta'$ приходим к ортогональности векторов $\dot{I}_s \perp \dot{\Psi}_\delta$, $i_{sx} = 0$, $i_{sy} = -i_{ry}$ [9].

Этот режим обеспечивает минимум токов в обмотках при заданном электромагнитном моменте. Отсюда следует очень важный вывод: реализация ортогонального управления снижает размерность вектора управлений. Теперь изменяемыми переменными могут быть частота возбуждения ω_2 и магнитный поток (ток намагничивания).

Тогда критерий минимума суммарных потерь примет вид:

$$\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c) \rightarrow \min_{V=(\dot{\Psi}_\delta, \omega_2)} \Rightarrow V^o(\dot{X}), \dot{X}_c \in Q_c. \quad (12)$$

Причем функция качества $\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c)$ является хорошо организованной, поскольку изменение магнитного состояния более существенно влияет на показатель качества, т.к. при этом меняются и потери в меди, и потери в стали двигателя, тогда как при изменении частоты возбуждения – только потери в стали [10]. Решение экстремальной задачи в этом случае

можно найти классическим методом Эйлера.

В электроприводах, длительно работающих с нагрузками, близкими к номинальным, потери в стали значительно меньше активных потерь. Для таких режимов более применим экстремальный по минимуму токов закон управления.

При выборе в качестве критерия оптимальности минимума токов без учета потерь в стали и реализации ортогонального управления экстремальная задача примет вид:

$$i_{sy}, \dot{I}_r (\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c) \rightarrow \min_{\dot{V}=(\Psi_\delta)} \Rightarrow V^o(\dot{X}), \dot{X}_c \in Q_c. \quad (13)$$

Учитывая, что при ортогональном управлении выполняются условия $i_{sy} = -i_{ry}$, $|\dot{\Psi}_\delta| = \Psi_{\delta x} = L_m \cdot i_{rx}$, т.е. варьирование магнитного потока осуществляется намагничивающей составляющей тока ротора. Вторая составляющая является моментобразующей. Тогда при заданном электромагнитном моменте $m = m_c$ необходимо найти такое сочетание проекций тока ротора, при котором модули токов статора и ротора будут минимальны. Проекция тока ротора могут быть заданы как:

$$\begin{aligned} i_{rx} &= \dot{I}_r \cdot \cos \lambda'; \\ i_{ry} &= \dot{I}_r \cdot \sin \lambda', \end{aligned} \quad (14)$$

где λ' – угол между векторами тока ротора и основного магнитного потока.

При такой постановке задача минимизации токов сводится к поиску оптимальной фазы между векторами тока и потока:

$$i_{sy}, \dot{I}_r (\lambda', m = m_c) \rightarrow \min_{\lambda'} \Rightarrow \lambda'^o(m), m_c \in Q_{m_c}. \quad (15)$$

Поиск решения можно также вести классическим методом Эйлера.

Рассмотренная нами задача минимизации суммарных потерь без ограничений ($\Delta P \rightarrow \min$) предполагает изменение основного магнитного потока в широком диапазоне. При значительных изменениях нагрузки для поддержания скорости на заданном уровне необходимо быстрое изменение потока за счет значительного форсирования напряжения. В реальных ПЧ запас по напряжению ограничен, и применить алгоритм минимума потерь будет невозможно. В таких условиях целесообразно применение алгоритма минимума суммарных потерь при неизменном заданном потоке Ψ_δ .

Задача формулируется следующим образом. Задан критерий оптимизации $\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c)$, где $\dot{X}_c \in Q_c$. Требуется найти управление $\forall i_0 \in QV$, обеспечивающее минимум целевой функции. При этом на область допустимых управлений наложено ограничение $\Psi_\delta = \Psi_\delta^* = \text{const}$, где Ψ_δ^*

– заданное значение модуля основного магнитного потока, например, номинальное.

Тогда при обеспечении ортогональности векторов $\dot{i}_s \perp \dot{\Psi}_\delta$ и составе вектора управлений $V = (\dot{\Psi}_\delta, \omega_2)$ задача примет вид

$$\Delta P(\dot{V}, \dot{X} = \dot{X}_c) \rightarrow \min_{V \in Q_V} \Rightarrow V^o(\dot{X}), \dot{X}_c \in Q_c, \quad (16)$$

$$\text{где } Q_V = \{V : V = (\dot{\Psi}_\delta, \omega_2), \Psi_{\delta x} = \Psi_{\delta x}^* = \text{const}\}.$$

В системе координат x, y , ориентированной по вектору основного магнитного потока, магнитный поток может быть задан проекцией тока намагничивания $\Psi_{\delta x}^* = L_m \cdot i_{rx}^*$. А при заданном электромагнитном моменте будут известны и моментобразующие токи статора и ротора $i_{sy} = -i_{ry}$, и соответственно, потери в меди обмоток. Тогда решение задачи сведется к одномерной задаче поиска оптимальной частоты возбуждения, обеспечивающей минимум потерь в стали.

Рассмотренные постановки задач безусловного или условного (с ограничениями) поиска экстремальных управлений АД по энергетическим критериям имеют одно общее сходство: необходимость изменения магнитного состояния двигателя, что, вследствие электромагнитной инерции цепей двигателя, неприемлемо для динамичных приводов. Поэтому в таких случаях целесообразно применение алгоритмов управления с постоянным магнитным потоком во избежание значительных форсировок выходного напряжения ПЧ. С другой стороны, для обеспечения минимума суммарных потерь при низких нагрузках необходимо значительно уменьшать магнитный поток. При этом возникает опасность полного размагничивания двигателя. Поэтому имеет смысл ограничивать нижнюю границу величины магнитного потока 10-20 % номинального. Таким образом, при минимизации потерь или токов необходимо вводить ограничения на магнитный поток двигателя.

При этом необходимо учитывать, что зависимость магнитного потока от тока намагничивания $\Psi_\delta = f(I_m)$ носит нелинейный характер и при решении экстремальных задач необходимо аппроксимировать кривую намагничивания некой функцией, позволяющей однозначно поставить в зависимость току намагничивания значение магнитного потока.

V. Заключение

Предложенная формулировка обобщенной задачи экстремального управления электроприводом при выполнении им технологической задачи позволяет учесть ограничение силового ПЧ по выходному напряжению.

Обоснован выбор практически значимых критериев экстремального управления электроприводом с АД.

Установлено, что реализация ортогонального управления векторами тока статора и основного потокосцепления уменьшает размерность вектора управлений. При этом функция качества будет хорошо организованной и решение задачи экстремального управления возможно классическим методом Эйлера.

Все рассмотренные постановки задач безусловного или условного (с ограничениями) поиска экстремальных управлений ЭП с АД по энергетическим критериям связаны с изменением магнитного состояния двигателя, что ведет к необходимости аппроксимации кривой намагничивания.

© Тутаев Г.М., 2018

© Бобров М.А., 2018

Библиографический список

- [1] Петухов Г.В., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. – 504 с.
- [2] Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: автореф. дис. д-р. техн. наук, УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2009. – 41 с.
- [3] Панкратов В.В., Зима Е.А. Математическое моделирование асинхронных электрических машин и машин двойного питания // *Электротехника*. 2003. №9. С. 19-25.
- [4] Панкратов В.В., Зима Е.А. Энергооптимальное векторное управление асинхронными электроприводами. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 120 с.
- [5] Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Экстремальное управление электрическими двигателями. Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2006. – 420 с.
- [6] Сонин Ю.П., Гуляев И.В. Асинхронизированный вентильный двигатель. Саранск: изд-во Морд. гос. ун-та, 1998. – 68 с.
- [7] Тутаев Г.М. Асинхронизированный вентильный двигатель как многоканальный объект управления // *Электричество*. 2003. № 10. С. 48-51.
- [8] Гуляев И.В., Тутаев Г.М., Волков А.В. Асинхронизированный вентильный двигатель и его модель // *Электротехника*. 2016. № 12. С. 64-68.
- [9] Тутаев Г.М. Варианты векторного управления электроприводом с асинхронизированным вентильным двигателем // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2009. № 3. С. 11-15.
- [10] Растринин Л.А. Системы экстремального управления. М.: Наука, 1974. – 630 с.

G.M. Tutaev, M.A. Bobrov

EXTREMAL CONTROL OF DOUBLY-FED INDUCTION MOTOR DRIVE BY ENERGY CRITERIA

National Research Mordovia State University

Abstract. The issues of increasing efficiency of electrotechnical complexes with electric drives are extremely important. The article is devoted to the task of extremal control of AC electric drives, in particular, to the task of extremal control in terms of energy criteria of the electric drive on an doubly inverter-fed induction motor (DIFIM). Energy criteria are the minimum of currents consumed by windings or the minimum of total losses, which provides an increase of efficiency of the motor and limits its heating. At the specifying of the process conditions, the state vector components are represented by the required electromagnetic torque and the specified angular speed of the rotor. The variable quantities forming the control vector are the phase of the stator current vector, the air gap flux and the excitation frequency. It is shown that it is possible to use the classical Euler method to solve the task of extremal control the electric drives with the DIFIM. Considered in the article statements of the task of searching for extremal controls by a DIFIM according to energy criteria are associated with the need to change the magnetic state of the motor, which is unacceptable for dynamic drives. Therefore, in such cases, the use of control algorithms with a constant magnetic flux is advisable in order to avoid significant boosting of the output voltage of the frequency converter. On the other hand, to minimize the total losses at low loads, it is necessary to significantly reduce the magnetic flux. However, there is a danger of a complete demagnetization of the motor. In this connection, it makes sense to limit the lower limit of the magnetic flux up to 10-20% of the nominal value. In this case it is necessary to take into account that the dependence of the magnetic flux on the magnetization current is nonlinear, and when solving extremal task, it becomes necessary to approximate the magnetization curve by a function that makes it possible to uniquely determine the magnetic flux value.

Keywords: control vector, doubly inverter-fed induction motor, extremal control, mathematical model, optimality criterion, quality function, state vector.

References

- [1] G.V. Petukhov and V.I. Yakunin. Methodological basis of external design of purposeful processes and purposeful systems. Moscow: ACT, 2006.
- [2] V.N. Polyakov. Energy-efficient operation modes of AC drives. Doct. of Tech. S. thesis, Ural State Technical University, Ekaterinburg, 2009.
- [3] V.V. Pankratov and E.A. Zima. Asynchronous machines and machines with a double power supply. Russian Electrical Engineering, vol. 74, no. 9, pp. 22-29, Sept. 2003.
- [4] V.V. Pankratov and E.A. Zima. Energy-optimal flux vector control of induction electric drives. Novosibirsk: NSTU, 2005.
- [5] V.N. Polyakov and R.T. Shreiner. Extremal control of electric motors. Ekaterinburg: USTU, 2003.

- 2006.
- [6] Yu.P. Sonin and I.V. Gulyaev, Double inverter-fed induction motor. Saransk: OMSU, 1998.
 - [7] G.M. Tutaev. An Asynchronized converter-fed motor as a multichannel controlled plant // *Electricity*, no. 10, pp. 48-51, Oct. 2013.
 - [8] I.V. Gulyaev, G.M. Tutaev and A.V. Volkov. An asynchronized converter-fed motor and its model // *Russian Electrical Engineering*, vol. 87, no. 12, pp. 693-697, Dec. 2016.
 - [9] G.M. Tutaev. Flux vector control options of asynchronized converter-fed motor // *Electrical engineering complexes and control systems*. no. 3, pp. 11-15, March 2009.
 - [10] L.A. Rastrigin. *Extremal control system*. Moscow: Science, 1974.