

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 62-83

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-39-50

Многокритериальный синтез многомерного управления электроприводом переменного тока*

А.С. ВОСТРИКОВ¹, Е.В. ПРОХОРЕНКО², Ю.П. ФИЛЮШОВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: vostrikov@nstu.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: prokhorenko@corp.nstu.ru

³ 630092, РФ, г. Новосибирск, ул. Объединения 1А, Федеральное государственное унитарное предприятие ПО «Север» кандидат технических наук, инженер. E-mail: filushov@mail.ru

Определены аргументы, в зависимости от которых установлены аналитические связи силовых и энергетических характеристик электропривода переменного тока в виде трех функций энергетического состояния. В качестве характеристик выступают электромагнитный момент, энергия магнитного поля, тепловые потери и напряжение. Используя функции энергетического состояния, посредством показателей качества установлены связи основных свойств электропривода переменного тока с учетом величины реактивной мощности, потерь в стали, потерь в меди, насыщения магнитной системы двигателя, мощности мгновенного изменения энергии магнитного поля при формировании электромагнитного момента, эффективности использования напряжения и мощности, подводимой к обмоткам двигателя. В зависимости от технологических требований разработано правило выбора решений многокритериальной оптимизации электропривода. Разработанное правило позволяет формализовать задачу многокритериального управления, учитывая потери в стали и насыщение магнитной системы двигателя. В качестве показателей качества выступают: энергетическая эффективность, показатель интенсивности процессов электромеханического преобразования энергии, показатели эффективности использования напряжения и мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Методом обратной модели с линеаризацией по выходу сформировано многомерное управление электроприводом, позволяющее изменять выходные величины в функции скорости, тока или насыщения магнитной системы двигателя. В качестве выходных величин наряду с электромагнитным моментом выступают энергетические свойства электропривода. С использованием вариационных методов определены условия управления, обеспечивающего изменение состояния электрической машины за минимальное время при установленных ограничениях. Предложенная методология синтеза управления способствует решению практически важных задач энергосбережения высокодинамичных систем воспроизведения движения большой и малой мощности.

* Статья получена 13 августа 2017 г.

Ключевые слова: электропривод переменного тока, критерии качества, многокритериальная оптимизация, многомерное управление, показатели качества, метод Лагранжа в форме Понтрягина, критерий качества быстрогодействия, метод обратной модели с линеаризацией по выходу, типовой характер изменения выходных величин

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность основывается на широком применении электрического привода (ЭП) в технологических процессах. Электропривод является не только средством управления технологическими процессами, но и энергосиловой установкой, обеспечивающей производственные механизмы необходимой энергией. Общепромышленные и уникальные промышленные установки оборудуются регулируемым приводами переменного тока, мощность которых составляет от единиц до сотен и тысяч киловатт. Потребляя более 60 % всей вырабатываемой в мире электроэнергии, электропривод проникает все глубже в автоматизацию производства. Конструктивно электрическая машина электропривода выполняется таким образом, чтобы в номинальных режимах работы потери в двигателе были минимальны, а оценка эффективности использования мощности $\cos(\varphi)$, подводимой к обмоткам двигателя, имела наилучшее значение. Вместе с тем снижение нагрузки на 50 % от номинальной величины вызывает снижение КПД до 40...60 % [1]. В процессе исторического развития быстродействующий электропривод достиг высокого уровня совершенства, обеспечивая высокие динамические свойства, удовлетворяющие самым разнообразным технологическим задачам. Являясь энергосиловой установкой, электропривод должен наилучшим образом отвечать не только динамическим, но и энергетическим требованиям, учитывая ограничения источника питания.

1. ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Предъявляемые к электроприводу технологические требования обусловлены желанием повысить производительность технологических процессов и максимально снизить потери энергии. Для решения задачи эффективного управления необходимо сопоставить основные свойства электропривода, учитывая величину реактивной мощности, потери в стали, потери в меди, нелинейность характеристики намагничивания, мощность мгновенного изменения энергии магнитного поля при формировании электромагнитного момента, эффективность использования напряжения и мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Основные свойства электропривода зависят от нагрузки и имеют противоречивый характер, что значительно усложняет решение задачи эффективного управления, обеспечивающего наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода. Эффективное управление электроприводом обуславливает многокритериальный подход к синтезу управления. Сложность заключается в том, что не разработано правило (принцип оптимальности), которое позволило бы ответить на вопрос, какое решение лучше для реализации предъявляемых к электроприводу технологических требований. Необходимо определить аргументы, характеризующие

закон управления, и установить перечень показателей качества, определяющих динамические и энергетические свойства электропривода в зависимости от выбранных аргументов. Задавая один критерий качества, ограничивая область допустимых управлений, следует определить другие локальные критерии, которые в этих условиях имеют наилучшее значение. Поэтому решение задачи комплексного (многокритериального) подхода к синтезу управления электроприводом, обеспечивающему наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода в рамках установленных ограничений, требует своего решения.

Процесс формализации многокритериальных задач неизбежно связан с экспертными оценками как самих критериев качества, так и связей между ними. Обычно из физического смысла задачи следует, что локальные критерии имеют различную важность при решении задачи, т. е. один локальный критерий имеет какой-то приоритет над другим критерием. Это следует учитывать при выборе принципа оптимальности и определения области возможных решений, отдавая предпочтение более важным критериям. Основанный на суждении экспертов по вкладу каждого критерия качества в общую оценку, метод анализа иерархий [2] не позволяет говорить об объективном решении задачи управления электроприводом. Отсутствие правила не дает возможности формализовать задачу управления, обеспечивающего эффективное использование электрической машины и источника питания для реализации технологических требований.

2. РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В настоящее время требования к динамическим и энергетическим свойствам определяют два различных направления развития электропривода переменного тока. Одно из них определяет энергоэффективное управление, обеспечивающее формирование электромагнитного момента при минимуме тока статора или минимуме суммарных потерь [3]. Это направление получило развитие в работах В.Г. Макарова, В.Н. Полякова и Р.Т. Шрейнера, где, учитывая насыщение магнитной системы двигателя, анализируются связи энергетических характеристик для реализации экстремального управления электроприводом [4]. Несмотря на несомненное достоинство, такие электроприводы не отличаются высоким быстродействием. Рост реактивной мощности снижает эффективность управления, не позволяя быстро парировать возмущение в условиях ограничения напряжения источника питания, снижая качество и производительность технологических процессов. Формирование экстремального управления по одному критерию качества не дает возможность оценить другие локальные критерии, показатели которых могут быть такими, что сформированное управление не может быть целесообразным [5]. Нелинейность характеристики намагничивания в совокупности с нелинейной связью регулируемых переменных и электромагнитного момента значительно усложняет задачу экстремального управления электроприводом, не позволяя контролировать динамику процессов [6].

Для высокодинамичных систем воспроизведения движения, по аналогии с машинами постоянного тока, управление формируют при стабилизации энергии магнитного поля, частным случаем которого является формирование

электромагнитного момента при стабилизации потокосцепления статора, ротора или потокосцепления в воздушном зазоре. Это направление обосновано в работе Blachke F. 1971 г. и до настоящего времени считается доминирующим в системах векторного управления машинами переменного тока [7]. При избытке энергии магнитного поля часть ресурсов управления направляют на стабилизацию потокосцепления, обеспечивая линеаризацию системы, приведя структуру управления к одноканальному виду. Но формирование электромагнитного момента в этих условиях не отличается экономичностью, поскольку поддерживать потокосцепление на уровне номинальной величины при различной нагрузке двигателя энергетически неэкономично. Быстродействие одноканальной системы связано с возможностью источника питания и ограничено полосой пропускания контуров регулируемых переменных. Используя все ресурсы управления, здесь нет возможности увеличивать энергию или мощность, затрачиваемую на регулирование. Известны системы прямого управления электромагнитным моментом (direct torque control). Такие системы, ограниченные по быстродействию напряжением источника питания, характеризуются существенными пульсациями электромагнитного момента, снижающими точность регулирования на малой скорости. Известный метод градиентного управления позволяет отыскивать аналитическое выражение регулятора, обеспечивающего движение к цели управления с максимальной интенсивностью исходя из текущего состояния объекта управления. Сложность формализации задачи, выбор целевой функции и весовых коэффициентов значительно усложняют решение задачи эффективного управления. Высокие требования к вычислительным ресурсам системы и ограничение напряжения питания вносят существенные погрешности регулирования, не позволяя использовать все возможности электрической машины [8].

Обобщая методы и способы управления, на примере обобщенной электрической машины рассматривается методология синтеза управления электроприводом переменного тока, обеспечивающего наряду с типовым характером формирования электромагнитного момента регулирование основных свойств электропривода. Разработанная методология базируется на двух концептуальных положениях, доказательство которых позволило сформировать новую систему взглядов на комплексный подход синтеза многомерного управления машинами переменного тока различного типа. Одно положение определяет условия изменения состояния электрической машины за минимальное время при формировании выходных величин. Другое концептуальное положение включает исследование связей основных свойств работы электрической машины, на основании которых разработано правило многокритериальной оптимизации работы электропривода.

3. ПРАВИЛО ВЫБОРА РЕШЕНИЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Модель обобщенной машины переменного тока, описываемой системой уравнений Кирхгофа в системе неподвижных или вращающихся координат:

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}\mathbf{I} + \omega\mathbf{D}\Psi + \frac{d\Psi}{dt}; \quad \mathbf{U} = [u_d \quad u_q \quad u_{rd} \quad u_{rq}]^T,$$

$$\Psi = [\Psi_d \quad \Psi_q \quad \Psi_{rd} \quad \Psi_{rq}]^T; \quad \mathbf{R} = \text{diag}\{R_s \quad R_s \quad R_r \quad R_r\},$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{L}^{-1}\Psi; \quad L_s = L_m + L_{\sigma}; \quad L_r = L_m + L_{\sigma r}; \quad L_m = \frac{\Psi_0}{I_0}, \quad (1)$$

$$I_0 = \sqrt{(i_d + i_{rd})^2 + (i_q + i_{rq})^2}; \quad \Psi_0 = \sqrt{(\Psi_d - L_{\sigma} i_d)^2 + (\Psi_q - L_{\sigma} i_q)^2}.$$

Поскольку рассматривается обобщенная машина, отношение потоко-сцепления в воздушном зазоре Ψ_0 к току намагничивания I_0 принято в виде постоянной величины. Для анализа связей силовых и энергетических характеристик рассмотрены процессы электромеханического преобразования энергии. Эти процессы неразрывно связаны с накоплением энергии в обмотках двигателя (энергией магнитного поля) и описываются уравнением (2) балан-са P мощности всех цепей управления:

$$P = \mathbf{I}^T \mathbf{R} \mathbf{I} + \omega \mathbf{I}^T \mathbf{D} \Psi + \mathbf{I}^T \frac{d\Psi}{dt} = \Delta P + \omega m + \frac{dw}{dt}; \quad (2)$$

$$w = \frac{1}{2} \Psi^T \mathbf{I}; \quad m = \mathbf{I}^T \mathbf{D} \Psi; \quad (3)$$

$$f(\beta, \varphi) = \frac{2w}{m} = \frac{1}{(\text{ctg } \beta + \text{tg } \varphi)} \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \frac{L_r L_s}{L_m^2 \sin^2 \beta} - 2 + 2 \text{tg } \varphi \text{ctg } \beta \right),$$

$$F(\varphi, \beta) = \frac{\Delta P}{m}; \quad F(\beta, \varphi) = \frac{1}{(\text{ctg } \beta + \text{tg } \varphi)} \left(\frac{R_s}{L_s \cos^2 \varphi} + \frac{R_r}{L_m^2 \sin^2 \beta} \right), \quad (4)$$

$$f_u(\beta, \varphi) = \frac{U^2}{R_s m} = \frac{\text{tg } \varphi^2 + [1 + \omega T_s (\text{ctg } \beta + \text{tg } \varphi)]^2}{T_s (\text{ctg } \beta + \text{tg } \varphi)}.$$

Из уравнения (2) следует, что состояние электрической машины зависит от четырех независимых переменных. В качестве независимых переменных могут выступать: m – электромагнитный момент, ω – угловая скорость вращения ротора, β и φ – два аргумента на рис. 1, которых достаточно для определения положения всех векторов. Из числа приведенных переменных m и ω заданы условиями технологической задачи. Варьируемыми величинами выбраны аргументы β и φ , с помощью которых осуществляется поиск эффективного управления электроприводом. Связи силовых и энергетических характеристик электрической машины для каждого положения векторов представлены в виде трех функций энергетического состояния (4). Используя установленные связи, определено влияние аргументов на характер процессов электромеханического преобразования энергии [9]. Определены показатели качества (рис. 2), характеризующие основные свойства электропривода. Здесь показатель времени T_d характеризует интенсивность процессов электромеханического преобразования энергии, η – показатель энергетической эффек-

тивности, U_0 – показатель эффективности использования напряжения, $\cos(\varphi)$ – показатель эффективности использования мощности.

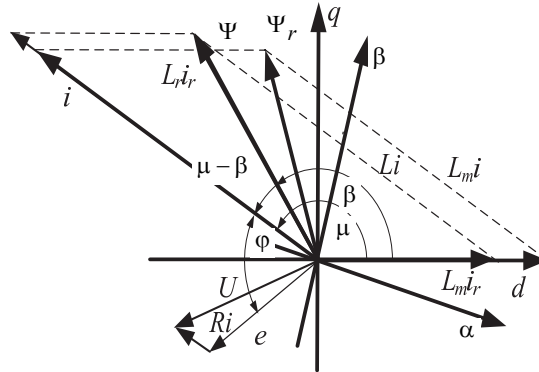


Рис. 1. Векторная диаграмма

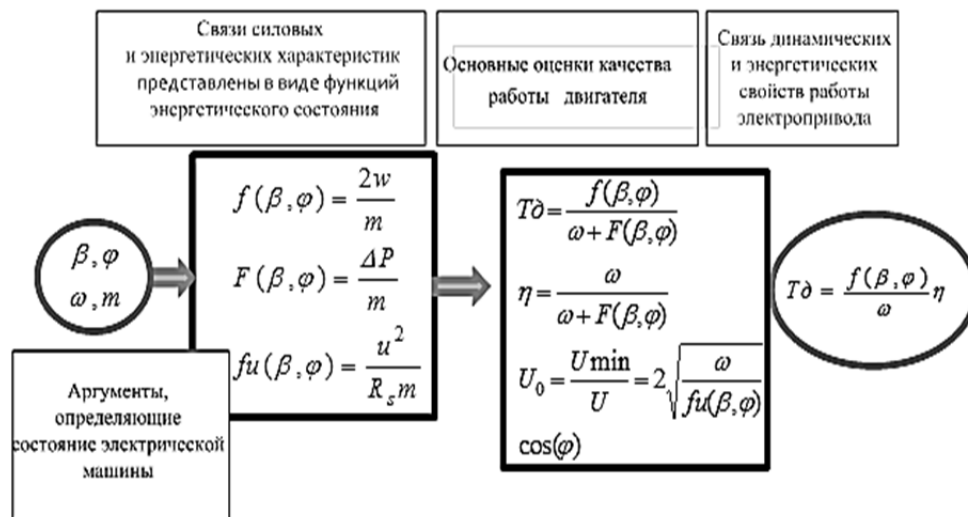


Рис. 2. Связи основных свойств электропривода

Использование явных связей основных свойств электропривода позволило установить правило выбора показателей качества многокритериальной оптимизации. Задавая один показатель качества, всегда можно определить значения аргументов β и φ , при которых другие показатели имеют наилучшее значение. Установленные правила позволяют формализовать задачу эффективного использования электрической машины и источника питания для достижения цели управления, определенной технологическими требованиями [10].

4. МНОГОМЕРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Для реализации решений многокритериальной задачи управления электрическая машина рассматривается в виде многомерного объекта, имеющего несколько входов и выходов, нелинейно связанных с регулируемыми пере-

менными. Для исключения нелинейной связи регулируемых переменных и выходных величин, синтез многомерного управления осуществляется методом обратной модели с линеаризацией по выходу (Linearization by output injection) [11]. Преобразовав уравнение (1), выполнен переход к системе новых регулируемых переменных $\tilde{\Psi}$. В силу простого математического описания, в качестве регуляторов выходных величин рассматриваются П - регуляторы.

$$\frac{d\Psi}{dt} = \mathbf{V}\Psi + \mathbf{U}; \quad \mathbf{V} = -\mathbf{R}\mathbf{L}^{-1} + \omega\mathbf{D}; \quad \Psi = \mathbf{B}\psi; \quad \psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2}; \quad (5)$$

$$\mathbf{B}^T = |b_d \quad b_q \quad b_{rd} \quad b_{rq}|; \quad \left\{ \sum_{i=1}^n u_i^2 \leq u_{ogr}^2 \right\} \subset \Omega; \quad i = \overline{1, n} \quad (n=4), \quad (6)$$

где $b_d = \cos(\beta)$; $b_q = \sin(\beta)$; $b_{rq} = \frac{L_m \sin(\beta)}{L_s}$,

$$b_{rd} = \frac{\cos(\beta) \left[(L_r L_s - L_m^2) \operatorname{tg}(\beta)^2 + L_m^2 \operatorname{tg}(\beta) \operatorname{tg}(\varphi) + L_r L_s \right]}{L_m L_s (\operatorname{tg}(\beta) \operatorname{tg}(\varphi) + 1)};$$

$$\mathbf{U} = -\mathbf{K}\Psi + \Psi_{ref} T_z^{-1}; \quad \Psi_{ref} = \mathbf{B}_{ref} \frac{L_s [\operatorname{ctg}(\beta) + \operatorname{tg}(\varphi)]}{\psi} U_{ref}, \quad (7)$$

$$\psi \tilde{\mathbf{B}} \frac{d\Psi}{dt} = \psi \tilde{\mathbf{B}} (\mathbf{V} - \mathbf{K}) \Psi + \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{B}_{ref} \frac{\operatorname{ctg}(\beta) + \operatorname{tg}(\varphi)}{T_z} L_s U_{ref},$$

где $\tilde{\mathbf{B}} = \operatorname{diag}\{b_d, b_q, b_{rd}, b_{rq}\}$; $\psi \tilde{\mathbf{B}} \Psi = \tilde{\Psi}$; $\tilde{\Psi}^T = |\Psi_d^2 \quad \Psi_q^2 \quad \Psi_{rd}^2 \quad \Psi_{rq}^2|$;

$$\frac{d\tilde{\Psi}}{dt} = 2(\mathbf{V} - \mathbf{K})\tilde{\Psi} + 2\tilde{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{ref} \frac{\operatorname{ctg}(\beta) + \operatorname{tg}(\varphi)}{T_z} L_s U_{ref}. \quad (8)$$

Вектор напряжения \mathbf{U} ограничен по модулю u_{ogr} и сформирован таким образом (7), чтобы в совокупности с обратными связями по регулируемым переменным Ψ в области допустимых управлений он отражал задание U_{ref} электромагнитного момента и задание основных свойств электропривода с помощью матрицы \mathbf{B}_{ref} . Под областью допустимых управлений понимаются все возможные управления, позволяющие сформировать предписанные значения выходных величин. Следует определить элементы матрицы \mathbf{K} регулятора управления, при котором состояние электрической машины в условиях ограничения полосы пропускания контуров регулируемых переменных на уровне T_z^{-1} будет изменяться за минимальное время [12].

5. ЗАДАЧА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Для решения задачи быстрогодействия применен метод Лагранжа в понтрягинской форме [13]. Связь (9) между оптимальным управлением, регулируемыими переменными и координатами вектора сопряженной системы определена посредством гамильтониана H быстрогодействия [14]:

$$\frac{d\tilde{\Psi}}{dt} = \mathbf{f}(\tilde{\Psi}, \tilde{\mathbf{B}}, U_{ref}), \quad H = \mathbf{S}^T \mathbf{f}(\tilde{\Psi}, \tilde{\mathbf{B}}, U_{ref}), \quad T = \int_{t_0}^{t_1} 1 dt \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$\mathbf{f}(\tilde{\Psi}, \tilde{\mathbf{B}}, U_{ref}) = 2(\mathbf{V} - \mathbf{K})\tilde{\Psi} + 2\tilde{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{ref} \frac{\text{ctg}\beta + \text{tg}\varphi}{T_z} L_s U_{ref}; \quad \tilde{\Psi}(0) = 0; \quad (10)$$

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \tilde{\Psi}} = -2(\mathbf{V} - \mathbf{K})^T \mathbf{S}, \quad \mathbf{S}(t) = e^{-2(\mathbf{V} - \mathbf{K})^T t} \mathbf{S}(0); \quad (11)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \tilde{\mathbf{B}}} = 0; \quad \frac{\partial H}{\partial U_{ref}} = 2\mathbf{S}^T \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{B}_{ref} \frac{L_s [\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)]}{T_z} = 0; \quad (12)$$

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{S}(0) e^{\frac{2t}{T_z}}, \quad \frac{d\mathbf{S}}{dt} = \frac{2}{T_z} \mathbf{S}, \quad \mathbf{K} = \mathbf{E} T_z^{-1} + \mathbf{V}; \quad (13)$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \text{diag}\{b_d, b_q, b_{rd}, b_{rq}\}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = \text{const}, \quad \mathbf{B} = \text{const} = \mathbf{B}_{ref},$$

$$\frac{d\tilde{\Psi}}{dt} = -2\frac{\tilde{\Psi}}{T_z} + 2\tilde{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{ref} \frac{\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)}{T_z} L_s U_{ref}; \quad (14)$$

$$\tilde{\Psi}(t) = e^{-2t/T_z} \tilde{\Psi}(0) + \int_0^t 2e^{2T_z^{-1}(t-\tau)} \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{B}_{ref} \frac{\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)}{T_z} L_s u_{ref} d\tau. \quad (15)$$

$$\psi^2(t) = U_{ref} L_s [\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)] \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_z}} \right);$$

$$\Psi(t) = \mathbf{B}\psi(t) = \mathbf{B} \sqrt{U_{ref} L_s [\text{ctg}(\beta) + \text{tg}(\varphi)] \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_z}} \right)}; \quad m = U_{ref} \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_z}} \right). \quad (16)$$

В результате формализации задачи управления выбраны аргументы β и φ , значения которых используются для задания основных свойств электропривода посредством элементов (6) матрицы \mathbf{B}_{ref} . Критерием качества является время T (9). Вектор \mathbf{S} сопряженной системы (11) имеет довольно сложную зависимость от времени. Из условий стационарности (12) следует, что изменение составляющих вектора сопряженной системы должно осуществляться пропорционально и с одинаковым темпом. Эти требования мо-

гут быть выполнены при определенном выборе (13) элементов матрицы **K** регулятора. Определенный выбор элементов матрицы **K** регулятора влияет и на решение (15) основной системы (14) уравнений, которое удалось получить в аналитическом виде для регулируемых переменных (16). Из полученных выражений следует, для основной системы уравнений заданное соотношение регулируемых переменных сохраняется как в статических, так и динамических режимах, обеспечивая типовой характер формирования электромагнитного момента при одновременном регулировании заданных свойств электропривода. Быстродействие системы в условиях ограничения полосы пропускания контуров регулируемых переменных в два раза выше относительно одноканальной структуры управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью рассматриваемого решения задачи управления является представление электрической машины в виде многомерного объекта, имеющего несколько входов и выходов, нелинейно связанных с регулируемыми переменными. Показан выбор аргументов и установлен перечень показателей качества, характеризующих динамические и энергетические свойства электропривода в зависимости от выбранных аргументов, определяющих закон управления. Установленные связи основных свойств электрической машины позволили разработать правило многокритериальной оптимизации электропривода. Разработанные правила позволяют формализовать задачу многокритериального управления, учитывая потери в стали и насыщение магнитной системы двигателя. Использование вариационных методов позволило определить условия управления, обеспечивающие изменения состояния обобщенной электрической машины за минимальное время в условиях установленных ограничений. За счет применения метода обратной модели с линеаризацией по выходу управление обеспечивает типовой характер формирования выходных величин. Типовой характер формирования электромагнитного момента определяет прогнозируемость процессов управления и преемственность синтеза внешних контуров способами подчиненного регулирования. Предложенная методология синтеза управления электроприводом способствует решению практически важных задач энергосбережения высокودинамичных систем воспроизведения движения большой и малой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Н.Ф., Горнов А.О. Критерии эффективности процесса электрохимического преобразования энергии в силовом канале электропривода. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 543 с.
2. Саати Т.Л. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы. – М.: Мир, 1973. – 302 с.
3. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Обобщение задач оптимизации установившихся режимов электрических двигателей // Труды международной тринадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – С. 15–18.
4. Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03. – Екатеринбург, 2009. – 495 с.
5. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Экстремальное управление электрическими. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 420 с.

6. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. – М: Энергия, 1964. – 527 с.
7. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
8. Семькина И.Ю. Повышение энерго и ресурсоэффективности горных машин средствами регулируемого электропривода: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03. – Кемерово, 2013. – 312 с.
9. Симаков Г.М., Филушов Ю.П. Энергоэффективное управление электроприводом переменного тока. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 245 с.
10. Филушов Ю.П. Синтез структуры управления синхронным двигателем в системе его физических переменных, обеспечивающий минимум реактивных потерь // Труды Всероссийской научно-технической конференции по повышению эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск, 1994. – С. 23–27.
11. Воевода А.А., Филушов Ю.П. Линеаризация обратной связью // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 2 (84). – С. 68–76.
12. Воевода А.А., Филушов Ю.П. Синтез алгоритма управления многоканальным объектом // Вестник РГРТУ. – 2017. – № 61. – С. 88–95.
13. Филушов Ю.П., Филушов В.Ю. Управление асинхронной машиной в условиях минимума реактивной мощности // Электротехника. – 2014. – № 2. – С. 15–20.
14. Алексеев В.М., Тихомиров С.В. Оптимальное управление. – М.: Наука, 1979. – 430 с.

Востриков Анатолий Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления. Имеет более 150 публикаций. E-mail: sch@sintez.nstu.ru

Прохоренко Евгений Валерьевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез систем управления. Имеет более 30 публикаций, в том числе 5 патентов. E-mail: prokhorenko@corp.nstu.ru

Филушов Юрий Петрович, кандидат технических наук, инженер ФГУП ПО «Север». Основное направление научных исследований – теория автоматического управления, оптимизация электромагнитных процессов в электрической машине. Имеет более 50 публикаций. E-mail: filushov@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-1-39-50

Multicriteria synthesis of multidimensional control of the AC electric drive*

A.S. VOSTRIKOV¹, E.V. PROKHORENKO², Yu.P. FILYUSHOV³

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: vostrikov@nstu.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; PhD (Eng.), associate professor. E-mail: prokhorenko@corp.nstu.ru*

³ *Federal State Unitary Enterprise "Sever", 1A, Ob'edineniya St., Novosibirsk, 630092, Russian Federation; PhD (Eng.), engineer. E-mail: filushov@mail.ru*

The arguments are defined based on which analytic relationship of power and power characteristics of the alternating current drive in the form of three functions of the energy state are established. These characteristics include electromagnetic torque, magnetic field energy, heat loss and voltage. Using the energy state functions by means of quality indices the relationships between the main properties of the AC drive are established taking into account the amount of reactive power, loss in steel, loss in copper, saturation of the engine magnetic system, the power of instantaneous change in the magnetic field energy in the formation of the

* Received 13 August 2017.

electromagnetic moment as well as the efficiency of using power and voltage fed to the engine windings. Depending on technological requirements, a rule for choosing solutions for multicriteria optimization of the electric drive is developed. The developed rule allows formalizing the problem of multicriteria control taking into account losses in steel and saturation of the engine magnetic system. Power efficiency, the intensity of processes of electromechanical energy transformation, the efficiency of using power and voltage fed to the engine windings serve as quality indices. The method of inverse model with output linearization is used to form multidimensional control of the electric drive, which allows changing output values in the velocity function, current or saturation of the engine magnetic system. The energetic properties of the electric drive along with the electromagnetic torque act as output values. Using variational methods, control conditions are determined that ensure the change in the state of the electric machine in a minimum time given the restrictions. The proposed methodology of control synthesis contributes to the solution of practically important problems of energy saving of highly dynamic systems of reproduction of high and low power motion.

Keywords: AC electric drive, quality criteria, multicriteria optimization, multidimensional management, quality metrics, Lagrange method in the Pontryagin form, criterion of performance quality, inverse model with output linearization, typical change of output values

REFERENCES

11. Il'inskii N.F., Gornov A.O. Kriterii effektivnosti protsessa elektrokhimicheskogo preobrazovaniya energii v silovom kanale elektroprivoda. Avtomatizirovannyi elektroprivod [Criteria of efficiency of process of electrochemical transformation of energy in the power channel of the electric drive. Automated electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 543 p.
2. Saaty T.L. *Optimization in integers and related extremal problems*. New York, McGraw-Hill, 1970 (Russ. ed.: Saati T.L. *Tselochislennyye metody optimizatsii i svyazannyye s nimi ekstremal'nyye problemy*. Moscow, Mir Publ., 1973. 302 p.).
3. Polyakov V.N., Shreiner R.T. [Generalization of optimization problems of steady-state modes of electric motors]. *Trudy mezhdunarodnoi trindatsatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka"* [Proceedings of the thirteenth international scientific-technical conference "Alternating current electrical drives"]. Ekaterinburg, 2005, pp. 15–18. (In Russian).
4. Polyakov V.N. *Energoeffektivnyye rezhimy reguliruemyykh elektroprivodov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Energy efficient modes of regulated electric drives. Dr. eng. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2009. 495 p.
5. Polyakov V.N., Shreiner R.T. *Ekstremal'noe upravlenie elektricheskimi dvigatelyami* [Extreme control of electric engines]. Ekaterinburg.: UGTU-UPI Publ., 2006. 420 p.
6. White D.C., Woodson H.H. *Electromechanical energy conversion*. New York, Wiley, 1959 (Russ. ed.: Uait D., Vudson G. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii*. Moscow, Energiya Publ., 1964. 527 p.).
7. Krasovskii A.A. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 712 p.
8. Semykina I.Yu. *Povyshenie energo i resursoeffektivnosti gornyykh mashin sredstvami reguliruemogo elektroprivoda*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Increase of power and resource efficiency of mining machines by means of the regulated electric drive. Dr. eng. sci. diss.]. Kemerovo, 2013. 312 p.
9. Simakov G.M., Filyushov Yu.P. *Energoeffektivnoe upravlenie elektroprivodom peremennogo toka* [Energy efficient control of AC electric drive]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 245 p.
10. Filyushov Yu.P. [Synthesis of synchronous motor control in the system of physical variables, providing a minimum reactive losses]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po povysheniyu effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri* [Proceedings of All-Russian scientific-technical conference on increasing the efficiency of production and use of energy in Siberia]. Irkutsk, 1994, pp. 23–27. (In Russian).
11. Voevoda A.A., Filyushov Yu.P. Linearizatsiya obratnoi svyaz'yu [Feedback linearization]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (84), pp. 68–76.
12. Voevoda A.A., Filyushov Yu.P. Sintez algoritma upravleniya mnogokanal'nym ob'ektom [Multi-channel object control algorithm synthesis]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-*

tehnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University, 2017, no. 61, pp. 88–95.

13. Filyushov Yu.P., Filyushov V.Yu. Upravlenie asinkhronnoi mashinoi v usloviyakh minimuma reaktivnoi moshchnosti [Control of an asynchronous machine under conditions of minimum reactive power]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 2, pp. 15–20. (In Russian).

14. Alekseev V.M., Tikhomirov S.V. *Optimal'noe upravlenie* [Optimal control]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 430 p.

Для цитирования:

Востриков А.С., Прохоренко Е.В., Филлюшов Ю.П. Многокритериальный синтез многомерного управления электроприводом переменного тока // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 1 (70). – С. 39–50. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-39-50.

For citation:

Vostrikov A.S., Prokhorenko E.V., Filyushov Yu.P. *Mnogokriterial'nyi sintez mnogomernogo upravleniya elektroprivodom peremennogo toka* [Multicriteria synthesis of multidimensional control of the AC electric drive]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (70), pp. 39–50. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-39-50.