

УДК 68.83.523

Ю.П. Филюшов ¹, Г.М. Симаков ², В.Ю. Филюшов ²

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Север»

² Новосибирский государственный технический университет

Для эффективного управления электрической машиной необходимо обеспечение наилучшего сочетания динамических и энергетических свойств электропривода. Однако эти свойства имеют противоречивый характер, что требует комплексного подхода к синтезу управления и формализации задачи управления. В работе рассмотрено правило выбора решений многокритериальной оптимизации, на основе которого формализуется задача эффективного управления электроприводом переменного тока. Приведены функции энергетического состояния электрической машины, описывающие связи силовых и энергетических характеристик. Установлено, что поверхности функций обладают минимумом, который зависит от конструктивного исполнения электрической машины. Рассмотрены условия изменения состояния электрической машины за минимальное время при ограничении мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Сформулировано правило выбора решений многокритериальной оптимизации работы электропривода в зависимости от цели и характера технологической задачи. На основе правила предложен метод формализации требований к управлению, обеспечивающему эффективное использование электрической машины и источника питания для реализации цели управления.

Ключевые слова: многокритериальный синтез управления, обобщенная электрическая машина, связи основных свойств электрической машины посредством показателей качества, электропривод переменного тока.

1. Актуальность работы

В процессе исторического развития быстродействующий электропривод достиг высокого уровня совершенства, обеспечивая высокие динамические свойства, удовлетворяющие самым разнообразным технологическим задачам. Вместе с тем, являясь энергосиловой установкой, электропривод должен наилучшим образом отвечать не только динамическим, но и энергетическим требованиям, учитывая существующие ограничения [1].

Предъявляемые к электроприводу требования обусловлены желанием повысить производительность технологических процессов и максимально снизить потери энергии [2]. Для решения задачи эффективного управления необходимо сопоставить основные свойства электропривода, учитывая величину реактивной мощности, потери в стали, потери в меди,

насыщение магнитной системы, мощность мгновенного изменения энергии магнитного поля при формировании электромагнитного момента, эффективность использования напряжения и мощности, подводимой к обмоткам двигателя. Эти свойства имеют противоречивый характер, что усложняет решение задачи эффективного управления, обеспечивающего наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода, которое достигается при наиболее полном использовании электрической машины и источника питания [3]. Такое управление зависит от нескольких показателей качества, что обуславливает многокритериальный подход к синтезу управления электроприводом [4]. Эффективное управление должно обеспечить наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода в условиях существующих ограничений. Сложность заключается в том, что не разработано правило (принцип оптимальности), которое позволило бы ответить на вопрос, какое решение лучше для реализации предъявляемых требований к электроприводу [5]. Необходимо знать аргументы, определяющие закон управления, и установить перечень показателей качества, влияющих на динамические и энергетические свойства электропривода в зависимости от принятых аргументов. Задавая один критерий качества, ограничивая область допустимых управлений, следует определить другие локальные критерии, показатели которых в этих условиях имеют наилучшее значение. Поэтому решение задачи комплексного (многокритериального) подхода к синтезу управления, обеспечивающего наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода, в рамках установленных ограничений, требует своего решения [6].

II. Связи силовых и энергетических характеристик электрической машины

Для решения задачи эффективного управления разработано правило выбора решений многокритериальной оптимизации работы электропривода, на основании которого формализуется задача управления, обеспечивающего наилучшее сочетание динамических и энергетических свойств электропривода в условиях заданных ограничений. Учитывая разнообразие исследуемых объектов, в качестве преобразователя энергии рассматривается обобщённая электрическая машина. Вектор напряжения U определяет управление (1) электрической машиной:

$$U = R \cdot I + \omega \cdot D \cdot \Psi + \frac{d\Psi}{dt}; U = [u_d \quad u_q \quad u_{rd} \quad u_{rq}]^T; \quad (1)$$

$$\Psi = [\psi_d \quad \psi_q \quad \psi_{rd} \quad \psi_{rq}]^T; R = \text{diag}\{R_s \quad R_s \quad R_r \quad R_r\};$$

$$I = L^{-1} \cdot \Psi; L_s = L_m + L_{\sigma}; L_r = L_m + L_{\sigma r}; L_m = \frac{\Psi_0}{I_0};$$

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

где D – матрица поворота; L – матрица индуктивностей; L_{σ} , $L_{\sigma r}$ – индуктивности рассеивания обмоток статора и ротора; L_s , L_r – полные индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора определяет мгновенное отношение потокоцепления в воздушном зазоре Ψ_0 к току намагничивания I_0 .

Для обобщенной электрической машины связь потокоцепления в воздушном зазоре и тока намагничивания имеет линейную зависимость.

Исследование основывается на математической модели (1), представленной уравнениями Кирхгофа в системе координат d, q , вращающихся со скоростью ротора ω , ориентированной по току ротора $i_{rq} = 0$, $i_{rd} = i_r$. Связи силовых и энергетических характеристик, в качестве которых выступают электромагнитный момент, энергия магнитного поля, тепловые потери и напряжение, подводимое к обмоткам электрической машины, рассмотрены в работе 2009 года [7]. Для анализа этих связей нами рассмотрены процессы электромеханического преобразования энергии. Эти процессы неразрывно связаны с накоплением энергии w в обмотках двигателя (энергией магнитного поля) и описываются уравнением (2) баланса P мощности всех цепей управления.

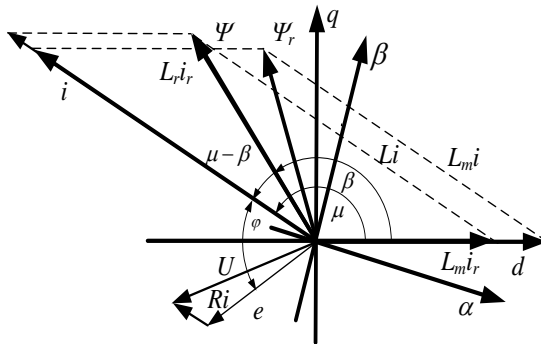


Рис. 1. Векторная диаграмма работы обобщенной электрической машины

Из представленного уравнения следует, что состояние электрической машины зависит от четырех независимых переменных [8]. В качестве независимых переменных могут выступать: электромагнитный момент m ;

ω – угловая скорость вращения ротора; β , φ – два аргумента представленных на рисунке 1, которых достаточно для определения положения всех векторов. Из числа приведенных переменных m и ω заданы условиями технологической задачи. Варьируемыми величинами выбраны аргументы β , φ с помощью которых осуществляется поиск связей основных свойств работы электропривода.

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

$$w = \frac{1}{2} \cdot \Psi^T \cdot I ; f(\varphi, \beta) = \frac{2 \cdot w}{m} ;$$

$$f(\beta, \varphi) = \frac{1}{(\text{ctg } \beta + \text{tg } \varphi)} \cdot \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} + \frac{L_r \cdot L_s}{L_m^2 \cdot \sin^2 \beta} - 2 + 2 \text{tg } \varphi \cdot \text{ctg } \beta \right) . \quad (3)$$

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

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

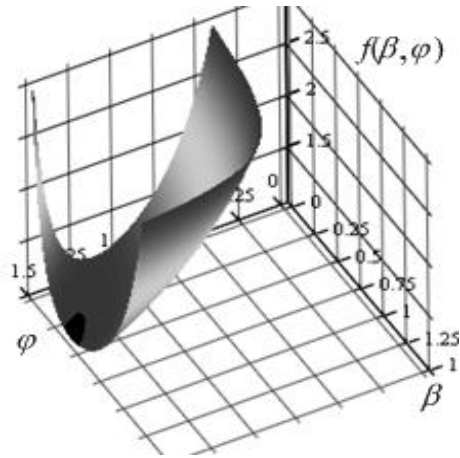
$$f_{\min} = \frac{2 \cdot \sqrt{L_r \cdot L_s - L_m^2}}{L_m} ; \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} ; \varphi = \arcsin \sqrt{\frac{L_r \cdot L_s - L_m^2}{L_r \cdot L_s}} .$$

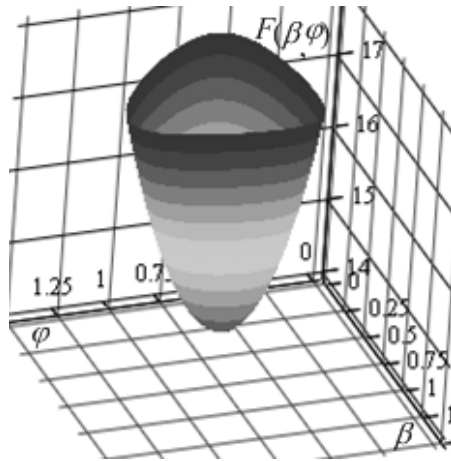
$$F_{\min} = \frac{2 \cdot \sqrt{R_r \cdot R_s}}{L_m} ;$$

$$\varphi = \beta = \arcsin \left(L_s \cdot \sqrt{\frac{R_r}{R_r \cdot L_s^2 + R_s \cdot L_m^2}} \right) . \quad (6)$$

Связи силовых и энергетических характеристик электрической машины представлены в виде двух функций энергетического состояния [9]. Поверхности значений функций в линейной части характеристики намагничивания отражены на рисунке 2. Первая функция энергетического состояния $f(\varphi, \beta)$ определяет связь между энергией w , накапливаемой в обмотках электрической машины, и электромагнитным моментом (3), не имеет размерности.



а.



б.

Рис. 2. Поверхности значений первой $f(\varphi, \beta)$ (а) и второй $F(\varphi, \beta)$ (б) функций энергетического состояния электрической машины

Связь между тепловыми потерями и электромагнитным моментом m представлена в виде второй функции (4) энергетического состояния $F(\varphi, \beta)$ [с^{-1}]. Потери в стали учитываются в табличной форме. Проведенные исследования показывают: поверхность значений каждой из функций имеет минимум f_{\min} , F_{\min} , который зависит от конструктивного исполнения электрической машины и достигается при определенном положении векторов [10]. Минимум $f(\varphi, \beta)$ достигается при аргументах β , φ , определен-

ных выражением (5). Минимум $F(\varphi, \beta)$ достигается при аргументах, определенных другими формулами (6). Установленные связи силовых и энергетических характеристик обобщенной электрической машины позволяют экстраполировать полученные результаты и на другие типы электрических машин, учитывая потери в стали насыщение магнитной системы двигателя.

III. Структурирование связей основных свойств электропривода

При повышении быстродействия системы путем форсирования управления увеличиваются напряжение и мощность, подводимая к обмоткам двигателя. Это определяет увеличение интенсивности процессов преобразования энергии. Рассмотрим условия изменения состояния электрической машины за минимальное время при ограничении мощности, подводимой к обмоткам двигателя [11]. В качестве уравнения связи (7) рассмотрим уравнение баланса мощностей (2) полагая, что темп изменения энергии магнитного поля существенно превышает темп изменения скорости вращения ротора:

$$\frac{dw}{dt} = -2 \cdot w \cdot \frac{\omega + F(\beta, \varphi)}{f(\beta, \varphi)} + P_{ref}; \quad T_\omega = \frac{f(\beta, \varphi)}{\omega + F(\beta, \varphi)}. \quad (7)$$

$$T_\omega = \frac{f(\beta, \varphi)}{\omega} \cdot \eta [c]. \quad (8)$$

Параметр времени T_ω , характеризующий темп электромеханического преобразования энергии, может выступать в качестве показателя качества работы электропривода (8). Он зависит от функций энергетического состояния $F(\varphi, \beta)$, $f(\varphi, \beta)$ и угловой скорости вращения ротора ω . Положение векторов, при котором функция $f(\varphi, \beta)$ имеет минимальное значение, определяет условие наивысшей интенсивности процессов преобразования энергии при ограничении их мощности. В этих условиях возрастают потери в электроприводе. Это потребовало установить зависимость показателя η энергетической эффективности и показателя интенсивности процессов преобразования энергии T_ω .

Напряжение подводится к обмоткам двигателя в зависимости от способа управления, реализуемого в электроприводе. Желаемые соотношения энергетических и динамических свойств электропривода могут быть реализованы только при достаточной величине напряжения, значение которого всегда ограничено. Поэтому оценка свойств будет неполной без оценки величины и эффективности использования напряжения u , подводимого к обмоткам двигателя. Для этой цели введена третья функция (9)

энергетического состояния $f_u(\varphi, \beta)$, устанавливающая зависимость между модулем напряжения статора и электромагнитным моментом:

$$f_u(\beta, \varphi) = \frac{u^2}{R_s \cdot m}, \text{ где } u = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}. \quad (9)$$

$$f_u(\beta, \varphi) = \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi + [1 + \omega \cdot T_s \cdot (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{tg} \varphi)]^2}{T_s \cdot (\operatorname{ctg} \beta + \operatorname{tg} \varphi)} [\text{c}]. \quad (10)$$

$$U_0 = \frac{U_{\min}}{U} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega}{f_u(\beta, \varphi)}}; U_{\min} = 2 \cdot \sqrt{R_s \cdot \omega \cdot m}. \quad (11)$$

Приняв обозначение $T_s = L_s/R_s$, третья функция энергетического состояния $f_u(\varphi, \beta)$ записана формулой (10). Поверхность значений функции $f_u(\varphi, \beta)$ представлена на рисунке 3. При заданной скорости вращения ротора аргументы функции $f_u(\varphi, \beta)$ могут характеризовать величину необходимого напряжения.

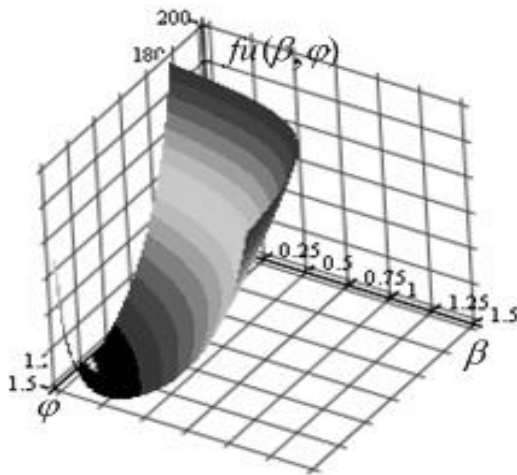


Рис. 3. Третья функция энергетического состояния, характеризующая связь электромагнитного момента и напряжения, подводимого к обмоткам двигателя

Для оценки эффективности использования напряжения U_0 выбрано отношение U_{\min} к величине напряжения U , требуемого для реализации того или иного способа управления (11), где U_{\min} – величина минимального

напряжения необходимого для передачи исполнительному механизму заданной мощности при фиксированной скорости ω .

Сочетание аргументов φ , β функций (3-4) и (10) определяет основные свойства работы электрической машины, которые характеризуются показателями качества.

Аргументы φ , β могут выступать в качестве задания основных свойств электропривода при организации многомерного управления. На рисунке 4 представлена структурная схема связей основных свойств электропривода от аргументов, определяющих положение векторов в системе вращающихся координат. В качестве показателей качества выступают:

- коэффициент полезного действия;
- показатель интенсивности процессов преобразования энергии;
- показатель эффективности использования напряжения;
- показатель эффективности использования мощности.

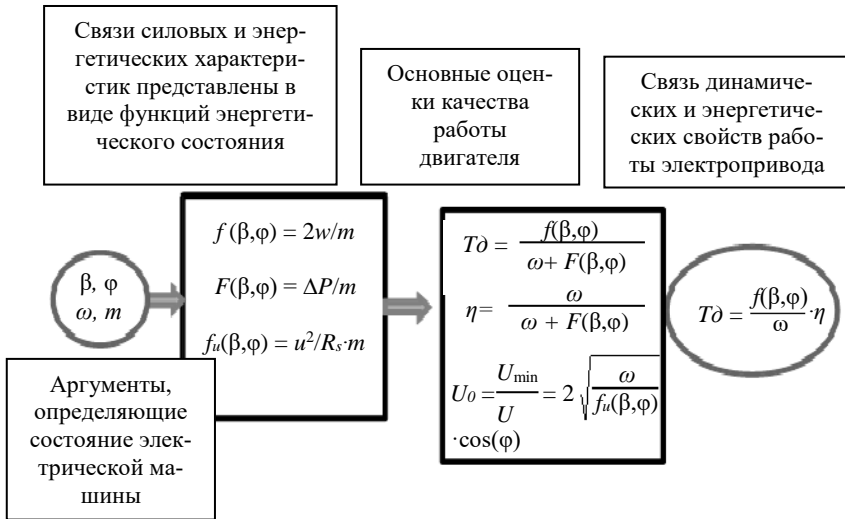


Рис. 4. Структура связей показателей основных свойств работы электрической машины

IV. Решение многокритериальной оптимизация электропривода

Установленный перечень взаимосвязанных показателей качества динамических и энергетических свойств позволяет сформулировать правило выбора решений многокритериальной оптимизации работы электропривода в зависимости от цели и характера технологической

задачи. Задавая один показатель, всегда можно определить аргументы, при которых другие показатели качества имеют наилучшее значение. Рассмотрим применение этого правила на следующем примере. Пусть задано время t_{ref} , в течение которого необходимо линейно сформировать электромагнитный момент m_{ref} при ограничении мощности P_{ref} , подводимой к обмоткам двигателя. Скорость вращения ротора равна нулю. В этих условиях необходимо определить аргументы β , φ , при которых потери ΔP_{min} минимальны. Для этой цели определена безразмерная величина первой функции энергетического состояния $f(\beta, \varphi)$:

$$\frac{dw}{dt} = P_{ref} = \frac{f(\beta, \varphi)}{2} \cdot \frac{dm}{dt}; \quad f(\beta, \varphi) = \frac{P_{ref}}{2} \cdot \frac{t_{ref}}{m_{ref}}; \quad (12)$$

$$\beta = f(\varphi); \quad \Delta P_{min} = F(\beta) \cdot M_{ref}.$$

Установленное значение функции $f(\beta, \varphi)$ позволяет определить связь между аргументами φ , β в области значений, где выполняются условия заданного быстродействия. При определенном значении функции $f(\beta, \varphi)$ следует выделить те значения аргументов, при которых вторая функция $F(\beta, \varphi)$ имеет минимальное значение. При подстановке полученной связи аргументов в (4), вторая функция энергетического состояния $F(\beta)$ представляется зависимостью уже от одного аргумента.

Минимум функции $F(\beta)$, представленный на рисунке 5, определяет те значения аргументов, при которых достигаются условия заданного быстродействия.

Зная аргументы, доставляющие наилучшее соотношение динамических и энергетических свойств электропривода при различной скорости вращения ротора, следует проверить решение в условиях существующих ограничений. В качестве ограничений могут выступать показатели, представленные на рисунке 4 в структурированном виде. В случае выхода на ограничение (напряжения или эффективности использования мощности), следует снизить быстродействие или, в условиях ограничения быстродействия, увеличить потери, определив новые значения аргументов. На основании разработанного правила многокритериальной оптимизации предложен метод формализации требований к управлению, которое обеспечивает эффективное использование электрической машины и источника питания для реализации цели управления.

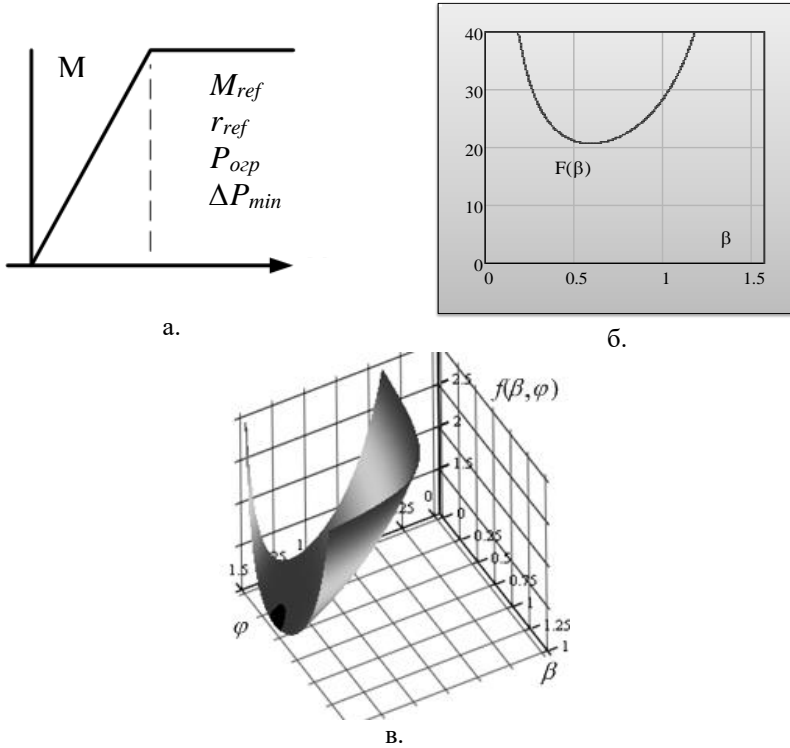


Рис. 5. Пример выбора решений многокритериальной оптимизации

В. Заключение

Задача выбора решений многокритериальной оптимизации электропривода является составной частью разработанной концепции комплексного подхода к синтезу многомерного управления электроприводами различного типа. Формализация задачи управления выполняется в соответствии с технологическими требованиями. Определяется изменение аргументов в функции скорости или нагрузки. Синтез многомерного управления электроприводом позволяет, наряду с формированием электромагнитного момента, регулировать энергетические свойства электропривода. Концепция включает рассмотрение условий изменения состояния электрической машины вариационными методами за минимальное время при ограничении полосы пропускания регулируемых переменных [12, 13]. Стандартный характер изменения выходных величин достигается за счет синтеза управления методом обратной модели с линеаризацией по выходу [14]. Новизна и приоритет управления, формализация которого осуществ-

лена на основе разработанного правила, подтверждена патентом на изобретение № 2092967 РФ, Н 02 Р 21/00. Его идея положена в основу методологии синтеза многомерного управления электрическими машинами (синхронных с электромагнитным возбуждением, явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов и асинхронных машин с короткозамкнутым ротором) быстродействующего электропривода. Такое управление расширяет потребительские свойства электропривода переменного тока, поскольку не осуществляет предварительного намагничивания магнитной системы двигателя и улучшает интегральную оценку КПД за время переходного процесса на 6-8% [15-16].

Областью применения алгоритмов управления, основанных на разработанной концепции, могут быть электроприводы металлургической, металлообрабатывающей промышленности, электроприводы подвижного состава железнодорожного транспорта, где к технологическим процессам предъявляются высокие динамические и энергетические требования в условиях существенного изменения нагрузки.

© Филюшов Ю.П., 2018

© Симаков Г.М., 2018

© Филюшов В.Ю., 2018

Библиографический список

- [1] Ильинский Н.Ф., Сарбатов Р.С. Научно-технические аспекты повышения эффективности использования энергии в массовом электроприводе. Автоматизированный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
- [2] Шубенко В.А., Оптимизация частотно управляемого асинхронного электропривода по минимуму тока // Электричество. 1970. № 9. С. 23-26.
- [3] Филюшов Ю.П. Метод оптимального синтеза управляющих воздействий машины переменного тока // Электротехника. 2012. № 8. С. 28-34.
- [4] Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. М.: Энергия, 1964. – 527 с.
- [5] Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
- [6] Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2006. – 420 с.
- [7] Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: дис. док. техн. наук, Ур. гос. техн. ун-т, Екатеринбург, 2009. – 495 с.
- [8] Филюшов 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. 1-5.

- [9] Симаков Г.М. Энергоэффективное управление. Исследование энергоэффективного управления быстродействующим асинхронным электроприводом // IX международная конференция по автоматизированному электроприводу (АЭП-2016). Пермь, 2016. С. 152-168.
- [10] Филюшов Ю.П. Оптимизация электромагнитных процессов в асинхронной короткозамкнутой машине // Электричество. 2011. № 5. С. 42-47.
- [11] Алексеев В.М. Оптимальное управление. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 430 с.
- [12] Воевода А.А. Синтез алгоритма управления многоканальным объектом // Вестник РГРТУ. 2017. № 61. С. 88-95.
- [13] Филюшов В.Ю. Линеаризация нелинейного трехканального динамического объекта обратной связью // Научный вестник НГТУ. 2017. т. 66. № 1. С. 43-49.
- [14] Филюшов Ю.П. Оптимизация электромагнитных процессов в синхронной машине // Электричество. 2011. № 8. С. 57-62.
- [15] Филюшов Ю.П. Управления асинхронной машиной в условиях минимума реактивной мощности // Электротехника. 2014. № 2. С. 15-20.

J.P. Filyushov ¹, G.M. Simakov ², V.J. Filyushov ²

MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF AC ELECTRIC DRIVE

¹ Federal State Unitary Enterprise Production Association «Sever»,
Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russia

Abstract. To effectively control an electric machine, it is necessary to ensure the best combination of dynamic and energy properties of an electric drive. However, these properties are contradictory, which requires a comprehensive approach to the synthesis of management and the formalization of the management task. The paper considers a rule for choosing solutions of multi – criteria optimization, on the basis of which the task of efficient control of an AC electric drive is formalized. The functions of the energy state of the electric machine, describing the relationship of power and energy characteristics have been presented. It is established that the surface functions have a minimum, which depends on the design of the electric machine. The conditions for changing the state of an electric machine in the shortest time while limiting the power supplied to the motor windings are considered. A rule has been formulated for choosing solutions for multicriterial optimization of the electric drive operation depending on the purpose and nature of the technological problem. On the basis of the rule, a method of formalization of management requirements has been proposed, which ensures the effective use of an electrical machine and a power source for realizing the purpose of control.

Keywords: communication of the basic properties of an electric machine by means of quality indicators, electric drive of alternating current, generalized electric machine, multi-criteria synthesis of control.

References

- [1] N.F. Ilinskiy and R.S. Sarbatov, Scientific and technical aspects of increasing the efficiency of energy use in the mass electric drive. Automated electric drive. Moscow: Energoatomizdat, 1986.
- [2] V.A. Shubenko. Optimization of the Frequency Controlled Asynchronous Electric Water-to-Current Minimum // *Electricity*. no. 9, pp. 23-26, 1970.
- [3] Yu.P. Filyushov. Method of optimal synthesis of control actions of an alternating current machine // *Elektrotehnika*, no. 8, pp. 28-34, 2012.
- [4] D. White, G. Woodson, Electromechanical energy conversion. Moscow: Energy, 1964.
- [5] R.T. Schreiner, T. R. Dmitrenko. Optimum frequency control of asynchronous electric drives. Kishinev: Shtiintsa 1982.
- [6] V.N. Polyakov, Extreme electric motor control. Yekaterinburg: UGTU – UPI, 2006.
- [7] V.N. Polyakov. Energy efficient modes of adjustable electric drives// Doc. of Tech. S. thesis, Ural State Technical University, Yekaterinburg, Russia, 2009.
- [8] Yu.P. Filyushov. Synthesis of the control structure of a synchronous engine in the system of its physical variables, ensuring a minimum of jet losses// in proc. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference on improving the efficiency of energy production and use in Siberia. 1994, Irkutsk, Russia, pp. 1-5.
- [9] G.M. Simakov. Energy efficient management. Study of energy – efficient control of high – speed asynchronous electric drive// in proc. IX Intern. Conf. on Automated electric drive (AEP-2016). 2016, Perm, Russia, pp. 152-168.
- [10] Yu.P. Filyushov. Optimization of electromagnetic processes in an asynchronous short-circuited machine // *Electricity*, no. 5, pp. 42-47, 2011.
- [11] V.M. Alekseev. Optimal control. Moscow: Science, 1979.
- [12] A.A. Voevoda. Synthesis of the control algorithm of a multichannel object // *Vestnik RGRTU*, no. 61, pp. 88-95, 2017.
- [13] V.Yu. Filyushov. Linearization of a nonlinear three-channel dynamic object by feedback // *Scientific Herald of the NSTU*, t. 66, no 1, pp. 43-49, 2017.
- [14] Yu.P. Filyushov. Optimization of electromagnetic processes in the synchronous machine bus // *Electricity*, no. 8, pp. 57-62, 2011.
- [15] Yu.P. Filyushov. Control of an asynchronous machine in conditions of a minimum of reactive power // *Electrical Engineering*, no. 2, pp. 15-20, 2014.