ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

А. Н. Попов [A. N. Popov]

УДК 681.51

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

THE THEORETICAL BASES OF THE SYNTHESIS OF POWER SAVING REGULATORS FOR THE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

В статье рассматривается применение методов синергетической теории управления для решения задач синтеза алгоритмов энергосберегающего управления электромеханическими системами. Приводится пример применения предлагаемого подхода для синтеза алгоритмов энергосберегающего векторного управления асинхронным двигателем.

The paper is devoted to using of the methods of synergetic control theory for synthesis of energy saving control by electromechanical processes. The proposed approach application for induction motor is demonstrated.

Ключевые слова: электромеханическое преобразование энергии, энергосбережение, автоматическое управление, энергетические инварианты, синергетический синтез регуляторов.

Key words: electromechanical energy conversion, energy saving, automatic control, energy invariants, synergetic synthesis of regulators.

Процессы электромеханического преобразования энергии имеют чрезвычайно широкое распространение в технологической деятельности человека. Электрические машины остаются не только основным типом генераторов механического движения, но и являются основным потребителем электроэнергии. В связи с этим проблема максимально эффективного электромеханического преобразования энергии имеет приоритетное значение в рамках общей стратегии рационального использования энергетических ресурсов и создания энергосберегающих технологий.

Успешное решение указанной проблемы предполагает проведение комплекса мероприятий организационно-правового, научно-технического и экономического характера, проводимых как на стадии проектирования соответствующих электромеханических систем (ЭМС), так и на стадии их эксплуатации. К числу наиболее характерных технических способов повышения энергетической эффективности электромеханических процессов, прежде всего, относятся:

– использование менее энергоемких материалов и совершенствование конструкции электрических машин;

– рациональная организация работы соответствующей электромеханической системы;

– использование принципов автоматического управления;

– поиск законов энергосберегающего управления.

Применение принципов автоматического управления способствует более гибкой организации электромеханических процессов и, следовательно, приводит к определенному энергетическому выигрышу. Однако здесь источник энергосбережения далеко не исчерпан. Резервы повышения энергетической эффективности следует искать в совершенствовании самих законов (алгоритмов) автоматического управления. Таким образом, возникает отдельная задача поиска *законов энергосберегающего управления*, которые позволяют снизить, а в идеальном случае минимизировать уровень энергетических потерь при текущем уровне полезной мощности, в свою очередь определяемым характеристиками генерируемого механического движения.

В настоящей статье рассматривается подход к построению законов энергосберегающего управления электромеханическими процессами, основанный на идее поиска инвариантных энергетических соотношений и использующий принципы и методы синергетической теории системного синтеза [1].

Проблема синтеза энергосберегающих регуляторов

Очевидная актуальность проблемы энергосбережения обусловливает интерес к решению данной проблемы со стороны специалистов по автоматике и привлечение различных направлений и методов теории автоматического управления. Тем не менее, пока можно констатировать фактическое отсутствие универсальных подходов к решению задачи аналитического синтеза законов энергосберегающего управления. Сформулируем эту задачу в привычной для теории управления постановке.

Пусть динамика системы описывается математической моделью в переменных состояния:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{m}),$$

где $\mathbf{x}$ – вектор переменных состояния, $\mathbf{u}$ – вектор управляющих воздействий, $\mathbf{m}$ – вектор возмущающих воздействий.

Требуется найти закон управления $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x})$ как некоторую совокупность обратных связей, которые обеспечивают перевод системы из произвольного начального состояния из некоторой допустимой области в заданное состояние. Заданное состояние должно соответствовать реализации основных целей управления. В случае энергосберегающего управления системой эти цели должны отвечать требованиям решаемых данной системой технологических задач, а также требованиям эффективного использования энергии.

Использование подходов классической теории автоматического регулирования предполагает линейное или линеаризованное математическое описание управляемых процессов и скалярное управление. Поэтому большинство традиционных систем автоматического управления представляют собой системы стабилизации, работающие по принципу компенсации отклонения выходной (технологической) переменной от требуемого значения за счет соответствующей обратной связи. При этом в контуре обратной связи используются стандартные регуляторы, реализующие закон П, ПИ или ПИД типа. Очевидно, что работоспособность таких систем ограничена областью адекватности линейной модели реальным физическим процессам, а регулятор, в основном, «озадачен» обеспечением устойчивости системы относительно заданного значения технологической переменной. Кроме того, скалярный принцип управления, который зачастую искусственным образом навязывается системе путем сепарирования ее на отдельные локальные подсистемы или путем игнорирования потенциальных каналов управления, ограничивает возможности эффективного воздействия на систему. Тем самым сужается круг дополнительных задач, которые данная система может решать, в том числе и задач энергосбережения. Справедливости ради, необходимо отметить, что сформулированная выше проблема синтеза энергосберегающих регуляторов в классической теории управления фактически не ставилась. Наверное, в силу своей сложности.

Попытки учета энергетических особенностей управляемых процессов (иногда вполне успешные) были предприняты методами теории оптимального управления, получившей бурное развитие во второй половине прошлого столетия. Под оптимальным управлением в общем случае понимается управляемый перевод системы из начального состояние в конечное с минимизацией на траекториях движения некоторого целевого функционала. Целевой функционал (критерий качества) постулируется априори и отражает желаемые свойства управляемой системы в динамических и стационарных режимах ее функционирования. Следующие два частных критерия качества принято относить к «энергетическим»:

– минимизация расхода топлива или вещества

$$I_1 = \int_0^T \sum_{k=1}^m c_k |u_k| dt; \quad (1)$$

– минимизация расхода энергии

$$I_2 = \int_0^T \sum_{k=1}^m c_k^2 u_k^2 dt. \quad (2)$$

Основной проблемой теории оптимального управления остается проблема аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), то есть задача синтеза обратных связей, обе-

спечивающих минимум постулируемого функционала. К сожалению, несмотря на строгую математическую постановку и логическую завершенность, проблема АКОР получила свое разрешение в основном для случая линейных объектов невысокого порядка и квадратичных функционалов. В то же время, эффективное управление современными процессами и системами требует количественного учета таких факторов, как сверхвысокая плотность, температура, давление, скорость и т.п. и, следовательно, обусловливает необходимость использования нелинейного математического описания. Очевидно также, что дополнительные требования к качеству функционирования системы могут быть удовлетворены, когда в процесс управления активно включены все предусмотренные конструкцией каналы целенаправленного воздействия.

Помимо указанных выше методологических трудностей существует, на наш взгляд, еще один фактор, ограничивающий использование традиционных подходов в задачах синтеза энергосберегающих регуляторов. Имеется в виду их чрезмерный формализм. Трудно представить, что для управления самыми разнообразными процессами и явлениями подходит один и тот же универсальный рецепт в виде типового закона управления или стандартного критерия качества.

Например, «энергетические» критерии (1) и (2) оптимальной теории управления физически понятны, так как предполагают минимизацию модуля или квадрата управляющего воздействия. Если по механической аналогии считать управление некоторой силой, действующей на систему извне, то оптимизация по критериям (1) и (2) соответствует минимально возможному значению этой силы на траекториях движения. Действие силы приведет к соответствующей реакции системы, которая, в свою очередь, зависит от ее внутренних свойств. Мощность, потребляемая системой, равна произведению силы на соответствующую скорость (реакцию системы на действие силы). Очевидно, что критерии (1) и (2) этот факт не учитывают, поскольку сформулированы без учета свойств системы. Можно также дать электротехническую интерпретацию предыдущих рассуждений. Если управление есть напряжение на зажимах простой электрической цепи, то реакция системы (сила тока в цепи) опять же зависит от ее внутренних свойств. Потребляемая системой мощность снова вычисляется как произведение управляющего воздействия на некоторую внутреннюю переменную системы.

Резюмируя изложенные выше рассуждения, отметим следующее. Во-первых, проблема аналитического синтеза законов управления системами в общей постановке остается нерешенной. Существует необходимость привлечения современных подходов и методов теории управления, способных дать действенный инструмент синтеза обратных связей для класса нелинейных, многосвязных и многомерных систем. Во-вторых, критерии энергетической эффективности управляемых процессов и систем должны учитывать их специфику и иметь ясный физический смысл.

Энергетические инварианты электромеханики

Совокупность критериев управления или набор желаний проектировщика системы в синергетической теории управления принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов. Применительно к ЭМС можно выделить три группы инвариантов – технологические, электромагнитные и энергетические [2]. *Энергетические инварианты* есть некоторые математические соотношения, связывающие переменные состояния ЭМС и соответствующие условию минимума потерь энергии.

Анализ потерь энергии в преобразовательных устройствах ЭМС позволяет сделать следующие выводы. Уровень потерь энергии в силовых преобразователях и механической части определяется, в первую очередь, их конструктивными особенностями. Потери энергии в электрических двигателях, в свою очередь, являются нелинейной функцией электромагнитных и механических переменных. В современных ЭМС существует возможность целенаправленно изменять значения этих переменных и, следовательно, влиять на уровень потерь. Таким образом, энергосберегающее управление электромеханическими процессами фактически сводится к соответствующему управлению, входящими в его состав электрическими машинами.

Способы формирования энергетических инвариантов основаны на идее поиска экстремума функции потерь энергии в электрической машине по одной из ее переменных. При этом функция потерь формируется как сумма частных потерь или как разность потребляемой и полезной мощности и записывается в переменных используемой при синтезе математической модели. Применение данной методики позволило получить систему энергетических инвариантов для основных типов электродвигателей постоянного и переменного тока [3, 4]. Эти инварианты представлены в

таблице 1. Коэффициенты k_i зависят от параметров электромагнитных цепей и номинальных данных электрической машины, M_c – момент сопротивления нагрузки на валу двигателя, ω – угловая скорость ротора, p и m – количество пар полюсов и фаз обмотки статора, L_m, L_{md}, L_r – коэффициенты взаимной и собственной индуктивности обмоток.

Анализируя результаты применения методики построения инвариантных энергетических соотношений для основных типов индукционных электромеханических преобразователей, следует отметить следующее. Несмотря на существующие различия в конструкции, принципе действия и математических моделях, обнаруживается *явное структурное подобие полученных энергетических инвариантов*.

Таблица 1

Энергетические инварианты электромеханики

Тип двигателя	Оптимизируемая переменная	Энергетический инвариант
Постоянного тока	Магнитный поток	$\Phi_{опт} = M_c^{0,5}\left(\frac{k_1}{k_2 + k_3\omega^\beta}\right)^{0,25}$
	Ток якоря	$i_{яопт} = \frac{M_c^{0,5}}{c}\left(\frac{k_1}{k_2 + k_3\omega^\beta}\right)^{-0,25}$
Асинхронный	Модуль вектора потокосцепления обмотки ротора	$\psi_{r\,опт} = M_c^{0,5}\left(\frac{k_4}{k_5 + k_6\omega^\beta}\right)^{0,25}$
	Проекция тока статора на ось x системы координат	$i_{sx\,опт} = \frac{1}{L_m} M_c^{0,5}\left(\frac{k_4}{k_5 + k_6\omega^\beta}\right)^{0,25}$
	Проекция тока статора на ось y системы координат	$i_{sy\,опт} = \frac{2L_r}{pmL_m} M_c^{0,5}\left(\frac{k_4}{k_5 + k_6\omega^\beta}\right)^{-0,25}$
Синхронный	Ток в обмотке ротора	$i_{r\,опт} = M_C^{0,5}\left(\frac{k_7}{k_8 + k_9\omega^\beta}\right)^{0,25}$
	Проекция тока статора на ось q системы координат	$i_{sq\,опт} = \frac{2M_c^{0,5}}{mpL_{md}}\left(\frac{k_7}{k_8 + k_9\omega^\beta}\right)^{-0,25}$

Кроме того, вывод КПД различных двигателей при соблюдении инвариантных соотношений, проводимый на основе очевидных аналитических выкладок, приводит к идентичному результату и позволяет сделать вывод, что КПД любого из рассмотренных двигателей не зависит от момента сопротивления нагрузки. Например, КПД асинхронного двигателя при выполнении одного из соотношений из табл. 1 определяется выражением:

$$\eta = \frac{\omega}{k_5\left(\frac{k_4}{k_5 + k_6\omega^\beta}\right)^{0,5} + k_4\left(\frac{k_4}{k_5 + k_6\omega^\beta}\right)^{-0,5} + \omega}$$

На рис. 1 и 2 представлены графики зависимости КПД асинхронного двигателя типа 4A200L4 от скорости и момента нагрузки при оптимальном и номинальном значениях потокосцепления ротора.

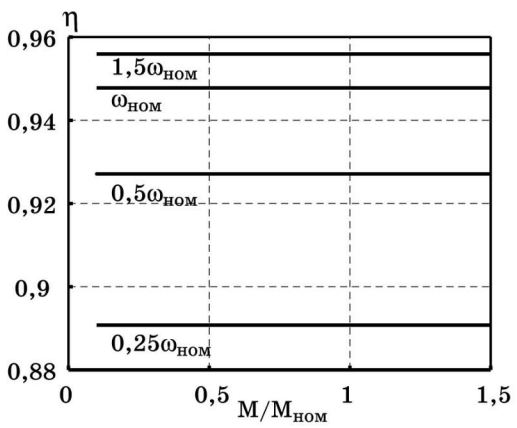

Рис. 1. КПД асинхронного двигателя при $\psi_r = \psi_{r\,опт}$

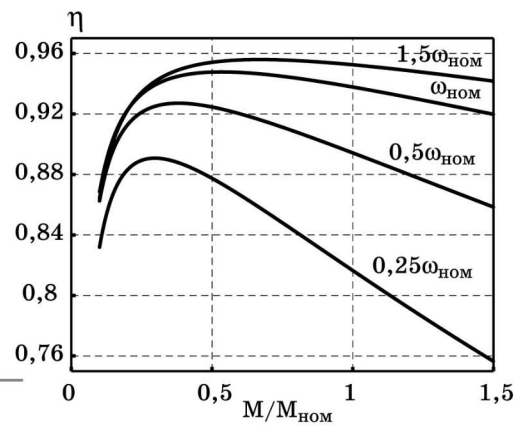

Рис. 2. КПД асинхронного двигателя при $\psi_r = \psi_{r\,ном}$

Методика синергетического синтеза энергосберегающих регуляторов ЭМС

Исходными данными для применения процедуры синергетического синтеза законов управления ЭМС являются набор инвариантов и ее математическая модель. В общем случае модель ЭМС представляет собой совокупность взаимосвязанных моделей основных элементов силового канала: силовых преобразователей, двигателей и механических преобразователей. Связь указанных моделей между собой осуществляется через переменные взаимодействия: токи и напряжения обмоток двигателей, угловые перемещения, угловые скорости и моменты двигателей. Управляющими воздействиями в современных ЭМС являются напряжения на входах силовых преобразователей, а координаты состояния ЭМС – это электрические, магнитные и механические переменные элементов силового канала.

Обобщенная процедура синергетического синтеза регуляторов ЭМС представляет собой ряд последовательных этапов, на каждом из которых осуществляется каскадная динамическая декомпозиция исходной математической модели [4, 5]. Такая декомпозиция происходит в результате введения на каждом этапе параллельно-последовательной совокупности инвариантных многообразий («внешних» и «внутренних») и нахождения вектора управления («внешнего» или «внутреннего») как решения функциональных уравнений метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). На определенных этапах процедуры явным образом задаются инварианты системы: технологические, электромагнитные и энергетические.

При синтезе законов энергосберегающего управления возникает ряд особенностей, которые хотя и не вносят принципиальных изменений в ход самой процедуры, но должны быть оговорены отдельно. Первая особенность достаточно очевидна: хотя бы один из инвариантов системы должен быть энергетическим инвариантом (табл. 1). Кроме того, здесь не применим широко используемый прием подавления внешнего возмущающего момента за счет соответствующих динамических звеньев регулятора. Это связано с тем, что момент сопротивления нагрузки входит в структуру энергетических инвариантов, и любые последствия, вызванные его внезапным изменением, должны быть не подавлены, а оценены.

На основе обобщенной процедуры и изложенных соображений были разработаны прикладные методы синергетического закона энергосберегающего управления ЭМС постоянного и переменного тока. Для каждого типа ЭМС предложено несколько вариантов проведения процедуры синергетического синтеза, отличающихся видом энергетических и технологических инвариантов и способом вхождения их в структуру формируемых инвариантных многообразий. Эти методы позволили получить совокупность законов энергосберегающего управления электромеханическими процессами, обеспечивающих оптимизацию энергетических режимов при выполнении требуемой технологической задачи [3, 5–7].

В качестве примера рассмотрим задачу синтеза энергосберегающего регулятора для ЭМС с асинхронным электродвигателем (АД). При синтезе используется в координатной системе *xy*, ориентированной по вектору потокосцепления обмотки ротора и вращающейся синхронно с магнитным полем электрической машины:

$$
\begin{aligned}
J\frac{}{dt} &= \frac{pmL}{L}\ {}_r i_{sy} - M_c;\\
\frac{di_{sx}}{dt} &= -\frac{r_r L_m^2 \quad r_s L_r^2}{L_r L} i_{sx} + p\omega\, i_{sy} + \frac{r_r L_m}{L_r}\frac{}{}{}_{sy}{}_r + \frac{L_m r_r}{L_r L}\psi_r + \frac{}{L} u_{sx};\\
\frac{di_{sy}}{dt} &= -\frac{r_r L_m^2 \quad r_s L_r^2}{L_r L} i_{sy} - p\omega\, i_{sx} - \frac{r_r L_m}{L_r}\frac{i_{sx} i_{sy}}{}{}_r - \frac{L_m}{L} p\omega\psi_r + \frac{}{L} u_{sy};\\
\frac{d\ {}_r}{dt} &= \frac{r_r L_m}{L_r}\ {}_{sx} - \frac{r_r}{L_r}\ {}_r.
\end{aligned}
\qquad (3)
$$

Здесь и далее: u_{sx}, u_{sy} и i_{sx}, i_{sy} – проекции напряжения и тока статора на оси вращающейся системы координат; ψ_r – модуль результирующего вектора потокосцепления ротора; L_s, L_r, L_m – собственные и взаимная индуктивности обмоток, а r_s, r_r – их активные сопротивления; $L = L_s L_r - L^2_m$, J – момент инерции ротора.

Поставим задачу синергетического синтеза закона векторного закона управления АД, обеспечивающего стабилизацию угловой скорости ротора в заданном значении ($\omega = \omega^*$) и минимизацию потерь энергии. Решение указанной задачи предполагает нахождение проекций напряжений статора на оси координатной системы как функций переменных АД: $u_{sx} = u_{sx}(\omega, i_{sx}, i_{sy}, \psi_r)$ и $u_{sx} = u_{sy}(\omega, i_{sx}, i_{sy}, \psi_r)$. По этим проекциям определяются необходимые значения частоты и амплитуды напряжения статора, которые формируются преобразователем частоты.

Первым шагом процедуры синергетического синтеза является введение инвариантных многообразий следующего вида:

$$\psi_1 = i_{sy} - \frac{2L_r \left|M_c^*\right|^{0,5}}{mpL_m}\left(\frac{k_5 + k_6\left|\omega^*\right|^{\beta}}{k_4}\right)^{0,25} = 0,$$
$$\psi_2 = i_{sx} - \frac{\left|M_c^*\right|^{0,5}}{L_m}\left(\frac{k_4}{k_5 + k_6\left|\omega^*\right|^{\beta}}\right)^{0,25} = 0. \qquad (4)$$

Заметим, что инвариантные многообразия (4) соответствуют энергетическим инвариантам из табл. 1, в которых вместо угловой скорости и момента сопротивления нагрузки присутствуют их значения в заданном режиме работы. Технологический инвариант также входит в структуру $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$, но «скрытым» образом – в виде заданного значения угловой скорости.

Решив систему функциональных уравнений

$$T_1\dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0\ ,$$
$$T_2\dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$$

в силу уравнений модели (3), можно найти векторный закон управления:

$$u_{sx} = \frac{1}{b_1}\left(c_5 i_{sx} - c_7\omega i_{sy} - c_3\frac{i_{sy}^2}{\psi_r} - c_4c_6\psi_r - \frac{1}{T_1}\left(i_{sx} - \frac{c_4}{c_3}\left|M_c^*\right|^{0,5}\lambda_3\right)\right);$$
$$u_{sy} = \frac{1}{b_1}\left(c_5 i_{sy} + c_7\omega i_{sx} + c_3\frac{i_{sx}i_{sy}}{\psi_r} + c_6c_7\omega\psi_r - \frac{1}{T_2}\left(i_{sy} - \frac{c_2}{c_1}\left|M_c^*\right|^{0,5}\lambda_3^{-1}\right)\right). \qquad (5)$$

В выражении для закона управления приняты следующие обозначения:

$$\lambda_3 = \left(\frac{k_4}{k_5 + k_6\left|\omega^*\right|^{\beta}}\right)^{0,25},\ c_1 = \frac{pmL_m}{2JL_r},\ c_2 = 1/J, c_3 = \frac{r_rL_m}{L_r}, c_4 = \frac{r_r}{L_r}, c_5 = \frac{r_rL_m^2 + r_sL_r^2}{L_rL}, c_6 = \frac{L_m}{L}, c_7 = p, b_1 = \frac{L_r}{L}$$

На рис. 3–6 представлены полученные в результате компьютерного моделирования графики переходных процессов в АД при энергосберегающем управлении (5). Имитировался режим разгона привода в номинальный режим и дальнейшее скачкообразное изменение нагрузки. При моделировании использовались параметры и технические данные асинхронного двигателя 4А200L4.

На рис. 7 и 8 показаны сравнительные диаграммы КПД АД при энергосберегающем и традиционном способах управления. В первом случае варьировалось значение момента сопротивления нагрузки при номинальной скорости, а во втором изменялось установившееся значение скорости, момент оставался номинальным. Темные колонки соответствуют энергосберегающему управлению, а светлые – традиционному, реализованному в системах типа «Transvector».

Результаты вычислительного эксперимента в полной мере подтверждают аналитические выкладки и позволяют сделать следующие выводы. В условиях вариации внешнего момента КПД двигателя при энергосберегающем управлении постоянен и максимален. При традиционном способе управления КПД зависит от значения момента и достигает максимума при $M_c \approx 0{,}75M_{ном}$. Последнее подтверждает известный из теории электрических машин факт о том, что максимальный КПД двигателя достигается при таком моменте на валу двигателя, когда равны постоянные и переменные потери. При энергосберегающем управлении указанное равенство выдерживается при любом допустимом значении M_c. Отсюда следует, что *энергосберегающее управление позволяет поддерживать постоянный максимальный КПД двигателя во всем допустимом диапазоне нагрузки*. При изменении скоростного режима КПД двигателя падает, но энергосберегающий эффект также имеет место.

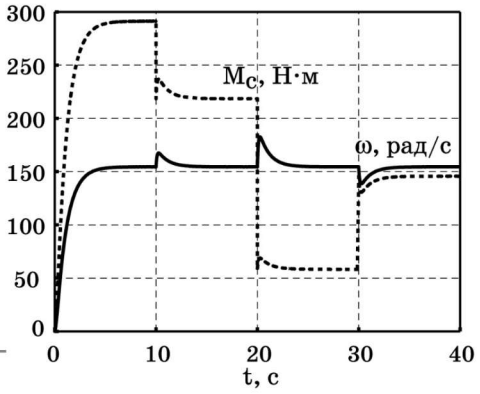

Рис. 3. Угловая скорость ротора и момент сопротивления нагрузки

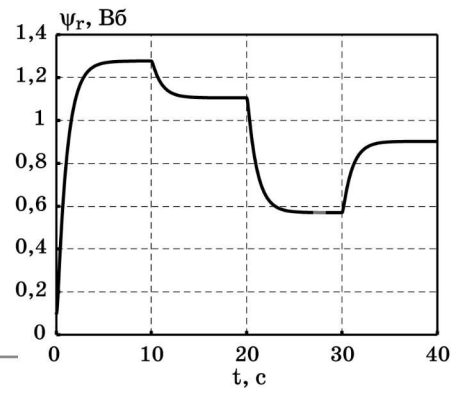

Рис. 4. Модуль вектора потокосцепления обмотки ротора

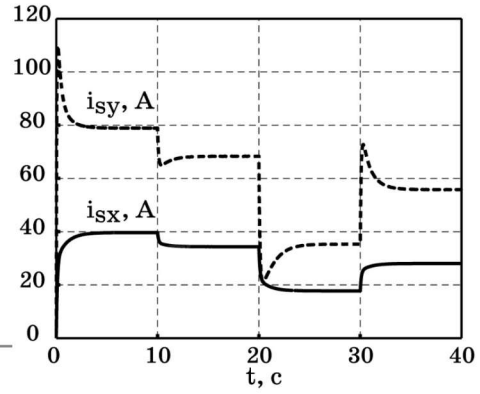

Рис. 5. Проекции тока статора

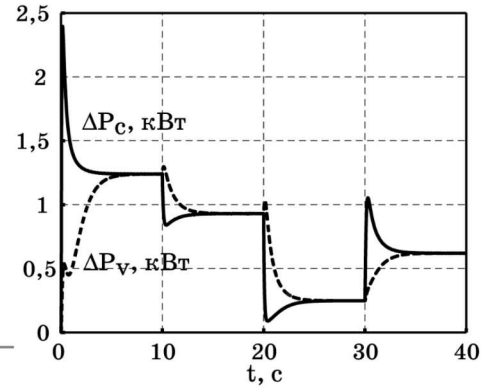

Рис. 6. Постоянные и переменные потери

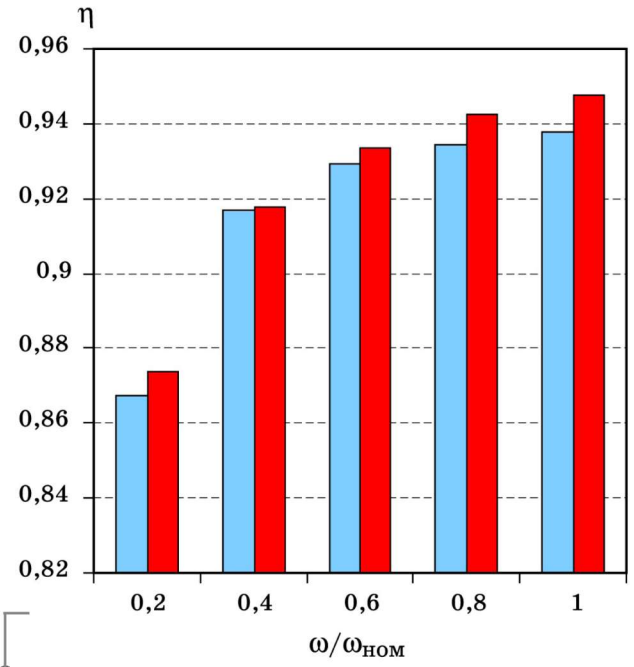

Рис. 7. Сравнительная диаграмма КПД АД ($\omega = \omega_{ном}$, $M_c = var$)

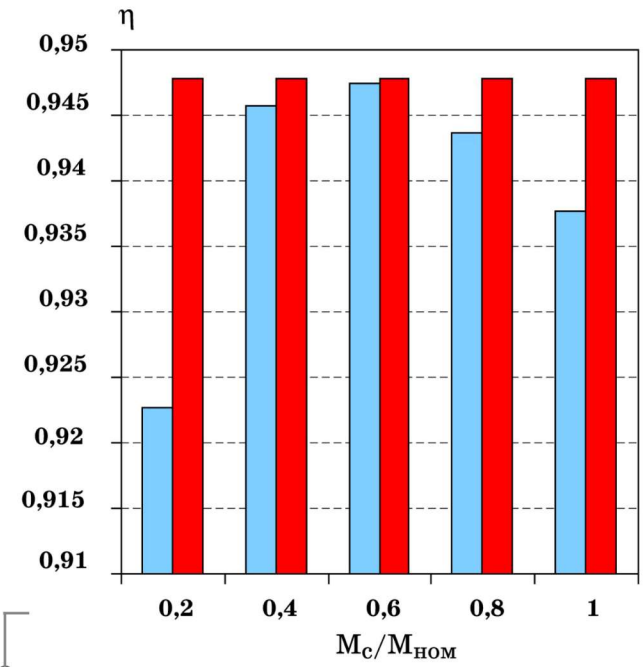

Рис. 8. Сравнительная диаграмма КПД АД ($M_c = M_{ном}$, $\omega = var$)

Момент на валу двигателя в результате действия различных внешних факторов со стороны обслуживаемого технологического процесса может изменяться не всегда предсказуемым образом. В связи с этим, эффективный закон управления должен обладать адаптивными свойствами. Это приведет не только к исключению статической ошибки по скорости, но и к коррекции оптимального значения управляемой электромагнитной переменной. Решение задачи синтеза законов энергосберегающего управления ЭМС, обладающих свойством инвариантности к неконтролируемому

изменению момента сопротивления нагрузки, было проведено путем построения соответствующих асимптотических наблюдателей [3, 4].

Заключение

В настоящей статье были кратко изложены результаты применения методов синергетического синтеза при решении проблемы энергосберегающего управления электромеханическими процессами. Предлагаемый подход был использован при синтезе энергосберегающих регуляторов для основных типов электромеханических преобразователей и выявил такие же особенности, что и в представленном выше примере. Таким образом, полученные законы энергосберегающего управления могут послужить основой для создания перспективных ЭМС различного типа и назначения. Учитывая масштабность использования ЭМС в современной технике и расширяющийся спектр технологических режимов генерации механического движения, можно предполагать, что внедрение подобных регуляторов приведет к существенной экономии энергии и ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников А. А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.

2. Колесников А. А., Веселов Г. Е., Попов А. Н. Инварианты электромеханических систем и вибромеханики // Синергетика и проблемы теории управления: Сб. науч. тр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. С. 251–269.

3. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы / под ред. А. А. Колесникова. М.: КомКнига, 2006. 304 с.

4. Попов А. Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. 67 с.

5. Колесников А. А., Веселов Г. Е., Попов А. Н. Синергетическое управление нелинейными электроприводами. I. Концептуальные основы синергетического синтеза систем // Известия вузов «Электромеханика». 2005. № 6. С. 8–15.

6. Веселов Г. Е., Попов А. Н., Радионов И. А. Энергосберегающее управление асинхронным тяговым двигателем: синергетический подход // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 2. С. 18–22.

7. Веселов Г. Е., Попов А. Н., Радионов И. А. Синергетическое управление асинхронным тяговым электроприводом локомотивов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 4. –С. 166–180.

REFERENCES

1. Kolesnikov A. A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya. M.: Energoatomizdat, 1994. 344 s.

2. Kolesnikov A. A., Veselov G. E., Popov A. N. Invarianty elektromekhanicheskikh sistem i vibromekhaniki // Sinergetika i problemy teorii upravleniya: Sb. nauch. tr. M.: FIZMATLIT, 2004. S. 251–269.

3. Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: mekhanicheskie i elektromekhanicheskie sistemy / pod red. A. A. Kolesnikova. M.: KomKniga, 2006. 304 s.

4. Popov A. N. Sinergeticheskiy sintez zakonov energosberegayushchego upravleniya elektromekhanicheskimi sistemami. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2003. 67 s.

5. Kolesnikov A. A., Veselov G. E., Popov A. N. Sinergeticheskoe upravlenie nelineynymi elektroprivodami. I. Kontseptual'nye osnovy sinergeticheskogo sinteza sistem // Izvestiya vuzov «Elektromekhanika». 2005. № 6. S. 8–15.

6. Veselov G. E., Popov A. N., Radionov I. A. Energosberegayushchee upravlenie asinkhronnym tyagovym dvigatelem: sinergeticheskiy podkhod // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2013. № 2. S. 18–22.

7. Veselov G. E., Popov A. N., Radionov I. A. Sinergeticheskoe upravlenie asinkhronnym tyagovym elektroprivodom lokomotivov // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2014. № 4. S. 166–180.

ОБ АВТОРЕ

Попов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой синергетики и процессов управления, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 347922, Ростовская обл., г. Таганрог, ул. Чехова, 2, к. И-403, тел.: +79085047284, E-mail: anpopov@sfedu.ru

Popov Andrei Nickolaevitch, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Synergetic and Control Processes of South Federal University, Address: Chekhova st., 2, Taganrog, Russian Federation, 347922, phone: +79085047284, E-mail: anpopov@sfedu.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Н. Попов

Работа посвящена использованию методов синергетического синтеза при решении проблемы энергосберегающего управления электромеханическими процессами. Рассматриваются вопросы энергии инвариантов нахождения и синергетического процедуры синтеза управления энергосбережения. Демонстрируется предлагаемое применение для асинхронного двигателя. Использование синергетического подхода при проектировании энергоэффективного управления электромеханических систем позволяет получить контроль, который способен гарантировать, что предписанный технологический инвариант выполняется и сводит к минимуму потери энергии в электрическом двигателе, что гарантирует, что производительность электромеханическое преобразование в различных режимах работы двигателя выше, чем в обычных системах управления.

THE THEORETICAL BASES OF THE SYNTHESIS OF POWER SAVING REGULATORS FOR THE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

A. N. Popov

The paper is devoted to using of the methods of the synergetic control theory for synthesis of energy saving control for electromechanical processes. The questions of energy invariants finding and synergetic synthesis procedure of energy saving control are considered. The proposed approach application for induction motor is demonstrated. The use of the synergetic approach for the design of energy efficient control of the electromechanical systems allows one to obtain a control that is able to ensure that a prescribed technological invariant is met and minimizes the energy loss in electric motor, which guarantees that the performance of the electromechanical transformation in various motor operational modes is higher than in the conventional control systems.