

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Колесников.

Рассветалов Леонид Александрович

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого.

E-mail: leonid.rassvetalov@novsu.ru.

173003, г. Великий Новгород, ул. Б.С.-Петербургская, 41.

Тел.: 88162626862.

Кафедра радиосистем.

Rassvetalov Leonid Alexandrovich

Novgorod State University.

E-mail: leonid.rassvetalov@novsu.ru.

41, B.S-Petersburgskaya Street, Veliky Novgorod, 173003, Russia.

Phone: +78162626862.

The Department of Radio Systems.

УДК 681.51

А.Н. Попов

**СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ***

Рассматривается применение методов синергетической теории управления для решения задач проектирования систем энергосберегающего управления электромеханическими процессами. Излагаются вопросы поиска энергетических инвариантов электромеханики – соотношений, соответствующих минимуму потерь энергии. Обсуждаются особенности процедуры синергетического синтеза энергосберегающих регуляторов электромеханических систем. Приводится пример применения предлагаемого подхода для синтеза систем энергосберегающего управления асинхронным электроприводом.

Электромеханическое преобразование энергии; энергосбережение; автоматическое управление; энергетические инварианты; синергетический синтез регуляторов.

A.N. Popov

**SYNERGETIC SYNTHESIS OF ENERGY SAVING CONTROL SYSTEMS
FOR ELECTROMECHANICAL PROCESSES**

The paper is devoted to using of 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. Proposed approach application for induction motor is demonstrated.

Electromechanical energy conversion; energy saving; automatic control; energy invariants; synergetic feedback synthesis.

Введение. 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 этой связи проблема максимально эффективного электромеханического преобразования энергии имеет приоритетное значение в рамках общей стратегии рационального использования энергетических ресурсов и развития энергосберегающих технологий.

Успешное решение указанной проблемы предполагает проведение комплекса мероприятий организационно-правового, научно-технического и экономического

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-08-00912-а).

характера, проводимых как на стадии проектирования соответствующих электро-механических систем (ЭМС), так и на стадии их эксплуатации. К числу наиболее характерных технических способов повышения энергетической эффективности электро-механических процессов, прежде всего, относятся:

- ◆ использование менее энергоемких материалов и совершенствование конструкции электрических машин;
- ◆ рациональная организация работы соответствующей электро-механической системы;
- ◆ использование принципов автоматического управления;
- ◆ поиск законов энергосберегающего управления.

Применение принципов автоматического управления способствует более гибкой организации электро-механических 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 определяемых характеристиками генерируемого механического движения.

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

1. Проблема аналитического синтеза энергосберегающих регуляторов.

Очевидная актуальность проблемы энергосбережения обуславливает 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:

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

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, который обеспечивает 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, 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.

Попытки учета энергетических особенностей управляемых процессов (иногда вполне успешные) были предприняты методами теории оптимального управления. Под оптимальным управлением в общем случае понимается управляемый перевод системы из начального состояния 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 критериям «энергетического» типа:

- ◆ минимизация расхода топлива или вещества

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

- ◆ минимизация расхода энергии

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

«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 самой системы.

Основной проблемой теории оптимального управления остается проблема аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), т.е. задача синтеза обратных связей, обеспечивающих 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, обуславливает 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.

Резюмируя изложенные выше рассуждения, отметим следующее. Во-первых, проблема аналитического синтеза законов управления системами в общей постанов-

ке 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.

2. 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 энергии. 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 [2–4]. Эти инварианты представлены в табл. 1. Коэффициенты k_i и c 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, β – коэффициент, зависящий от марки стали магнитопровода.

Таблица 1

Энергетические инварианты электромеханики

Тип двигателя	Оптимизируемая переменная	Энергетический инвариант
Постоянного тока	Магнитный поток	$\Phi = M_c^{0,5} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^\beta} \right)^{0,25}$
	Ток якоря	$i_a = \frac{M_c^{0,5}}{c} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^\beta} \right)^{-0,25}$

Окончание табл. 1

Тип двигателя	Оптимизируемая переменная	Энергетический инвариант
Асинхронный	Модуль вектора потокосцепления обмотки ротора	$\psi_r = M_c^{0,5} \left(\frac{k_4}{k_5 + k_6 \omega^\beta} \right)^{0,25}$
	Проекция тока статора на ось X системы координат	$i_{sx} = \frac{1}{L_m} M_c^{0,5} \left(\frac{k_4}{k_5 + k_6 \omega^\beta} \right)^{0,25}$
	Проекция тока статора на ось Y системы координат	$i_{sy} = \frac{2L_r}{p\pi L_m} M_c^{0,5} \left(\frac{k_4}{k_5 + k_6 \omega^\beta} \right)^{-0,25}$
Синхронный	Ток в обмотке ротора	$i_r = M_c^{0,5} \left(\frac{k_7}{k_8 + k_9 \omega^\beta} \right)^{0,25}$
	Проекция тока статора на ось q системы координат	$i_{sq} = \frac{2M_c^{0,5}}{p\pi L_{md}} \left(\frac{k_7}{k_8 + k_9 \omega^\beta} \right)^{-0,25}$

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.

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 4А200L4 от скорости и момента нагрузки при оптимальном и номинальном значениях потокосцепления ротора.

3. 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 двигате-

лей. Управляющими воздействиями в современных ЭМС являются напряжения на входах силовых преобразователей, а координаты состояния ЭМС – это электрические, магнитные и механические переменные элементов силового канала.

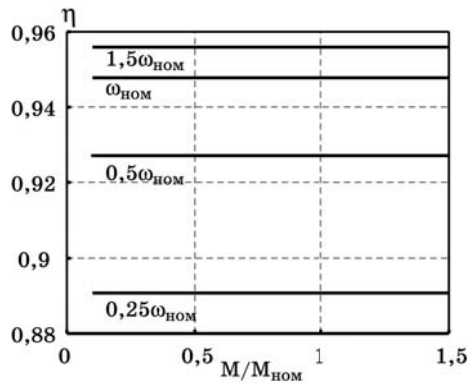


Рис. 1. КПД асинхронного двигателя при оптимальном потокоцеплении ротора

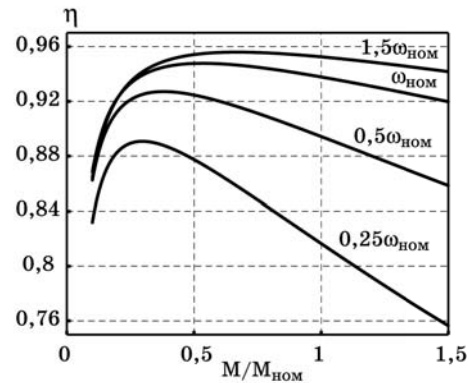


Рис. 2. КПД асинхронного двигателя при номинальном потокоцеплении ротора

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 в синергетической теории управления 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. В этой связи при необходимости учета внешнего возмущающего момента следует использовать методику синергетического синтеза динамических регуляторов с асимптотическими наблюдателями.

На основе рассмотренной обобщенной процедуры и изложенных соображений были разработаны прикладные методы синергетического синтеза законов энергосберегающего управления ЭМС постоянного и переменного тока. Для различных типов ЭМС предложено несколько вариантов проведения процедуры синергетического синтеза, отличающихся видом энергетических и технологических инвариантов, а также 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 [3,4].

В качестве примера рассмотрим задачу синтеза энергосберегающего регулятора для ЭМС с асинхронным электродвигателем (АД). При синтезе используется математическая модель АД в координатной системе XU , движущейся синхронно с магнитным полем и ориентированной по вектору потокосцепления обмотки ротора:

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

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; $L = L_s L_r - L_m^2$, J – момент инерции ротора.

Поставим задачу синергетического синтеза закона векторного управления АД, обеспечивающего стабилизацию угловой скорости ротора в заданном значении ($\omega = \omega^*$ – технологический инвариант) 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 $u_{sy} = u_{sy}(\omega, i_{sx}, i_{sy}, \psi_r)$. По этим проекциям определяются необходимые значения частоты и амплитуды напряжения статора, которые формируются преобразователем частоты и являются фактическими каналами управления для АД.

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

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

Заметим, что инвариантные многообразия (4) соответствуют энергетическим инвариантам из табл. 1, в которых вместо угловой скорости и момента сопротив-

ления нагрузки присутствуют их значения в заданном режиме работы – $\omega^* M_c^*$. 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:

$$\begin{aligned} u_{sx} &= \frac{1}{b_1} \left(c_5 i_{sx} - c_7 \omega i_{sy} - c_3 \frac{i_{sy}^2}{\psi_r} - c_4 c_6 \psi_r - \frac{1}{T_1} \left(i_{sx} - \frac{c_4}{c_3} |M_c^*|^{0,5} \lambda_3 \right) \right); \\ u_{sy} &= \frac{1}{b_1} \left(c_5 i_{sy} + c_7 \omega i_{sx} + c_3 \frac{i_{sx} i_{sy}}{\psi_r} + c_6 c_7 \omega \psi_r - \frac{1}{T_2} \left(i_{sy} - \frac{c_2}{c_1} |M_c^*|^{0,5} \lambda_3^{-1} \right) \right). \end{aligned} \quad (5)$$

В выражении для закона управления приняты следующие обозначения:

$$\lambda_3 = \left(\frac{k_4}{k_5 + k_6 |\omega^*|^\beta} \right)^{0,25}, \quad c_1 = \frac{pmL_m}{2JL_r}, \quad c_2 = 1/J, \quad c_3 = \frac{r_r L_m}{L_r}, \quad c_4 = \frac{r_r}{L_r},$$

$$c_5 = \frac{r_r L_m^2 + r_s L_r^2}{L_r L}, \quad c_6 = \frac{L_m}{L}, \quad c_7 = p, \quad b_1 = \frac{L_r}{L}.$$

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.

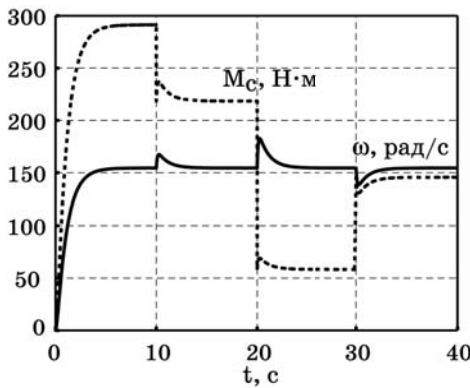


Рис. 3. Угловая скорость ротора и момент сопротивления нагрузки

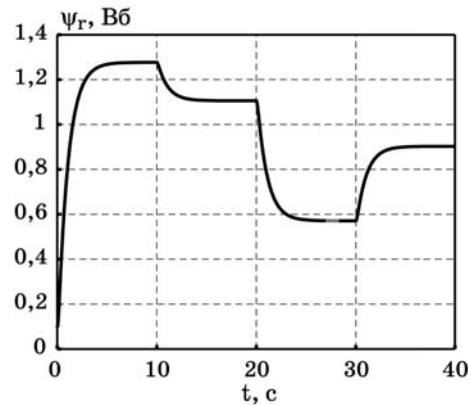


Рис. 4. Модуль вектора потокосцепления обмотки ротора

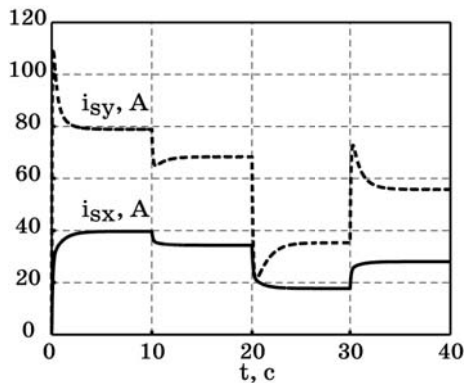


Рис. 5. Проекция тока статора

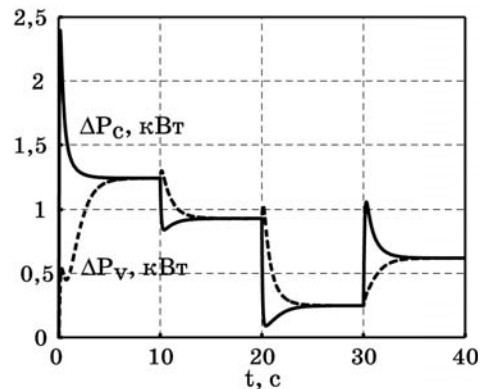


Рис. 6. Постоянные и переменные потери

На рис. 7 и 8 представлены 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 по закону (5), а светлые – традиционному векторному управлению АД при стабилизации потокосцепления ротора в номинальном значении.

Результаты вычислительного эксперимента в полной мере подтверждают аналитические выкладки и позволяют сделать следующие выводы. В условиях вариации внешнего момента КПД двигателя при энергосберегающем управлении постояен и максимален. При традиционном способе управления КПД зависит от значения момента и достигает максимума при $M_c \approx 0,5M_{ном}$. Это 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 (рис. 6). 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.

Момент на валу двигателя в результате действия различных внешних факторов со стороны обслуживаемого технологического процесса может изменяться не всегда предсказуемым образом. В этой связи эффективный закон управления должен обладать адаптивными свойствами. Это приведет не только к исключению статической ошибки по скорости, но и 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].

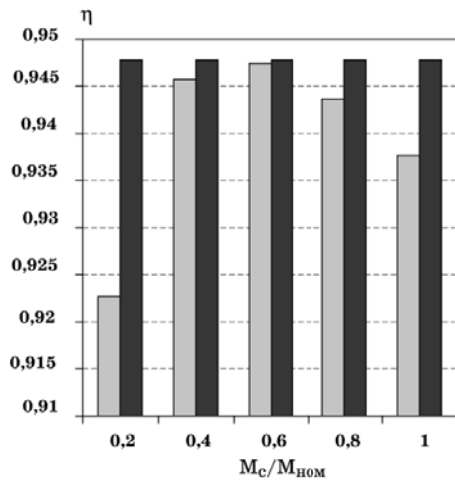


Рис. 7. Сравнительная диаграмма КПД АД ($\omega = \omega_{ном}$, $M_c = var$)

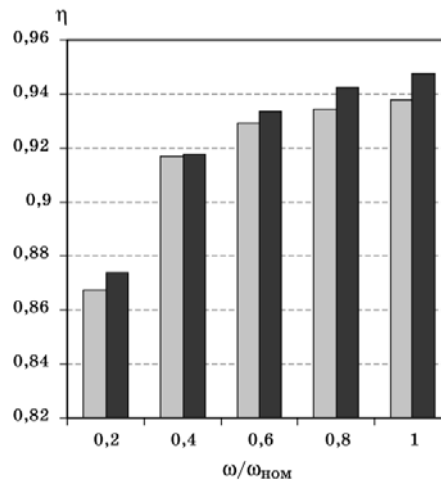


Рис. 8. Сравнительная диаграмма КПД АД ($M_c = M_{ном}$, $\omega = var$)

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

Попов Андрей Николаевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: andypriest@mail.ru.

347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2.

Тел.: 88634318090.

Кафедра синергетики и процессов управления; к.т.н.; доцент.

Popov Andrei Nickolaevitch

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: andypriest@mail.ru.

2, Chekhova Street, Taganrog, 347922, Russia.

Phone: +78634318090.

The Department of Synergetics and Control; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

УДК 621.396

В.П. Тепин, А.В. Тепин

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ И АВТОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ**

Исследуются особенности динамики нестационарных хаотических систем с внешним либо внутренним параметрическим управлением. В рассматриваемых системах скалярное управляющее воздействие контролирует скорость эволюции хаотического процесса. Это достигается синхронной вариацией значения производной каждой из переменных состояния. В результате обеспечивается управление временными и частотными показателями динамического хаоса за счет изменения свойств воздействия. Представлены результаты имитационного моделирования ряда параметрических и автопараметрических режимов хаотической системы, прототипом которой служит стационарная система Чуа.

Динамический хаос; управление хаосом; нестационарные хаотические системы; параметрическое управление; автопараметрическое управление.

V.P. Tepin, A.V. Tepin

**PARAMETRIC AND AUTOPARAMETRIC SYSTEMS WITH CHAOTIC
DYNAMICS**

In this paper, we study the peculiarities of the dynamics of non-stationary chaotic systems under external or internal parametric control. In the systems under consideration, a scalar control action governs the chaotic process evolution rate. This is achieved by the derivative value of each state variable synchronous variation. As the result, the dynamic chaos time and frequency domain characteristics control is provided by means of the control action behavior variation. Simulation results are presented for some parametric and autoparametric modes of chaotic system based on Chua's stationary prototype.

Dynamic chaos; chaos control; non-stationary chaotic systems; parametric control; autoparametric control.

Введение. Динамический (детерминированный) хаос представляет собой сложное нерегулярное движение, наблюдаемое в некоторых классах нелинейных систем различной физической природы [1]. Это движение имеет псевдослучайный характер – подобно случайному процессу оно является незатухающим, непериодическим, обладает непрерывным частотным спектром, быстро спадающей автокорреляционной функцией, однако закон этого движения в любой момент времени полностью предопределен уравнениями динамики системы и начальными условиями.

Возможности практического использования уникальных свойств систем с хаотической динамикой, способных порождать значительное многообразие широкополосных незатухающих непериодических процессов, привлекают пристальное внимание специалистов различных областей науки и техники. В течение двух десятилетий во всем мире ведутся многочисленные исследования и разработки, направленные на практическое использование хаотических систем. Наиболее значи-