

*На правах рукописи*

**Ловчаков Евгений Владимирович**



**СИНТЕЗ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ  
ПО КРИТЕРИЯМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление  
и обработка информации (в промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Тула 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук  
Соловьев Александр Эдуардович

Официальные оппоненты:

Лесков Алексей Григорьевич,  
доктор технических наук, ст. научный  
сотрудник, Дмитровский ф-л ФГБОУ  
ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,  
директор

Надеждин Евгений Николаевич,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный педагогический университет им.  
Л.Н. Толстого», профессор кафедры  
«Информатика и информационные  
технологии»

Ведущая организация:

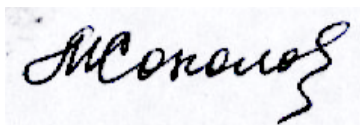
ОАО «Конструкторское бюро приборостроения» им. акад. А.Г. Шипунова

Защита состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2014 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.05 при ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 (12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2014 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Соколова Марина Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Как известно, затраты на экономию 1 кВт электрической мощности обходятся в 4–5 раз дешевле, чем стоимость одного вновь вводимого киловатта мощности. Поэтому в настоящее время оптимизация режимов энергопотребления в электрооборудовании является одним из приоритетных направлений развития науки и техники во всех промышленных странах мира.

В настоящей работе исследуется задача уменьшения потребления энергии электротехническими объектами (ЭТО) за счет оптимизации управления ими в переходных режимах функционирования. К этим объектам относятся электроприводы (ЭП), работающие в составе различных промышленных, транспортных и бытовых агрегатов с потреблением около 70 % всей вырабатываемой энергии (И.Я. Браславский, И.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко) и печи сопротивления (ПС), количество которых достигает до 90% всех электротермических установок, а суммарная энергия, потребляемая ими, составляет более 10 % используемой электроэнергии (А.П. Альтгаузен, А.Д. Свенчанский). В работе рассматриваются электроприводы, имеющие повторно-кратковременные режимы работы, и печи сопротивления периодического действия (камерные, колпаковые и шахтные), для которых в основном характерны переходные режимы работы, вызванные частым повторением однотипных технологических операций. Эти многочисленные ЭТО в переходных режимах работы потребляют существенные объемы электроэнергии, соизмеримые с объемами энергии в стационарных режимах функционирования. Однако, как показывает анализ литературы, проектирование электротехнических устройств направлено в основном на оптимизацию энергетических процессов в стационарных режимах. Особенности же их динамических процессов учитываются при проектировании и настройке систем регулирования скорости (угла) ЭП и температуры ПС, в которых, как правило, используются стандартные релейные или линейные (непрерывные или цифровые) П, ПИ, ПИД-регуляторы, не предназначенные для минимизации потребления энергии. По указанным причинам задачи энергосбережения в установках ЭП и ПС являются весьма актуальными.

Указанные электротехнические устройства выделены в отдельный класс объектов управления (класс ЭТО периодического действия) в связи с тем, что их движение с необходимой точностью можно описать единой моделью в форме системы обыкновенных дифференциальных уравнений с полиномиальными и/или дробно-рациональными нелинейностями от фазовых координат. Важнейшая особенность объектов данного класса состоит в том, что управляющие сигналы объектов, представляющие собой электрические напряжения исполнительных элементов, ограничены уровнем напряжения питания устройств. Это ограничение задает интенсивность процессов преобразования энергии в ЭТО: его превышение, естественно, недопустимо по условиям эксплуатации, а уменьшение также нежелательно – это снижает быстродействие ЭТО периодического действия и, как правило, их производительность.

По своей сущности энергосберегающее управление предполагает уменьшение в определенные интервалы времени значений напряжения исполнительных элементов, что может привести к затягиванию переходных процессов и, соответственно, снижению производительности электротехнических объектов. Поэтому, чтобы не допустить уменьшения производительности ЭТО, для них задачу оптимального энергосберегающего управления целесообразно решать одновременно с минимизацией времени переходных процессов системы регулирования технологической переменной (скорости ЭП или температуры ПС). Такая оптимизация динамических процессов в ЭТО

может уменьшить энергопотребление в переходных режимах, согласно результатам работ проф. Д.Ю. Муромцева и его коллег, от 10 до 30 % при сохранении приемлемого быстродействия этих устройств.

Таким образом, для ЭТО периодического действия является **актуальной** задача синтеза оптимальной системы управления их технологической переменной по критерию качества, требующего одновременной минимизации потребления объектом электроэнергии в переходных режимах и времени этих режимов, взятого с весовым коэффициентом, при значениях напряжений на исполнительных элементах не выше допустимого уровня. Далее он кратко называется критерием энергосбережения – быстродействия (КЭБ).

С точки зрения многокритериальной оптимизации КЭБ представляет собой результирующий (комбинированный) функционал качества, изменением весового коэффициента которого определяется множество всех нехудших систем управления (множество Парето-оптимальных решений), характеризующихся критериями энергосбережения и быстродействия (С.В. Емельянов, А.А. Колесников, А.Г. Гельфгат и др.).

Необходимо отметить, что данный критерий находит применение при управлении объектами различной физической природы, причем, как правило, определяется программное управление (В.И. Коробов, Д.Ю. Муромцев, Н.В. Фалдин, и др.). Его использование для синтеза регуляторов скорости ЭП и температуры ПС приводит к серьезным трудностям, и в настоящее время неизвестны оптимальные алгоритмы обратной связи при ограничении управляющего сигнала.

Наиболее приспособленным к решению сформулированной задачи энергосберегающего управления, как показывает анализ работ, является подход, основанный на результатах теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) А. А. Красовского, использующей так называемые функционалы обобщенной работы (ФОР). Во-первых, ФОР имеет выраженную энергетическую составляющую и, во-вторых, его применение в решении сложных нелинейных задач управления позволяет существенно уменьшить объем вычислений, например, по сравнению с квадратичным функционалом (работы А.А. Красовского, В.Н. Букова, В.С. Шендрик и др.). В связи с этим в работе для оценки качества функционирования ЭТО предлагается использовать, наряду с КЭБ, модифицированный критерий «энергосбережение – быстродействие» (МКЭБ), представляющий разновидность функционала обобщенной работы А.А. Красовского.

**Цель работы** состоит в разработке методик синтеза замкнутых квазиоптимальных систем управления электротехническими объектами периодического действия по критериям минимизации потребления энергии электротехнической системой и времени ее переходных процессов при ограниченных значениях напряжений на исполнительных элементах; в разработке на их основе энергосберегающих, быстродействующих алгоритмов управления конкретными объектами.

Достижение данной цели требует решения следующих **задач исследования**.

1. Обосновать использование модифицированного критерия «энергосбережение – быстродействие» для оптимизации динамических режимов электротехнических объектов; определить и сравнить свойства оптимальных по МКЭБ и КЭБ алгоритмов обратной связи для объектов, описываемых нелинейной моделью первого порядка.

2. Разработать методику синтеза квазиоптимальных энергосберегающих систем управления произвольного порядка, основанную на использовании установленных алгоритмов обратной связи для объектов первого порядка.

3. Предложить метод синтеза квазиоптимальных систем управления электротехническими объектами, обеспечивающий оптимизацию с требуемой точностью как критерия «энергосбережение – быстродействие», так и модифицированного КЭБ на основе конкретизации и развития результатов теории АКОР.

4. Разработать с использованием предложенных методик синтеза квазиоптимальные алгоритмы управления конкретными электротехническими объектами и провести экспериментальную проверку эффективности их функционирования путем физического моделирования.

**Объектом исследования** являются системы управления электротехническими объектами, динамика которых описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями с полиномиальными и/или дробно-рациональными нелинейностями.

**Предметом исследования** является переходные процессы, протекающие в системе управления электротехническим объектом, и методики их оптимизации по критериям «энергосбережение – быстродействие».

**Методы исследования.** При получении теоретических результатов использовались законы электротехники, положения теории дифференциальных уравнений, теории устойчивости и оптимального управления. При исследовании конкретных электротехнических систем применялись математическое моделирование и экспериментальное исследование.

**Научная новизна** заключается в предложенных, строго обоснованных способах определения оптимальных структуры, параметров и алгоритмов функционирования систем управления электротехническими объектами, минимизирующих потребление электроэнергии и время переходных процессов систем при ограниченном уровне питающего напряжения.

Она представлена следующими результатами, которые выносятся на защиту:

- модифицированным критерием «энергосбережение–быстродействие», отличающимся от исходного функционала качества слагаемым, которое определяет энергию сигналов оптимального управления синтезируемой системы;
- оптимальными по критериям «энергосбережение–быстродействие» законами управления объектами, описываемыми нелинейными моделями первого порядка;
- методикой синтеза квазиоптимальных систем управления объектами, описываемыми линейными моделями произвольного порядка, основанной на использовании оптимальных законов управления объектами первого порядка, которая обеспечивает уменьшение энергопотребления системы за счет применения как линейных, так и нелинейных обратных связей;
- методом синтеза квазиоптимальных управлений объектами рассматриваемого класса, обобщающим и развивающим метод степенных рядов А.А. Красовского на оптимизацию систем по критериям «энергосбережение – быстродействие»;
- алгоритмом квазиоптимального управления, полученным с применением разработанного метода синтеза, для следящего электропривода радиолокационной станции, обеспечивающим практически предельное быстродействие в расширенной области начальных отклонений антенны;
- алгоритмом квазиоптимального управления печью сопротивления, значительно снижающим как энергопотребление электротермической системы, так и время ее переходных процессов в сравнении со стандартными регуляторами.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**, содержащихся в диссертации, базируется на использовании апробированных теоретических мето-

дов синтеза систем управления, непротиворечивости проводимых математических выкладок и подтверждается совпадением отдельных полученных результатов с результатами известных работ и результатами моделирования.

**Практическая значимость** разработанных в диссертации методик конструирования систем определяется следующим: они позволяют без особых трудностей аналитического и вычислительного характера, присущих известным методам, синтезировать реализуемые на практике системы квазиоптимального управления технологическими режимами ЭТО. Предложенные в работе алгоритмы управления позволяют реализовать энергосберегающие и быстродействующие электротехнические системы.

**Реализация результатов.** Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (ТулГУ). Полученные результаты использованы в научно-исследовательской работе при выполнении государственного контракта № 02.740.11.0477 в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме: «Создание энергосберегающей оптимальной системы управления электроприводом для промышленных объектов и объектов спецтехники», гранта РФФИ № 10-08-97505 «Теория аналитического конструирования оптимальных регуляторов нелинейных систем по критериям точности, быстродействию, энергосбережению для систем наведения и слежения за подвижными объектами», а также в учебном процессе ТулГУ, о чём свидетельствуют соответствующие акты.

**Апробация работы.** Основные результаты, полученные в диссертационной работе, были представлены и обсуждены на Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» – ММТТ-21, Саратов, 2008; ММТТ-23, Саратов, 2010; ММТТ-24, Саратов, 2011; X, XI, XII Всероссийских науч.-техн. конф. студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых «Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов» (Тула, 2011 - 2013); четвертой, пятой и шестой Всероссийских научно-практических конференциях «Системы управления электротехническими объектами» (Тула, 2007, 2010, 2012).

**Публикации.** Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах, из них 5 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получен патент на изобретение № 2453890, Россия. В работах [1, 2], выполненных в соавторстве, соискателю принадлежат разработка и проверка на примерах рекуррентного алгоритма синтеза регулятора. В работе [3] он провел описание применения и моделирования метода синтеза систем управления, доказательство утверждения их устойчивости. Соответственно в работе [4] им предложены способ нелинейных преобразований координат объекта и условие сходимости степенных рядов.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 166 наименований, 5 приложений. Материал изложен на 172 страницах и содержит 35 рисунков и 4 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследований, формулируются цель работы и основные подходы ее достижения, обосновываются методы исследования, а также приводятся положения, определяющие структуру работы.

**В первой главе** дается описание математических моделей исследуемых электротехнических объектов, для них обосновывается выбор функционалов качества управления и формулируется задача оптимального энергосберегающего управления,

имеющая важные практическое и теоретическое значения. Далее обосновывается подход к её решению и ставятся задачи исследования работы.

Анализ многочисленных работ по исследованию динамики рассматриваемых ЭТО периодического действия показал, что их движение с достаточной инженерной точностью может быть описано системой обыкновенных дифференциальных уравнений с полиномиальными и/или дробно-рациональными нелинейностями

$$\dot{X}(t) = A(X) + B(X) \cdot U(t), \quad (1)$$

где  $X(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T$  – вектор состояния объекта, фазовые координаты которого представляют собой отклонения его переменных от заданного режима работы,  $A(X)$  – вектор  $n$  полиномиальных (дробно-рациональных) функций от компонент вектора  $X(t)$ ,  $U(t) = (u_1(t), \dots, u_m(t))^T$  – вектор управляющих воздействий – электрических напряжений исполнительных элементов объекта, причем их значения ограничены  $|u_i(t)| \leq U_{i,\max}$ ,  $B(X)$  – функциональная матрица размерности  $n \times m$  коэффициентов при управлениях. Объекты (1) предполагаются управляемыми.

Для оценки качества функционирования исследуемых систем вводятся и математически описываются критерий «энергосбережение-быстродействие» (КЭБ)

$$J_1 = \int_0^T [U^T(t) \cdot R \cdot U(t) + q] dt \rightarrow \min, \quad q > 0, \quad (2)$$

и соответствующий ему модифицированный КЭБ

$$J_2 = \int_0^T \left( U^T(t) \cdot R \cdot U(t) + \frac{1}{4} \frac{\partial S(X)}{\partial X} \cdot B[X(t)] \cdot R^{-1} \cdot B^T[X(t)] \cdot \left( \frac{\partial S(X)}{\partial X} \right)^T + q \right) dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $R$  – симметричная положительно определённая матрица размерности  $m \times m$ , задаваемая таким образом, чтобы первое слагаемое критерия (2) или (3) определяло энергию сигналов управления рассматриваемого объекта; коэффициент  $q$  задает вес критерия быстродействия в используемом комбинированном функционале качества;  $S(X)$  – функция Беллмана-Ляпунова синтезируемой оптимальной системы;  $(\partial S(X)/\partial X)^T$  – ее градиент.

Функционал (3) отличается от критерия (2) дополнительным слагаемым, имеющим, как можно показать, физический смысл энергии сигналов оптимального управления. Это свидетельствует о подобии требований критериев (2) и (3), предъявляемых к ЭТО в отношении энергопотребления, которое, как показали дальнейшие исследования, близко к эквивалентности требований. Однако критерий (3), являющийся разновидностью ФОР А.А. Красовского, обеспечивает при синтезе оптимальных систем управления, в сравнении с функционалом (2), не только математические преимущества, но и определенные свойства систем, например, отсутствие, как правило, перерегулирования в их переходных процессах.

Исследуемая задача управления 1, имеющая важные практическое и теоретическое значения, формулируется аналогично известной задаче АКОР Летова-Калмана: *требуется найти закон управления как функцию координат состояния  $U(X(t))$ , образующий вместе с объектом (1) асимптотически устойчивую систему управления, переводящий её из произвольного начального состояния  $X(t=0) = X_0$  в конечное  $X(t=T) = 0$  с минимальным значением КЭБ (2).*

Задача управления 2 ставится аналогично задаче 1, но для оптимизации МКЭБ.

В теории оптимального управления основным методом синтеза замкнутых систем (решения задачи 1) является метод динамического программирования Р. Беллмана, в соответствии с которым закон обратной связи имеет вид

$$U_{opt}(X) = -\frac{1}{2} \cdot R^{-1} \cdot B^T(X) \cdot \left( \frac{\partial S(X)}{\partial X} \right)^T, \quad (4)$$

причем функция Беллмана  $S(X)$  удовлетворяет следующему уравнению

$$\frac{\partial S(X)}{\partial X} \cdot A(X) - \frac{1}{4} \frac{\partial S(X)}{\partial X} \cdot B(X) \cdot R^{-1} \cdot B^T(X) \cdot \left( \frac{\partial S(X)}{\partial X} \right)^T = -q \quad (5)$$

(ограничения на сигналы управления временно не учитываются).

Уравнение в частных производных (5), известное как уравнение Гамильтона-Якоби-Беллмана, относительно искомой функции Беллмана является нелинейным, что предопределяет серьезные трудности в его решении. Поэтому, как показал А.А. Красовский, целесообразно перейти к использованию соответствующего ФОР, т.е. в нашем случае, к решению задачи управления 2. Оно, согласно основной теореме А. А. Красовского, описывается выражением (4), но в котором функция  $S(X)$  удовлетворяет уже линейному уравнению в частных производных

$$\frac{\partial S(X)}{\partial X} \cdot A(X) = -q. \quad (6)$$

Линейность этого уравнения принципиально облегчает его решение и даёт возможность перейти от теоретических исследований к решению достаточно сложных задач управления ЭТО. В связи с этим в настоящей работе при синтезе систем чаще используется введенный модифицированный КЭБ (3), как допускающий более простые процедуры оптимизации.

Следует отметить, что сложность решения указанных задач управления увеличивается при учете ограничения на модуль сигналов управления  $|u_i(t)| \leq U_{i,\max}$ ,  $i=1,2,\dots,m$ . Это приводит, как показывает анализ литературных источников, к неопределенности оптимального управления даже для ЭТО, описываемых моделями первого порядка. Данное обстоятельство вызвало постановку задачи исследования 1 (второй ее половины) и задачи исследования 2 – см. стр. 4.

В теории АКОР широко используется интегральный критерий

$$J_3 = \int_0^T [U^T(t) \cdot R \cdot U(t) + Q(X)] dt \rightarrow \min, \quad (7)$$

с положительно-определенной функцией  $Q(X)$ , в частности, квадратичный функционал с  $Q(X) = X^T(t) \cdot Q \cdot X(t)$ , применение которого приводит к управлению (4) с функцией Беллмана, удовлетворяющей уравнению в частных производных

$$\frac{\partial S(X)}{\partial X} \cdot A(X) - \frac{1}{4} \frac{\partial S(X)}{\partial X} \cdot B(X) \cdot R^{-1} \cdot B^T(X) \cdot \left( \frac{\partial S(X)}{\partial X} \right)^T = -X^T \cdot Q \cdot X. \quad (8)$$

Наиболее разработанным методом решения уравнения (8) и, соответствующего ему, линейного уравнения, является метод степенных рядов Э.Г. Альбрехта, В.И. Зубова, А.А. Красовского. Однако его невозможно использовать для решения интересующих нас уравнений (5) и (6), отличающихся от (8) правой частью – константа  $q$  не является положительно определенной функцией типа  $X^T Q X$ . Следовательно, возникает необходимость в решении задачи исследования 3.



Применение полученных теоретических результатов к построению оптимальных управлений конкретными ЭТО рассматривается в задаче исследования 4.

**Во второй главе** решаются задачи исследования 1, 2 в части синтеза и исследования энергосберегающих алгоритмов управления объектами, описываемых нелинейной моделью первого порядка  $\dot{x}(t) = a(x)x + b(x)u(t)$ .

С использованием метода динамического программирования Р. Беллмана для них установлен оптимальный закон управления по критерию (2):

$$u(x) = -U_{\max} \text{sat} \left[ \frac{a(x)}{b(x)U_{\max}} + \left( \sqrt{\left( \frac{a(x)}{b(x)U_{\max}} \right)^2 + \frac{q}{rU_{\max}^2}} \right) \text{sign}(x) \right] \equiv F_0(x), \quad (9)$$

где  $\text{sat}(x)$  и  $\text{sign}(x)$  – стандартные функции теории управления,  $r=R$ .

Оптимальность управления (9) перепроверялась многими способами: 1) применением классического вариационного исчисления; 2) рассмотрением предельных значений функции (9) при  $r \rightarrow 0$ , и  $r \rightarrow \infty$ , которые дают известные оптимальные управления; 3) моделированием замкнутой системы в сравнении с системой, реализующей известное оптимальное программное управление.

Для задачи управления, использующей модифицированный КЭБ (3), аналогичным образом получен и обоснован оптимальный закон обратной связи вида

$$u(x) = -U_{\max} \text{sat} \left[ \frac{b(x)q}{2a(x)rU_{\max}} \cdot \frac{1}{x} \right] \equiv \bar{F}_0(x). \quad (10)$$

Результаты сравнительного моделирования систем с законами управления (9) и (10) представлены на рис. 1 применительно к электротермическому объекту – электроплитке, нагруженной специальным образом, входящей в состав лабораторного стенда, которая, по каналу «напряжение нагревательной спирали – температура», приближенно описывалась передаточной функцией  $W(p) = K/(T_1 p + 1)$ ,  $T_1 = 63$  мин,  $K = 0.64$  °C/B. Результаты математического моделирования рис.1 а, б показывают, что, во-первых, моделируемые системы управления с точки зрения энергопотребления практически эквивалентны (различие составляет не более чем 2 %) и, во-вторых, они способны уменьшить потребление электроэнергии  $W$  за время переходного процесса более 30% ( $\Delta W_{\%} \geq 30\%$ ) в сравнении с энергией  $W_{\text{ном}}$  при прямом пуске объекта с управлением  $U_{\text{ном}} = 220$  В. В работе процентное уменьшение потребления системой электроэнергии оценивается по формуле  $\Delta W_{\%} = (W_{\text{ном}} - W) \cdot 100\% / W_{\text{ном}}$ . Указанные результаты достаточно близки к результатам моделирования известного оптимального программного управления:  $W=226.02$  Вт\*час,  $\Delta W_{\%}=40\%$ .

На рис. 1в приведены результаты физического моделирования системы с законом управления (9), реализованной на лабораторном стенде, разработанном на кафедре электротехники и электрооборудования ТулГУ при выполнении гранта РФФИ №10-08-97505. Стенд состоит из указанного электротермического объекта, программируемого логического контроллера ОВЕН ПЛК 154, предназначенного для реализации исследуемых алгоритмов управления; симисторного коммутатора электрической мощности; блока управления симисторами и тиристорами (БУСТ фирмы ОВЕН); ЦАП АЦП L-card E-154, счетчика энергии Меркурий 201; блока измерителей (тока, напряжения, температуры) и компьютера, используемого для управления и записи результатов эксперимента. Экспериментальные данные по характеру и значениям соответствуют результатам моделирования системы (сравните графики рис. 1).

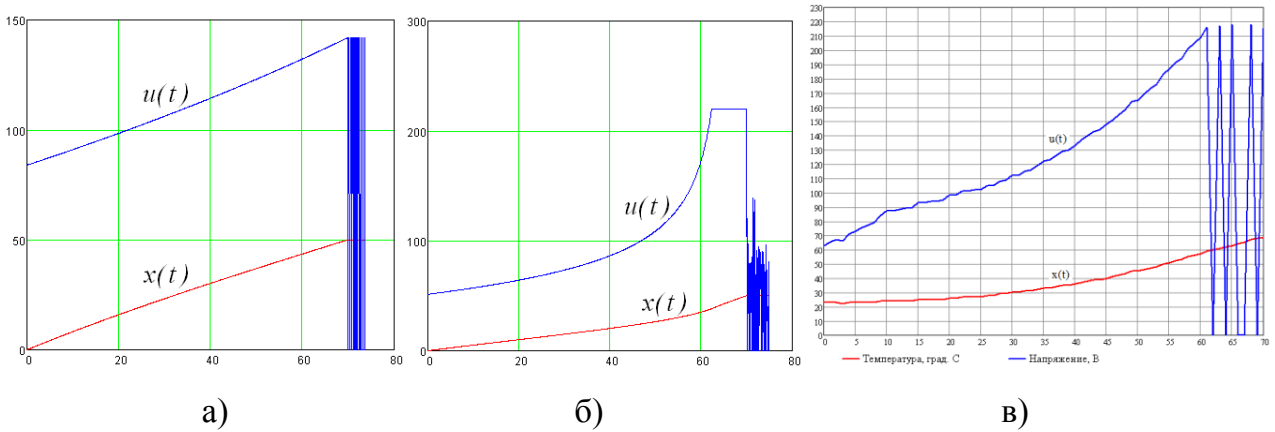


Рис. 1. Результаты математического и физического моделирования систем:

- а) с управлением (9) –  $q=341.5$ ,  $W=249.39$  Вт\*час,  $\Delta W\%=33.8\%$ ;  
 б) с управлением (10) –  $q=67.85$ ,  $W=255.43$  Вт\*час,  $\Delta W\%=32.2\%$ ;  
 в) с управлением (9):  $T_{окр}=23^\circ\text{C}$ ,  $x_z = 50^\circ\text{C}$ ,  $q=341.5$ ,  $W=210$  Вт\*час,  $\Delta W\%=44.3\%$

Закон обратной связи (9), с последующей упрощающей его кусочно-линейной аппроксимацией, положен в основу способа автоматического управления, заявленного в патенте на изобретение № 2453890 Россия, МПК G 05 В 13/00.

На основе полученных управлений (9) и (10), для ЭТО, динамика которых с допустимой погрешностью описывается линейной системой  $n$  уравнений

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t), \quad (11)$$

предлагается приближённая, но простая методика решения сформулированных задач управления 1, 2. Их решение, с использованием положений синергетической теории управления А.А. Колесникова и введением, так называемой агрегированной переменной  $\psi(t) = \psi(X(t)) = D^T X(t)$ , трансформируется к решению задачи энергосберегающего управления соответствующим объектом первого порядка

$$\dot{\psi}(t) = a \cdot \psi(t) + b \cdot u(t). \quad (12)$$

На основе уравнений (9), (10) и (12), для управления объектом произвольного порядка (11) предлагается использовать обратные связи

$$u(t) = F_0[\psi(t)] = F_0[D^T X(t)] \quad \text{или} \quad u(t) = \bar{F}_0[D^T X(t)], \quad (13)$$

параметры которых определяются соотношениями

$$a = \alpha, \quad D = \Lambda, \quad b = D^T B, \quad (14)$$

где  $\alpha$  – одно из вещественных собственных чисел матрицы  $A^T$  объекта;  $\Lambda$  – собственный вектор данной матрицы, соответствующий числу  $\alpha$ .

Установлены свойства и особенности управлений (13) в зависимости от выбора собственного числа объекта, в частности, доказано **утверждение 1**: методика синтеза, основанная на соотношениях (11) – (14) обеспечивает устойчивость конструируемой системы в случаях: а) асимптотической устойчивости исходного объекта, б) неустойчивого ЭТО, если последний имеет только один вещественный корень  $\alpha \geq 0$ , который и выбирается в качестве параметра  $a=\alpha$  объекта (12).

Данная методика применена при синтезе регулятора для указанного выше электротермического объекта, описываемого уточненной передаточной функцией

$$W(p) = K/(T_1 p + 1)(T_2 p + 1), \quad K = 0.64^\circ\text{C}/\text{В}, \quad T_1 = 19.6 \text{ мин.}, \quad T_2 = 51.2 \text{ мин.} \quad (15)$$

Моделирование синтезированной системы показало, что она существенно, до  $\Delta W\% \approx 33.7\%$ , снижает потребление энергии, что, однако, вдвое меньше в сравнении

с оптимальным программным управлением, обеспечивающим  $\Delta W_{\%} \approx 68.5\%$ .

Указанное обстоятельство инициировало поиск более точного метода решения задач энергосберегающего управления.

**В третьей главе** решается задача исследования 3 – разрабатывается метод синтеза квазиоптимальных замкнутых систем управления высокого порядка по критериям быстродействия и энергосбережения. Метод основан на замене решения задачи управления 1 или 2 решением соответствующей задачи АКОР для рассматриваемого объекта с использованием критерия качества (7), задаваемого специальным образом для обеспечения близости этих решений.

При выборе положительно определенной функции  $Q(X)$  этого критерия, аппроксимирующей функцию  $q \cdot 1(X)$  функционалов (2) или (3), учитывались два основных требования: 1) данная функция при  $q=1$  должна иметь значения предельно близкие к единичной функции  $1(X) = 1$  во всем фазовом пространстве объекта за исключением точки  $X=0$ , в которой  $Q(0) = 0$  (это требование критерия быстродействия); 2) функция  $Q(X)$  должна иметь структуру, обеспечивающую применение стандартного метода степенных рядов в решении задачи АКОР.

Этим требованиям удовлетворяют полиномиальные функции  $Q_1(x_1) = a_1 x_1^2 + a_2 x_1^4 + a_3 x_1^6 + \dots$  и дробно-рациональные функции вида

$$Q_2(x_1) = (a_1 x_1^2 + a_2 x_1^4 + a_3 x_1^6 + \dots) / (1 + b_1 x_1^2 + b_2 x_1^4 + b_3 x_1^6 + \dots).$$

Коэффициенты  $a_i, b_i, i = 1, 2, 3, \dots$  указанных функций относительно просто рассчитываются известным методом наименьших квадратов (МНК) из условий минимума среднеквадратичной ошибки аппроксимации.

Анализ показал (см. рис. 2), что полиномиальные аппроксимации медленно приближаются с увеличением порядка полинома к функции  $1(X)$  на принятом интервале определения, а за пределами этого интервала – неограниченно увеличиваются по модулю. Поведение же дробно-рациональных функций принципиально иное: они при больших значениях аргумента практически совпадают с единицей, асимптотически приближаясь к ней.

$$Q_2(x_1) = ax_1^2 / (1 + ax_1^2) \quad (16)$$

при определенных значениях параметра  $a$  обеспечивает меньшую среднеквадратичную ошибку приближения, чем, например, полином восьмой степени.

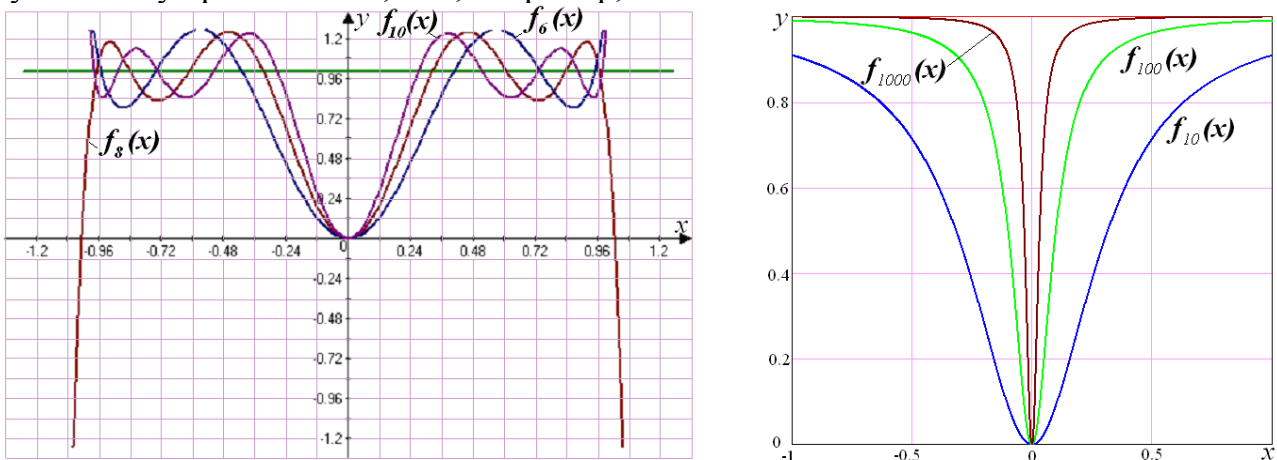


Рис. 2. Аппроксимации функции  $I(X)=1$ :

а) полиномиальная степеней 6, 8, 10;

б) дробно-рациональная с  $a = 10, 100, 1000$

По указанным причинам при решении задач управления 1, 2 рекомендуется использовать, как правило, дробно-рациональную аппроксимацию (16).

Важно подчеркнуть, что использование аппроксимаций  $Q_1(x_1)$ ,  $Q_2(x_1)$  и, в частности, (16), обеспечивает гладкость решений уравнений (5), (6) в фазовом пространстве объекта при замене в них  $q \cdot l(X) \square q \cdot Q_i(x_1)$ , а также и обоснованность применения метода динамического программирования в исследуемых задачах управления. Гладкость же решений облегчает их нахождение методом степенных рядов за счет улучшения сходимости последних.

Соответственно, предлагаемый метод синтеза кратко можно описать как метод, содержащий следующие две основные процедуры: 1) замена исходной задачи оптимального управления задачей АКОР для рассматриваемого объекта с функционалом качества (7), в котором положительно определенная функция  $Q(X)$  задается в форме полинома  $Q_1(x_1)$  или дробно-рациональной функции  $Q_2(x_1)$ ; 2) решение полученной задачи АКОР методом степенных рядов.

Проведено исследование различных вариантов применения данного метода, отличающихся как видами функций  $Q_1(x_1)$  и  $Q_2(x_1)$ , так видами аппроксимаций функции Беллмана (полиномиальной или дробно-рациональной), на модельных примерах решения задач быстрогодействия для объектов с последовательным соединением двух и трех интеграторов, для которых известны точные решения. Установлено, что для этих задач наибольшую точность определения управления обеспечила модификация метода, в которой использовалась аппроксимация

$$l(X) \approx (bx_1^2 + a^2x_1^4) / ((1 + ax_1^2)^2), \quad b = 2,22a, \quad (17)$$

а функция Беллмана находилась в форме дробно-рациональной функции

$$S(X) = A(X) / (1 + ax_1^2) \quad (18)$$

с полиномом  $A(X)$ , определяемым решением соответствующего уравнения в частных производных методом степенных рядов. Отличие в длительности процессов в квази-оптимальной и оптимальной системах составляло не более 15 % при измерении времени переходных процессов по моменту вхождения выходной координаты в зону ( $\pm 2\%$ ) от задания. Подчеркнем, что в литературных источниках не найдены работы, в которых при синтезе алгоритмов управления использовались бы дробно-рациональные представления функции Беллмана, в частности, вида (18).

При моделировании синтезированных систем управления было замечено, что некоторые из них являются неустойчивыми. Анализ этого факта привел к доказательству **утверждения 2**: для обеспечения устойчивости системы, синтезируемой предложенным методом, необходимо задавать максимальное значение степени  $N_s = 2k$  составляемых полиномиальной функции Беллмана и функции  $Q_1(x_1)$  соответствующее нечетному значению  $k$ , т.е. устойчивость обеспечивается управлениями  $u_1(X)$ ,  $u_5(X)$ ,  $u_9(X), \dots, u_{2k-1}(X)$ .

Это утверждение, исключаящее половину неудовлетворительных управлений, имеет важное прикладное значение для объектов высокого порядка.

Предложенный метод формально может быть применен к синтезу систем с уменьшенным энергопотреблением. Применение будет отличаться лишь способом задания значений параметров  $q$  и  $R$  критерия (2) или (3): для быстродействующей системы с одним управляющим воздействием принимается  $q=1$ , а величина  $R=r$  при моделировании постепенно уменьшается до момента достижения системой макси-

мального быстродействия с допустимым перерегулированием; для систем с уменьшенным энергопотреблением, напротив, величина  $r=const$  (она определяет энергию сигнала управления), а параметр  $q$  медленно увеличивается до тех пор, пока не будет достигнуто желаемое время быстродействия системы.

Однако дальнейший анализ и решение модельных примеров выявили существенные особенности синтеза энергосберегающих систем. Было установлено, что квазиоптимальное управление имеет характер близкий к оптимальному только при условии принадлежности начальных состояний объекта области сходимости применяемого ряда. **Утверждение 3:** степенной ряд, определяющий решение задачи АКОР для устойчивого объекта с модифицированным критерием «энергосбережение-быстродействие», использующего аппроксимацию  $1(X) \approx \alpha x_1^2 / (1 + \alpha x_1^2)$ , сходится для состояний объекта  $x_1 \leq 1/\sqrt{\alpha}$ ,  $x_2 = 0, \dots, x_n = 0$ .

Это условие для реальных электротехнических объектов часто не выполняется. Показывается, что обеспечить сходимость степенных рядов в задачах оптимального энергосбережения возможно за счет применения нелинейных преобразований координат объекта, в частности, замены

$$z_1(t) = -1/x_1(t) \rightarrow x_1(t) = -1/z_1(t), \quad \dot{x}_1(t) = \dot{z}_1(t)/z_1^2(t). \quad (19)$$

В связи с указанным обстоятельством, в предлагаемый метод синтеза энергосберегающих систем была введена дополнительная процедура, состоящая в анализе области сходимости применяемого степенного ряда с использованием установленных соотношений, и, если необходимо, проведения нелинейного преобразования фазовых координат объекта управления.

**В четвертой главе** теоретические результаты главы 3 применяются для решения задачи синтеза квазиоптимальной по быстродействию системы управления следящим приводом радиолокационной станции (РЛС) на базе двигателя постоянного тока ДПР-72, работающим в режиме поиска цели. Математическая модель привода РЛС имеет вид:

$$\dot{x}_1(t) = a_{12}x_2(t), \quad \dot{x}_2(t) = a_{23}x_3(t), \quad \dot{x}_3(t) = a_{32}x_2(t) + a_{33}x_3(t) + bu(t), \quad |u(t)| \leq U_m = 9B, \quad (20)$$

$$a_{12} = 0.0674, \quad a_{23} = 2788.46 \text{ Ом}/B \cdot c^2, \quad a_{32} = -2.24 \text{ А}, \quad a_{33} = -125 \text{ 1/с}, \quad b = 129.31 \text{ 1/Ом} \cdot c,$$

где  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  - соответственно угол и угловая скорость антенны,  $x_3(t)$  - ток двигателя.

Для работы ЭП в режиме поиска характерна отработка больших рассогласований по соответствующим угловым координатам (азимуту, углу места) с предельным быстродействием, а также частые пуски и остановки антенны на краях сектора поиска. При этом процесс позиционирования на краях сектора поиска должен осуществляться, по возможности, без перерегулирования с целью исключения механических ударов в приводе. В связи с указанными особенностями работы ЭП, синтез управления осуществлялся исходя из необходимости выполнения следующих требований: рабочая область начальных отклонений составляет  $\pm[1^0; 15^0]$ , время переходных процессов при отработке приводом угловых рассогласований из указанной области не должно превышать величины  $1.1 t_{opt}$ , значение перерегулирования не превышает 1%.

Сформулированная задача быстродействия решалась предложенным методом с использованием аппроксимаций (17), (18) при  $a=500$ ,  $b=0$  и функционала

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty \left[ q_1 x_1^2(t) + q_2 x_2^2(t) + q_3 x_3^2(t) + \frac{qa^2 x_1^4}{(1 + ax_1^2)^2} + ru^2(t) \right] dt$$

с параметрами  $q_1 = 0.005$ ,  $q_2 = 4.3 \cdot 10^{-10}$ ,  $q_3 = 0.814 \cdot 10^{-8}$ ,  $r = 0.156 \cdot 10^{-5}$ ,  $q = 0.1$ . Относительно нормированных переменных  $\bar{x}_i(t) = x_i(t)/X_{i,m}$  ( $X_{1,m} = 15^\circ$ ,  $X_{2,m} = 5281/c$ ,  $X_{3,m} = 9.31$  A,  $U_m = 9$  B) получен следующий закон управления:

$$u(\bar{X}) = -U_m \text{sat} \left[ \frac{r^{-1}b_3}{(1 + a\bar{x}_1^2)} \left( A_{13}\bar{x}_1 + A_{23}\bar{x}_2 + 2A_{33}\bar{x}_3 + A_{1113}\bar{x}_1^3 + A_{1123}\bar{x}_1^2\bar{x}_2 + 2A_{1133}\bar{x}_1^2\bar{x}_3 + \right. \right. \quad (21)$$

$$\left. \left. A_{1223}\bar{x}_1\bar{x}_2^2 + 2A_{1233}\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3 + 3A_{1333}\bar{x}_1\bar{x}_3^2 + A_{2223}\bar{x}_2^3 + 2A_{2233}\bar{x}_2^2\bar{x}_3 \right) \right]$$

( $A_{13} = 1.347 \cdot 10^{-4}$ ,  $A_{23} = 4.539 \cdot 10^{-6}$ ,  $A_{33} = 5.715 \cdot 10^{-7}$ ,  $A_{1113} = 1.564$ ,  $A_{1123} = 0.087$ ,  $A_{1133} = 0.0066$ ,  $A_{1223} = 0.00179$ ,  $A_{1233} = 0.000285$ ,  $A_{1333} = 0.000016$ ,  $A_{2223} = 0.0000136$ ,  $A_{2233} = 0.00000345$ ).

Результаты моделирования систем, квазиоптимальной с управлением (21) и оптимальной с программным управлением, приведены на рис. 3. Как видно, переходные процессы этих систем по координате  $x_1(t)$  практически совпадают. Более того, показатели процессов квазиоптимальной системы управления ЭП удовлетворяют требованиям технического задания, причем она, в отличие от известных систем, работает практически с предельным быстродействием и без перерегулирования втрое более широкой области начальных отклонений.

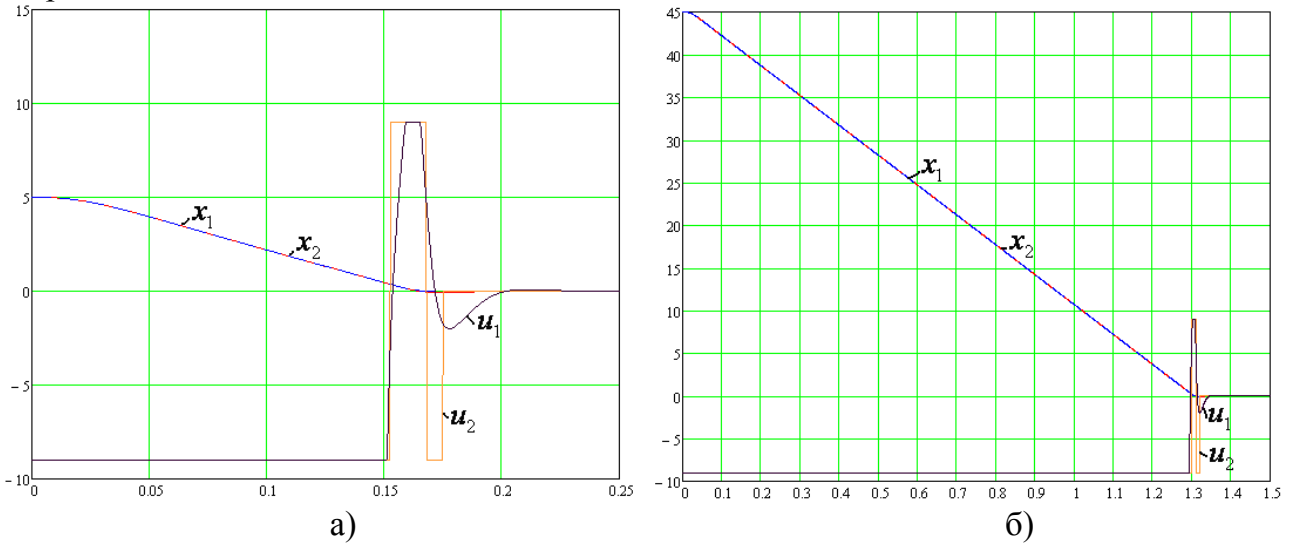


Рис. 3. Процессы систем с управлением (21) (переменные  $x_1$ ,  $u_1$ ) и оптимальным программным управлением ( $x_2$ ,  $u_2$ ) при отработке отклонений: а)  $x_1(0) = 5^\circ$ , б)  $x_1(0) = 45^\circ$

Результаты главы использованы при выполнении госконтракта № 02.740.11.0477.

**В пятой главе** решается задача исследования 4: метод синтеза главы 3 используется для конструирования квазиоптимальной системы управления температурным режимом печи сопротивления; исследуются моделированием и экспериментально свойства синтезированной энергосберегающей электротехнической системы.

Метод синтеза был применен к печи, описываемой моделью (15), при использовании замены (19) и нормирующего преобразования  $z_1(t) = k_n x_1(t)$ ,  $k_n = 0.01$ , обеспечивающих сходимость используемых степенных рядов для данного объекта. В итоге получен квазиоптимальный по МКЭБ закон обратной связи вида

$$u_0(X) = U_m \text{sat} \left( \frac{\alpha q}{2rU_m} \cdot \frac{KT_1(T_1 - 3T_2)^{-1}}{[k_n(X_z - x_1)]^3} \left( 1 + \frac{(T_1 - 2T_2)(T_1 - 3T_2)\alpha - 3KT_2(T_1 - 5T_2)k_n(X_z - x_1)x_2}{(T_1 - 2T_2)(T_1 - 5T_2)[k_n(X_z - x_1)]^2} \right) \right) \quad (22)$$

Результаты моделирования системы с управлением (22) показали: несмотря на то, что она и обеспечивает существенную экономию электрической энергии ( $\Delta W_{\%} \geq 30\%$ ), однако имеет значительную статическую ошибку при отработке задания  $X_z$  (при  $X_z=70^{\circ}\text{C}$  ошибка достигала значения порядка  $8^{\circ}\text{C}$ ).

Для уменьшения статической ошибки предложено совместно с энергосберегающим законом управления (22) использовать стандартный ПИД-регулятор, который, как известно из практики эксплуатации печей сопротивления, обеспечивает желаемую точность стабилизации температуры. С использованием положений теории систем с переменной структурой закон управления представлен в форме:

$$u(X) = \begin{cases} u_0(X), & \text{если } x_1 \leq X_z - X_z \cdot s; \\ U_{m\text{sat}} \left( K_{\Pi} \cdot x_1 + K_{\text{Д}} \frac{dx_1}{dt} + K_{\text{И}} \int x_1 dt \right), & \text{если } x_1 > X_z - X_z \cdot s. \end{cases} \quad (23)$$

Физический смысл управления (23) состоит в том, что при больших значениях ошибки регулирования работает регулятор (22), а при малых с целью достижения требуемой точности стабилизации – ПИД-регулятор. Момент переключения с управления (22) на ПИД-регулятор с параметрами  $K_{\Pi}$ ,  $K_{\text{Д}}$ ,  $K_{\text{И}}$  задается значением коэффициента  $s$ . Численные значения указанных четырех параметров найдены моделированием системы в среде Matlab с использованием блока Signal Constraint (оптимизации параметров):  $K_{\Pi} = 19.874 \text{ В}/^{\circ}\text{C}$ ,  $K_{\text{Д}} = 210.087 \text{ В}$ ,  $K_{\text{И}} = 0.0083 \text{ В}/(^{\circ}\text{C})^2$ ,  $s = 0.275$ . На рис. 4 представлены графики переходных процессов системы переменной структуры при отработке задания  $X_z=70^{\circ}\text{C}$ . Они показывают, что исследуемый регулятор обеспечивает как требуемую точность стабилизации температуры (ошибка порядка  $1^{\circ}\text{C}$ ), так и хорошие показатели энергосбережения ( $\Delta W_{\%} = 48.3\%$ ).

На следующем этапе исследования проводился сравнительный анализ показателей качества указанной системы переменной структуры и систем управления со стандартными регуляторами: ПИД-регулятором, настроенным в соответствии с методом Певзнера ( $K_{\Pi} = 11.73 \text{ В}/^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{И}} = 77.204 \text{ мин}$ ,  $T_{\text{Д}} = 13.64 \text{ мин.}$ ) и ПИ-регулятором с настройками по методу Циглера и Никольса ( $K_{\Pi} = 8.75 \text{ В}/^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{И}} = 75 \text{ мин.}$ ). Как показали результаты моделирования, предлагаемый регулятор переменной структуры, в сравнении с ПИД и ПИ-регуляторами, обеспечивает при отработке задания  $X_z=70^{\circ}\text{C}$  существенное уменьшение времени переходных процессов системы управления (соответственно на 77 и 185 мин. относительно его  $t_{\text{нм}}=120 \text{ мин.}$ ) и меньшее потребление электрической энергии (на 67.42 % и 145.7 %) за время переходного процесса.

Регулятор переменной структуры (23) был реализован и испытан на лабораторном стенде. Результаты экспериментального исследования системы при нагреве объекта от температуры окружающей среды  $20^{\circ}\text{C}$  до задания  $X_z=70^{\circ}\text{C}$  представлены на рис. 5. В данном процессе нагрева потребление электроэнергии составило 319.9 Вт\*час, а соответственно процентное ее уменьшение –  $\approx 50.5\%$ , что хорошо согласуется с указанными результатами моделирования на рис. 4.

Энергосберегающий регулятор переменной структуры (23), реализованный на контроллере ОВЕН ПЛК 154, прошел испытание и на промышленной печи ПН-34 предприятия ЗАО «Строительный инструмент» г. Тулы. При выводе печи, предварительно охлажденной до температуры окружающей среды  $\approx 20^{\circ}\text{C}$ , на режим  $500^{\circ}\text{C}$  получено уменьшение энергопотребления на  $\Delta W_{\%} \approx 16\%$ .



Результаты диссертационной работы нашли также применение в учебном процессе ТулГУ при преподавании дисциплины «Теория оптимального управления электроприводами» на кафедре электротехники и электрооборудования.

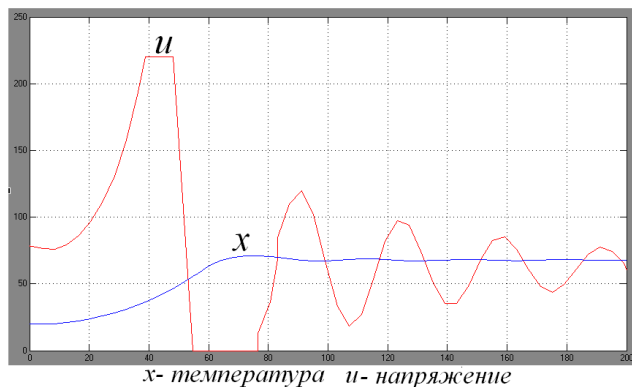


Рис. 4. Моделирование переходных процессов системы с переменной структурой:  $X_z=70^{\circ}\text{C}$ ,  $X_0=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha=25$ ,  $W=334.7$  Вт\*час,  $\Delta W_{\%} \approx 48.3\%$

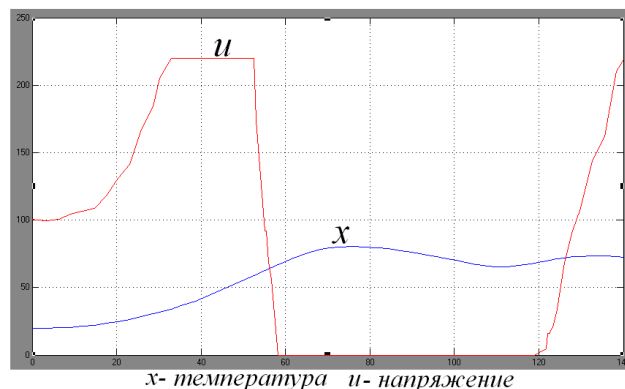


Рис. 5. Экспериментальные процессы системы с переменной структурой:  $X_z=70^{\circ}\text{C}$ ,  $X_0=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha=25$ ,  $q=0.02$ ,  $W=319.9$  Вт\*час,  $\Delta W_{\%} \approx 50.5\%$

В приложениях приведены листинги программ, используемых при синтезе оптимальных систем управления и их моделировании, а также копии документов, подтверждающих использование полученных результатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой поставлена и решена актуальная научная задача синтеза оптимальных замкнутых систем управления электротехническими объектами периодического действия по критериям минимизации потребления системой электроэнергии и времени ее переходных процессов при значениях напряжений на исполнительных элементах не выше допустимого уровня, обеспечивающей в сравнении с известными системами существенное снижение энергопотребления (на десятки процентов).

Важнейшие теоретические и практические результаты диссертации заключаются в следующем.

1. Для оценки качества работы электротехнических объектов периодического действия введен новый функционал качества – модифицированный критерий «энергосбережение-быстродействие» (МКЭБ), оптимизация которого позволяет уменьшить энергопотребление объектов. Данный критерий, являющийся разновидностью функционала обобщенной работы А.А. Красовского, имеет относительно простую процедуру минимизации.
2. Получены и проверены моделированием и экспериментально законы обратной связи, оптимальные по критериям «энергосбережение-быстродействие» (КЭБ и МКЭБ) для объектов, описываемых нелинейной моделью первого порядка. Сравнение свойств систем, имеющих данные управления, показывает, что при определенных условиях они практически эквивалентны в отношении энергопотребления (различие составляет несколько процентов), однако синтез систем с использованием МКЭБ осуществляется с существенно меньшим объемом вычислений.
3. Разработана и строго обоснована методика использования законов обратной связи, предложенных в п.2, при синтезе энергосберегающих систем управления объек-



тами, которые с допустимой погрешностью описываются линейными моделями произвольного порядка. Системы с данными алгоритмами управления, как показало моделирование, обеспечивают уменьшение энергопотребления на 20 и более процентов по сравнению с пуском объектов при максимальном значении управляющего сигнала.

4. Предложен метод синтеза квазиоптимальных по критериям «энергосбережение-быстродействие» систем управления объектами, описываемыми нелинейными моделями динамики высокого порядка. В форме утверждений сформулированы условия применимости метода синтеза, являющегося развитием метода степенных рядов А.А. Красовского. На модельных примерах с известными точными решениями показывается, что свойства синтезированных систем с хорошей точностью приближаются к свойствам оптимальных систем.
5. С использованием предложенного метода синтеза разработан алгоритм квазиоптимального управления следящим электроприводом радиолокационной станции, обеспечивающий в режиме поиска цели безударный (без перерегулирования) перевод антенны практически с предельным быстродействием в диапазоне  $\pm 45^\circ$ .
6. Для печей сопротивления предложен квазиоптимальный энергосберегающий регулятор переменной структуры, высокие показатели работы которого подтверждаются результатами моделирования и экспериментального исследования: для промышленной электропечи ПН-34 уменьшение потребления электроэнергии составило 16 %, а для объекта лабораторного стенда – порядка 40 % в сравнении с его нагревом при номинальном питающем напряжении. Данный регулятор, в сопоставлении со стандартным ПИД-регулятором, обеспечивает существенное уменьшение времени переходных процессов системы (до 54 %) и меньшее потребление электрической энергии (до 67 %) за время переходных процессов.
7. Разработан лабораторный стенд для проведения физического моделирования синтезированных квазиоптимальных систем управления температурным режимом печей сопротивления. На нем испытаны предложенные алгоритмы энергосберегающего управления электротермическими объектами.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ловчаков В. И. Метод матричных степенных рядов в решении нелинейных задач оптимального управления / В. И. Ловчаков, Е.В. Ловчаков // Изв. ТулГУ, Серия Вычислительная техника, информационные технологии, системы управления. Вып. 3. Системы управления. Т.2. – 2006. – С. 16–19.
2. Ловчаков Е.В. Метод матричных степенных рядов в решении нелинейных задач конструирования оптимальных регуляторов / Е.В. Ловчаков, В.И. Ловчаков // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 7. – С. 98–108.
3. Соловьев А.Э. Метод синтеза квазиоптимальных систем управления по критериям быстродействия и энергосбережения / А.Э. Соловьев, Е.В. Ловчаков // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – Вып. 5. – С. 220–230.
4. Ловчаков Е.В. Метод степенных рядов в решении задач оптимального энергосберегающего управления по критерию обобщенной работы / Е.В. Ловчаков, А.М. Сапожников // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – Вып. 5. – С. 146–156.
5. Ловчаков Е.В. Синтез и исследование квазиоптимального энергосберегающего регулятора температуры // Датчики и системы. – 2014. – № 4. – С. 8–12.

6. Пат. № 2453890 Россия, МПК G 05 В 13/00. Способ автоматического управления в нелинейной системе и следящая система для его осуществления / Ловчаков В.И., Ловчаков Е.В., Сухинин Б.В., Сапожников А.М. – Заявка № 2010150556; Приоритет 10.12.2010; Опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17. – 11 с.
7. Ловчаков В.И. Аналитический синтез регулятора по критерию минимума энергии управления и времени переходного процесса / В.И. Ловчаков, Е.В. Ловчаков // Математ. методы в технике и технологиях (ММТТ–19): Труды XIX Международ. науч. конф. – Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2006. – №2. – С.69–70.
8. Ловчаков В.И. Ловчаков Е.В. Обобщенный метод степенных рядов в решении нелинейных задач оптимального управления / В. И. Ловчаков, Е.В. Ловчаков // Системы управления электротехническими объектами: Труды 4-й Всероссийской научно–практич. конф. – Тула, Известия ТулГУ. – 2007. – С.151–154.
9. Ловчаков В.И. К решению задачи быстрогодействия системы по одной (нескольким) координатам / В.И. Ловчаков, Е.В. Ловчаков, А.М. Сапожников // Математ. методы в технике и технологиях (ММТТ–22): Материалы XXII Международ. науч. конф. – Псков: Псковский гос. политехн. ин-т. – 2009. – Т.2. – С. 22–26.
10. Ловчаков В.И. Энергосберегающие управления электротехническими объектами / В.И. Ловчаков, Е.В. Ловчаков, Б.В. Сухинин // Электрика – 2009. – №12. – С. 7–13.
11. Ловчаков В.И. Эквивалентность задач оптимального управления с различными функционалами качества / В.И. Ловчаков, Е.В. Ловчаков, Б.В. Сухинин, А.Э. Соловьев // Математ. методы в технике и технологиях (ММТТ–23): Материалы XXIII Международ. науч. конф. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. – 2010. – Т.2. – С. 78–81.
12. Ловчаков В.И. Квазиоптимальное энергосберегающее управление электротепловым объектом второго порядка / В.И. Ловчаков, Е.В. Ловчаков, Б.В. Сухинин, А.Э. Соловьев // Системы управления электротехническими объектами: Труды 5-й Всероссийской научно–практич. конф. – Вестник ТулГУ. Серия «Проблемы управления электротехническими объектами». Вып.5. – Тула, ТулГУ. – 2010. – С. 102–106.
13. Ловчаков Е.В. Моделирование квазиоптимальной системы по критерию быстрогодействие–энергосбережение / Е.В. Ловчаков // Математ. методы в технике и технологиях (ММТТ–24): Материалы XXIV Международ. науч. конф. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. – 2011. – Т.2. – С. 65–68.
14. Ловчаков В.И. Решение задачи быстрогодействия для одного класса нелинейных объектов управления / В.И. Ловчаков, Б.В. Сухинин, В.В. Сурков, Е.В. Ловчаков // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ–24: сб. трудов XXIII Международ. науч. конф. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т. – 2011. – Т.2. – С.61–65.
15. Ловчаков Е.В. Методика синтеза квазиоптимальных по быстрдействию регуляторов / Е.В. Ловчаков, А.М. Сапожников // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов: Материалы докладов X Всероссийской науч.–техн. конф. Студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых. – Тула, Из-во ТулГУ. – 2011. – С. 314–318.
16. Ловчаков Е.В. Исследование моделей динамики электропечи сопротивления, используемых для расчета энергосберегающих управлений / Е.В. Ловчаков А.А. Кузмичев, Р.В. Белоус // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов: Материалы докладов X Всероссийской науч.–техн. конф. студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых. – Тула, Из-во ТулГУ. – 2011. – С. 318–321.

17. Ловчаков В.И. Решение задачи быстродействия трех интеграторов модифицированным методом фазового пространства / В.И. Ловчаков, А.Э. Соловьев, Е.В. Ловчаков // Системы управления электротехническими объектами: Труды 6-й Всероссийской научно-практич. конф. – Вестник ТулГУ. Серия «Проблемы управления электротехническими объектами». Вып.6. – Тула, ТулГУ. – 2012. – С. 175–179.
18. Ловчаков Е.В. Исследование квазиоптимального энергосберегающего регулятора для электротеплового объекта / Е.В. Ловчаков // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов: Материалы докладов XII Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых. – Тула, Из-во ТулГУ. – 2013. – С. 232–236.