

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 681.513.5

НОВИКОВ
Сергей Олегович

**ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМОЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
МОДИФИЦИРОВАННЫМ ПРИНЦИПОМ МАКСИМУМА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Минск, 2011

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель

Панасюк Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор
--

Официальные оппоненты:

Петровский Александр Александрович,
доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой
электронно-вычислительных средств
учреждения образования «Белорусский
государственный университет информатики и
радиоэлектроники»;

Петренко Юрий Николаевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Электропривод и автоматизация промышленных
установок и технологических комплексов»
Белорусского национального технического
университета

Оппонирующая организация Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится 31 марта 2011 г. в 14³⁰ на заседании совета по защите диссертаций К 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу 220013, г. Минск, пр. Независимости 65, тел. (8–017) 293–95–64, E-mail: gurski2010@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « 22 » февраля 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
канд. техн. наук, доцент

Н.Н. Гурский

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Вопросам оптимизации управления электромеханическими системами (ЭМС) уделено достаточно много внимания в многочисленных публикациях. Больше всего разработок и исследований посвящено оптимальному управлению двигателем постоянного тока. В основном это задачи оптимального управления по быстродействию, производительности и нагреву. Эти задачи решались методами динамического программирования, вариационного исчисления и принципом максимума Л.С. Понтрягина. Однако, аналитические решения, которые можно получить этими методами, возможны только для электромеханических объектов с линейными характеристиками. Например, для систем ЭМС с переменными параметрами, к которым можно отнести и электропривод постоянного тока (ЭПТ), перечисленные методы не позволяют получить решения в замкнутом виде (с обратными связями).

Обеспечение эффективности регуляторов, возможность реализации дополнительных требований, является ключевым звеном в практическом использовании методов оптимизации для создания качественных систем автоматического управления. В работе приведено алгоритмическое проектирование оптимального регулятора, способного обеспечить дополнительные требования к системе.

В диссертации рассматривается методика решения задачи управления ЭПТ на основе модифицированного принципа максимума с учетом переменности момента инерции нагрузки и корректирующей обратной связи по скорости. Решение этой задачи позволяет снизить электрические потери при управлении ЭПТ с переменными параметрами. Сегодня, в силу общей направленности на экономию энергоресурсов усилился интерес проектировщиков к алгоритмам, оптимального по энергетическим критериям управления электроприводами различных типов, поэтому работа, посвященная совершенствованию методов управления ЭМС, является актуальной.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема научной работы соответствует научному направлению кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» (ПОВТиАС) Белорусского национального технического университета (БНТУ). Работа проведена в рамках программы фундаментальных исследова-

ний лаборатории «Микропроцессорные системы управления» БНТУ с ОАО «Пеленг» г. Минск по теме «Разработка программного обеспечения для автоматизированного проектирования электромеханических следящих систем» (рег. № 0188006802 от 31.10.1988 г.). В договоре ГБ–91 «Разработка методов синтеза оптимальных систем» работа проводилась в разделе «Оптимальное управление двигателем постоянного тока с использованием теории модифицированного принципа максимума» (акт № 3/22, БПИ, 1991 г.). В рамках договоров с УП «Эплайсофт» г. Минск по темам «Разработка алгоритмов управления производственными системами с запаздыванием» (акт гос. регистрации № 20033693, 2004 г.), и «Разработка математических и программных средств компьютерного моделирования многомерных систем виброзащиты» (акт гос. регистрации № 20083419, 2008 г.) использовалась математическая модель синтезированного оптимального регулятора. В договоре ГБ 06–288 кафедры ПОВТ и АС БНТУ «Методическое и программное обеспечение информационных систем», в системе программирования CoDeSys реализована модель системы оптимального управления ЭПТ с переменными параметрами, оптимальный регулятор для которой получен на основе положений предложенного модифицированного принципа максимума (акт внедрения в учебный процесс, Минск, БНТУ, 2008 г.).

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в оптимизации управления электромеханической системой с переменными параметрами нагрузки, рассматриваемой как электропривод с двигателем постоянного тока (ДПТ) и корректирующей обратной связью по скорости.

Задачи исследования:

1. Решить в аналитической форме задачу оптимального управления ЭМС с переменным моментом инерции и учетом обратной связи по скорости.
2. Разработать частные методики и алгоритмы для:
 - построения оптимального регулятора с учетом переменного момента инерции нагрузки по критерию минимума электрических потерь;
 - оптимального по электрическим потерям управления ЭМС с переменным моментом инерции нагрузки.
3. Разработать программное обеспечение, предназначенное для исследования оптимального по электрическим потерям управления ЭМС с переменным моментом инерции нагрузки.
4. Оценить методом моделирования по критерию минимума электрических потерь эффективность управления ЭМС с учетом переменного момента инер-

ции нагрузки, в сравнении с известным управлением ЭМС при постоянном моменте инерции нагрузки.

В качестве объекта исследования выбрана ЭМС в виде ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки.

Предметом исследования являются методика построения и структура системы управления ЭМС с учетом переменного момента инерции нагрузки.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика аналитического синтеза оптимального управления для ЭМС с переменным моментом инерции нагрузки, основанная на модификации принципа максимума с энергосберегающим регулированием по замкнутому циклу.

2. Методика построения энергосберегающего оптимального регулятора и структуры микропроцессорного управления ЭМС по измеренному сигналу рассогласования, с учетом переменного момента инерции нагрузки.

3. Методика и алгоритм управления ЭМС с переменным моментом инерции нагрузки и корректирующими обратными связями обеспечивающие снижение электрических потерь на 7–13 % в сравнении с известными регуляторами.

4. Методика компьютерного моделирования оптимальных процессов управления ЭМС, реализованная в специализированной системе программирования CoDeSys, позволяющая получить сравнительные оценки энергоэффективности.

Личный вклад соискателя

Научный руководитель принимал участие в постановке задачи и определении возможных путей решения.

Все основные результаты диссертационных исследований разработаны и реализованы автором лично. В публикациях с соавторами вклад определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертационной работы и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на международных научно–технических конференциях «Наука – образованию, производству, экономике» (БНТУ, Минск, 2005–2010), на научно-технических конференциях студентов и аспирантов (Пинск 2008 г., Гомель 2008 г.), Международной научно-технической конференции «Совершенствование систем автоматизации технологических процессов» (Минск: БНТУ, 2010).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 27 печатных работ. Статьи [1–А – 3–А], опубликованные в журнале «Энергетика», соответствуют пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь по специальности 05.13.01– Системный анализ, управление и обработка информации.

Опубликованы: 3 статьи в научных журналах, 22 статьи в сборниках материалов международных научных конференций, 2 тезиса докладов на международных и республиканских научных конференциях.

Количество опубликованных материалов составляет 2,5 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных библиографических источников, приложений. В первой главе проведен анализ опубликованных источников по проблеме и сделано обоснование проведения исследований по теме диссертационной работы. Во второй главе приведены основные математические методы оптимального управления, приведены положения модифицированного принципа максимума и рассмотрены особенности их применения для решения задач управления ЭПТ. В третьей главе рассмотрена возможность применения модифицированного принципа максимума для решения задачи позиционного оптимального управления ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки. Проведено моделирование процесса позиционного управления ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки на основе модифицированного принципа максимума. Четвертая глава посвящена вопросам реализации и моделирования управления ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки с применением положений модифицированного принципа максимума в системе программирования CoDeSys. В приложениях приведены акты внедрения и справки об использовании материалов диссертационных исследований, а также результаты испытаний работы микропроцессорной системы оптимального управления ЭПТ с учетом переменности момента инерции нагрузки на основе модифицированного принципа максимума.

Общий объем диссертации 144 страницы, из которых 98 страниц основного текста. Диссертация содержит 25 рисунков на 11 страницах, 10 таблиц на 3 страницах, библиографический список из 138 наименований на 8 страницах, включающий 24 собственных публикаций автора и семь приложений на 24 страницах, в том числе: 6 таблиц на 18 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы и практический интерес, который могут представлять результаты диссертационных исследований для оптимизации управления ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы и выбору направления исследования. Рассмотрена система относительных единиц, используемая в главах 1–3, приведено основное уравнение ЭПТ и интегральные ограничения, накладываемые на процессы управления ЭПТ.

Оптимальному управлению электроприводом посвящены работы ряда исследователей (А.А. Воронова, В.А. Иванова, Ю.П. Петрова, Л.С. Понтрягина, Н.В. Фалдина и других), в работах которых были поставлены и решены многие задачи оптимального по электрическим потерям управления электроприводами различных типов.

Основным уравнением ЭПТ является уравнение равновесия моментов на валу электродвигателя:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{э}} - M_{\text{н}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{э}}$ – электромеханический момент двигателя; J – момент инерции всех вращающихся масс электропривода; ω – угловая скорость вращения вала двигателя; $M_{\text{н}}$ – момент нагрузки. Момент инерции J в выражении (1) является постоянной величиной.

При исследовании электроприводов принято пользоваться системой относительных единиц, выражая ток якоря, магнитный поток, моменты и скорость вращения в долях от их значений в номинальном режиме электродвигателя. В соответствии с этим уравнение (1) имеет следующий вид (далее в относительных единицах):

$$J \frac{dv}{dt} = \mu_{\text{э}} - \mu_{\text{н}}. \quad (2)$$

В главе приведены постановки задач оптимального управления ЭПТ изменением скорости вращения. Разнообразие ЭПТ и требований, предъявляемых к ним, затрудняют исчерпывающую классификацию задач оптимального управления ЭПТ. Обычно выделяют ряд типовых задач. Одной из них, а именно задаче обеспечения минимума электрических потерь в якоре ДПТ при заданных ограничениях и особенности ее решения рассматриваются в настоящей работе.

Вторая глава диссертации посвящена анализу математических методов, в основном применяемых для решения задач оптимального управления ЭПТ – вариационного исчисления, принципа максимума Л.С. Понтрягина, принципа оптимальности Р. Беллмана и положения модифицированного принципа максимума. Модификация принципа максимума Л.С. Понтрягина была предложена профессором В.И. Панасюком.

Динамическое программирование, принцип максимума, классическое вариационное исчисление и модифицированный принцип максимума имеют каждый свою область применения.

Вариационное исчисление применяется при исследовании нелинейных систем в общем виде. Принцип максимума имеет преимущества перед другими методами при оптимизации линейных систем. Он позволяет выявить структуру решения, что дает возможность синтезировать оптимальный регулятор. Однако в нелинейных системах он приводит к практически не решаемой краевой задаче принципа максимума. Основное значение динамического программирования заключается в том, что принцип оптимальности может служить основой для разработки приближенных алгоритмов численного решения задач оптимизации, удобных для реализации на ЭВМ. Модифицированный принцип максимума — это одно из необходимых условий оптимальности. Сутью использования этого метода для решения задач электропривода является такая модификация исходной задачи оптимального управления за счет замены ее аргумента, которая приводит к упрощению краевой задачи принципа максимума и решению задачи в основном за счет замены переменных сопряженных функций постоянными.

Для получения оптимального управления в электроприводах применялись в основном вариационное исчисление и традиционный принцип максимума. Однако, полученные оптимальные законы управления не нашли пока достаточно широкого распространения в практике проектирования в основном из-за сложности решения уравнений определяющих оптимальное управление. При использовании микропроцессорных систем для их реализации желательно иметь конечные процедуры для описания оптимальных процессов, не приводящие к краевой задаче. Этим целям достаточно хорошо служит модифицированный принцип максимума, позволяющий решить задачу управления электромеханической системой с немонотонным изменением аргумента.

В третьей главе рассматривается применение модифицированного принципа максимума для решения прикладной задачи оптимального управления [З–А].

В качестве такой прикладной задачи рассматривается задача позиционного управления ЭПТ по критерию минимума электрических потерь с учетом ло-

кальных ограничений. В формальной постановке задача оптимального управления ЭПТ сводится к следующему:

– перевести электропривод из одного состояния при скорости $v(0) = v_0$, соответствующего углу поворота $\alpha(0) = \alpha_0$, в другое заданное состояние, соответствующее скорости $v(T) = v_T$ и углу поворота $\alpha(T) = \alpha_T \geq \alpha_0$, с минимальными потерями Q за фиксированное время T , не нарушив соответствующие локальные ограничения этого ЭПТ.

Рассматривается решение задачи оптимального позиционного управления ЭПТ для случая, когда момент инерции зависит от угла поворота вала двигателя, а момент нагрузки постоянен или является функцией скорости вращения электропривода. Для применения модифицированного принципа максимума необходимо заменить время t на одну из фазовых переменных, в данной задаче это скорость v . Методика применения модифицированного принципа максимума может быть описана следующим образом. Уравнение равновесия моментов может быть представлено в виде:

$$J(\alpha) \frac{dv}{dt} = \mu_s - \hat{\mu}_h(\alpha, v), \quad (3)$$

где $\hat{\mu}_h(\alpha, v) = \mu_h + (v^2/2) * (dJ(\alpha)/d\alpha)$; $\mu_h = \text{const}$.

Момент нагрузки μ_h будем считать постоянным, а момент инерции J зависит от угла α . Момент инерции аппроксимируется кусочно-постоянной функцией аргумента α . Рассмотрим решение задачи позиционирования. Учитывая, что для электропривода $dq/dt = i^2$ и $d\alpha/dt = v$, перепишем систему уравнений движения электропривода (3) в виде:

$$\frac{dq}{dt} = i^2, \quad J(\alpha) \frac{dv}{dt} = i - \hat{\mu}_h, \quad \frac{d\alpha}{dt} = v, \quad (4)$$

где q – потери; i – ток якоря, который в относительных единицах равен μ_s .

Граничные условия при этом имеют вид

$$v(0) = 0, \quad v(T) = 0, \quad \alpha(0) = 0, \quad \alpha(T) = \alpha_T. \quad (5)$$

Требуется на решениях системы (4) при соблюдении условий (5) выбрать такой закон изменения тока якоря, который доставит минимум функционалу:

$$q = \int_0^T i^2 dt \rightarrow \min. \quad (6)$$

После замены аргумента t на v система уравнений привода (4) примет вид

$$\frac{dq}{dv} = \frac{J(\alpha)i^2}{i - \hat{\mu}_H(\alpha, v)}, \quad \frac{dt}{dv} = \frac{J(\alpha)}{i - \hat{\mu}_H(\alpha, v)}, \quad \frac{d\alpha}{dv} = \frac{J(\alpha)v}{i - \hat{\mu}_H(\alpha, v)}. \quad (7)$$

Граничные условия для этой задачи имеют вид

$$q(0) = 0, \quad v(0) = v_0 = 0, \quad v(T) = v_T = 0, \quad \alpha(0) = 0, \quad \alpha(T) = \alpha_T. \quad (8)$$

Определим для системы (8) функцию Л.С. Понтрягина в виде

$$H = \frac{(\psi_0 i^2 + \psi_1 + \psi_2 v) J(\alpha)}{i - \hat{\mu}_H(\alpha, v)}. \quad (9)$$

Тогда уравнения для сопряженных переменных будут иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_0}{dv} = -\frac{\partial H}{\partial q} &\equiv 0; & \frac{d\psi_1}{dv} = -\frac{\partial H}{\partial t} &\equiv 0; \\ \frac{d\psi_2}{dv} = -\frac{\partial H}{\partial \alpha} &= -\frac{(\psi_0 i^2 + \psi_1 + \psi_2 v)}{(i - \hat{\mu}_H(\alpha, v))^2} \left[\frac{\partial J(\alpha)}{\partial \alpha} (i - \hat{\mu}_H(\alpha, v)) + \left(\frac{v^2}{2}\right) \frac{\partial^2 J(\alpha)}{\partial \alpha^2} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Проведем ступенчатую (кусочно-постоянную) аппроксимацию зависимости $J(\alpha)$, тогда ψ_2 также будет кусочно-постоянной, с разрывами первого рода, определяемыми точками разрывов функции $J(\alpha)$. Полагая $\psi_0 = -1$ из условия $\partial H / \partial i = 0$, определяем оптимальный закон изменения тока якоря:

$$i^* = \hat{\mu}_H(\alpha, v) \pm \sqrt{\hat{\mu}_H(\alpha, v) + \psi_1 + \psi_2 v}. \quad (11)$$

Обозначим некоторую степень постоянства $J(\alpha)$ и ψ_2 индексом j , а следующую за ней индексом $j+1$. Точки разрывов кусочно-постоянной функции $J(\alpha)$ от аргумента v не зависят. Поэтому гамильтониан в оптимальном процессе непрерывен. Исходя из этого и приравниваем соответствующие индексы j и $j+1$:

$$\frac{(i_j^{*2} + \psi_1 + \psi_2 v_j) J_j}{i_j^* - \hat{\mu}_{Hj}} = H_j = H_{j+1} = \frac{(i_{j+1}^{*2} + \psi_1 + \psi_2 v_{j+1}) J_{j+1}}{i_{j+1}^* - \hat{\mu}_{Hj+1}}. \quad (12)$$

Отсюда получаем с учетом выражения для тока (11)

$$\pm J_j i_j^* = \pm J_{j+1} i_{j+1}^*, \quad (13)$$

где знак «+» соответствует участку разгона; знак «-» участку торможения.

Подставляя (11) в (13) и решая полученное уравнение относительно ψ_{2j+1} , получаем формулу для определения ψ_{2j+1} в виде

$$\psi_{2j+1} = ((J_j i_j^* / J_{j+1} + \hat{\mu}_{Hj+1}(\alpha, v))^2 - \hat{\mu}_{Hj+1}^2 - \psi_1) / v_j. \quad (14)$$

Процесс позиционирования имеет участки разгона и торможения. Из непрерывности гамильтониана в оптимальном процессе следует непрерывность оптимального управления (тока i^*), и поэтому переключение на торможение происходит при скорости $v = v_n$, определяемой из условия $\hat{\mu}_n(\alpha, v) + \psi_1 + \psi_2 v = 0$. Задаваясь для системы (4) с регулятором (11) различными значениями констант ψ_1 и ψ_2 подбираем такие их значения, чтобы выполнялись граничные условия (5). Полученный процесс и является решением задачи в исходной постановке.

В соответствии с приведенной выше общей методикой получено аналитическое решение системы уравнений (4) и решена задача позиционного управления ЭПТ с переменным моментом инерции в замкнутом виде.

Для проведения моделирования управления ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки на основе модифицированного принципа максимума задавался конкретный закон изменения зависимости момента инерции $J(\alpha)$, в виде

$$J(\alpha) = J_0 + (k_1 \alpha + k_2 \alpha^2) e^{k_3 \alpha}, \quad (15)$$

где J_0, k_1, k_2, k_3 – константы.

Для вычисления момента сопротивления $\hat{\mu}_n(\alpha, v)$ используется точная зависимость (15). Из (4) получим

$$\hat{\mu}_n(\alpha, v) = \mu_n + \frac{v^2}{2} [k_1 + (2k_2 + k_1 k_3) \alpha + k_2 k_3 \alpha^2] e^{k_3 \alpha}, \quad (16)$$

где μ_0 – константа.

- Анализ данных полученных при моделировании, проводился для:
- оптимального управления током якоря в соответствии с уравнениями (11), (14), где ψ_2 – величина, значение которой определяется на каждом шаге вычислений и подставляется в (11);
 - оптимального управления, при котором весовой множитель ψ_2 , принимается постоянным на всем интервале вычислений.

Алгоритм расчета может быть представлен в следующем виде:

1. Ввод исходных данных ($\mu_0, k_1, k_2, k_3, \Delta t, \psi_1, \psi_2, k$) и инициализация переменных ($v=0, t=0, \alpha=0, q=0, \mu_n = \mu_0$).
2. Вычисление момента инерции и момента сопротивления нагрузки, значения тока и скорости на n -м шаге.
3. Модификация значения угла для следующего шага.
4. Вычисление моментов инерции и момента сопротивления нагрузки, значений тока и скорости, вычисление электрических потерь, коэффициента ψ_2 на $n+1$ -м шаге.
5. Подготовка вычислительной процедуры к следующему шагу. Проверка условий окончания процедуры управления, если $\hat{\mu}_n(\alpha, v) + \psi_1 + \psi_2 v \geq 0$, то участок разгона обозначаем $k=1$ и переходим к шагу 3, иначе в (11) $k=-1$ и значение под корнем берем по модулю, после чего переходим к шагу 6.
6. Проверка условий окончания процедуры расчета управления, если скорость больше нуля, то переход к шагу 3, иначе к шагу 7.
7. Конец работы программы.

Результаты моделирования приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты моделирования с коэффициентом ψ_2 – var

Исходные данные		Результаты расчетов			
Ψ_1	Ψ_2	T	v	α	q
2000	-1300	0,1260	0,08395	0,1199	78,62
50,5	-16,7	1,503	0,09776	1,597	14,33

Таблица 2 – Результаты моделирования с коэффициентом ψ_2 – const

Исходные данные		Результаты расчетов			
Ψ_1	Ψ_2	T	v	α	q
2010	-1453	0,1260	0,08339	0,1201	78,88
90	-76,5	1,505	0,098938	1,579	16,50

Из сравнения и оценки полученных результатов, по критерию минимума электрических потерь (6) видно, что оптимальное управление с $\psi_2 - \text{var}$ по отношению к оптимальному управлению с $\psi_2 - \text{const}$, снижает потери в меди якоря двигателя постоянного тока, в зависимости от обрабатываемого угла, в пределах 7–13 %.

Четвертая глава посвящена реализации оптимального управления ЭПТ на основе модифицированного принципа максимума с учетом переменного момента инерции нагрузки и корректирующей обратной связи по скорости. Для того чтобы разрабатываемая система управления решала поставленные вопросы, необходимо использовать эффективное программно–алгоритмическое обеспечение, которое позволяет синтезировать законы управления, моделировать схему управления и исследовать ее поведение при различных условиях работы.

В качестве такой системы выбрана система программирования CoDeSys [1–А]. В CoDeSys реализована модель системы управления ЭПТ (17) с оптимальным программным регулятором в контуре управления, рисунок 1 [3–А].

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt}; \quad M_{\text{э}} = k_{\text{д}} I_{\text{я}}; \quad J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{э}} - M_{\text{н}}, \quad (17)$$

где $U_{\text{я}}$ – напряжение двигателя; $I_{\text{я}}$ – ток якоря; $R_{\text{я}}$ – сопротивления якоря; $L_{\text{я}}$ – индуктивность якоря; $k_{\text{д}}$ – конструктивный коэффициент двигателя.

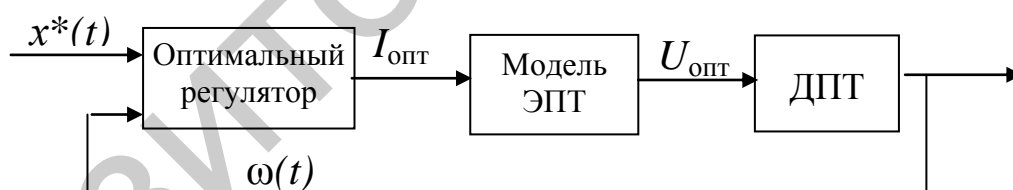


Рисунок 1 – Структурная схема программного оптимального управления электромеханической системой

Используя положения модифицированного принципа максимума, применим их для реализации оптимального управления ЭПТ, с переменным моментом инерции нагрузки и учетом корректирующей обратной связи по скорости. В блоке «Оптимальный регулятор» производится расчет оптимальных параметров управления ЭПТ, при заданном угле поворота вала двигателя, необходимых для схемы усилителя мощности, управляющих двигателем. Выражение для момента инерции имеет экспоненциальный характер зависимости от обрабатываемого угла (согласно (15)). Входным сигналом для блока «Модель ЭПТ» служит значение оптимального тока (11) рассчитанного для конкретного шага вы-

числений. Тогда управляющим воздействием для блока «ДПТ» будет не оптимальный ток якоря, а рассчитанное оптимальное напряжение $U_{\text{опт}}$, рассчитанное по (17) с учетом (11) [3–А]. Результаты моделирования процесса управления приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Результаты моделирования процесса с ψ_2 – var

Исходные данные		Результаты расчетов		
Ψ_1	Ψ_2	T	α	q
7	-52	0,231	2,076907	6,669504

Таблица 4 – Результаты моделирования процесса с ψ_2 – const

Исходные данные		Результаты расчетов		
Ψ_1	Ψ_2	T	α	q
1005	303	0,287	2,042645	18,3549

Графики поведения основных переменных системы управления – изменение тока, обрабатываемого угла, электрических потерь, поведение момента инерции и изменения скорости вращения вала ДПТ приведены на рисунке 2.

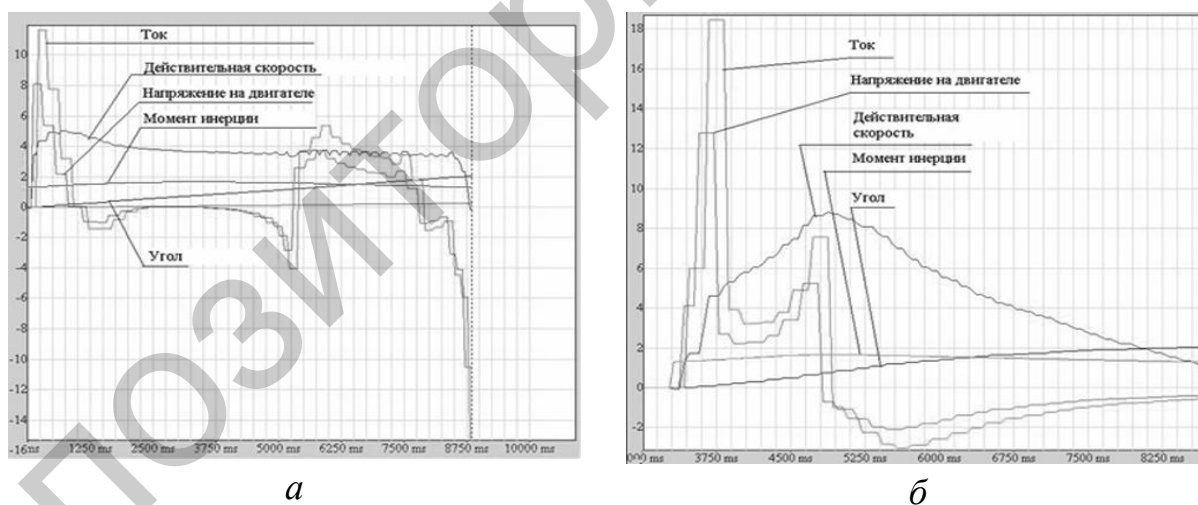


Рисунок 2 – Поведение основных параметров наблюдаемой системы в оптимальном процессе с ψ_2 –const (а) и с ψ_2 –var (б)

Изменим выражение для вычисления момента инерции (15), имеющего экспоненциальный вид, на выражение, в результате вычисления которого изменение момента инерции нагрузки будет осуществляться по параболическому закону, и имеющему, например, следующий вид

$$J(\alpha) = k_1 + (k_2 + k_3\alpha)^2. \quad (1)$$

8)

Соответственно изменится и выражение для вычисления момента сопротивления нагрузки, которое примет вид

$$\mu_n(\alpha, v) = k_1 + (2k_2k_3 + 2k_3^2\alpha)v^2/2. \quad (19)$$

На основе приведенной ранее методики были проведены испытания системы управления ЭПТ с измененным выражением для момента инерции нагрузки типа (18). Анализ полученных данных показал, что за одно и тоже время, при отработке одного и того же угла система управления ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки, в которой учитывалось изменение сопряженной переменной ψ_2 на каждом шаге вычислительного процесса, позволила снизить потери минимум на 15 %, по отношению к системе, где ψ_2 оставалась постоянной величиной. Графические результаты эксперимента при управлении ЭПТ с переменным моментом инерции в виде (18) приведены на рисунке 3.

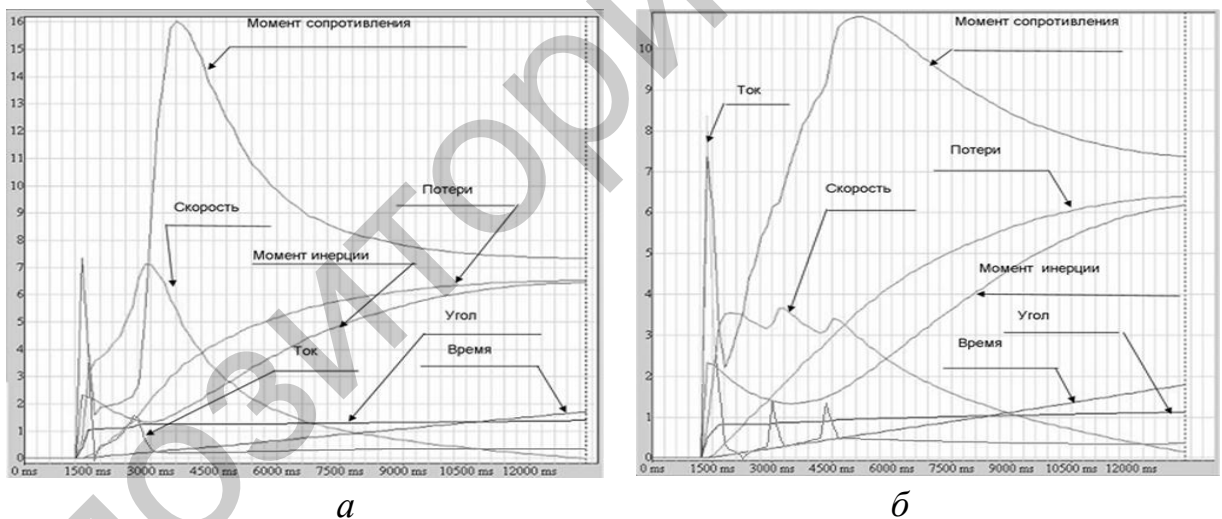


Рисунок 3 – Поведение основных параметров наблюдаемой системы в оптимальном процесс с $\psi_2 - \text{const}$ (а) и с $\psi_2 - \text{var}$ (б)

Результаты моделирования процесса управления по этому эксперименту приведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 – Результаты управления ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки в виде параболы с $\psi_2 - \text{const}$

Исходные данные	Результаты расчетов
-----------------	---------------------

Ψ_1	Ψ_2	T	α	q
-5	-0.137	1,786999	6,518981	1,392035

Таблица 6 – Результаты управления ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки в виде параболы с Ψ_2 – var

Исходные данные		Результаты расчетов		
Ψ_1	Ψ_2	T	α	q
-53	353,5 443	1,791999	6,483997	1,123974

Структурная схема программируемого логического контроллера (ПЛК), предназначенного для управления ЭМС с переменным моментом инерции нагрузки и учетом корректирующей обратной связи по скорости, реализована в представленном на рисунке 4 виде.

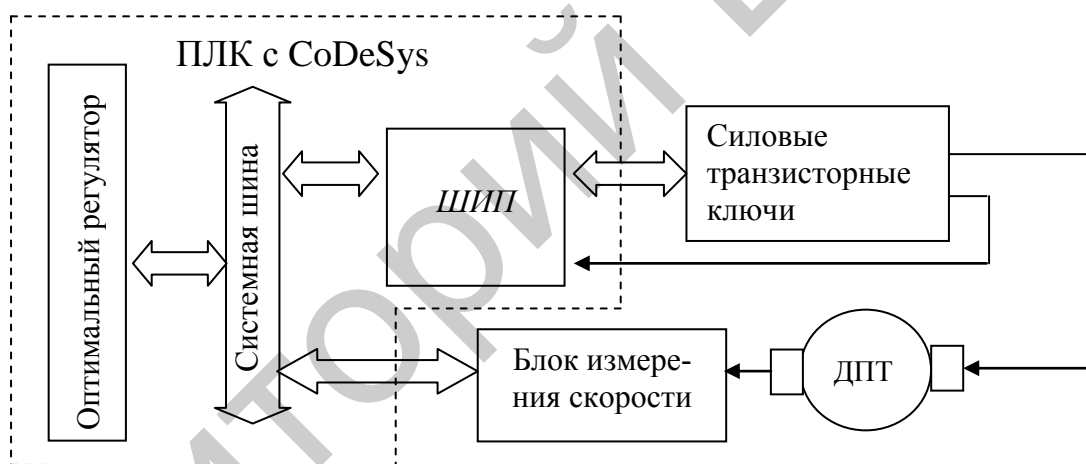


Рисунок 4 – Структурная схема оптимальной микропроцессорной системы управления ЭМС с переменным моментом инерции нагрузки

ПЛК с системой CoDeSys полностью включает в себя такие элементы системы управления ЭМС, как:

- программно реализованный и расположенный в перепрограммируемом постоянном запоминающем устройстве или на FLASH памяти оптимальный регулятор, предназначенный для управления ЭМС с переменным моментом инерции нагрузки;
- программно реализованный и расположенный в перепрограммируемом постоянном запоминающем устройстве или на FLASH памяти ШИП;
- сопряжение с силовыми транзисторными ключами и датчиками осуществляется по унифицированным линиям входов–выходов ПЛК.

По результатам моделирования системы управления ЭМС проводился анализ полученных данных, аналогично приведенному в главе 3. Из сравнения и анализа полученных данных, по критерию минимума электрических потерь, видно, что применение процедуры модифицированного принципа максимума для управления ЭМС с переменным моментом инерции нагрузки, позволяет снизить электрические потери при управлении такой системой и повысить её энергоэффективность.

В приложениях представлены результаты моделирования оптимальных процессов, копии актов и справок о практическом использовании результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Получено новое решение задачи оптимального позиционного управления ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки, основанное на применении метода модифицированного принципа максимума. Новизна заключается в том, что удалось получить решение в виде регулятора с обратными связями, отличающееся от известных тем, что оно получено за счет упрощения процедуры её решения. Проведено моделирование позиционного управления ЭМС с переменным моментом инерции нагрузки по критерию минимума электрических потерь, что позволило снизить электрические потери в среднем от 7 % до 13 %, в сравнении с известными регуляторами. Полученное решение, делает возможным реализацию на микропроцессорной основе оптимального управления ЭМС с переменными параметрами в замкнутом виде [2–А – 5–А, 7–А, 13–А, 22–А – 27–А].
2. Разработан алгоритм реализации оптимального по электрическим потерям регулятора, предназначенного для управления ЭМС с переменными параметрами нагрузки, который в отличие от известных, позволяет использовать обратную связь системы управления по скорости [2–А, 3–А, 19–А – 23–А].
3. Разработаны и реализованы методика и алгоритм управления микропроцессорной системой, которые максимально используют аппаратные ресурсы серийного микроконтроллера и в отличие от известных, позволяют реализовать управление ЭМС с переменным моментом инерции нагрузки в замкнутом виде [3–А, 23–А].
4. Реализована новая методика компьютерного моделирования оптимальных процессов, которая предназначена для управления ЭМС с переменными параметрами нагрузки, использующая в качестве микроконтроллера систему про-

граммирования CoDeSys. Она позволяет провести моделирование управления ЭМС с переменным моментом инерции в реальном масштабе времени. Структура микропроцессорной системы отличается от существующих введением блока формирования оптимальных параметров управления и возможностью проведения исследований её поведения без использования реального объекта управления [1–А – 27–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Использование результатов диссертационной работы позволяет построить алгоритмы для оптимального микропроцессорного управления электромеханическими системами на основе модифицированного принципа максимума с учетом переменного момента инерции. Применение модифицированного принципа максимума позволяет решить задачу оптимального управления электромеханической системой с переменными параметрами нагрузки и учетом обратных связей в виде конечного алгоритма.

Разработанная в диссертационной работе методика внедрена в учебный процесс кафедры ПОВТиАС БНТУ в дисциплинах «Микропроцессорные системы управления», «Автоматизированные системы контроля и управления» и «Оптимальное проектирование в технических системах». Полученные результаты могут быть использованы в системах управления промышленными роботами, электрических кранов, экскаваторов.

Разработанные в диссертации методика и алгоритм синтеза микропроцессорного регулятора могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных разработках аналогичных систем оптимального управления для других объектов с переменными параметрами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1–А. Новиков, С.О. Возможности системы программирования CoDeSys при разработке программного обеспечения и проектировании микропроцессорных систем управления / С.О. Новиков // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика. – Минск : БНТУ, 2009. – № 1. – С. 27–35.

2–А. Новиков, С.О. Моделирование работы системы управления электроприводом постоянного тока в среде программирования CoDeSys / С.О. Новиков // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика. – Минск : БНТУ, 2009. – № 2. – С. 22–27.

3–А. Новиков, С.О. Проектирование оптимального по потерям регулятора для управления ЭПТ с переменным моментом инерции в системе программирования CoDeSys / С.О. Новиков, А.В. Пашенко // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика. – Минск : БНТУ, 2009. – № 3. – С. 28–34.

Статьи в материалах конференций

4–А. Новиков, С.О. Микропроцессорная система управления двигателем переменного тока / С.О. Новиков // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Пятой международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2007. – Т. 1. – С. 172–174.

5–А. Новиков, С.О. Особенности реализации алгоритма системы управления в среде CoDeSys / С.О. Новиков, В.Н. Грицкевич // Материалы Второй МС научно-практической конференции «Студенческая наука будущее государства» : г. Пинск, Респ. Беларусь, Полесский государственный университет, 25.03.2008 г. – Пинск, 2008. – С. 68–69.

6–А. Новиков, С.О. Расширение реального времени системы CoDeSys / С.О. Новиков, А.В. Невельский // Материалы Второй МС научно-практической конференции «Студенческая наука будущее государства» : г. Пинск, Респ. Беларусь, Полесский государственный университет, 25.03.2008 г. – Пинск, 2008. – С. 100–101.

7–А. Новиков, С.О. Компьютерное моделирование системы управления в среде исполнения CoDeSys / С.О. Новиков, А.И. Антонович // Материалы Второй МС научно-практической конференции «Студенческая наука будущее гос-

ударства» : г. Пинск, Респ. Беларусь, Полесский государственный университет, 25.03.2008 г. – Пинск, 2008.– С. 54–55.

8–А. Новиков, С.О. Моделирование работы манипулятора конвейерной установки ленточного типа в среде исполнения CoDeSys / С.О. Новиков, М.Э. Гук // Материалы Второй МС научно-практической конференции «Студенческая наука будущее государства» : г. Пинск, Респ. Беларусь, Полесский государственный университет, 25.03.2008 г. – Пинск, 2008. – С. 69–70.

9–А. Новиков, С.О. Язык CFC в CoDeSys / С.О. Новиков, И.И. Козик // Материалы Второй МС научно-практической конференции «Студенческая наука будущее государства» : г. Пинск, Респ. Беларусь, Полесский государственный университет, 25.03.2008 г. – Пинск, 2008. – С. 80.

10–А. Новиков, С.О. Компьютерное моделирование системы управления системой исполнения CoDeSys / С.О. Новиков, Е.А. Мельникова // Материалы Второй МС научно-практической конференции «Студенческая наука будущее государства» : г. Пинск, Респ. Беларусь, Полесский государственный университет, 25.03.2008 г. – Пинск, 2008. – С. 97.

11–А. Новиков, С.О. Описание алгоритма программы в системе исполнения CoDeSys для управления кабиной лифта / С.О. Новиков, О.М.Фролов // Материалы Второй МС научно-практической конференции «Студенческая наука будущее государства» : г. Пинск, Респ. Беларусь, Полесский государственный университет, 25.03.2008 г. – Пинск, 2008. – С. 117.

12–А. Новиков, С.О. Создание программного обеспечения для работа-погрузчика с помощью программного комплекса CoDeSys / С.О. Новиков, Н.В. Рюмко // Материалы Второй МС научно-практической конференции «Студенческая наука будущее государства» : г. Пинск, Респ. Беларусь, Полесский государственный университет, 25.03.2008 г. – Пинск, 2008. – С. 112–113.

13–А. Новиков, С.О. Программа управления широтно-импульсным преобразователем / С.О. Новиков, В.С. Петухов // Материалы Второй МС научно-практической конференции «Студенческая наука будущее государства» : г. Пинск, Респ. Беларусь, Полесский государственный университет, 25.03.2008 г. – Пинск, 2008.– С. 104–105.

14–А. Новиков, С.О. Компьютерное моделирование системы управления системой исполнения CoDeSys / С.О. Новиков, А.И Антонович // Материалы XI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов (Гомель, 17–19 марта 2008 года): в 2 ч., Ч. 1, ГГУ им. Ф. Скорины, 2008. – С. 59–60.

15–А. Новиков, С.О. Особенности использования стандарта МЭК 61131 / С.О. Новиков, В.Н. Грицкевич // Материалы XI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов (Гомель, 17–19 марта 2008 года): в 2 ч., Ч. 1, ГГУ им. Ф. Скорины, 2008. – С. 71–72.

16–А. Новиков, С.О. Применение новых технологий в разработке микропроцессорных систем управления / С.О. Новиков, О.Н. Карасик, Н.Н. Космачев // Материалы XI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов (Гомель, 17–19 марта 2008 года): в 2 ч., Ч. 1, ГГУ им. Ф. Скорины, 2008. – С. 81–82.

17–А. Новиков, С.О. Применение стандарта МЭК 61131–3 для разработок программного обеспечения / О.М.Фролов, С.О. Новиков // Материалы XI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов (Гомель, 17–19 марта 2008 года): в 2 ч., Ч. 2, ГГУ им. Ф. Скорины, 2008. – С. 43–44.

18–А. Новиков, С.О. Особенности визуализации в системе CoDeSys / С.О. Новиков, А.В. Невельский // Материалы XI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов (Гомель, 17–19 марта 2008 года): в 2 ч., Ч. 2, ГГУ им. Ф. Скорины, 2008. – С. 124–125.

19–А. Новиков, С.О. Использование комплекса CoDeSys в системах управления / С.О. Новиков, Л.И. Новикова // Материалы Шестой МНТК «Наука образованию, производству, экономике»: в 3 т.– Минск : БНТУ, 2008. – Т. 1. – С. 106.

20–А. Новиков, С.О. Применение стандарта МЭК 61131 в учебном процессе / С.О. Новиков, Л.И. Новикова // Материалы Шестой МНТК «Наука образованию, производству, экономике»: в 3 т.– Минск : БНТУ, 2008. – Т. 1. – С. 107.

21–А. Новиков, С.О. Описание алгоритма программы в системе исполнения CoDeSys для управления отопительной системой / П.А. Трич, С.О. Новиков // Материалы XII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов (Гомель, 16–18 марта 2009 года), ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – С. 163–164.

22–А. Новиков, С.О. Оптимальное управление электроприводом постоянного тока / С.О. Новиков, А.В. Пащенко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Седьмой международной научно–технической конференции. – Минск : БНТУ, 2009. – Т. 1. – С. 121.

23–А. Новиков, С.О. Решение задачи оптимального позиционного управления электроприводом постоянного тока с переменным моментом инерции / С.О. Новиков, А.В. Пащенко // Материалы Международной научно–технической конференции : Совершенствование систем автоматизации технологических процессов. – Минск : БНТУ, 2010. – С. 19.

24–А. Новиков, С.О. Применение метода модифицированного принципа максимума для управления электроприводом постоянного тока / С.О. Новиков, Л.И. Новикова // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Восьмой международной научно–технической конференции. – Минск : БНТУ, 2010. – Т. 1. – С. 178.

25–А. Новиков, С.О. Моделирование системы управления шаговым двигателем в среде CoDeSys / С.О. Новиков, Л.И. Новикова // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Восьмой международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2010. – Т. 1. – С. 179.

Тезисы докладов на научных конференциях

26–А. Новиков, С.О. Применение модифицированного принципа максимума в задачах оптимального управления манипулятором с переменным моментом инерции / В.И. Панасюк, С.О. Новиков, А.В. Пашенко, Е.Н. Майер. – Седьмая всесоюзная конференция «Управление в механических системах», Свердловск, 12–14 июня 1990. – С. 82.

27–А. Новиков, С.О. Оптимальное управление электроприводом постоянного тока на микропроцессорной основе / А.В. Пашенко, С.О. Новиков // Тезисы республиканской научно-технической конференции : Автоматизированный электропривод промышленных установок. – Минск : БГПА, 1994. – С. 85.

РЫЗИОМЭ

Новікаў Сяргей Алегавіч

Аптымізацыя кіравання электрамеханічнай сістэмай з пераменнымі параметрамі мадыфікаваным прынцыпам максімуму

Ключавыя словы: аптымальнае кіраванне, мадыфікаваны прынцып максімуму, мікрапрацэсарнае кіраванне, аптымальны рэгулятар, электрапрывод пастаяннага току, аптымізацыя электрычных страт, пераменны момант інэрцыі.

Мэта дысертацыйнай працы складаецца ў аптымізацыі кіравання электрамеханічнай сістэмай з пераменнымі параметрамі на грузкі, якая разглядаецца як электрапрывод з рухавіком пастаяннага току і пераменным момантам інэрцыі на грузкі, а таксама ў распрацоўцы аптымальных алгарытмаў кіравання на аснове мадыфікаванага прынцыпу максімуму і параўнання іх з аптымальнымі працэсамі, атрыманымі іншымі метадамі тэорыі аптымальнага кіравання. Ацэнка эфектыўнасці прымянення мадыфікаванага прынцыпу максімуму для кіравання электрамеханічнай сістэмай з пераменным момантам інэрцыі на грузкі, шляхам параўнальнага мадэлявання і наступнага аналізу вынікаў.

Праведзена аналітычнае мадэляванне работы разглядаанай электрамеханічнай сістэмы з выкарыстаннем тэорыі мадыфікаванага прынцыпу максімуму. Распрацаваны алгарытм разліку кіраўніка ўздзеяння для аптымальнага рэгулятара. Праведзены аналіз атрыманых вынікаў у параўнанні з вынікамі аптымальнага кіравання, атрыманымі вядомым кіраваннем электрамеханічнай сістэмай пры пастаянным моманце інэрцыі на грузкі.

Распрацавана структурная схема сістэмы кіравання, прызначаная для мадэлявання аптымальнага кіравання электрамеханічнай сістэмай, параметры на грузкі якой залежаць ад зменлівага моманту інэрцыі на грузкі з улікам карэктуючай зваротнай сувязі. Распрацоўка праграмага забеспячэння выканана з улікам патрабаванняў стандарту МЭК 61131–3. Рэалізавана новая метадыка камп'ютарнага мадэлявання аптымальных працэсаў, якая прызначана для кіравання ЭПТ з пераменнымі параметрамі і выкарыстоўвае ў якасці мікракантролера сістэму праграмавання CoDeSys. Яна дазваляе правесці мадэляванне кіравання ЭПТ з пераменным момантам інэрцыі на грузкі ў рэальным маштабе часу. Структура мікрапрацэсарнай сістэмы адрозніваецца ад існуючых магчымасцю правядзення даследаванняў яе паводзін у рэальным часе без выкарыстання аб'екта кіравання.

РЕЗЮМЕ

Оптимизация управления электромеханической системой с переменными параметрами модифицированным принципом максимума

Ключевые слова: оптимальное управление, модифицированный принцип максимума, микропроцессорное управление, оптимальный регулятор, электропривод постоянного тока, оптимизация электрических потерь.

Цель диссертационной работы состоит в оптимизации управления электромеханической системой с переменными параметрами нагрузки, рассматриваемой как электропривод с двигателем постоянного тока и переменным моментом инерции нагрузки, а так же в разработке оптимальных алгоритмов управления на основе модифицированного принципа максимума и сравнения их с оптимальными процессами, полученными другими методами теории оптимального управления. Оценка эффективности применения модифицированного принципа максимума для управления электромеханической системой с переменным моментом инерции нагрузки, методом моделирования и последующего анализа результатов.

Проведено аналитическое моделирование работы рассматриваемой электромеханической системы с использованием теории модифицированного принципа максимума. Разработан алгоритм расчета управляющего воздействия для оптимального регулятора. Проведен анализ полученных результатов в сравнении с результатами оптимального управления, полученными известным управлением электромеханической системой при постоянном моменте инерции нагрузки.

Разработана структурная схема системы управления, предназначенная для моделирования оптимального управления электромеханической системой, параметры нагрузки которой зависят от изменяющегося момента инерции и с учетом корректирующей обратной связи. Разработка программного обеспечения выполнена с учетом требований стандарта МЭК 61131-3. Реализована новая методика компьютерного моделирования оптимальных процессов, которая предназначена для управления ЭПТ с переменными параметрами, использующая в качестве микроконтроллера систему программирования CoDeSys. Она позволяет провести моделирование управления ЭПТ с переменным моментом инерции нагрузки в реальном масштабе времени. Структура микропроцессорной системы отличается от существующих возможностью проведения исследований её поведения в реальном времени без использования объекта управления.

SUMMARY

Novikov Sergey Olegovich.

Optimizing control of electromechanical systems with variable parameters, the modified maximum principle

Keywords: optimal control, the modified maximum principle, microprocessor control, the optimal regulator, the electric DC power optimization in losses, the variable moment of load inertia.

The aim of the thesis is to optimize the management of electromechanical system with variable parameters load, considered as a electric drive with DC motor and variable moment of inertia, as well as in the development of optimal control algorithms based on modified maximum principle and comparison with the optimal process, obtained by other methods in the theory of optimal management. Evaluating the effectiveness of the modified maximum principle for control of electromechanical systems with variable moments of load inertia, by simulation and subsequent analysis of results.

An analytical modeling of the considered electromechanical system using the theory of the modified maximum principle. Developed an algorithm for calculating the control action for optimum control. The analysis of the results in comparison with the results of optimal control, receipt management of electromechanical system with a constant load inertia.

The structural scheme of microprocessor control system designed to simulate an optimal control of electromechanical system, the load characteristics of which depend on the changing moment of load inertia taking into account the corrective feedback. Development of pro–software effort is made to meet the requirements of IEC 61131–3. Implemented a new method of computer simulation of optimal processes, which is designed to control electric drive with DC motor with variable parameters are used as a microcontroller system programming of CoDeSys. It allows you to simulate control electric drive with DC motor with variable moment of load inertia in real time. The structure of a microprocessor system differs from existing research the possibility of its behavior in real time without using a control object.

Научное издание

НОВИКОВ
Сергей Олегович

**ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМОЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
МОДИФИЦИРОВАННЫМ ПРИНЦИПОМ МАКСИМУМА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура «Таймс».

Усл. печ. л. Уч.–изд. л. Тираж 60 экз. Зак. 149

Издатель и полиграфическое исполнение:

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЛИ №02330/0494349 от 16.03.2009.

проспект Независимости, 65. 220013, г. Минск.