

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Попова Андрея Николаевича «Прикладная теория и методы синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления нелинейными электромеханическими системами», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

1. Актуальность темы диссертационной работы

В современных условиях постоянного роста требований к максимально эффективному использованию энергии в технических системах и развития энергосберегающих технологий проблема повышения эффективности электромеханического преобразования энергии является особенно актуальной. Электромеханические системы (ЭМС) составляют основу большинства промышленных и транспортных агрегатов, потребляя значительную долю производимой электроэнергии. По оценкам экспертов, повышение КПД ЭМС даже на 1% ведет к существенной экономии ресурсов и значительному снижению негативного воздействия на экологию.

При этом традиционные методы синтеза алгоритмов управления, основанные на классической линейной теории автоматического управления, не учитывают сложную нелинейную и многосвязную динамику современных ЭМС. Отсутствие адекватных методов и инструментов для решения задачи синтеза энергосберегающих регуляторов в нелинейной постановке, способных при этом компенсировать внешние и параметрические возмущения, существенно сдерживает развитие отрасли.

В связи с этим диссертационная работа Попова А.Н., посвященная разработке прикладной теории и методов синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления нелинейными ЭМС, весьма актуальна и имеет важное значение с точки зрения внедрения современных направлений теории автоматического управления в практику модернизации промышленных и транспортных систем.

2. Анализ содержания диссертации

В качестве достоинства следует отметить логически выстроенную структуру диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений с примерами программных реализаций.

В первой главе рассмотрена проблематика энергосбережения в ЭМС, дана систематизация существующих методов энергосберегающего управления и выявлены ключевые противоречия в теории и практике управления ЭМС. Здесь же сформулирована научно-техническая проблема, на решение которой направлено диссертационное исследование в целом, перечислены основные задачи и этапы исследования.

Вторая глава посвящена формированию исходных данных для решения основных задач исследования, включая подробный разбор математических моделей силового канала ЭМС. Существенное место в главе уделено вопросу выявления возможностей по снижению потерь энергии при ее электромеханическом преобразовании. Автором предложена формализованная методика поиска условий минимизации потерь энергии в электрических двигателях, использующая их математические модели и основанная на простой идее поиска локального минимума функции потерь мощности. Применение этой методики позволило построить систему энергетических инвариантов ЭМС, которая по сути определяет стратегию управления соответствующим двигателем для получения эффекта энергосбережения при изменяющихся условиях его работы.

В третьей главе изложена прикладная теория синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС, в том числе представлена обобщённая процедура системного подхода – декомпозиция системы и синтеза управляющих алгоритмов, а также разработаны прикладные методы синергетического синтеза для реализации характерных режимов механического движения исполнительного органа (стабилизация скорости, позиционирование, генерация колебаний, слежение).

В четвертой главе представлены прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС с различными типами двигателей: двигателями постоянного тока, асинхронными короткозамкнутыми двигателями, синхронными двигателями с электромагнитным возбуждением и постоянными магнитами. В главе проведен анализ энергетической эффективности, который демонстрирует заметное увеличение КПД двигателей при использовании предложенных алгоритмов.

Пятая глава посвящена решению задач синтеза адаптивных регуляторов ЭМС. В контексте основных задач диссертационного исследования адаптация к изменению параметров и действию возмущений имеет важное значение, поскольку выражения для энергетических инвариантов содержат параметры электромагнитных цепей и момент нагрузки. Их неконтролируемое изменение может привести не только к ухудшению качества управления, но и к смещению реальной точки энергетического оптимума. В главе представлены прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления, позволяющие компенсировать внешние возмущения и флуктуацию параметров моделей, что расширяет область устойчивости и обеспечивает максимальную энергетическую эффективность в условиях неопределенности.

Каждая глава диссертации заканчивается выводами. Выводы и рекомендации **Заключения** достаточно обоснованы.

3. Научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований

В диссертации представлен ряд результатов, обладающих новизной и имеющих теоретическую и практическую значимость. В качестве наиболее значимых результатов можно отметить следующие.

1. Методика поиска условий минимизации потерь энергии в электрических двигателях, которая позволяет получать математические

выражения, соответствующие минимуму суммарных потерь в рамках конкретной математической модели. Отличительной особенностью этой методики от существующих является ее универсальность и явная ориентация на дальнейшее использование при синтезе алгоритмов управления.

2. Предложенная обобщенная процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС. Процедура фактически представляет собой математически обоснованную стратегию синтеза многоканальных ЭМС, исключая необходимость линеаризации математической модели и применения численных поисковых процедур при настройке контуров управления.

3. Прикладные методы синергетического синтеза электромеханических осцилляторов. Автором предложен принципиально новый подход к синтезу колебательных систем, основанный на формировании в пространстве состояний системы целевых аттракторов типа «пределный цикл». Здесь, на наш взгляд, наиболее полно продемонстрированы возможности синергетической теории управления профессора Колесникова А. А., использующей методологию и терминологию нелинейной динамики и синергетики.

4. Прикладные методы синергетического синтеза энергосберегающих регуляторов ЭМС. Данные методы фактически представляют собой теоретический инструментарий для нахождения алгоритмов энергосберегающего управления для ЭМС с различными типами электрических двигателей. Существенное отличие от существующих аналогов состоит в том, что основная технологическая задача и требования по минимизации потерь энергии решаются комплексно на основе единой нелинейной математической модели и представляются аналитически в форме векторного закона управления.

5. Прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС. Подчеркивая важность решения задач адаптации при проектировании современных систем управления, следует

отметить, что разработанные автором прикладные методы синтеза адаптивных регуляторов ЭМС не только позволяют получать алгоритмы, компенсирующие внешние и параметрические возмущения, но и обеспечивают минимизацию потерь энергии в условиях существенной неопределенности. Таким образом в одном алгоритме управления сосредоточен весь комплекс основных требований к ЭМС: функциональность, энергоэффективность и адаптивность.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в разработке новых прикладных методов синтеза алгоритмов автоматического управления для общего класса ЭМС, максимально учитывающих сложную нелинейную динамику рассматриваемых физических процессов, обеспечивающих решение полного спектра задач по организации заданного механического движения с возможностью минимизации потерь энергии и в условиях действия внешних и параметрических возмущений.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в том, что предложенные подходы, методы и алгоритмы могут найти широкое применение при проектировании современных и перспективных ЭМС промышленного и транспортного назначения с целью повышения их энергоэффективности и надежности.

4. Достоверность и степень обоснованности научных положений и выводов

Научные положения диссертации базируются на корректном использовании математического аппарата, современных методов нелинейной динамики, теории устойчивости, теории автоматического управления, синергетической теории управления. Теоретические выкладки в достаточной степени подтверждены средствами компьютерного моделирования. Общая логика изложения, строгая математическая последовательность и

использование множества примеров свидетельствуют о высокой степени обоснованности и достоверности научных положений и выводов.

5. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Изложенные научные положения, полученные результаты, выводы и рекомендации позволяют сделать заключение о том, что диссертация Попова Андрея Николаевича, представленная к защите на соискание ученой степени доктора технических наук, соответствует пп. 3, 4, 9 паспорта научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

6. Соответствие автореферата содержанию диссертации

Обращает на себя внимание достаточно грамотное изложение материала в автореферате диссертации. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации. В нем представлены научные положения, новизна, теоретическая и практическая значимость, основные выводы по пяти главам диссертации, заключение с результатами и основными выводами работы.

7. Структура, стиль и язык диссертации

Диссертация хорошо структурирована, содержание соответствует цели и задачам исследований. Стиль изложения результатов исследования диссертационной работы отмечают смысловая законченность, целостность и связность текста.

8. Апробация работы и подтверждение опубликования основных результатов диссертации

Основные результаты работы докладывались на международных научных конференциях, что свидетельствует о том, что основные положения диссертации широко апробированы. Основные результаты диссертации опубликованы в 70 научных трудах, в том числе в 17 статьях в журналах, включенных ВАК РФ в перечень рецензируемых научных изданий, в 9 статьях в научных изданиях, входящих в международные системы индексирования Scopus и Web of Science.

9. Замечания по диссертационной работе

1. Ограниченность тестирования реальных систем. Несмотря на успешные компьютерные эксперименты, отсутствие реального эксперимента на прототипах или действующем оборудовании ограничивает подтверждение полной работоспособности предложенных решений в производственных условиях.

2. Необходимо детализировать как неучитывание возможных погрешностей датчиков и несовершенства измерений может повлиять на качество управления в стационарном режиме. Также при проведении компьютерного моделирования целесообразно не только качественно (по графикам переходных процессов), но и количественно охарактеризовать достижение целей управления, например использование числовых метрик – среднеквадратичная ошибка (root-mean-square error), средняя абсолютная ошибка (average absolute value) и др.

3. При проведении синтеза алгоритмов управления, в основном, использовались нелинейные математические модели электрических двигателей. Динамика других элементов силового канала ЭМС – силовых преобразователей (инвертеров, ШИМ-преобразователей постоянного тока) и механических преобразователей либо не учитывалась, либо принималась слишком упрощенной.

4. Представленные в работе прикладные методы синтеза алгоритмов управления применялись к некоторым абстрактным ЭМС. На наш взгляд,

было бы правильным продемонстрировать эффективность предлагаемых подходов для решения задач управления конкретными технологическими агрегатами и тяговыми установками транспортных средств.

5. Для оценки энергетической эффективности ЭМС использовался самый простой и очевидный количественный показатель – коэффициент полезного действия двигателя. Однако процессы преобразования энергии в электрической машине в принципе могут быть двунаправленные (например, режим рекуперативного торможения). Об этом желательно было бы упомянуть в работе.

Представленные замечания не носят принципиального характера и не снижают общую положительную оценку работы в целом и значимость полученных результатов.

10. Заключение

Диссертационная работа Попова Андрея Николаевича соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 и представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, связанная с разработкой теоретических положений и новых методов синтеза эффективных алгоритмов энергосберегающего управления электромеханическими системами. Широкое применение таких систем в промышленных и транспортных приложениях позволяет сказать, что рассматриваемая проблема имеет важное хозяйственное значение.

Диссертация соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями) в редакции от 16 октября 2024 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой

степени доктора технических наук, а ее автор, Попов Андрей Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Официальный оппонент:

Профессор кафедры автоматизации производственных процессов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»), доктор технических наук, доцент

Шифр научной специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Я, Лубенцов Валерий Федорович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Лубенцов Валерий Федорович
« 17 » 09 2025 г.

Почтовый адрес: 350020, Россия, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135, каб. 317.
Телефон: 8 (861) 255-93-92; моб. тел.: 8 (961) 444-00-61;
e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

Подпись Лубенцова Валерия Федоровича заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ФГБОУ ВО «КубГТУ», кандидат технических наук, доцент



Гончар Виктория Викторовна
« 17 » 09 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет»
Почтовый адрес: 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, каб. А-245
Телефон: +7 (861) 274-52-53, местн. 2-24
Веб-сайт: <https://kubstu.ru/> Эл. почта: rector@kubstu.ru