

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)

Актуальность темы исследований. В условиях современного технологического прогресса, индустриализации и цифровизации перед наукой и техникой стоит задача всесторонней оптимизации энергопотребления в целом, а особенно в электромеханических системах (ЭМС), играющих фундаментальную роль в промышленной и транспортной инфраструктуре. ЭМС входят в основу разнообразных устройств и технических комплексов, начиная от приводов производственных линий, робототехнических комплексов и заканчивая электротранспортом и системами генерации и распределения электроэнергии. В каждом из этих приложений эффективность управления напрямую влияет на энергопотребление и, как следствие, на эксплуатационные расходы и надежность.

Однако традиционные методы управления, основанные преимущественно на линейных моделях и классических теоретических подходах, оказываются малоэффективными при работе с современными ЭМС, обладающими сложной нелинейной динамикой, множеством состояний и параметров, а также существенным уровнем неопределенности. Сложности моделирования и управления связаны также с тем, что в реальных условиях ЭМС крайне редко поддаются линейной аппроксимации без существенной потери точности и управляемости.

В этом контексте синергетический подход выступает как мощный теоретический и методологический аппарат для построения алгоритмов управления ЭМС. Применение принципов синергетики к задачам управления подразумевает изучение не просто отдельных компонентов, а комплексного поведения системы, ее адаптивных и эволюционных процессов, позволяющих достигать устойчивости и оптимальности при наличии внешних и внутренних возмущений. Именно синергетический синтез алгоритмов управления открывает возможность систематически и методично проектировать управляющие воздействия, которые не только минимизируют потребление энергии, но и повышают надежность, устойчивость и адаптивность электромеханических комплексов. Такой синтез предполагает также глубокий анализ внутренних динамических свойств систем, выявление синергетических аттракторов, что существенно расширяет традиционный инструментарий автоматического управления. Синергетический синтез помогает создавать нелинейные алгоритмы управления, обладающие необходимой гибкостью и способностью к

самоорганизации без необходимости жесткой перенастройки программного обеспечения или аппаратных компонентов.

Таким образом, данная тема исследования полностью соответствует требованиям времени и отвечает насущным потребностям научного и технического сообщества. Она нацелена на углубленное изучение комплексного подхода к решению прикладных задач энергосбережения через применение синергетических принципов управления к ЭМС, что является не только научно значимым, но и крайне важным с практической точки зрения.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований. Научная новизна диссертационного исследования состоит в комплексной разработке новых теоретических и прикладных методов, существенно расширяющих возможности и качество управления современными ЭМС с учетом требований энергосбережения в условиях нелинейности, многоканальности объекта управления и наличии возмущающих воздействий. В рамках единой методологической концепции на базе синергетического подхода предложена универсальная методика поиска энергетических инвариантов для широкого класса ЭМС, охватывающая основные типы электродвигателей – двигатели постоянного тока, асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, синхронные двигатели с электромагнитным возбуждением и синхронные двигатели с постоянными магнитами. Эти энергетические инварианты выражают математические условия, которые в аналитическом виде задают режимы минимизации суммарных потерь энергии в процессе преобразования, учитывая нелинейную динамику и вариацию рабочих параметров. В отличие от существующих подходов, обычно ограниченных экспериментальными, эвристическими или численными методами, разработанная методика носит универсальный характер и позволяет получать строгие математические выражения для оптимальных энергетических режимов, что является важным шагом к принципиально новому уровню оптимизации и управления электромеханическими процессами.

Кроме того, новизной работы является создание обобщенной процедуры синергетического синтеза алгоритмов векторного управления для нелинейных многоканальных ЭМС. Эта процедура опирается на каскадную декомпозицию исходных высокоразмерных нелинейных динамических моделей путем введения системы инвариантных многообразий (электромагнитных, энергетических и технологических) и на решение функциональных уравнений метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов. В рамках единой процедуры предложены также прикладные методы синергетического синтеза электромеханических осцилляторов, следящих регуляторов ЭМС и адаптивного энергосберегающего управления с нелинейными наблюдателями. При этом в отличие от традиционных методов построения регуляторов и адаптивных систем здесь нет необходимости в расширении управляющих структур дополнительными компенсационными блоками, а разрабатываемые законы

управления сохраняют математическую строгость и отражают специфику физической динамики ЭМС. Кроме того, предложенная процедура исключает широко распространенную необходимость применения сложных численных процедур и итерационных оптимизаций для настройки регуляторов при изменении условий эксплуатации и параметров системы, что существенно облегчает процесс проектирования и внедрения.

Теоретическая значимость исследования заключается в формировании и развитии фундаментальных основ синергетического синтеза алгоритмов управления нелинейными ЭМС, опирающихся на новейшие концептуальные подходы современной теории автоматического управления. Работа расширяет класс решаемых задач, интегрируя методологию синергетической теории управления (СТУ). При этом разработана универсальная обобщенная процедура синергетического синтеза, базирующаяся на каскадной декомпозиции сложных динамических моделей. Важным вкладом стало введение и формализация энергетических инвариантов, которые придают новый смысл понятию оптимума с точки зрения минимизации суммарных энергопотерь, тем самым расширяя класс энергетически эффективных систем управления. Научно обоснованы методы устойчивого управления с доказанной инвариантностью к внешним возмущениям и параметрическим вариациям. Представленные в диссертации результаты обладают высокой степенью теоретической обоснованности.

Практическая значимость исследования выражается в возможности существенного повышения надежности, функциональности и энергетической эффективности широкого спектра ЭМС различного назначения. Внедрение разработанных алгоритмов энергосберегающего управления позволит существенно улучшить КПД электрических двигателей в реальных рабочих режимах с изменяющейся скоростью и нагрузкой, что подтверждается моделированием и экспериментальными исследованиями, где энергоэффективность увеличивается более чем на 10% в ключевых режимах. Кроме того, разработанные адаптивные методы обеспечивают устойчивую работу систем в условиях неопределенностей, внешних возмущений и вариации параметров, минимизируя эксплуатационные ошибки и повышая гарантию долговечности оборудования. Практическая применимость результатов подтверждается реальными внедрениями в ряде промышленных и исследовательских организаций, а также использованием в учебном процессе.

Обоснованность и достоверность защищаемых положений, полнота решения задач. Основу научного подхода составляют современные достижения теории автоматического управления, нелинейной динамики и СТУ. Попов А. Н. предлагает новый метод поиска энергетических инвариантов – математических условий, позволяющих минимизировать потери энергии в процессе электромеханического преобразования, получаемых из анализа внутренних свойств ЭМС. Данный подход отличается универсальностью и применимостью

ко всем основным типам электрических двигателей, включая двигатели постоянного тока, асинхронные и синхронные двигатели.

Разработанная обобщённая процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления основывается на концепции притягивающих инвариантных многообразий (ИМ), что обеспечивает декомпозицию сложной нелинейной системы на иерархию простых subsystem. Введение ИМ позволяет последовательно находить оптимальное управление, которое соответствует цели минимизации потерь энергии и стабильному выполнению поставленных задач управления.

Результативность предлагаемого подхода доказана путём компьютерной симуляции, показавшей значительное улучшение показателей энергоэффективности по сравнению с традиционными схемами управления. Приведённые в автореферате экспериментальные данные демонстрируют, что использование разработанных алгоритмов увеличивает КПД двигателей на величину до 10%, особенно в режимах неполной загрузки и изменяющегося момента нагрузки. Важнейшим аспектом работы является доказательство независимости КПД двигателя от величины момента сопротивления нагрузки при условии соблюдения найденных энергетических инвариантов. Это означает, что при фиксированной угловой скорости максимальная эффективность сохраняется независимо от нагрузки, что открывает широкие перспективы для практической реализации в промышленности и транспорте.

Решение задач исследования характеризуется исключительной глубиной и комплексностью, охватывая весь спектр необходимых аспектов для успешного внедрения разработанных методов. Во-первых, Попов А. Н. формирует детальную базу математических моделей основных компонентов ЭМС, учитывая физическую реальность происходящих процессов. Далее, предлагается эффективная методика поиска энергетических инвариантов, позволяющая определять условия минимальной энергопотери для широкого круга ЭМС. Особое внимание уделяется созданию прикладных методов синергетического синтеза, способных реализовать базовые режимы движения исполнительных органов, такие как стабилизация угловой скорости, позиционирование и генерация механических колебаний. Важным этапом является проектирование алгоритмов энергосберегающего управления, адаптированных к особенностям различных конструкций ЭМС. Наконец, особое внимание уделяется оценке влияния неопределённых факторов на работу замкнутых систем и разработке методов адаптивного управления, способного компенсировать влияние внешних возмущений и внутренних изменений параметров. Таким образом, диссертация охватывает всю необходимую последовательность действий, от начальной постановки задач до финальной верификации и оценки эффективности разработанных алгоритмов, обеспечивая полновесное и целостное решение заявленных исследовательских задач.

Краткая характеристика основного содержания диссертации. Во введении обоснована актуальность темы, отмечены существующие теоретические и практические противоречия, связанные с ограничениями классических методов управления, не учитывающих нелинейность и многоканальность ЭМС, а также сложность энергосберегающего синтеза алгоритмов управления. Поставлена цель исследования, обозначены основные задачи, включая анализ существующих подходов, выбор адекватных моделей, формирование энергетических инвариантов, процедуру синергетического синтеза и создание прикладных энергосберегающих и адаптивных регуляторов.

Первая глава посвящена анализу современной ситуации в области эффективного использования энергии в ЭМС и обзору существующих методов энергосбережения. ЭМС рассматривается как совокупность силовой подсистемы и информационно-управляющей подсистемы. Раскрыты закономерности потерь энергии на разных стадиях преобразования, акцентировано внимание на нелинейной функции потерь в электродвигателях и возможности их регулирования. Обзор существующих методов энергосберегающего управления поделен на две большие группы – модельно-ориентированные и поисковые, с анализом достоинств и недостатков. Подчеркнута необходимость разработки новых прикладных методов, учитывающих нелинейную динамику ЭМС, что требует отхода от классических линеаризованных подходов.

Во **второй главе** сформированы исходные научные данные для дальнейших исследований. Выбраны и подробно описаны математические модели основных компонентов силового канала ЭМС, особенно электродвигателей различных типов – от двигателей постоянного тока до асинхронных и синхронных с разными типами возбуждения. Ключевая идея – сформировать и использовать систему инвариантов трех типов: технологические (определяющие цели управления), электромагнитные (контроль магнитных характеристик) и энергетические (обеспечивающие режимы минимальных энергозатрат). Более того, разработана методика поиска энергетических инвариантов, базирующаяся на выражении суммарных потерь энергии и их локальной минимизации по оптимизируемой переменной состояния. Получен набор энергетических инвариантов для различных типов электродвигателей с подтверждением их универсальности и эффективности через анализ КПД.

Третья глава посвящена формированию прикладной теории синергетического синтеза алгоритмов векторного управления для нелинейных ЭМС. Представлено обоснование неприменимости классических методов теории автоматического управления для решения задач управления сложными многоканальными нелинейными системами. В качестве концептуальной базы берется СТУ, которая через каскадную декомпозицию системы уравнений и введение инвариантных многообразий позволяет последовательно синтезировать внутренние и внешние управляющие воздействия. Детально описана обобщенная процедура синергетического синтеза, включающая построение

расширенных моделей, разложение на уровни (двигатель–механизм, технологические задачи) и решение функциональных уравнений синтеза. На примере ЭМС с двигателем постоянного тока демонстрируются этапы построения модели, постановка задач стабилизации и компенсации возмущений, что иллюстрирует универсальность и эффективность предложенного подхода.

Четвертая глава раскрывает теоретические основы энергосберегающего управления ЭМС и разработку соответствующих прикладных методов синтеза. Основу составляет использование энергетических инвариантов в задаче построения управления, минимизирующего потери энергии. Представлены варианты одноканальной и двухканальной оптимизации с различными способами введения инвариантов. Для каждого типа электродвигателей (постоянного тока, асинхронных, синхронных) разработаны конкретные алгоритмы энергосберегающего синтеза, способные стабилизировать угловую скорость и оптимизировать электромагнитные процессы. Результаты моделирования показывают, что введённые алгоритмы обеспечивают повышение КПД, особенно при варьировании нагрузки и скорости работы, с энергетическим выигрышем до 10% по сравнению с традиционными методами.

Пятая глава посвящена развитию адаптивных методов синергетического синтеза, направленных на управление ЭМС с учётом реальных неопределённостей – изменения параметров, внешних возмущений и нестационарностей. Анализируются основные источники неопределённости, влияющие на стабильность и энергоэффективность, выделены наиболее опасные факторы – внешний момент нагрузки и изменение сопротивлений обмоток. Предложены адаптивные алгоритмы управления с нелинейными наблюдателями, обеспечивающими текущую оценку параметров и возмущений и позволяющими динамически корректировать энергетический инвариант и управляющие законы. Моделирование демонстрирует устойчивость системы и сохранение эффективности при значительных вариациях возмущений и параметров. Рассмотрены также особенности адаптации к колебательным возмущениям различного характера, что расширяет практическое применение синтезированных методов.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации и позволяет сформировать обоснованное представление по всей работе в целом, а объект, предмет исследования и содержание диссертации соответствуют пп. 1-4, 14, 15 паспорта специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Результаты диссертационного исследования могут применяться для повышения энергетической эффективности и надежности управления различными ЭМС в промышленности и транспорте. Рекомендуется использовать разработанную методику поиска энергетических инвариантов для построения оптимальных

рабочих режимов электродвигателей всех основных типов, что позволит минимизировать энергопотери при изменении нагрузки и скорости работы.

Обобщенная процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления предназначена для широкого класса нелинейных многоканальных ЭМС, поэтому она может применяться при создании универсальных, адаптивных систем управления с высокой точностью и устойчивостью без необходимости использования дополнительных компенсационных блоков и сложных процедур настройки. Такая методика позволит повысить как производительность, так и долговечность оборудования за счет адекватного учета физических процессов в реальных условиях эксплуатации.

Прикладные методы синергетического синтеза электромеханических осцилляторов и следящих регуляторов стоит использовать в технических системах, где требуется управление колебательными процессами или точное следование сложным, меняющимся со временем сигналам. Эти алгоритмы помогут создавать более эффективные системы вибрационного и позиционного управления, актуальные в машиностроении, робототехнике и автоматизации.

Разработанные методы энергосберегающего управления на основании нелинейных моделей следует интегрировать в действующие электроприводы для значительного повышения КПД, особенно в условиях переменных нагрузок и режимов работы. Это особенно целесообразно применять на промышленных объектах и в транспортном секторе для снижения эксплуатационных затрат. Адаптивные алгоритмы с нелинейными наблюдателями, способные в реальном времени оценивать и компенсировать влияние внешних возмущений и параметрических сдвигов, рекомендуется внедрять в системы управления, работающие в сложных, изменчивых условиях. Это обеспечит стабильность и высокое качество управления, минимизируя сбой и повысив общую эффективность работы ЭМС.

Апробация результатов работы. По теме диссертации опубликовано 70 печатных работ, в том числе 5 монографий; 17 статей в изданиях, включенных ВАК РФ в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, 9 публикаций в научных изданиях, входящих в международные системы индексирования научных работ Scopus и Web of Science. Результаты работы многократно обсуждались на всероссийских и международных конференциях. Таким образом, научные результаты, полученные автором, достаточно полно отражены в публикациях по теме диссертации.

При прочтении диссертации и автореферата возникли следующие **замечания и вопросы:**

1. При разработке процедур синтеза алгоритмов управления ЭМС не рассматривается вопрос ограничения на допустимые значения управляющих воздействий и переменных состояния. В реальных условиях эксплуатации такие

ограничения всегда имеются и могут существенно сужать область достижимости в пространстве состояний управляемой системы.

2. В работе рассматриваются исключительно нелинейные модели ЭМС. В этой связи всегда возникает нетривиальная задача анализа устойчивости нелинейных систем с использованием соответствующего математического аппарата, например, аппарата функций Ляпунова. В работе такой анализ не представлен.

3. В диссертации предложены оригинальные методы синтеза алгоритмов управления ЭМС для задачи генерации механических колебаний. К сожалению, за рамками рассмотрения остались вопросы, связанные с реакцией самой системы на возникновение таких режимов: допустимый диапазон изменения амплитуды и частоты генерируемых колебаний, корреляция параметров колебаний с частотными свойствами самого объекта, возможность синхронизации частот и др. Такие вопросы весьма актуальны в случаях учета деформаций элементов механической части и упругих взаимодействий между ними.

4. Не представлено сравнение предложенных алгоритмов нелинейного синергетического управления ЭМС с другими нелинейными алгоритмами управления ЭМС, полученными иными методами современной теории управления.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации Попова А. Н. и значимость полученных автором результатов.

Заключение. Представленная работа демонстрирует глубокое понимание предмета исследования и отвечает высоким стандартам качества, необходимым для защиты диссертации на соискание степени доктора наук. Основная ценность исследования заключается в том, что автор разработал оригинальные методы и алгоритмы, направленные на существенное повышение энергоэффективности ЭМС, что является крайне актуальным направлением в современном инженерном деле.

Автор представил полноценную картину решения сложных инженерных задач, подчеркнув важность учета особенностей нелинейных динамических систем и взаимодействия множества переменных, оказывающих влияние на процессы преобразования энергии. Исследуя классические подходы к управлению ЭМС, он выявил существенные недостатки традиционного подхода, связанный с отсутствием точного учета внутренней динамики и влиянием внешних возмущений. Особенно ценным является создание универсальной методики поиска энергетических инвариантов, позволяющей рассчитывать оптимальные режимы работы ЭМС с минимальными потерями энергии. Методы, предложенные автором, отличаются оригинальностью и глубокой проработкой математических оснований, что подтверждает серьезность заявленного вклада в развитие прикладной теории управления.

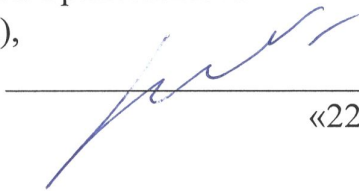
Наконец, следует особо отметить роль диссертанта в формулировании понятий и инструментов, используемых в исследовании. Его личный вклад очевиден, а многочисленные публикации, подтверждающие значимость полученных результатов, свидетельствуют о высоком уровне квалификации и глубоких профессиональных компетенциях исследователя.

Таким образом, диссертация Попова Андрея Николаевича на тему «Прикладная теория и методы синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления нелинейными электромеханическими системами» соответствует специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки) по пунктам 1-4, 14, 15 паспорта специальности, демонстрирует высокое качество проведенного исследования, наличие значимых и новаторских идей, глубокий теоретический аппарат и подтвержденную практическую пользу, содержит новые научные результаты, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие науки и практики, 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).

На включение персональных данных, содержащихся в отзыве, в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку согласен.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник лаборатории №16
«Нелинейных систем управления им. Е.С. Пятницкого»
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук (ИПУ РАН),
доктор технических наук, профессор



В.А. Уткин

«22» сентября 2025 г.

Почтовый адрес:

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, ИПУ РАН

Тел. +7 495 198-17-20, доб. 1346

Эл. почта: vicutkin@ipu.ru

Подпись



ЗАВЕРЯЮ

ВЕД. ИНЖЕНЕР

ЗАЛОЖНЕВА Л.Л.

