



**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

ул. Профессора Попова, д.5, лит Ф, Санкт-Петербург, 197022  
Телефон: (812) 234-46-51; факс: (812) 346-27-58; e-mail: [info@etu.ru](mailto:info@etu.ru); <https://etu.ru>  
ОКПО 02068539; ОГРН 1027806875381; ИНН/КПП 7813045402/781301001

10.09.2025 № 100302/15  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«**УТВЕРЖДАЮ**»  
Проректор по научной и  
инновационной деятельности  
доктор технических наук  
**А.А. Семенов**  
«10» 09 2025 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**  
**ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный**  
**электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»**  
на диссертационную работу Попова Андрея Николаевича «Прикладная  
теория и методы синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего  
управления нелинейными электромеханическими системами»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по  
научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка  
информации, статистика (технические науки)

**Актуальность темы диссертационного исследования**

Диссертационная работа Попова А.Н. посвящена разработке  
теоретических методов синтеза алгоритмов энергосберегающего управления  
электромеханическими системами (ЭМС). Подобные системы являются  
основой многих промышленных комплексов и транспортных средств,  
востребованы в самых различных технических приложениях. Кроме этого,  
ЭМС относятся к классу наиболее энергоемких технических систем,

поскольку 60-70% общего потребления электрической энергии приходится на их долю.

Современные ЭМС проектируются как системы с автоматическим управлением, а важным этапом проектирования является теоретический расчет, связанный с выбором алгоритма управления и его настройкой под решаемую технологическую задачу. Высокие требования к надежности и энергоэффективности ЭМС зачастую приводят к ситуациям, когда типовые решения не дают желаемого результата, необходим глубокий анализ протекающих физических процессов, учет различных факторов и меняющихся условий функционирования. Возникает необходимость разработки новых прикладных методов синтеза алгоритмов управления ЭМС, опирающихся на передовые направления теории автоматического управления.

Целью диссертационного исследования является повышение энергетической эффективности ЭМС за счет совершенствования процессов управления и использования новых типов алгоритмов автоматического управления. Для достижения указанной цели в диссертации разработаны теоретические методы синтеза алгоритмов управления, основанные на синергетическом подходе в теории управления профессора Колесникова А.А. Отличительной особенностью этого подхода является возможность синтеза алгоритмов управления для нелинейных, многомерных и многосвязных систем.

В этой связи, тема диссертационного исследования Попова А.Н., посвященного разработке прикладной теории и методов синергетического синтеза алгоритмов управления нелинейными ЭМС, которые обеспечивают реализацию различных задач генерации механического движения, минимизацию потерь энергии и адаптацию к изменению параметров и действию внешних возмущений, имеет несомненную актуальность.

### **Оценка содержания и завершенности диссертации**

Диссертационная работа Попова А.Н. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 249 наименований, 8 приложений и изложена на 364 страницах машинописного текста.

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы предмет, цель и основные задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, представлены результаты апробации работы.

**В первой главе** обосновывается актуальность вопросов поиска энергосберегающих решений в ЭМС. Выделена отдельная научно-техническая проблема, состоящая в разработке методов энергосберегающего управления ЭМС и проведен обзор существующих методов ее решения. Описаны основные подходы к синтезу систем автоматического управления, получившие наибольшее распространение при проектировании управляемых ЭМС. Автором делается вывод о необходимости разработки новых теоретических и методологических основ синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС, учитывающих нелинейность математического описания электромеханических процессов и взаимовлияние каналов управления.

**Вторая глава** диссертации посвящена формированию исходных данных для решения основных задач исследования: выбраны и описаны математические модели ЭМС, которые представляют собой системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений с несколькими каналами управления и сформулированы основные задачи управления ЭМС в виде системы инвариантов: технологических, электромагнитных и энергетических. Ключевое место в главе занимают вопросы определения условий минимизации потерь энергии в ЭМС и нахождения так называемых энергетических инвариантов, которые фактически являются математическими условиями минимизации суммарных потерь энергии.

Предложена методика формирования энергетических инвариантов ЭМС, на основании которой получены энергетические инварианты для основных типов электрических двигателей постоянного и переменного тока.

На основе аналитического расчета автором делается вывод, что при выполнении энергетических инвариантов КПД электродвигателя не зависит от момента сопротивления нагрузки, а, следовательно, существует возможность минимизировать энергетические потери за счет соответствующих алгоритмов управления в условиях существенной вариации механической нагрузки и заданной скорости.

**В третьей главе** сформулированы основные положения прикладной теории синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС: разработана обобщенная процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС, позволяющая применять принципы и методы синергетической теории управления для этого класса технических систем; предложены прикладные методы синергетического синтеза электромеханических осцилляторов, позволяющие формировать на основе ЭМС управляемые системы, генерирующие механические колебания исполнительного органа и прикладной метод синергетического синтеза следящих ЭМС в нелинейной постановке.

**Четвертая глава** посвящена изложению теоретических основ синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС и разработке соответствующих прикладных методов синтеза для ЭМС с различными типами электрических двигателей постоянного и переменного тока. Эти методы фактически являются инструментом поиска алгоритмов управления ЭМС, обеспечивающих стабилизацию угловой скорости и минимизацию потерь в двигателе при изменении заданной угловой скорости и момента сопротивления нагрузки.

Также в главе проведен анализ энергетической эффективности ЭМС с разработанными и традиционными алгоритмами управления. Делается вывод, что использование предложенных алгоритмов позволяет повысить КПД

двигателя в режимах его работы с варьируемой угловой скоростью и изменяемой нагрузкой. В наибольшей степени энергосберегающий эффект проявляется при недогруженном двигателе и может достигать 10%.

**В пятой главе** рассмотрены важные вопросы построения алгоритмов адаптивного управления ЭМС, обеспечивающих парирование действующих на систему внешних и параметрических возмущений и разработаны прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС. Предложенные алгоритмы адаптивного управления ЭМС осуществляют текущую оценку возмущающего момента и флуктуации активных сопротивлений обмоток, обеспечивают компенсацию их влияния на свойства замкнутой системы. Показана возможность сочетания свойств энергосбережения и адаптации в одном алгоритме управления.

**В заключении** представлены основные научные результаты диссертационной работы и отмечены направления их использования и развития в теории и практике проектирования управляемых ЭМС различного назначения.

Содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования. Диссертация представляет собой целостный научный труд, ее главы изложены на достаточно высоком научно-техническом и математическом уровне, выводы полностью отражают полученные в работе научные результаты и практические рекомендации. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, написан лаконично, техническим языком.

### **Новизна научных результатов и выводов**

В диссертационной работе Попова А.Н. получены следующие результаты, обладающие научной новизной.

1. Предложена методика поиска математических условий минимизации потерь энергии в ЭМС в условиях существенного изменения заданной угловой скорости и момента нагрузки электродвигателя. Это методика применима для всех основных типов электрических двигателей и, в

отличие от существующих частных результатов, носит универсальный характер, рассматривается именно в контексте решаемых задач синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС с использованием нелинейных моделей динамики.

2. Предложена обобщенная процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС. Отличительной особенностью этой процедуры является использование наиболее адекватных нелинейных математических моделей ЭМС с векторным принципом управления. Использование нелинейных моделей при синтезе алгоритмов управления избавляет от необходимости компенсации взаимовлияния каналов управления и естественной обратной связи по ЭДС двигателя. Такая практика введения дополнительных блоков развязки и компенсации имеет место при проектировании типовых контуров подчиненного регулирования ЭМС. Кроме того, процедура носит строгий аналитический характер, а значит делает нецелесообразным применение численных методов и итерационных способов настройки типовых регуляторов, в последнее время получивших широкое распространение.

3. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов управления ЭМС, обеспечивающих генерацию механических колебаний исполнительного органа. Для решения задачи генерации колебаний автором предложен оригинальный подход, опирающийся на общую идеологию синергетического синтеза и такие известные понятия нелинейной динамики как «автоколебательные системы» и «предельный цикл». В отличие от существующих аналогов, применение таких методов не предполагает введения в структуру ЭМС дополнительных механических преобразователей и специальных генераторов гармонического сигнала.

4. Разработан прикладной метод синергетического синтеза следящих ЭМС. Автором предложена общая идея организации процедуры синергетического синтеза следящих регуляторов, основанная на расширении пространства состояния за счет дополнительных дифференциальных

уравнений опорного сигнала. Этот результат является новым, поскольку ранее в рамках синергетической теории управления задача слежения не решалась. Основное отличие от традиционных следящих систем – возможность решения задачи синтеза в нелинейной постановке.

5. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза энергосберегающих регуляторов ЭМС. Новизна предложенных методов синтеза обусловлена использованием в процедуре синтеза исходных нелинейных моделей ЭМС и полученных условий минимизации потерь энергии (энергетических инвариантов). Рассмотрены ЭМС с наиболее распространенными двигателями постоянного и переменного тока, что позволяет сказать об универсальности предложенного подхода. Представленные в достаточном объеме результаты компьютерного моделирования и проведенный анализ энергетической эффективности подтверждают теоретические выводы и демонстрируют возможность существенного энергосбережения при использовании полученных алгоритмов управления.

6. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС, основанные на построении нелинейных наблюдателей параметров (активных сопротивлений обмоток двигателя) и возмущающего внешнего момента. Это дает возможность преодолеть известные ограничения существующих модельно-ориентированных методов энергосберегающего управления ЭМС и гарантировать максимальную энергетическую эффективность в условиях существенных неопределенностей.

### **Теоретическая значимость и практическая ценность**

Теоретическая ценность работы Попова А.Н. состоит в том, что им впервые разработаны теоретические основы синтеза алгоритмов управления ЭМС, охватывающие широкий спектр задач организации требуемого механического движения исполнительного органа, применимые для ЭМС с

различными типами электрических двигателей, обеспечивающие высокую энергетическую эффективность и адаптивность управляемых систем.

Результаты, полученные в рамках диссертационного исследования, обладают высокой практической ценностью, состоящей в возможности существенной модернизации алгоритмической базы автоматически управляемых ЭМС различного типа и назначения с целью повышения надежности, функциональности и энергетической эффективности соответствующих промышленных агрегатов, тяговых установок транспортных средств и другого оборудования с электрическими двигателями

### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов подтверждается глубоким анализом современного состояния исследований в выбранной области знаний, согласованностью теоретических положений и результатов компьютерного моделирования,

Для решения задач диссертационного исследования соискатель корректно использовал математический аппарат и методы теории автоматического управления, теории устойчивости и математического моделирования.

### **Апробация работы и публикация результатов исследования**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на различных научных мероприятиях всероссийского и международного уровня, в том числе: 5<sup>th</sup> IFAC Symposium Nonlinear Control Systems (Saint-Petersburg, Russia, 2001); Международные научно-технические конференции «Динамика технологических систем» (Ростов-на-Дону, 2001-2016); Всероссийские научные конференции «Управление и информационные технологии» (Санкт-Петербург, Пятигорск, 2004-2006); Всероссийские научные конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (2006-2024); IV Международная научно-техническая конференция

«Электроприводы переменного тока» (Екатеринбург, 2007); V Международная конференция по автоматизированному электроприводу (Санкт-Петербург, 2007); Международные конференции Chaotic Modeling and Simulation International Conference (Греция, Турция, 2008-2013), IEEE International Energy Conference «EnergyCon 2014» (Dubrovnik, Croatia, 2014); 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT-2014, Санкт-Петербург, 2014); 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON 2015, Санкт-Петербург, 2015); Международные научные конференция по проблемам управления в технических системах (Санкт-Петербург, 2017-2023); 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED 2019, МЭИ, Москва, 2019).

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 по научной специальности 2.3.1, 9 публикаций в научных изданиях, входящих в международные системы индексирования научных работ Scopus и Web of Science.

Результаты диссертационного исследования внедрены в научную и проектную деятельность ООО «Нарзан-гидроресурсы» и АО «Научно-конструкторское бюро вычислительных систем», используются в учебном ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» и ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».

### **Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы**

При ознакомлении с диссертационной работой Попова А.Н. возникли следующие вопросы и замечания.

1. Важнейшей задачей, решаемой при синтезе систем управления, особенно в нелинейной постановке, является задача оценки устойчивости замкнутой системы с разработанным алгоритмом управления. В

диссертационной работе факт устойчивости управляемых ЭМС подтверждается только результатами компьютерного моделирования. Фактически отсутствуют результаты применения известных формализованных критериев теории устойчивости.

2. В работе разработаны алгоритмы управления ЭМС, которые представляют собой нелинейные функции переменных состояния управляемой системы. Обязательным этапом программно-аппаратной реализации того или иного алгоритма управления является этап настройки этого алгоритма под конкретную ЭМС. В случае использования типовых регуляторов задача настройки алгоритма управления фактически состоит в настройке параметров этого регулятора. А как поступать в случае «нетипичного» алгоритма управления? Именно такие алгоритмы предлагаются. К сожалению, в работе нет рекомендаций по настройке разработанных алгоритмов управления под заданные требования к переходным и установившимся режимам работы управляемой системы.

3. При синтезе следящих систем управления всегда возникает вопрос, связанный с точностью воспроизведения заданного входного сигнала. В работе предложен новый метод синтеза следящих регуляторов, использующий общую идеологию синергетического синтеза систем и применимый для нелинейных объектов. Однако не приведена оценка точности слежения, выраженная в соответствующих математических оценках и формализованных критериях.

Приведенные вопросы и замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы и ее научного уровня, поскольку не влияют на основные положения, выводы и теоретические результаты.

### **Общее заключение**

Представленная диссертационная работа Попова А.Н. является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, научной новизны, теоретической значимости и практической ценности результатов исследования

Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как значительное научное достижение в области прикладной теории управления. В работе решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение – повышение энергетической эффективности электромеханических систем промышленного и транспортного назначения.

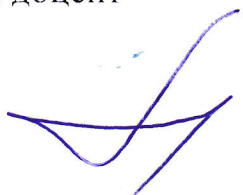
Рассматриваемая диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки) и полностью отвечает требованиям пп. 9 – 11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора 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).

Отзыв подготовлен Шестопаловым Михаилом Юрьевичем, д.т.н. (05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации), заведующим кафедрой автоматики и процессов управления ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».

Диссертация Попова А.Н. и отзыв на нее обсуждены и одобрены на заседании кафедры автоматики и процессов управления ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (протокол № 6 от 2 сентября 2025 г.).

Заведующий кафедрой автоматики и  
процессов управления  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»,  
доктор технических наук, доцент

10 сентября 2025 г.



Шестопалов Михаил Юрьевич

197022, Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф.  
Корпус 1, помещение 1204  
тел. +7 (812) 234-37-98, [myshestopalov@etu.ru](mailto:myshestopalov@etu.ru)

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Адрес: 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф

Тел. +7(812) 234-46-51

E-mail: [info@etu.ru](mailto:info@etu.ru)

Официальный сайт: <https://etu.ru/>