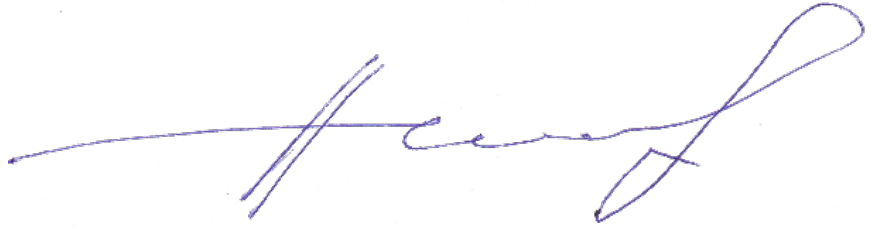


На правах рукописи



Попов Андрей Николаевич

**ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА
АЛГОРИТМОВ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ
НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление
и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Таганрог – 2025

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

| | |
|------------------------|---|
| Научный консультант: | Веселов Геннадий Евгеньевич , доктор технических наук, доцент, директор Института компьютерных технологий и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Таганрог) |
| Официальные оппоненты: | Уткин Виктор Анатольевич , доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (г. Москва) Колесникова Светлана Ивановна , доктор технических наук, доцент, профессор ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (г. Санкт-Петербург) Лубенцов Валерий Федорович , доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации производственных процессов ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (г. Краснодар) |
| Ведущая организация: | ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург) |

Защита диссертации состоится «16» октября 2025 г. в 14:00 на заседании объединенного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 99.2.107.02 на базе ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» и ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» по адресу: 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корп. «Г», ауд. Г-439.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: 344103, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж, а также на библиотечном портале ЮФУ: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1342375/>

Автореферат разослан «___» июля 2025 г.

Ученый секретарь
объединенного диссертационного
совета 99.2.107.02,
доктор технических наук, доцент



Кравченко Ю. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности. Комплексы машин, механизмов и устройств, функционирующих согласованно и осуществляющих целенаправленное преобразование электрической энергии в механическое движение, принято выделять в отдельный класс электромеханических систем (ЭМС). Такие системы являются основой большинства промышленных агрегатов, обеспечивают движение транспортных средств на электрической тяге, находят массовое применение в других сферах человеческой деятельности.

Закономерная тенденция к автоматизации основных технологических операций привела к развитию ЭМС с автоматическим управлением, в которых функции обеспечения эффективного электромеханического преобразования энергии возложены на автоматические регуляторы.

Существенный вклад в становление и развитие теории ЭМС с автоматическим управлением внесли многие отечественные и зарубежные ученые: Ринкевич С. А., Попов В. К., Голован А. Г., Морозов Д. П., Сабинин Ю. А., Андреев В. П., Чиликин М. Г., Башарин А. В., Сиротин А. А., Грабовецкий Г. В., Сандлер А. С., Ключев В. И., Ковчин С. А., Шубенко В. А., Борцов Ю. А., Соколов М. М., Ильинский Н. Ф., Слезанковский О. В., Юньков М. Г., Шрейнер Р. Т., Блашке Ф. (Blaschke F.), Хассе К. (Hasse K.), Такахаши И. (Takahashi I.), Ногучи Т. (Noguchi T.), Депендрок М. (Depenbrock M.), Боссе Б. (Bose B. K.), Леонард В. (Leonhard W.), Новотны Д. (Novotny D. W.), Липо Т. (Lipo T. A.), Вас П. (Vas P.), Краузе П. (Krause, P. C.), Мерфи Д. (Murphy, J. M. D.), Ортега Р. (Ortega R.), Болди И. (Boldea, I.) и др.

Ключевой теоретической задачей, которую необходимо решать при проектировании ЭМС с автоматическим управлением является задача синтеза алгоритмов управления. Она состоит в определении математической структуры системы автоматического управления как совокупности обратных связей, обеспечивающих желаемый режим функционирования ЭМС.

Анализ существующих подходов к проектированию современных управляемых ЭМС позволил сделать следующие выводы.

1. При синтезе алгоритмов автоматического управления ЭМС в основном используется подход, разработанный почти 70 лет назад (последовательная коррекция

и ее вариации) и имеющий строгое математическое обоснование в применении к классу линейных систем с одним каналом управления.

2. Применение методов классической теории автоматического управления (ТАУ) для синтеза алгоритмов управления ЭМС приводит к необходимости обоснования и разработки дополнительных методик, позволяющих экстраполировать линейные подходы для управления нелинейными системами. В этой связи, возникают методологические трудности с настройкой типовых регуляторов в контурах управления, в структуру системы вводятся дополнительные блоки, компенсирующие взаимовлияние каналов управления и естественные обратные связи по ЭДС вращения двигателя.

3. Отсутствие аналитических методик расчета приводит к широкому использованию поисковых численных процедур настройки контуров управления, применению методов искусственного интеллекта и других информационных технологий.

ЭМС, являющиеся самыми массовыми средствами генерации механического движения, одновременно являются и основным потребителем электроэнергии. По приближенным оценкам примерно 60-70% всей генерируемой электрической энергии преобразуется в механическое движение в ЭМС различного назначения.

Обзор существующих методов энергосберегающего управления ЭМС позволяет сделать вывод, что при проектировании систем энергосберегающего управления в основном также используется принцип подчиненного регулирования с последовательной коррекцией, который требует необходимости разработки дополнительных методик, зачастую имеющих эмпирический или эвристический характер.

Таким образом, в настоящее время имеют место противоречия в теории и практике проектирования управляемых ЭМС, суть которых состоит в следующем.

Противоречие в практике определяется снижением надежности и энергетической эффективности ЭМС, использующих традиционные принципы управления и типовые автоматические регуляторы, при расширении диапазона регулирования скорости, существенной вариации механической нагрузки, действии внешних и параметрических возмущений.

Противоречие в теории состоит в использовании принципов и методов линейной ТАУ при решении задач синтеза алгоритмов управления нелинейными ЭМС, что приводит к существенным допущениям и вызывает необходимость применения

поисковых процедур настройки типовых регуляторов. Такой подход ведет к отходу от математических принципов ТАУ в сторону комбинаторики и численных методов.

В этой связи, возникает отдельная научная проблема, связанная с разработкой теоретических основ синтеза алгоритмов управления ЭМС, которые бы были ориентированы на специфику и особенности управляемых объектов, максимально учитывали их естественную динамику и сопутствующие этой динамике физические процессы преобразования энергии.

Проблема синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС с учетом указанных выше требований может быть сформулирована следующим образом. Необходимо разработать математически обоснованные процедуры, позволяющие получать в аналитическом виде алгоритмы автоматического управления ЭМС, обладающие следующими основными свойствами:

- использование математических моделей ЭМС, которые относятся к классу нелинейных и многосвязных динамических систем;
- реализация режимов с минимальным уровнем потерь энергии при решении заданной технологической задачи управления движением исполнительного органа;
- компенсация действия внешних неконтролируемых возмущений и флуктуации параметров при решении задач минимизации энергетических потерь.

Объект исследования – электромеханические системы различного типа и назначения.

Целью исследования является повышение энергетической эффективности ЭМС за счет совершенствования процессов управления и использования новых типов алгоритмов автоматического управления.

Предмет исследования – прикладные методы синтеза алгоритмов автоматического управления нелинейными ЭМС различного типа и назначения.

Научная задача диссертационного исследования состоит в разработке прикладной теории и методов синергетического синтеза алгоритмов управления нелинейными ЭМС, обеспечивающих реализацию различных задач механического движения, минимизацию потерь энергии и адаптацию к изменению параметров и действию внешних возмущений.

Для решения общей научной задачи в работе поставлены и решаются следующие частные задачи исследования:

1. Анализ существующих подходов к энергосбережению в процессах электромеханического преобразования энергии и методов синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС.

2. Обоснование и выбор математических моделей ЭМС различного типа, адекватно описывающих динамику протекающих физических процессов.

3. Разработка методики поиска энергетических инвариантов ЭМС, представляющих собой математические условия, записанные относительно переменных состояния выбранных математических моделей и соответствующие режиму минимальных суммарных потерь энергии в процессе ее электромеханического преобразования.

4. Формирование набора энергетических инвариантов ЭМС с различными типами электродвигателей.

5. Разработка обобщенной процедуры синергетического синтеза алгоритмов векторного управления ЭМС, являющейся универсальным инструментом применения принципов и методов синергетической теории управления (СТУ) для решения задач управления ЭМС различного типа и назначения.

6. Разработка прикладных методов синергетического синтеза алгоритмов векторного управления ЭМС, обеспечивающих реализацию типовых режимов движения исполнительного органа: стабилизация угловой скорости, позиционирование, генерация незатухающих колебаний и слежение.

7. Разработка прикладных методов синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС с различными типами электрических двигателей.

8. Проведение сравнительного анализа энергетической эффективности ЭМС с разработанными энергосберегающими и традиционными алгоритмами управления.

9. Анализ основных неопределенностей математических моделей ЭМС и оценка их влияния на свойства замкнутых систем с разработанными алгоритмами управления.

10. Разработка прикладных методов синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС с различными типами электрических двигателей,

осуществляющих текущую оценку внешних и параметрических возмущений и обеспечивающих их парирование.

11. Моделирование и исследование ЭМС с разработанными алгоритмами управления.

Научная новизна представленных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Предложена методика поиска энергетических инвариантов ЭМС, позволяющая в аналитической форме получать условия минимизации потерь энергии в процессе ее электромеханического преобразования при вариации угловой скорости и момента нагрузки электродвигателя. В отличие от существующих подходов данная методика носит универсальный характер и применима для всех основных типов электрических двигателей (п. 3 паспорта специальности 2.3.1.).

2. Предложена обобщенная процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС, применение которой, в отличие от существующих подходов к синтезу автоматических регуляторов ЭМС, предполагает использование наиболее адекватных нелинейных математических моделей ЭМС, и, следовательно, исключает необходимость введения в структуру системы дополнительных блоков, компенсирующих взаимовлияние каналов управления и естественную обратную связь по ЭДС двигателя, а также делает нецелесообразным использование распространенной в настоящее время практики применения численных методов и итерационных способов настройки типовых регуляторов при изменении режима функционирования ЭМС (п. 9 паспорта специальности 2.3.1.).

3. Разработан прикладной метод синергетического синтеза электромеханических осцилляторов, который позволяет получать алгоритмы управления ЭМС, обеспечивающие формирование в пространстве состояний управляемой системы аттрактора типа «предельный цикл», что гарантирует асимптотическую устойчивость режимов незатухающих механических колебаний исполнительного органа и, в отличие от существующих аналогов, не требует введения в структуру системы дополнительных механических преобразователей и специальных генераторов гармонического сигнала. (п. 4 паспорта специальности 2.3.1.).

4. Разработан прикладной метод синергетического синтеза следящих ЭМС, который в отличие от существующих подходов к синтезу следящих ЭМС, позволяет решить задачу в нелинейной постановке, а синтезированный алгоритм управления гарантирует отслеживание любого непрерывного по времени сигнала, темпы изменения которого во времени сопоставимы с собственной динамикой ЭМС и находятся в рамках существующих физических ограничений (п. 4 паспорта специальности 2.3.1.).

5. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза энергосберегающих регуляторов ЭМС, которые, в отличие от существующих методов модельно-ориентированного энергосберегающего управления ЭМС, позволяют получать алгоритмы энергосберегающего управления на основе нелинейных математических моделей ЭМС, не предполагают проведения дополнительных поисковых процедур по настройке типовых регуляторов при изменении условий эксплуатации, а синтезируемые с помощью этих методов алгоритмы управления обеспечивают существенный энергетический выигрыш по сравнению с традиционной схемой управления, который выражается в увеличении КПД двигателя при изменении угловой скорости и механической нагрузки (п. 9 паспорта специальности 2.3.1.).

6. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС, которые, в отличие от традиционных подходов, используют нелинейные математические модели ЭМС и позволяют получать алгоритмы адаптивного управления с нелинейными наблюдателями, производящими текущую оценку как изменяющихся во времени параметров ЭМС, так и действующих со стороны технологического процесса возмущений. Это дает возможность преодолеть ограничения существующих модельно-ориентированных методов энергосберегающего управления ЭМС, корректировать энергетический инвариант и соответствующую ему точку оптимума энергетических потерь, а, следовательно, расширять область устойчивости замкнутой системы и гарантировать максимальную энергетическую эффективность управляемых электромеханических процессов в условиях существенных неопределенностей (п. 9 паспорта специальности 2.3.1.).

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в формировании теоретических основ синергетического синтеза алгоритмов управления нелинейными ЭМС и разработке новых прикладных методов синтеза алгоритмов

энергосберегающего и адаптивного управления ЭМС различного типа и назначения. Полученные теоретические результаты, опирающиеся на передовые концептуальные подходы современной ТАУ, могут послужить основой для разработки принципиально новых алгоритмов автоматического управления ЭМС, учитывающих существенную нелинейность математических моделей и взаимовлияние каналов управления, обеспечивающих оптимизацию процессов электромеханического преобразования энергии и обладающих свойством инвариантности к действию внешних и параметрических возмущений.

Практическая значимость работы определяется возможностью существенной модернизации алгоритмической базы систем автоматического управления для 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.

Методология и методы диссертационного исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории автоматического управления, методы теории устойчивости, методы теории дифференциальных уравнений, методы оптимизации, методы нелинейной динамики, методы синергетической теории управления, методы математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. **Методика поиска энергетических инвариантов ЭМС** позволяет в аналитической форме получать условия минимизации потерь электрической энергии в силовых каналах ЭМС в заданных режимах эксплуатации (п. 3 паспорта специальности 2.3.1.).

2. **Обобщенная процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС** является универсальной стратегией применения принципов и методов СТУ при решении всего спектра задач управления ЭМС и позволяет в строгой математической форме получать алгоритмы автоматического управления нелинейными ЭМС различного типа и назначения (п. 9 паспорта специальности 2.3.1.).

3. Прикладной метод синергетического синтеза электромеханических осцилляторов позволяет создавать на основе ЭМС управляемые системы, генерирующие устойчивые механические колебания заданной амплитуды и частоты (п. 4 паспорта специальности 2.3.1.).

4. Прикладной метод синергетического синтеза следящих ЭМС позволяет получать алгоритмы замкнутого управления нелинейными ЭМС для задачи изменения углового положения исполнительного органа в соответствии с входным сигналом, который является априори неизвестной функцией времени (п. 4 паспорта специальности 2.3.1.).

5. Прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС позволяют получать алгоритмы замкнутого управления, обеспечивающие минимизацию потерь энергии в двигателе при существенной вариации угловой скорости и механической нагрузки (п. 9 паспорта специальности 2.3.1.).

6. Прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС позволяют получать алгоритмы автоматического управления, обеспечивающие реализацию основных задач управления в условиях действия внешних и параметрических возмущений, гарантируя асимптотическую устойчивость управляемой системы (п. 9 паспорта специальности 2.3.1.).

Достоверность и обоснованность полученных теоретических и практических результатов вытекает из корректного использования математических методов ТАУ, методов теории устойчивости, подтверждается результатами компьютерного моделирования.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования имеют следующее внедрение:

- научная и проектная деятельность ООО «Нарзан-гидроресурсы»;
- научная и проектная деятельность АО «Научно-конструкторское бюро вычислительных систем»;
- учебный процесс кафедры синергетики и процессов управления имени профессора Колесникова А. А. ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» при подготовке бакалавров и магистров направления подготовки «Системный анализ и

управление», аспирантов по научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика;

– учебный процесс кафедры систем управления и информационных технологий Пятигорского института (филиала) ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» при подготовке бакалавров направления подготовки «Управление техническими системами» и магистров направления «Информационные системы и технологии».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: First International Conference «Control and self-organization in Nonlinear Systems» (Bialystok, Poland, 2000); 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, (Savannah, Georgia, USA, 2001); 5th IFAC Symposium Nonlinear Control Systems (Saint-Petersburg, Russia, 2001); Международные научно-технические конференции «Динамика технологических систем» (Ростов-на-Дону, 2001-2016); VII International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (Vrnjачka Banja, Югославия, 2001); VII Международный семинар «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (ИПУ РАН, Москва, 2002); Всероссийских научных конференциях «Управление и информационные технологии» (Санкт-Петербург, Пятигорск, 2004-2006); Всероссийских научных конференциях «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).

Публикации. 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.

Личное участие соискателя в получении результатов. Все изложенные в работе результаты получены автором лично.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 249 наименований, 8 приложений и изложена на 364 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, определены цель, объект и предмет исследования, сформулированы теоретическая и практическая значимость работы, указаны методы исследования, описаны положения, выносимые на защиту, и их научная новизна.

В первой главе рассмотрены вопросы эффективного использования энергии в ЭМС, отмечены существующие подходы к решению задач энергосбережения в ЭМС и сформулирована основная научная проблема диссертационного исследования.

Современную ЭМС можно представить как совокупность двух взаимодействующих подсистем – силовой и информационно-управляющей (рисунок 1).

К силовой подсистеме относятся все устройства, которые отвечают за уровневую и видовую трансформацию энергии: электрические двигатели (ЭД), преобразователи электрической энергии (ПЭЭ) и механические преобразователи (МП). Электрическая энергия, поступающая в систему, проходит три стадии преобразования и в конечном счете превращается в требуемое механическое движение исполнительного органа (ИО), посредством которых система воздействует на обслуживаемый технологический процесс. При этом часть энергии неизбежно рассеивается и полезно не используется.

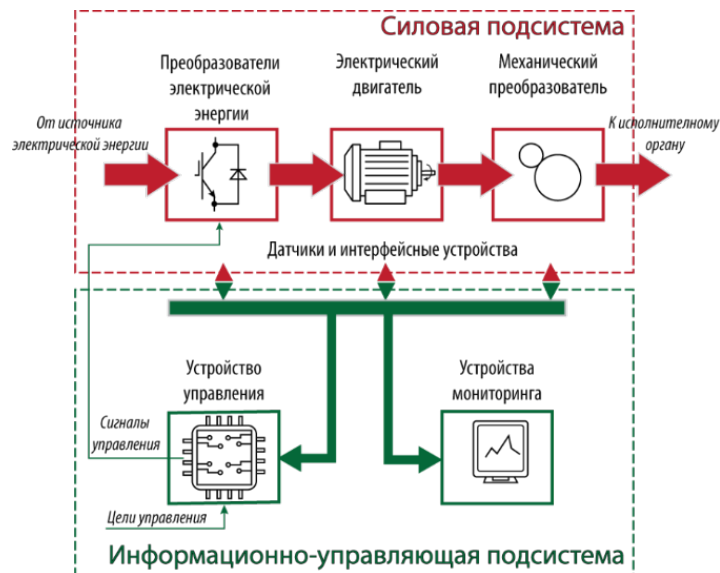


Рисунок 1 – Обобщенная структура ЭМС.

Уровень потерь энергии в ПЭЭ и МП определяется в первую очередь их конструктивными особенностями. Потери энергии в ЭД являются нелинейной функцией электромагнитных переменных, при этом существует возможность целенаправленно изменять значения этих переменных а, следовательно, влиять на уровень потерь.

Можно выделить следующие характерные подходы к энергосбережению, нашедшие свое применение в практике проектирования и эксплуатации ЭМС:

- совершенствование конструкции преобразователей энергии;
- рациональная организация работы ЭМС в составе конкретной промышленной или транспортной установки;
- разработка алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС.

Методы энергосберегающего управления ЭМС в зарубежной литературе называют онлайн методами управления с минимизацией потерь энергии – Loss Minimization Techniques (LMT) или Loss Minimization Control (LMC). Суть этих методов заключается в использовании сигналов обратной связи и информации о параметрах силовых элементов для корректировки или формирования управляющих воздействий на ЭМС с целью минимизации потерь энергии в процессе ее эксплуатации.

В главе сделан обзор существующих методов энергосберегающего управления ЭМС. Отмечено, что все эти методы условно делятся на два основных класса: методы модельно-ориентированного управления (model-based control) и поисковые методы

(search control). Рассмотрены особенности этих методов, их достоинства и недостатки.

В общем случае задача синтеза алгоритмов управления может быть сформулирована следующим образом. Пусть динамика объекта управления описывается следующей математической моделью в переменных состояния:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{m}),$$

где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор состояния, $\dot{\mathbf{x}} = (\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n)$ – вектор производных переменных состояния по времени, $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_m)$ – вектор управляющих воздействий, $\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_l)$ – вектор возмущающих воздействий.

Требуется определить вектор управления как функцию координат состояния $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x})$, обеспечивающий перевод системы из начального состояния $\mathbf{x}^0 = \mathbf{x}(t_0)$ в момент времени t_0 в желаемое состояние $\mathbf{x}^*(t)$, определяемое целями управления.

Отдельное внимание в главе уделено подходам к синтезу алгоритмов управления ЭМС, нашедших наибольшее применение. Проведенный анализ показал, что в современных системах управления ЭД постоянного и переменного тока в основном используется принцип подчиненного регулирования с последовательной коррекцией. В главе рассмотрены аспекты построения систем подчиненного регулирования для двигателей постоянного и переменного тока, отмечаются нюансы процедуры синтеза и возникающие при этом методологические трудности.

Сделан вывод, что системы подчиненного регулирования с типовыми регуляторами снижают свою надежность и энергетическую эффективность при расширении диапазона регулирования скорости, существенной вариации механической нагрузки, действии внешних и параметрических возмущений. Это связано с тем, что при настройке контуров не учитывается реальная динамика ЭМС, которая является существенно нелинейной и многосвязной динамической системой. Поэтому для решения задач синтеза эффективных алгоритмов управления ЭМС необходимо переходить на другие концептуальные основы и разрабатывать новые прикладные методы синтеза, лишенные указанных недостатков.

Проблема синтеза алгоритмов энергосберегающего управления нелинейными ЭМС, которая является ключевой в данной работе, может быть сформулирована

следующим образом. Необходимо разработать математически обоснованные процедуры, позволяющие получать в аналитическом виде алгоритмы автоматического управления ЭМС, которые бы соответствовали следующим ключевым требованиям:

- использовали нелинейные математические модели ЭМС;
- использовали векторный принцип управления;
- предполагали применение для ЭМС с разными типами ЭД и МП;
- предусматривали реализацию режимов с минимальным уровнем потерь энергии в ЭД при решении задачи управления движением ИО;
- предусматривали компенсацию действия внешних неконтролируемых возмущений и флуктуации параметров.

Вторая глава посвящена формированию исходных данных для решения основных задач диссертационного исследования.

Выбраны и описаны математические модели основных элементов силового канала ЭМС. Основное внимание было уделено математическим моделям ЭД, осуществляющих основную функцию рассматриваемых систем – целенаправленное электромеханическое преобразование энергии. При этом рассматривались исходные модели, полученные на основе известных подходов электромеханики, без дополнительных способов их упрощения и других аппроксимаций.

Сформулированы основные задачи управления ЭМС в виде системы инвариантов: технологических, электромагнитных и энергетических. Представлены типовые *технологические инварианты*, указывающие на конкретную задачу управления механическим движением ИО ЭМС. Описаны характерные *электромагнитные инварианты* ЭМС, которые отражают идею стабилизации магнитного состояния ЭД, основанную на анализе статических характеристик и нагрузочной способности ЭД при варьировании электрических и магнитных переменных.

Предложена методика формирования *энергетических инвариантов* ЭМС, которые представляют собой математические условия, записанные относительно переменных состояния выбранных математических моделей, и соответствующие режиму минимальных суммарных потерь энергии. Данная методика применяется к выбранной математической модели ЭД и использует априорные знания о природе физических процессов, имеющих место при электромеханическом преобразовании энергии.

На основе этих знаний записывается функция суммарных потерь мощности $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma}(\mathbf{x})$ как функция переменных состояния модели. Для упрощения процедуры поиска локального минимума функции $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma}(\mathbf{x})$ предложено представлять мощность суммарных потерь в виде функции одной из переменных состояния $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma}(x_{\text{опт}})$. Эта переменная в дальнейшем называется оптимизируемой, а поиск локального минимума этой функции дает выражение для оптимального в смысле минимума потерь энергии значения этой переменной, то есть искомый энергетический инвариант.

Использование этой методики позволило получить набор энергетических инвариантов для основных типов ЭД, представленный в Таблице 1.

Значения коэффициентов $k_i, i = 1, \dots, 15$ зависят от номинальных данных двигателя и параметров его электромагнитных цепей; M_c – момент сопротивления нагрузки на валу ЭД; L_{12} – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; c – конструктивная постоянная; p – число пар полюсов ЭД; β – коэффициент, зависящий от марки стали.

Анализ стационарных режимом позволил оценить эффективность процессов электромеханического преобразования энергии в ЭД при выполнении энергетических инвариантов. Показано, что практически во всех случаях КПД двигателя не зависит от момента сопротивления нагрузки и остается постоянным при заданной угловой скорости.

На рисунках 2 и 3 представлены графики зависимости КПД АД типа 4А200L4 от скорости и момента нагрузки при оптимальном и номинальном значениях модуля вектора потокосцепления ротора.

Рассматривая результаты применения предложенной методики формирования энергетических инвариантов ЭМС, можно отметить, что несмотря на существующие различия в конструкции, принципе действия и математических моделях основных типов ЭД, обнаруживается структурное подобие полученных математических выражений. Вывод КПД различных двигателей при поддержании энергетических инвариантов, проводимый на основе аналитических выкладок, приводит к единому результату и позволяет сделать вывод, что КПД большинства ЭД постоянного и переменного

тока не зависит от момента сопротивления нагрузки. Следовательно, при фиксированной угловой скорости КПД будет максимальным во всем допустимом диапазоне механической нагрузки.

Таблица 1.

| Тип ЭД | Переменные модели | Энергетический инвариант |
|---|--|--|
| Двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ) | ω – угловая скорость | $\Phi_{\text{опт}} = M_c^{0,5} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^\beta} \right)^{0,25}$ |
| | $i_{\text{я}}$ – ток в обмотке якоря Φ – магнитный поток одного полюса | $i_{\text{яопт}} = \frac{M_c^{0,5}}{c} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^\beta} \right)^{-0,25}$ |
| Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД) | ω – угловая скорость | $\psi_{r \text{ опт}} = M_c^{0,5} \left(\frac{k_4}{k_5 + k_6 \omega^\beta} \right)^{0,25}$ |
| | i_{1x}, i_{1y} – проекция вектора тока в обмотке статора | $i_{1x \text{ опт}} = \frac{1}{L_{12}} M_c^{0,5} \left(\frac{k_4}{k_5 + k_6 \omega^\beta} \right)^{0,25}$ |
| | ψ_r – модуль вектора потокосцепления обмотки ротора | $i_{1y \text{ опт}} = \frac{2L_2}{3pL_{12}} M_c^{0,5} \left(\frac{k_4}{k_5 + k_6 \omega^\beta} \right)^{-0,25}$ |
| Синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением (СД) | ω – угловая скорость | $i_{2 \text{ опт}} = M_c^{0,5} \left(\frac{k_7}{k_8 + k_9 \omega^\beta} \right)^{0,25}$ |
| | i_{1d}, i_{1q} – проекция вектора тока в обмотке статора | $i_{1q \text{ опт}} = \frac{2M_c^{0,5}}{3pL_{12}} \left(\frac{k_7}{k_8 + k_9 \omega^\beta} \right)^{-0,25}$ |
| | i_2 – ток в обмотке ротора | $i_{1d \text{ опт}} = -\frac{k_{10} \omega^\beta}{k_{11} + k_{12} \omega^\beta}$ |
| Синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) | ω – угловая скорость ротора i_{1d}, i_{1q} – проекция вектора тока в обмотке статора | $i_{1d \text{ опт}} = -\frac{k_{13} \omega^\beta}{k_{14} \omega^\beta + k_{15}}$ |

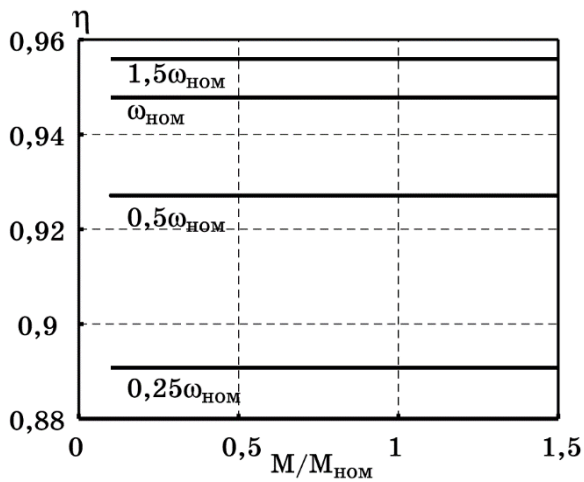


Рисунок 2 – КПД АД ($\psi_r = \psi_{r_{\text{опт}}}$)

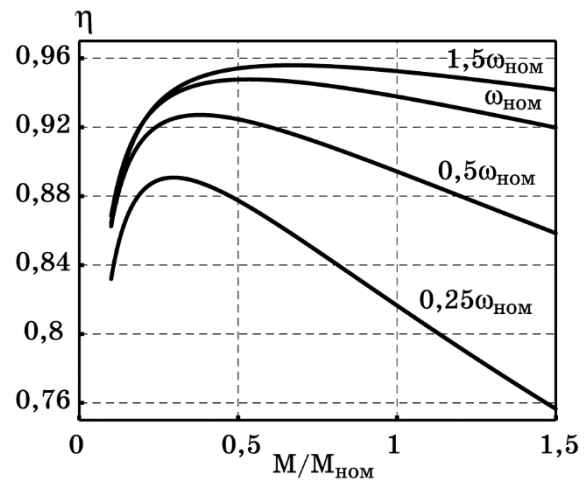


Рисунок 3 – КПД АД ($\psi_r = \psi_{r_{\text{НОМ}}}$)

В третьей главе сформулированы основные положения прикладной теории синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС.

Анализ математических моделей ЭМС позволяет сделать вывод, что ЭМС относятся к классу нелинейных динамических систем с несколькими каналами управления. Полученные энергетические инварианты представляют собой нелинейные функции, связывающие электромагнитные и механические переменные. В этой связи, использование методов классической ТАУ и типовых автоматических регуляторов для решаемой в работе проблемы синтеза алгоритмов энергосберегающего управления нелинейными ЭМС не представляется возможным.

В качестве концептуальной основы для синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС в работе используется СТУ, предложенная профессором А.А. Колесниковым. В главе кратко изложены основные принципы и особенности синергетического подхода в теории управления; описана методология синергетического синтеза, созданы необходимые теоретические и терминологические заделы для проведения дальнейших исследований.

Структурное подобие математических моделей ЭМС и типовые инварианты позволили разработать *обобщенную процедуру синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС*, которая может служить основой для синергетического синтеза алгоритмов управления для ЭМС конкретного типа и различного назначения.

Обобщенная процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС представляет собой ряд последовательных этапов, во время которых осуществляется каскадная декомпозиция системы дифференциальных уравнений исходной математической модели. Такая декомпозиция происходит в результате введения на каждом этапе параллельно-последовательной совокупности притягивающих инвариантных многообразий (ИМ) («внешних» и «внутренних») и нахождения вектора управления («внешнего» или «внутреннего») как решения основных функциональных уравнений метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). На определенных этапах процедуры явным образом задаются инварианты системы: электромагнитные, энергетические и технологические.

Структура силовой подсистемы ЭМС и специфика ее математического описания определяют следующие этапы обобщенной процедуры.

Этап 0. Построение модели синтеза. Этот этап включается в процедуру при необходимости компенсации внешних и параметрических возмущений, построения наблюдателей переменных, а также в случае изменяющихся во времени задающих воздействий.

Модель получается из исходной модели ЭМС путем замены параметров, ненаблюдаемых переменных, возмущающих и задающих воздействий переменными информационной модели z_i и добавлением дифференциальных уравнений, описывающих предполагаемую динамику этих переменных:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}); \\ \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{z}).\end{aligned}$$

Этап 1. Декомпозиция до уровня «ЭД – МП» Этот этап включается в процедуру синтеза в тех случаях, когда необходимо учитывать динамику ПЭЭ. Тогда соответствующие дифференциальные уравнения математической модели ЭМС устанавливают связь между управляющими сигналами ПЭЭ, напряжением источника, напряжениями и токами в обмотках ЭД.

Согласно стандартной процедуре метода АКАР вводится параллельная совокупность ИМ. Это – «внешние» многообразия. Все остальные многообразия, вводимые на последующих этапах – «внутренние», они геометрически принадлежат «внешним» многообразиям.

Управляющими переменными модели являются напряжения на обмотках двигателя или их проекции на оси выбранной координатной системы (для ЭД переменного тока). В большинстве случаев в процедуре метода АКАР используются основные функциональные уравнения первого порядка вида $T_s \dot{\psi}_s + \psi_s = 0$. Тогда «внешние» многообразия всегда должны содержать управляющие переменные. Например, для ЭМС с ДПТ совокупность «внешних» многообразий задается в виде:

$$\begin{aligned}\psi_1^{(I)} &= u_{я} - \varphi_1^{(I)} = 0; \\ \psi_2^{(I)} &= u_{\epsilon} - \varphi_2^{(I)} = 0,\end{aligned}$$

где $u_{я}$ и u_{ϵ} – напряжения на обмотках якоря и возбуждения. Верхний индекс в виде римской цифры в скобках указывает на номер этапа обобщенной процедуры

Функции $\varphi_1^{(I)}$ и $\varphi_2^{(I)}$ пока неизвестны и будут определяться на следующих этапах процедуры. В модели декомпозированной системы, описывающей динамику на пересечении «внешних» ИМ, эти функции рассматриваются как «внутренние» управления.

Этап II. Декомпозиция до уровня МП. Декомпозированная система представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающую динамику подсистемы «ЭД-МП». В этих уравнениях вместо напряжений на обмотках ЭД или их проекций присутствуют «внутренние» управления $\varphi_i^{(I)}$, которые определяют динамику электромагнитных переменных: токов или их проекций, потока или потокосцепления. Эти переменные на данном этапе процедуры становятся управляющими переменными. Далее вводятся ИМ, содержащие управляющие переменные декомпозированной системы этого этапа. На этапе II в виде ИМ вводятся энергетические и электромагнитные инварианты.

Итогом данного этапа является декомпозиция системы до уравнений механического движения вала ЭД и связанного с ним МП. В этой системе обычно остается одно «внутреннее» управление $\varphi_1^{(II)}$.

Этап III. Декомпозиция до уровня технологической задачи. Синтез «внутреннего» управления $\varphi_1^{(III)}$ производится на основании требований к желаемому режиму движения ИО ЭМС. То есть формируется ИМ, соответствующее технологическому инварианту системы.

Если МП можно рассматривать как жесткий механизм, то динамика углового положения и угловой скорости ИО описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega; \\ \dot{\omega} &= (k\varphi_1^{(III)} - M_c) / J,\end{aligned}$$

где θ, ω – угловые положение и скорость ИО; J – момент инерции.

В этом случае для реализации задачи стабилизации угловой скорости в значении ω^* на этом этапе вводится ИМ в виде соответствующего технологического инварианта:

$$\psi_1^{(III)} = \omega - \omega^* = 0. \quad (1)$$

Если необходимо позиционировать вал ИО в заданное угловое положение θ^* , то можно сформировать финишное ИМ как

$$\psi_1^{(III)} = \omega - \beta(\theta - \theta^*) = 0. \quad (2)$$

Этап IV. Поиск «внутренних» и «внешних» управлений. На заключительном этапе процедуры осуществляется поиск управляющих воздействий для каждой декомпозированной системы, начиная с последней. Этот поиск состоит в решении основных функциональных уравнений метода АКАР в силу уравнений декомпозированной системы этого этапа.

В главе продемонстрировано применение разработанной обобщенной процедуры на конкретном примере, позволяющем представить все ее этапы. Рассматривается ЭМС постоянного тока в составе двух управляемых выпрямителей, ДПТ и МП в виде 2-хмассовой механической системы. Функциональная схема этой ЭМС представлена на рисунке 2.

Решается задача синергетического синтеза алгоритма управления, обеспечивающего стабилизацию угловой скорости ИО в заданном значении (технологический инвариант), стабилизацию магнитного потока двигателя в номинальном значении (электромагнитный инвариант) и компенсацию действия неизвестного кусочно-постоянного возмущения.

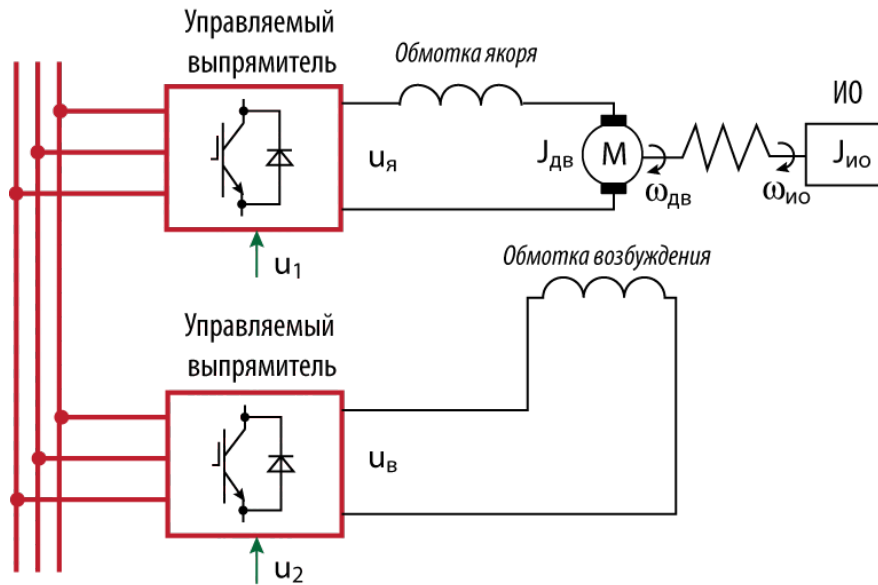


Рисунок 2 – Функциональная схема ЭМС постоянного тока

Математическая модель рассматриваемой ЭМС формируется путем объединения моделей ПЭЭ, ЭД и МП. Для обеспечения инвариантности к действию кусочно-постоянного возмущения к модели добавляется интеграл по ошибке скорости.

Полученная модель синтеза имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2; \\
 \dot{x}_2 &= (a_1(x_1 - x_3) + a_2(x_2 - x_4) - M_c + z_1)a_3; \\
 \dot{x}_3 &= x_4; \\
 \dot{x}_4 &= (a_5x_5x_6 - a_1(x_1 - x_3) - a_2(x_2 - x_4))a_4; \\
 \dot{x}_5 &= (x_7 - a_5x_4x_6 - a_6x_5)a_7; \\
 \dot{x}_6 &= (x_8 - a_8x_6)a_9; \\
 \dot{x}_7 &= (a_{10}u_1 - x_7)a_{11}; \\
 \dot{x}_8 &= (a_{10}u_2 - x_8)a_{12}; \\
 \dot{z}_1 &= k_1(x_2 - x_2^*).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь: $x_1 = \theta_{ио}$, $x_3 = \theta_{дв}$, $x_2 = \omega_{ио}$, $x_4 = \omega_{дв}$ – угловые положения и скорости двигателя и ИО; $x_5 = i_я$, $x_7 = u_я$ – ток и напряжение обмотки якоря; $x_6 = \Phi$, $x_8 = u_в$ – магнитный поток и напряжение обмотки возбуждения; u_1 и u_2 – управляющие напряжения преобразователей; параметры a_i вычисляются на основе параметров элементов силового канала ЭМС. Из последнего уравнения (3) следует, что z_1 представляет собой интеграл отклонения угловой скорости ИО x_2 от ее заданного значения x_2^* .

В Таблице 2 отражены основные этапы процедуры синергетического синтеза, характеризующиеся введением ИМ и каскадной декомпозицией исходной системы.

Таблица 2.

| Этап | Инвариантные многообразия | Декомпозированная система |
|------|---|---|
| I | $\psi_1^{(I)} = x_7 - \varphi_1^{(I)} = 0;$ $\psi_2^{(I)} = x_8 - \varphi_2^{(I)} = 0.$ | $\dot{x}_1 = x_2;$ $\dot{x}_2 = (a_1(x_1 - x_3) + a_2(x_2 - x_4) - M_c + z_1)a_3;$ $\dot{x}_3 = x_4;$ $\dot{x}_4 = (a_5x_5x_6 - a_1(x_1 - x_3) - a_2(x_2 - x_4))a_4;$ $\dot{x}_5 = (\varphi_1^{(I)} - a_5x_4x_6 - a_6x_5)a_7;$ $\dot{x}_6 = (\varphi_2^{(I)} - a_8x_6)a_9;$ $\dot{z}_1 = k_1(x_2 - x_2^*).$ |
| II | $\psi_1^{(II)} = x_5 - \varphi_1^{(II)} = 0;$ $\psi_2^{(II)} = x_6 - x_6^* = 0.$ | $\dot{x}_1 = x_2;$ $\dot{x}_2 = (a_1(x_1 - x_3) + a_2(x_2 - x_4) - M_c + z_1)a_3;$ $\dot{x}_3 = x_4;$ $\dot{x}_4 = (a_5\varphi_1^{(II)}x_6^* - a_1(x_1 - x_3) - a_2(x_2 - x_4))a_4;$ $\dot{z}_1 = k_1(x_2 - x_2^*).$ |
| III | $\psi_1^{(III)} = \begin{pmatrix} a_1(x_1 - x_3) + \\ +a_2(x_2 - x_4) - \\ -M_c + z_1 \end{pmatrix} a_3 - \beta(x_2 - x_2^*) = 0$ | $\dot{x}_2 = \beta(x_2 - x_2^*)$ |

На рисунках 3 – 6 представлены результаты моделирования системы (3) с синтезированным алгоритмом управления. Как видно из представленных графиков, замкнутая система обладает свойством асимптотической устойчивости относительно требуемого состояния, заданные инварианты выполняются, внешний возмущающий момент парируется.

Помимо движения ИО с заданной скоростью или его перемещения в заданное положение, ЭМС используются для обеспечения генерации стационарных режимов, отличных от равновесного. Существует целый ряд технических задач, требующих организации периодического изменения положения ИО во времени: грохота, абсорбирующие агрегаты, вибромеханические установки и др.

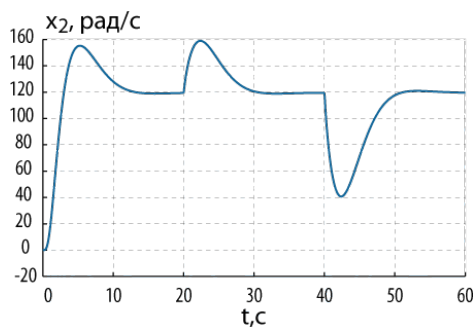


Рисунок 3 – Угловая скорость ИО

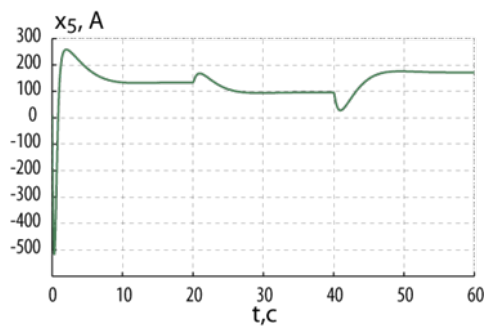


Рисунок 4 – Ток якоря ЭД

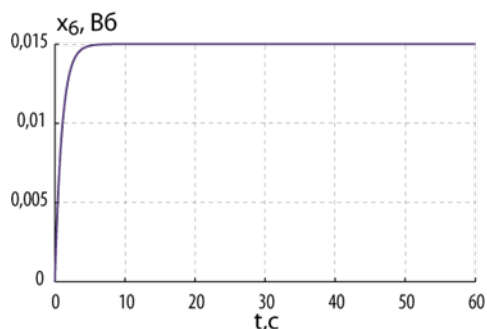


Рисунок 5 – Магнитный поток

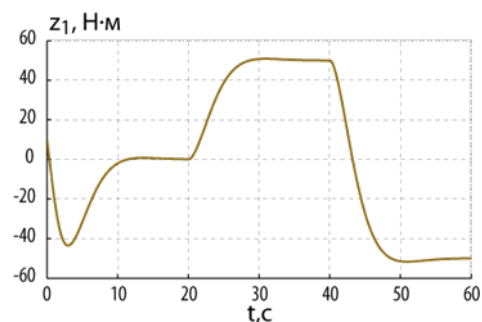


Рисунок 6 – Оценка возмущающего момента

В диссертации предложены прикладные методы синергетического синтеза электромеханических осцилляторов, позволяющие формировать на основе ЭМС управляемые системы, генерирующие механические колебания ИО. При этом генерация колебаний не требует включения в состав системы специальных МП, а достигается за счет соответствующих алгоритмов управления ЭД.

Данные методы основаны на идее направленной трансформации пространства состояния ЭМС посредством управляющих воздействий с целью формирования в нем аттракторов типа «предельный цикл». Такая трансформация становится возможной при использовании в процедуре синергетического синтеза эталонных осцилляторов – математических моделей известных автоколебательных систем. Предложены два варианта реализации этой идеи в процедуре синергетического синтеза алгоритмов управления ЭМС, которые легли в основу соответствующих прикладных методов.

Первый метод предполагает использование эталонных осцилляторов на заключительном этапе декомпозиции исходной математической модели. На рисунках 7 – 9 представлены результаты компьютерного моделирования электромеханического осциллятора на базе СДПМ, использующего эталонный осциллятор Рэля

$\ddot{x} - \mu_1(1 - \dot{x}^2)\dot{x} + \mu_2x = 0$. В ходе моделирования путем варьирования параметров эталонного осциллятора μ_1 и μ_2 изменялись амплитуда и частота генерируемых колебаний углового положения вала двигателя. На рисунке 9 можно наблюдать аттрактор типа «предельный цикл», возникающий в пространстве состояний замкнутой системы на ИМ.

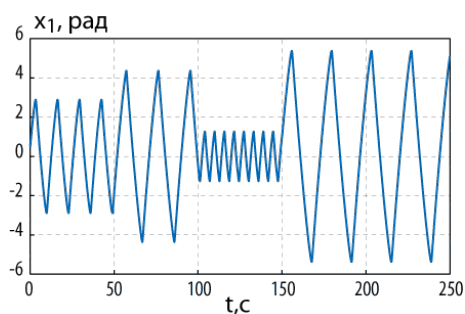


Рисунок 7 – Угловое положение

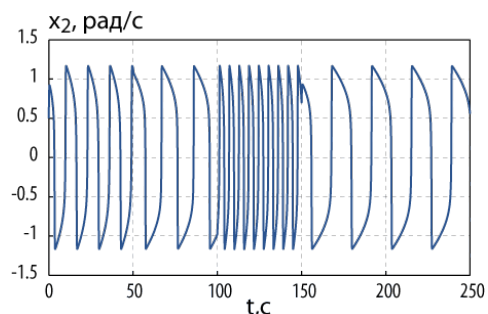


Рисунок 8 – Угловая скорость

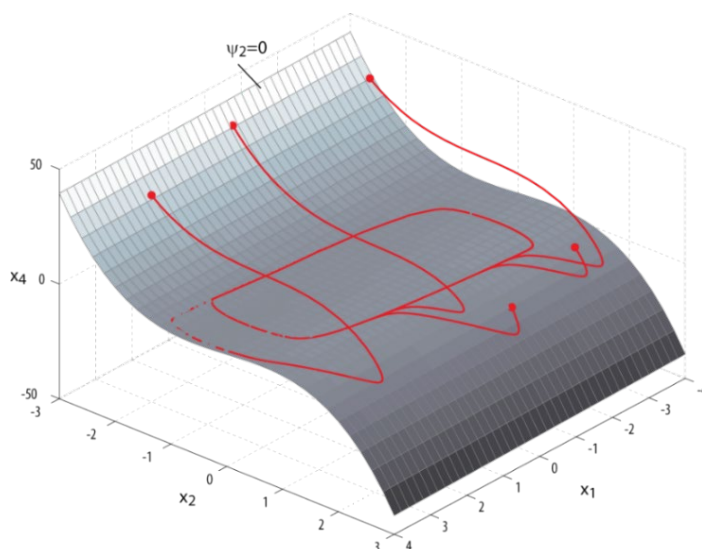


Рисунок 9 – Фазовый портрет замкнутой системы

Поскольку данный метод синтеза имеет ограничения, связанные со структурой уравнений механического движения и возможностью генерации синусоидальных колебаний с независимой настройкой частоты и амплитуды, был разработан второй метод. В процедуре синтеза используется математическая модель, состоящая из уравнений ЭМС и уравнений эталонного осциллятора (уравнений системы Пуанкаре):

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}); \\ \dot{z}_1 &= (\mu_1 - z_1^2 - z_2^2)z_1 + \mu_2 z_2; \\ \dot{z}_2 &= (\mu_1 - z_1^2 - z_2^2)z_2 - \mu_2 z_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Задача синтеза состоит в нахождении алгоритма управления $\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$, обеспечивающего асимптотическое схождение углового положения ИО ЭМС и переменной эталонного осциллятора: $\theta_{ИО} \rightarrow z_1$.

На рисунках 10 – 11 представлены результаты компьютерного моделирования электромеханического осциллятора на базе АД. В ходе моделирования имитировалось изменение заданных значений амплитуды и частоты генерируемых колебаний путем изменения параметров эталонного осциллятора.

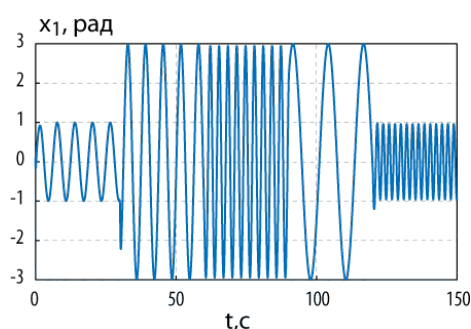


Рисунок 10 – Угловое положение

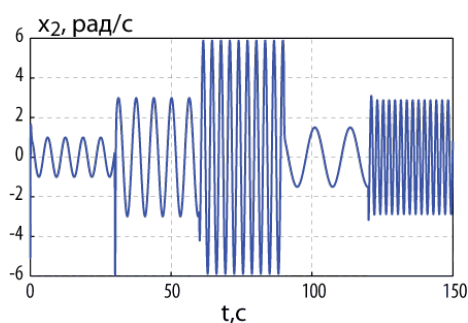


Рисунок 11 – Угловая скорость

Одной из характерных задач, решаемых ЭМС, является задача слежения, которая состоит в воспроизведении априори неизвестного временного сигнала $g(t)$ с заданной точностью.

В работе предложен подход к синтезу алгоритмов следящего управления для нелинейных систем, основанный на принципах и методах СТУ. Суть этого подхода состоит в следующем. Задающий сигнал в следящей системе, являющийся неизвестной функцией времени, можно рассматривать как линейный сигнал с переменным коэффициентом наклона аппроксимирующей прямой. Тогда в процедуре синергетического синтеза нужно использовать модель расширенной системы вида:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \\ \dot{z}_1 &= z_2, \\ \dot{z}_2 &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где z_1 – переменная модели опорного сигнала, z_2 – переменная, характеризующая текущее значение коэффициента наклона аппроксимирующей прямой.

Процедура синтеза включает в себя два этапа. На первом этапе проводится синтез алгоритма управления, обеспечивающего асимптотическое схождение управляемой переменной ЭМС к переменной опорного сигнала: $\theta_{ИО} \rightarrow z_1$; при этом считается, что все переменные модели (5) являются наблюдаемыми. На втором этапе проводится синтез асимптотического наблюдателя, проводящего оценку текущего значения z_2 .

Уравнения наблюдателя и оценки для систем вида (5) имеют универсальный вид:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= l_1 y_1 + l_1^2 z_1 \\ \hat{z}_2 &= -l_1 z_1 - y_1, \end{aligned}$$

где y_1 – переменная наблюдателя, l_1 – параметр определяющий скорость схождения коэффициента наклона аппроксимирующей прямой и его оценки.

На рисунках 12 – 13 приведены результаты моделирования следящей ЭМС с АД. В качестве тестового входного сигнала использовалась функция $g(t) = A_s \sin \omega_s t \cdot A_c \sin \omega_c t$. В ходе моделирования параметры тестового сигнала (амплитуды и частоты) изменялись.

Графики $g(t)$ и $x_1(t)$ на рис. 12 практически неразличимы, на рис. 13 в увеличенном масштабе показан процесс схождения управляемой переменной к входному сигналу.

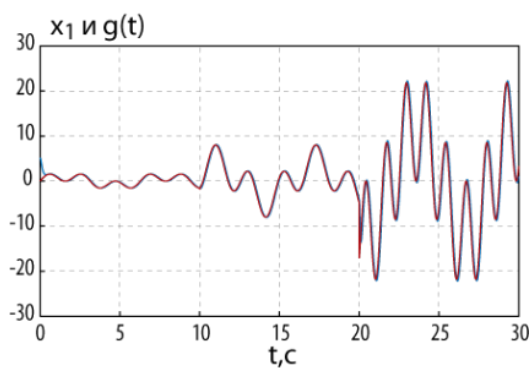


Рисунок 12 – Входной сигнал и угловое положение ИО

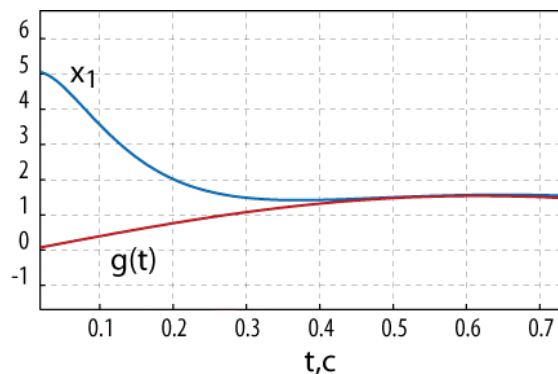


Рисунок 13 – Схождение управляемой переменной и входного сигнала

Четвертая глава диссертации посвящена изложению теоретических основ синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС и разработке соответствующих методов синтеза для ЭМС с различными типами ЭД.

Все разработанные методы основаны на обобщенной процедуре синергетического синтеза векторных регуляторов, предполагают использование соответствующих энергетических инвариантов (Таблица 1) и позволяют получать алгоритмы управления ЭМС, обеспечивающие стабилизацию угловой скорости и минимизацию суммарных потерь энергии в ЭД.

Для каждого типа ЭМС предложены несколько вариантов проведения процедуры синергетического синтеза, различающихся способом формирования ИМ и видом используемого энергетического инварианта.

Рассмотрены различные варианты одноканальной оптимизации, когда в процедуре синергетического синтеза используется один энергетический инвариант. Также предложены варианты синтеза с двухканальной оптимизацией, когда в процедуре синтеза используются два энергетических инварианта, а технологический инвариант (стабилизация угловой скорости) входит в структуру ИМ неявным образом.

Так, например, для ЭМС с АД возможны три варианта синтеза. Динамика этой ЭМС описывается математической моделью АД в координатной системе xu , вращающейся синхронно с магнитным полем и ориентированной по вектору потокосцепления обмотки ротора:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\omega}{dt} &= a_1\psi_r i_{1y} - a_2 M_c; \\
 \frac{d\psi_r}{dt} &= a_3 i_{1x} - a_4 \psi_r; \\
 \frac{di_{1x}}{dt} &= -a_5 i_{1x} + a_4 a_6 \psi_r + a_7 \omega i_{1y} + a_3 \frac{i_{1y}^2}{\psi_r} + b_1 u_{1x}; \\
 \frac{di_{1y}}{dt} &= -a_5 i_{1y} - a_6 a_7 \omega \psi_r - a_7 \omega i_{1x} - a_3 \frac{i_{1x} i_{1y}}{\psi_r} + b_1 u_{1y}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Переменные модели (6) описаны в Таблице 1, а ее коэффициенты связаны с параметрами АД. Управляющими воздействиями являются проекции напряжения статора на оси системы координат u_{1x} , u_{1y} .

При выборе в качестве оптимизируемой переменной модуля вектора потокосцепления ротора процедура включает в себя два этапа декомпозиции.

Сначала вводятся ИМ:

$$\psi_1 = i_{1x} - \varphi_1 = 0,$$

$$\psi_2 = i_{1y} - \varphi_2 = 0,$$

где φ_1 и φ_2 – пока неизвестные функции, которые аналогичны желаемым значениям проекций тока в традиционных системах векторного управления АД i_{1x}^* и i_{1y}^* .

На пересечении ИМ динамика АД описывается уравнениями декомпозированной системы:

$$\frac{d\omega}{dt} = a_1\psi_r\varphi_2 - a_2M_c;$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} = a_3\varphi_1 - a_4\psi_r.$$

На втором этапе вводятся ИМ, совпадающие с инвариантами системы:

$$\psi_3 = \omega - \omega^* = 0,$$

$$\psi_4 = \psi_r - |M_c^*|^{0,5} \left(\frac{k_4}{k_5 + k_6 |\omega^*|^\beta} \right)^{0,25} = 0.$$

При двухканальной оптимизации процедура синергетического синтеза проводится в один этап декомпозиции, а вводимые ИМ имеют следующий вид:

$$\psi_1 = i_{1x} - i_{1x\text{опт}} = 0,$$

$$\psi_2 = i_{1y} - i_{1y\text{опт}} = 0,$$

где $i_{1x\text{опт}}$ и $i_{1y\text{опт}}$ вычисляются согласно выражениям для энергетических инвариантов из Таблицы 1.

В этом случае алгоритм энергосберегающего управления ЭМС с АД, полученный из решения системы основных функциональных уравнений $T_i\dot{\psi}_i + \psi_i = 0, i = 1, 2$ в силу модели (6), имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} u_{1x} &= \frac{1}{b_1} \left(a_5 i_{1x} - a_4 a_6 \psi_r - a_7 \omega i_{1y} - a_3 \frac{i_{1y}^2}{\psi_r} - \frac{1}{T_1} (i_{1x} - i_{1x\text{опт}}) \right); \\ u_{1y} &= \frac{1}{b_1} \left(a_5 i_{1y} + a_6 a_7 \omega \psi_r + a_7 \omega i_{1x} + a_3 \frac{i_{1x} i_{1y}}{\psi_r} - \frac{1}{T_2} (i_{1y} - i_{1y\text{опт}}) \right). \end{aligned} \quad (7)$$

На рисунках 14 – 18 представлены результаты моделирования ЭМС (6) с алгоритмом управления (7). Моделировалась следующая технологическая последовательность: пуск двигателя в номинальную скорость с моментом нагрузки $M_c = 0,5M_{\text{ном}}$;

увеличение момента до номинального значения $M_c = M_{\text{ном}}$; реверс двигателя с номинальными значениями скорости и момента; реверс двигателя с моментом $M_c = 0,1M_{\text{ном}}$ и разгон до скорости $\omega = 0,5\omega_{\text{ном}}$. На рисунке 18 показан фазовый портрет замкнутой системы, на котором можно наблюдать характерное устремление фазовых траекторий к пересечению ИМ $\psi_1 = 0$ и $\psi_2 = 0$.

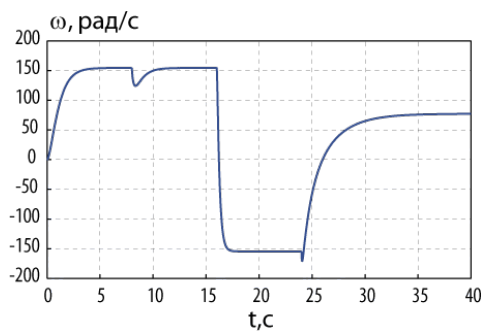


Рисунок 14 – Угловая скорость

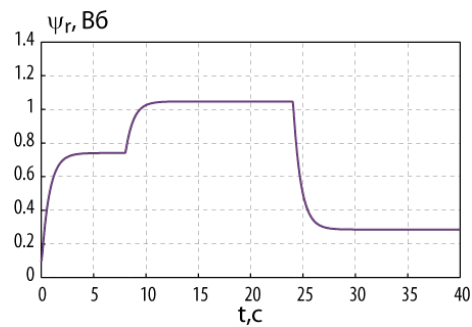


Рисунок 15 – Потокосцепление ротора

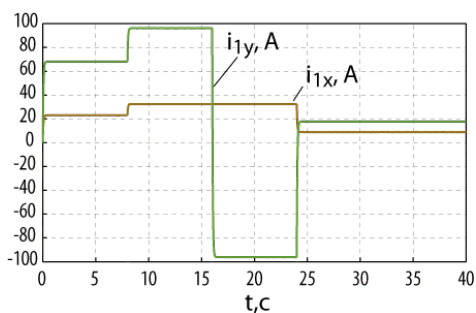


Рисунок 16 – Проекция тока

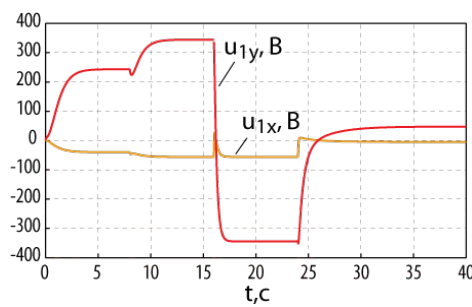


Рисунок 17 – Проекция напряжения

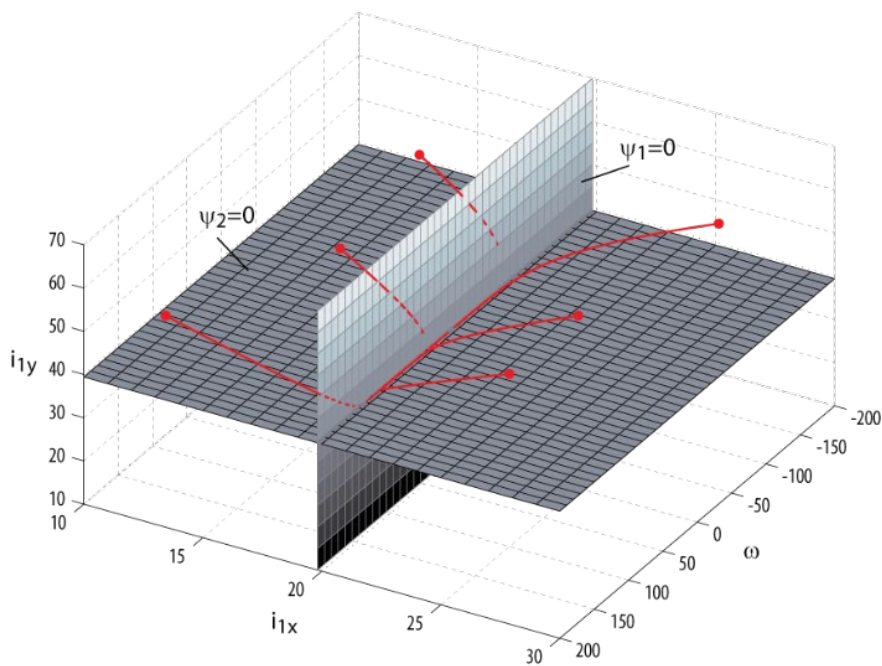


Рисунок 18 – Фазовый портрет в проекции на пространство ω, i_{1x}, i_{1y} .

Для всех типов ЭД был проведен сравнительный анализ энергетической эффективности ЭМС с разработанными и традиционными алгоритмами управления. На рисунках 19 и 20 представлены сравнительные диаграммы КПД СД типа МС321-6/6. Первая диаграмма получена при варьировании момента нагрузки в режиме стабилизации угловой скорости в номинальном значении; вторая – при варьировании заданной угловой скорости в условиях номинального момента нагрузки. Колонки красного цвета соответствуют энергосберегающему управлению, колонки голубого цвета – традиционному.

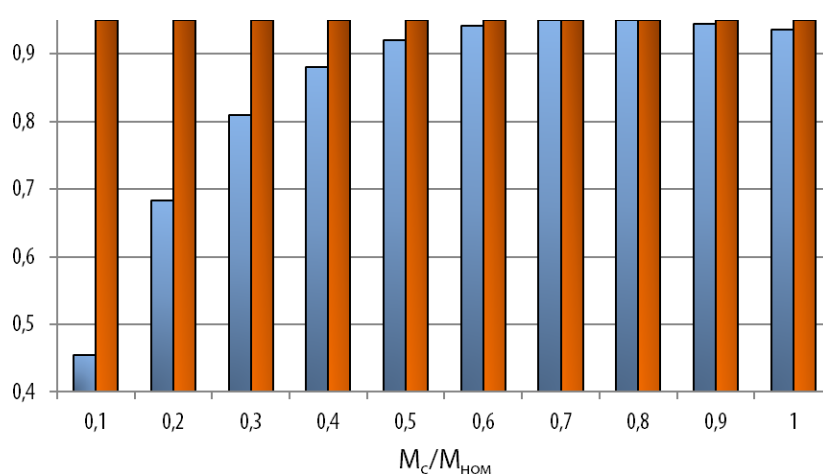


Рисунок 19 – Сравнительная диаграмма КПД ($\omega^* = \omega_{ном}$, $M_c = var$)

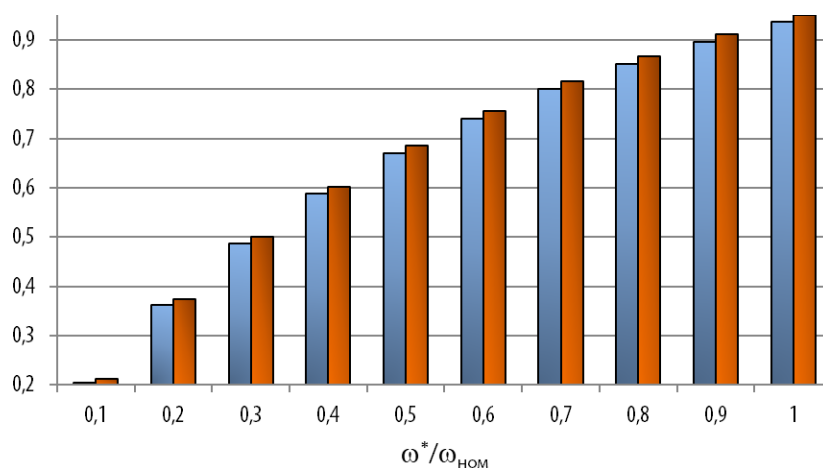


Рисунок 20 – Сравнительная диаграмма КПД ($M_c = M_{ном}$, $\omega^* = var$)

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что использование разработанных алгоритмов управления позволяет повысить КПД двигателя в режимах его работы с варьируемой угловой скоростью и изменяемой нагрузкой. Энергосберегающий эффект, имеющий место при соответствующем управлении ЭМС,

зависит от режима ее работы, а именно, от заданной угловой скорости и момента сопротивления нагрузки. В наибольшей степени он проявляется при недогруженном двигателе и может превышать 10%.

Пятая глава посвящена разработке прикладных методов синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС.

Основным недостатком всех модельно-ориентированных методов энергосберегающего управления ЭМС является прямая зависимость возможности минимизации потерь энергии от точности используемой математической модели. Предложенные в главах 3 и 4 прикладные методы синергетического синтеза использовали математические модели ЭМС в виде систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, при этом считалось, что все переменные состояния измеряемы, параметры определены и неизменны, а момент сопротивления нагрузки является известной функцией угловой скорости ИО ЭМС. В реальных условиях эксплуатации это далеко не всегда так, а, следовательно, в моделях могут появляться неопределенности различного происхождения, что может стать причиной не только снижения точности управления, но и приводить к смещению точки оптимума в задачах энергосбережения.

В работе проведен анализ основных неопределенностей математических моделей ЭМС и оценено их влияния на свойства замкнутых систем с разработанными алгоритмами управления. В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- к наиболее критичным с точки зрения эффективного функционирования ЭМС факторам следует, прежде всего, отнести действие внешнего возмущающего момента и неконтролируемое изменение активных сопротивлений обмоток двигателя;
- разработанные алгоритмы управления обеспечивают сохранение устойчивости замкнутых систем в условиях действия внешних возмущений и неконтролируемой вариации параметров, критических режимов поведения системы не наблюдается;
- игнорирование действия внешнего возмущающего момента и неконтролируемое изменение активных сопротивлений обмоток ЭД приводит к появлению статической ошибки по угловой скорости и снижению эффективности электромеханического преобразования энергии.

В главе представлены прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС, способных осуществлять текущую оценку внешних и параметрических возмущений и обеспечивающих их парирование.

Эти методы основаны на методе синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления с асимптотическими наблюдателями. В процедуре синтеза используется математическая модель расширенной системы следующего вида:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{g}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{G}_1(\mathbf{x})\mathbf{z}; \\ \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{h}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{H}_1(\mathbf{x})\mathbf{z},\end{aligned}\tag{8}$$

где \mathbf{x} – вектор наблюдаемых переменных; \mathbf{z} – вектор ненаблюдаемых переменных (в качестве ненаблюдаемых переменных могут выступать не измеряемые переменные, параметры и возмущающие воздействия); \mathbf{u} – вектор управляющих воздействий. Дифференциальные уравнения в (8), определяющие динамику ненаблюдаемых переменных \mathbf{z} , формируются либо на основании исходной математической модели, либо исходя из априорной информации о предполагаемом изменении во времени возмущающих воздействий и параметров.

Процедура синергетического синтеза адаптивных регуляторов включает в себя два основных этапа.

1. Синтез алгоритма управления. Для расширенной системы (8) применяется стандартная процедура метода АКАР в предположении, что все переменные расширенной системы наблюдаемы. Результатом этого этапа является закон управления $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$.

2. Синтез асимптотического наблюдателя. Задача синтеза заключается в построении асимптотической оценки $\hat{\mathbf{z}}$ вектора \mathbf{z} по наблюдаемым значениям вектора \mathbf{x} и синтезированному на первом этапе вектору управления \mathbf{u} .

При разработке методов синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС была продемонстрирована возможность сочетания свойств энергосбережения и адаптации в одном законе управления. Получаемые наблюдателем оценки возмущающего момента и активных сопротивлений обмоток ЭД позволяют проводить текущую коррекцию соответствующего энергетического инварианта и алгоритма энергосберегающего управления ЭМС. Анализ энергетической эффективности замкнутых систем управления приводит к тем же выводам, что сделаны в главе 4.

На рисунках 21 – 28 представлены результаты компьютерного моделирования ЭМС с СД и алгоритмом адаптивного энергосберегающего управления. Имитировался разгон двигателя в номинальную скорость при отсутствии возмущающего момента и номинальных значениях сопротивлений обмоток. Затем оценивалась реакция системы на действие возмущающего момента и изменение сопротивлений обмоток двигателя (увеличение до 50% от номинала).

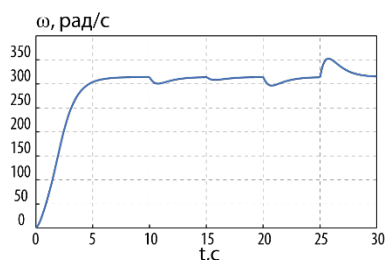


Рисунок 21 – Угловая скорость

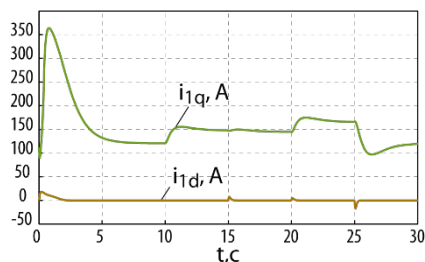


Рисунок 22 – Проекция тока статора

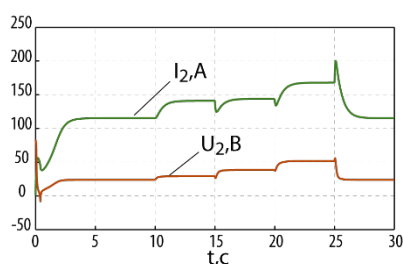


Рисунок 23 – Ток и напряжение ротора

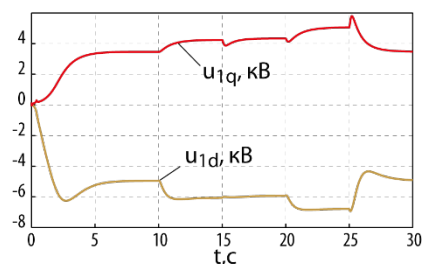


Рисунок 24 – Проекция напряжения статора

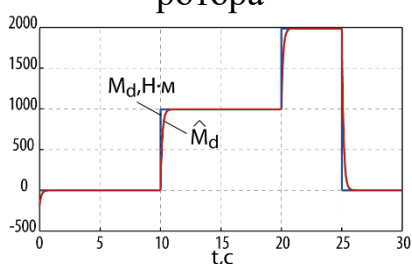


Рисунок 25 – Возмущающий момент и его оценка

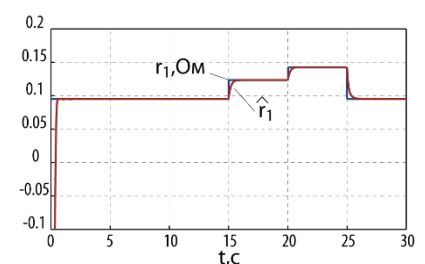


Рисунок 26 – Сопротивление обмотки статора и его оценка

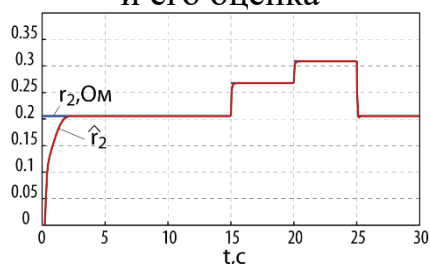


Рисунок 27 – Сопротивление обмотки ротора и его оценка

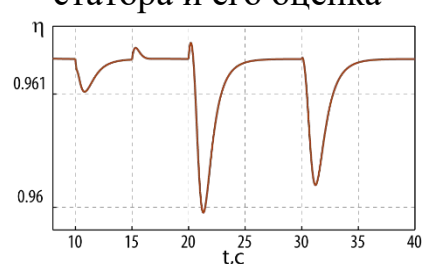


Рисунок 28 – КПД СД при вариации возмущающего момента

Также в главе рассмотрены особенности процедуры синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС в условиях нестационарности возмущающего момента. Представлено решение задач синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС, компенсирующих действие возмущающего момента, являющегося линейной или гармонической функцией времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработана методика поиска энергетических инвариантов ЭМС, представляющих собой математические условия, записанные относительно переменных состояния выбранных математических моделей и соответствующие режиму минимальных суммарных потерь энергии в процессе ее электромеханического преобразования.

2. Получены энергетические инварианты ЭМС с основными типами электродвигателей: двигателей постоянного тока, асинхронных двигателей, синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением, синхронными двигателями с постоянными магнитами.

3. Предложена обобщенная процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС, являющаяся универсальной стратегией использования принципов и методов синергетического синтеза систем при решении всего спектра задач управления ЭМС.

4. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов векторного управления ЭМС, обеспечивающих реализацию типовых режимов движения исполнительного органа: стабилизация угловой скорости, позиционирование, генерация незатухающих колебаний и слежение.

5. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС с различными типами электрических двигателей, которые позволяют получать алгоритмы замкнутого управления, минимизирующие потери энергии в двигателе при существенной вариации заданной угловой скорости и механической нагрузки. Использование алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС приводит к существенному энергетическому выигрышу, который выражается в увеличении КПД двигателя по сравнению с традиционной схемой управления, в определенных режимах это увеличение превышает 10%.

6. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС, которые позволяют получать алгоритмы управления, обеспечивающие реализацию основных задач управления в условиях действия внешних и параметрических возмущений.

Результаты диссертационного исследования рекомендуется использовать при решении задач модернизации алгоритмической базы систем автоматического управления для ЭМС различного типа и назначения с целью повышения надежности и энергетической эффективности конкретных промышленных агрегатов, тяговых установок транспортных средств и другого оборудования с электрическими двигателями.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Монографии

1. Современная прикладная теория управления: [монография]. Ч. 3. Новые классы регуляторов технических систем / [А. А. Колесников, Л. Н. Рассудов, В. Б. Яковлев и др.]; под редакцией А. А. Колесникова. – Москва; Таганрог: ТРТУ, 2000. – 654 с. – ISBN 5-8327-0057-0.

2. Синергетическое управление нелинейными электромеханическими системами / А. А. Колесников, Г. Е. Веселов, А. Н. Попов [и др.]. – Москва: Испо-Сервис, 2000. – 248 с. – ISBN 5-283-01665-2.

3. Синергетическая теория управления нелинейными взаимосвязанными электромеханическими системами / А. А. Колесников, Г. Е. Веселов, А. Н. Попов, Ал. А. Колесников; Министерство образования Российской Федерации, Таганрогский государственный радиотехнический университет. – Таганрог: ТРТУ, 2000. – 182 с. – ISBN 5-8327-0039-2.

4. Попов, А. Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами: монография / А. Н. Попов; Министерство образования Российской Федерации, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Таганрогский государственный радиотехнический университет. – Таганрог: ТРТУ, 2003. – 78 с.

5. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы / А. А. Колесников, Г. Е. Веселов, А. Н. Попов [и др.]; под общей редакцией А. А. Колесникова. – Москва: URSS; КомКнига, 2006. – 300 с. – ISBN 5-484-00330-X.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Колесников, А. А. Синергетическое управление нелинейными электроприводами. I. Концептуальные основы синергетического синтеза систем / А. А. Колесников, Г. Е. Веселов, А. Н. Попов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2005. – № 6. – С. 8-15. К1.

2. Колесников, А. А. Синергетическое управление нелинейными электроприводами. II. Векторное управление электроприводами постоянного тока / А. А. Колесников, А. Н. Попов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2006. – № 1. – С. 6-17. К1.
3. Попов, А. Н. Синергетический подход к синтезу законов энергосберегающего управления техническими системами / А. Н. Попов // Нелинейный мир. – 2005. – № 3 – С. 112-123. К2.
4. Веселов, Г. Е. Энергосберегающее управление асинхронным тяговым двигателем: синергетический подход / Г. Е. Веселов, А. Н. Попов, И. А. Радионов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 2. – С. 18-22. К1.
5. Попов, А.Н. Синергетический синтез генераторов нелинейных электромеханических колебаний / А.Н. Попов, Ал.А. Колесников // Нелинейный мир. –2004. – № 4. – С. 278 – 284. К2.
6. Попов, А. Н. Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами / А. Н. Попов // Известия ТРТУ. – 2001. – № 5(23). – С. 179-185. К2.
7. Попов, А. Н. Синергетический синтез нелинейных электромеханических осцилляторов / А. Н. Попов, Ал. А. Колесников // Известия ТРТУ. – 2001. – №5(23). – С. 190-198. К2.
8. Попов, А. Н. Синергетические законы управления электроприводом постоянного тока: стабилизация, позиционирование, слежение, энергосбережение / А. Н. Попов // Известия ТРТУ. – 2006. – № 6(61). – С. 121-148. К2.
9. Попов, А. Н. Синергетический синтез систем энергосберегающего управления электромеханическими процессами / А. Н. Попов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. – №6(119). – С. 74-84. К2.
10. Попов, А. Н. Метод синергетического синтеза генераторов нелинейных электромеханических колебаний / А.Н. Попов, Ал.А. Колесников // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. – №6(119). – С. 233-245. К2.
11. Попов, А. Н. Синергетический синтез регуляторов для задач генерации колебательных режимов в технических системах / А. Н. Попов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. – №4(129). – С. 156-162. К2.
12. Веселов, Г. Е. Синергетическое управление асинхронным тяговым электроприводом локомотивов / Г. Е. Веселов, А. Н. Попов, И. А. Радионов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 123-137. К1.
13. Попов, А. Н. Теоретические основы синтеза энергосберегающих регуляторов электромеханических систем / А. Н. Попов // Современная наука и инновации. – 2016. – № 3(15). – С. 20-28. К3
14. Попов, А. Н. Синергетический синтез следящих регуляторов / А. Н. Попов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. – №7 (201). – С. 143-154. К2.
15. Попов, А. Н. Энергосберегающие регуляторы для систем автоматизированного электропривода / А. Н. Попов // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4(43). – С. 55. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3771>. К2.
16. Попов, А. Н. Алгоритмы комплексной оптимизации тяги для систем автоведения подвижного состава железнодорожного транспорта / А. Н. Попов, И. А. Радионов //

Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4(43). – С. 68. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3804> (дата обращения 02.06.2025). К2.

17. Адиняев, В. А. Разработка системы энергосберегающего управления силовой установкой электромобиля с тяговым асинхронным двигателем В. А. Адиняев, А. Н. Попов // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 12(72). – С. 231-239. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6727> (дата обращения 02.06.2025). К2.

Статьи в изданиях, включенных в наукометрические базы данных Scopus и Web of Science:

1. Veselov, G. E. Synergetic control of asynchronous electric traction drives of locomotives / G. E. Veselov, A. N. Popov, I. A. Radionov // Journal of Computer and Systems Science International. – 2014. – Vol. 53, № 4. – P. 587-600. – DOI 10.1134/S1064230714040157.

2. Popov, A. N. Synergetic synthesis of power saving control for locomotive asynchronous drive systems / A. N. Popov, I. A. Radionov, A. S. Mushenko // 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 6-8 October 2014, St. Petersburg, Russia. – 2014. – P. 446-450. – DOI 10.1109/ICUMT.2014.7002142.

3. Adaptive Power Saving Control for Traction Asynchronous Electrical Drive: Synergetic Approach / G. E. Veselov, A. N. Popov, I. A. Radionov, A. S. Mushenko // ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference, Dubrovnik, Croatia, 13-16 May 2014. – 2014. – P. 1446-1453. – DOI 10.1109/ENERGYCON.2014.6850613.

4. Popov, A. N. Synergetic design of autopiloting systems with complex optimization of train traction / A. N. Popov, I. A. Radionov, A. S. Mushenko // IFAC-PapersOnLine: 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems MICNON 2015, Saint Petersburg, Russia, 24-26 June 2015. – 2015. – Vol. 48, No. 11. – P. 457-462. – DOI 10.1016/j.ifacol.2015.09.228.

5. Popov, A. N. Design of closed-loop control for generation of nonlinear oscillations / A. N. Popov, A. A. Kuz'menko // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS, October 25-27, 2017. – 2017. – P. 199-202. – DOI 10.1109/CTSYS.2017.8109525.

6. Popov, A. N. Design of energy-efficient regulators for vector control systems of induction motor of an electric vehicle propulsion system / A. N. Popov // Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019, St. Petersburg, October 30 – November 01, 2019. – 2019. – P. 81-84. – DOI 10.1109/CTS48763.2019.8973239.

7. Popov, A.N. Energy-saving Regulators for Asynchronous Electric Drive Vector Control Systems: Design Procedure and Adaptive Control // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia 30th of January – 02nd of February 2019: Proceedings. – 2019. – P. 8664255. – DOI 10.1109/IWED.2019.8664255.

8. Popov, A. N. Synergetic synthesis of tracking control systems / A. N. Popov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Dynamics of Technical Systems (DTS 2020) 11-13 September 2020, Rostov-on-Don, Russia. – 2021. – Vol. 1029, No 1. – Art. No 012032. – DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012032.

9. Popov, A. N. Generalized Procedure for Synergetic Synthesis of Vector Regulators of Electromechanical Systems / A. N. Popov // Proceedings of 2023 5th International Conference on

Публикации в других научных изданиях:

1. Колесников, А. А. Инварианты электромеханических систем и вибромеханики / А. А. Колесников, Г. Е. Веселов, А. Н. Попов // Синергетика и проблемы теории управления / под редакцией А. А. Колесникова. – Москва: Физматлит, 2004. – С. 251-269.

2. Попов, А. Н. Синергетический синтез энергосберегающих регуляторов для электроприводов постоянного и переменного тока / А. Н. Попов // Синергетика и проблемы теории управления / под редакцией А. А. Колесникова. – Москва: Физматлит, 2004. – С. 309-323.

3. Попов, А.Н. Синергетический синтез энергосберегающих регуляторов асинхронных электроприводов // Труды IV Международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург: Изд-во УПИ, 2007. – С.123-127.

4. Kolesnikov, A.A., Veselov, G.E., Popov, A.N, Kuz'menko, A.A. Synergetic control for nonlinear electromechanical systems// Proceeding of the First International Conference «Control and self-organization in Nonlinear Systems», Bialystok, Poland, 2000. – P.145-160.

5. Kolesnikov, A.A., Veselov, G.E., Popov, A.N, Kolesnikov, Al.A. Synergetic control for DC and AC electric drives // Proceedings of the VII International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements Vrnjachka Banja, 2001.

6. Popov, A.N. Synergetic synthesis of energy-saving control for electromechanical processes // Book of Abstract of 3rd Chaotic Modeling and Simulation International Conference (CHAOS2010), Greece. –2010. – P. 71.

7. Попов, А. Н. Синергетический синтез регуляторов для систем векторного управления асинхронным двигателем электромобиля / А. Н. Попов // IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика», п. Нижний Архыз, Россия 24–27 сентября 2019 г.: сборник научных работ. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – С. 41-50. – Режим доступа: https://ictis.sfedu.ru/ssas/SSAS_2019.pdf.

Попов Андрей Николаевич

ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА
АЛГОРИТМОВ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление
и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Подписано в печать «26» июня 2025 г.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Формат 60×84^{1/16}.

Усл. печ. лист. 2,35. Уч. изд. л. 2,0. Заказ № 9967. Тираж 100 экз.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции

Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.

344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8 (863) 243-41-66