

## О Т З Ы В

на диссертацию Попова Андрея Николаевича

«Прикладная теория и методы синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления нелинейными электромеханическими системами»,

представленную на соискание ученой степени

доктора технических наук по специальности

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

Системы разных классов электромеханических и вибромеханических систем (непрерывные и дискретные, детерминированные и стохастические, одномерные и многомерные, стационарные и нестационарные) могут быть описаны с применением различных подходов и моделей, из которых наиболее естественным и практически приемлемым является форма систем нелинейных ОДУ, описывающих динамику протекающих в объекте процессов во времени. Этот аппарат явился удобной моделью реальных систем, используемой в проектировании автоматически управляемых ЭМС. Однако нелинейность модели, как известно, есть плохо преодолимое препятствие для конструирования системы управления такими системами посредством методов на основе классической теории автоматического управления без специальных допущений (линеаризация, введение в структуру системы дополнительных блоков, компенсирующих взаимовлияние каналов управления на фоне обратных связей по ЭДС вращения двигателя и др.).

Теория синергетического управления (СТУ), лежащая в основе применяемых в диссертационном исследовании базовых методов - конструирования агрегированных регуляторов и интегральной адаптации, обеспечивает выполнение ряда полезных методологических шагов и характеристик при конструировании регуляторов для сложных технических объектов, а именно:

– определение математической структуры системы автоматического управления как совокупности обратных связей, обеспечивающих желаемый режим функционирования нелинейных объектов в окрестности инвариантных многообразий;

– сведение задачи анализа системы управления к определению и формализации специальных макропеременных как функций от динамического состояния объекта, отражающих инженерные требования к качеству систем, выполнение которых обеспечивается аппаратом СТУ (таким образом, инвариантные многообразия задаются, а не отыскиваются в отличие от традиционных задач механики);

– сведение задачи синтеза системы нелинейного управления к решению линейных дифференциальных уравнений относительно макропеременных нескольких уровней иерархии, зависящей от специфики исходной системы ОДУ, структуры вхождения управляющих переменных в описание и вида целевых макропеременных.

Перечисленные достоинства СТУ, являющейся основным рабочим инструментом в диссертационном исследовании Попова А.Н., отвечают постановке и успешному решению научной проблемы: разработке теоретических основ синтеза алгоритмов управления ЭМС, ориентированных на специфику и физические особенности управляемых объектов и в наибольшей степени учитывающих их естественную динамику и сопутствующие этой динамике процессы преобразования энергии.

СТУ позволяет не только получить в явном виде решение задачи, но и дает возможность моделировать траектории управляемых систем, что использовано автором диссертационного исследования в задаче построения нелинейного наблюдателя системы с единых позиций при конструировании регуляторов для ЭМС.

Самостоятельным важным результатом работы является подход к синтезу алгоритмов следящего управления для нелинейных систем, основанный на принципах и методах СТУ.

Отдельно выделены результаты по аналитическим моделям энергетических инвариантов электромеханических систем. В работе они активно используются для синтеза нелинейных регуляторов нескольких типов ЭМС.

Научная новизна представленной к защите диссертации состоит в следующих результатах:

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, и применимая для всех основных типов электрических двигателей.

2. Предложена обобщенная процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС, применение которой, в отличие от существующих подходов к синтезу автоматических регуляторов ЭМС, исключает необходимость введения в структуру системы дополнительных блоков, компенсирующих взаимовлияние каналов управления и естественную обратную связь по ЭДС двигателя, и являющейся свободной от применения численных методов и итерационных способов настройки типовых регуляторов при изменении режима функционирования ЭМС.

3. Разработан метод синергетического синтеза электромеханических осцилляторов для получения алгоритмов управления ЭМС, обеспечивающих формирование в пространстве состояний управляемой системы аттрактора типа «пределный цикл», что гарантирует асимптотическую устойчивость режимов незатухающих механических колебаний исполнительного органа и, в отличие от существующих аналогов, не требует введения в структуру системы дополнительных генераторов гармонического сигнала.

4. Разработан метод синергетического синтеза следящих ЭМС в нелинейной постановке, а реализующий его 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.

5. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза энергосберегающих регуляторов ЭМС, позволяющие получать алгоритмы энергосберегающего управления на основе нелинейных математических моделей ЭМС, не предполагающие проведения дополнительных поисковых процедур по настройке типовых регуляторов при изменении условий эксплуатации и обеспечивающие существенный энергетический выигрыш по сравнению с традиционной схемой управления, который выражается в увеличении КПД двигателя при изменении угловой скорости и механической нагрузки.

6. Разработаны прикладные методы синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС 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.

Несомненным преимуществом используемого СТУ-подхода является возможность простой программной реализации при моделировании системы векторного управления, поскольку достаточно применять операции матричной алгебры и решений ОДУ.

Диссертация включает традиционные разделы: введение и заключение, библиографический список, основные результаты в пяти главах, приложения.

Введение содержит необходимые в диссертационном исследовании элементы: актуальность работы, объект и предмет исследования, цель работы и задачи, методы исследования, обоснование достоверности результатов, положения научной новизны, формулировки теоретической и практической значимости, указание соответствия диссертации паспорту научной специальности, описание структуры диссертации, основные результаты, результаты апробации работы и сведения о публикациях по теме работы. Заключение подводит итоги диссертационного исследования, в восьми приложениях - четыре акта о внедрениях и листинги программ с символическим выводом синергетических регуляторов для четырех рассмотренных в диссертации моделей ЭМС.

Первая глава включает сведения о существующих подходах к решению задач энергосбережения в ЭМС и формулировку основной научной проблемы диссертационного исследования. В главе сделан обзор существующих методов энергосберегающего управления ЭМС, приведена условная их классификация, рассмотрены особенности этих методов, их достоинства и недостатки. Сделан акцент на задаче синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС как основной и наиболее непростой, возникающей в процессе проектирования замкнутых систем автоматического управления.

Вторая глава содержит результаты, связанные с выбором и описанием математических моделей основных элементов силового канала ЭМС с акцентом на модели электрических двигателей, осуществляющих целенаправленное электромеханическое преобразование энергии. При этом рассматривались модели в исходном описании с позиций электромеханики без упрощения и аппроксимаций. Для всех моделей формализованы задачи управления ЭМС в виде системы целевых инвариантов: технологических, электромагнитных и энергетических.

Третья глава решает задачу синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС. Представлена обобщенная процедура синергетического синтеза алгоритмов векторного управления нелинейными ЭМС как ряд иерархически последовательных этапов, на каждом из которых осуществляется каскадная декомпозиция исходной системы ОДУ.

Четвертая глава рассматривает теоретические основы синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления ЭМС и разработку соответствующих прикладных методов синтеза для ЭМС (основанных на обобщенной процедуре синергетического синтеза векторных регуляторов) с различными типами электрических двигателей и использованием специальных энергетических инвариантов для получения алго-

ритмов управления ЭМС, обеспечивающих стабилизацию угловой скорости и минимизацию суммарных потерь энергии в двигателях.

Пятая глава посвящена разработке прикладных методов синергетического синтеза алгоритмов адаптивного управления ЭМС, что наиболее важно и приемлемо с точки зрения практической, поскольку используемый принцип интегральной адаптации призван нивелировать в процессе управления влияние различных неконтролируемых неопределенностей на процессы в ЭМС в виде ограниченных функций времени.

Разработаны алгоритмы управления, осуществляющие текущую оценку внешних и параметрических возмущений и обеспечивающих их компенсацию.

Проведено множество вычислительных экспериментов, подтверждающих теоретические выводы.

Представленная к защите диссертация не лишена недостатков. Имеются следующие замечания:

1. При разработке методов и алгоритмов предполагается, что силовая часть ЭМС содержит один двигатель. Возникает естественный вопрос: масштабируемы ли развиваемые в работе алгоритмы управления, реализующие развиваемые в диссертации подходы, для решения задач управления ЭМС с несколькими двигателями? Именно к таким ЭМС относятся манипуляционные роботы, прокатные станы, обрабатывающие станки, транспортные средства типа «мотор-колесо» и др.
2. В диссертации не содержится обоснование вопроса: образуют ли выбранные энергетические макропеременные инварианты (с позиции математического определения термина «инвариант»). На стр. 91 формулировка «инварианта» допускает произвольное толкование.
3. В главе 5 представлены адаптивные регуляторы с учетом возмущений, в том числе и нестационарных. В данном случае термин «нестационарность» требует уточнения, поскольку речь идет изначально о нелинейных системах.
4. При решении задач синтеза адаптивных регуляторов в главе 5 делается предположение, что параметрические и внешние возмущения являются ступенчатыми. Не означает ли это, что согласно утверждению из функционального анализа о представлении измеримой функции на измеримом множестве как предела последовательности соответствующих ступенчатых функций, возмущение может быть произвольной ограниченной функцией?

5. Предлагаемая автором теория и методы дают возможность получать алгоритмы нелинейного управления ЭМС. Однако в диссертации не обсуждаются вопросы настройки этих алгоритмов для учета заданных ограничений относительно показателей качества переходных процессов в замкнутой системе.
6. Прикладной метод синергетического синтеза следящих ЭМС основан на идее линейной аппроксимации неизвестного входного сигнала как наиболее простой. Имеется ли практическая целесообразность и возможность в рамках этого подхода аппроксимировать входной сигнал полиномиальной функцией более высокого порядка?
7. Использование асимптотического наблюдателя (раздел 5.2.1) может вносить в динамику системы управления дополнительное возмущение, обусловленное неточностью получаемой оценки. Обладает ли конструируемый регулятор фильтрующими свойствами для парирования дополнительного возмущения в условиях немодельных, приближенных к реальным испытаниям?

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. В целом представленная диссертация «Прикладная теория и методы синергетического синтеза алгоритмов энергосберегающего управления нелинейными электромеханическими системами» представляет собой законченную научную работу, которая выполнена на высоком уровне.

Предлагаемые прикладные методы нелинейного синтеза энергосберегающих регуляторов ЭМС являются новыми, а решенные в диссертационном исследовании задачи представляются актуальными. Работа вносит существенный вклад в развитие теории нелинейного управления, имеет несомненную практическую значимость. Достоверность теоретических результатов обусловлена представленными прикладными методами и реализующими их конструктивными алгоритмами синтеза нелинейных регуляторов. Все полученные результаты подтверждены с помощью вычислительных экспериментов. Высокий уровень результатов подтверждается публикациями в ведущих рецензируемых журналах. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Попова Андрея Николаевича отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым Высшей аттестационной комиссией к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой сте-

пени доктора технических наук по специальности 2.3.1. – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент: профессор кафедры компьютерных технологий и программной инженерии института вычислительных систем и программирования ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП)  
д.т.н., доцент

Колесникова Светлана Ивановна

Подпись Колесниковой Светланы Ивановны удостоверяю.

И.о. начальника ОКР  
(должность)

(подпись)

О.В. Гусев  
(Ф.И.О.)



Дата

18.09.2025 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»  
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Россия.  
Тел.: +7(812) 710-65-10  
Электронная почта: [common@aanet.ru](mailto:common@aanet.ru)  
Веб-сайт: <http://guap.ru>