

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Галяева Ивана Андреевича «Спектральные методы
разложения грамианов для управления линейными и билинейными
системами с приложением в электроэнергетике», представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

Диссертационная работа Галяева И.А. посвящена разработке методов анализа линейных и билинейных систем управления на основе спектральных и сингулярных разложений грамианов.

Актуальность темы диссертации. Линейные и билинейные системы управления, изучаемые в работе, возникают при анализе многих практических инженерных задач. Свойства грамианов систем управления широко используются при исследовании задач управления, в том числе при исследовании устойчивости электроэнергетических систем. Однако большинство методов анализа устойчивости в теории управления не учитывают взаимодействие различных спектральных составляющих системы. Метод спектральных разложений грамианов, используемый в работе, позволяет произвести данный анализ. В результате были получены новые результаты в анализе устойчивости систем управления. Разработанные в работе методы применяются для анализа динамики модели двухзонной печи и модели асинхронного двигателя. Полученные результаты применяются для решения важной практической задачи настройки регуляторов в электроэнергетических системах. Таким образом, разработка новых методов теории управления на основе спектральных разложений грамианов, является актуальной задачей.

Оценка содержания работы. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и списка сокращений и условных обозначений. Диссертация изложена на 126 страницах, содержит 6 рисунков и список литературы со 135 наименованиями. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

В первой главе описываются разложения грамиана управляемости по простому и по парному спектру и в форме произведения Адамара. Получены спектральные и сингулярные разложения обратных матриц бесконечных грамианов. Верификация результатов исследования представлена на примерах разложения грамианов для модели двухзонной печи и для модели асинхронного двигателя. Получены спектральные разложения энергетических функционалов, являющихся оценками энергии переменных состояния и новые критерии устойчивости линейных систем. Для неустойчивых линейных систем получены спектральные разложения решения соответствующего уравнений Ляпунова и сепарабельные спектральные разложения смешанного грамиана управляемости. Эти результаты подтверждаются на примере анализа динамики модели управления четырёхмерным динамическим объектом и спектральных разложений энергетических функционалов грамианов неустойчивой динамической системы.

Во второй главе изучаются методы решения обобщенных непрерывных уравнений Ляпунова для билинейных систем управления. В разделе 2.1 показано, как нестационарная билинейная система сводится к стационарной билинейной системе, для которой разработаны новые сепарабельные спектральные разложения грамианов. В разделе 2.2 на основе преобразований Лапласа разработан итеративный алгоритм построения поэлементного решения обобщенного уравнения Ляпунова для стационарной билинейной

системы. В обоих разделах сформулированы достаточные условия BIBO-устойчивости данных систем.

В третьей главе разрабатываются адаптивные методы управления и алгоритмы настройки системных регуляторов в электроэнергетических системах. Решена задача упрощения математической модели генераторов электроэнергетической системы с учетом динамики низкочастотных электромеханических колебаний, а также задача упрощения передаточных функций системного стабилизатора в полосе пропускания частот электромеханических колебаний. Предложены новый метод и алгоритм оптимальной настройки регуляторов на основе принципа неявной эталонной модели и метода наименьших квадратов. Новизна результата заключается в том, что целевой функционал при этом выражается с помощью спектрального разложения грамиана наблюдаемости. Проведено численное моделирование трёхгенераторного кластера электроэнергетической системы.

Новизна и достоверность результатов. В работе получены следующие научные результаты:

1. Условия устойчивости линейных систем с учетом нелинейных эффектов взаимодействия мод и инвариантные представления энергетических функционалов на основе методов спектральных и сингулярных разложений грамианов управляемости и наблюдаемости.
2. Метод получения сепарабельных спектральных разложений грамианов управляемости для неустойчивых динамических систем. Методы получения спектральных разложений грамианов управляемости и обратных грамианов, позволяющих аналитически вычислять составляющие энергии, соответствующие характерным собственным числам матриц грамианов, определяющие основной вклад в величину энергетических функционалов достижимости и устойчивости.
3. Новые достаточные условия ограниченной (BIBO)-устойчивости непрерывной нестационарной билинейной системы на основе метода решения обобщенного уравнения Ляпунова в виде суммы матриц субграмианов, соответствующих парным комбинациям собственных чисел матрицы динамики линейной части.
4. Метод и алгоритм упрощения моделей узлов графа электроэнергетической системы с использованием аппарата передаточных функций для анализа и синтеза системных регуляторов.

Полученные в диссертации результаты являются новыми. Они имеют теоретическое значение, вносят вклад в развитие теории управления. Особенностью представленных в работе результатов является учёт взаимодействия различных мод систем управления в условиях различных режимов ее функционирования. Достоверность результатов обеспечивается корректными математическими доказательствами. Практическая значимость подтверждается результатами анализа устойчивости и настройки системных регуляторов электроэнергетических систем.

Замечания по диссертационной работе.

1. В главе три численные результаты представлены только для однолинейной схемы двухзонной трёхмашинной энергосистемы. В связи с этим остаётся неясным, могут ли предлагаемые методы быть применены на практике для анализа более сложных электроэнергетических систем.

2. Формулировка теоремы 1.4 содержит неточность. Энергетический функционал J определяется через собственные числа s_k , которые определены однозначно. По этой причине неясно, как может быть определён предел в формуле (1.36).
3. В автореферате используется без пояснений обозначение для характеристического многочлена $N(s_k)$, определённого в диссертации.

Закключение. Отмеченные недостатки являются незначительными, не влияют основные результаты исследования. Диссертация выполнена лично соискателем на высоком математическом уровне. Результаты диссертационной работы опубликованы в 8 публикациях, в том числе 4 в изданиях, индексируемых в международных базах данных, приравненных к журналам категории К1 Перечня ВАК, и 4 публикаций – в сборниках трудов международных и всероссийских конференций. Диссертация Галяева Ивана Андреевича является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальных задач и обладающей научной ценностью. В работе представлены научные результаты и положения, совокупность которых можно квалифицировать как развитие теории методов решения задач анализа и синтеза линейных и билинейных систем управления. Автореферат соответствует содержанию работы. Уровень полученных научных и практических результатов отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика». Диссертационная работа отвечает критериям, установленным в постановлении Правительства РФ № 842 от 29.09.2013 «О порядке присуждения учёных степеней», а её автор, Галяев Иван Андреевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Официальный оппонент
Профессор кафедры 804
«Теория вероятностей и компьютерное моделирование»
Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
доктор физико-математических наук
Иванов Сергей Валерьевич


21.08.2025

Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993, тел. +7 (499) 158-48-74,
e-mail: sergeyivanov89@mail.ru


Зам. нач. отдела
