

## Отзыв

на автореферат диссертации

Галяева Ивана Андреевича на тему

«Спектральные методы разложения грамианов для управления линейными и билинейными системами с приложением в электроэнергетике»

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

Современные электроэнергетические системы характеризуются исключительной сложностью, высокой размерностью, ростом доли нестабильной возобновляемой генерации и постоянно ужесточающимися требованиями к надежности и устойчивости. Эти факторы выводят на первый актуальный план задачи анализа и синтеза систем управления, способных гарантировать устойчивость в условиях больших возмущений и структурных изменений режимов работы. Ключевым вызовом при создании таких систем является сложность анализа и управления сложно-перекрестными связями между множеством компонентов ЭЭС, традиционно описываемых линейными и билинейными динамическими моделями.

Диссертационная работа Галяева Ивана Андреевича посвящена разработке методов анализа линейных и билинейных систем управления на основе спектральных и сингулярных разложений грамианов. В общем случае, актуальность темы исследования подтверждается применением результатов диссертации для решения современных оптимизационных задач. В контексте электроэнергетики разработанные в работе спектральные методы разложения грамианов управляемости и наблюдаемости предоставляют мощный аппарат для декомпозиции сложной динамики ЭЭС на составляющие, соответствующие отдельным модам и их взаимодействиям. Это позволяет не только точно оценивать запасы устойчивости, но и создавать высокоэффективные алгоритмы адаптивной настройки системных регуляторов для моделей высокой размерности, что является крайне актуальной задачей для обеспечения надежного функционирования объединенных энергосистем в современных условиях.

Целью диссертационного исследования является разработка методов и алгоритмов решения уравнений Ляпунова для повышения эффективности управления и мониторинга состояния многомерных динамических систем. В ходе достижения цели были получены следующие новые 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 ВВО-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 ЭЭС с использованием аппарата передаточных функций для анализа и синтеза регуляторов для ЭЭС.

Теоретическая значимость работы заключается в фундаментальном развитии спектральной теории управления: разработан новый класс методов анализа и синтеза, основанный на спектральных и сингулярных разложениях грамианов управляемости и наблюдаемости. Это позволяет не только получить аналитическое решение матричных уравнений Ляпунова для многосвязных систем, но и раскрыть глубокие внутренние свойства систем, такие как энергетическое распределение по модам и нелинейные эффекты их взаимодействия, что вносит существенный вклад в теорию устойчивости и управления как для линейных, так и для билинейных динамических моделей.

Практическая значимость подтверждена апробацией полученных методов для различных динамических систем, в том числе для электроэнергетических систем, где они показали свою эффективность для синтеза системных регуляторов и адаптивного управления, что открывает перспективы их применения для широкого класса сложных технических систем в энергетике, робототехнике и аэрокосмической отрасли.

Все результаты диссертационного исследования опубликованы в статьях в изданиях, приравненных к журналам категории К1 Перечня ВАК или доложены на конференциях, что свидетельствует о достоверности результатов.

К содержательной части автореферата имеются следующие замечания, не влияющие на общую положительную оценку работы:

1. Работа содержит ряд новых алгоритмов (спектрального итеративного решения, поэлементного вычисления). Требуются дополнительные разъяснения по их вычислительной сложности и устойчивости при работе с системами высокой размерности. Как методы масштабируются на задачи с тысячами и десятками тысяч переменных, характерные для современных электроэнергетических систем?
2. В работе заявлено применение методов на модели узлов графа ЭЭС. Для убедительности валидации необходимо определённое количественное сравнение (которое возможно есть в пояснительной записке), т.е. насколько предложенные методы адаптивной настройки регуляторов или упрощения

моделей превосходят по точности, быстродействию или робастности уже существующие классические методы (например, LQR, методы на основе наблюдателей Калмана, методы понижения порядка)?

Автореферат написан ясно и логично стройно. Публикации в достаточной степени отражают основное содержание работы.

С учётом изложенного считаю, что диссертационная работа Галяева Ивана Андреевича «Спектральные методы разложения грамианов для управления линейными и билинейными системами с приложением в электроэнергетике» является законченной научно-квалификационной работой, в которой сделан существенный вклад в теорию управления сложными динамическими системами. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» и критериям, предъявляемым ВАК к диссертационным работам, поэтому Галяев Иван Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Я, Гурина Людмила Александровна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник  
лаборатории управления функционированием  
электроэнергетических систем  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки (ФГБУН)  
Институт систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева  
Сибирского отделения  
Российской академии наук

Гурина Людмила Александровна  
«22» августа 2025 г.

ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук 664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова,  
д. 130

Email: gurina@isem.irk.ru

Телефон: 8(3952)500646 доб. 233

Подпись Гуриной Л.А. заверяю.

