

DOI:

НОВЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО И СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Ядыкин И.Б., Искаков А.Б.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва

ул. Профсоюзная д.65

Jad@ipu.ru, isk_alex@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены новые методы мониторинга устойчивости и управления в крупно-масштабных электроэнергетических системах, разрабатываемые в рамках проекта Российского научного фонда 19-19-00673. Основным теоретическим результатом выполнения проекта явилась разработка новой концепции модального анализа по Ляпунову (Lyapunov modal analysis - LMA), которая объединяет в себе два подхода для оценки устойчивости динамических систем – а именно, селективный модальный анализ и спектральные разложения функций Ляпунова.

Ключевые слова: селективный модальный анализ, спектральные разложения грамианов, многоагентные системы, электроэнергетические системы, оценка устойчивости, управление

Практически все существующие методы модального анализа не учитывают динамику взаимодействия собственных мод системы, существенно влияющую на вариации энергии её возмущений. Оригинальный метод субграмианов [1, 2] позволяет получать спектральные разложения энергетических функционалов и количественно оценивать взаимодействие собственных мод в динамической системе. Под энергетическими функционалами понимаются обобщения функций Ляпунова, которые характеризуют энергию сигнала либо энергию возмущения системы при её отклонении от равновесного состояния. Целью выполняемого проекта РФ №19-19-00673 является разработка – на основе метода субграмианов – методов, алгоритмов и общей теории для оценки устойчивости и надёжности распределённых динамических систем посредством анализа спектральных разложений энергии возмущения и явного учёта взаимодействия собственных мод системы, а также топологии распределённой системы. Поскольку в распределённых системах каждая собственная мода ассоциирована с определёнными узлами графа взаимодействий системы, одной из задач проекта является разработка новых критериев оценки состояния системы на основе комбинации метода субграмианов и информации о топологии сети. Полученные критерии позволят эффективно оценивать запасы устойчивости в сечениях сети, проводить её структурный анализ и выявлять её «узкие места». Разрабатываемые методы помогут точнее учесть межмодальные и резонансные взаимодействия в больших мультрезонансных системах и соотнести их со структурой и сечениями сети. На основе развитой теории планируется предложить новые технологии адаптивного мониторинга и управления электроэнергетической системой (ЭЭС). В настоящем докладе приводится обзор основных результатов, полученных в ходе выполнения проекта в 2019 и 2020 годах.

Основным теоретическим результатом выполнения проекта явилась разработка новой концепции модального анализа по Ляпунову (Lyapunov modal analysis - LMA), которая объединяет в себе два подхода для оценки устойчивости динамических систем – а именно, селективный модальный анализ и спектральные разложения функций Ляпунова [3]. Функции Ляпунова при этом выбираются так, чтобы отражать величину проинтегрированной по времени энергии, связанной с возмущением конкретной переменной состояния или собственной моды системы. Предложенный подход позволяет анализировать устойчивость динамической системы “в малом” с точки зрения энергии возмущений, накапливаемой в переменных состояния во времени. В отличие от стандартного модального анализа, который анализирует динамику отдельного возмущения, LMA позволяет анализировать такие системы, в которых случайные возмущения возникают с течением времени. Предложенный подход также позволяет определять и оценивать межмодальные взаимодействия в динамических системах на основе интегральной энергии производимой в системе в результате совместного действия этих мод во времени, а не в смысле их совместной мгновенной динамики. Традиционные коэффициенты участия (participation factors) характеризуют относительный вклад мод системы и переменных состояния в эволюцию состояний и мод соответственно. В отличие от этого, на основе LMA были предложены коэффициенты участия по Ляпунову (Lyapunov participation factors – LPF), которые характеризуют аналогичные вклады в соответствующие функции Ляпунова, определяющие

интегральную энергию, связанную с состояниями и модами на бесконечном или конечном интервале времени. Для тестовой электроэнергетической системы (ЭЭС) Кундура было показано, что показатели LMA позволяют идентифицировать резонансные модальные взаимодействия, слияние собственных мод и их приближение к границе устойчивости, а также связывать эти явления с конкретными переменными состояниями.

Другая важная задача проекта – разработать варианты метода субграмианов, учитывающие факторы нестационарности и нелинейности модели. В этом случае энергетические функционалы определяются решениями более сложных обобщённых уравнений Ляпунова. В ходе выполнения проекта были рассмотрены билинейные эффекты в динамике ЭЭС. Этот важный класс слабонелинейных эффектов возникает при воздействиях малой величины. В ЭЭС такие эффекты могут быть связаны как с учётом детерминированных билинейных членов в динамике системы, так и с возникновением случайного шума в параметрах нагрузки или измерениях [4]. В докладе на Всемирном Конгрессе IFAC [5] спектральные разложения функций Ляпунова были впервые применены к анализу поведения билинейной модели двухрайонной электроэнергетической системы. В отличие от техники нормальных форм и метода модальных рядов, спектральные разложения рассматривались не для динамики переменных состояния, а для функций Ляпунова, которые характеризуют L2-нормы переменных или сигналов во временной области. Решение обобщённого уравнения Ляпунова для билинейной системы было представлено в виде суммы эрмитовых матриц, соответствующих отдельным собственным значениям системы или их парным комбинациям. Разработан итерационный алгоритм вычисления спектральных членов для устойчивых билинейных систем. В тестовом эксперименте с целью анализа устойчивости при переходных процессах оценивалось значение отдельных собственных мод и их парных комбинаций в зависимости от величины билинейных членов. Полученные результаты согласуются с интуитивной интерпретацией, полученной из уравнений модели и анализа собственных значений. Спектральные разложения функций Ляпунова позволили указать область применимости линейной модели и выявить доминирующие собственные моды при анализе переходной устойчивости электроэнергетической системы.

В ходе выполнения проекта получен ряд других важных теоретических результатов.

- Подготовлен обзор применения методов спектрального и модального анализа для исследования устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) и обеспечения их надёжного функционирования [6].

- Для описания интеллектуальных электрических сетей (smart grids) применён формализм стохастических гибридных систем (SHS), в которых стохастика влияет как на непрерывные компоненты состояния, так и на дискретные переходы между состояниями [7]. Предложенный подход позволяет при оценке устойчивости и стабилизируемости smart grids применять аппарат, разработанный для SHS, например, методы совместного спектрального радиуса и обобщённого спектрального радиуса. Данный подход может быть использован, в частности, для оценивания ошибок прогнозной динамики электрической сети в результате запаздываний и неточностей фиксации переходов дискретных состояний, к которым относятся переключения коммутации.

- В работе [8] были получены спектральные разложения решений уравнений Сильвестра – Ляпунова – Крейна (СЛК) в матричном виде, которые позволяют оценивать местоположение спектра матриц с простым спектром. Предложенный метод локализации открывает новые возможности для локализации спектра несимметричных матриц путём исследования спектра вспомогательной симметричной матрицы. В электроэнергетике такая задача возникает при необходимости оценить местоположение определённых собственных значений ЭЭС, вызывающих медленные и плохо демпфируемые колебания в системе. Предложенный подход может быть использован в алгоритмах спектральной кластеризации, с помощью которых решаются задачи разделения ЭЭС на «острова» (islanding) при авариях.

При выполнении проекта также получены первые прикладные результаты.

- Подготовлены тестовые модели ЭЭС. Создано программное обеспечение для расчёта установившихся режимов и моделирования задач статической и динамической устойчивости. В частности, разработаны нелинейные динамические модели 68-узловой и 145-узловой тестовых схем IEEE, традиционно используемых для анализа статической устойчивости (устойчивости в «малом») и низкочастотных колебаний. Разработана большая нелинейная динамическая модель ОЭС Сибири, содержащая 1129 узлов и 1491 связей. Верификация модели выполнялась путём сравнения отклика динамической модели с реальными осциллограммами напряжения и частоты, полученными при возникновении возмущений в ОЭС Сибири.

- В работе [9] на основании подхода LMA предложены два показателя для оценки запаса статической устойчивости, учитывающих собственные колебания системы. Коэффициенты участия по Ляпунову (LPF) характеризуют относительное участие мод системы в энергии возмущения, накопленной в переменных состояниях системы во времени. В отличие от стандартных факторов участия, LPF отражают увеличение участия тех мод, которые приближаются к границе своей устойчивости. Энергии модального взаимодействия по Ляпунову (Lyapunov modal interaction energies – LМIE) позволяют охарактеризовать парные взаимодействия между собственными модами системы с помощью полной энергии возмущения, создаваемой их взаимодействием во времени. Проведены численные сценарные эксперименты для двухрайонной тестовой ЭЭС Кундура, подтвердившие эффективность предложенных показателей и критериев.

- В работе [10] предложены динамические модели гибридной изолированной энергосистемы переменного / постоянного тока, состоящей из четырех электрических сетей с возобновляемыми генерирующими установками и системами хранения энергии, с использованием передовых методов, основанных на глубоком обучении с подкреплением и интегральных уравнениях. Проанализирован потенциал ветровой и солнечной радиации на нескольких участках на берегу озера Байкал, а также электрическая нагрузка в зависимости от климатических условий. Оптимальный подбор компонентов системы накопления энергии поддерживается в онлайн-режиме. Подход обоснован с использованием ретроспективных наборов метеорологических данных. Такая формулировка позволяет разработать рекомендации по оптимальному управлению несколькими автономными гибридными энергосистемами постоянного и переменного тока с различными структурами, составом оборудования и видами переменного или постоянного тока. Разработанный подход позволяет получать ценную информацию на различных этапах разработки проектов гибридных энергосистем переменного / постоянного тока с автономными гибридными системами солнечно-ветровой генерации.

- Разработан алгоритм определения центров качаний, доминирующих в ЭЭС, и соответствующих им критических «коридоров» на графе сети, основанный на показателях спектральных разложений интегральной энергии возмущения напряжений в узлах сети. При этом характерная структура распределения возмущений напряжения на графе ЭЭС определяется набором узлов, в которых модальные вклады в интегральную энергию возмущения напряжений имеют наибольшую величину для выбранного собственного числа системы. Были проведены тесты, демонстрирующие применимость разработанного алгоритма для межрайонных колебаний, возникающих в тестовой схеме IEEE с 68 узлами. Показано, что распределения возмущений напряжения на графе энергосистемы, полученные новым методом, в целом совпадают с распределениями, полученными при возбуждении системы соответствующими вынужденными колебаниями.

- В рамках работ по применению метода субграмианов к медико-биологическим системам сделан доклад [11], посвященный анализу модели метаболизма глюкозы при сахарном диабете I-го типа. Исследовано использование энергетических функционалов, получаемых с помощью метода субграмианов, для оценивания состояния пациента после получения дозы инсулина. Математическое моделирование подтвердило возможность использования конечных и бесконечных грамианов и энергетических функционалов для анализа виртуальной энергии поджелудочной железы.

В рамках развития уже полученных в проекте результатов, в настоящее время продолжают исследования по ряду направлений. А именно: формулировка и обоснование показателей для количественной оценки отдельных мод и их взаимодействия в нестационарной и/или пространственно-распределенной ЭЭС, разработка версии метода субграмианов для анализа устойчивости ЭЭС с учётом факторов нелинейности и нестационарности, синтез алгоритмов настройки системных стабилизаторов крупных генераторов в ЭЭС на основе метода субграмианов, разработка алгоритмов определения оптимального расположения элементов системы мониторинга переходных режимов (СМПР) на графе ЭЭС на основе метода субграмианов, разработка принципов устойчивого децентрализованного управления для гибридных микросетей, разработка методов быстрых вычислений спектральных разложений грамианов для оценки устойчивости больших динамических систем.

Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 19-19-00673.

Литература

1. *Yadykin I.B.* On properties of gramians of continuous control systems, *Automation and Remote Control* 71(6), 1011–1021 (2010).
2. *Yadykin I.B., Iskakov A.B., Akhmetzyanov A.V.* Stability analysis of large-scale dynamical systems

- by sub-gratian approach, *Int. J. Robust Nonlin. Control* 24 (8-9), 1361-1379 (2014)
3. *Iskakov A.B., Yadykin I.B.* Lyapunov modal analysis and participation factors with applications to small-signal stability of power systems, arXiv:1909.02227 [math.OC], (Sep. 2019). <https://arxiv.org/abs/1909.02227>
 4. *Ядыкин И.Б., Искаков А.Б.* Спектральные разложения решений уравнений Ляпунова для билинейных динамических систем // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 488. - №6. - С. 599-603.
 5. *Iskakov A.B., Yadykin I.B.* Analysis of a bilinear model of an electric power system using spectral decompositions of Lyapunov functions, Preprint of IFAC World Congress 2020, Paper No. 2834. (2020)
 6. *Воропай Н.И., Голуб И.И., Ефимов Д.Н., Искаков А.Б., Ядыкин И.Б.* Спектральный и модальный методы в исследованиях устойчивости электроэнергетических систем и управлении ими, *Автоматика и телемеханика*, 2020, № 10 (в печати).
 7. *Козякин В.С., Кузнецов Н.А., Чеботарев П.Ю.* Консенсус в асинхронных мультиагентных системах. III. Конструктивная устойчивость и стабилизируемость // *Автоматика и телемеханика*. 2019. № 6. С. 3–37.
 8. *Agaev R.P.* Localization of the Spectra of Laplacian Matrices in The Area Restricted by an Ellipse, Proceedings of 2019 12th International Conference “Management of Large-Scale System Development,” (MLSD 2019). IEEE Xplore Digital Library, 8911096 (Nov. 2019).
 9. *Kutyakov E.J., Dushin S.V., Iskakov A.B., Abramnikov A.N.* Investigation of Lyapunov modal analysis framework using the two-area test power system, Proceedings of 2019 12th International Conference “Management of Large-Scale System Development,” (MLSD 2019). IEEE Xplore Digital Library, 8910988 (Nov. 2019).
 10. *Sidorov D., Panasetsky D., et al.* Toward Zero-Emission Hybrid AC/DC Power Systems with Renewable Energy Sources and Storages: A Case Study from Lake Baikal Region, *Energies* 2020, 13, 1226; doi:10.3390/en13051226
 11. *Ядыкин И.Б., Катаев Д.Е., Галяев И.А.* Оценивание аномалий баланса виртуальной энергии математической модели поджелудочной железы для создания искусственной поджелудочной железы. Материалы XII Международной конференции “Управление развитием крупномасштабных систем” (MLSD 2019), М.: ИПУ РАН, 2019, С. 1159-1161, ISBN 978-5-91450-237-6.