

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу

Храменкова Владислава Анатольевича

«Нелокальная устойчивость энергосетей с хаб-топологией», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. - Радиофизика

В условиях непрерывного роста и развития современных энергосетей особенно актуальной становится задача обеспечения их устойчивости. Она заключается в нахождении условий установления и поддержания нормального режима работы энергосетей. В рамках этой задачи энергосети рассматриваются как динамические сети из активных узлов-генераторов и узлов-потребителей, взаимодействующих между собой посредством нелинейных связей, реализуемых через электрические сети. Динамика сетей взаимодействующих агентов является традиционным объектом исследований нелинейной динамики и радиофизики. При этом большое распространение получили упрощенные модели генераторов, схожие с уравнениями Курамото второго порядка (second-order Kuramoto model), которые описывают поведение сетевых систем различной природы. Поэтому результаты, касающиеся устойчивости энергосетей, могут быть естественным образом обобщены на случай других динамических сетей. Моделирование установившихся и переходных режимов работы энергосетей, которым соответствуют аттракторы динамических систем и движения между ними, дает возможность интерпретировать различные аварийные ситуации с помощью формализма нелинейной динамики. Становится возможным установление базовых закономерностей обеспечения устойчивости энергосетей и ее нарушения. Для этой цели могут быть использованы модели типичных или общих подсетей, входящих в состав различных энергосетей. Изучение таких моделей подсетей способствует пониманию динамики энергосетей в целом. Таким образом, исследование энергосетей как динамических сетей дает вклад в общую теорию устойчивости энергосетей и развивает понимание явлений, происходящих в сложных радиофизических системах.

Диссертационная работа Храменкова Владислава Анатольевича посвящена исследованию моделей энергосетей с хаб-топологией, изучению нелокальной устойчивости синхронных режимов, которые принципиально важны для энергосетей, а также развитию методов оценки устойчивости синхронных режимов по отношению к различным возмущениям.

Диссертационная работа характеризуется органичным сочетанием результатов, полученных аналитическими и численными методами. Такие результаты дополняют друг друга и не являются противоречивыми.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 148 наименований. Объем работы составляет 148 страниц, включая 55 иллюстраций. Диссертационная работа имеет логично организованную структуру, последовательное изложение результатов, хорошее графическое оформление.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, представлен обзор литературы по теме, сформулирована основная цель работы и четыре основные задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели. Представлено описание научной новизны, методологии и методов исследований, аргументы в пользу достоверности полученных результатов, а также описана их практическая значимость. На основании результатов сформулированы пять положений, выносимых на защиту. Приведены сведения об апробации полученных результатов.

В **первой главе** вводятся основные объекты диссертационного исследования – модели энергосетей в формате динамических систем, описываемых системами обыкновенных дифференциальных уравнений. В частности, детально описываются модель синхронных моторов и модель эффективной сети. Определены основные режимы работы энергосетей, такие как синхронный (нормальный), квазисинхронный и асинхронный режимы. Приведены основные причины возмущений параметров и переменных, способные нарушить синхронный режим работы энергосети.

Во **второй главе** представлены результаты исследования режимов работы энергосети с топологией хаб-кластера в рамках модели синхронных моторов. Исследованы случаи хаб-кластеров из трех и четырех элементов. С помощью численного моделирования в пространстве параметров локализованы области, где имеет место глобально устойчивое состояние равновесия, отвечающее синхронному режиму работы энергосети. Также определены области, где устойчивый синхронный режим сосуществует с другими типами режимов: квазисинхронными и асинхронными. Предложена аналитическая оценка области притяжения синхронного режима в виде минимального расстояния от соответствующей устойчивой точки до одной из поверхностей уровня функции Ляпунова, проходящих через седла. Проведен сравнительный анализ аналитической оценки с результатом численного счета. Аналитическая оценка размера бассейна притяжения получена в общем виде для сети из произвольного

числа узлов. В соответствии с ней характерный размер бассейна притяжения устойчивого синхронного режима растет при увеличении количества узлов в сети.

Глава три посвящена моделированию динамики энергосети при подключении новой линии передач или подсети для проверки так называемого эффекта Браеса, который заключается в том, что при подключении дополнительной линии передач в сеть, наблюдается потеря устойчивости синхронного режима. Проведен анализ динамических режимов модели типичной трехэлементной подсети – мотива. В пространстве параметров, отвечающих за пропускные способности действующих линий передач мотива и его новой линии, обнаружена область сосуществования устойчивого синхронного решения и автоколебательных решений как периодических, так и хаотических. Описаны механизмы появления мультистабильности режимов, а также механизмы выхода системы на автоколебательный аттрактор. Данный эффект также исследован при объединении подсетей в виде мотива и хаб-кластера. Численно определены условия и стратегии подключения подсети, когда синхронный режим остается глобально асимптотически устойчивым.

В **главе четыре** проведено исследование хаб-кластера с разными длинами линий электропередач, имеющих активно-индуктивный характер сопротивления. Анализ динамики хаб-кластера проведен с помощью вспомогательных систем сравнения. Получен критерий парциальной устойчивости отдельных пар потребитель-генератор хаб-кластера, позволяющий выделять области начальных условий и параметров безопасной работы указанных пар элементов. Проведена апробация критерия на сети, состоящей из девяти пар потребитель-генератор. Результаты численного эксперимента полностью подтвердили правильность критерия.

В **главе пять** в рамках модели эффективной сети изучена устойчивость многомашинной энергосети, состоящей из нескольких генераторов, питающих общую нагрузку, представленную постоянным полным сопротивлением. Установлены условия на параметры схемы замещения, позволяющие редуцировать эффективную сеть с глобально связанными узлами до эффективной сети с топологией звезды. С ее помощью получены условия мультистабильности синхронных режимов в многомашинной энергосети. В случае трехмашинной энергосети подробно изучена нелокальная устойчивость синхронных режимов, а также переключения между ними, обусловленные действием различных возмущений. Рассмотрена задача безопасного подключения (отключения) генератора к (от) энергосети в случае различных исходных синхронных режимов ее работы.

Глава шесть посвящена исследованию энергосети Нижнего Новгорода в рамках модели синхронных моторов. Представлено детальное описание модели сети. Проведено численное моделирование ее динамики, исследована устойчивость отдельных узлов-генераторов и узлов-потребителей, изучен вопрос об устойчивости синхронного режима к скачкам мощности в отдельных узлах, которые моделируются прямоугольными импульсами.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Наиболее важными результатами диссертационной работы, на мой взгляд, являются следующие.

1. Новый сценарий появления парадокса Браесса. Показано, что данный парадокс может проявляться в результате возникновения мультистабильности синхронного и других (квазисинхронных или асинхронных) режимов без потери его устойчивости или исчезновения. Такой механизм, с одной стороны, приводит к тому, что в реальной энергосети он может быть не замечен, так как при плавном изменении параметров системы можно пройти область мультистабильности, оставаясь в бассейне притяжения устойчивого равновесия, соответствующего синхронному режиму. С другой стороны, флуктуации или резкие скачки напряжения могут перекинуть систему в режим автоколебаний, и их появление будет слабопрогнозируемым.

2. Разработка математических моделей на основе эталонных осцилляторов с детальной интерпретацией физического смысла переменных и параметров. Получен ряд моделей, имеющих конкретные физические интерпретации. Получена модель для энергетической системы Нижнего Новгорода.

3. Получены условия безопасного подключения и отключения линий передачи или подсетей для моделей различного типа.

Научные результаты диссертационной работы являются новыми и оригинальными, что подтверждается публикацией их в ведущих зарубежных высокорейтинговых научных журналах. Достоверность результатов и выводов работы не вызывает сомнений.

По диссертации имеется ряд замечаний и вопросов:

1. В литературе хорошо известны такие сети, как звездчатые сети, которые соединены через центральный элемент. Являются ли звездчатые сети и хаб-сети полными аналогами или есть принципиальное отличие?

2. В главе 2 представлены аналитические результаты по оценке размера бассейна притяжения устойчивого равновесия, соответствующего синхронному режиму. Но при этом не представлено численно рассчитанных бассейнов притяжения, только численная оценка максимального радиуса сферы, внутри

которой точки притягиваются к устойчивому равновесию. С учетом того, что сосуществующие аттракторы являются периодическими или хаотическими, они могут иметь сложные фрактальные бассейны притяжения. Было бы интересно посмотреть их структуру.

3. Оценка границы устойчивости (см. рис. 2.7), полученная аналитически, значительно меньше границы, полученной численно. С чем может быть связано расхождение? Было бы интересно посмотреть на поведение системы при прохождении параметров по линии оценок в условиях шумового воздействия, будут ли в этом случае переключения между режимами.

4. В главах 3-5 проводится оценка вероятности реализации режимов по выбранным случайно начальным условиям. При этом можно просканировать область фазового пространства равномерно с некоторым шагом и дать оценку отношения объемов областей притяжения аттракторов в этой области к объему всей области. Почему был выбран такой способ задания начальных условий. Каким образом формировался случайный набор начальных условий?

5. При исследовании модели энергосети Нижнего Новгорода обсуждаются вопросы нарушения устойчивости из-за скачков мощности в отдельных узлах энергосети. Интересным было бы моделирование какой-либо реальной аварии с помощью разработанной модели.

6. На рис.2.1 представлена шкала, к которой не дано пояснения, поэтому не понятно, что она означает.

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы.

В итоге считаю, что диссертационная работа Храменкова Владислава Анатольевича представляет собой решение актуальной и новой радиофизической задачи по анализу мультстабильных решений в энергосетях с хаб-топологией, а также разработке аналитических методов для оценки размеров бассейна притяжения состояния равновесия мультстабильных систем. Диссертация полностью соответствует специальности 1.3.4. — Радиофизика (пп. 1, 4 паспорта специальности). Автореферат правильно отражает содержание работы.

По результатам диссертационной работы опубликовано 6 статей в рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в международные системы научного цитирования Web of Science и Scopus, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук: «Chaos, Solitons & Fractals», «Chaos», «Cybernetics and Physics», «Известия вузов. ПНД». Результаты научной работы были широко представлены на различных международных и всероссийских конференциях. Получено свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ.

Результаты диссертационной работы имеют прикладную значимость, в первую очередь необходимо отметить важность данной работы для предприятий энергосистемы, также результаты найдут применение при решении задач в области исследования связанных нелинейных осцилляторов, которые ведутся в Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), Национальном исследовательском университете «Высшая школа экономики» (г. Москва, г. Нижний Новгород), Национальном исследовательском Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского (г. Саратов), Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. (г. Саратов), Институте радиотехники и электроники РАН (г. Москва, г. Саратов), Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород). Также результаты могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Радиофизика» в рамках курсов, посвященных теории автоколебательных процессов.

Таким образом, считаю, что диссертационная работа Владислава Анатольевича Храменкова вносит важный вклад в развитие современных представлений о динамике ансамблей нелинейных осцилляторов, устойчивости энергосетей как одного из направлений радиофизики и теории нелинейных колебаний и волн. Работа удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Храменков Владислав Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. — Радиофизика.

Официальный оппонент

Доцент кафедры фундаментальной математики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (г. Нижний Новгород), кандидат физико-математических наук (01.04.03), доцент

Станкевич Наталия Владимировна

25 февраля 2025 г.

Почтовый адрес: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12.

Телефон: +7 9033290994.

E-mail: nstankevich@hse.ru



Н. В. Станкевич
ЗАВЕДЕВА НАЧАЛЬНИКОМ
ОТДЕЛА КАДРОВ
Н.А. ЕРМОЛИНОЙ