

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Храменкова Владислава Анатольевича
«Нелокальная устойчивость энергосетей с хаб-топологией»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.4 — радиофизика.

Моделирование динамических режимов энергосетей является актуальным направлением в современной теории нелинейных колебаний (нелинейной динамике). Модели энергосетей представляют собой ансамбли нелинейных элементов со сложными связями между ними. Исследования таких моделей вызывают большой интерес в соответствии с логикой развития фундаментальных теоретических представлений о коллективной динамике сложных систем. Сложные ансамбли и многослойные сети служат моделями систем различной природы (например модели нейронных систем в биофизике), однако, при этом, характер их поведения, явление синхронизации, образование различных кластерных структур, эффекты, связанные с воздействием шума, могут иметь много общего. Таким образом, исследования моделей энергосистем вносят вклад в общие теоретические представления о динамике сложных систем. С другой стороны, моделирование энергосистем, определение возможных синхронных и асинхронных режимов, анализ стабильности синхронных режимов при внешних воздействиях различного характера имеет большую практическую важность, поскольку позволяет, в определенной степени, найти условия оптимального функционирования реальных энергетических сетей и оценить опасность нарушения нормального режима работы. Такие оценки очень важны при проектировании новых узлов энергетических систем, расчете нагрузок и параметров режима работы. На сегодняшний день исследуемые модели, конечно, не могут совершенно точно описать реальные энергосети в силу сложности последних. Однако даже упрощенные модели могут дать важную информацию о возможных проблемах и способах их решения.

Диссертационная работа Владислава Анатольевича Храменкова посвящена анализу моделей энергосетей, имеющих топологию хаб-кластера. Её актуальность не вызывает сомнений. Проведенные исследования интересны и важны и с теоретической точки зрения, и в плане возможных

приложений к решению практических задач обеспечения стабильной работы энергосистем. Работа полностью соответствует специальности «радиофизика», поскольку посвящена исследованию колебательных процессов в определенном классе нелинейных систем. В работе применяются аналитические и численные методы, разработанные в рамках радиофизики и нелинейной динамики.

В диссертационном исследовании В.А. Храменкова рассматривается ряд моделей энергосети, имеющих сходную топологию звезды с центральным хабом. Эти модели относятся к двум типам, известным в литературе: модель синхронных моторов (МСМ) и модель эффективной сети (МЭС). В последнем случае делаются предположения о характере связей, позволяющие перейти к хаб-топологии. Такие упрощенные модели позволяют использовать при их исследовании не только численное моделирование, но и аналитические методы, а полученные результаты могут быть применимы и к более сложным системам. В первой главе диссертации изложено описание различных подходов к моделированию энергетической сети и границ их применимости. Во второй главе анализируется модель МСМ с топологией хаб-кластера с несколькими генераторами и одним потребителем (синхронным мотором), выступающим в качестве хаба. Построены карты режимов для сети из трех и четырех узлов, установлены области существования синхронных, квазисинхронных и асинхронных режимов на плоскости управляющих параметров. Проведен теоретический анализ нелокальной устойчивости синхронного режима с использованием функции Ляпунова, что позволило оценить размер бассейна притяжения синхронного режима. В третьей главе рассматривается базовая МСМ модель из двух генераторов и одного мотора. Исследуются изменения режима при введении дополнительной линии связи между моторами. На примере данной простой модели установлен новый сценарий эффекта Браеса, связанный с переходом системы в область сосуществования синхронного и асинхронного режимов (мультистабильность) в результате введения дополнительной связи двух узлов. В области мультистабильности исследована устойчивость синхронного режима по отношению к различным возмущениям начального состояния. Исследованы условия безопасного объединения рассмотренной базовой модели и хаб-кластера с генератором в качестве хаба. В четвертой

главе исследуется модель (МСМ) неоднородной энергосети в виде хаб-кластера с генератором в качестве хаба и различной длиной линий передач между хабом и нагрузками. При этом учитывается как индуктивное, так и активное сопротивления линий передачи. Получен критерий устойчивости синхронного режима для отдельных пар потребитель-генератор, позволяющий определить значения длин линий передачи, при которых в данной паре устанавливается тот или иной режим. В пятой главе рассматривается модель эффективной сети (МЭС) для нескольких генераторов с общей нагрузкой, которая при определенных условиях, наложенных на коэффициенты передачи, сводится к сети с топологией хаб-кластера, все узлы которого являются генераторами. Установлены области устойчивых синхронного и асинхронного режимов на плоскости управляющих параметров, показана стабилизирующая роль демпферного коэффициента роторов генераторов, определены условия безопасного подключения и отключения генератора, при которых сохраняется синхронный режим. Детально исследован эффект мультистабильности на примере сети с тремя генераторами. Проанализировано влияние возмущений различных переменных на установление синхронного режима. Рассмотрено воздействие источников цветного гауссова шума, моделирующего флуктуации мощностей турбин. Получены статистические характеристики переключений режимов, вызванных шумом. В последней, шестой главе исследована модель (МСМ) энергосети Нижнего Новгорода, при построении которой использована реальная топология сети и реальные характеристики линий передачи. Численный анализ модели выявил наиболее слабые, с точки зрения стабильности синхронного режима, узлы (подстанции). Было установлено, что такие подстанции являются наиболее удаленными от генераторов.

Из приведенного краткого содержания видно, что проведено объемное сложное исследование целого ряда моделей. Хочется отметить прекрасное владение автором как теоретическими методами (метод функции Ляпунова, теоретический анализ состояний равновесия, использование свойств симметрии для упрощения исследуемой модели), так и аппаратом численного моделирования с расчетом различных динамических и статистических характеристик режимов и с применением специально

разработанных программ. Диссертационная работа содержит ряд новых научных результатов, которые интересны с теоретической точки зрения, а также могут быть использованы при оценке устойчивости функционирования реальных энергосетей и разработке соответствующих рекомендаций. Особо можно отметить такие результаты как оценка размера области притяжения синхронного режима методом функции Ляпунова, установление нового механизма парадокса Браеса, полученные оценки безопасного подключения и отключения узла, оценки безопасного объединения сетей, детальный анализ мультистабильности в модели сети генераторов с общей нагрузкой. Впечатляет исследование модели энергосети Нижнего Новгорода с реальными характеристиками линий передач. Оно показывает применимость методов и результатов работы к конкретным практическим задачам.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы в работе научных коллективов, занимающихся проблемами радиофизики, нелинейной динамики и моделирования сложных систем в таких организациях, как ИРЭ РАН, СГУ, СГТУ, ННГУ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ИПМаш РАН, АО ЭНИН, ИСЭМ СО РАН и др., а также применяться в учебном процессе при разработке новых курсов и практикумов.

Диссертационная работа не содержит существенных недостатков, однако всё же можно сделать ряд замечаний по тексту диссертации:

1. При выводе уравнений (2.2) перенормировкой был убран параметр, характеризующий пропускную способность линий передачи. Его влияние на динамические режимы системы может быть существенным и было бы полезно оставить этот параметр в качестве управляющего, тем более что в модели (3.2) параметры, задающие пропускные способности линий передачи используются.
2. На странице 36, строка 7 сверху говорится, что минимальное расстояние $r_{\min}$ до границы бассейна притяжения точки равновесия, соответствующей синхронному режиму, растёт с увеличением числа элементов хаб-кластера. В то же время увеличивается мультистабильность режимов. Как согласуется одно с другим?
3. Введение вспомогательных систем (4.11), (4.12) требует некоторых дополнительных пояснений.

4. В разделе 5.1 потенциалы узлов и разности фаз генераторов обозначены одной и той же буквой φ , что не очень удачно.
5. В формуле (5.6) использовано обозначение R_k , которое не пояснено.
6. Параметр α в разных моделях имеет разный смысл. Смысл альфы в уравнениях (5.22) нужно было бы пояснить. Вообще желательно было бы чаще давать расшифровку параметров, а не просто использовать буквенные обозначения. Тогда текст был бы легче для понимания.
7. На странице 98 в строках 13 -12 снизу говорится о двух устойчивых однородных состояниях O_3 и O_4 . Вероятно, это опечатка и речь идет о неоднородных состояниях.
8. Из Рис.5.14 можно сделать вывод, что бассейны притяжения аттракторов при определенных параметрах имеют сложное строение с фрактальными границами. В этом случае трудно выделить такую окрестность, аттрактора, чтобы в неё не попали точки из бассейна другого аттрактора. Как это могло сказаться на определении вероятностей нахождения в окрестности устойчивых равновесий?
9. Не понятно, почему на Рис.6.7 все графики для безопасных значений скачков мощности кроме графика (а) одинаковые? Длительность скачков мощности, превышающая 10 единиц уже не важна? Но на странице 132 говорится, что реакция энергосети зависит от длительности скачка.

Указанные погрешности в тексте являются не принципиальными и несколько не снижают общего положительного впечатления о работе. Диссертационная работа В.А. Храменкова представляет исследования по актуальной проблематике, проведенные на высоком уровне и прекрасно изложенные. Автореферат полно и точно отражает содержание работы. Диссертационная работа свидетельствует о высокой квалификации её автора. В ней получены важные новые научные результаты, вносящие заметный вклад в моделирование режимов функционирования и определение условий стабильной работы энергетических сетей. Диссертация В.А. Храменкова представляет собой законченное оригинальное научное исследование. Она соответствует специальности 1.3.4 – радиофизика и удовлетворяет всем требованиям пп. 9-11, 13-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013,

предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Считаю, что автор диссертации, В.А. Храменков, достоин присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Саратовский национальный
исследовательский государственный университет имени
Н.Г. Чернышевского», доктор физико-математических наук
(01.04.03-радиофизика), профессор



Вадивасова Татьяна Евгеньевна

19.02.2025

Почтовый адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83
Телефон: +7(8452)26-16-96
Электронный адрес: rector@sgu.ru
Официальный сайт: www.sgu.ru

