

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПМаш РАН)



В.О., Большой пр-т, д. 61, Санкт-Петербург, 199178

Тел.: +7 (812) 321-47-78, факс: +7 (812) 321-47-71;

<https://ipme.ru>, e-mail: [ipmash@ipme.ru](mailto:ipmash@ipme.ru)

ОКПО 04850273 ОГРН 1037800003560 ИНН 7801037069 КПП 780101001

Исх.№

УТВЕРЖДАЮ



В.А. Полянский

2025 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**Института проблем машиноведения Российской академии наук 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 диссертационной работе В.А. Храменкова представлены результаты исследования нелокальной устойчивости нормального (синхронного) режима централизованных энергосетей с хаб-топологией, то есть хаб-кластеров, которые могут играть роль типичных подсетей крупных энергообъединений. Также в работе приведены результаты исследования устойчивости модели энергосети Нижнего Новгорода. Цель представленной работы состоит в нахождении условий нелокальной устойчивости энергосетей при внезапных изменениях нормального режима работы, которые обусловлены отключением или подключением генераторов и линий электропередачи, изменением их пропускной способности, объединением энергосетей, колебаниями мощностей турбин генераторов и мощностей нагрузок.

**Актуальность диссертации** определяется развитием методов и подходов общей теории устойчивости энергосетей в рамках анализа нелокальной устойчивости типичных подсетей в виде хаб-кластеров к различным возмущениям. Энергосети в виде хаб-кластеров рассмотрены с позиции нелинейного динамического подхода как динамические сети из взаимодействующих активных узлов-элементов: генераторов и потребителей электроэнергии. С помощью современных методов нелинейной динамики и численного моделирования определены величины, дающие наглядное представление о границах нелокальной устойчивости нормальных режимов хаб-кластеров. При этом в отличие от локального анализа устойчивости, становится возможным разделить возмущения нормального режима на безопасные и небезопасные. Первые ведут только к переходному процессу, который завершается восстановлением нормального режима, а вторые – к его нарушению. Актуальность работы также обусловлена приведенными в ней результатами по

исследованию модели энергосети Нижнего Новгорода, которые позволяют выделить ее наиболее уязвимые элементы.

**Научная новизна** представленной работы определяется развитыми в ней методами и подходами к определению границ нелокальной устойчивости нормальных режимов хаб-кластеров. Получен новый критерий устойчивости отдельных пар потребитель-генератор, входящих в состав хаб-кластера. Установлен новый сценарий потери устойчивости энергосети при добавлении линии электропередачи или увеличении пропускной способности действующей линии за счет подключения дополнительной параллельной цепи. Кроме того, в работе получены условия мультистабильности (сосуществования) нормальных режимов в многомашинной энергосети и изучены переключения между ними под действием различных возмущений, в том числе шума. На основании актуальных данных построена модель энергосети Нижнего Новгорода, учитывающая основные топологические особенности реальной сети, и проведен анализ ее устойчивости по отношению к возмущениям в отдельных узлах-элементах сети.

Результаты диссертационной работы обладают **теоретической и практической значимостью** и вносят вклад в общую теорию устойчивости энергосетей. Результаты, касающиеся устойчивости отдельных хаб-кластеров, могут быть использованы в качестве первого приближения при анализе энергосетей, содержащих хаб-кластеры как подсети. Разработанные методы и подходы к определению границ нелокальной устойчивости хаб-кластеров могут быть обобщены на случай других топологий энергосетей. Новый сценарий возникновения парадокса Браеса имеет место в энергосетях с различной топологией, что свидетельствует о его универсальности. Он должен учитываться при выборе пропускных способностей новых линий электропередачи.

Текст диссертационной работы содержит все необходимые сведения, которые позволяют убедиться в правильности предлагаемых методов и подходов, **достоверности и обоснованности** полученных результатов. Результаты работы опубликованы в авторитетных российских и зарубежных журналах, неоднократно докладывались на конференциях и семинарах различного уровня. **Личный вклад автора** адекватно отражен в диссертации и автореферате.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Объем работы составляет 148 страниц текста, включая 55 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 161 наименования, включая 13 публикаций автора по теме диссертации.

**Во Введении** приведена актуальность темы исследования, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертации, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации рассмотрены модели энергосетей из синхронных генераторов, питающих через передающие системы потребителей, представленных синхронными моторами или постоянными полными сопротивлениями. Соответственно, введены модель синхронных моторов (МСМ) и модель эффективной сети (МЭС). Приведены характеристики основных режимов работы энергосети: синхронного (нормального), квазисинхронного (относительно безопасного) и асинхронного (аварийного, небезопасного). Перечислены основные причины возмущений синхронного режима энергосети.

**Во второй главе** в рамках МСМ изучены режимы хаб-кластеров, состоящих из одного генератора, питающего нескольких потребителей или наоборот – одного потребителя, питающегося от нескольких генераторов. Построены диаграммы режимов работы хаб-кластеров из трех и четырех узлов. Выделены области параметров, где реализуется только синхронный режим, а также области, где наряду с синхронным режимом, сосуществуют квазисинхронные или асинхронные режимы. В последнем случае предложен аналитический подход, базирующийся на втором методе Ляпунова, который позволяет дать оценку границы безопасных возмущений синхронного режима. Приведено сравнение этой оценки с результатами численного моделирования.

**В третьей главе** показан новый сценарий возникновения парадокса Браеса в энергосетях. С помощью типичной подсети в виде трехэлементного мотива установлены основные закономерности парадокса, связанные с потерей устойчивости энергосети при добавлении новой линии электропередачи или увеличении пропускной способности уже действующей линии. Определены границы нелокальной устойчивости синхронного режима мотива при указанных изменениях в топологии энергосети. Приведены примеры энергосетей, в которых имеет место новый сценарий парадокса Браеса. В качестве сети, подсетью которой является мотив, рассмотрен хаб-кластер. Для объединенной сети построена диаграмма режимов, с помощью которой определены условия безопасного объединения мотива и хаб-кластера. Проведена классификация режимов, с точки зрения их безопасности для отдельных подсетей – мотива и хаб-кластера. Сформулированы основные сценарии поведения объединенной энергосети при изменении пропускной способности линии электропередачи между ними.

**В четвертой главе** рассмотрен хаб-кластер с различными линиями электропередачи. Исследована его динамика с помощью вспомогательных систем сравнения. Выработан аналитический критерий парциальной устойчивости, то есть устойчивости отдельных пар потребитель-генератор. Он позволяет выделять начальные условия и области параметров, соответствующие установлению синхронного или квазисинхронного режима в одной или нескольких парах потребитель-генератор. Критерий протестирован на примере хаб-кластера из одного генератора и девяти потребителей. Результаты численного моделирования полностью подтверждают результаты критерия. В приложении к четвертой главе приведена таблица с координатами точек кривой Трикоми.

**В пятой главе** в рамках МЭС рассмотрена многомашинная энергосеть из нескольких генераторов, питающих общую нагрузку в виде постоянного полного сопротивления. Получены условия на параметры схемы замещения многомашинной энергосети, позволяющие перейти от эффективной сети с глобально связанными узлами к эффективной сети с топологией звезды. Установлены условия мультистабильности синхронных режимов многомашинной энергосети, а также их основные характеристики – распределения токов по цепям сети и активные мощности генераторов, выдаваемые в сеть. Рассмотрены задачи о безопасном отключении и подключении генератора. На примере трехмашинной сети изучена нелокальная устойчивость синхронных режимов и переключения между ними под действием различных возмущений, в том числе шума. В приложении к пятой главе приведены замечания, касающиеся редукции эффективной сети до сети с топологией звезды.

**В шестой главе** построена модель синхронных моторов для энергосети Нижнего Новгорода. Получены таблицы режимов работы сети. Исследована устойчивость энергосети Нижнего Новгорода по отношению к возмущениям динамики отдельных генераторов и потребителей, а также к скачкам мощностей турбин генераторов и мощностей потребителей в виде прямоугольных импульсов. Выделены наиболее уязвимые узлы сети. Определено пороговое значение длины линии электропередачи конечного узла-генератора, превышение которой делает его уязвимым к скачкам мощности турбины.

**В Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы. К числу наиболее значимых результатов можно отнести следующие. Автором диссертации предложена модель типичной подсети крупных энергообъединений – подсеть в виде хаб-кластера. Определены области параметров, соответствующие различным режимам работы хаб-кластера. В частности, выделены области параметров, где всегда реализуется только синхронный режим. При параметрах, допускающих сосуществование синхронного и других режимов, предложен аналитический подход к определению величин возмущений, не нарушающих исходный синхронный режим. Получен аналитический критерий устойчивости отдельных пар потребитель-генератор из состава хаб-кластера, который может быть обобщен на случай энергосетей с другими топологиями. Предложена модель типичной подсети в виде трехэлементного мотива. С его помощью установлен новый сценарий возникновения парадокса Браеса в энергосетях. Показано, что он имеет место в

энергосетях с различной топологией. Этот результат свидетельствует в пользу универсальности выявленного сценария. Получены ограничения на значения пропускной способности линии электропередачи между хаб-кластером и мотивом, при выполнении которых обеспечивается установление синхронного режима в объединенной энергосети. Для энергосети из генераторов, питающих общую нагрузку в виде постоянного полного сопротивления, получены условия мультистабильности синхронных режимов с различными характеристиками. На примере трехмашинной энергосети изучены переключения между синхронными режимами, обусловленные действием различных возмущений. Построена модель синхронных моторов для энергосети Нижнего Новгорода и проведен анализ ее устойчивости по отношению к возмущениям в отдельных узлах сети. Выделены наиболее уязвимые узлы.

Результаты диссертации целесообразно использовать при развитии и совершенствовании энергосистем Нижегородского и других регионов.

#### **Замечания по содержанию диссертации.**

- В работе вместе с энергосетями рассматриваются и графы, ассоциированные с данной сетью. Однако не понятно, как используются свойства данных графов с точки зрения сохранения областей устойчивости и т.п.
- В работе неоднократно говорится об изменении фазового портрета при появлении возмущений (см., например, рис. 6 в автореферате). Однако не говорится о характере данных возмущений. Что из себя представляет функция возмущения? Почему именно такое возмущение выбрано, а не другое? Можно ли указать наилучшие возмущения с точки зрения возможности сохранения устойчивости?
- В работе рассматривается построение областей устойчивых и неустойчивых режимов при различных параметрах энергосети. Однако в нелинейных моделях важно знать и область притяжения. Как учитывается зависимость полученных решений от начальных условий?
- В шестой главе формируется модель энергосети Нижнего Новгорода. Однако не понятно, как задаются и откуда берутся параметры в динамических моделях синхронных генераторов и насколько полученная модель адекватна реальной.
- Во второй главе для поиска области устойчивости используется аппарат функций Ляпунова. Какой физический смысл имеет функция (2.8)?

Результаты диссертационной работы были рассмотрены и обсуждены на заседании научного семинара в ИПМаш РАН, состоявшегося 21 февраля 2025 года.

Диссертация В.А. Храменкова «Нелокальная устойчивость энергосетей с хаб-топологией» представляет собой самостоятельную и завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Она соответствует специальности 1.3.4. – Радиофизика и отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 в действующей редакции. Содержание работы достаточно полно отражено в автореферате. Диссертация и автореферат оформлены правильно. Автор работы В.А. Храменков заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Отзыв составил:

доктор технических наук, профессор,  
руководитель подразделения

«Управление сложными системами» ИПМаш РАН

11 февраля 2025 г.

УДОСТОВЕРЯЮ: Помощник Директора

ИПМАШ РАН

«15» февраля

2025 г.

Фрадков Александр Львович