

*На правах рукописи*

ХРАМЕНКОВ Владислав Анатольевич

**НЕЛОКАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ  
ЭНЕРГОСЕТЕЙ С ХАБ-ТОПОЛОГИЕЙ**

1.3.4 – радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

Научный руководитель:

**Некоркин Владимир Исаакович,**

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий отделом ФГБНУ «ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН».

Официальные оппоненты:

**Вадивасова Татьяна Евгеньевна,**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов);

**Станкевич Наталия Владимировна,**

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры фундаментальной математики НИУ «Высшая школа экономики» (г. Нижний Новгород).

Ведущая организация:

ФГБУН «Институт проблем машиноведения Российской академии наук» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится «17» марта 2025 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 при ФГБНУ «ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН и на сайте [www.ipfran.ru](http://www.ipfran.ru).

Автореферат разослан «10» февраля 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы

Современные энергосети (в англоязычной литературе – power grids) состоят из большого числа взаимодействующих между собой элементов, которые обеспечивают производство, передачу, распределение и потребление электроэнергии. Их развитие направлено на удовлетворение возрастающей потребности в электроэнергии. Наблюдается непрерывный рост энергосетей, который сопровождается появлением новых электростанций, созданием крупных энергообъединений, состоящих из большого числа узлов нагрузки, внутрисетевых и межсетевых связей. Эксплуатация таких сетей является сложной комплексной проблемой, обусловленной необходимостью безаварийной непрерывной работы большой совокупности подсетей и устройств (электрических сетей, электростанций, подстанций, потребителей и т.д.), связанных между собой и расположенных на значительном удалении друг от друга.

В нормальном режиме работы энергосети [1] ее частота и модуль напряжения на шинах подключения потребителей (нагрузок) могут изменяться только в заранее установленных пределах, гарантирующих надежное электроснабжение потребителей. Для реализации нормального режима необходима синхронная работа генераторов энергосети, то есть установление синхронного (рабочего) режима их параллельной (совместной) работы [2, 3]. Нарушение синхронной работы генераторов, то есть переход к асинхронному (аварийному) режиму, приводит к значительным колебаниям токов и напряжений, вызывающих срабатывание устройств релейной защиты и отключение линий электропередачи, что в конечном итоге приводит к расстройству электроснабжения потребителей и энергоавариям (локальным и масштабным нарушениям электроснабжения/“power outage, blackouts”[4], каскадным авариям/ “cascade failures”[5]). Они могут затрагивать отдельные районы и целые города. Устранение последствий аварий требует больших затрат ресурсов и времени.

Закономерно возникает задача об устойчивости энергосетей, под которой принято понимать их способность восстанавливать нормальный режим после воздействия какого-либо возмущения (короткого замыкания, обрыва линии электропередачи, резкого роста нагрузки, потери возбуждения генераторов и др.). Такая задача может быть сведена к задаче об устойчивости синхронного режима работы генераторов энергосети или, как принято говорить, устойчивости параллельной работы генераторов [2].

Инженерная теория устойчивости энергосетей строилась на основе первого метода Ляпунова. Основы теории локальной устойчивости энергосетей были заложены в трудах отечественных (Лебедев С.А., Жданов П.С., Горев А.А., Веников В.А. и др.) и зарубежных (Park R.H., Kimbark E.W., Concordia

С. и др.) ученых. Цель анализа устойчивости энергосети – определение реакции генераторов на различные возмущения. Наибольшая выработка электроэнергии приходится на синхронные машины (турбо- и гидрогенераторы тепловых и гидроэлектростанций, соответственно). Впервые дифференциальные уравнения синхронной машины независимо друг от друга получили Park R.H. и Горев А.А. Последним на примере генератора, работающего на шины бесконечной мощности (ШБМ), которые характеризуется постоянным модулем напряжения и неизменной частотой этого напряжения, были рассмотрены задачи о простых и сложных переходах в одномашиной энергосети, а также о втягивании машины в синхронизм. Моделирование многомашинных энергосетей с помощью уравнений Парка – Горева затруднительно в силу их большой математической размерности и значительного числа параметров. Для анализа таких сетей разработаны более простые модели, полученные в предположении упрощенного рассмотрения процессов в контурах синхронных машин [6].

Практика эксплуатации многомашинных энергосетей показала, что локальный анализ устойчивости синхронных режимов не всегда достаточен. Поэтому в настоящее время широкое распространение приобрел нелинейный динамический подход (Dorfler F., Hellmann F., Kurths J., Motter A.E., Nishikawa T., Schafer B., Timme M., Witthaut D., Анищенко В.С., Белых В.Н., Вадивасова Т.Е., Осипов Г.В., Фрадков А.Л., Фуртат И.Б. и др.), в рамках которого энергосеть рассматривается как динамическая сеть. Ее активными узлами-элементами являются потребители и генераторы электроэнергии. Роль связей, осуществляющих взаимодействие между узлами сети, играют передающие системы (трансформаторы, линии электропередачи, переключательные пункты и пр.). Динамика энергосети, как правило, описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. Состояние каждого генератора энергосети (синхронной машины) упрощенно задается уравнением движения ротора (“swing equation”). Передающая система рассматривается как пассивная часть сети, связывающая ее элементы. Нагрузка может быть как пассивной частью энергосети – постоянное полное сопротивление (классическая позиционная модель или модель эффективной сети/“effective network model“ [7], далее – МЭС), так и активным элементом, например, синхронным двигателем (модель синхронных моторов/ “synchronous motor model“ [7, 8], далее – МСМ).

С помощью динамического подхода построены и частично изучены модели больших энергосетей: Великобритании (120 узлов и 165 связей) [8], Северной Европы (236 узлов и 320 связей) [9] и Италии (678 узлов и 822 связи) [10]. Особое внимание уделяется топологии сетей, то есть вариантам связей между их узлами. Например, установлено, что добавление связей, то есть новых линий электропередачи, не всегда ведет к увеличению устойчивости энергосети, как считалось ранее, а может приводить к потере синхронного режима и аварии. Такое явление называется парадоксом Браеса в энергосетях [11]. Его существование подтверждено экспериментально в небольшой спе-

циально сконструированной энергосети [12]. Парадокс Браеса обнаружен в модели энергосети Великобритании, при помощи которой выявлены наиболее уязвимые к изменениям топологии участки сети [13], а также предложен алгоритм управления генераторами (“secondary control”) [14], позволяющий избежать нарушения синхронного режима при подключении новых линий электропередачи. В рамках небольших подсетей выявлены общие закономерности существования и локальной устойчивости синхронного режима [15], а также мультистабильности синхронных режимов [16]. Предложен ряд концепций и мер (“minimal fatal shock measure” – MiFaS [17], “node’s basin stability” [9]) для оценки нелокальной устойчивости синхронных режимов по отношению к различным возмущениям, а также для предотвращения их нарушения (“nonlinear damping” [18]) [18–21]. Изучено влияние солнечных и ветряных электростанций, подключенных через силовые инверторы к энергосетям (так называемые “inverter-based resources” – IBRs [22]), на их устойчивость. В ряде работ рассматривалась стохастическая динамика энергосетей, обусловленная шумовыми колебаниями мощностей потребителей и генераторов [23], сбоями в отдельных узлах, которые моделируются шумом [24], а также стохастической динамикой электростанций, работающих за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [25].

В условиях непрерывного расширения энергосетей из-за растущей потребности в электроэнергии возникают возмущения, связанные с изменениями топологии энергосетей. Они обусловлены подключением мощных потребителей (промышленные предприятия, электрифицированный транспорт, коммунально-бытовые нагрузки) и генераторов (в том числе работающих за счет ВИЭ, т. е. ветровых, солнечных и приливных электростанций), вводом новых линий электропередачи для перераспределения мощностей между потребителями, образованием межсетевых связей для объединения энергосетей с целью оптимизации их технико-экономических показателей (например, единая энергосистема (ЕЭС) России). Указанные изменения, как правило, затрагивают отдельные участки энергосетей, содержащие несколько взаимосвязанных генераторов и потребителей, которые образуют подсети. Среди них выделяются сильно централизованные подсети – хаб-кластеры (сети с топологией «звезда»), которые состоят из одного генератора (электростанции), питающего нескольких потребителей, или наоборот – одного мощного потребителя и нескольких генераторов, питающих его. Обычно крупные энергосети имеют в своем составе несколько хаб-кластеров, связанных между собой, к тому же хаб-кластер можно рассматривать и как самостоятельную энергосеть. Стоит отметить, что для предотвращения наиболее тяжелых энергоаварий автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР) может разделять энергосеть на несколько автономных подсетей. При этом необходимо обеспечение их устойчивости для успешного предотвращения или локализации аварий. Таким образом, нахождение условий устойчивости энергосетей и их подсетей (в том числе хаб-кластеров) является одной из актуальных задач,

возникающих в процессе проектирования и эксплуатации современных энергосетей.

### **Цель диссертационной работы**

Цель работы состоит в нахождении условий нелокальной устойчивости энергосетей при внезапных изменениях режима работы, обусловленных отключением или подключением генераторов и линий электропередачи, изменением их пропускной способности, объединением энергосетей, колебаниями мощностей турбин генераторов и мощностей нагрузок.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Построить модели сильно централизованных энергосетей, которые являются типичными подсетями крупных энергообъединений.
2. Установить границы нелокальной устойчивости подсетей по отношению к различным возмущениям, в том числе топологическим.
3. Выработать критерии и подходы для оценки нелокальной устойчивости энергосетей.
4. Построить модель энергосети Нижнего Новгорода и провести анализ ее устойчивости.

### **Научная новизна работы**

1. Предложен подход, базирующийся на втором методе Ляпунова, который позволяет дать аналитическую оценку величины безопасных возмущений, при которых энергосеть в виде хаб-кластера сохраняет свою устойчивость.

2. Предложен критерий парциальной устойчивости, базирующийся на использовании вспомогательных систем сравнения, который дает условия безопасной работы групп пар потребитель-генератор из состава хаб-кластера.

3. Установлен новый сценарий возникновения парадокса Браеса в энергосетях, при котором потеря устойчивости сети при добавлении новой линии электропередачи или изменении пропускной способности действующей линии электропередачи связана с возникновением мультистабильности синхронного и асинхронных режимов.

4. Найден условия безопасного объединения подсетей – хаб-кластера и трехмашинной энергосети, в которой возможен парадокс Браеса, при наиболее опасных, с точки зрения возникновения парадокса, параметрах.

5. Найден условия на параметры схемы замещения многомашинной энергосети с общей нагрузкой, которые позволяют осуществить переход от эффективной сети с глобальными связями к эффективной сети с хаб-топологией. Эти условия возникают естественным образом из-за различия в длинах линий электропередачи или/и применения устройств продольной компенсации (УПК индуктивности линии) на одной из них. При выполнении

условий значительно упрощаются задачи о существовании и устойчивости синхронных режимов.

6. Установлены условия возникновения мультистабильности синхронных режимов в многомашинной энергосети с общей нагрузкой. Выделены наиболее оптимальные с позиции генерируемой мощности синхронные режимы. Найдены условия безопасного отключения и подключения генератора для каждого синхронного режима. На примере трехмашинной энергосети изучены переключения между синхронными режимами, вызванные различными возмущениями.

7. Найдены условия возможного нарушения рабочего режима энергосети Нижнего Новгорода и установлены наиболее уязвимые к возмущениям узлы сети.

### **Теоретическая и практическая значимость диссертации**

1. Выделен типичный структурный элемент в составе крупных энергообъединений – энергосеть в виде хаб-кластера. Определены условия его устойчивости, которые можно использовать в качестве первого приближения при отыскании границ устойчивости больших энергосетей.

2. Подходы, предложенные для определения устойчивости отдельного хаб-кластера, могут быть обобщены на случай энергосетей с другими топологиями. Они могут использоваться для расчетов устойчивости энергосетей при их расширении за счет подключения новых потребителей и генераторов.

3. Разработана и зарегистрирована программа для расчета параметров безаварийной работы групп пар потребитель-генератор, входящих в состав хаб-кластера [A13].

4. Установлен новый сценарий возникновения парадокса Браеса в энергосетях, который позволяет прогнозировать их реакцию на добавление новой линии электропередачи или изменение пропускной способности действующей линии. Он дает возможность определить наиболее оптимальные параметры линий электропередачи, позволяющие избежать нарушения устойчивости энергосети при указанных изменениях.

5. Переход от эффективной сети с глобальными связями к эффективной сети с хаб-топологией при моделировании многомашинной энергосети с общей нагрузкой позволяет применять подходы, предложенные для определения границ устойчивости хаб-кластера.

### **Методы исследований и достоверность результатов**

Исследование динамики систем, используемых в диссертационной работе, проводилось с помощью современных методов нелинейной динамики (изучение структуры фазового пространства, построение бифуркационных диаграмм, метод сечений Пуанкаре, метод функций Ляпунова, метод систем

сравнения) и численного моделирования (методы Рунге – Кутты и Эйлера – Маруямы для интегрирования систем обыкновенных и стохастических дифференциальных уравнений, соответственно). Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием аналитических и численных результатов, а также согласованностью с результатами других авторов. Основные положения диссертационной работы опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных журналах и подвергались оценке независимых экспертов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. У энергосетей с хаб-топологией существуют области параметров, при которых синхронный режим устойчив по отношению к возмущениям частот вращения и/или фаз роторов синхронных машин в большом или в целом.

2. Критерий парциальной устойчивости дает условия безаварийной работы групп пар потребитель-генератор, входящих в состав хаб-кластера, и условия безопасного подключения потребителя или генератора к такой сети.

3. Установленный сценарий возникновения парадокса Браеса представляет собой новый механизм потери устойчивости энергосетей, связанный с мультистабильностью синхронного и асинхронных режимов.

4. Существует минимальное значение пропускной способности, то есть наибольшей передаваемой активной мощности, линии электропередачи между хаб-кластером и трехмашинной энергосетью, гарантирующее устойчивость объединенной энергосети.

5. В многомашинной энергосети с общей нагрузкой наблюдается мультистабильность синхронных режимов, которые характеризуются различными стационарными распределениями токов по цепям сети и мощностями, выдаваемыми генераторами в сеть.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы докладывались на научных семинарах Института прикладной физики РАН, на российских и международных конференциях, в том числе

18-я, 20-я, 21-я научные школы «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, Россия, 2018, 2022, 2024).

24-я Нижегородская сессия молодых ученых (Нижний Новгород, Россия, 2019).

International Symposium «Topical problems of nonlinear wave physics» (Nizhny Novgorod, Russia, 2021).

19-я научно-техническая конференция «Молодежь в науке» (Саров, Россия, 2021)

17-я Всероссийская молодежная научно-инновационная школа «Математика и математическое моделирование» (Саров, 2023).

4-я международная конференция «Integrable Systems and Nonlinear Dynamics» (ISND) (Ярославль, Россия, 2023)

23-я международная конференция и молодежная школа «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии» (Нижний Новгород, Россия, 2023).

По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 6 статей в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, 6 статей в тезисах докладов. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Результаты работы получены в рамках грантов РФФИ и РФФИ.

### Личный вклад автора

Все результаты диссертационной работы получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Постановка задач и интерпретация результатов выполнены совместно с научным руководителем и соавтором.

### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 148 страниц текста, включая 55 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 161 наименования на 13 страницах.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы, приводятся основные результаты, и раскрывается их научная и практическая значимость, излагаются основные положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации результатов.

**В первой главе** приводятся модели энергосетей, которые используются в диссертации, описываются их основные особенности.

В разделе 1.1 рассматривается энергосеть, состоящая из синхронных генераторов, питающих нагрузки, посредством передающих систем. Ее можно представить в виде эквивалентной схемы замещения, в которой источники ЭДС (генераторы) соединены пассивной цепью с узлами нагрузки. Динамика генератора упрощенно задается уравнением движения его ротора [2] в системе относительных единиц

$$C_i \ddot{\delta}_i = P_{T,i} - P_{D,i} - P_{SM,i}, \quad (1)$$

где  $\delta_i$  – механический угол ротора относительной синхронной оси;  $C_i$  – константа, значение которой зависит от выбора системы относительных единиц;  $P_{T,i}$  – мощность турбины  $i$ -го генератора;  $P_{D,i} = D_i \dot{\delta}_i$  – эквивалентная мощность демпфирования,  $D_i$  – демпферный коэффициент;  $P_{SM,i}$  – активная мощность, выдаваемая генератором в сеть. Она зависит от конструкции генерато-

ра, параметров пассивной цепи, а также от состояния узлов нагрузки и других генераторов. В формуле (1) и далее по тексту точкой над переменной обозначается производная по времени.

В разделе 1.2 приводится модель энергосети с нагрузками в виде синхронных моторов. Их динамика задается аналогичными (1) уравнениями. Предполагается, что  $i$ -я и  $j$ -я машины связаны линиями электропередачи (далее для краткости – передачи), которые замещаются индуктивными сопротивлениями  $x_{i,j}$ . Уравнения модели синхронных моторов [8] записываются в виде

$$\ddot{\delta}_i = P_i - \alpha_i \dot{\delta}_i + \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^{N^{\text{MCM}}} K_{i,j}^{\text{MCM}} \sin(\delta_j - \delta_i). \quad (2)$$

В этом случае энергосеть представляется как динамическая сеть с графом, состоящим из узлов-генераторов ( $P_i > 0$ ) и узлов-потребителей ( $P_i < 0$ ), соединенных ребрами (линиями передачи) с силой связи  $K_{i,j}^{\text{MCM}} = |U_i U_j| x_{i,j}^{-1}$ , где  $U_k = |U_k| e^{i\delta_k}$  – напряжение на зажимах генератора (мотора),  $N^{\text{MCM}}$  – число узлов (машин). МСМ используется во 2, 3, 4 и 6-й главах диссертации.

В разделе 1.3 приводится модель энергосети с нагрузками в виде постоянных полных сопротивлений. Активными элементами такой энергосети являются генераторы, взаимодействующие друг с другом посредством пассивной цепи, содержащей нагрузки. Такую цепь можно характеризовать собственными  $Y_{i,j} = |Y_{i,j}| e^{-i\Psi_{i,j}}$ ,  $i \neq j$  и взаимными  $Y_{i,i} = |Y_{i,i}| e^{-i\Psi_{i,i}}$  проводимостями ветвей, содержащих источники ЭДС (генераторы),  $i, j = 1, 2, \dots, N^{\text{МЭС}}$ ,  $N^{\text{МЭС}}$  – число генераторов, причем  $|Y_{i,j}| \neq 0$ . Каждая из указанных проводимостей зависит от проводимостей всех элементов, входящих в схему замещения энергосети. В этом случае уравнения (1) примут вид

$$C_i \ddot{\delta}_i = A_i - D_i \dot{\delta}_i - \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^{N^{\text{МЭС}}} K_{i,j}^{\text{МЭС}} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{i,j}), \quad (3)$$

где  $A_i = P_{T,i} - |E_i|^2 |Y_{i,i}| \sin(\alpha_{i,i})$ ,  $K_{i,j}^{\text{МЭС}} = |E_i E_j Y_{i,j}| \neq 0$  и  $\alpha_{i,j} = \pi/2 - \Psi_{i,j}$ . Поэтому энергосеть может быть представлена как эффективная сеть взаимодействующих узлов-генераторов, связанных глобально, что и обуславливает название модели – модель эффективной сети [7]. Она используется в 5-й главе диссертации.

В разделе 1.4 приводится соответствие между режимами энергосети и характером изменения переменных  $\delta_i(t)$  в МСМ и МЭС. Режим энергосети соответствуют аттракторы систем (2) и (3). Установление режима означает попадание изображающей точки в заранее заданную (сколь угодно малую) окрестность аттрактора, целиком лежащую в его области притяжения. Вид

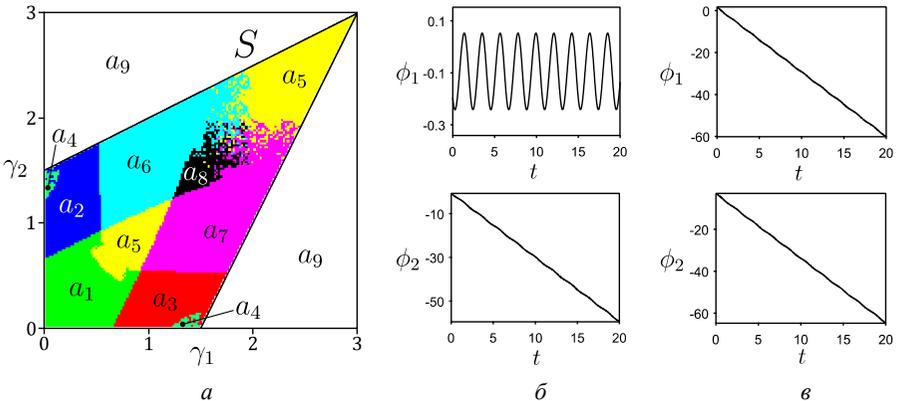
режима определяется поведением относительных углов  $\delta_{ij}(t) = \delta_i(t) - \delta_j(t)$  на аттракторе. Например, при синхронном режиме переменные  $\delta_{ij} = \text{const}_{ij}$  для всех связанных пар узлов в случае МСМ, и для всех пар узлов в случае МЭС.

**Вторая глава** посвящена изучению режимов работы энергосети с топологией хаб-кластера и установлению границ устойчивости ее синхронного режима [A1, A2].

В разделе 2.1 рассматривается МСМ энергосети в виде хаб-кластера, состоящего из одного генератора, питающего нескольких потребителей или наоборот. В первом случае хаб-кластер моделирует централизованную сеть, в которой крупная электростанция (т. е. хаб, например, АЭС, ГРЭС или ГЭС) питает несколько потребителей, а во втором – моделируется сеть с несколькими небольшими электростанциями, питающими мощную нагрузку. Динамика хаб-кластера задается уравнениями

$$\begin{cases} \dot{\phi}_i = y_i, \\ \dot{y}_i = -\gamma_i - \lambda y_i - \sin(\phi_i) - \sum_{j=1}^{N-1} \sin(\phi_j), \end{cases} \quad (4)$$

которые получены в предположении, что все линии передачи одинаковые. Здесь  $\phi_i = \delta_{i+1,1}$ ,  $\gamma_i \sim P_{i+1} - P_1$ ,  $\lambda$  – новый демпферный коэффициент. Первый узел-потребитель ( $P_1 < 0$ ) является хабом, остальные же соответствуют генераторам ( $P_{i+1} > 0$ ),  $i = 1, 2, \dots, N - 1$ ,  $N \equiv N^{\text{МЭС}}$ .



**Рис. 1.** Разбиение области параметров  $S$  на подобласти  $a_i$  с различными режимами хаб-кластера из трех машин ( $a$ ). Осциллограммы переменных при квазисинхронном ( $b$ ) и асинхронном ( $e$ ) режимах. Параметры:  $\lambda = 0.3$ ,  $\gamma_1 = 1.4$ ,  $\gamma_2 = 1.5$

В разделе 2.2 установлено, что при параметрах из области  $S$  (рис. 1,  $a$ ) система (4) имеет единственное устойчивое состояние равновесия  $O_1$ , соответствующее синхронному режиму хаб-кластера. Наряду с ним в фазовом

пространстве системы (4) могут существовать другие аттракторы, соответствующие асинхронным и квазисинхронным режимам. Для хаб-кластеров из трех и четырех машин построены разбиения области  $S$  на подобласти с различными режимами. Установлено существование безопасной области параметров  $a_1$  (рис. 1, *a*), отвечающей установлению только синхронного режима. В остальных же областях, сосуществуют несколько режимов. Например, при параметрах из области  $a_8$  в хаб-кластере из трех машин может установиться синхронный, квазисинхронный (рис. 1, *б*) или асинхронный режим (рис. 1, *в*).

В разделе 2.3 оценивается граница безопасных возмущений. Вне области  $a_1$  синхронный режим может быть нарушен возмущениями, действие которых сводится к изменению положения изображающей точки в фазовом пространстве системы (4). Область притяжения точки  $O_1$  содержит все безопасные возмущения, не нарушающие синхронный режим. С помощью функции Ляпунова вида

$$V(y_i, \phi_i) = \sum_{i=1}^{N-1} y_i^2 - \frac{2}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N-1} y_i y_j + \frac{2N}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \int_{\phi_i^{(1)}}^{\phi_i} [\sin(\xi) - d_i] d\xi, \quad (5)$$

где  $d_i = \sin \phi_i^{(1)}$ ,  $\phi_i^{(1)}$  – координаты точки  $O_1$ , дана оценка минимального расстояния от этой точки до границы ее области притяжения

$$r_{min} = \sqrt{\frac{N-1}{N} C_{min}^{sad}}, \quad C_{min}^{sad} = \min_k (V(O_k^{sad})), \quad (6)$$

где  $O_k^{sad}$  – состояния равновесия типа седло. Эта оценка полностью согласуется с расстоянием, определенным численно. Однако нахождение последнего требует значительно больше времени, чем вычисление  $r_{min}$  по формуле (6).

**Третья глава** посвящена изучению устойчивости энергосети при подключении новой линии передачи [A4] или подсети [A5].

В разделе 3.1 рассматривается парадокс Браеса в энергосетях. Он состоит в непредвиденном переходе энергосети из синхронного режима в асинхронный при добавлении новой линии передачи или увеличении пропускной способности действующей линии [11].

Для выявления сценария возникновения парадокса Браеса рассматривается трехмашинная энергосеть – мотив, состоящий из потребителя (мотора,  $P_1 < 0$ ), соединенного с двумя генераторами ( $P_2 = P_3 > 0$ ), посредством одинаковых линий передачи ( $K_{1,2} = K_{1,3} \equiv K$ ). Между генераторами добавляется новая линия ( $K_{2,3} \equiv B$ ) и изучается реакция мотива, изначально работающего в синхронном режиме [A4]. Его динамика задается уравнениями

$$\begin{cases} \dot{\phi}_i = y_i, \\ \dot{y}_i = 1 - \alpha y_i - 2K \sin(\phi_i) - K \sin(\phi_j) - B \sin(\phi_i - \phi_j), \end{cases} \quad (7)$$

где  $\phi_i = \delta_{i+1,1}$ ,  $i, j = 1, 2$ ,  $i \neq j$ , параметр  $K$  отвечает за пропускную способность линий передачи между потребителем и генераторами, а  $B$  – пропускную способность новой линии между генераторами.

Проведено исследование динамики системы (7). Установлено, что она имеет единственное устойчивое состояние равновесия  $O$ , соответствующее синхронному режиму работы мотива, причем его координаты не зависят от параметра  $B$ , что делает невозможным нарушение синхронного режима только за счет изменения указанного параметра. На плоскости параметров  $(B, K)$  построена диаграмма режимов мотива (рис. 2, а). Она имеет две характерные области. При параметрах из области  $a$  в мотиве всегда устанавливается синхронный режим. При параметрах из области  $b$  система (7) является мультистабильной – синхронный режим сосуществует с асинхронными режимами, которым соответствуют вращательные предельные циклы или хаотические аттракторы того же типа.

Наличие характерной клиновидной области (рис. 2, а) на диаграмме режимов мотива лежит в основе динамического сценария парадокса Браеса, который состоит в следующем. Если при  $K \in (K_2, K_3)$  и  $B = 0$ , мотив находится в синхронном режиме, то при увеличении параметра  $B$  точка  $(B, K)$  может быть смещена в область параметров  $b$ , где система (7) является мультистабильной, поэтому под действием возмущений мотив может быть переведен из синхронного режима в асинхронный (рис. 2, б). Следовательно, подключение новой линии передачи с пропускной способностью  $B$  может привести к нарушению синхронного режима, если оно сопровождается действием возмущений. Аналогичные клиновидные области были получены для сетей, отличных от мотива, что свидетельствует об универсальности установленного сценария

В разделе 3.2 приводится исследование динамики модели энергосети, которая образуется при объединении хаб-кластера и мотива [A5]. Предполагается, что хаб-кластер состоит из генератора (хаба), соединенного с потребителями одинаковыми линиями передачи с пропускной способностью  $H$ . Он также связан с потребителем мотива линией передачи с пропускной способностью  $C$ .

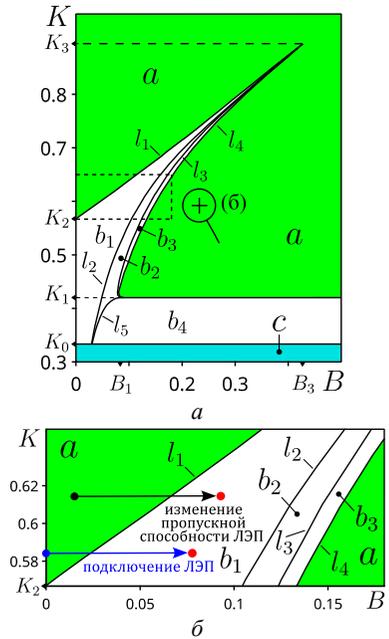


Рис. 2. Диаграмма режимов мотива. Параметр  $\alpha = 0.8$

Построено разбиение плоскости параметров  $(H, C)$  на области с различными режимами объединенной энергосети. Исходя из него, определены условия на параметр  $C$ , гарантирующие установление синхронного режима объединенной сети. В областях параметров, отвечающих сосуществованию синхронного и других режимов, определены вероятности их реализации. Проведена классификация безопасности режимов для отдельных подсетей – хаб-кластера и мотива. Установлено, что помимо безопасного синхронного режима, в объединенной сети могут устанавливаться комбинированные режимы, при которых в хаб-кластере реализуется относительно безопасный квазисинхронный режим, а в мотиве – опасный асинхронный, или наоборот. С помощью полученных результатов сформулированы основные сценарии поведения объединенной энергосети при изменении пропускной способности линии передачи  $(C)$ , соединяющей подсети.

**Четвертая глава** посвящена исследованию динамики неоднородной энергосети с топологией хаб-кластера при помощи вспомогательных систем сравнения и получению критерия парциальной устойчивости [A3].

В разделе 4.1 вводится модель неоднородной энергосети, учитывающая индуктивное и активное сопротивления линий передачи, которые зависят от их длин, то есть расположения потребителей и генераторов на местности, что и обуславливает неоднородность параметров. Вносятся необходимые изменения в уравнения (2). Рассматривается хаб-кластер из одного генератора  $(P_1 > 0)$  и  $N - 1$  потребителей  $(P_k < 0)$ , его динамика задается уравнениями

$$\begin{cases} \frac{d\phi_i}{dt} = y_i, \\ \frac{dy_i}{dt} = -\gamma_i - \alpha y_i - \frac{2}{l_i} \sin(\Delta_i) \sin(\phi_i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^{N-1} \frac{1}{l_j} [\cos(\Delta_j) - \cos(\phi_j - \Delta_j)]. \end{cases} \quad (8)$$

Динамика  $n$ -й пары потребитель-генератор задается уравнениями

$$\begin{cases} \frac{d\phi_n}{d\tau} = y_n, \\ \frac{dy_n}{d\tau} = -\gamma_n a_n^2 - \lambda_n y_i - \sin(\phi_n) + a_n^2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^{N-1} \frac{1}{l_j} [\cos(\Delta_j) - \cos(\phi_j - \Delta_j)], \end{cases} \quad (9)$$

где  $\phi_n = \delta_{n+1,1}$ ,  $\gamma_n \sim P_1 - P_{n+1}$ ,  $a_n = a_n(l_n, \Delta_n)$ ,  $\tau = t/a_n$ ,  $\Delta_n = \arg(r_n + ix_n)$ ,  $r_n$  и  $x_n$  – активное и индуктивное сопротивления  $n$ -ой линии передачи с длиной  $l_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N - 1$ ,  $N \equiv N^{\text{MCM}}$ . Также предполагается, что все линии имеют одинаковые погонные полные сопротивления.

В разделе 4.2 исследуется динамика системы (8). При помощи вспомогательных систем сравнения

$$\begin{cases} \dot{\phi}_n = y_n, \\ \dot{y}_n = \gamma_n^\pm - \lambda_n y_n - \sin(\phi_n), \end{cases} \quad (10)$$

выделяются области локализации траекторий системы (9) –  $b_n^\omega$  и  $k_n^\omega$ , границы которых составлены из вертикалей, сепаратрис и предельных циклов систем (10). Область  $b_n^\omega$  лежит на фазовом цилиндре  $G = S \times R$ , не охватывая его, причем для координат любой ее точки справедливы следующие неравенства  $\varphi_{min} < \varphi_n < \varphi_{max}$  и  $y_{min} < y_n < y_{max}$ , где  $0 < \varphi_{max} - \varphi_{min} < 2\pi$  и  $y_{min}y_{max} < 0$ . Напротив, область  $k_n^\omega$  охватывает фазовый цилиндр  $G$ , причем для любой ее точки  $y_n < 0$ . Векторное поле систем (8) и (9) на границах областей  $b_n^\omega$  и  $k_n^\omega$  ориентировано внутрь. Области  $b_n^\omega$  и  $k_n^\omega$  существуют для параметров из областей  $D_{lib}^n$  и  $D_{rot}^n$  соответственно (рис. 3).

В разделе 4.3 показано, что области  $b_n^\omega$  и  $k_n^\omega$  позволяют установить режимы в паре потребитель-генератор. Если для всех  $i \neq n$  начальные условия  $(\phi_i(0), y_i(0))$  в системе (8) будут произвольными, то при  $(\phi_n(0), y_n(0)) \in b_n^\omega$  или  $(\phi_n(0), y_n(0)) \in k_n^\omega$  переменные  $\phi_n$  и  $y_n$  будут изменяться в пределах этих областей. В первом случае переменная  $\phi_n$  стремится к стационарному значению или совершает ограниченные колебания. Соответственно, в  $n$ -й паре потребитель-генератор устанавливается синхронный или квазисинхронный режим. Во втором случае переменная  $\phi_n$  монотонно убывает, поэтому в  $n$ -й паре потребитель-генератор устанавливается асинхронный режим. Полученные результаты обобщаются для нескольких пар потребитель-генератор.

В разделе 4.4 на основании установленных свойств траекторий системы (8) формулируется критерий парциальной устойчивости  $n$ -й пары потребитель-генератор. Он состоит в следующем. Изменение параметров внутри области  $D_{lib}^n$  является безопасным для нормальной работы  $n$ -й пары потребитель-генератор, поскольку в этом случае выход из синхронного режима возможен лишь в квазисинхронный режим. Напротив, область параметров  $D_{rot}^n$  является потенциально опасной, так как для этих значений параметров возможна реализация асинхронного режима в  $n$ -й паре потребитель-генератор.

Критерий апробирован на примере хаб-кластера из девяти пар потребитель-генератор при различных значениях параметров, характеризующих каждую из них. Установлены области  $D_{lib}^i$ ,  $b_i^\omega$  и  $D_{rot}^j$ ,  $k_j^\omega$  для отдельных пар. Поведение переменных при параметрах и начальных условиях из указанных

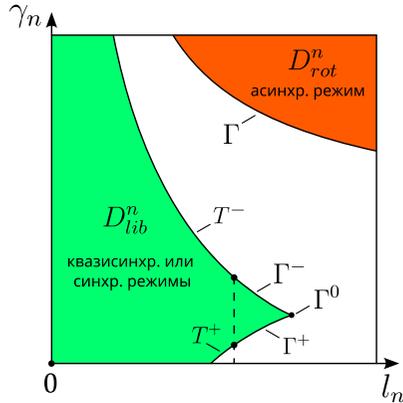


Рис. 3. Области  $D_{lib}^n$  и  $D_{rot}^n$

областей, определяемое критерием, полностью совпадает с результатами численного моделирования.

**Пятая глава** посвящена исследованию мультистабильности синхронных режимов и переключений между ними в многомашинной энергосети с общей нагрузкой в виде постоянного полного сопротивления [А6].

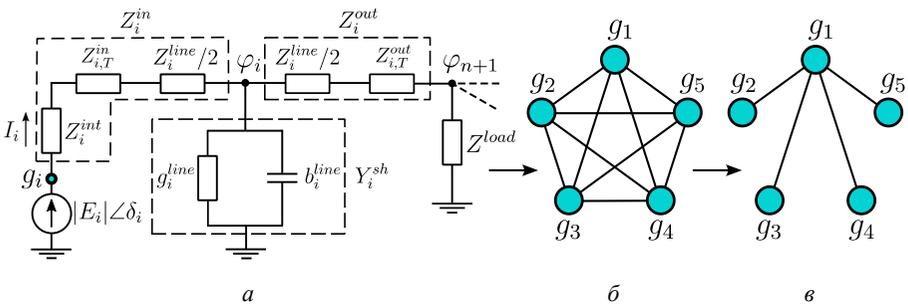
В разделе 5.1 строится эффективная сеть для энергосети из  $N^{\text{МЭС}}$  генераторов, питающих посредством линий передачи и трансформаторов ( $Z_i^{\text{in}}, Z_i^{\text{out}}, Y_i^{\text{sh}}$ ), общую нагрузку ( $Z^{\text{load}}$ ) (рис. 4, а). Приводятся выражения для коэффициентов  $K_{i,j}^{\text{МЭС}}$  через параметры схемы замещения (рис. 4, а). С их помощью определяются условия перехода от эффективной сети с глобальными связями (рис. 4, б) к эффективной сети с хаб-топологией (рис. 4, в):

$$|R_1| \ll |R_j|, \quad (11)$$

где  $j = 2, 3, \dots, N$ ,  $N \equiv N^{\text{МЭС}} - 1$ ,  $R_k = Z_k^{\text{in}} + Z_k^{\text{out}} + Y_k^{\text{sh}} Z_k^{\text{in}} Z_k^{\text{out}}$  и хабом является первый узел-генератор. Условия (11) выполняются, если линия передачи первого генератора значительно короче остальных или/и на ней выполнена продольная компенсация. Динамика хаб-кластера при равенстве параметров всех генераторов и линий, кроме первой, задается уравнениями

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_i = y_i, \\ \dot{y}_i = \Delta - \mu y_i - 2 \cos(\alpha) \sin(\varphi_i) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \sin(\varphi_i - \alpha), \end{cases} \quad (12)$$

где  $\varphi_i = \delta_{1,i+1}$ ,  $\Delta \sim A_1 - A_2$ ,  $\mu$  – новый демпферный коэффициент.



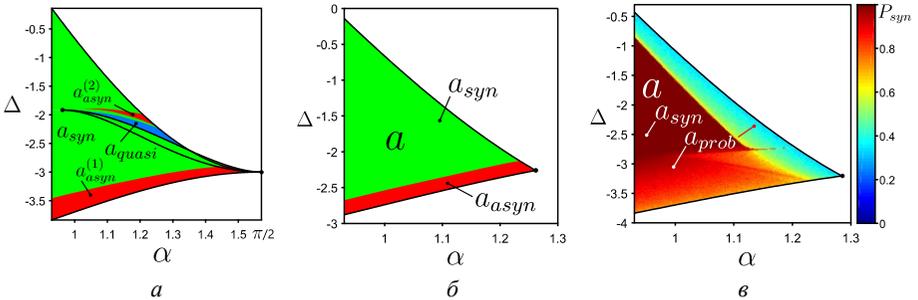
**Рис. 4.** Схема замещения участка многомашинной энергосети с общей нагрузкой (а). Эффективная сеть с глобальными связями (б) и хаб-топологией (в)

В разделе 5.2 устанавливается, что система (12) может иметь одно устойчивое однородное состояние равновесия  $O_1^{\text{hom}}$  с одинаковыми координатами  $\varphi_i$  и  $N$  устойчивых неоднородных –  $O_i^{\text{inh}}$ , имеющих одинаковые координаты  $\varphi_i$ , кроме одной. Каждое состояние равновесия соответствует однородному

или неоднородному синхронному режиму, которые различаются распределениями токов по цепям сети и мощностями, выдаваемыми генераторами в сеть.

В разделе 5.3 изучается мультистабильность режимов многомашинной энергосети с общей нагрузкой. Для сетей с разным числом генераторов построены разбиения плоскости параметров  $(\alpha, \Delta)$  на подобласти, соответствующие установлению только синхронных режимов ( $a_{syn}$ ) или их сосуществованию с квазисинхронными ( $a_{quasi}$ ) или/и асинхронными ( $a_{asyn}$ ) режимами (рис. 5, а).

В разделе 5.4 рассматриваются задачи о безопасном отключении и подключении генератора к энергосети, изначально работающей в одном из синхронных режимов. Определяются условия, при которых изменение количества генераторов приводит к пренебрежимо малому изменению параметров системы (12), выделяется область параметров  $a$  (рис. 5, б, в), при которых возможно установление синхронного режима в измененной энергосети. Для различных исходных синхронных режимов получены разбиения области  $a$  на подобласти  $a_{syn}$  и  $a_{asyn}$  (рис. 5, б), соответствующие установлению синхронного или асинхронного режима при отключении генератора. С помощью функции Ляпунова получена аналитическая оценка области  $a_{syn}$ . Построено распределение вероятности установления синхронного режима  $P_{syn}$  в области  $a$  (рис. 5, в) при подключении генератора с произвольными начальными условиями, ограниченными поглощающей областью.

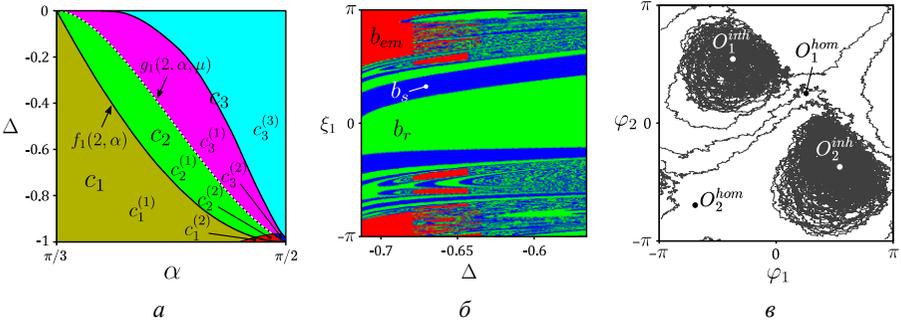


**Рис. 5.** Диаграмма режимов энергосети (а). Разбиение области  $a$  на подобласти  $a_{syn}$  и  $a_{asyn}$  при отключении одного генератора (б). Распределение вероятности  $P_{syn}$  в области  $a$  при подключении генератора (в). Параметры:  $\mu = 1.7$ ,  $N = 4$  (а);  $\mu = 0.2$ , исходный размер сети  $N = 4$  (б);  $\mu = 1$ , исходный размер сети  $N = 4$  (в)

В разделе 5.5 рассматривается динамика трехмашинной энергосети [А6]. Установлено, что однородный и неоднородные синхронные режимы существуют в смежных областях параметров —  $c_1$  и  $c_2$  (рис. 6, а), соответственно, при этом в неоднородных синхронных режимах генераторы выдают большую мощность. Найдены области параметров (рис. 6, а), при которых всегда устанавливаются однородные ( $c_1^{(1)}$ ) и неоднородные синхронные режимы

( $c_2^{(1)}$ ) или они сосуществуют с асинхронными режимами ( $c_1^{(2)}$  и  $c_2^{(2)}$ ). Выделены области существования квазисинхронного ( $c_3^{(1)}$ ) и асинхронного ( $c_3^{(3)}$ ) режимов, а также область их сосуществования ( $c_3^{(2)}$ ). Построены диаграммы режимов в области  $c_2$  при разных значениях параметра  $\mu$ .

В разделе 5.6 получены оценки областей притяжения точек  $O_1^{inh}$  и  $O_2^{inh}$ , определена реакция энергосети на скачкообразные частотные и фазовые возмущения синхронных режимов. Определены возмущения  $\xi_i$ , приводящие к переходу в асинхронный режим ( $b_{em}$ ), переключению на другой синхронный режим ( $b_s$ ), а также не нарушающие исходный режим ( $b_r$ ) (рис. 6, б).



**Рис. 6.** Диаграмма режимов (а). Типы фазовых возмущений (б). Фазовое возмущение  $\xi_1 = \varphi_1 - \varphi_1^{ss}$ , где  $\varphi_1$  – возмущенное значение переменной,  $\varphi_1^{ss}$  – координата устойчивого состояния равновесия. Реализация случайного процесса (в). Параметры:  $\mu = 1$  (а);  $\mu = 0.5, \alpha = 1.3$  (б);  $\Delta = -0.1, \alpha = 1.3, b_1 = 0.25, b_2 = 0.15$  (в)

В случае сильного демпфирования ( $\mu \gg 1$ ) рассматриваются переключения между нормальными режимами под действием случайных колебаний мощностей турбин генераторов, которые моделируются статистически независимыми стандартными виннеровскими случайными процессами  $W_1(t)$  и  $W_2(t)$ . При этом динамика энергосети задается системой стохастических дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \Delta - 2\cos(\alpha) \sin(\varphi_1) - \sin(\varphi_2 - \alpha) + b_1 W_1(t), \\ \dot{\varphi}_2 = \Delta - 2\cos(\alpha) \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1 - \alpha) + b_2 W_2(t). \end{cases} \quad (13)$$

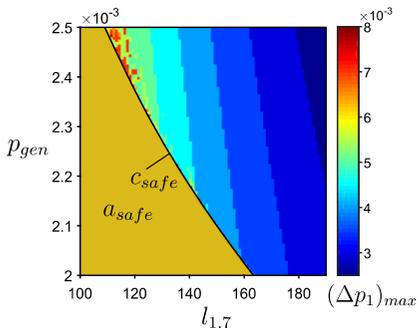
Нормальным режимам соответствуют окрестности точек  $O_1^{inh}$  и  $O_2^{inh}$  в виде кругов с центрами в этих точках. Путем интегрирования системы (13) методом Эйлера – Маруямы при начальных условиях в точке  $O_1^{inh}$ , получены статистические ансамбли из 30000 реализаций каждый (рис. 6, в) при разных значениях параметров  $b_i$ . С их помощью установлена плотность вероятности случайного процесса  $(\varphi_1(t), \varphi_2(t))$ , вероятности реализации нормальных режимов и среднее время первого нарушения нормального режима, задаваемого окрестностью точки  $O_1^{inh}$ .

В шестой главе исследуется устойчивость энергосети Нижнего Новгорода в рамках модели синхронных моторов [A1].

В разделе 6.1 вводится модель энергосети Нижнего Новгорода, учитывающая основные особенности ее топологии. Для этого используется карта-схема размещения линий электропередачи, электростанций и подстанций города [26]. В рамках МСМ, внешние по отношению к городу электростанции и подстанции представлены синхронными генераторами, а подстанции, расположенные в черте города (т.е. потребители) – моторами. Предполагается, что линии передачи имеют одинаковую конструкцию, но отличаются длинами, которые определяет их индуктивные сопротивления  $x_{i,j} = x_0 l_{i,j}$  и, следовательно, коэффициенты  $K_{i,j}^{МСМ} \sim l_{i,j}^{-1}$ , где  $x_0$  – погонное индуктивное сопротивление линии,  $l_{i,j}$  – длина линии между  $i$ -й и  $j$ -й машинами. Механические мощности  $P_i$ , подводимые к генераторам и снимаемые с моторов, считаются равномерно распределенными между машинами каждого типа. Причем их алгебраическая сумма равна нулю, что необходимо для существования стационарного состояния. Граф модели энергосети содержит 14 узлов (машин) и 17 ребер (линий передачи).

В разделе 6.2 определены режимы энергосети Нижнего Новгорода. Выявлена возможность сосуществования синхронного, асинхронного и различных квазисинхронных режимов. Результаты отображены в таблицах режимов, составленных при разных значениях демпферного коэффициента.

В разделе 6.3 установлена реакция энергосети, первоначально находящейся в синхронном режиме, на возмущения в отдельных узлах (машинах), которые сопровождаются изменением пары переменных угол/частота  $(\delta_i, \dot{\delta}_i)$ , отвечающих за состояние возмущаемого узла. Выделены наиболее уязвимые узлы.



**Рис. 7.** Зависимость максимальной безопасной амплитуды импульса  $(\Delta p_1)_{max}$  от мощностей генераторов  $p_{gen}$  и длины линии передачи  $l_{1,7}$  одного из генераторов. При параметрах из области  $a_{safe}$  импульс не нарушает синхронный режим, вне ее – нарушает даже при небольших амплитудах.

В разделе 6.4 изучена устойчивость энергосети к скачкам мощностей в виде прямоугольных импульсов, моделирующих внезапные приращения мощностей турбин генераторов или нагрузок на валы синхронных моторов. Установлено существование порогового значения длины линии передачи

одного из генераторов, превышение которой делает сеть особенно уязвимой к указанным возмущениям (рис. 7).

**В заключении** приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Изучены режимы энергосети с хаб-топологией. Определены области параметров, при которых всегда устанавливается синхронный режим или он сосуществует с квазисинхронными и/или асинхронными режимами. В последнем случае предложен подход, позволяющий оценить величину возмущений, не нарушающих синхронный режим.

2. В трехмашинной энергосети установлен новый сценарий возникновения парадокса Браеса, который связан с возникновением мультистабильности синхронного и асинхронного режимов при добавлении новой линии передачи или увеличении пропускной способности действующей линии.

3. Получены условия безопасного объединения двух энергосетей – хаба-кластера и мотива. Установлены режимы работы объединенной энергосети, проведено их разделение на режимы безопасные как для всей сети в целом, так и для отдельных подсетей.

4. Для неоднородной энергосети с хаб-топологией получен критерий устойчивости отдельных пар потребитель-генератор.

5. Для энергосети из нескольких генераторов, работающих на общую нагрузку в виде постоянного полного сопротивления, получены условия сосуществования синхронных режимов с различными распределениями токов по цепям сети и мощностями, выдаваемыми генераторами в сеть. Найдены условия безопасного отключения и подключения генератора. На примере трехмашинной энергосети рассмотрены переключения между синхронными режимами, вызванные различными возмущениями.

6. Построена модель энергосети Нижнего Новгорода. Проведено исследование ее устойчивости, показавшее возможность сосуществования синхронного и различных квазисинхронных режимов. Выделены наиболее уязвимые к возмущениям узлы сети. Установлено существование порогового значения длины линии передачи отдельного генератора, превышение которой делает его особенно уязвимым к скачку мощности турбины.

## **Список работ автора по теме диссертации**

A1. Khramenkov, V.A. Dynamics and stability of two power grids with hub cluster topologies / V.A. Khramenkov, A.S. Dmitrichev, V.I. Nekorkin // *Cybernetics and Physics*. – 2019. – V. 8, № 1. – P. 29–33.

A2. Храменков, В.А. Пороговая устойчивость синхронного режима энергосети с топологией хаб-кластера / В.А. Храменков, А.С. Дмитричев, В.И. Некоркин // *Известия вузов. ПНД*. – 2020. – Т. 28, № 2. – С. 120–139.

A3. Khramenkov, V.A. Partial stability criterion for a heterogeneous power grid with hub structures / V.A. Khramenkov, A.S. Dmitrichev, V.I. Nekorkin // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2021. – Vol. 152. – P. 111373.

A4. Khramenkov, V.A. A new scenario for Braess's paradox in power grids / V.A. Khramenkov, A.S. Dmitrichev, V.I. Nekorkin // *Chaos*. – 2022. – Vol. 32, № 11. – P. 113116.

A5. Храменков, В.А. Об условиях безопасного подключения к хаб-кластерным энергосетям / В.А. Храменков // *Известия вузов. ПНД*. – 2022. – Т. 30, № 4. – С. 424–435.

A6. Khramenkov, V.A. Bistability of operating modes and their switching in a three machine power grid / V.A. Khramenkov, A.S. Dmitrichev, V.I. Nekorkin // *Chaos*. – 2023. – Vol. 33, № 10. – P. 103129.

A7. Храменков, В.А. Синхронные и асинхронные режимы в энергосети с хаб-топологией / В.А. Храменков // Тезисы докладов XVIII научной школы «Нелинейные волны – 2018». Н. Новгород : ИПФ РАН, 2018. С. 200.

A8. Храменков, В.А. Новый сценарий парадокса Браеса в энергосетях / В.А. Храменков, А.С. Дмитричев, В.И. Некоркин // Тезисы докладов XX научной школы «Нелинейные волны – 2022». Н. Новгород : ИПФ РАН, 2022. С. 291.

A9. Храменков, В.А. Динамический сценарий парадокса Браеса в энергосетях / В.А. Храменков // Сборник материалов XVII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы «Математика и математическое моделирование». Саров, 2023. С. 344–345.

A10. Khramenkov, V.A. Partial stability criterion for power grids / V.A. Khramenkov // *Abstracts of 4th International Conference on “Integrable System & Nonlinear Dynamics (ISND 2023)”*. Yaroslavl, 2023. P. 84.

A11. Храменков В.А. Сосуществование и переключения синхронных режимов в модели трехмашинной энергосети / В.А. Храменков // Труды XXIII Международной конференции «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии». Н. Новгород, 2023. С. 161–165.

A12. Храменков, В.А. Мультистабильность синхронных режимов в многомашинной энергосети с общей нагрузкой / В.А. Храменков, А.С. Дмитричев, В.И. Некоркин // Тезисы докладов XXI научной школы «Нелинейные волны 2024». Н. Новгород, 2022. С. 279–280.

A13. Дмитричев, А.С., Храменков, В.А., Некоркин, В.И. Программа для ЭВМ «Оценка областей безопасного режима работы генераторов (потребителей) энергосетей на основе модели Курамото с инерцией» : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660565, 28 июня 2021 г.

## Список цитируемой литературы

1. ГОСТ Р 58058—2018 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Устойчивость энергосистем. Нормы и требования. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 15 с.
2. Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов. – Москва : Энергия, 1979. – 456 с.
3. Андерсон, П. Управление энергосистемами и устойчивость / П. Андерсон, А. Фуад. – Москва : Энергия, 1980. – 568 с.
4. Veloza, O.P. Analysis of major blackouts from 2003 to 2015: classification of incidents and review of main causes / O.P. Veloza, F. Santamaria // *Electr. J.* – 2016. – V. 29, № 7. – P. 42–49.
5. Dobson, I. Complex systems analysis of series of blackouts: cascading failure, critical points, and selforganization / I. Dobson, B.A. Carreras, V.E. Lynch, D. E. Newman // *Chaos.* – 2007. – V. 17, № 2. – P. 026103.
6. Калентионок, Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е.В. Калентионок. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 375 с.
7. Nishikawa, T. Comparative analysis of existing models for power grid synchronization / T. Nishikawa, A.E. Motter // *New J. Phys.* – 2015. – V. 17, № 1. – P. 015012.
8. Rohden, M. Self-organized synchronization in decentralized power grids / M. Rohden, A. Sorge, M. Timme, D. Witthaut // *Phys. Rev. Lett.* – 2012. – V. 109, № 6. – P. 064101.
9. Menck, P.J. How dead ends undermine power grid stability / P.J. Menck, J. Heitzig, J. Kurths, J.H. Schellnhuber // *Nat. Commun.* – 2014. – V. 5, № 1. – P. 3969.
10. Motter, A.E. Spontaneous synchrony in power-grid networks / A.E. Motter, S.A. Myers, M. Anghel, T. Nishikawa // *Nature Physics* – 2013. – V. 9. – P. 191–197.
11. Witthaut, D. Braess’s paradox in oscillator networks, desynchronization and power outage / D. Witthaut, M. Timme // *New J. Phys.* – 2012. – V. 14, № 8. – P. 083036.
12. Schafer, B. Understanding Braess’ paradox in power grids / B. Schafer, T. Pesch, D. Manik, J. Gollenstede, G. Lin, H.-P. Beck, D. Witthaut, M. Timme // *Nat. Commun.* – 2022. – V. 13, № 1. – P. 5396.
13. Witthaut, D. Nonlocal failures in complex supply networks by single link additions / D. Witthaut, M. Timme // *The European Physical Journal B.* – 2013. – V. 86, № 9. – P. 377.
14. Tchuisseu, E.B. Curing Braess’ paradox by secondary control in power grids / E.B. Tchuisseu, D. Gomila, P. Colet, D. Witthaut, M. Timme, B. Schafer // *New J. Phys.* – 2018. – V. 20, № 8. – P. 083005.

15. Dorfler, F. Synchronization in complex oscillator networks and smart grids / F. Dorfler, M. Chertkov, F. Bullo // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* – 2013. – V. 110, № 6. – P. 2005–2010.
16. Balestra C. Multistability in lossy power grids and oscillator networks / C. Balestra, F. Kaiser, D. Manik // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science.* – 2019. – V. 29, № 12. – P. 123119.
17. Halekotte, L. Minimal fatal shocks in multistable complex networks / L. Halekotte, U. Feudel // *Scientific Reports* – 2020. – V. 10, № 1. – P. 11783.
18. Arinushkin, P.A. Nonlinear damping effects in a simplified power grid model based on coupled Kuramoto-like oscillators with inertia / P.A. Arinushkin, T.E. Vadivasova // *Chaos, Solitons and Fractals.* – 2021. – V. 152. – P. 111343.
19. Hellmann, F. Survivability of deterministic dynamical systems / F. Hellmann, P. Schultz, C. Grabow, J. Heitzig, J. Kurths // *Sci. Rep.* – 2016. – V. 6, №1. – P. 29654.
20. Kim, H. Building blocks of the basin stability of power grids / H. Kim, S.H. Lee, P. Holme // *Phys. Rev. E.* – 2016. – V. 93, № 6. – P. 062318.
21. Kim, H. On structural and dynamical factors determining the integrated basin instability of power-grid nodes / H. Kim, M.J. Lee, S.H. Lee, S.-W. Son // *Chaos.* – 2019. – V. 29, № 10. – P. 103132.
22. Li, Y. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: a duality theory / Y. Li, Y. Gu, and T. C. Green // *IEEE Trans. Power Syst.* – 2022. – V. 37, № 6. – P. 4541–4554.
23. Tumash, L. Effect of disorder and noise in shaping the dynamics of power grids / L. Tumash, S. Olmi, E. Scholl // *EPL.* – 2018. – V. 123, № 2. – P. 20001.
24. Gambuzza, L.V. Analysis of dynamical robustness to noise in power grids / L.V. Gambuzza, A. Buscarino, L. Fortuna, M. Porfiri, M. Frasca // *IEEE J. Emerging Sel. Top. Circuits Syst.* – 2017. – V. 7, № 3. – P. 413–421.
25. Gupta P.C. Multistability, coexisting behaviours and control of fractional order dissipative small scale grid with disturbances and noise / P.C. Gupta and P.P. Singh // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* – 2023. – V. 232, № 14. – P. 2415–2436.
26. Министерство энергетики Российской Федерации, приказ № 495 от 1 августа 2014 года «Об утверждении схемы и программы развития Единой Энергетической системы России на 2014–2020 годы».

ХРАМЕНКОВ Владислав Анатольевич

**НЕЛОКАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ  
ЭНЕРГОСЕТЕЙ С ХАБ-ТОПОЛОГИЕЙ**

Автореферат

Подписано к печати 25.12.2024 г.  
Формат  $60 \times 90^{1/16}$ . Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ № 48(2024).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики  
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН  
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46