

DOI: 10.34831/EP.2023.34.46.001

УДК 621.311

Цифровой симулятор режимов минигрида, интегрированного с внешней электрической сетью

Часть 1. Физико-технологические основы объекта симуляции

ФИШОВ А. Г., доктор техн. наук; fishov@ngs.ru

ПЕТРИЩЕВ А. В., канд. техн. наук

ОЖУЛАС В. А.

Новосибирский государственный технический университет

630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20



А. Г. Фишов



А. В. Петрищев



В. А. Ожулас

Представлены результаты разработки цифрового симулятора (двойника) режимов самобалансирующихся локальных интеллектуальных энергосистем (минигридов) на основе синхронной малой генерации. Симулятор адекватен реальному объекту с управлением на основе специализированной системной автоматики, использующей инновационные способы противоаварийного и режимного управления минигридами, интегрированными в существующие электрические сети централизованного энергоснабжения. Симулятор позволяет оператору осуществлять запуск электростанции с нуля при автономной работе или при поданном питании на шины станции со стороны внешней энергосистемы, выбор состава работающего генерирующего оборудования с учётом нескольких сечений в схеме выдачи мощности и условий сбалансированности при противоаварийном отделении, разные заданные режимы обмена мощностью с внешней сетью, создавать и ликвидировать аварийные ситуации. Интерфейс оператора, средства манипулирования и наблюдения максимально приближены к реальным, реализованным в пилотном проекте создания минигрида жилмассива на базе когенерационной газовой электростанции. В симуляторе реализованы возможности ручного и полуавтоматического управления режимами минигрида при «островной» и параллельной работах с сетью, а также переходами между ними. Симулятор предназначен для подготовки дежурного персонала реальных минигридов, интегрированных в существующие электрические сети, а также для обучения студентов электроэнергетиков со специализацией по управлению режимами энергосистем и активных электрических сетей, содержащих распределённую малую генерацию. Статья публикуется в двух частях. Первая часть посвящена физико-технологическим процессам и описанию управления режимами минигридов как объектов симуляции. Вторая — описанию технической реализации симулятора, верификации её результатов, особенностям использования в процессах обучения студентов и подготовки оперативного персонала минигридов.

Ключевые слова: распределённая малая генерация, минигрид, локальные системы энергоснабжения, электрическая сеть, параллельная работа, автоматика, симулятор, цифровой двойник.

К числу основных направлений развития современной электроэнергетики относятся широкое применение распределённой малой генерации и различных объектов на их основе в существующих распределительных электрических сетях централизованного энергоснабжения, а также цифровизация таких объектов и технологий их проектирования, подготовки персонала [1 – 11].

Важную роль в этих процессах занимают, так называемые, цифровые двойники и симуляторы работы реальных объектов, обеспечивающие ускорение процессов их разработки, подготовки эксплуатационного оперативного персонала [12 – 13].

Цифровой симулятор разработан в составе проектов по созданию самобалансирующихся энергосистем малой мощности (минигридов) под управлением интеллектуального программно-технического комплекса (ПТК), интегрированных в сети питающих центров (макрогридов, энергосистем централизованного энергоснабжения) [14 – 20].

Назначение разработки — презентация разработанной в Новосибирском государственном техническом университете технологии интеллектуального управления режимами минигридов при их компьютерной имитации, обучение диспетчерского персонала объектов, использующих данную технологию, а также студентов технических университетов по направлению «Электроэнергетика» особенностям режимов минигридов и возможностям эффективного управления ими с использованием современных технологий.

Авторы убеждены, что создание цифровых симуляторов и двойников минигридов будет способствовать переводу электроэнергетики РФ на новый технологический уклад, характеризующийся включением в сети генерирующих источников распределённой (малой) генерации с различными видами используемых первичных энергоресурсов, позволяющих существенно изменить возможности электрической сети по обеспечению надёжного и качественного энергоснабжения потребителей, организовать их эффективное взаимодействие с другими генерирующими источниками, направленное на снижение издержек сетевой инфраструктуры, создание механизмов её сбалансиро-

ванного развития, снижение затрат потребителей на энергоснабжение.

Объекты цифрового симулятора

Миниригид жилмассива на базе когенерационной электростанции

В 2021 г. впервые в нашей стране в г. Новосибирске при реконструкции локальной системы энергоснабжения жилмассива «Берёзовое» на базе собственной когенерационной электростанции был создан миниригид с полноценной параллельной работой с внешней электрической сетью, множеством режимов обмена мощностью, надёжными переходами между режимами параллельной и автономной работы по разработанной в НГТУ технологии управления, реализуемой автооператором.

Этапность развития системы энергоснабжения жилмассива от минигрида представлена в табл. 1, схема выдачи мощности во внутреннюю и внешнюю сеть показана на рис. 1.

Состав электрогенерирующего оборудования минигрида: пять газопоршневых установок (ГПУ) фирмы Caterpillar мощностью по 2 МВт каждая; две резервных дизель-генераторных установки (ДГУ) мощностью по 1,6 МВт.

Суммарная мощность теплогенерации за счёт когенерации тепла и газовых котлов составляет около 50 МВт.

Характеристики электроснабжения жилмассива на этапах развития минигрида представлены в табл. 2.

Положительные системные эффекты для внешней электрической сети от параллельной работы минигрида с правом выдачи мощности представлены в табл. 3.

Особенности новых режимов минигрида:

1. При параллельной работе с внешней сетью, жилмассив и его промышленная нагрузка имеют два источника энергоснабжения (от ГПУ минигрида и внешней электрической сети, с регулируемым обменным перетоком мощности между ними в одном из балансируемых сечений присоединения S_1 или S_2 (рис. 1 и рис. 2, в).

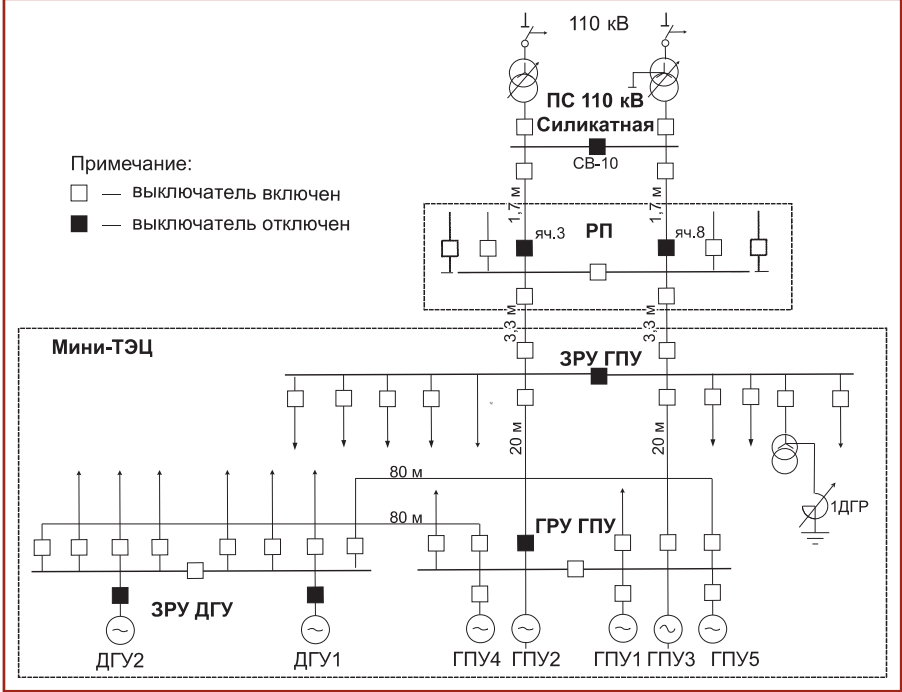


Рис. 1. Схема выдачи мощности минигрида жилмассива «Берёзовое» в г. Новосибирске:

ПС — высоковольтная подстанция; РП — распределительный пункт; ЗРУ ГПУ — генераторное распределительное устройство газопоршневых установок (10 кВ); ЗРУ ГРУ — закрытое распределительное устройство; ГПУ — газопоршневая установка; ДГУ — резервная дизель-генераторная установка; ДГР — дугогасящий реактор; СВ — секционный выключатель; яч. — ячейка выключателя

2. Генераторы минигрида, не участвующие в покрытии собственного электропотребления (так называемые «свободные»), при наличии оперативного разрешения также могут вводиться в работу и загружаться до максимально разрешённой собственной мощности или обменной мощности в заданном сечении.

3. Переход минигрида из режима параллельной работы в автономный осуществляется сбалансированно:

- при оперативном отделении минигрида от внешней сети — с разгрузкой и отключением свободных генераторов;
- при противоаварийном отделении (при экстренном отключении выключателей в сечении) — с одновременным отключением свободных генераторов без разгрузки (что сохраняет сбалансированность отделившегося минигрида

и его работоспособность после отделения).

4. По факту возобновления готовности минигрида и внешней электрической сети к нормальной параллельной работе этот режим восстанавливается автоматически.

Отдельно стоит указать, что для обеспечения экономичной работы энергоблоков минигрида в основном режиме параллельной работы с внешней сетью и с удержанием обменной мощности в коридоре допустимых значений предложен и запатентован способ управления режимом параллельной работы синхронных генераторов с дискретной коррекцией загрузки энергоблоков [19].

Способ позволяет:

- удовлетворить требования стандарта к участию энергоблоков электростанции минигрида в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ);
- обеспечить длительную постоянную нагрузку энергоблоков электростанции минигрида.

Способ реализуется под управлением автооператора следующим образом [19]:

1. Мощность энергоблокам задаётся внешними постоянными сигналами и регулируется только регуляторами частоты вращения двигателей (АРЧВ). Таким образом, системная автоматика осуществляет разомкнутое управление мощностью энергоблоков для задания желаемой выдаваемой мощности, а АРЧВ проводят независимое регулирование мощности по отклонению час-

Таблица 1

Этапы развития минигрида (пример)			
Этап	Длительность	Наименование	Содержание
1	2015 – 2019	Островной режим	Создание системы энергоснабжения жилмассива. Миниригид полностью изолирован от внешней сети.
2	2019 – 2021	Островной режим с резервированием от внешней сети	Подключение минигрида к внешней сети. Параллельная работа генераторов минигрида с внешней сетью запрещена.
3	2021 – по настоящее время	Режим параллельной работы с правом выдачи мощности	Параллельная работа генераторов минигрида с внешней сетью и обмен мощностью разрешены.

Характеристики электроснабжения жилмассива на этапах развития минигрида

Характеристики электроснабжения	Этапы		
	1	2	3
Надёжность	Не обеспечивается	Обеспечивается частично	Обеспечивается
	Частые отключения энергоблоков автоматикой при сбросах или набросах нагрузки, в режимах минимальной нагрузки. Погашение нагрузки на время восстановления	При погашении электростанции (отключении всех энергоблоков) вводится ограниченный сетевой резерв	1. Вероятность погашения электростанции снижена. В случае погашения вводится ограниченный сетевой резерв. 2. При сбросах или набросах нагрузки в минигриде источниками внешней сети осуществляется динамическое балансирование мощности
Экономичность	Не обеспечивается	Не обеспечивается	Обеспечивается
	1. Низкий КИУМ генерации ввиду высокой неравномерности суточного профиля нагрузки. 2. Повышенный расход газа и ресурса ГПУ ввиду непрерывного регулирования частоты	При погашении электростанции (отключении всех энергоблоков) вводится ограниченный сетевой резерв	1. Выдача избыточных мощностей (до 4 МВт) во внешнюю сеть. 2. Сглаживание графика нагрузки за счёт выдачи мощности во внешнюю сеть. 3. Работа энергоблоков в режиме коррекции обменной мощности с удержанием её в коридоре допустимых значений
Качество	Не обеспечивается	Не обеспечивается	Обеспечивается
	Нестабильность частоты	При погашении электростанции (отключении всех энергоблоков) вводится ограниченный сетевой резерв	Стабильность частоты, обеспечиваемая внешней сетью
Экологичность	Обеспечивается	Обеспечивается	Обеспечивается повышено на (15 – 20) %
	Повышенный расход газа при непрерывном поддержании баланса активной мощности путём регулирования частоты	При погашении электростанции (отключении всех энергоблоков) вводится ограниченный сетевой резерв	Работа энергоблоков в режиме удержания обменной мощности в коридоре допустимых значений снижает расход газа на выработку эквивалентного количества энергии и, соответственно, углеродный след от использования топливной генерации

Таблица 3

Системные эффекты для внешней электрической сети от параллельной работы минигрида с правом выдачи мощности

Эффект	Содержание
Надёжность	Резервирование нагрузки (до 4 МВт) на ПС «Силикатная» за счёт возможности перевода на питание от минигрида
Экономичность	Снижение потерь за счёт разгрузки сети встречным потоком энергии от минигрида
Качество	Стабилизация напряжения в точке подключения к РЭС (шины ПС «Силикатная») за счёт действия регуляторов напряжения генераторов минигрида (нет необходимости в работе РПН)

тоты (ОПРЧ). При этом состав работающих энергоблоков и желаемая нагрузка задаются автооператором, а ширина коридора допустимых небалансов определяется допустимостью набросов/сбросов мощности на энергоблоки при спорадическом отделении минигрида от внешней электрической сети (сбросе обменного перетока мощности).

2. При приближении к границе коридора осуществляется корректировка

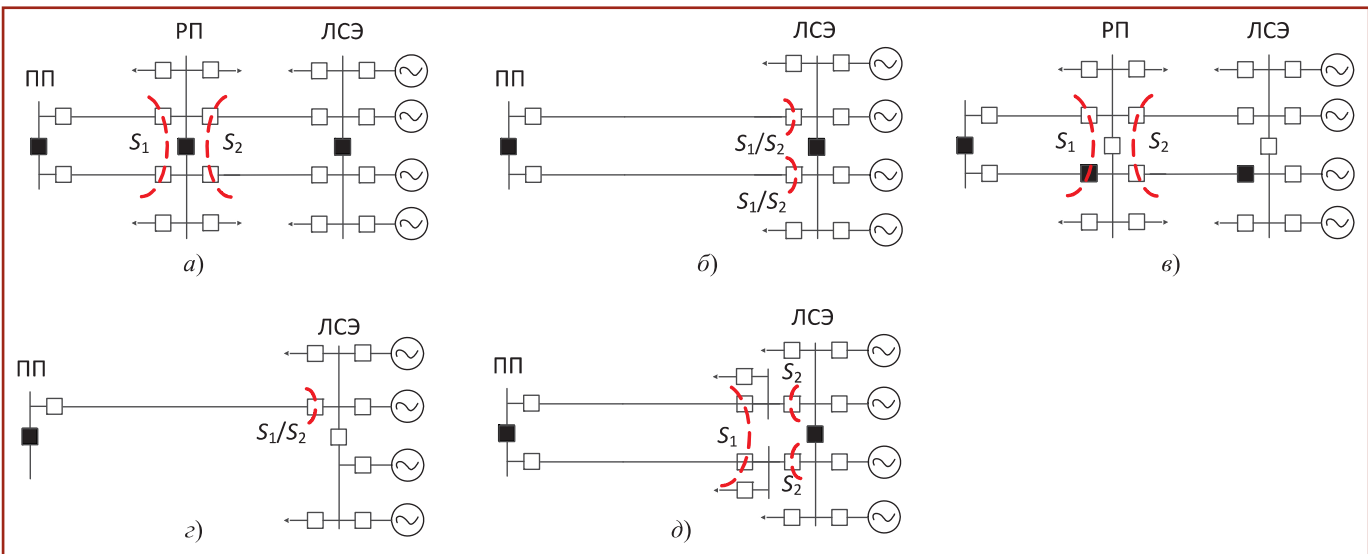


Рис. 2. Варианты схем выдачи мощности минигридов:

а — базовая схема с разделяющимся на две симметричные части минигридом с РП; б — схема с разделяющимся на две симметричные части минигридом без РП; в — схема с неразделяющимся на части минигридом с РП с основной и резервной связью с внешней сетью; г — схема с неразделяющимся на части минигридом без РП с одной связью с внешней сетью; д — схема с разделяющимся на части минигридом без РП с повышенной вариативностью отделения от внешней сети

желаемой загрузки энергоблоков для ввода режима в середину коридора. Необходимость корректировок обусловлена изменением собственной нагрузки минигрида и проводится, как правило, с частотой 1–2 раза в час. Длительность корректировки составляет 60–75 с. Корректировка осуществляется только при условии нахождения частоты в зоне мёртвой полосы ОПРЧ, т.е. не препятствует его работе. При таком регулировании мощности энергоблоков за счёт их преимущественной работы в режиме выдачи постоянной мощности удаётся значительно снизить расход газа на выработку эквивалентного количества энергии (на 15–20 %), что, соответственно, снижает углеродный след от использования топливной генерации.

Объект симуляции цифрового двойника как обобщение минигрида с многоагрегатной электростанцией и разными схемами выдачи мощности

При разработке цифрового двойника минигрида было использовано обобщение схем выдачи мощности и многоагрегатных электростанций минигрида (рис. 2), позволяющее расширить область его применения на множество однотипных минигридов с разными схемами выдачи мощности и, соответственно, различающимися условиями управления режимами.

Необходимость разделения минигрида на две части связана с ограничением в виде недопустимости шунтирования шин подстанции присоединения минигрида к внешней электрической сети её внутренней сетью.

Инновационные способы и автоматика режимного и противоаварийного управления минигридами при параллельной работе с внешней энергосистемой

Интеграция минигридов с внешней энергосистемой преследует цели получения положительных системных эффектов по надёжности энергоснабжения, качеству электрической энергии, а также экономичности работы электростанции минигрида. Для достижения этих целей с минимальными затратами были предложены специальные способы управления режимами минигридов, к числу которых следует отнести:

- Экстренное противоаварийное сбалансированное отделение минигрида от внешней сети при угрозах нарушения устойчивости параллельной работы или возникновения опасных ударных моментов на валах генераторов электростанции [16].

- Поддержание постоянной готовности к спорадическому противоаварийному сбалансированному отделению минигрида от внешней электрической сети путём совместного выбора состава работающего генерирующего

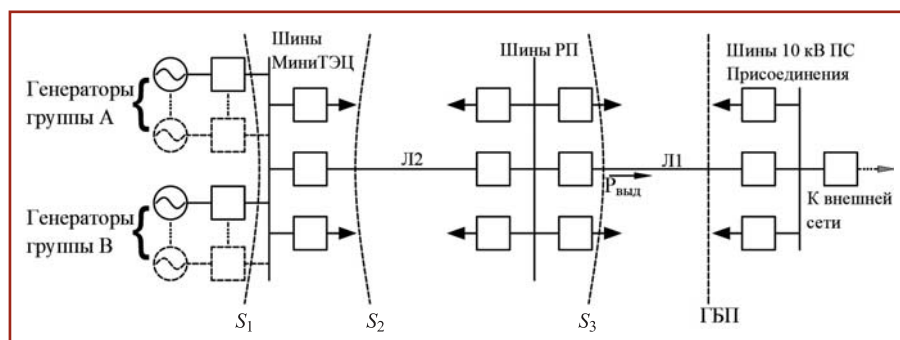


Рис. 3. Простейший пример принципиальной схемы присоединения минигрида на параллельную работу с внешней сетью для демонстрации способа противоаварийного управления при угрозах нарушения устойчивости параллельной работы:

S_1, S_2, S_3 — сечения возможного деления и последующей синхронизации; ГБП — граница балансовой принадлежности

оборудования и сечения для отделения [17].

- Создание наиболее благоприятных режимов для генерирующего оборудования электростанции минигрида по экономичности и использованию эксплуатационного ресурса [19].

- Автоматическое восстановление нормального режима параллельной работы минигрида с внешней сетью при возникновении соответствующих условий [18, 20].

- Специализированное автоматическое регулирование частоты и обменной мощности [19].

Способы были использованы при создании специальной системной автоматики при реализации пилотного проекта минигрида жилмассива «Березовое» в Новосибирске на базе многоагрегатной газопоршневой мини-ТЭЦ.

Рассмотрим основную идею технологии безопасной параллельной работы минигрида с внешней сетью с использованием его противоаварийного сбалансированного отделения от внешней сети по разным сечениям в качестве основного способа обеспечения надёжности энергоснабжения потребителей на простейшем примере присоединения минигрида к шине 10 кВ подстанции внешней электрической сети (рис. 3).

Минигрид предполагает параллельную работу с внешней сетью в одном из трёх режимов:

избыточный — с выдачей значимой мощности $P_{\text{выд}}$ во внешнюю сеть по заданной уставке $P_{\text{зад}}$ ($P_{\text{выд}} \approx P_{\text{зад}}$);

сбалансированный — без выдачи значимой мощности во внешнюю сеть ($P_{\text{выд}} \rightarrow 0$);

дефицитный — с потреблением значимой мощности из внешней сети ($P_{\text{выд}} \approx -P_{\text{зад}}$).

Энергоблоки минигрида в зависимости от общего баланса активной мощности динамически делятся на две группы:

Группа А или «Балансирующие энергоблоки» — состоит из минимального числа энергоблоков, достаточного для поддержания баланса мощности собственной нагрузки в текущем режиме.

Группа В или «Свободные энергоблоки» — состоит из энергоблоков с избыточной для покрытия собственной нагрузки мощностью, что позволяет выдавать их мощность во внешнюю электрическую сеть.

Рассмотрим избыточный режим минигрида, именно в нём достигаются все заявляемые повышенные характеристики: надёжность, экономичность, качество и экологичность.

В этом режиме энергоблоки группы А загружены на величину собственной нагрузки минигрида с допустимым при противоаварийном экспресс-отделении от внешней сети небалансом, позволяющим сохранить их в работе без отключения. Энергоблоки группы В загружены на величину заданной оперативной уставки ($P_{\text{г(В)}} = P_{\text{выд}} = P_{\text{зад}}$), где $P_{\text{г(В)}}$ — текущая мощность энергоблоков группы В. Эти условия поддерживаются режимной автоматикой в нормальных режимах. Режимная автоматика поддерживает эти параметры при отсутствии больших возмущений (стационарный нормальный режим). При этом регуляторы энергоблоков группы А поддерживают требуемый обменный переток и заданный для него $\cos\varphi$.

При возникновении возмущения (коротком замыкании во внешней сети или внутренней сети минигрида) фиксируется снижение напряжения прямой последовательности или появление значимого напряжения обратной. Тогда, до отключения КЗ устройствами РЗА во внешней сети, за время менее 0,1 с отключаются выключатели сечения S_1 и выключатели генераторов группы В. Регуляторы энергоблоков группы А переводятся в режим регулирования частоты и напряжения.

Если КЗ являлось внешним, то при опережающем отделении сохраняется баланс мощности в отделившейся островной части и работоспособность при переходе в режим регулирования частоты оставшимися генераторами. За счёт опережающего отключения минигрида во внешней сети устанавливаются условия для работы устройств РЗА, соответствующие отсутствию параллель-

ной работы с минигридом, что позволяет, как правило, не согласовывать работу защит минигрида и внешней сети.

Если КЗ являлось внутренним и нарушился баланс мощности, то в отделившейся части после восстановления напряжения, при необходимости, действует автоматика ограничения повышения или снижения частоты. Она обеспечивает сохранение (полное или частичное) энергоснабжения потребителей в отделившемся минигриде за счёт:

- регулирования мощности, выдаваемой генераторами;
- включения дополнительной нагрузки;
- отключения части нагрузки.

После восстановления нормальных условий по напряжению и частоте с обеих сторон сечения (выключателя) минигрид автоматически снова переводится в режим параллельной работы (путём точной синхронизации с последующим восстановлением режима регуляторов для параллельной работы).

Сбалансированный режим минигрида можно рассматривать как частный случай избыточного: множество генераторов группы В — пустое, действия над ними не производятся.

В дефицитном режиме деление происходит по сечению S_2 с устранением дефицита мощности минигрида путём отнесения части нагрузки (нагрузки РП) к внешней сети.

Представленные инновационные способы и автоматика режимного и противоаварийного управления параллельной работой минигрида создают ряд положительных режимно-технических эффектов, представленных в табл. 4.

Как следует из представленного описания, одной из ключевых задач управ-

ления режимами минигридов в нормальных условиях является совместный выбор состава включённого генерирующего оборудования (ВСВГО) с его разделением на две группы и сечения в схеме выдачи мощности минигридов для его использования при спорадическом противоаварийном отделении от внешней электрической сети.

Задача ВСВГО и определения сечения для спорадического противоаварийного отделения минигрида от внешней электрической сети

Выбор состава включённых в работу генераторов и определение контролируемого сечения на объектах минигрида основывается на следующих требованиях:

- Должны обеспечиваться заданные оператором цели управления (режимами).
- Небаланс по активной мощности минигрида не должен превышать допустимое значение после оперативного или спорадического отделения минигрида от внешней электрической сети по контролируемому сечению (отделение по сечению должно быть с допустимым небалансом).
- Режимы каждого энергоблока должны быть длительно или кратковременно (для послеаварийного режима) допустимы.

Для оптимального выбора состава включённых в работу генераторов необходимо определить контролируемое сечение, состав и загрузку энергоблоков так, чтобы обеспечивался баланс активной мощности минигрида с учётом мощности контролируемого сечения, а величина перетока мощности по сечению должна находиться внутри коридо-

ра его допустимых отклонений. При этом необходимо учитывать, что все энергоблоки минигрида в зависимости от условий могут быть разделены на три типа «Балансирующие», «Свободные», «Находящиеся в сервисе», возможна смена состояния энергоблоков с балансирующего на свободный и наоборот, а энергоблоки, находящиеся в сервисе, не могут автоматически использоваться при ВСВГО.

Ограничениями по загрузке являются:

- Загрузка всех энергоблоков должна находиться внутри рабочего диапазона мощности, т. е. в пределах технологического минимума ($P_{\text{тех. min}}$) и максимума ($P_{\text{тех. max}}$);
- Загрузка всех энергоблоков должна обеспечивать выполнение ограничения на максимально разрешённую выдачу и максимально разрешённое потребление мощности ($P_{\text{огр. сеч}}$) по выбранному сечению, с учётом мощности усреднённой на интервале нагрузки ($P_{\text{н. ср}}^{\text{инт}}$) и амплитуды нерегулярных колебаний ($\Delta P_{\text{н. к}}$);
- Загрузка балансирующих энергоблоков после спорадического отделения минигрида от внешней сети должна находиться внутри рабочего диапазона мощности, определяемого величиной допустимого небаланса ($\Delta P_{\text{д. н. к}}$) энергоблока, с учётом нерегулярных колебаний.

Математическая формулировка подзадачи загрузки включённых в работу энергоблоков с целью выдачи максимальной мощности во внешнюю сеть

Целевой функцией является величина выдаваемой мощности ($P_{\text{выд}}$) энергоблоками, находящимися в работе (балансирующими и свободными), а критерием оптимизации является её максимум, т. е. $P_{\text{выд}} \rightarrow \max$.

С учётом ограничений типа равенств и неравенств (при однотипности всех энергоблоков) задача будет иметь следующий вид:

$$P_{\text{выд}} = \sum_{i=1}^{n_6} P_{\text{загр}, i}^6 + \sum_{i=1}^{n_c} P_{\text{загр}, i}^c \rightarrow \max$$

при ограничениях

$$\begin{cases} P_{\text{тех. min}} \leq P_{\text{загр}, i}^6 \leq P_{\text{тех. max}, i} \\ P_{\text{тех. min}} \leq P_{\text{загр}, i}^c \leq P_{\text{тех. max}, i} \\ P_{\text{доп. min}, i}^6 \leq P_{\text{загр}, i}^6 \leq P_{\text{доп. max}, i}^6 \\ P_{\text{загр}, i}^c = P_{\text{доп. max}, i}^c \end{cases}$$

где n_6 и n_c — число балансирующих и свободных энергоблоков;
 $P_{\text{загр}, \max}^6 = P_{\text{тех. max}} - \frac{\Delta P_{\text{н. к}}}{n_6}$ — величина

максимальной загрузки балансирующего энергоблока с учётом амплитуды нерегулярных колебаний $\Delta P_{\text{н. к}}$; $P_{\text{загр}, i}^6$ и $P_{\text{загр}, i}^c$ — величина загрузки i -го балансирующего и свободного энергоблока со-

Таблица 4

Положительные режимно-технические эффекты инновационных способов и автоматики режимного и противоаварийного управления параллельной работой минигрида

Эффект	Оценка эффективности	Пояснение
Предотвращение нарушений устойчивости режима параллельной работы минигрида с внешней энергосистемой	Исключительная	Вместо управления для сохранения устойчивости параллельной работы используется экстренное сбалансированное отделение по переменным сечениям в схеме выдачи мощности
Достаточность состава и уставок существующих устройств РЗА во внешней сети	Исключительная	Отделение минигрида не влияет на условия работы устройств РЗА внешней сети. При отделении возникает конфигурация сети, соответствующая отсутствию подключения минигрида к внешней сети
Сохранение уровней токов КЗ, отключаемых выключателями в сети минигрида, соответствующими уровням автономного режима	Высокая	Кроме уровней токов КЗ отключаемых выключателями сечений S_1 и S_2
Предотвращение возникновения на валах синхронных генераторов разрушительных динамических моментов при возмущениях	Исключительная	За счёт исключения действия ударных электромагнитных моментов, возникающих при восстановлении напряжения в сети после отключения КЗ без отделения минигрида с учётом выбега роторов генераторов

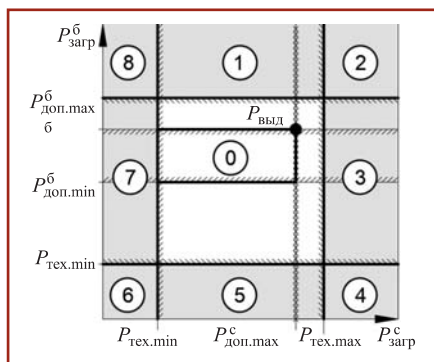


Рис. 4. Графическое представление области допустимых режимов для поиска оптимальной загрузки i -го энергоблока при фиксированном составе энергоблоков (смысл номеров зон раскрывается в последующем описании, при этом зона с номером 0 удовлетворяет всем ограничениям по загрузке энергоблока)

ответственно; $P_{\text{доп.мин}}^b$ и $P_{\text{доп.макс}}^b$ — величина минимально и максимально допустимой мощности загрузки i -го балансирующего энергоблока, соответственно; $P_{\text{доп.макс}}^c$ — величина максимально допустимой мощности загрузки свободного энергоблока.

При этом

$$P_{\text{доп.мин}}^b = \left(\frac{P_{\text{н.ср}}^{\text{инт}} + \Delta P_{\text{н.к}}}{n_6} - \Delta P_{\text{д.н.}} \right);$$

$$P_{\text{доп.макс}}^b = \left(\frac{P_{\text{н.ср}}^{\text{инт}} - \Delta P_{\text{н.к}}}{n_6} + \Delta P_{\text{д.н.}} \right);$$

$$P_{\text{загр}}^c = P_{\text{доп.макс}}^c = \frac{P_{\text{огр.сеч}} - (P_{\text{доп.макс}}^b n_6 - P_{\text{н.ср}}^{\text{инт}} + \Delta P_{\text{н.к}})}{n_c}.$$

В данной формулировке задача оптимальной загрузки энергоблоков сводится к задаче линейного программирования и может быть решена известными

методами (например, симплекс методом).

При этом область допустимых режимов (ОДР) будет выглядеть, как представлено на рис. 4, где по осям абсцисс и ординат отложены мощности загрузки однотипных свободных и балансирующих энергоблоков соответственно.

Максимум целевой функции ($P_{\text{выд}}^b$) для сформированной ОДР будет находиться в точке пересечения прямой $P_{\text{доп.макс}}^b$ и $P_{\text{доп.макс}}^c$.

Пример решения подзадачи загрузки включённых в работу энергоблоков с целью выдачи максимальной мощности

Средой для решения является программа Microsoft Excel с реализацией симплекс метода. Окно настройки функции «Параметры поиска решений» и набор исходных данных представлен на рис. 5.

В ходе проверки математической модели получены решения и построены следующие зависимости:

- загрузки энергоблоков от величины нагрузки минигрида ($P_{\text{н.ср}}^{\text{инт}}$) [рис. 6, а] при постоянстве следующих величин: $\Delta P_{\text{н.к}}$, $\Delta P_{\text{д.н.}}$, $P_{\text{тех.мин}}$, $P_{\text{тех.макс}}$, $P_{\text{огр.сеч}}$, n_6 , n_c — равные значениям, представленным на рис. 5, а;
- выдачи мощности в сеть ($P_{\text{выд.сеч}}^b$) от величины допустимой загрузки сечения ($P_{\text{огр.сеч}}$) [рис. 6, б] при постоянстве следующих величин: $\Delta P_{\text{н.к}}$, $\Delta P_{\text{д.н.}}$, $P_{\text{тех.мин}}$, $P_{\text{тех.макс}}$, n_6 , n_c — равные значениям, представленным на рис. 5, а, величина нагрузки минигрида также являлась постоянной и равнялась 3600 кВт.
- загрузки энергоблоков от состава балансирующих и свободных энергоблоков (n_6/n_c) [рис. 7] при постоянстве следующих величин: $\Delta P_{\text{н.к}}$, $\Delta P_{\text{д.н.}}$,

$P_{\text{тех.мин}}$, $P_{\text{тех.макс}}$, $P_{\text{огр.сеч}}$ — равные значениям, представленным на рис. 5, а, величина нагрузки выставлялась таким образом, чтобы загрузка балансирующих энергоблоков равнялась $P_{\text{тех.мин}}$ или $P_{\text{доп.макс}}^b$ (при $P_{\text{выд.макс}}^b = 0$).

Полученные решения и зависимости показывают достоверность математической модели, однако, при поиске оптимальной загрузки энергоблоков могут возникать ситуации, когда не все ограничения выполняются (см. красную область на рис. 6, а и б). При этом загрузка энергоблоков упирается в ограничения по технологическому минимуму или максимуму, что связано с тем, что решение определено для заданного состава энергоблоков без учёта возможности его изменения. На рис. 7 видно, как изменение СВГО позволяет не только увеличить/уменьшить выдачу мощности в сети, а также увеличить выдачу мощности для балансирования собственной нагрузки минигрида. Изменение состава генерирующего оборудования является следующей подзадачей, входящей в цикл определения общего решения.

Зоны выбора и выбор СВГО и сечений с целью выдачи максимальной мощности

Помимо основной зоны ОДР на рис. 4 представлены восемь зон, границы которых формируются условиями возможной максимальной и минимальной загрузки энергоблоков. При вариации нагрузки, границ коридора выдачи мощности по сечению, состава энергоблоков, экстремум может упираться в границы одной из зон, что свидетельствует о необходимости изменения СВГО и/или сечения. При этом границы зон однозначно определяют необходи-

	A	B	C	D	E	F	
1	Исходные данные						
2	$P_{H.cp}^{инт}$	$P_{н.к}$	$P_{д.н.i}$	$P_{тех.min}$	$P_{тех.max}$	$P_{огр.сеч}$	
3	3600	50	200	1000	2000	4000	
4	Ограничения		Тип	$P_{загр_i}^{б(с)}$, Вт	k_i	$\sum k_i$	
5	1	1975	Баланс.	1975	1	2	
6	2	1975	Баланс.	1975	1		
7	3	1800	Свобод.	1800	1	2	
8	4	1800	Свобод.	1800	1		
9	5	1975				Целевая функция	
10	6	1975				$P_{выд}$	7550
11	7	1800					
12	8	1800					
13	9	1975					
14	10	1975					
15	11	1975					
16	12	1975					
17	13	1800					
18	14	1800					
19	15	1975					

а)

Оптимизировать целевую функцию: $\$F\10

До: ☒ Максимум ☐ Минимум ☐ Значения: 0

Изменяя ячейки переменных: $\$D\$5:\$D\8

В соответствии с ограничениями:

$\$B\$10 \leq (\$E\$3 - \$B\$3) / \$F\5
 $\$B\$11 \leq (\$E\$3 - \$B\$3) / \$F\7
 $\$B\$12 \leq (\$E\$3 - \$B\$3) / \$F\7
 $\$B\$13 \geq ((\$A\$3 + \$B\$3) / \$F\$5) - \$C\3
 $\$B\$14 \geq ((\$A\$3 + \$B\$3) / \$F\$5) - \$C\3
 $\$B\$15 \leq ((\$A\$3 - \$B\$3) / \$F\$5) + \$C\3
 $\$B\$16 \leq ((\$A\$3 - \$B\$3) / \$F\$5) + \$C\3
 $\$B\$17 = (\$F\$3 - (\$B\$15 * \$E\$5 + \$B\$16 * \$E\$6 - \$A\$3 + \$B\$3)) / \$F\7
 $\$B\$18 = (\$F\$3 - (\$B\$15 * \$E\$5 + \$B\$16 * \$E\$6 - \$A\$3 + \$B\$3)) / \$F\7
 $\$B\$19 = \$D\6
 $\$B\$5 \geq \$D\3
 $\$B\$6 \geq \$D\3
 $\$B\$7 \geq \$D\3

☒ Сделать переменные без ограничений неотрицательными

Выберите метод решения: Поиск решения лин. задач симплекс-методом

Параметры

б)

Рис. 5. Решение задачи симплекс-методом в среде Microsoft Excel:

а — рабочая область, содержащая исходные данные; б — окно настройки для решения задачи

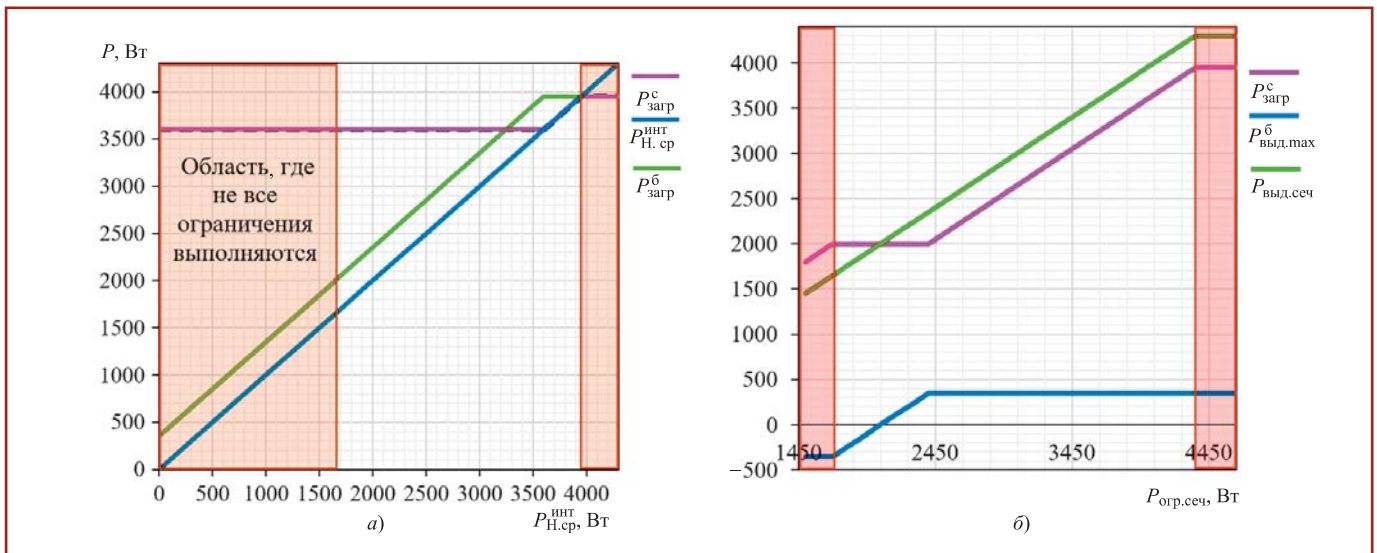


Рис. 6. Зависимости загрузки энергоблоков и выдачи мощности во внешнюю электрическую сеть от внешних параметров:

а — величины нагрузки минигрида; б — величины допустимой загрузки сечения

мость увеличения или уменьшения ВГО. Зоны отражают следующие условия и тип воздействия (увеличение \uparrow или уменьшение \downarrow числа энергоблоков в группе):

1. $P_{загр,i}^b = P_{загр,макс}^b \rightarrow n_b \uparrow$.
2. $P_{загр,i}^b = P_{загр,макс}^b$
и $P_{загр,i}^c = P_{загр,макс}^c \rightarrow n_b \uparrow$ и $n_c \uparrow$.
3. $P_{загр,i}^c = P_{загр,макс}^c \rightarrow n_c \uparrow$.
4. $P_{загр,i}^b = P_{тех,мин}$
и $P_{загр,i}^c = P_{загр,макс}^c \rightarrow n_b \downarrow$ и $n_c \uparrow$.
5. $P_{загр,i}^b = P_{тех,мин} \rightarrow n_b \downarrow$.
6. $P_{загр,i}^b = P_{тех,мин}$
и $P_{загр,i}^c = P_{тех,мин} \rightarrow n_b \downarrow$ и $n_c \downarrow$.
7. $P_{загр,i}^c = P_{тех,мин} \rightarrow n_c \downarrow$.
8. $P_{загр,i}^b = P_{загр,макс}^b$
и $P_{загр,i}^c = P_{тех,мин} \rightarrow n_b \uparrow$ и $n_c \downarrow$.

Поиск нового СВГО целесообразен с использованием динамического метода с корректировкой на шаге состава генерирующего оборудования в группе на единицу при выходе на границу зоны. При этом на предварительном этапе определяется:

- Число доступных для использования энергоблоков $n_{раб}$ определяется как:

$$n_{раб} = n_{ст} - n_{сер}$$

где $n_{ст}$ — полное число энергоблоков на станции; $n_{сер}$ — число энергоблоков, находящихся в сервисе.

- Число балансирующих собственную нагрузку энергоблоков для сечения S_i определяется как:

$$n_{S_i}^{6,min} = \frac{P_{S_i}^{H,sp}}{P_{тех,макс}},$$

где $P_{S_i}^{H,sp}$ — среднеинтервальная мощность нагрузки относительно сечения S_i .

Необходимость смены сечения $S_1 S_2$ возникает при условии отсутствия возможности увеличения числа баланси-

рующих энергоблоков. Смена сечения в данном случае приводит к уменьшению нагрузки минигрида в случае отделения от внешней сети за счёт исключения шин РП.

Целесообразность перехода от внутреннего сечения к внешнему $S_2 \rightarrow S_1$ возникает при условии достаточности мощности энергоблоков, находящихся в работе, для покрытия всей нагрузки минигрида.

Таким образом, зная необходимое число балансирующих энергоблоков для каждого из сечений и состав введенных в работу энергоблоков, можно установить контролируемое сечение по следующему условиям:

- $n_{раб} \geq n_{S_i}^{6,min}$ — контролируемое сечение S_i ;
- $n_{S_i}^{6,min} \geq n_{раб} \geq n_{S_2}^{6,min}$ — контролируемое сечение S_2 .

Выбрав контролируемое сечение и число балансирующих энергоблоков, проводится поиск числа свободных энергоблоков $n_{S_i}^c$, по следующему условию:

$$\begin{aligned} & \text{если } n_{раб} - n_{S_i}^{6,min} \geq \frac{P_{огр,сеч}(\Delta P_{д,н,i} n_{S_i}^{6,min})}{P_{тех,макс}}, \\ & \text{то } n_{S_i}^c = \frac{P_{огр,сеч}(\Delta P_{д,н,i} n_{S_i}^{6,min})}{P_{тех,макс}}, \\ & \text{иначе } n_{S_i}^c = n_{раб} - n_{S_i}^{6,min}. \end{aligned}$$

Определённый состав ($n_{S_i}^{6,min}$ и $n_{S_i}^c$) на предварительном этапе не будет отражать все выдвинутые ограничения по загрузке энергоблоков, поскольку не включает $\Delta P_{д,н,i}$ и $\Delta P_{ч,к}$, поэтому необходимо соотносить данный состав с ОДР. Если экстремум оптимальной загрузки снова находится на границе зон, то согласно зоне, указывающей направление в изменении СВГО, проводится корректировка состава на одну единицу необходимого изменения от найденного на предварительном этапе.

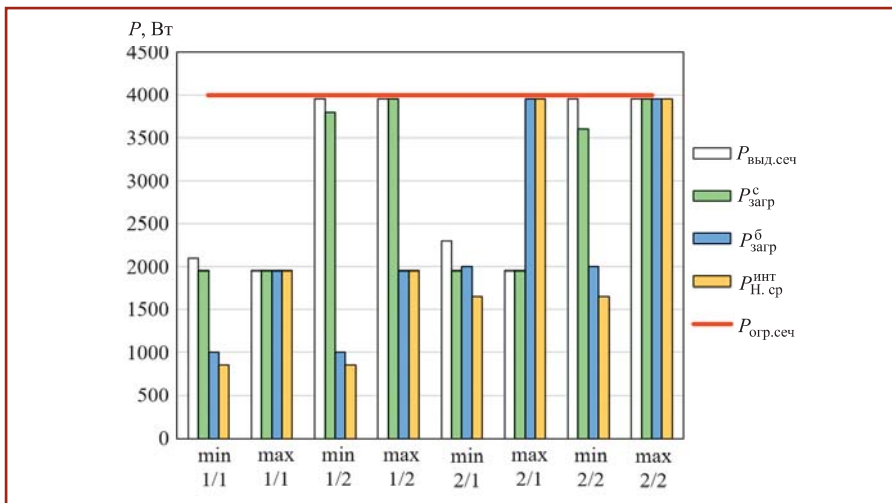


Рис. 7. Зависимость загрузки энергоблоков от состава балансирующих и свободных энергоблоков

Выбор считается завершённым, если оптимальная нагрузка для определённого состава соответствует всем ограничениям.

Заключение по части 1

Представленные физико-технологические основы режимов и комплексного оперативного, режимного и противоаварийного управления минигридами, позволяющего снять основные технологические барьеры на пути интеграции минигридов в существующие электрические сети централизованного энергоснабжения, получить существенные системные эффекты от этой интеграции, повышают уровень сложности этого управления, в том числе требуемой интеллектуальности в принятии решений. Следствием стала необходимость создания специализированной интеллектуальной системной автоматики для подобных минигридов, а также разработки симулятора режимов и работы системы управления для подготовки диспетчерского (дежурного) персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хохлов А. Распределенная генерация в России: потенциал развития / А. Хохлов, Ю. Мельников, Ф. Веселов, Д. Холкин, К. Дацко. — М.: Энергетический центр Московской школы управления Сколково, 2018.

2. Efimov D. N., Suslov K. V., Voropai N. I. Virtual power plants for isolated and jointly operating electric power supply systems — Perspectives and challenges for Russia // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. — IEEE, 2011. P. 1 — 6.

3. Фишов А. Г. Технические и экономические аспекты создания минигридов и их интеграции с централизованным энергоснабжением // Энергетик. 2022. № 4. С. 27 — 34.

4. Hu C., Shi W., Jiang L. Application case of digital twin technology in electric power system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. Vol. 788. No. 1. P. 012083.

5. Goia B., Cioara T., Anghel I. Virtual power plant optimization in smart grids: A Narrative Review // Future Internet. 2022. Vol. 14. No. 5. 128 p. DOI: 10.3390/fi14050128.

6. Nikonowicz Ł. B., Milewski, J. Virtual Power Plants — general review: structure, application and optimization // Journal of Power of Technologies. 2012. Vol. 92. P. 135 — 149.

7. Ullah Z., Mirjat N. H. Modelling and analysis of virtual power plants interactive operational characteristics in distribution systems // Energy Conversion and Economics. 2022. Vol. 3. No. 1. P. 11 — 19.

8. Dzobo O. Virtual power plant energy optimisation in smart grids. 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference «Robotics and Mechatronics». Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC / RobMech / PRASA), Bloemfontein, South Africa, 2019. P. 714 — 718.

9. Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Эффекты интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Изв. вузов. Сер. «Проблемы энергетики». 2022. Т. 24. № 1. С. 3 — 15. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-3-15.

10. Самойленко В. О. Проблемы подключения и эксплуатации малой генерации / В. О. Самойленко, С. А. Ерошенко, А. В. Паздерин // В сб. докл. 5-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках специализированного форума «Expo Build Russia»: «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии (ЭКСИЭ'05)»; науч. ред. Ф. Н. Сарапулов. г. Екатеринбург, 2016. С. 45 — 47.

11. Илюшин П. В. Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единой энергетической системе России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению // Вестник МЭИ. 2022. № 4. С. 98 — 107.

12. Danilczyk W., Sun Y., He H. ANGEL: An Intelligent Digital Twin Framework for Microgrid Security. 2019 North American Power Symposium (NAPS), 2019. P. 1 — 6. DOI: 1109/NAPS46351.2019.9000371.

13. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jones, et al. // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2020. Vol. 29. P. 36 — 52.

14. Гежа Е. Н. Системная автоматика для интеграции локальных систем электроснабжения с синхронной малой генерацией в электрические сети / Е. Н. Гежа, Е. С. Ивкин, О. В. Сердюков, В. Е. Глазырин, Г. В. Глазырин, А. И. Марченко, Р. Ю. Семендяев, А. Г. Фишов // Релейщик. 2018. № 2 (32). С. 24 — 31.

15. Марченко А. И., Денисов В. В., Мурашкина И. С. Средства и способы управления параллельной работой электрической станции малой генерации с электрической сетью // Системы анализа и обработки данных. 2019. № 1 (74). С. 77 — 90.

16. Патент RU 2662728 C2. Способ противоаварийного управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях: заявл. 06.12.2016; опубл. 30.07.2018. Фишов А. Г., Мукатов Б. Б., Марченко А. И.; заявитель Фишов А. Г.; патентообладатель Новосибирский государственный технический университет.

17. Патент RU 2697510 C1. Способ управления составом и нагрузкой генераторов электростанции с собственными нагрузками, работающей изолированно и параллельно с приемной энергосистемой: заявл. 10.04.2018; опубл. 15.08.2019. Фишов А. Г., Семендяев Р. Ю., Ивкин Е. С.

18. Патент RU 2686079 C1. Способ синхронизации частей электрической сети: заявл. 30.11.2017; опубл. 24.04.2019. Фишов А. Г., Армеев Д. В., Сердюков О. В.

19. Патент RU 2752248 C1. Способ управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях: заявл. 07.12.2020; опубл. 23.07.2021. Фишов А. Г., Какоша Ю. В.

20. Патент RU 2752693 C1. Способ удаленной синхронизации и восстановления нормального режима аварийно разделенной электрической сети с генераторами: заявл. 28.09.2020; опубл. 30.07.2021. Фишов А. Г., Гуломзода А. Х.

ПОДПИСКА

Цены на подписку через редакцию на второе полугодие 2023 г.

129090, Москва, ул. Щепкина, 8.
Тел. +7 (495) 234-74-21.
energetick@mail.ru

Наименование издания	Подписной индекс	Цена одного экземпляра с почтовыми расходами в рублях	
		без НДС	с НДС
Энергетик	71108	2240,00	2464,00
Библиотека электротехника	88983	1420,00	1562,00
Энергетика за рубежом	87261	1090,00	1199,00