

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента – доктора технических наук  
Илюшина Павла Владимировича на диссертационную работу  
Ивкина Ефима Сергеевича на тему «Системная автоматика для создания  
локальных интеллектуальных энергосистем и управления их режимами»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические  
системы»

### **1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ**

В настоящее время во всем мире реализуется «энергетический переход» – формирование цифровой децентрализованной малоуглеродной энергетической инфраструктуры. Децентрализация достигается за счет внедрения объектов малой распределенной генерации (МРГ), использующей все доступные виды энергетических ресурсов для обеспечения надежного энергоснабжения потребителей, при соблюдении требований по повышению энергоэффективности и снижению выбросов парниковых газов.

Надежность поставок электроэнергии является важнейшей составляющей жизнеобеспечения бытовых потребителей, а от доступности электроэнергии для коммерческих и промышленных потребителей во многом зависит эффективность функционирования и дальнейшее развитие экономики страны. Для решения указанных задач обосновано создание локальных интеллектуальных энергосистем (ЛИЭС) – MiniGrid, представляющих собой новые объекты распределенной энергетики, на базе МРГ. Создаваемые ЛИЭС являются сложными гетерогенными объектами с децентрализованными системами управления, которые интенсивно насыщаются техническими (новые виды оборудования и системы автоматики) и организационными (новые виды услуг и моделей розничного рынка) инновациями.

В России в настоящее время ведутся работы по созданию дефицитных промышленных объектов распределенной энергетики – активных энергетических комплексов (АЭК) в системах внутреннего электроснабжения промышленных предприятий, а также сбалансированных коммунальных ЛИЭС в системах энергоснабжения бытовых и приравненных к ним потребителей. Создание и интеграция ЛИЭС в ЕЭС России позволяет извлекать значимые локальные и системные технико-экономические эффекты.

Следовательно, актуальность разработки специализированной комплексной автоматики управления режимами MiniGrid, обеспечивающей выполнение требований к свободному и малозатратному присоединению к внешним распределительным сетям без централизации управления, в

представленной диссертационной работе, не вызывает сомнений.

Анализ достижений российских и зарубежных ученых в рассматриваемой научной области позволил соискателю сформулировать цель и осуществить постановку задачи для своего диссертационного исследования.

Целью диссертационной работы является разработка системной автоматики для локальных интеллектуальных энергосистем (MiniGrid) с синхронной малой генерацией и ее применения на реальных объектах.

Объектом исследования являются системы электроснабжения на базе малой синхронной генерации, объединяемые на параллельную работу с внешней электрической сетью посредством синхронных электрических связей.

Предметом исследования являются средства, способы и алгоритмы управления режимами автономной и параллельной с внешней сетью работы объектов с малой генерацией, а также переходами между ними.

## **2. НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Личный вклад соискателя заключается в разработке, реализации и отладке алгоритмов управления и графических интерфейсов системной автоматики MiniGrid для физических моделей НГТУ и НИУ МЭИ, а также MiniGrid жилмассива «Березовое». Соискатель принимал участие (доля около 50%) в разработке комплексной программы испытаний системной автоматики MiniGrid к включению на параллельную работу с ЕЭС России, программы проверки соответствия генерирующих установок требованиям к участию в общем первичном регулировании частоты, проведении испытаний, подготовке заявки на изобретение, написании статей и подготовке докладов по результатам работы.

В диссертационной работе решена научно-техническая задача по устранению рисков и технологических барьеров, возникающих в результате прямого подключения сбалансированных ЛИЭС на базе МРГ к внешним распределительным сетям, за счет создания системной автоматики, построенной на принципах децентрализованного управления.

Научной новизной в представленной Ивкиным Е.С. диссертационной работе обладают следующие положения:

- разработан комплекс программно-аппаратных средств (системная автоматика) и технических решений, обеспечивающих создание и управление режимами MiniGrid;
- теоретически и экспериментально на физических моделях и реальном объекте исследовано применение разработанной системной автоматики и доказана его эффективность;
- разработаны методики и программы испытаний системной автоматики и функционирования MiniGrid в автоматическом режиме.

### **3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Диссертационная работа Ивкина Е.С. имеет конкретную практическую направленность, так как ее результаты используются:

- в системной автоматике MiniGrid, практических рекомендациях по ее применению, картах уставок и настройки отдельных технологических узлов, способах взаимодействия с блочной автоматикой генерирующих установок;
- при реализации пилотного проекта по созданию и присоединению MiniGrid с мини-ТЭЦ жилмассива «Березовое» (г. Новосибирск) к электрической сети Новосибирской энергосистемы с режимом параллельной работы и выдачей избыточной мощности во внешнюю распределительную сеть;
- при проведении комплексных испытаний MiniGrid с функционированием в автоматическом режиме и вводе разработанной системной автоматики в эксплуатацию.

### **4. ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ВЫВОДОВ, ПОЛОЖЕНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИЙ**

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается корректным использованием методов математического и физического моделирования, положений теорий устойчивости, управления режимами электроэнергетических систем, автоматического и автоматизированного управления, а также методологии экспериментальных исследований, структурного анализа и проектирования.

В процессе исследования для выполнения комплексных расчетов электрических режимов были использованы широко применяемые программно-вычислительные комплексы «Мустанг» и «RastrWin». Для подтверждения полученных теоретических результатов были проведены комплексные натурные испытания системной автоматики на физических комплексах «Электродинамическая модель электроэнергетических систем» Центра коллективного пользования «Центр испытаний устройств контроля и управления режимами электроэнергетических систем» НГТУ, кафедры Электроэнергетических систем НИУ МЭИ и MiniGrid жилмассива «Березовое».

Представленные в диссертационной работе основные научные положения, выводы по главам, заключительные выводы и рекомендации являются в целом обоснованными.

### **5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ О СООТВЕТСТВИИ ДИССЕРТАЦИИ УСТАНОВЛЕННЫМ КРИТЕРИЯМ**

Диссертационная работа Ивкина Е.С. отвечает критериям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением

Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 11.09.2021). В ней соблюдены следующие принципы соответствия:

5.1. Указанная соискателем цель работы – разработка системной автоматики для локальных интеллектуальных энергосистем (MiniGrid) с синхронной малой генерацией и ее применения на реальных объектах – достигнута в рамках представленной диссертационной работы. В целом диссертационная работа является законченной научно-квалифицированной работой, так как содержит решение научной и практической задачи, имеющей существенное значение для электроэнергетической отрасли страны, заключающейся в разработке комплекса программно-аппаратных средств (системной автоматики) и технических решений, обеспечивающих создание и управление режимами MiniGrid (п. 9).

5.2. Диссертация написана соискателем самостоятельно, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе ее автора в науку. В составе авторского коллектива соискателем получен патент Российской Федерации на изобретение №2697510 «Способ управления составом и загрузкой генераторов электростанции с собственными нагрузками, работающей изолированно и параллельно с приемной энергосистемой». Кроме того, в диссертации имеются два акта о внедрении результатов, полученных автором диссертационного исследования, в учебный процесс на кафедре «Автоматизированных электроэнергетических систем» НГТУ, а также на мини-ТЭЦ жилмассива «Березовое» ООО «Генерация Сибири». Предложенные соискателем научно-практические решения аргументированы и сопоставлены с результатами экспериментальных и аналитических исследований других авторов (п. 10).

5.3. Научные публикации Ивкина Е.С. – 8 печатных работ, в том числе: 3 научные статьи в изданиях из перечня российских рецензируемых научных журналов ВАК РФ по специальности 05.14.02; 1 патент Российской Федерации; 2 статьи – в научных изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus; 2 статьи в других научных изданиях. Основные научные положения и результаты диссертационной работы рассматривались на более чем пяти научно-технических конференциях и семинарах (п.п. 11-13).

5.4. В диссертационной работе Ивкина Е.С. сделаны необходимые ссылки на авторов и источники заимствования материалов и отдельных результатов научной деятельности (п. 14).

5.5. Тема и содержание диссертации Ивкина Е.С. соответствует паспорту специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» по следующим пунктам:

- п. 1 – Оптимизация структуры, параметров и схем электрических

соединений электростанций, электроэнергетических систем и систем электроснабжения;

– п. 6 – Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике;

– п. 9 – Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике.

## **6. АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ**

Диссертационная работа Ивкина Е.С. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 71 наименование, списка сокращений и условных обозначений, списка терминов и двух приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 166 страниц и включает 58 рисунков и 24 таблицы.

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, внедрение и апробация полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава **«Требования к MiniGrid и ее системе управления»** посвящена анализу перспектив развития электроэнергетики в различных странах мира и России. Отмечены специфические особенности российской электроэнергетики – масштабная газификация страны и потребность в большом количестве тепловой энергии, что определяет тренд на развитие газовой распределенной когенерации. Рассмотрены восемь типов объектов с МРГ, имеющие различное назначение и требования к системной автоматике и энергоисточнику, их положительные и отрицательные стороны. Отмечено отсутствие нормативной базы для включения MiniGrid на параллельную работу с ЕЭС России, использования системной автоматики для управления режимами MiniGrid, что является основными сдерживающими факторами их развития. Сформулированы требования к программно-техническому обеспечению и интерфейсам управляющих программно-технических комплексов (ПТК) системной автоматики MiniGrid.

Во второй главе **«Принципиальные технические решения при создании MiniGrid на базе локальной системы энергоснабжения»** приведены и обоснованы технические решения, позволяющие при различных внешних и внутренних возмущениях сохранить в работоспособном состоянии электросетевое оборудование во внешней распределительной сети, а также газопоршневые установки (ГПУ) мини-ТЭЦ. Показано, как разработанные и

реализованные в ПТК технические решения позволяют обеспечить надежность электроснабжения электроприемников MiniGrid в различных схемно-режимных условиях, безопасность оборудования за счет соответствующей функциональности, требуемые быстродействие, селективность и чувствительность устройств противоаварийной и режимной автоматики.

Третья глава **«Модели (алгоритмы) управления режимами MiniGrid, реализованные в автоматике»** посвящена представлению моделей (алгоритмов) режимного, противоаварийного управления и автооперирования опытного образца автоматики для физической модели MiniGrid, созданной в НГТУ. В главе отмечается, что при разработке программного обеспечения и системной автоматики использовалась методология структурного анализа и проектирования, что позволило учесть все критически важные моменты в функционале системной автоматики при разработке алгоритмов.

В четвертой главе **«Техническая реализация и испытания системной автоматики MiniGrid»** представлены результаты технической реализации и испытаний системной автоматики на пилотном проекте Minigrd жилмассива «Березовое» (г. Новосибирск). Minigrd присоединен к внешней распределительной сети ЕЭС России на напряжении 10 кВ и имеет в своем составе мини-ТЭЦ установленной электрической мощностью 10 МВт (ГПУ 5х2,0 МВт), а также нагрузку с суммарной максимальной мощностью – 7,5 МВт, в том числе 4,5 МВт I категории надежности электроснабжения. Для ввода в эксплуатацию системной автоматики была разработана комплексная программа испытаний готовности MiniGrid к включению на параллельную работу с ЕЭС России. Отмечено, что результаты испытаний оказались положительными и было принято решение о вводе системной автоматики на первом этапе в опытно-промышленную, а затем и в промышленную эксплуатацию.

В **заключении** представлены обобщающие выводы по диссертационной работе, где показано, что разработанный комплекс технических решений и системной автоматики позволяет локальные системы электроснабжения при прямом подключении к внешней распределительной сети преобразовывать в MiniGrid, исключая возможные риски повреждения электросетевого оборудования и генерирующих установок мини-ТЭЦ. Кроме того, предложенный подход к интеграции MiniGrid в ЕЭС России позволяет преодолеть ряд организационных и нормативных барьеров.

## **7. ВОПРОСЫ И ЗАМЕЧАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ ДИССЕРТАЦИИ**

При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации Ивкина Е.С. возникли следующие вопросы и замечания:

1. В п. 3 выводов по Главе 1 (стр. 30) указывается на отсутствие

нормативной базы для включения MiniGrid на параллельную работу с ЕЭС России и применения специализированной системной автоматики для управления режимами MiniGrid. Однако в диссертации не содержится ни одного конкретного предложения соискателя в какие нормативные документы нужно внести изменения и какие именно изменения требуются. Учитывая, что Глава 1 является постановочной для диссертационного исследования, то констатировать проблему, не предлагая путей ее решения, некорректно.

2. В Главе 2 (стр. 31) констатируется, что основными разрешительными условиями для синхронизации частей сети, в том числе, являются несущественная несимметрия и несинусоидальность. Следовало бы дать количественную оценку допустимых величин несимметрии и несинусоидальности напряжений для реализации синхронизации, с учетом особенностей генерирующих установок в MiniGrid и других факторов.

3. В Главе 2 (стр. 45) указывается, что величина допустимых сбросов/набросов нагрузки для генерирующих установок мощностью 2 МВт составляет около 150 – 200 кВт, т.е 7,5 – 10% от  $P_{ном}$ . Однако, эти величины существенно отличаются для генерирующих установок разных видов, типов и заводов-изготовителей, и зависят от их класса и исходной величины нагрузки, доходя до 25-30%, а для некоторых конструкций дизель-генераторных установок до 80-90%. В тексте следовало бы указать, что эти данные справедливы только для генерирующих установок конкретного завода-изготовителя и привести заводские характеристики допустимых сбросов/набросов, которые представляют собой либо нелинейную характеристику, либо характеристику в виде ломаной линии, точки излома которой зависят от величины исходной нагрузки.

4. В Главе 2 (стр. 46) ничем не обосновано наличие раздела 2.8. Если он в диссертации присутствует, следовательно, вопрос увеличения токов замыкания на землю в сети 10 кВ при подключении MiniGrid на параллельную работу с внешней распределительной сетью является важным. Однако, в разделе 2.8 присутствует только констатация факта о росте величины тока замыкания на землю, без указания величины его приращения, а также цитируется требование ПТЭ, что не несет никакой смысловой нагрузки. Далее в тексте диссертации данный вопрос нигде не рассматривается, никакие технические решения не разрабатываются и в заключении по диссертации он не находит отражения.

5. В главе 2 (стр. 46) в последнем абзаце указывается, что блоки ПТК 2 контролируют отключение выключателя на связи с ПС 110 кВ и, при его неотключении за заданное время 0,07 – 0,08 с, выдают сигнал на отключение смежного выключателя, разрывая связь РП с шинами ГРУ ТЭЦ (выполняют функцию УРОВ). Многолетний опыт выполнения расчетов переходных процессов в распределительных сетях с промышленной нагрузкой показывает,

что граница зоны благоприятных скольжений асинхронных двигателей соответствует предельному времени ликвидации КЗ  $\approx 0,07$  с, после чего их самозапуск невозможен и велика вероятность развития в MiniGrid лавины напряжения. Учитывая, что технические решения по системной автоматике представляются как универсальные, то необходимо обеспечить, чтобы время ликвидации КЗ, с учетом действия УРОВ, не превышало указанного значения.

6. В Главе 2 (стр. 54) использована фраза «КЗ в сети было проходящим», из которой неясно, считать ли рассматриваемое КЗ таким, которое ликвидируется устройствами релейной защиты во внешней, по отношению к MiniGrid, распределительной сети.

7. В выводе 3 по Главе 2 (стр. 58) указывается, что обеспечено полное аппаратное и функциональное дублирование системной автоматики, однако, такое утверждение было бы абсолютно справедливым, если бы коммутационные аппараты, применяемые в MiniGrid, имели по два соленоида отключения. Такие коммутационные аппараты изготавливаются различными заводами-изготовителями по отдельному заказу, что позволяет обеспечить полное аппаратное и функциональное резервирование системы.

8. В Главе 4 (стр. 138, п. 5) линейная аппроксимация левой ветви (точки 5, 6, 7) соответствует снижению загрузки генератора при повышении частоты, а не набору мощности генератором при снижении частоты, как указано в тексте.

9. Редакционные замечания:

– в Главе 1 раздел 1.7 (стр. 29) заканчивается двоеточием, что подразумевает наличие перечисления функциональных составляющих системы контроля и мониторинга MiniGrid ЦУСа, которое в тексте отсутствует;

– в Главе 2 (стр. 40) блок-схема алгоритма работы и взаимодействия АОСД и УРОВ представлена в незавершенной виде, так как в ней отсутствует начало и конец, а блоки ввода и вывода данных представлены своеобразно;

– в Главе 4 (стр. 121) два идентичных условных обозначения  $U_{уст}$  имеют разные интерпретации – уставка по напряжению и уставка по напряжению удаленного регулирования, что недопустимо;

– в Главе 4 рис. 4.11 (стр. 129) не соответствует описанию на стр. 120, так как в описании состояний генераторов (цвет зеленый – включен), а на рис. 4.11 цвет красный – включен. Визуальное представление состояний генераторов в АРМ должно быть идентичным для всего персонала, чтобы не вызвать ошибочных действий в процессе наладки и эксплуатации системной автоматики;

– в Главе 4 (стр. 131, 132) встречаются разные аббревиатуры одного и того же регулятора – АРЧВ и АРС, хотя целесообразно использовать одну аббревиатуру во всей диссертационной работе. При этом ни той, ни другой аббревиатуры в списке сокращений на стр. 150 нет.



Приведенные замечания и вопросы не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, поскольку существенно не влияют на основные выводы, а также полученные научные и практические результаты.

## **8. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Представленная диссертационная работа Ивкина Е.С. является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, обладающей как признаками актуальности и научной новизны, так и практической значимостью полученных результатов. В диссертационной работе решена важная научная и практическая задача, заключающаяся в разработке комплекса программно-аппаратных средств (системной автоматики) и технических решений, обеспечивающих создание и управление режимами MiniGrid, а также, позволяющих исключить возможные риски повреждения электросетевого оборудования во внешней распределительной сети и генерирующих установок мини-ТЭЦ.

Результаты, полученные соискателем в диссертационном исследовании, базируются на корректном использовании методов математического и физического моделирования, положений теорий устойчивости, управления режимами электроэнергетических систем, автоматического и автоматизированного управления, а также методологии экспериментальных исследований, структурного анализа и проектирования, что позволяет сделать вывод о том, что содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Содержание диссертационной работы соответствует поставленным задачам и подробно отражает последовательность их решения. Текст диссертационной работы изложен доступным языком, в основном корректным в научном и техническом отношении. Материалы диссертационного исследования представлены в объеме, достаточном для понимания, доступно и репрезентативно. Сделанные в диссертационной работе выводы и сформулированные рекомендации аргументированы.

Автореферат диссертации Ивкина Е.С. соответствует диссертационной работе по основным квалификационным признакам: цель, задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, актуальность, научная новизна, практическая значимость полученных результатов.

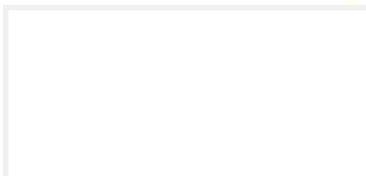
Основные научные и практические результаты диссертационной работы Ивкина Е.С. изложены с достаточной полнотой в 8 печатных работ, в том числе: 3 научные статьи в изданиях из перечня российских рецензируемых научных журналов ВАК РФ по специальности 05.14.02; 1 патент Российской Федерации; 2 статьи – в научных изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus;

2 статьи в других научных изданиях.

В целом диссертационная работа Ивкина Е.С. на тему «Системная автоматика для создания локальных интеллектуальных энергосистем и управления их режимами», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук является актуальной, обладает научной новизной и практической значимостью, соответствует паспорту специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы». Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно критериям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 11.09.2021), а ее автор Ивкин Ефим Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

#### ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

Доктор технических наук, главный научный сотрудник,  
руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем  
и распределенной энергетики ИНЭИ РАН



Павел Владимирович Илюшин

06 декабря 2021 г.

Тел. (моб): +7(915) 092-98-33

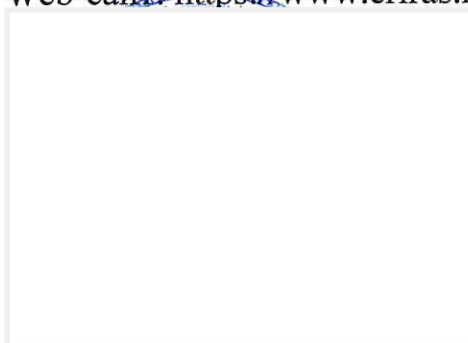
E-mail: ilyushin.pv@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт энергетических исследований Российской академии наук» (ИНЭИ РАН)

Адрес: 117186, Россия, г. Москва, ул. Нагорная, д. 31, корп. 2.

Телефоны: +7 (499) 127-46-64, +7 (499) 123-98-78, Факс: +7 (499) 123-44-85.

E-mail: info@eriras.ru, Web-сайт: <https://www.eriras.ru/>



*Отзыв получен 10.12.21  
От Павла Владимировича Илюшина*



*С отзывом ознакомился  
10.12.21 Ил. Ивкин*