

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Майорова Глеба Сергеевича на тему  
**«Выбор рационального состава генерирующей мощности  
централизованных и распределенных источников в интегрированных  
энергетических системах на основе мультиагентного подхода»**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

### **Актуальность исследования**

Тематика исследования согласуется с современной парадигмой развития энергосистем, согласно которой повышение энергетической, экономической и экологической эффективности производства, преобразования, аккумулирования и распределения энергии достигается за счет глубокой интеграции различных энергетических технологий в единые мультиэнергетические системы и комплексы. Цель создания таких интегрированных энергосистем (ИЭС) заключается в оптимальном распределении и преобразовании различных энергетических потоков для достижения наиболее эффективного использования энергии первичных энергоресурсов, в том числе возобновляемых. Существующие методы исследования традиционных, условно «монотехнологических», энергосистем для таких многокомпонентных и многопродуктовых объектов как ИЭС зачастую неприменимы или их применение имеет существенные ограничения. В связи с этим возникают новые задачи оптимального управления функционированием и развитием таких систем, требующие разработки новых методов их решения. В этом отношении работа в полной мере соответствует актуальным направлениям современной энергетической науки.

Работа посвящена решению одной из таких методических задач – определения рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии в ИЭС. Для ее решения разработаны методика, модели и алгоритмы, основанные на мультиагентном подходе, являющимся специальной разновидностью иерархического метода решения сложных комплексных задач посредством взаимодействия множества агентов, являющихся самостоятельными компонентами исследуемой системы, с заданными свойствами и параметрами, получающих сигналы в виде набора данных, интерпретирующих эти данные, и генерирующих некоторое управляющее действие в систему в соответствии со своими функциями. Таким образом, комплексная системная задача управления разбивается на множество подзадач меньшей размерности, решаемых на уровне агентов. В теории такая система, при условии корректной настройки агентов, должна функционировать как самоорганизующаяся

структура с высокой степенью адаптивности к внешним возмущениям. Для обоснования предлагаемого подхода к решению поставленных научно-методических задач проведен достаточно объемный анализ существующих исследований в области создания и управления ИЭС, изучены особенности применения мультиагентного подхода для моделирования ИЭС. Проведена апробация разработанного методического и программного аппарата на различных схемах ИЭС.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложена новая методика для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС на основе мультиагентного подхода. Данная методика позволяет рассматривать большое количество активных элементов со сложным поведением, в том числе распределенные источники энергии и активных потребителей с собственными источниками энергии. Также она позволяет проводить расчет одновременно для систем электро-, тепло-, газо- и хладоснабжения, и учитывать взаимодействие этих систем друг с другом в рамках ИЭС.

2. Разработана оригинальная структура МАС для исследования взаимодействия объектов ИЭС при решении задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС, определены основной состав и типы агентов МАС, их цели и задачи. Данная структура МАС позволяет рационально задействовать распределенную генерацию, активных потребителей и централизованные источники энергии в процессе энергоснабжения с учетом целесообразности преобразования одного вида энергии в другой при совместном функционировании систем электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения в рамках ИЭС.

3. Выполнена математическая постановка задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников в ИЭС, учитывающая зоны эффективности работы генерирующего оборудования и ограничения на выбросы вредных веществ в атмосферу. Разработаны математические модели основных агентов МАС, осуществляющих контроль и управление объектов ИЭС.

4. Разработан алгоритм формирования мультиагентной модели ИЭС в программной среде AnyLogic. На основании разработанного алгоритма в программной среде AnyLogic сформирована мультиагентная модель ИЭС в соответствии с разработанной схемой и предложенной структурой взаимодействия агентов в МАС. В этой модели представлены агенты

отдельных технологических систем тепло-, электро-, газо- и холодоснабжения. Разработаны алгоритмы поведения каждого типа агента, определены выполняемые ими функции, а также реализованы логические взаимодействия агентов друг с другом.

5. Выполнена апробация разработанной методики выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС с использованием мультиагентного подхода. Проведен ряд вычислительных экспериментов на двух различных схемах энергоснабжения для демонстрации работы блока расчета схемы (БРС) ИЭС и блока управления развитием (БУР) ИЭС.

### **Соответствие паспорту специальности**

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы:

п. 1. Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования.

п. 2. Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии.

п. 5. Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке тепловой, электрической энергии и энергоносителей в энергетических системах и комплексах.

### **Теоретическая и практическая ценность**

Теоретическая значимость результатов диссертации заключается в разработке методики для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников в ИЭС на основе мультиагентного подхода, которая позволит проводить расчет одновременно для систем электро-, тепло-, газо- и хладоснабжения, и учитывать взаимодействие этих систем друг с другом в рамках ИЭС. Также она позволит учитывать взаимодействие активных потребителей с энергосистемой и регулировать соотношение мощности от централизованных и распределенных

источников энергии при решении задачи развития ИЭС. Практическая значимость определяется разработкой программного прототипа МАС для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС в рамках разработанной методики и возможностью моделировать и исследовать реальные схемы энергоснабжения на базе этого прототипа. На практике данный программный прототип позволит разрабатывать схемы энергосистем с учетом интеграции и возрастающего влияния распределенной генерации и активных потребителей.

### **Обоснованность и достоверность положений, выносимых на защиту**

Достоверность и обоснованность результатов исследования сомнений не вызывает. Уровень достоверности научных положений, изложенных в диссертационной работе, определяется их корректностью с точки зрения математических моделей и методов исследования систем энергоснабжения, применением положений из теории электрических цепей и теории гидравлических цепей.

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на разных российских и международных научно-практических конференциях. Всего сделано 13 докладов.

Публикации по теме диссертации вышли в российский и зарубежных изданиях, имеющих надлежащий статус и направленность. По теме исследования опубликованы 19 статей, из них: 6 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (в том числе 3 статьи в журналах из категории К1 и 2 статьи в журналах из категории К2), 6 – в рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science Core Collection, 7 – в иных изданиях.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Диссертация написана в форме, позволяющей получить полное и достаточно подробное представление о материалах исследований, проведенных автором. Оформление работы выполнено в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011. Диссертация объемом 178 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 101 наименования, 4 приложений, основной текст изложен на 152 страницах.

**В первой главе** работы выполнен анализ предметной области, которая охватывает вопросы, связанные с исследованием ИЭС. Рассмотрены основные принципы создания и преимущества ИЭС в сравнении с существующими энергетическими системами, приведены некоторые из современных методов и моделей управления ИЭС различного уровня. Рассмотрены различные современные методы для создания ИЭС с распределенной генерацией,

приведены работы, в которых используются детерминированные и стохастические методы для проектирования ИЭС. Выполнен анализ возможности применения мультиагентного подхода для исследования ИЭС, рассмотрены основные преимущества и принципы создания МАС, приведен ряд работ, в которых мультиагентный подход успешно применяется для решения технических задач.

**Во второй главе** описана методика выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии интегрированной энергетической системы. Представлены математические модели для решения задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС. Разработана структура мультиагентной системы для исследования взаимодействия объектов ИЭС при решении задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии. Представлен алгоритм поиска оптимальной траектории развития интегрированных энергетических систем на долгосрочный период.

**В третьей главе** рассмотрены основные этапы создания мультиагентной модели ИЭС в программной среде AnyLogic. Выполнен анализ программного обеспечения для реализации мультиагентной модели ИЭС. Приведен алгоритм формирования мультиагентной модели ИЭС в программной среде AnyLogic и выполнено описание основных этапов этого алгоритма. Разработаны алгоритмы поведения каждого типа агента, выполняемые ими функции и логические взаимодействия их с другими агентами с помощью блок-схем диаграмм состояний.

**В четвертой главе** рассмотрены вычислительные эксперименты, проведенные на тестовой и реальной схеме энергоснабжения для демонстрации работы блока управления развитием интегрированной энергетической системы и блока расчета схемы интегрированной энергетической системы. Приводится ряд вычислительных экспериментов, проведенных на тестовой схеме ИЭС, показывающие формирование ИЭС до 21,5 года. Представлены результаты исследований, выполненных на основании реальной системы энергоснабжения микрорайона Академгородок г. Иркутска.

### **Вопросы, замечания по диссертации и автореферату**

1. Представленная в работе методика для выбора состава генерирующих источников в ИЭС теоретически описана довольно подробно. Однако остаётся непонятным, чем она отличается от существующих подходов, направленных на решение аналогичных задач. Следовало бы привести

количественное сравнение получаемых результатов с помощью предлагаемых в работе средств с распространёнными в настоящее время на практике решениями. Также неясно, как проверяется достоверность получаемых результатов расчёта согласно предложенной методике? Каким образом верифицировались или валидировались эти результаты?

2. В качестве одного из положений, выносимых на защиту, автор предлагает «оригинальную структуру мультиагентной системы (МАС)» (п. 2), но при этом на с. 49 диссертации указывает, что используется известная гибридная структура МАС. Так в чём заключается оригинальность, особенность разработанной в диссертации структуры МАС?

3. В диссертационной работе декларируется, что разработанная методика применима для объектов генерации на базе ВИЭ. Однако при разработке и апробации методики, никак не учтены особенности работы таких объектов, например, такие как стохастичность выработки электроэнергии из-за зависимости от погодных условий, которые, безусловно, будут оказывать влияние на проектируемый оптимальный баланс мощности и другие режимные аспекты, лежащие в основе разработанной методики.

4. При формировании целевых функций в работе используются различные по своей степени точности и изменчивости входные параметры, например, цена на электроэнергию, особенно в разрезе рассматриваемого в работе временного интервала в 15 лет. На сколько разработанный математический аппарат в целом является робастным к изменению входных переменных? Какая точность предъявляется к используемым входным параметрам, как она контролируется?

5. В диссертационной работе приводятся результаты вычислительных экспериментов, на основании которых делается вывод о рациональном выборе состава генерирующей мощности при развитии ИЭС. Однако численные рамки, градации или показатели, на основании которых сделаны соответствующие выводы, не приведены.

### **Общее заключение**

Диссертационная работа Майорова Глеба Сергеевича «Выбор рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников в интегрированных энергетических системах на основе мультиагентного подхода» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором на приемлемом научном уровне. Задача актуальна, а ее решение обладает научной новизной. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Сделанные замечания носят уточняющий, рекомендательный

характер и не снижают в целом положительной оценки диссертационной работы.

Автореферат в пределах своего объема соответствует тексту работы, правильно отражает содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

Работа полностью соответствует пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями).

Считаю, что автор рассматриваемой диссертации, Майоров Глеб Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Официальный оппонент,  
доцент Отделения электроэнергетики  
и электротехники Инженерной  
школы энергетики Национального  
исследовательского Томского  
политехнического университета,  
кандидат технических наук по  
специальности 05.14.02 –  
Электрические станции и  
электроэнергетические системы

Суворов Алексей  
Александрович

« 20 » 11 2023 г.

Удостоверяю, что подпись представлена работником ФГАОУ ВО НИ ТПУ А.А. Суворовым.

Ученый секретарь ФГАОУ ВО НИ ТПУ

Е.А. Кулинич

Сведения:

Фамилия, имя, отчество лица, представившего отзыв	Суворов Алексей Александрович
Ученая степень	к.т.н.
Специальность	05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы
Ученое звание	-
Наименование организации, работником которой является	Отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы

указанное лицо	энергетики государственного образовательного высшего «Национальный Томский университет»	Федерального автономного учреждения образования исследовательский политехнический
Должность	Доцент	
Почтовый адрес организации	634050, г. Томск, пр. Ленина, 30	
Телефон	+7(3822)701-777 (1987)	
Адрес электронной почты	suvorova@tpu.ru	