

На правах рукописи



Карджаубаев Нурлан Арапович

**МУЛЬТИАГЕНТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В  
МНОГОСВЯЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические  
системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Новосибирск - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Фишов Александр Георгиевич**

**Официальные оппоненты:** **Кубарьков Юрий Петрович**  
Доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра электрических станций, профессор

**Булатов Юрий Николаевич**  
Кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет», кафедра электроэнергетики и электротехники, доцент

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ), г. Томск.

Защита состоится: «28» февраля 2019 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации [https://www.nstu.ru/science/dissertation\\_sov/dissertations/view?id=17261](https://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=17261)

Автореферат разослан «28» декабря 2018 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент



Русина А. Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Одной из основных современных тенденций развития электроэнергетики является ее децентрализация с переходом к использованию электрогенераторов небольшой мощности (до 25 МВт), располагаемых в непосредственной близости к нагрузкам, а также децентрализации управления режимами, главным образом, в распределительных электрических сетях.

Массовое развитие РМГ в распределительных сетях, как правило, не имеющих централизованного диспетчерского управления из-за значительного усложнения системы управления и невозможности в силу отсутствия (в том числе по причине экономической нецелесообразности) наблюдаемости режимов, обуславливает необходимость создания на их основе качественно новых энергосистем, так называемых, Smart Grid.

Однако, существующая централизованная система управления препятствует появлению в сети множества активных объектов, тем более, учету желаний конкретных потребителей в отношении режимных параметров, в т.ч. напряжения. Основой в централизованной системе является центр управления, в котором с учетом обобщенных требований определяются режимы работы объектов управления, часто в условиях их плохой наблюдаемости, особенно, в распределительных электрических сетях. Система централизованного управления плохо приспособлена к работе в режиме реального времени, учету желаний конкретных субъектов.

Увеличение количества распределенных средств регулирования режима напряжения в электрической сети, принадлежащих разным субъектам, имеющим собственные цели регулирования, нуждается в разработке новых средств и методов управления режимом, учитывающих, как распределенность управления, так и различие в его целях у разных субъектов.

Самостоятельное (активное) участие установок потребителей и распределенной генерации в регулировании режима напряжений электрической сети, непосредственно связано с созданием множества районов локального регулирования режима с распределенным управлением. Основой их формирования является локальность балансов реактивной мощности. Такие районы могут становиться и локальными рынками услуг по снижению потерь в сети, обеспечению качества электроэнергии (регулирования напряжения, снижения его колебаний, несимметрии и несинусоидальности). В отличие от обычного локального управления, осуществляемого по местным параметрам, «умное» локальное регулирование предполагает контроль режима прилегающего района сети и использование распределенного искусственного интеллекта при принятии решений, что при достаточном количестве управляемых узлов способно обеспечить эффективное децентрализованное управление режимом напряжения сети в целом.

В ряде выполненных работ в данном направлении предлагается мультиагентный подход с использованием агентов, связанных с энергетическими

объектами. Необходимо отметить в указанных подходах также наличие центрального агента (решатель, сборщик данных, симулятор), выход, из строя которого делает неработоспособной всю систему. Это актуализирует разработку МАС без наличия какого-либо координирующего элемента.

*Основная идея настоящей работы* заключается в построении и исследовании одноуровневой мультиагентной системы (МАС) компромиссного регулирования напряжения в электрических сетях. Агенты МАС (интеллектуальные регуляторы) наделяются достаточным знанием режимных параметров (параметров прилегающего к узлу района сети) и возможностями координации действий со смежными агентами в зоне своего режимного влияния. При этом каждый агент, входящий в МАС, для контроля режима района сети использует исключительно локальные режимные параметры, является носителем интересов (агентом) одного из субъектов общего процесса энергоснабжения, а режим напряжения сети определяется как компромисс их интересов.

**Объект исследования** – электрические сети с синхронной распределенной малой генерацией, устройствами регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, мультиагентные системы регулирования напряжения.

**Предмет исследования** – координация действий агентов в одноуровневой системе децентрализованного мультиагентного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях с распределенной малой генерацией, устройствами регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности.

**Цель работы** – разработка инструментальных средств моделирования и исследование одноуровневой системы децентрализованного мультиагентного регулирования напряжения электрических сетей с распределенной малой генерацией, устройствами регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности.

Для достижения сформулированной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Анализ причин недостаточной эффективности предложенных ранее способов регулирования напряжения и методов их моделирования;
2. Формирование принципов, правил и алгоритмов координации действий агентов мультиагентной системы регулирования напряжения;
3. Разработка способов координации, использующих минимальный обмен информацией между агентами для компромиссного регулирования напряжения в электрической сети;
4. Разработка программы моделирования режимов электрической сети с мультиагентным регулированием напряжения;
5. Исследование эффективности разработанных способов координации действий агентов и алгоритмов управления в различных схемах электрической сети;
6. Проверка работоспособности алгоритмов агентного режимного управления на электродинамической модели энергосистемы, реализованных в прототипе агентной автоматики управления режимом электростанции.

### **Методы исследования.**

Моделирование режимов электрических сетей с мультиагентным регулированием напряжения на цифровых и физических моделях.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Одноуровневая мультиагентная система регулирования напряжения с самонастройкой регуляторов и координацией действий смежных агентов способна обеспечивать эффективное регулирование напряжения в электрической сети в нормальных и аварийных режимах.

2. Согласованность действий интеллектуальных агентов одноуровневой мультиагентной системы регулирования напряжения обеспечивается контролем режима прилегающего района электрической сети и координацией действий смежных агентов в зоне их взаимного влияния, осуществляемых по общим правилам.

3. Одноуровневая мультиагентная система регулирования напряжения с самонастройкой регуляторов и координацией действий смежных агентов представляет собой систему управления на основе распределенного искусственного интеллекта экспертного типа с центрами принятия решений по общим правилам.

### **Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Предложен принцип построения одноуровневой децентрализованной МАС управления режимом напряжений в электрических сетях, заключающийся в принятии решений на основе двух сетевых зон – зоны локального контроля режима электрической сети и зоны локальной координации действий агентов.

2. Разработаны база правил и алгоритмы координации поведения агентов МАС регулирования напряжения в электрических сетях.

3. Доказана возможность компромиссного регулирования напряжения в электрических сетях с распределенными средствами компенсации реактивной мощности посредством децентрализованной МАС с координацией действий агентов в смежных зонах.

### **Практическая значимость результатов работы состоит:**

- В обосновании и реализации принципов осуществления одноуровневого мультиагентного регулирования напряжения;
- В разработке базы правил и алгоритмов координации поведения агентов МАС для компромиссного регулирования напряжения в электрической сети;
- В разработке способа координации действий агентов и алгоритмов одноуровневого мультиагентного регулирования напряжения, пригодных для многовариантных реализаций в автоматических устройствах.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Полученные соискателем основные научные результаты соответствуют пункту 2 «Разработка методов анализа режимных параметров основного оборудования электростанций», пункту 12 «Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению» и пункту 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в

электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

**Реализация результатов.** Теоретические разработки, практические рекомендации и алгоритмы мультиагентного регулирования напряжения, предложенные в диссертационном исследовании, реализованы в прототипе автоматики и внедрены в компании ООО «Модульные Системы Торнадо» для опытной эксплуатации.

**Достоверность результатов и выводов** подтверждена сопоставительными вычислительными экспериментами, проводившимися на базе специализированных компьютерных программ (ПВК RastrWin, «Мустанг»), корректным использованием теории мультиагентного управления, а также сопоставлением теоретических расчетов с результатами экспериментальных исследований на физической модели электроэнергетической системы.

#### **Апробация работы**

Основные результаты работы представлялись, докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ, 54-ой международной научной студенческой конференции «МНСК-2016» (г. Новосибирск, 2016), VIII международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (г. Новосибирск, 2016), XI международном форуме «2016 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology» (г. Новосибирск, 2016), VII международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2016» (г. Казань, 2016), VIII международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2017» (г. Самара, 2017), II международном молодежном конгрессе «Энергетическая безопасность» (г. Курск, 2017).

#### **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 10 печатных работ, в том числе 2 научных статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 8 публикаций в международных и российских изданиях, материалах международных и всероссийских конференций.

#### **Личный вклад соискателя**

В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит формализация поставленных задач, разработка и исследование способов координации и алгоритмов поведения агентов МАС регулирования напряжения в среде ПВК RastrWin, тестирование алгоритмов на цифровой и физической моделях энергосистем, анализ и обобщение результатов.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 118 наименований, и приложений. Общий объём работы составляет 176 страниц, включая 63 рисунков и 9 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В 1 главе** проведен анализ развития систем и средств регулирования напряжения в электрических сетях. Рассмотрено развитие задач управления режимом напряжения электрических сетей с распределенной малой генерацией и проанализированы существующие и разрабатываемые мультиагентные системы (МАС), а также выделены их недостатки.

В настоящее время традиционное централизованное регулирование напряжения, осуществляемое сетевыми компаниями, не отвечает интересам потребителей, собственников распределенной генерации, обладающих средствами регулирования напряжения.

Распределительные сети развиваются так, что в них появляется все больше активных элементов, влияющих на режим напряжения в электрической сети, в т.ч. малая генерация. Это развитие помимо сетевых компаний все больше подчиняется интересам потребителей электроэнергии, присоединяемой генерации. Эти интересы часто являются противоречивыми. Так, электрические сети заинтересованы в повышенном напряжении, увеличивающем электропотребление электроприемниками потребителей, снижающим потери при передаче энергии, а потребители в пониженном напряжении, приводящем к энергосбережению и увеличению ресурса электроприемников. Противоречивость их интересов вызывает необходимость разработки новых концепций, методов и технических средств регулирования напряжения в электрической сети, позволяющих реализовывать компромиссные режимы.

Перспективным направлением решения данной задачи является мультиагентное регулирование напряжения с помощью интеллектуальных регуляторов (Агентов МАС). Под *агентом* понимается интеллектуальный регулятор напряжения, действующий в узле электрической сети в интересах одного из субъектов осуществляемого совместного процесса и подчиняющийся единым для всех агентов правилам. Под *мультиагентным регулированием напряжения* понимается вся совокупность мер, принимаемых каждым из субъектов процесса (сетевой компанией, генерацией, потребителем электроэнергии), для достижения собственных целей в рамках единых принципов и правил, обеспечивающих компромиссный режим электрической сети.

Анализ существующих и разрабатываемых МАС, таких как МАС управления спросом и предложением на электроэнергию и мощность, МАС ситуационной поддержки оператора в электрических сетях с РМГ, МАС восстановления сети после технологического нарушения, МАС регулирования напряжения в электрической сети показал, что:

1. Практически для всех работ по регулированию напряжения в электрической сети на основе МАС характерно наличие интенсивного информационного обмена информацией между агентами разных уровней;

2. Недостатком имеющихся МАС является наличие центрального агента (симулятор, сборщик данных, решатель), выход из строя которого делает практически неработоспособной всю систему.

Это актуализирует разработку МАС без центрального и/или координирующих элементов, агентам которой для обеспечения компромиссного режима по напряжению достаточно знания параметров режима только прилегающей к ним сети, минимального обмена информацией со смежными агентами и общих правил поведения.

Во 2 главе представлена концепция мультиагентного децентрализованного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях (РЭС) с координацией действий агентов смежных областей контроля режимов, сформулированы принципы и правила его осуществления, представлена техническая реализация.

Необходимость координации действий агентов возникает с развитием распределенной малой генерации, возникновением значимого взаимного влияния действий агентов смежных областей на режимы контролируемых ими районов сети (рисунок 1). Координация позволяет: разрешать возникающие конфликты интересов; осуществлять взаимопомощь при нарушениях нормального режима.

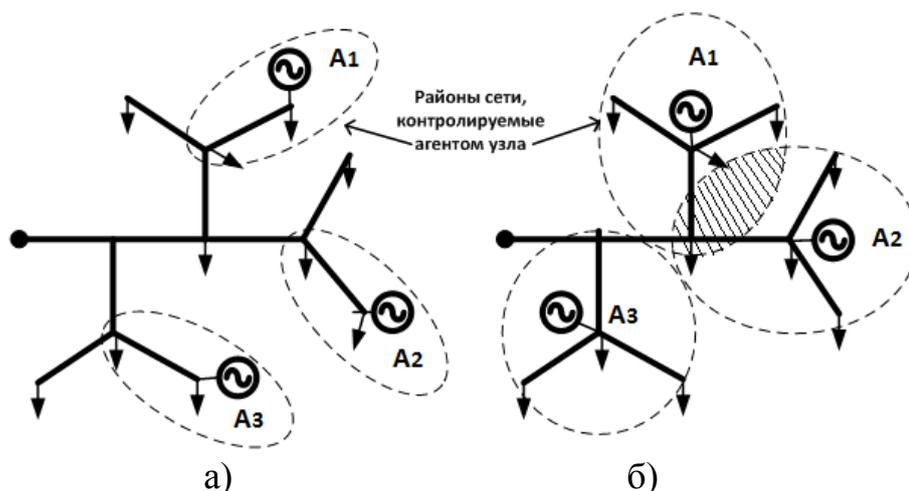


Рисунок 1 - Принципиальные схемы активных сетей с малым (а) и сильным (б) взаимным влиянием локальных регуляторов реактивной мощности (агентов)

Для разработки модели и алгоритмов МАС в работе введена терминология:

*Контролируемый район* – прилегающий к агенту район сети с контролируемым по локальным параметрам режимом напряжения.

*Базовый агент* – агент, в контролируемом районе которого произошло пороговое повышение/снижение напряжения, инициирующий действия МАС.

*Смежный агент* – агент, с узлом которого имеется прямая электрическая связь или действия которого имеют существенное влияние на режим контролируемого района базового агента.

*Участник* – агент, участвующий в процессе регулирования напряжения, инициированного базовым агентом.

*Уведомление* - сообщение агента смежным агентам о классе состояния своей зоны контроля и характере планируемых действий.

*Запрос помощи* – сообщение агента смежным агентам, содержащее запрос о помощи.

*Разрешение/запрет* – сообщение, направляемое агентом в ответ на запрос, содержащее разрешение или запрет действий по запросу, подтверждение или отказ в готовности оказать помощь.

Обоснованы и сформулированы *принципы организации децентрализованного мультиагентного распределенного регулирования напряжения:*

- Равноправие агентов в составе МАС, что способствует недискриминационному компромиссу по режиму напряжения электрической сети;
- локальность контроля режима (агент располагает параметрами режима только в контролируемом районе, границы которого определяются возможностями косвенных измерений напряжений отходящих линий электропередачи);
- минимальность обмена информацией между агентами (для передачи данных используются малозатратные, низкоскоростные каналы передачи данных по линиям электропередачи);
- единство системных правил для всех агентов МАС;
- локальность обмена информацией (агенты обмениваются сообщениями только с агентами, непосредственно связанными линиями электропередачи).

Обоснованы и сформулированы *принципы поведения агентов* в одноуровневой МАС регулирования напряжения:

- Независимость поведения при отсутствии запретов и запросов на взаимопомощь со стороны смежных агентов;
- Право запрета или отмены действий смежных агентов при нарушении ими нормального режима в контролируемой агентом зоне сети;
- Подчинение своих действий запретам и отменам действий со стороны смежных агентов;
- Предпочтительность противоаварийного управления над режимным при нарушениях нормального режима электрической сети.

В соответствии с этими принципами каждый агент, которому необходимо изменить режим по напряжению в своем контролируемом районе (базовый агент), должен получить разрешения на свое действие от смежных агентов.

Обоснованы *системные правила принятия решений* и осуществления действий агентами *с учетом режима контролируемого района и согласования действий со смежными агентами.*

Принятие решений агентами по изменению баланса реактивных мощностей в контролируемой зоне, коэффициентов трансформации базируется на единой классификации классов состояния сети по напряжению:

1. Режим нормальный оптимальный;
2. Режим нормальный;

3. Режим допустимо повышенный;
4. Режим допустимо пониженный;
5. Режим аварийно повышенный;
6. Режим аварийно пониженный;
7. Режим двухсторонних нарушений (с повышенными и сниженными напряжениями).

*Правила принятия решений по корректировке уставок средств компенсации реактивной мощности по режимным условиям в контролируемой зоне сети*

Задача ввода режима в допустимую область.

При нарушенных допустимых значениях напряжений узла электрической сети и узлов, примыкающих к нему, уставка корректируется для ввода режима напряжений в допустимые границы

$$U_{mini} < U_i < U_{maxi} \quad (1)$$

$$U_i \in D \quad (2)$$

где  $i=1, \dots, n$

$n$ - количество узлов контролируемого района сети;

$U_{min}$  - минимально допустимое напряжение;

$U_{max}$  - максимально допустимое напряжение;

$D$  – область допустимых напряжений контролируемого района электрической сети.

Правила корректировки уставок регуляторов для ввода режима в допустимую область:

- Если класс состояния 3 или 5, уставку регулирования источника реактивной мощности уменьшают (рисунок 2 а);
- Если класс состояния 4 или 6, уставку регулирования источника реактивной мощности увеличивают (рисунок 2 б).

Задача минимизации потерь в контролируемом районе сети.

При допустимых напряжениях в узлах уставка корректируется для снижения потерь мощности в контролируемом районе сети или увеличения пропуска мощности по сети.

$$\Delta P(U) \rightarrow \min \quad (3)$$

$$P_{\text{проп}} = \sum_j^k P_j \quad (4)$$

Нагрузочные потери определяются, как результат косвенных измерений по локальным параметрам на основе известной квадратичной зависимости

$$\Delta P = \sum_i^n I_i^2 R_i \quad (5)$$

где  $i=1, \dots, n$

$n$  - количество ветвей контролируемого района,

$$j=1, \dots, k$$

$j$  - количество ветвей с входящим в район потоком мощности.

Правила корректировки уставки для оптимизации потерь по проявлению физического процесса:

- Если класс состояния 1, то осуществляют пробное изменение уставки в любом направлении и определяют изменение потерь или пропуска мощности в прилегающем районе сети;
- Если при этом происходит снижение потерь или увеличение пропуска мощности в прилегающем районе сети, то продолжают изменять уставку в принятом направлении до достижения нулевого приращения потерь или пропуска мощности, или максимально или минимально допустимых напряжений в контролируемых узлах прилегающего района сети;
- Если же, при пробном изменении уставки, произошло увеличение потерь или снижение пропуска мощности в прилегающем районе сети, то меняют направление изменения уставки и продолжают изменять уставку в новом направлении до достижения нулевого приращения потерь или пропуска мощности или максимально или минимально допустимых напряжений в контролируемых узлах прилегающего района сети (рисунок 2 с,d);
- Если при корректировке уставок в классах состояния 3-6 потери мощности снижаются или пропуск мощности увеличивается, то корректировку уставок продолжают в том же направлении до достижения максимально или минимально допустимого напряжения в любом из контролируемых узлов или до исчезновения приращения потерь или пропуска мощности в контролируемом районе сети.

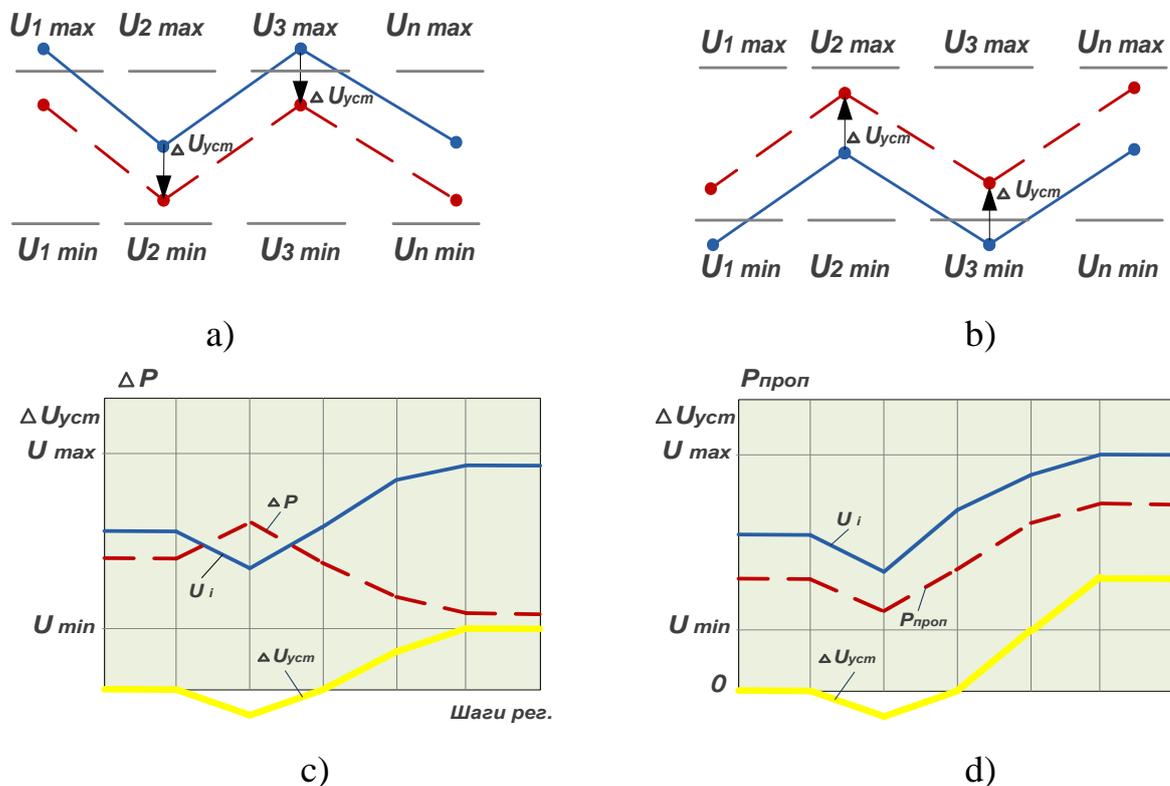


Рисунок 2 - Ситуационные корректировки уставки регулирования напряжения

### *Правила координации взаимодействия смежных агентов:*

- Агент, планирующий выполнить действие, уведомляет о его цели и характере смежным агентам;
- При отсутствии собственной возможности нормализации режима напряжений в своем районе Агент запрашивает помощь смежных агентов;
- Агент, получивший уведомление о планируемом действии смежного агента, запрещает его, если у него нет возможностей компенсации негативных последствий в контролируемом районе от действий смежного агента;
- Агент выполняет действия после получения от смежных агентов разрешений на их осуществление и действует до достижения цели или получения запрета на их продолжение от смежных агентов;
- Агент уведомляет смежных агентов о завершении своих действий.

### *Обмен сообщениями между смежными Агентами*

Для координации взаимодействия Агенты используют следующие смысловые сообщения, передаваемые определенным кодом:

1. «Режим нормальный, бездействую, готов помогать»;
2. «Режим допустимо повышенный, снижаю напряжение, запрещаю повышение напряжения смежными агентами».  
Если собственной возможности снизить напряжение нет, то «Прошу помочь снизить напряжение»;
3. Если режим допустимо пониженный, то «Повышаю напряжение, запрещаю снижение напряжения смежным агентам».  
Если запас регулирования исчерпан, то «Прошу помочь повысить напряжение»;
4. «Режим аварийно повышенный, снижаю аварийное напряжение, запрещаю повышение напряжения смежными агентами».  
Если собственной возможности снизить напряжение нет, то «Прошу экстренно снизить напряжение»;
5. «Режим аварийно пониженный, повышаю напряжение, запрещаю снижать напряжение смежными агентами».  
Если исчерпан запас регулирования, то «Прошу экстренно повысить напряжение».

### *Реализация мультиагентного регулирования напряжения в электрической сети*

Техническая реализация интеллектуального регулятора напряжения в сети предполагает использование компьютерных алгоритмов косвенных измерений режимных параметров в контролируемой зоне сети, искусственного интеллекта (экспертного модуля), действий агента, информационного обмена со смежными агентами. Обобщенная структура “интеллектуального” регулятора представлена на рисунке 3.

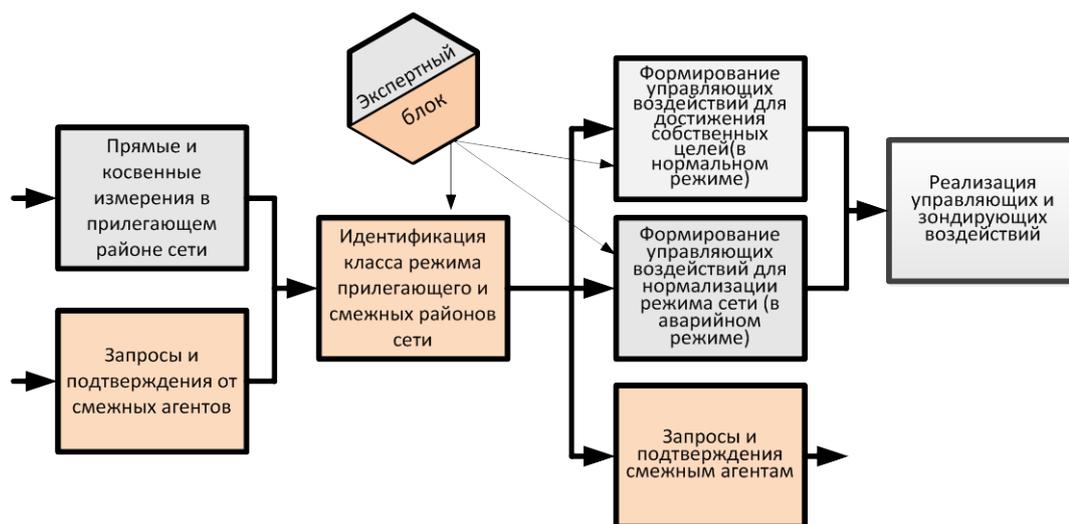


Рисунок 3 - Структура “интеллектуального” регулятора напряжения

**Глава 3** посвящена разработке алгоритма действия агента с учетом его взаимодействия со смежными агентами, а также моделированию и исследованию МАС регулирования напряжения в электрических сетях по созданной программе макрос в среде ПВК RastrWin.

Особенностью режимов электрических сетей с МАС регулирования напряжения является адаптивность регуляторов напряжения или реактивной мощности к режиму контролируемого района сети и области регулирования, причем эта адаптивность выражается не функциональной связью, а сложной логической, представленной правилами экспертного и координирующего блоков.

Представим эту связь (связь коррекций уставок регуляторов напряжения или реактивной мощности с параметрами сети) следующим образом:

$$\Delta U_i = k \times (R(M(U^i) + G(M(U^j))) \times B(M(U^j)) \quad (6)$$

где  $\Delta U_i$  – корректировка уставки по напряжению  $i$ -го регулятора;  
 $k$  – коэффициент усиления в контуре корректировки уставки;  
 $M(U^i)$  – полное множество узлов контролируемого района сети  $i$ -го регулятора;

$R$  – логический оператор (система правил), формирующий независимый указатель корректировки (1 – увеличение, 0 – неизменность, -1 – снижение);

$M(U^j)$  – полное множество узлов района сети, входящих в районы регулирования смежных агентов агента  $i$ -го регулятора;

$G$  – логический оператор (система правил), формирующий запрос на помощь в регулировании напряжения от смежных агентов (1 – увеличение, 0 – неизменность, -1 – снижение);

$B$  – логический оператор (система правил), формирующий запреты на заявляемые действия  $i$ -го агента от смежных агентов (0 – запрет, 1 – разрешение).

Следует отметить, что:

- в результате расчета режима электрической сети с МА регулированием напряжения (т.е. в установившемся режиме) все  $\Delta U_i$  агентов, у которых не

исчерпан рабочий диапазон регулирования, имеют значение 0 либо за счет удовлетворения всем правилам корректировки уставки, либо за счет блокировки действий смежными агентами;

- невозможность замены логических операторов функциональными зависимостями не позволяет свести модель установившегося режима электрической сети с МА регулированием напряжения к системе уравнений и применить к ней традиционные методы решения и обычные вычислительные комплексы (RastrWin, АНАРЭС, Мустанг и др.);
- моделирование МАС, использующих разные цели управления, контроль режима прилегающих районов с коррекцией уставок регуляторов, экспертные блоки в подсистемах принятия решений, в настоящее время не реализованы в промышленных программах, поэтому была разработана экспериментальная программа расчета режимов с интеллектуальными локальными регуляторами путем создания внешних процедур для обычных программ расчета режимов.

Программа написана на языке программирования VBScript в программной среде ПВК RastrWin. Встроенный макроязык на основе Visual Basic Script позволил автоматизировать часто встречающиеся группы операций. Макросы использованы для моделирования поведения агентов на основе ниже представленного алгоритма.

*Модель (алгоритм) поведения каждого агента МАС представляет собой следующую процедуру:*

1. Идентификация класса состояния своего контролируемого района.
2. Проверка наличия и анализ сообщений смежных агентов.
3. Определение необходимых действий:

*В нормальном режиме:*

- разрешает действия смежным агентам;
- по запросам смежных агентов оказывает помощь в нормализации напряжений в смежных районах сети;
- при отсутствии запросов на помощь в нормализации напряжений в смежных зонах сети, с уведомлением и при разрешении смежных агентов, осуществляет оптимизацию режима напряжений в своем контролируемом районе.

*В режиме допустимых отклонений:*

- запрещает смежным агентам заявляемые действия, ухудшающие режим напряжения в контролируемом районе сети;
- разрешает смежным агентам заявляемые действия, улучшающие режим напряжения в контролируемом районе сети;
- определяет, согласовывает со смежными агентами и, при получении разрешений, осуществляет собственные действия по нормализации режима напряжения в контролируемом районе сети.

*В режиме аварийных отклонений:*

- запрещает смежным агентам заявляемые действия, ухудшающие режим напряжения в контролируемом районе сети;
- запрашивает помощь смежных агентов в нормализации напряжений в контролируемом районе сети;
- определяет и осуществляет собственные действия по нормализации режима напряжения в контролируемом районе сети.

*В режиме двухсторонних нарушений:*

- запрещает смежным агентам заявляемые действия, ухудшающие режим напряжения в контролируемом районе сети;
- запрашивает помощь смежных агентов в нормализации напряжений в контролируемом районе сети.

Разработанная программа находит установившийся компромиссный режим напряжения в сети при корректировках уставок локальных регуляторов по заложенным правилам децентрализованного регулирования.

Состав процедур программы:

*Процедура 1* (определение контролируемого агентом района сети).

Каждый агент может контролировать напряжения всех шин своей ПС и напряжения шин смежных узлов (по удаленным концам отходящих линий). Напряжения удаленных концов таких линий могут контролироваться по результатам косвенных измерений (расчетным путем по результатам измерения параметров со стороны их примыкания к шинам подстанции с агентом).

Район сети определяется путем анализа топологии сети для выявления всех узлов, связанных линиями электропередачи с шинами подстанции с агентом. Таким образом, для каждого агента ( $i$ ) определяется множество узлов контролируемого напряжения ( $A_i$ ).

*Процедура 2* (определение смежных агентов и пересекающихся областей контроля).

Каждая пара множеств  $A_i$ ,  $A_j$  проверяется на наличие общих узлов. При выявлении общих узлов агенты маркируются как смежные.

*Процедура 3* (определение областей с существенным взаимным влиянием действий агентов на режим напряжений контролируемых районов).

Для выявления существенности взаимного влияния в каждой из зон контроля поочередно вводится зондирующее управляющее воздействие, фиксируются изменения напряжения в остальных зонах и проверяется их значимость по отношению к изменениям в базовой зоне путем сравнения с задаваемым порогом чувствительности:

$$K_{\text{ч}} = \Delta U_2 / \Delta U_1, \quad (7)$$

где  $K_{\text{ч}}$  – коэффициент чувствительности.

В результате последовательного применения процедур 2, 3 находятся пары агентов, имеющих как топологическую смежность, так и значимость взаимного влияния на режим напряжений.





После нормализации режима целью агентов стала минимизация потерь. На рисунке 6 представлен процесс согласованной оптимизации потерь в контролируемых зонах с учетом взаимодействий агентов по предотвращению выхода напряжений из допустимой области.

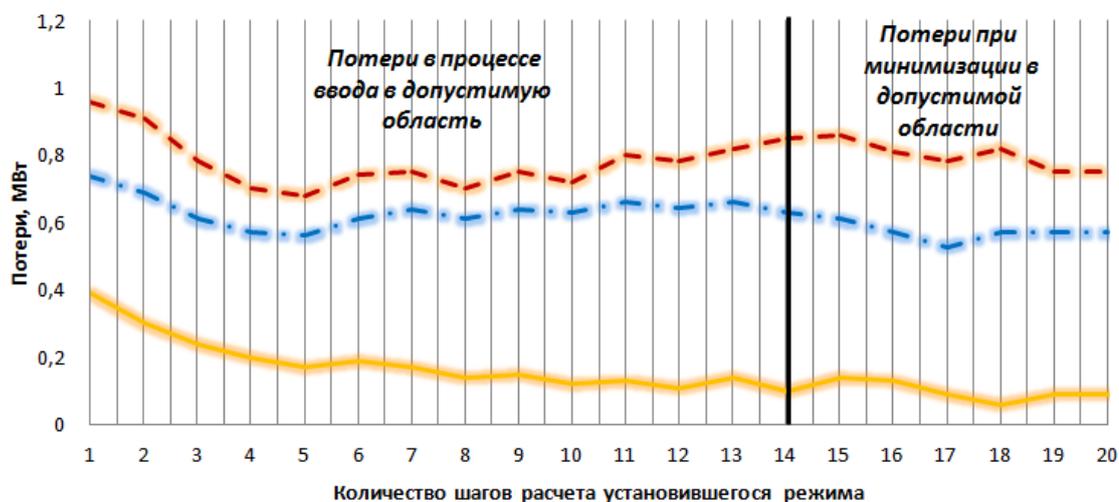


Рисунок 6 - Процесс расчета компромиссного установившегося режима электрической сети с оптимизацией потерь в зонах контроля агентов МАС

Примечание — – потери активной мощности в зоне контроля Агента 1  
- - - – потери активной мощности в зоне контроля Агента 2  
- · - · - – потери активной мощности в зоне контроля Агента 3

Результаты моделирования режима Жамбылской РЭС подтвердили возможность компромиссного регулирования напряжения в электрических сетях с распределенными средствами компенсации реактивной мощности посредством децентрализованной МАС с координацией действий агентов в смежных зонах.

**В 4 главе** представлены результаты технической реализации основных идей работы в составе создаваемой на кафедре автоматизированных электроэнергетических систем НГТУ совместно с ООО «Модульные системы Торнадо» агентной автоматики режимно-противоаварийного управления локальной системой энергоснабжения на базе газопоршневой электростанции, работающей, как автономно, так и параллельно с внешней электрической сетью.

Локальные системы энергоснабжения (ЛСЭ) малой мощности на базе топливных электростанций (ТЭС) с синхронными генераторами, как правило, не оснащаются режимной и противоаварийной автоматикой, обеспечивающей одновременно, как возможность их безопасной работы параллельно с внешней сетью, так и надежность электроснабжения потребителей.

Доступные технические решения этой задачи, как правило, используют различные разделяющие вставки (роутеры), поэтому сопоставимы по стоимости с самой ТЭС, а также обладают другими существенными недостатками.

Автоматика, разрабатываемая ООО «Модульные системы Торнадо» и НГТУ, обеспечивает безопасность параллельной работы ЛСЭ с сетью и надежность электроснабжения потребителей при прямом подключении ЛСЭ к внешней сети за счет комплексного (структурно-режимного и противоаварийного) управления.

К группе режимного управления относится и алгоритм регулирования напряжения и реактивной мощности. Его задачами являются:

- в нормальном режиме изолированной работы - стабилизация напряжения в допустимой для нормальных режимов зоне в контролируемой зоне сети;
- в аварийном режиме изолированной работы - предотвращение и ликвидация динамических и статических допустимых повышений и снижений напряжений;
- при параллельной работе с сетью – поддержание постоянства заданной для обмена с сетью доли реактивной мощности от полной мощности в заданном сечении сети (постоянства  $\text{tg}$  угла мощности);
- при аварийном отключении энергоблока и его торможении до полной остановки - экстренное снижение возбуждения до нуля;
- при регулировании напряжения или реактивной мощности группой энергоблоков – заданное распределение реактивной мощности между ними.

При этом, в зависимости от состава работающих энергоблоков и структурно-режимного состояния ЛЭС, функции и алгоритмы работы каждого из регуляторов меняются (осуществляется их структурно-параметрическая перенастройка).

*Алгоритмы регулирования напряжения и реактивной мощности в островном режиме и в режиме параллельной работы с сетью*

Автоматика осуществляет групповое регулирование напряжения и реактивной мощности в контролируемом районе сети. Алгоритм регулирования возбуждения ведущего генератора представлен на рисунке 7.

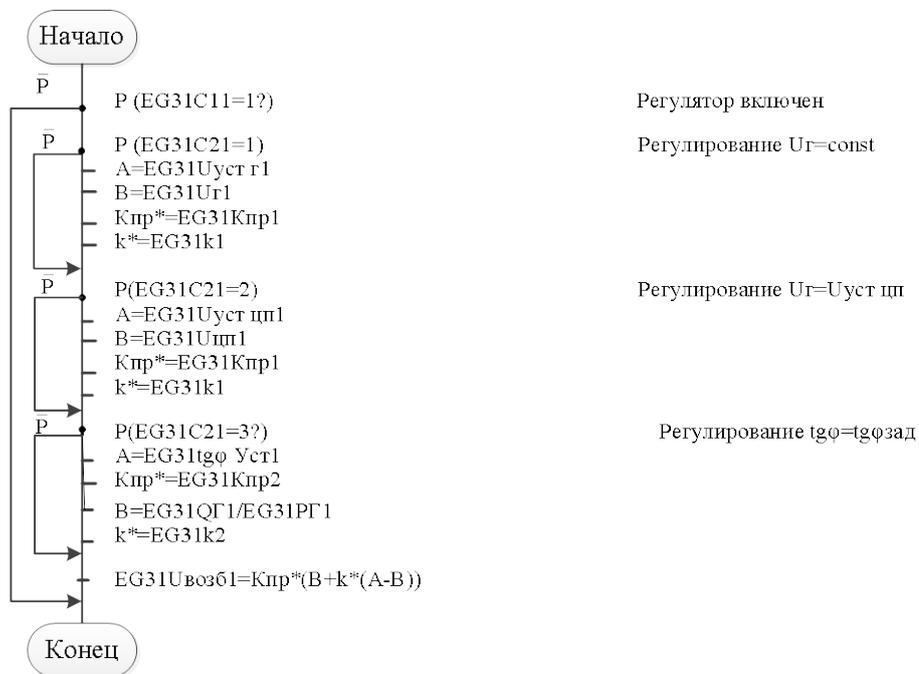


Рисунок 7 - Алгоритм регулирования напряжения и реактивной мощности ведущего генератора с ключами переключения способов регулирования от автооператора ПТК Minigrd

Характерные осциллограммы напряжений без регуляторов напряжения и с регуляторами приведены на рисунках 8 и 9.

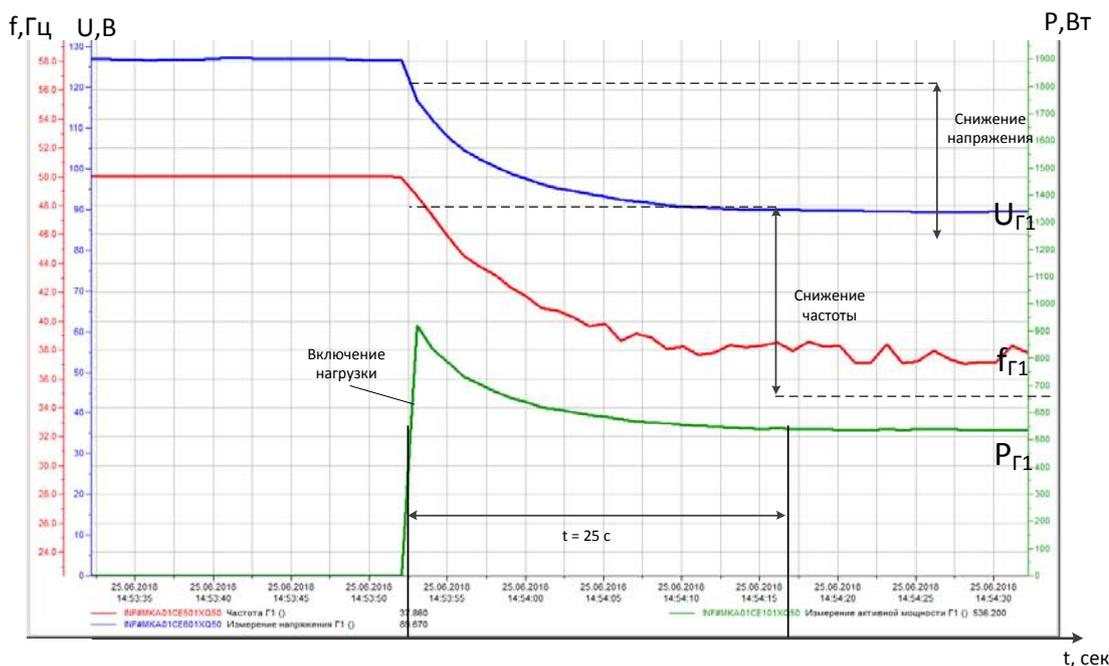


Рисунок 8 -Характерная осциллограмма напряжения без регуляторов напряжения и частоты в ЛЭС при включении мощной нагрузки

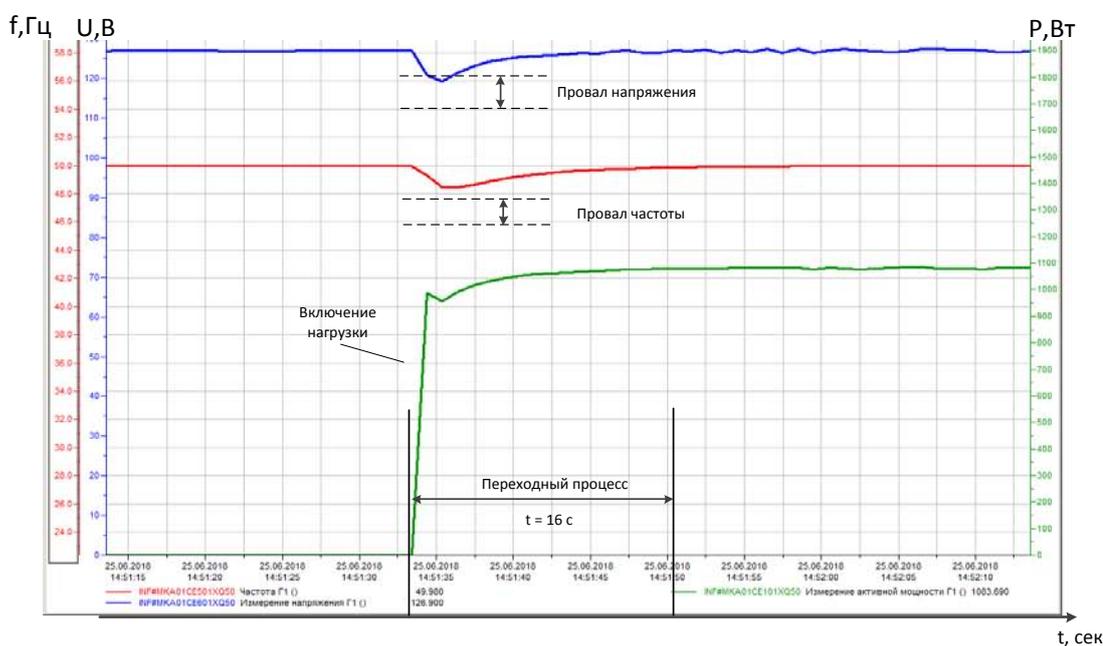


Рисунок 9 -Характерная осциллограмма напряжения с регуляторами напряжения и частоты в аналогичных условиях

Проведенные на физической модели ЭЭС испытания автоматики подтвердили работоспособность и эффективность агентного регулирования напряжения района электрической сети.

Ожидается, что инновационные средства автоматики для малой генерации с автооператором управления параллельной работой ЛСЭ с централизованной электрической сетью будут реализованы в пилотном проекте на одном из энергообъектов в г. Новосибирске и позволят существенно (в разы) снизить затраты на подключение таких объектов к сети, повысить эффективность их работы, снизить потери в сетях.

### **Основные результаты диссертационной работы:**

1. Предложена структура мультиагентного регулятора напряжения и обоснована необходимость интеллектуального (экспертного) блока в его составе, обеспечивающего принятие решений с учетом взаимодействия агентов одноуровневой МАС;

2. Предложен принцип построения МАС, реализующей децентрализованное управление режимом напряжений в электрических сетях с множеством распределенных управляемых компенсаторов реактивной мощности и распределенной малой генерацией;

3. Разработаны правила и алгоритмы координации, использующие минимальный обмен информацией между агентами для компромиссного поведения локальных регуляторов;

4. Разработан и реализован алгоритм в среде ПВК RastrWin (написана программа макрос) моделирования и исследования МАС регулирования напряжения в электрических сетях;

5. Работоспособность МАС и разработанной программы проверены на примерах существующих электрических сетей. Результаты расчета соответствуют ожиданиям, как в части возможности и эффективности децентрализованного регулирования напряжения в электрических сетях, так и в части моделирования подобных систем путем модификации существующих вычислительных комплексов.

### **Список публикаций по теме диссертации**

*Публикации в изданиях, рекомендованных в ВАК РФ:*

1. Карджаубаев, Н. А. Особенности обеспечения надежности электроснабжения в изолированно работающих энергосистемах с малой генерацией. Мукатов Б.Б., Карджаубаев Н.А., Фишов А.Г. // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 4 (29). – С. 94–104. DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-94-104.

2. Карджаубаев, Н. А. Децентрализованное мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях. Карджаубаев Н.А., Фишов А.Г. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 6. С. 183–195. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-183-195>

*Работы, опубликованные в международных и российских изданиях, сборниках научных трудов конференций:*

3. Karjaubayev, N. A. Decentralized Smart Multi-Agent Voltage Regulation in Electric Grids. Ideology and Modeling / A. G. Fishov, N. A. Karjaubayev, I. L.

Klavsvuts, D. A. Klavsvuts // 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2018): proc., Glasgow, United Kingdom, 4-7 Sept. 2018. - IEEE, ISBN 978-1-5386-2910-9. - DOI: 10.1109/UPEC.2018.8542109

4. Karjaubayev, N. A. Multi-agent voltage control in multiconnected electric networks / A. G. Fishov, N. A. Karjaubayev, E. Erdenebat // 12 International forum on strategic technology (IFOST 2017) : proc., Korea, Ulsan, 31 May – 2 June 2017. – Ulsan, 2017. – Vol.1. - P. 246-250. - ISBN 978-1-5090-5703-0.

5. Карджаубаев, Н. А. Децентрализация регулирования напряжения в электрических сетях = *Decentralization control of voltage in electrical networks* [Текст] / А. Г. Фишов, Н. А. Карджаубаев // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы 8 междунар. науч.-техн. конф., Самара, 2 – 6 окт. 2017 г. В 3 т. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. - Т. 3. - С. 173-176. - 60 экз. - ISBN 978-5-7964-2030-0.

6. Карджаубаев, Н. А. Мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях [Электронный ресурс] / А. Г. Фишов, Н. А. Карджаубаев, Э. Эрдэнэбат // Релейная защита и автоматика энергосистем 2017: междунар. выст. и конф., Санкт-Петербург, 25–28 апр. 2017 г.: сб. докл. - Санкт-Петербург, 2017. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). Релейная защита и автоматика энергосистем 2017. - Загл. с этикетки.

7. Karjaubayev, N. A. The research of influence normalizer voltage on characteristics and processes in electric networks / A. G. Fishov, A. I. Marchenko, N. A. Karjaubayev, V. V. Denisov, I. L. Klavsvuts // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г.: в 12 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 1, ч. 1. – С. 109-112. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-2991-4.

8. Карджаубаев, Н. А. Влияние нормализатора напряжения на характеристики и процессы в электрической сети / Н. А. Карджаубаев, А. И. Марченко; науч. рук. А. Г. Фишов // Материалы 54-й международной научной студенческой конференции (МНСК-2016). Энергетика = Proceedings of the 54 international students scientific conference (ISSC-2016). Energetics, Новосибирск, 16-20 апр. 2016 г. - Новосибирск: РИЦ НГУ, 2016. - С. 27. - 80 экз. - ISBN 978-5-4437-0515-6.

9. Карджаубаев, Н. А. Исследования влияния нормализатора напряжения на характеристики и процессы в электрических сетях / В. В. Денисов, А. Г. Фишов, А. И. Марченко, И. Л. Клавсуц, Н. А. Карджаубаев // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития: сб. материалов 17 Всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 20 дек., 30 дек. – Новосибирск : Изд-во ЦРНС, 2016. – С. 138-145. - ISBN 978-5-00068-756-7.

10. Карджаубаев, Н. А. Мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях = *Multiagent voltage regulation in distribution line* [Текст] / Н. А. Карджаубаев // Электроэнергетика глазами молодежи-2016: материалы 7 междунар. науч.-техн. конф., 19–23 сент. 2016 г., Казань: в 3 т. – Казань : Казань. гос. энерг. ун-т, 2016. - Т. 3. – С. 222-225. - 50 экз. - ISBN 978-5-89873-462-6.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ №159. Подписано в печать 21.12.2018 г.