

Методика разработки алгоритмов согласованного управления многоконтурной энергетической системой с применением цифровых двойников

Мозохин Андрей Евгеньевич

Специальность 02.03.01 Системный анализ, управление и
обработка информации

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор Шведенко Владимир Николаевич

Актуальность исследования

- ▶ Современная электроэнергетическая система (ЭЭС) представляет собой сложную организационную структуру, обеспечивающую координацию работы входящих в нее интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), путем определения их ролей, каналов связи и полномочий. Система управления ИЭУ ЭЭС должна обеспечивать согласованность их работы на технологических этапах генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии.
- ▶ Попытки разработки методов согласованного управления компонентами ЭЭС посредством интеграции разрозненных данных от ИЭУ генераторов, электрических подстанций, высоковольтных линий электропередачи и энергораспределительных устройств в единую информационную систему управления приводят к сложностям.
- ▶ Проблемы согласованной работы компонентов ЭЭС состоят в отсутствии единых стандартов информационного обмена между технологическими и корпоративными информационными системами, слабой согласованностью работы организационных структур, генерацией избыточного трафика в сеть и ряд других факторов.
- ▶ Отсутствие согласованной работы внедряемых ИЭУ компонентов ЭЭС негативно влияет на эффективности функционирования энергетических объектов, что в свою очередь снижает качественные и количественные показатели электроэнергии в сети. **Выше перечисленные факты указывают на необходимость разработки современных методов и алгоритмов согласованного управления компонентами интеллектуальной ЭЭС.**

Решаемая научно-техническая проблема

Проблемная ситуация. Недостатком существующих систем управления технологическими процессами в электроэнергетической системе является тот факт, что иерархическая структура управления применяется к сетевой топологии. В таком случае возникает конфликты ресурсов и процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии.

Научная проблема. Разработка теоретических основ и методов поддержки принятия управленческих решений с использованием технологии цифрового двойника для эффективной совместной работы гетерогенных систем генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии.

▶ *Теоретический аспект* проблемы заключается в создании методологии формирования цифровых двойников компонентов гетерогенной электроэнергетической системы для поддержания качественных и количественных показателей электроэнергии в сети.

▶ *Практический аспект* проблемы заключается в разработке современных методов анализа, синтеза и управления компонентами интеллектуальной электроэнергетической системы с целью повышения эффективности технологических процессов производства и потребления электроэнергии.

Характеристика области исследования

- ▶ **Объект исследования:** цифровой двойник компонентов электроэнергетической системы
- ▶ **Предмет исследования:** методы и алгоритмы обеспечения процессов производства и потребления электроэнергии на основе цифровых двойниками компонентов электроэнергетической системы.
- ▶ **Цель работы:** Разработка теоретических основ и методов поддержки принятия управленческих решений с использованием технологии цифровых двойников для эффективной совместной работы гетерогенных систем генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии.

Задачи исследования

- ▶ Анализ актуальных направлений цифровой трансформации в системах генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии
- ▶ Анализ существующих методов и алгоритмов управления интеллектуальными электронными устройствами систем производства и потребления электроэнергии
- ▶ Развитие теории цифровых двойников применительно к задачам моделирования и управления энергоинформационными процессами в ЭЭС
- ▶ Синтез систем управления для поддержки оптимального функционирования энергоинформационного взаимодействия компонентов ЭЭС
- ▶ Разработка концепции управления интеллектуальным пространством ЭЭС с применением цифровых двойников
- ▶ Разработка методологии построения цифровых двойников на основе декомпозиции полиструктурной ЭЭС и моделирования взаимодействия её компонентов в цифровой среде
- ▶ Разработка методики применения цифровых двойников для обеспечения согласованной работы компонентов ЭЭС на технологических этапах генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии.
- ▶ Практическая реализация методики управления интеллектуальным пространством ЭЭС с применением взаимодействующих цифровых двойников:
 - системы климат-контроля умного дома
 - распределительной электрической сети

Новые научные результаты и положения, выносимые на защиту

- ▶ Научный подход к системному представлению цифрового двойника ЭЭС
- ▶ Теоретические основы формирования цифровых двойников ЭЭС и её компонентов в единой цифровой среде моделирования.
- ▶ Методические основы для проектирования информационно-энергетического пространства для взаимодействия цифровых двойников компонентов ЭЭС.
- ▶ Концепция управления сетевой структурой ИЭУ объектов ЭЭС с применением технологии цифровых двойников
- ▶ Методика обеспечения комфортного состояния микроклимата умного дома с использованием ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей. Алгоритм работы нейронной сети позволяет контролировать параметры состояния физической среды, прогнозировать режимы работы киберфизических устройств и формировать сигналы управления для каждого из них, обеспечивая совместную работу устройств с минимальным ресурсопотреблением и информационным трафиком.
- ▶ Методика управления показателями качества электроэнергии в сети электроснабжения на основе использования ансамбля искусственных нейронных сетей. Для каждого цифрового двойника компонента ЭЭС создается нейронная сеть, обеспечивающие взаимосвязь контролируемых показателей качества электроэнергии и регулируемых величин исполнительных механизмов ИЭУ компонента ЭЭС

Практическая ценность

- ▶ *Реализация системы управления микроклиматом умного дома.* Разработана система управления микроклиматом умного дома на примере многофункционального учебного компьютерного класса. Разработаны гибридные нейронные сети систем кондиционирования, вентиляции и отопления.
- ▶ *Реализация системы управления показателями качества электроэнергии в ЭЭС.* Реализована система управления качеством электроэнергии на участке электрической сети с применением цифровых двойников, обеспечивающих взаимосвязь контролируемых показателей качества электроэнергии и регулируемых величин исполнительных механизмов ИЭУ.
- ▶ *Теоретические основы формирования современных систем управления объектами ЭЭС.* Технология цифрового двойника применительно к полиструктурным системам предоставляет разработчикам распределенных систем управления методологию создания современной системы управления, где выработка управленческих решений не приводит к конфликтам ресурсов компонентов электроэнергетической системы.

Апробация работы

- ▶ По теме исследования опубликовано 12 статей в рецензируемых изданиях входящих в «Перечень ВАК...». Из них 6 публикаций в журналах Scopus, 2 публикации в журналах Web of Science.
- ▶ Результаты и научные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях:
 - Международный форум «Российская энергетическая неделя» (г. Москва, 2016-2021),
 - Международная научно-техническая конференция в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2019» (г. Чебоксары, 2019),
 - Международной научно-технической конференция «Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес» (г. Вологда, 2021).
 - Международной научно-практической конференции для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК «Развивая энергетическую повестку будущего» (Москва, 2022).
- ▶ Проект цифровой платформы интеллектуальных сервисов полуфиналист конкурса инновационных проектов в области умной энергетики «неделю вперед Энергопрорыв-2017»,
- ▶ Акт внедрения программного модуль прогнозирования энергопотребления с применением ансамбля нейронных сетей в филиале ПАО «МРСК Центра» (Москва, 2016),
- ▶ Акт внедрения системы поддержки принятия решения диспетчеров в филиале ПАО «МРСК Центра» (Москва, 2018).

Базовая система понятий.

Интеллектуализация электроэнергетической системы

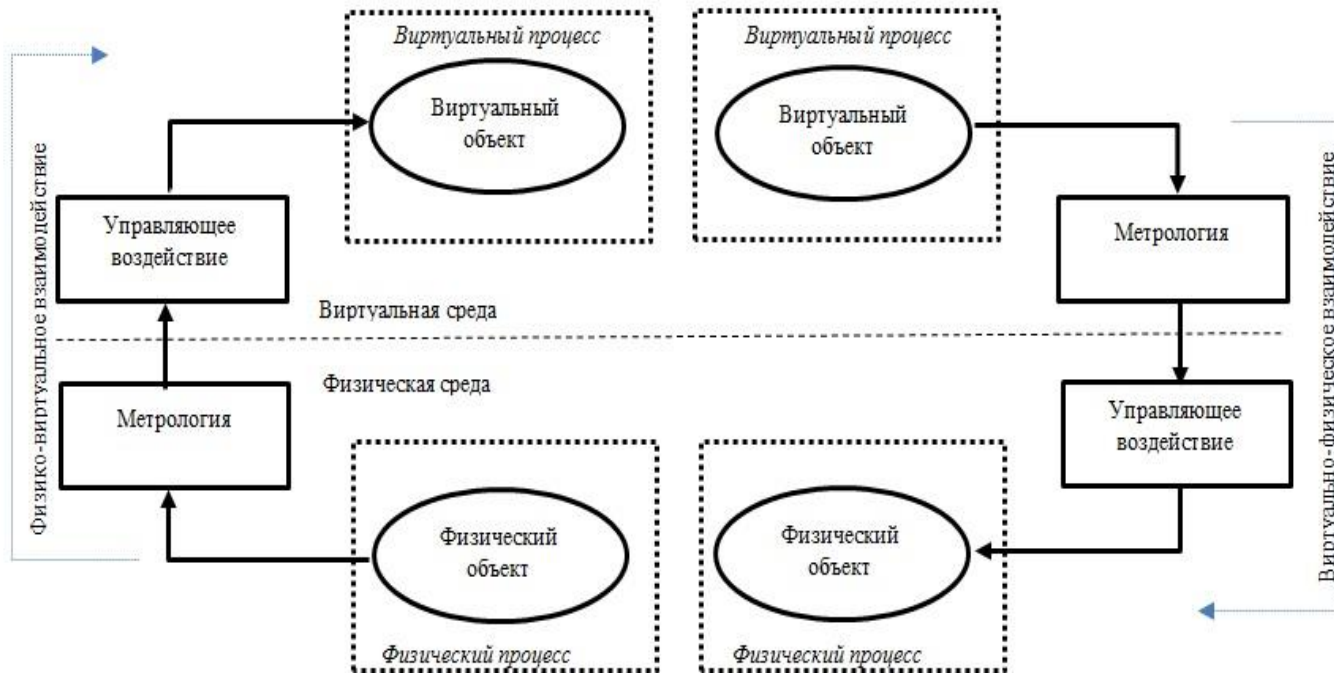
- ▶ **Электроэнергетическая система, ЭЭС** - совокупность объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок потребителей электрической энергии, связанных общим режимом работы в едином технологическом процессе производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии.
- ▶ **Интеллектуальная электроэнергетическая система, ИЭЭС** - это модернизированные сети электроснабжения, которые используют информационные и коммуникационные сети и технологии для сбора информации об энергопроизводстве и энергопотреблении, позволяющей автоматически повышать эффективность, надёжность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии.
- ▶ **Интеллектуальные электронные устройства, ИЭУ** - это многофункциональные устройства. Они используются в первую очередь как процессоры, а также как цифровые датчики информации и средства автоматизации. Они собирают данные, а затем выполняют дополнительные расчеты и реализуют логику принятого алгоритма.

Базовая система понятий.

Электроэнергетическая система как полиструктура

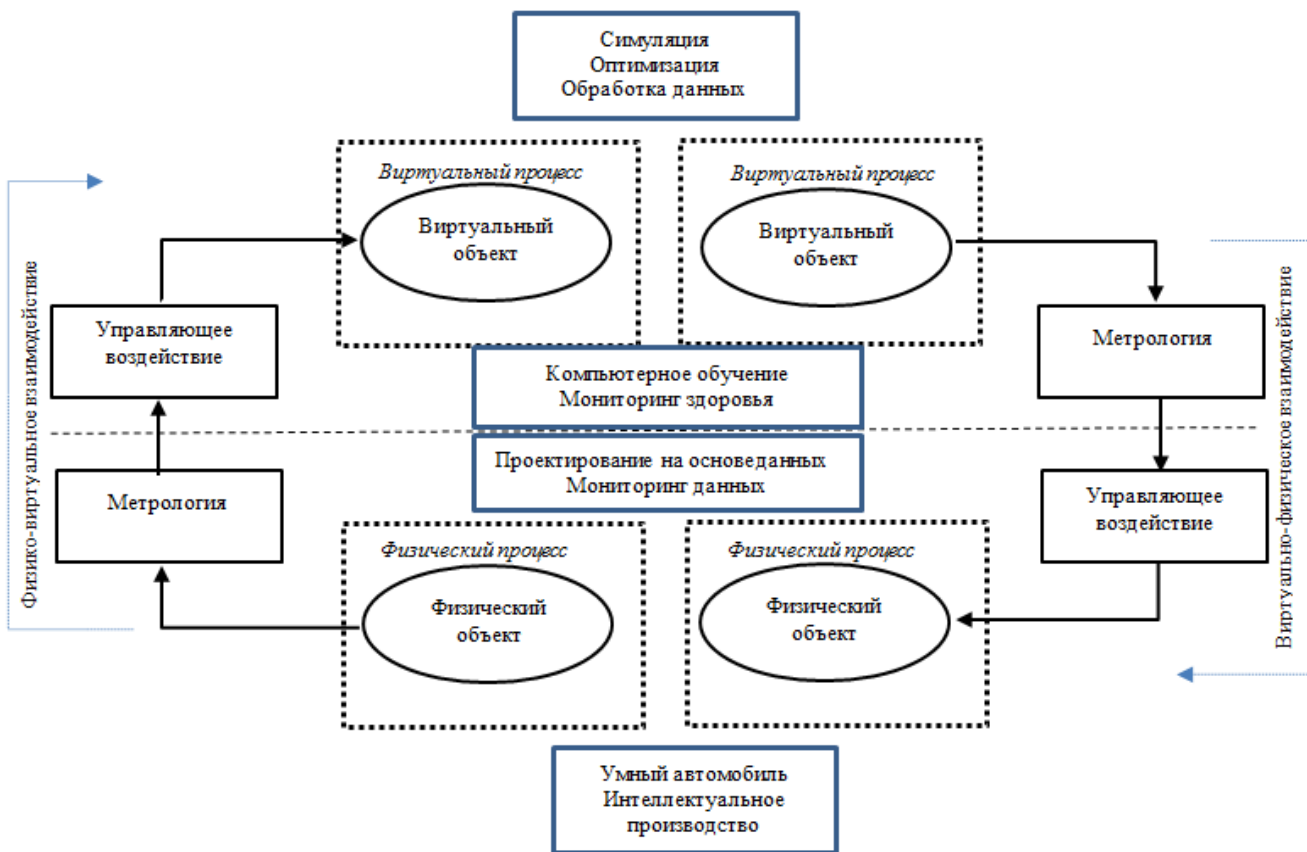
- ▶ **Полиструктурная электроэнергетическая система, ПЭЭС** - это сложная динамическая система, которая состоит из множества разнообразных элементов, различающихся физическими свойствами, функциональным назначением, сложностью внутренних структур и процессов в них происходящих, с различными моделями управления и кибернетическими устройствами, рассматривается с позиций системного единства и ориентирована на достижение общей цели.
- ▶ **Тело полиструктурной ЭЭС** - Идеальный или реальный физический объект, содержащий множество показателей полиструктуры образует особый ее элемент, формирующий синергетический эффект полиструктурной системы. Обязательной функцией тела полиструктуры является обеспечение информационного взаимодействия всех элементов полиструктурной системы, согласование их целевых ориентиров для достижения целевых ориентиров полиструктурной системы в целом.
- ▶ **Коллинеарные связи полиструктурной ЭЭС** - двунаправленные связи между телом и элементом полиструктурной ЭЭС. Выделяют связи типа «информация-информация», «информация-энергия», «энергия-информация», «энергия-энергия».

Теоретические основы формирования цифрового двойника ЭЭС



Двунаправленная синхронизация объектов физической и виртуальной сред с применением цифровых двойников

Теоретические основы формирования цифрового двойника ЭЭС



Двунаправленная синхронизация объектов ЭЭС с ИЭУ (интеллектуальные электронные устройства) с применением цифровых двойников

Методология построения цифрового двойника полиструктурной ЭЭС

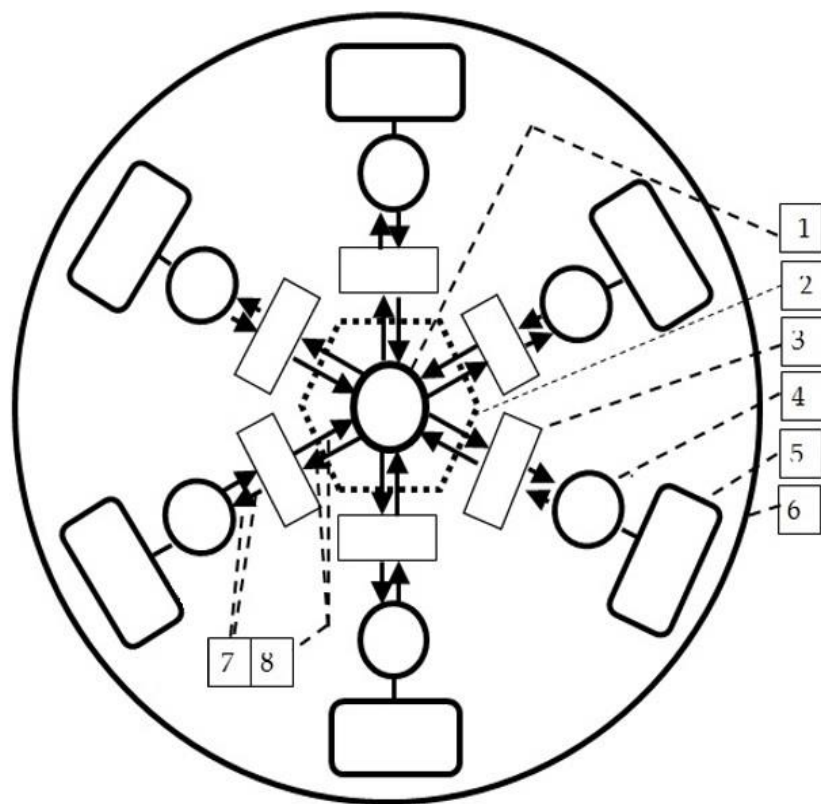


Схема информационных потоков по коллинеарным связям полиструктурной системы включает следующие функциональные блоки:

1 – метрическая система сбора, обработки, хранения и передачи данных тела полиструктурной системы;

2 – тело полиструктурной системы;

3 – валидатор фильтрации, группировки и преобразования данных, поступающих из метрической системы сбора, обработки, хранения и передачи данных элемента полиструктурной системы;

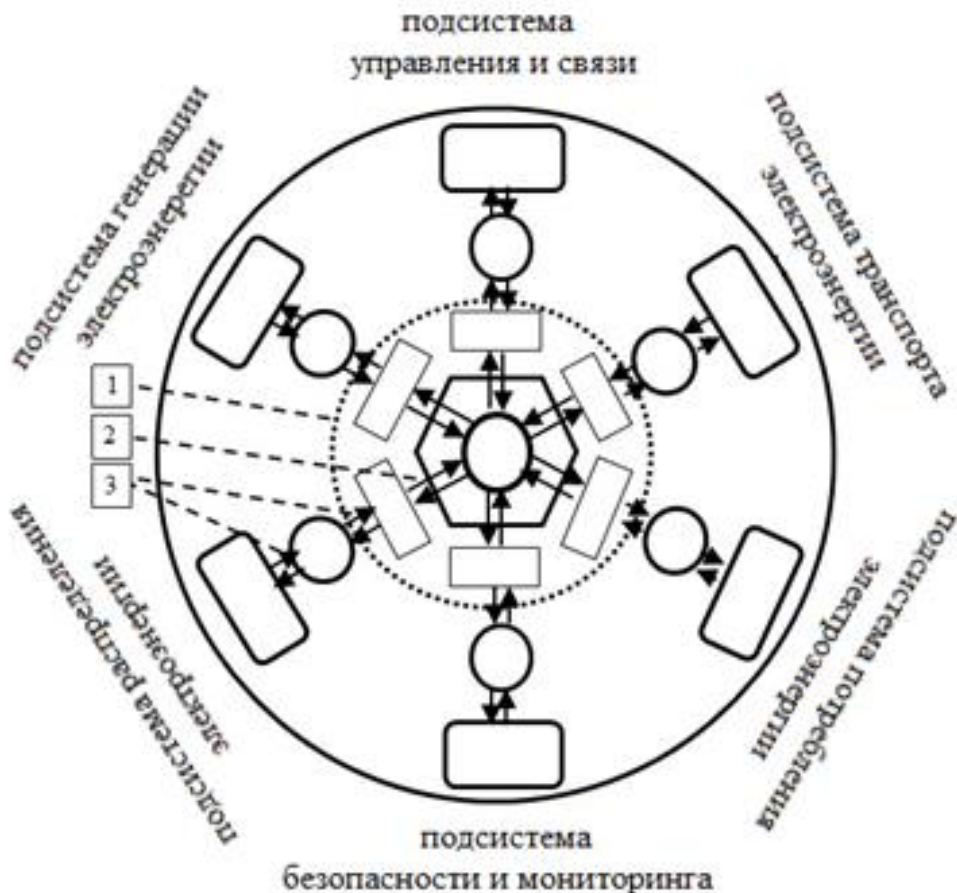
4 – метрическая система сбора, обработки, хранения и передачи данных элемента полиструктурной системы;

5 – компонент полиструктурной системы;

6 – полиструктурная система;

7, 8 – коллинеарные двусторонние связи

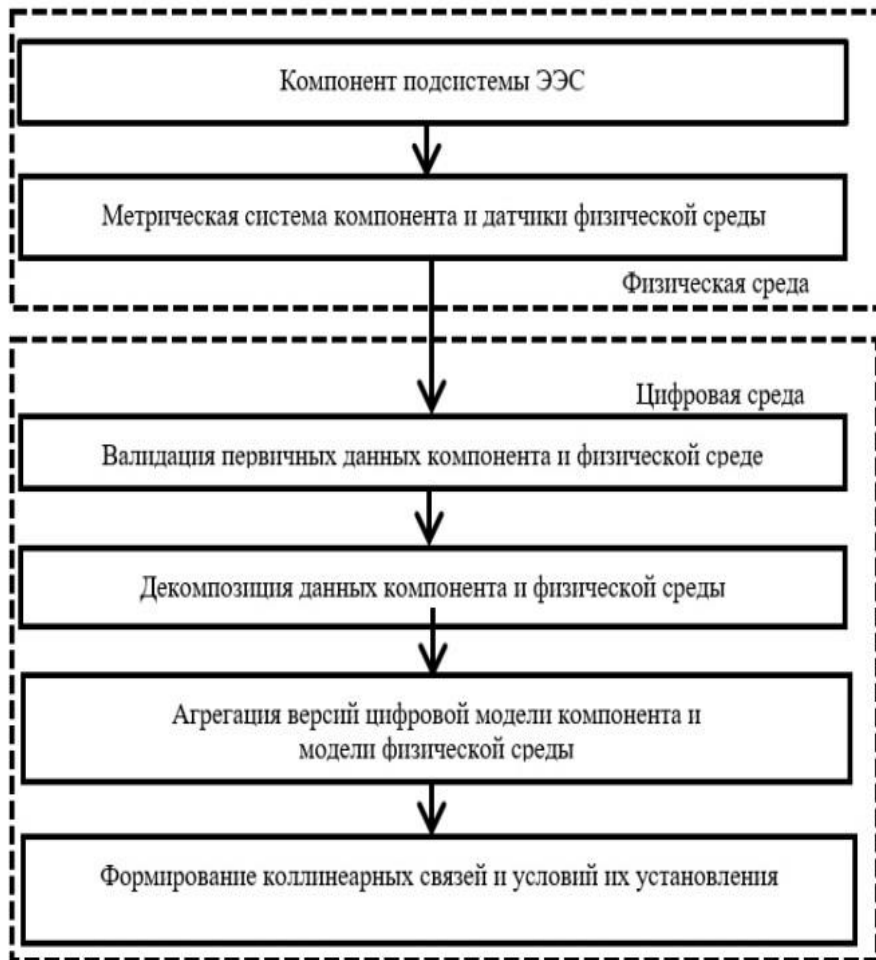
Методология построения цифрового двойника полиструктурной ЭЭС



Структурная схема
информационного взаимодействия
компонентов полиструктуры
интеллектуальной
электроэнергетической системы:

1 - граница разделения физической
и цифровой сред полиструктуры;
2, 3 - двунаправленные связи
информация взаимодействия
компонентов ИЭС

Методика формирования цифрового двойника компонентов ЭЭС



Порядок формирования цифровой модели компонента и установление коллинеарных связей между реальными и виртуальными объектами

Методика формирования цифрового двойника компонентов ЭЭС

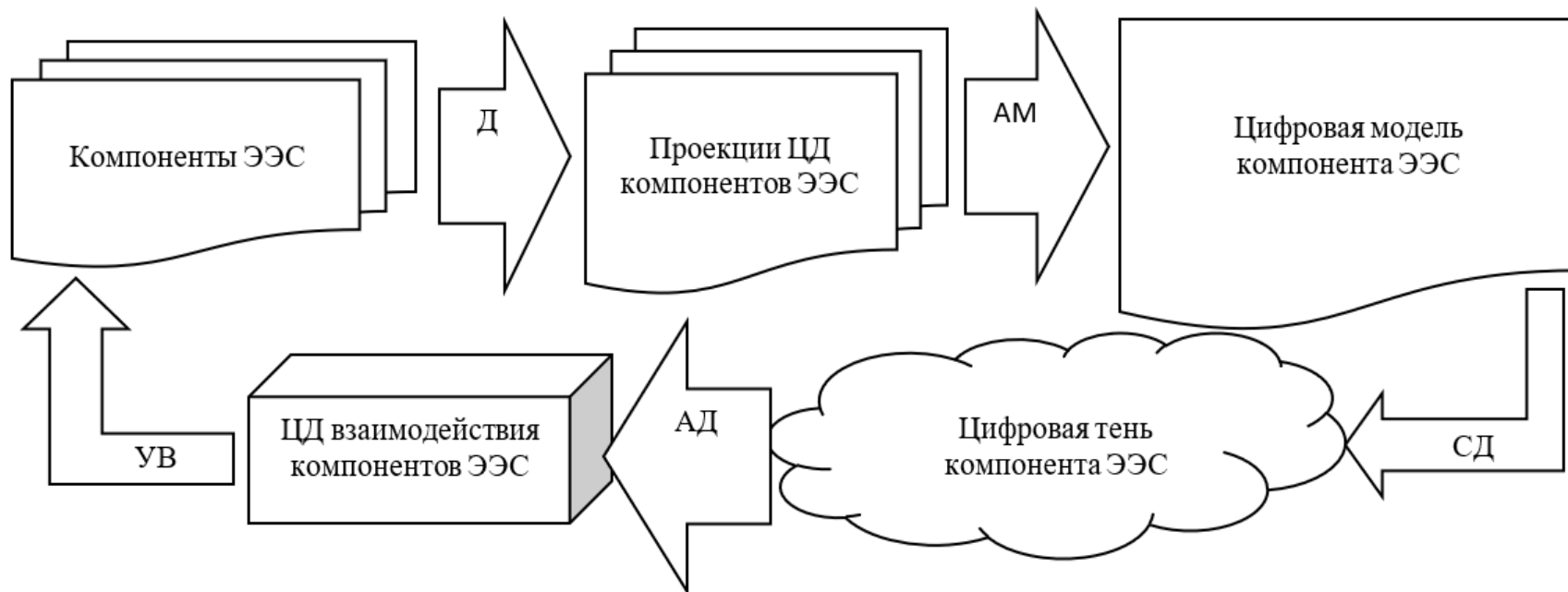
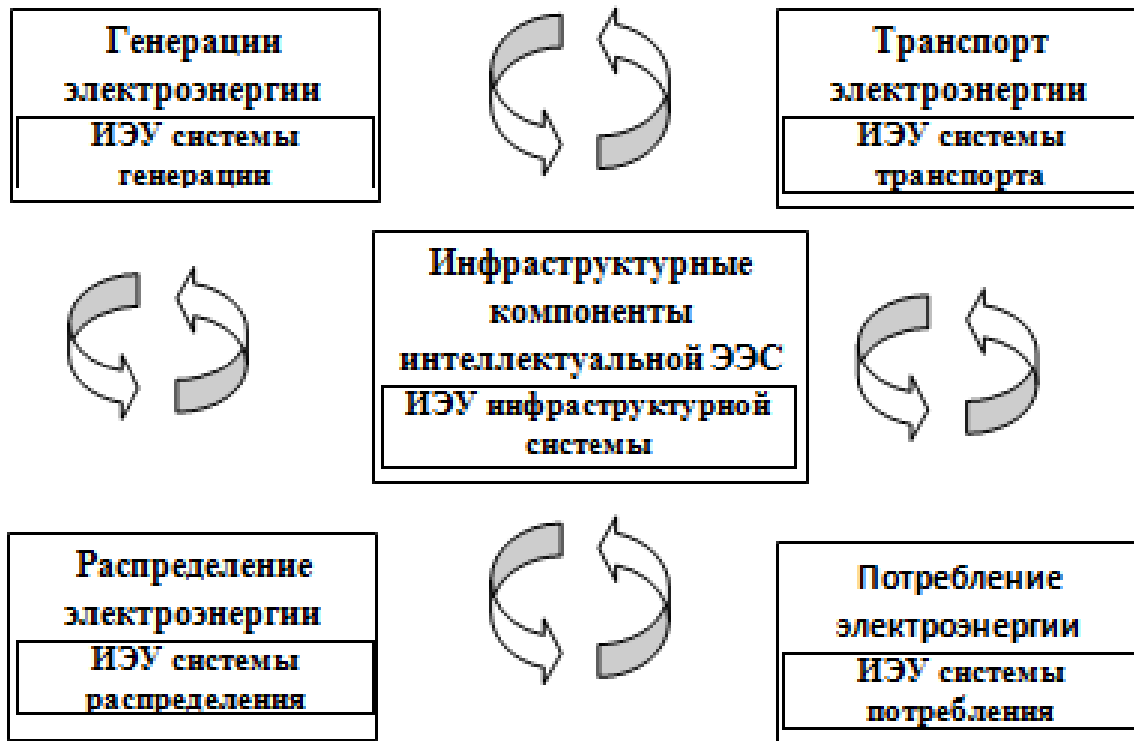


Схема информационных потоков при формировании цифрового двойника полиструктурной ЭЭС, где ЦД – цифровой двойник, ЭЭС- электроэнергетическая система, Д – декомпозиция, АМ – агрегация моделей, СД-синтез данными, АД- агрегация данных, УВ- управляющее воздействие.

Концепция управления сетевой структурой компонентов интеллектуальной ЭЭС с применением взаимодействующих ЦД



Структурная схема взаимодействия компонентов полиструктуры ЭЭС. Типы взаимодействия :

- энергия/энергия
- энергия/информация
- информация/энергия
- информация/информация

Концепция управления сетевой структурой компонентов интеллектуальной ЭЭС с применением взаимодействующих ЦД

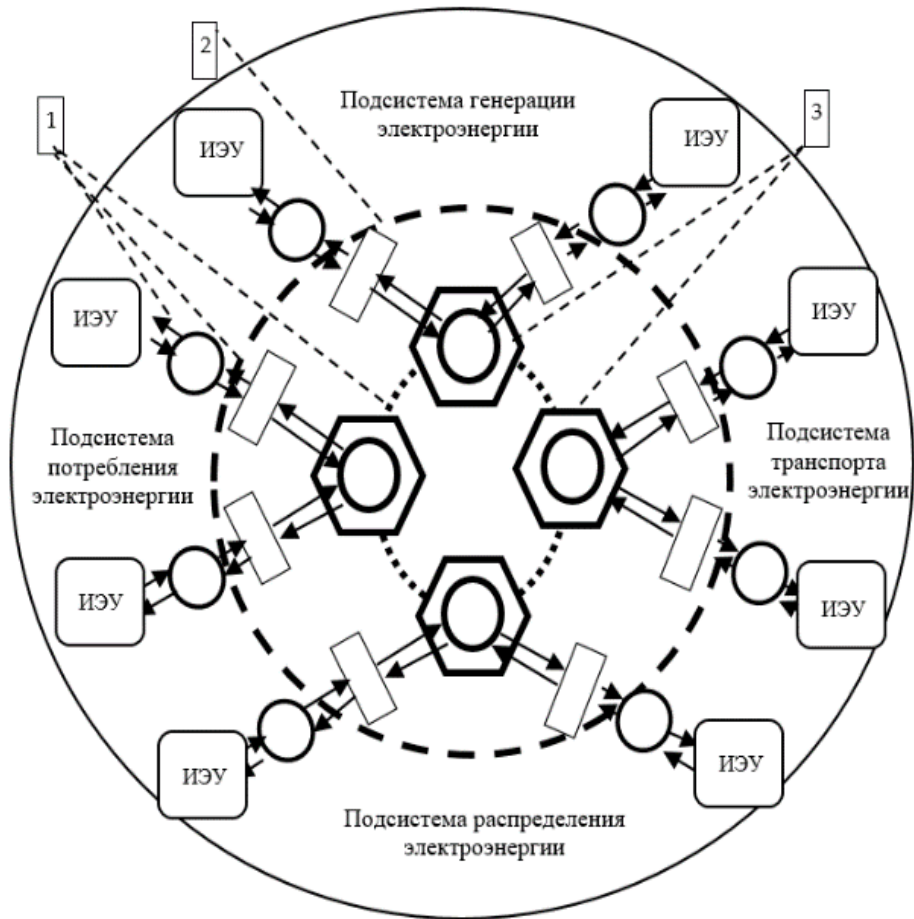


Схема взаимодействия цифровых двойников

компонентов полиструктурной ЭЭС:

1- коллинеарные двунаправленные связи типа информация–информация,

2- граница разделения физической и цифровой сред полиструктурной ЭЭС,

3 –тела компонентов полиструктурной ЭЭС

Методика управления сетевой структурой компонентов интеллектуальной ЭЭС с применением взаимодействующих цифровых двойников

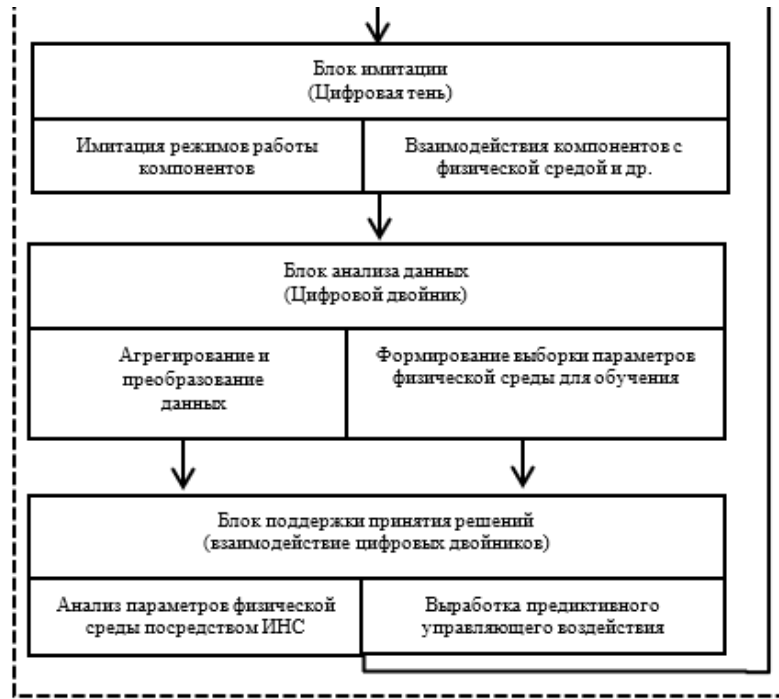


Блок схема управления полиструктурой ЭЭС на основе взаимодействующих цифровых двойников

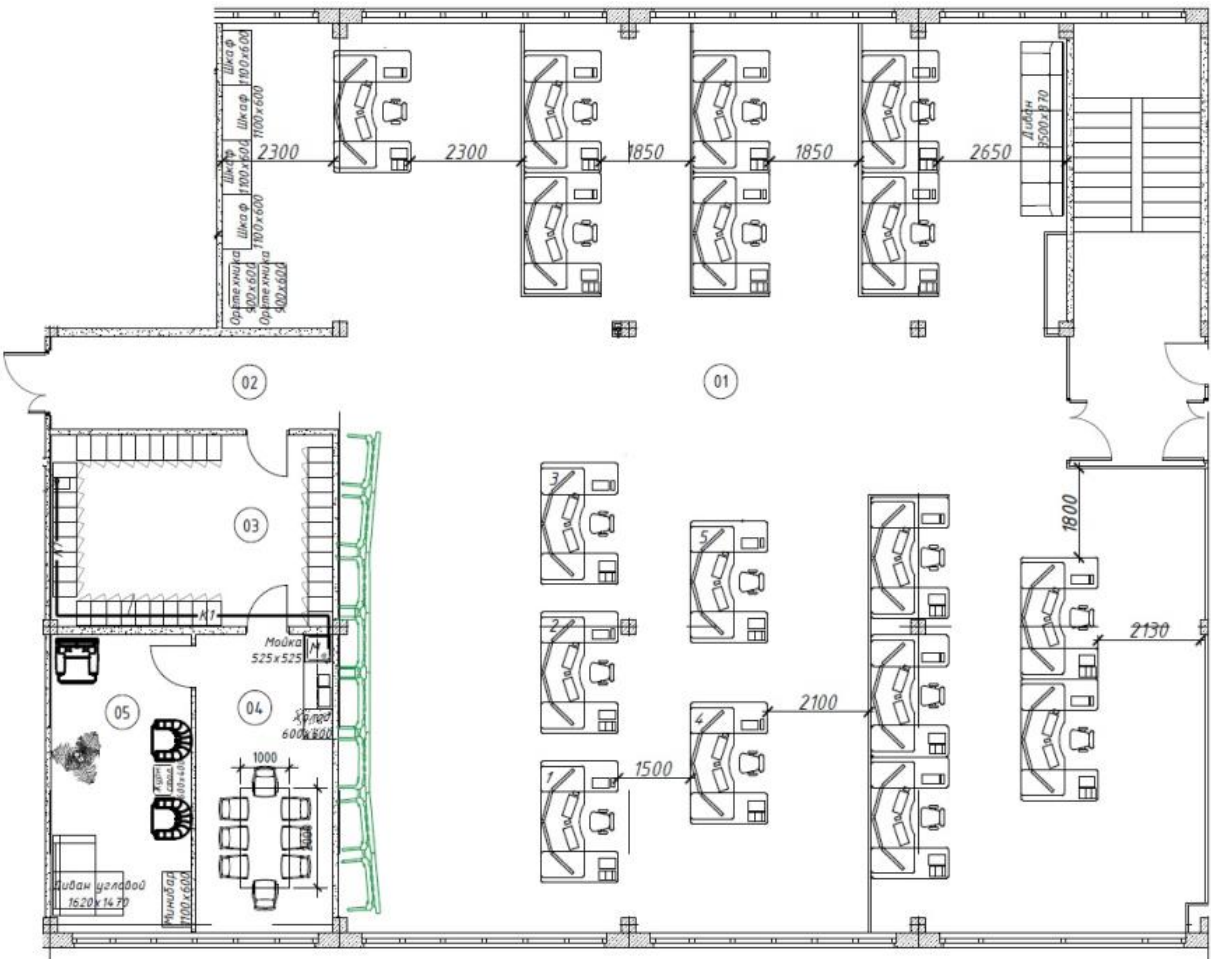
Состоит из следующих функциональных блоков :

- блок настраиваемой валидации входных данных,
- блок консолидации данных,
- блок обеспечения информационной взаимосвязи,
- блок имитации, блок
- анализа и принятия решений

Методика управления сетевой структурой компонентов интеллектуальной ЭЭС с применением взаимодействующих цифровых двойников



Практическая применение: Методика управления микроклиматом умного дома с использования ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей



План помещения
многофункционального учебного
компьютерного класса в
университете:

- 1 – многофункциональная аудитория,
- 2 – коридор,
- 3 – гардеробная,
- 4 – комната приема пищи,
- 5 – комната психологической разгрузки

Практическая применение: Методика управления микроклиматом умного дома с использованием ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей



Структурная схема взаимодействия компонентов полиструктуры умного дома. Типы взаимодействия :

- энергия/энергия
- энергия/информация
- информация/энергия
- информация/информация

Структурная схема взаимодействующих цифровых двойников компонентов микроклимата умного дома

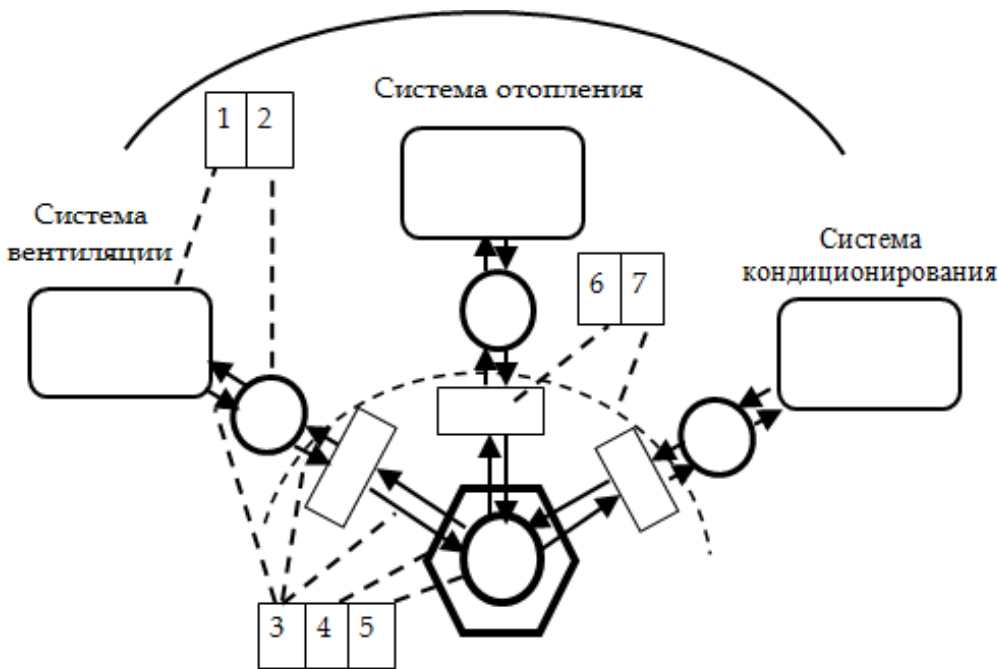
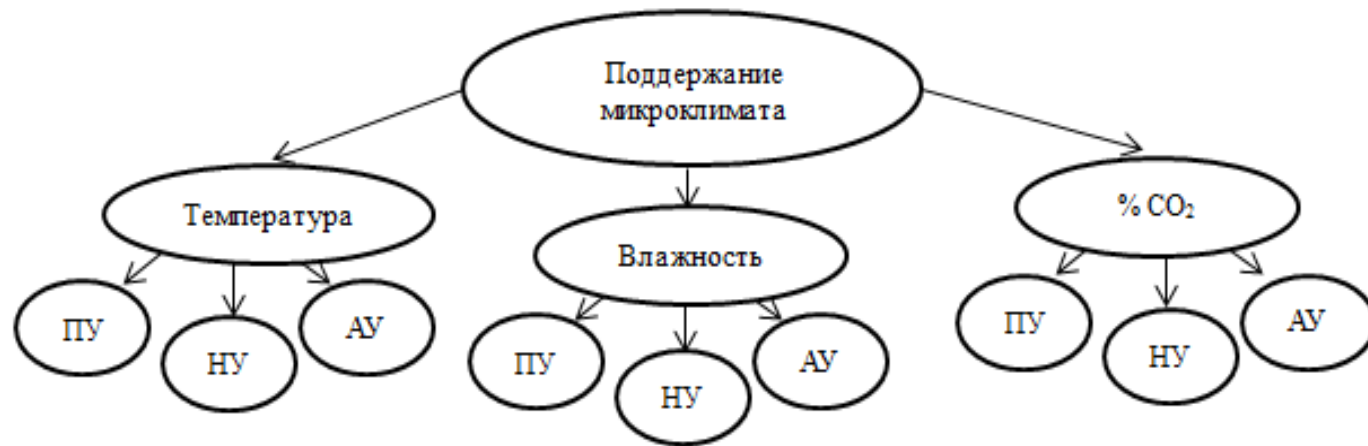


Схема взаимодействия цифровых двойников устройств микроклимата умного дома

- 1 - устройства микроклимат,
- 2 – IoT датчики физической среды и регуляторы состояния физических устройств,
- 3- двунаправленные связи типа энергия – информация, информация-энергия, информация-информация,
- 4- единый информационный центр согласования режимов работы устройств,
- 5- блок управления режимами работы киберфизических устройств,
- 6 – блок фильтрации входной информации,
- 7 – граница физической и виртуальной среды

Дерево целей системы управления микроклиматом умного дома



Дерево целей микроклимата многофункционального компьютерного класса, где ПУ-предупредительный уровень, НУ - нормативный уровень, АУ - аварийный уровень параметров физической среды помещения

Разработка алгоритма управления микроклиматом умного дома на основе нечетких искусственных нейронных сетей

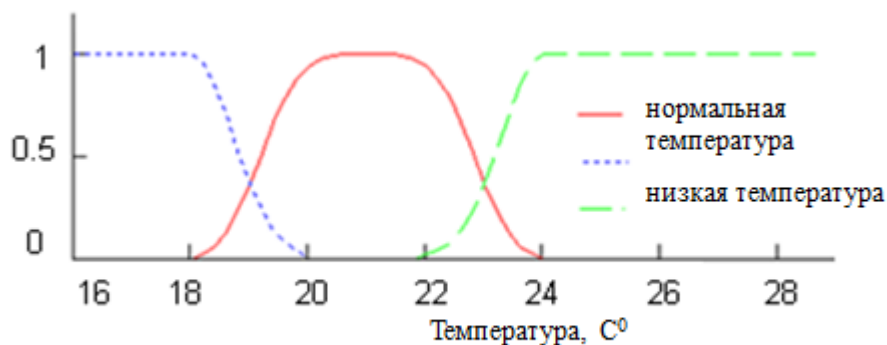


Рис. 5. Нечеткие множества для температуры в помещении

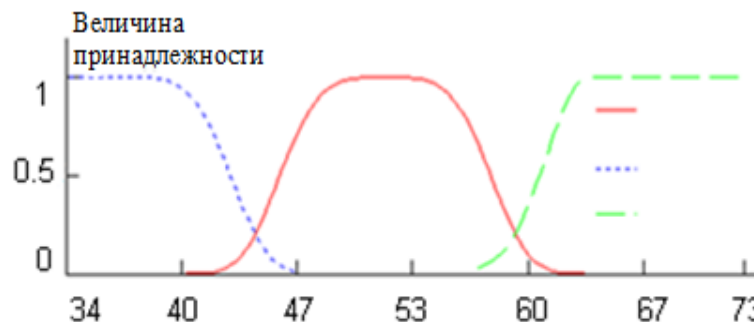


Рис. 6. Нечеткие множества для влажности воздуха в помещении

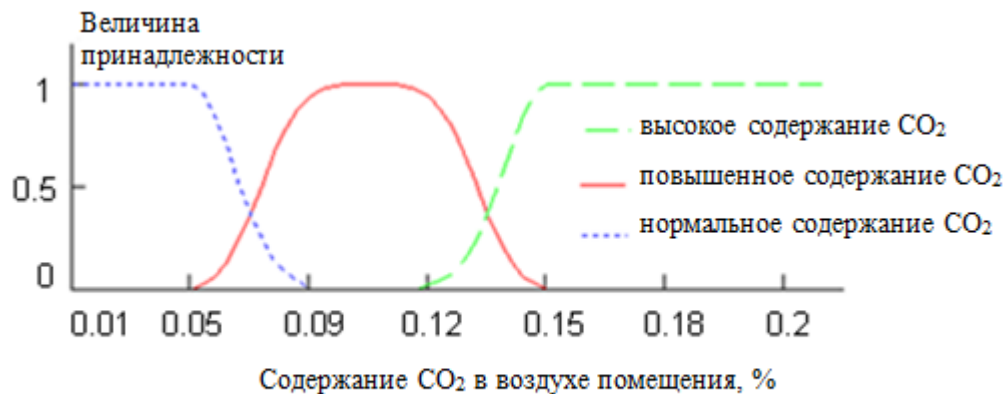
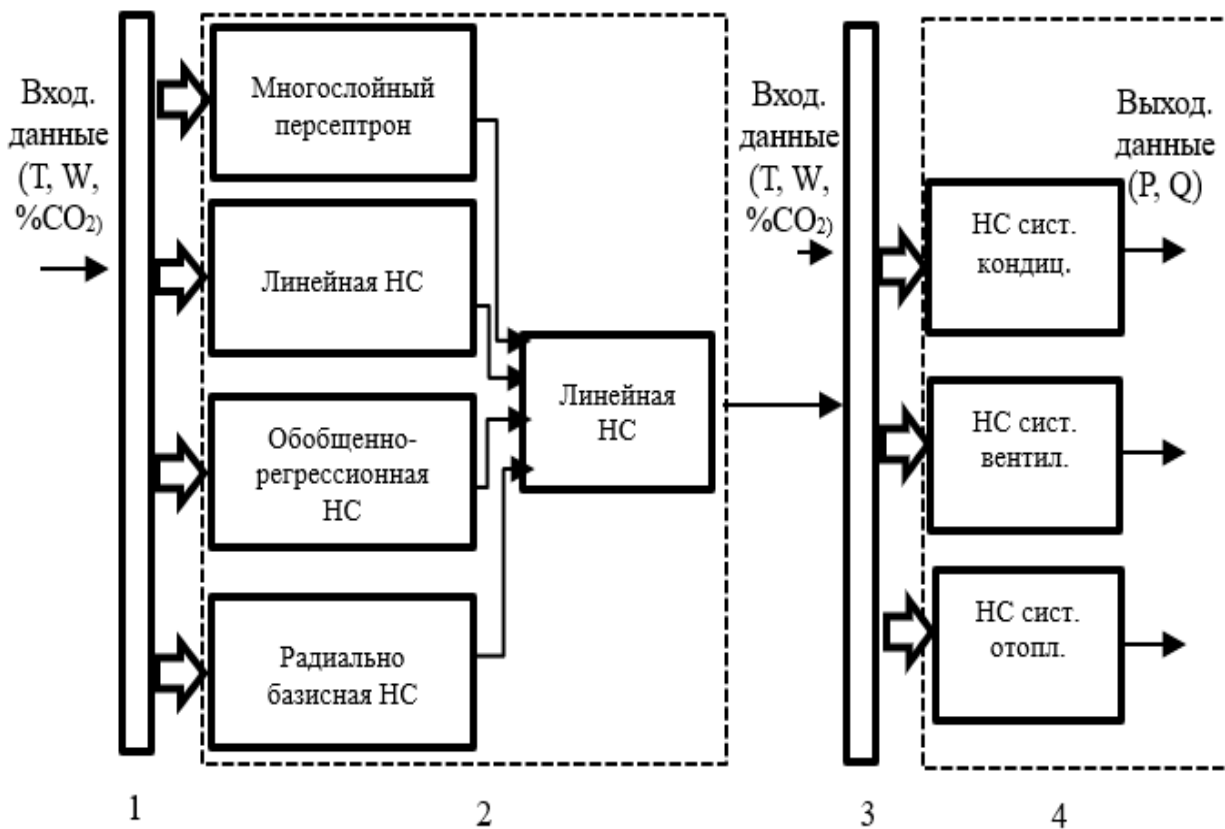


Рис. 7. Нечеткие множества по содержанию CO₂ в воздухе помещения

Формирование принадлежности входных данных к группе нечетких множеств по температуре, влажности и CO₂

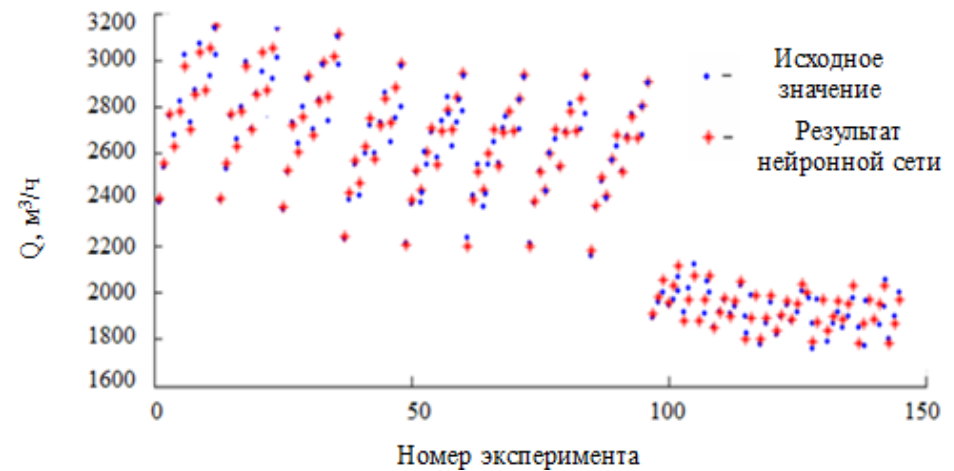
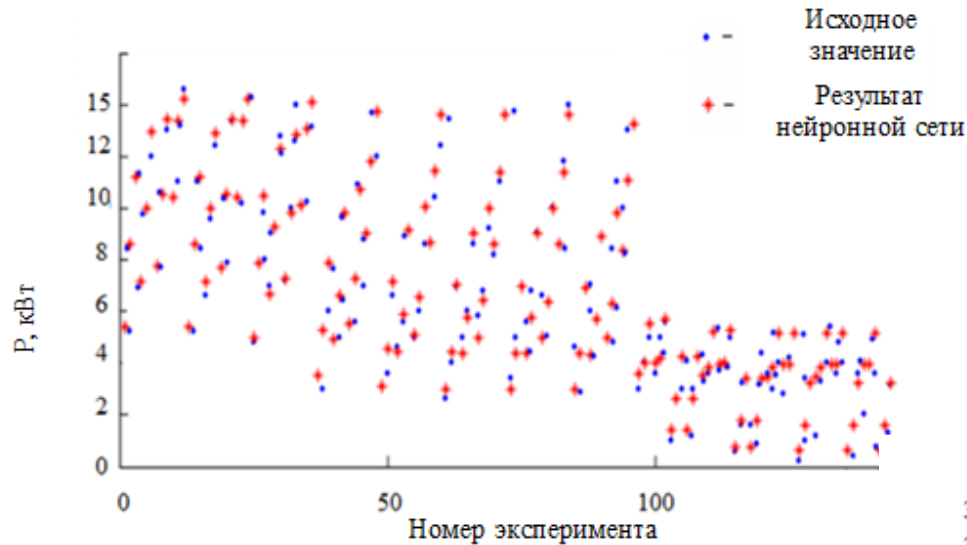
Алгоритм управления микроклиматом умного дома с использованием ансамбля искусственных нейронных сетей



Структурная схема алгоритма управления микроклиматом умного дома с использованием ансамбля нейронных сетей:

- 1 – блок консолидации данных о состоянии физической среды,
- 2 – блок прогнозирования состояния физической среды,
- 3 – блок обеспечения информационного взаимодействия киберфизических устройств,
- 4 – блок имитации режимов работы и выработки предиктивного управления устройствами климат-контроля

Оценка качества работы нейронной сети для управления режимами работы системы кондиционирования умного дома



Результат испытаний системы управления микроклиматом умного дома

▶ по параметрам P – энергопроизводительность и Q – расход воздуха

Схема интеграции компонентов управления умного дома в единое информационное пространство

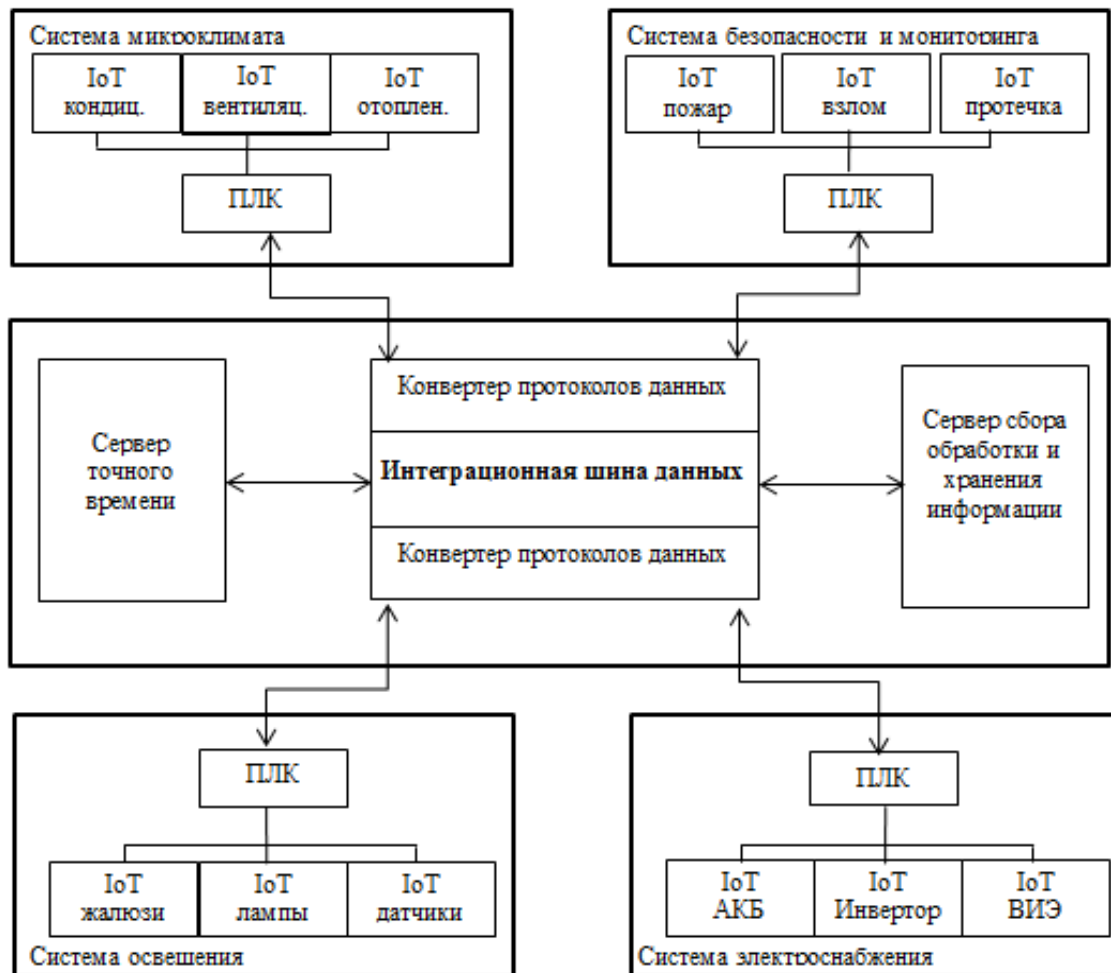
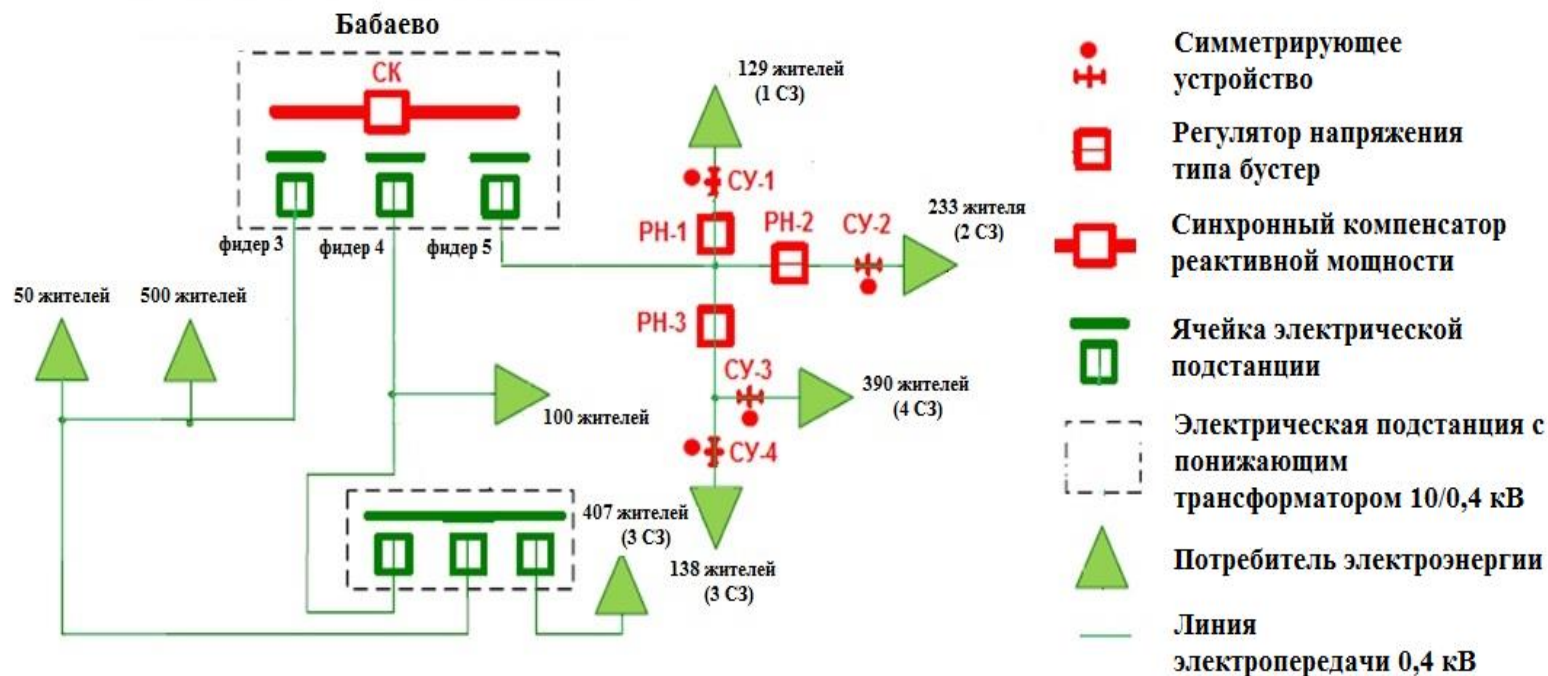


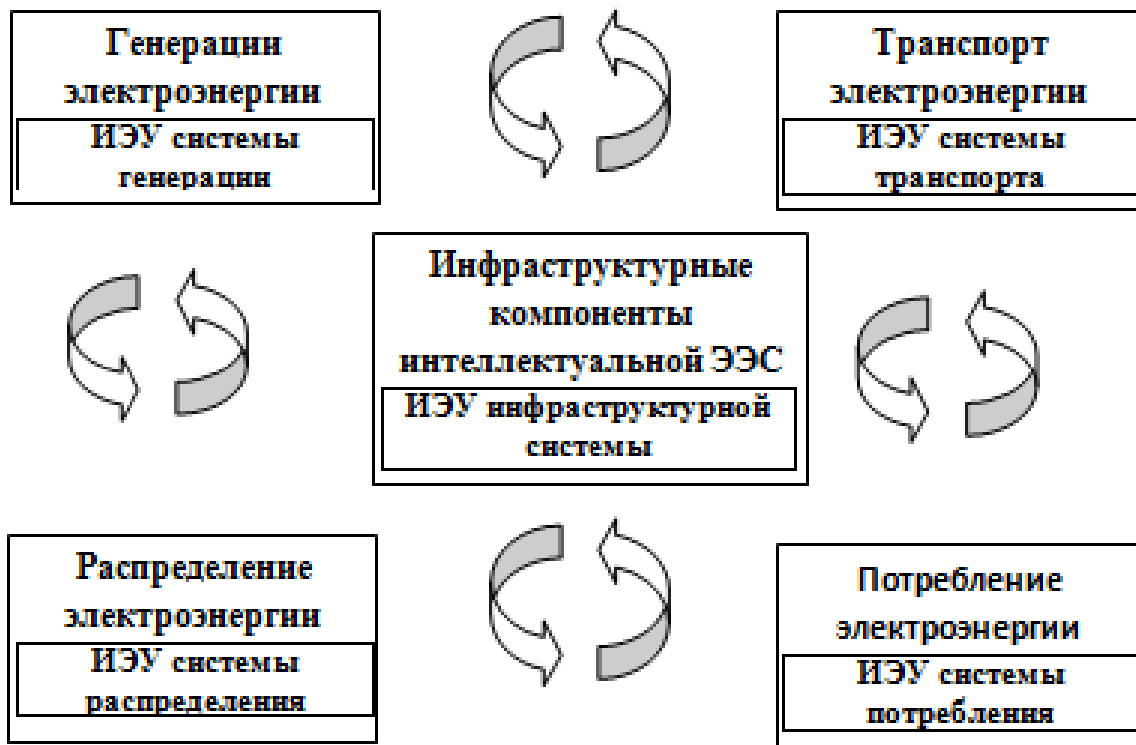
Схема интеграции компонентов управления умного дома в единое информационное пространство
ПЛК-программируемый логический контроллер,
АКБ – аккумуляторная батарея,
ВИЭ – возобновляемый источник энергии,
IoT – устройства с сетевыми интерфейсами взаимодействия (интернет вещей)

Практическая применение: Методика управления компонентами ЭЭС при обеспечении качества потребляемой электроэнергии с использования ансамбля искусственных нейронных сетей



Однолинейная схема участка электрической сети с интеллектуальными электронными устройствами, где СУ – симметрирующее устройство; РН – регулятор напряжения типа бустер; СК – синхронный компенсатор реактивной мощности; СЗ – социально-значимый объект электроснабжения

Практическая применение: Методика управления компонентами ЭЭС при обеспечении качества потребляемой электроэнергии с использования ансамбля искусственных нейронных сетей



Структурная схема взаимодействия компонентов полиструктуры ЭЭС. Типы взаимодействия :

- энергия/энергия
- энергия/информация
- информация/энергия
- информация/информация

Структурная схема взаимодействующих цифровых двойников компонентов ЭЭС

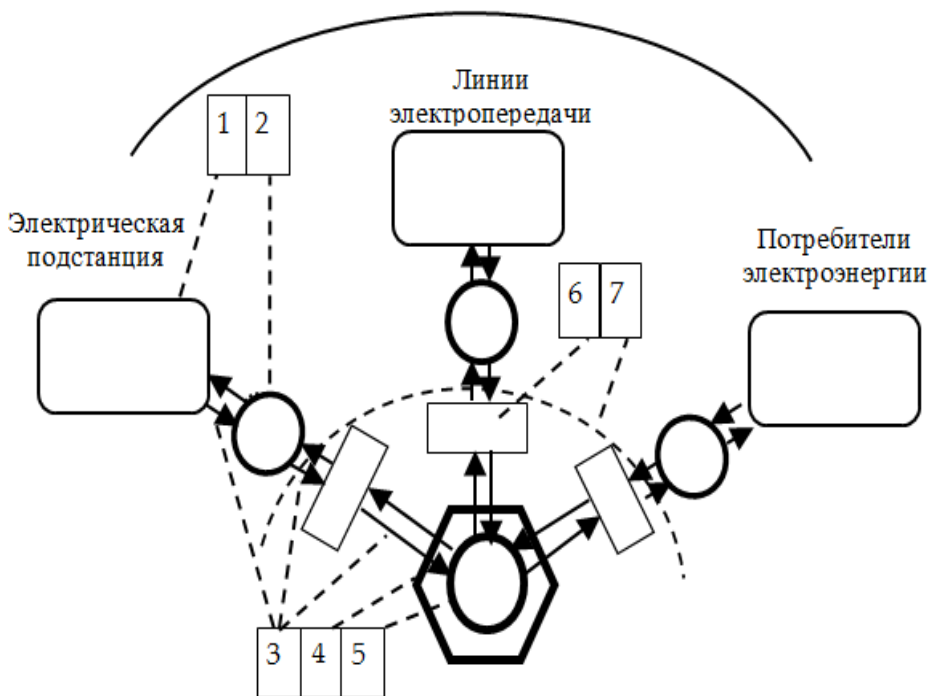
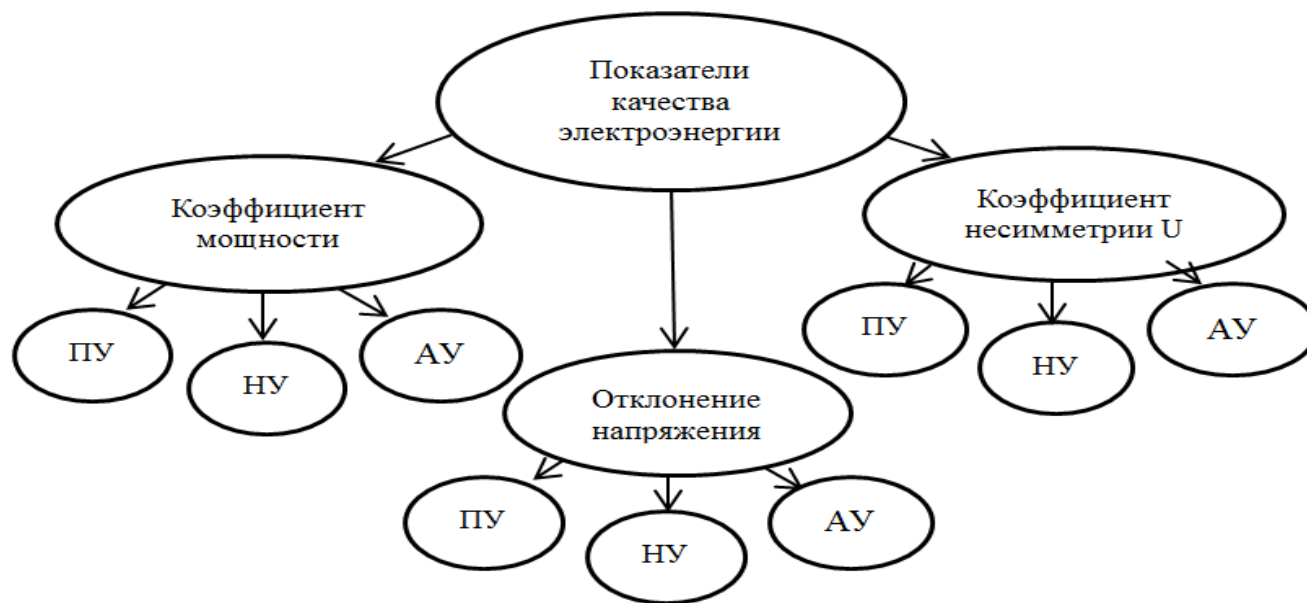


Схема взаимодействия цифровых двойников устройств контроля и управления качеством электроэнергии в сети:

- 1 – компоненты электроэнергетической системы с интеллектуальными электронными устройствами,
- 2 – цифровые измерители показателей качества электроэнергии в сети,
- 3 – двунаправленные связи типов «энергия–информация», «информация–энергия», «информация–информация»,
- 4 – единый информационный центр согласования режимов работы устройств;
- 5 – блок управления режимами работы киберфизических устройств,
- 6 – блок фильтрации входной информации,
- 7 – граница физической и виртуальной сред

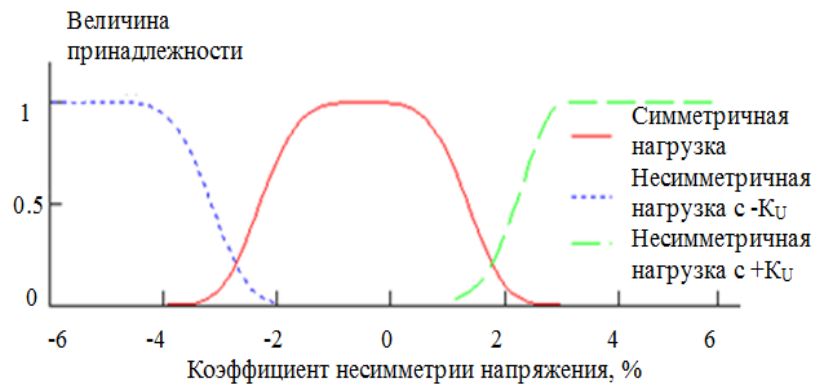
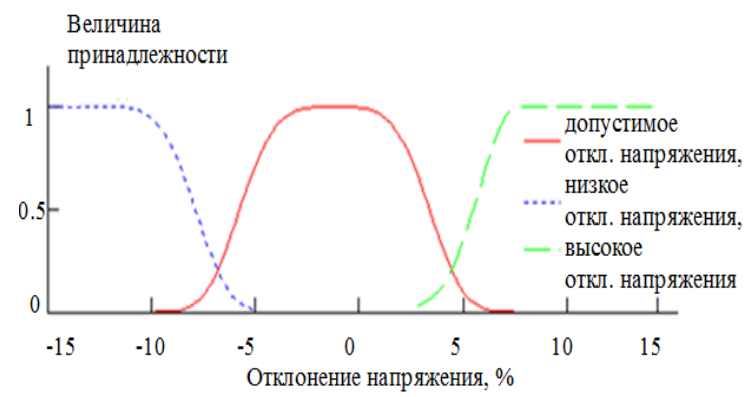
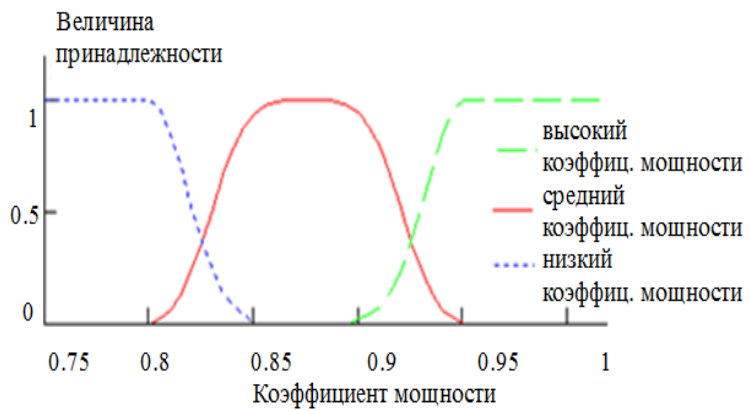
Дерево целей системы управления микроклиматом умного дома



Дерево целей показателей качества электроэнергии в сети:

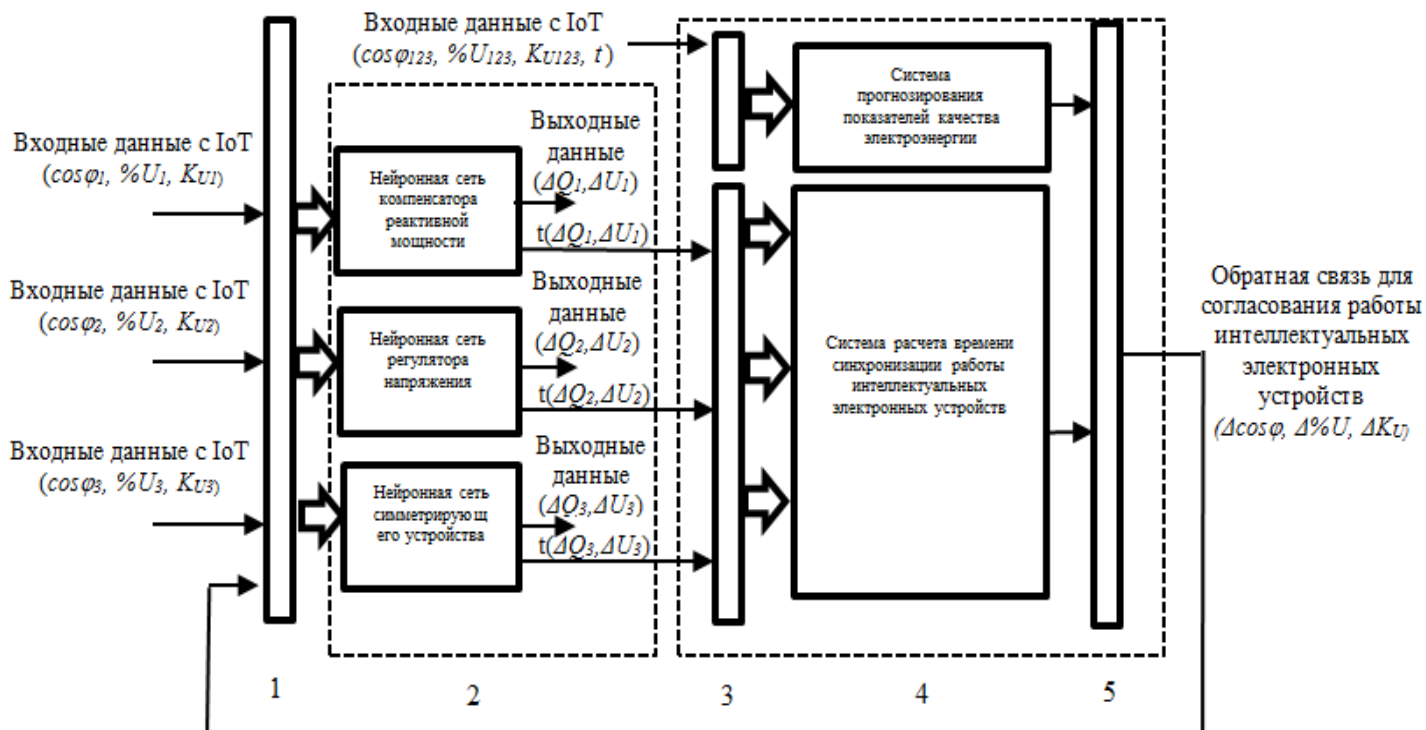
ПУ – предупредительный уровень; НУ – нормативный уровень; АУ – аварийный уровень значений показателей качества электроэнергии в сети

Разработка алгоритма управления показателями качества электроэнергии на основе нечетких искусственных нейронных сетей



Нечеткие множества для коэффициента мощности (a), отклонения напряжения (b) и коэффициента несимметрии напряжения (c) в сети (величина принадлежности является безразмерной величиной)

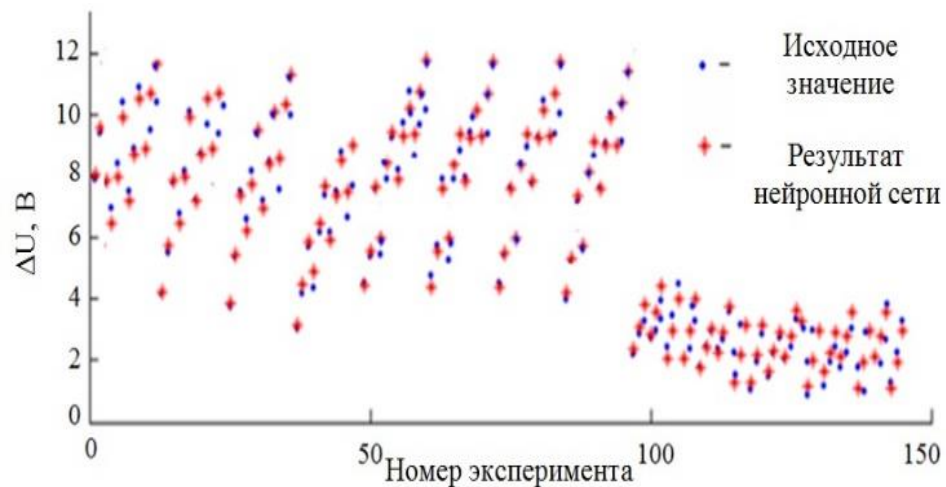
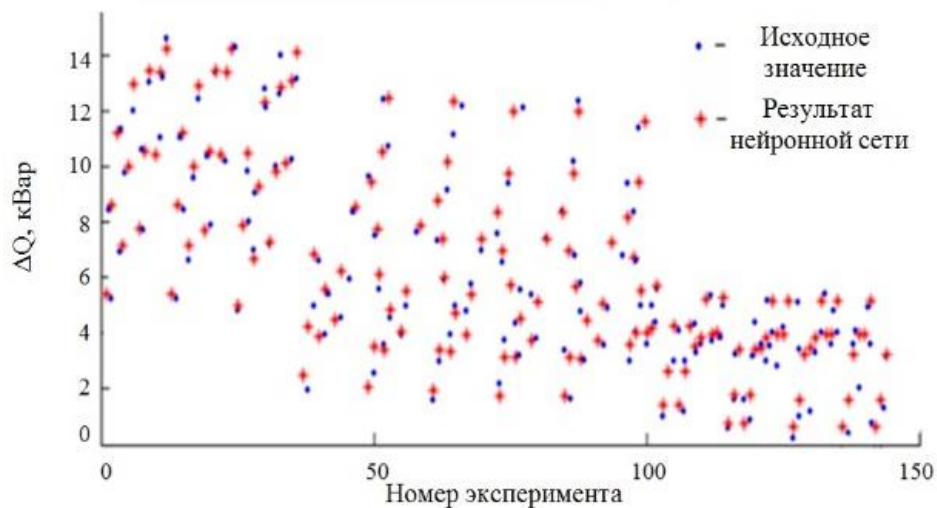
Структурная схема системы управления показателями качества электроэнергии в сети с использованием ансамбля нейронных сетей



Структурная схема алгоритма управления показателями качества электроэнергии в сети с использованием ансамбля нейронных сетей.

- ▶ t – метка времени входных и выходных данных

Оценка качества работы нейронной сети для управления режимами работы синхронного компенсатора реактивной мощности



Результаты испытаний величин компенсаций:
реактивной мощности (a) и отклонения напряжения (b)



Результаты работы

1. ЭЭС рассмотрена как полиструктурная система, состоящая из компонентов информационно связанных между собой и внешними системами. Даны базовые понятия полиструктуры ЭЭС, системы её показателей, метрической системы, а также тела полиструктуры. Выделены компоненты полиструктуры ЭЭС, участвующие в информационном взаимодействии в соответствии с регламентами технологических процессов: подсистема генерации электроэнергии, подсистема транспорта электроэнергии, подсистема распределения электроэнергии, подсистема потребления электроэнергии, подсистема инфраструктуры (включающая устройства, связи, управления, обеспечения безопасности и мониторинга компонентов ЭЭС). Полиструктура ЭЭС является открытой и позволяет добавлять в нее новые элементы для обеспечения высокой надежности, бесперебойности и гарантированности электроснабжения потребителей, а также снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии. Разработана структурная схема информационного взаимодействия компонентов полиструктуры ЭЭС.
2. Определены характеристики и параметры цифрового двойника, создающие потенциальные преимущества его применения при использовании программно-ориентированного подхода к проектированию, реализации и эксплуатации производственных систем и процессов. Представлены варианты технической реализации концепции цифровых двойников для производственных систем с применением цифровых технологий и интеллектуальных электронных устройств. Также проанализирована применимость технологии цифровых двойников на разных этапах жизненного цикла производственных систем. Систематизированы преимущества и недостатки создания производственных систем с применением концепции цифровых двойников.

Результаты работы

3. Для выработки управляющих воздействий на компоненты ЭЭС предложена сетевая структура цифровых моделей взаимодействующих по средствам коллинеарных связей. Особенность предложенной концепции управления состоит в экономии ресурса самих компонентов, за счет моделирования процесса управления в пространстве цифровых моделей полиструктурной системы ЭЭС. Реализацию управления компонентами ЭЭС предложено осуществить с применением технологии цифровых двойников, как эффективного способа киберфизического взаимодействия.
4. Разработана методика поиска согласованных результатов работы киберфизических устройств, которая реализуется в итерационном алгоритме установления их режимов работы для поддержания выходные параметры физической среды. Алгоритм реализован на примере управления устройствами климат-контроля умного дома и управления показателями качества электроэнергии в сети. В обоих случаях алгоритм управления осуществляет прогнозирование состояния физической среды при помощи ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей.
5. Проведен анализ методов интеллектуальной обработки данных поступающих с сетевых устройств для решения задачи предиктивного управления устройствами климат-контроля умного дома (устройствами контроля качества электроэнергии), обеспечивающих комфортное состояние в местах длительного пребывания человека при минимальном ресурсопотреблении. Для достижения оптимизации процессов управления микроклиматом (качеством электроэнергии) жилого пространства человека рекомендовано использования аппарата нечетких искусственных нейронных сетей, а для прогнозирования состояния физической среды умного дома (ЭЭС) - ансамблей нейронных сетей. В первом случае достигается гибкость и быстроедействие системы управления, во втором случае универсальность и лучшее качество прогнозирование физической среды.

Результаты работы

6. Предлагаемая система управления микроклиматом в помещениях умного дома (управления качеством электроэнергии в сети) имеет ряд практических преимуществ, в сравнении с существующими узкоспециализированными решениями по локальной автоматизации. Во-первых, блок консолидации данных позволяет решить проблему массовой генерации данных, возникающей при некорректной работе цифровых датчиков и регуляторов умного дома посредством фильтрации входных данных и агрегации групп параметров. Во-вторых, блок информационного взаимодействия киберфизических устройств обеспечивает связь между устройствами климат-контроля (контроля качества электроэнергии), а также решает проблему установления скрытых взаимосвязей между их данными, путем поиска двунаправленных связей внутри компонентов и между ними. В-третьих, блок прогнозирования состояния физической среды и блок имитации режимов работы устройств климат-контроля (устройств контроля качества электроэнергии) позволяют осуществлять предиктивное управление с целью формирования рациональных режимов работы устройств при минимальных затратах времени и энергии.
7. Перечисленные технические преимущества системы управления микроклиматом умного дома (системы управления качеством электроэнергии в сети) на основе взаимодействующих киберфизических устройств экономят время и пропускную способность информационной сети, при этом уменьшается нагрузка на сервер управления, а значит и стоимость реализации системы. Использование итерационного процесса принятия управленческого решения в цифровой среде позволяет избежать ситуаций избыточного расхода энергии устройствами климат-контроля умного дома (устройствами контроля качества электроэнергии) при их совместной работе

Спасибо за внимание!

