

А.Е. Мозохин

## МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМФОРТНОГО СОСТОЯНИЯ МИКРОКЛИМАТА УМНОГО ДОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЯ НЕЧЕТКИХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Мозохин А.Е. Методика обеспечения комфортного состояния микроклимата умного дома с использованием ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей.*

**Аннотация.** Анализ применения технологии умный дом указывает на недостаточный уровень управляемости его инфраструктурой, что приводит к избыточному потреблению энергетических и информационных ресурсов. Проблема управления цифровой инфраструктурой жилого пространства человека, связана с большим числом узкоспециализированных решений по домашней автоматизации, которые усложняют процесс управления. Умный дом рассматривается как множество независимых киберфизических устройств направленных на достижение своей цели. Для согласованной работы киберфизических устройств предлагается обеспечивать их совместную работу через единый информационный центр. Моделирование режимов работы устройств в цифровой среде сохраняет ресурс физических устройств, производя виртуальный расчет для всевозможных вариантов взаимодействия устройств между собой и физической средой. Разработана методика управления микроклиматом умного дома с применением ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей, на примере совместного использования кондиционера, вентиляции и отопления. 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. Предложен вариант практической реализации системы управления микроклиматом умного дома на примере многофункционального учебного компьютерного класса. Разработаны гибридные нейронные сети систем кондиционирования, вентиляции и отопления. Произведено тестирование работы системы управления микроклиматом многофункциональной аудитории университета с применением гибридных нейронных сетей, в качестве устройства управления использован программируемый логический контроллер отечественного производства. Целью управления на основе взаимодействующих киберфизических устройств является достижения минимума используемой мощности и информационного трафика при их совместной работе.

**Ключевые слова:** умный дом, ансамбль искусственных нейронных сетей, система климат-контроля, система управления, киберфизические устройства.

**1. Введение.** В настоящее время технология умный дом рассматривается разработчиками с позиции её взаимодействия со смежными быстро развивающимися технологиями, такими как умный город, умная сеть. Технология умный дом в работах [1-3] рассматривается исключительно как связующее звено между потребителем услуг и сервисами, находящимися за пределами самого дома. Однако, комфорт потребителей и эффективность функционирования интегрированных интеллектуальных устройств жилого пространства человека определя-

ется не только их взаимосвязью с внешними системами и сервисами, а главным образом энергетическими и информационными взаимодействиями между компонентами жилого пространства [4, 5].

По потенциалу развития жилое пространство человека не уступает сложным системам промышленных предприятий и организаций. С ростом числа цифровых технологий и их распространением жилое пространство становится настоящим полигоном для тестирования современных киберфизических систем [6, 7]. Поэтому возникает потребность в создании новых решений для обеспечения энергоэффективности зданий, офисов, социально-значимых объектов (школ, больниц, университетов), где человек находится большую часть времени, чтобы сделать пребывание в них комфортным, используя современные технологии [8].

Актуальной проблемой применения технологии умный дом является значительный поток данных с инфраструктурных систем жизнеобеспечения, который приводит к завышению требований к вычислительным ресурсам и сложности оперативной обработки информации. Также проблемой является завышенный расход энергоресурсов компонентами систем умного дома, связанный с несогласованностью режимов работы устройств, в процессе их функционирования. Так совместная работа систем отопления, вентиляции, кондиционирования приводит к росту энергопотребления при их несогласованной работе на достижении цели поддержания микроклимата жилого пространства [9].

Основная причина, снижающая эффективность совместного функционирования устройств климат-контроля в помещениях умного дома, является наличие иерархических систем управления направленных на выполнения частных задач. Это приводит к противоречиям в совместной работе устройств кондиционирования, вентиляции и отопления воздуха, и создает условия для конфликтов между рассредоточенными системами управления при распределении и потреблении ресурсов на этапах технологических процессов в жилых помещениях умного дома [10, 11].

Цифровизация жилого пространства человека позволяет достичь требуемого уровня управляемости и наблюдаемости системами жизнеобеспечения путем внедрения технологий интернета вещей, интеллектуального учета и накопления электроэнергии. Однако, попытки интеграции данных с цифровых устройств умного дома в единую информационную систему приводят к сложностям, связанным с отсутствием единого стандарта информационного обмена между информационными системами разных производителей, несогласованной работой си-

стем жизнеобеспечения зданий и сооружений, генерацией избыточно-го информационного трафика в сеть и ряд других факторов [12, 13].

Ранее в работе [14] была подробно рассмотрена методология формирования информационного пространства и киберфизических устройств умного дома, а в исследовании [15] предложена концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации. Согласно данной концепции любая интеллектуальная система должна имеет общий центр согласования целевых ориентиров входящих в ее состав подсистем, для мониторинга и распределения используемых ресурсов, а также оценки достигаемых синергетических эффектов. При этом виды взаимодействия систем и их составных элементов должны быть подчинены технологическим и организационным правилам функционирования отдельных ее элементов. В развитии теории и практики создания методов управления сложными системами, требуется исследовать методы анализа и обработки данных сетевых устройств для решения задачи предиктивного управления компонентами сложных систем, обеспечивающих комфортное состояния в местах длительного пребывания человека при минимальном ресурсопотреблении, на примере системы климат-контроля умного дома.

**2. Постановка задачи исследования.** Будем исходить из предположения, что энергетическое и информационное пространства умного дома являются сложной системой и относятся к классу система систем. В качестве объекта исследования рассмотрим помещение многофункционального учебного компьютерного класса в университете, который предназначен для непрерывного нахождения в нем студентов и преподавателей в количестве не более 30 человек. Само помещение состоит из многофункциональной аудитории, гардеробной, комнаты приема пищи и комнаты психологической разгрузки. План помещения представлен на рисунке 1.

При проектировании многофункциональной аудитории не было предусмотрено автоматическое регулирование параметров воздуха в помещении. Конструктивно устройства могут регулировать параметры температуры, влажности, скорости воздушного потока, чистоту воздуха и содержание в нем углекислого газа.

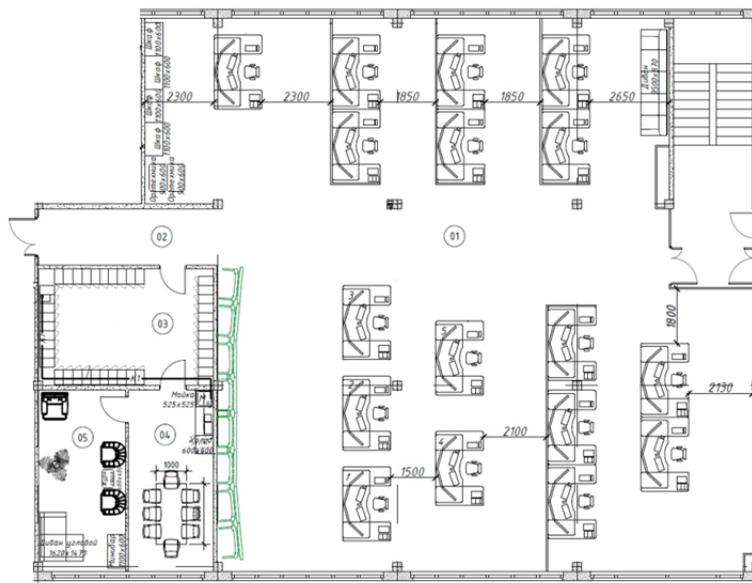


Рис. 1. План помещения многофункционального учебного компьютерного класса в университете, где 1 – многофункциональная аудитория, 2 – коридор, 3 – гардеробная, 4 – комната приема пищи, 5 – комната психологической разгрузки

Однако отсутствие единого информационного центра согласования режимов работы устройств климат-контроля для поддержания качественных и количественных показателей воздуха в помещении является проблемой. Отсутствие системы регулирования параметров физической среды делает пребывание людей в помещении дискомфортным, вызывает у них замедленную реакцию и повышенную усталость, а также приводит к неэффективному расходованию электроэнергии на поддержания микроклимата помещения.

Для решения проблемы неоптимального управления и создания комфортных условий пребывания людей в многофункциональной аудитории, была проведена экспертиза помещения, включающая следующие этапы:

- анализ и структурирование данных о значениях показателей физической среды в помещении на текущий момент времени, динамика их развития за заданный интервал времени и некоторый ретроспективный анализ последствий не устранения проблемной ситуации.
- ранжирование показателей физической среды по степени их влияния на развитие ситуации в будущем.

- формирование набора действий - альтернатив, которые могут привести к устранению проблемной ситуации.

- выбор программных и технических способов реализации системы управления для входного контроля показателей физической среды и выходного управления параметрами исполнительных механизмов устройств воздействия.

Отсортированные, обработанные и усредненные данные поступают в центр принятия решений, где из возможных альтернатив выбираются те, что удовлетворяют целям системы управления микроклимата. Центр принятия решения вырабатывает управленческие воздействия для регулирования параметров физической среды. Современные устройства климат-контроля позволяют регулировать параметры температуры, влажности и содержание углекислого газа в воздухе, а значит необходимо разработать универсальную методику управления микроклиматом умного дома, для различных типов устройств и их функциональных возможностей.

Целью управления системой микроклимата умного дома считается поддержание комфортных условий пребывания людей в жилом пространстве, в соответствии со всеми нормами и правилами охраны труда, при минимальном энергопотреблении и времени выхода на требуемые параметры физической среды в помещениях. Особенностью реализации на практике данной цели будет являться применение киберфизических устройств, взаимодействующих в единой цифровой среде.

**3. Дерево целей системы микроклимата умного дома.** Собранная первичная информация о состоянии физической среды умного дома была использована для формирования дерева целей системы микроклимата многофункциональной аудитории, которое представлено на рисунке 2. Первый уровень дерева целей - это поддержание комфортного для человека состояния физической среды помещения. Второй уровень дерева целей состоит из трех ветвей включающих поддержание температурного и влажностного режима, а также содержания  $\text{CO}_2$  в воздухе помещения. Третий уровень дерева целей состоит из ряда показателей температуры, влажности и содержания  $\text{CO}_2$ , включая их нормативные, предупредительные и аварийные пределы. Многоуровневое представление дерева целей способствует решению оперативных, тактических и стратегических задач системы микроклимата помещения и обеспечивает согласованное управление устройствами кондиционирования, вентиляции и отопления.



Рис. 2. Дерево целей микроклимата многофункциональной аудитории, где ПУ - предупредительный уровень, НУ - нормативный уровень, АУ - аварийный уровень параметров физической среды помещения

Система управления микроклиматом умного дома должна принимать, обрабатывать и накапливать информацию для выработки оперативных, тактических и стратегических решений. Поэтому сформированному дереву целей должна соответствовать интегрированная информационная система, выполняющая функции:

- принимает информацию с датчиков температуры, влажности и содержания  $\text{CO}_2$  в воздухе помещения по проводным и беспроводным каналам связи;
- обрабатывает поступающую информацию на предмет достоверности или избыточности;
- контролирует соответствие текущих параметров физической среды нормативным, предупредительным и аварийным пределам;
- накапливает информацию о параметрах физической среды, обработанных значений за день, за неделю, за месяц. В первом случае, данные нужны для принятия оперативных решений в части функционирования устройств климат-контроля. Во втором случае, для принятия тактических решений связанных с необходимостью перенастройки системы, расчета её энергоэффективности. В третьем случае, для проактивного управления в части модернизации системы микроклимата.

**4. Разработка алгоритма управления системой кондиционирования на основе нечетких искусственных нейронных сетей.** Существующие на данный момент регрессионные модели для описания процесса поддержания микроклимата в помещениях, не охватывают всех имеющихся зависимостей в рабочем диапазоне характеристик физической среды и режимов работы оборудования разного функционального и конструктивного исполнения [16, 17]. Наиболее перспективным направлением в области выработки предиктивного управляющего воздействия на сегодняшний день является использование математического аппарата нечетких искусственных нейронных сетей [18,

19]. Это объясняется тем, что особенностью сложных систем является наличие большого числа факторов, которые влияют на исследуемый показатель, а также ограниченного объема наблюдений данных факторов, используемых при построении модели [20]. Также, в некоторых случаях эти факторы имеют качественный характер и не могут быть измерены при помощи метрических шкал [21]. В условиях слабой математической формализации процессов, протекающих в сложных системах, и ограниченного объема статистических данных возрастает роль экспертной информации, используемой в процессе моделирования [22]. Данные обстоятельства снижают эффективность применения известных вариантов интеллектуальной обработки данных и указывают на необходимость использования в процессе построения моделей аппарата нечетких искусственных нейронных сетей.

Выбор данного аппарата интеллектуальной обработки данных не случаен, так нечеткие алгоритмы позволяют успешно решать задачи, в которых исходные данные являются ненадежными и слабо формализованными. При этом информационные системы, основанные на применении аппарата нечеткой логики, являются универсальными аппроксиматорами [23]. При реализации алгоритмов управления на основе нечетких искусственных нейронных сетей необходимо учитывать свойственные алгоритмам нечеткого логического вывода недостатки, связанные с субъективностью выбора вида и параметров функций принадлежности, а также исходного набора нечетких продукционных правил. Для устранения указанных недостатков нечетких систем возможно обеспечить их адаптивность, корректируя по мере построения модели на основе реальных статистических данных правила и параметры функций принадлежности. Один из вариантов такой адаптации реализуется при построении гибридных нейронных сетей [24].

Далее подробно рассматривается разработка нейронной сети для кондиционера. Структурная схема гибридной нейронной сети представлена на рис. 3. Данная сеть использует алгоритм Сугэно (Sugeno) 1-го порядка, в этом случае правила описываются линейными зависимостями [25, 26]. В ходе исследования были проведены вычисления в среде Scilab с использованием программного пакета Fuzzy Logic. В качестве нейронной сети для обработки параметров температуры, влажности и содержания углекислого газа в воздухе помещения использовался многослойный перцептрон с одним скрытым слоем [27].

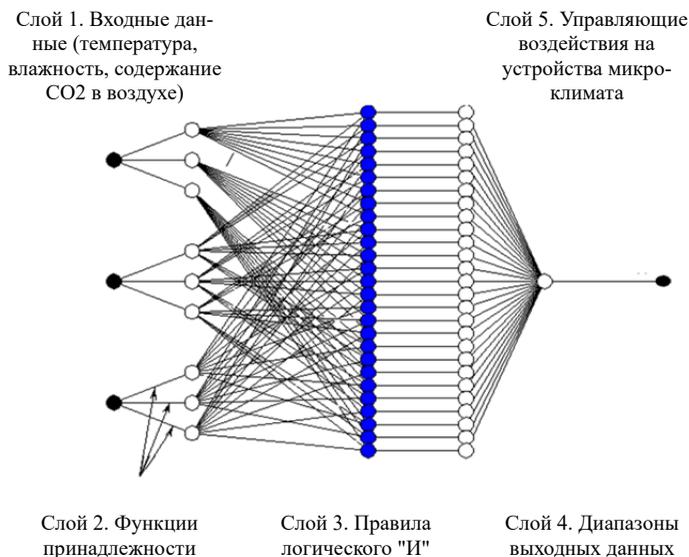


Рис. 3. Структура нейронной сети для управления микроклиматом умного дома

Из рисунка 3 видно, что гибридная нейронная сеть состоит из 5-ти слоев, каждый из которых решает конкретную задачу. Результатом работы нейронной сети являются формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы устройств микроклимата умного дома: кондиционера, вентиляции и радиаторов отопления.

**4.1. Создание первичного набора данных для нейронной сети.** На первый слой поступает информация о температуре, влажности и содержании углекислого газа в воздухе, измеренные IoT-датчиками в разных частях помещения. В момент обучения нейронной сети исходные данные берутся из обучающей выборки, далее сеть обрабатывает данные о характеристиках физической среды, полученные в режиме реального времени. Измеренные значения ( $T$ ,  $W$  и  $CO_2$ ) передаются на второй слой сети, где происходит этап формирования принадлежности к группе нечетких множеств.

Для формирования первичного набора данных использовались результаты экспериментальных исследований, проведенных в рамках данного помещения и подобных помещений, оснащенных системами климат-контроля, труды по микроклимату замкнутых помещений, а также рекомендации экспертов по работе систем микроклимата. Первичные данные делятся по группам в соответствии с их свойствами.

**4.2. Формирование принадлежности входных данных к группе нечетких множеств.** Функции принадлежности определяют соответствия между входными данными и нечеткими множествами. На рис. 4 видно, что входные данные относятся к одной из 27 групп, из области значений входных векторов.

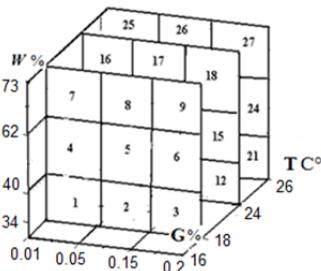


Рис. 4. Определение принадлежности входных данных, где  $T$  – значение температуры,  $W$  – значение влажности и  $G$  – содержание углекислого газа в воздухе помещения

Функции, определяющие принадлежность по температуре и влажности окружающей среды к одному из трех нечетких множеств, представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

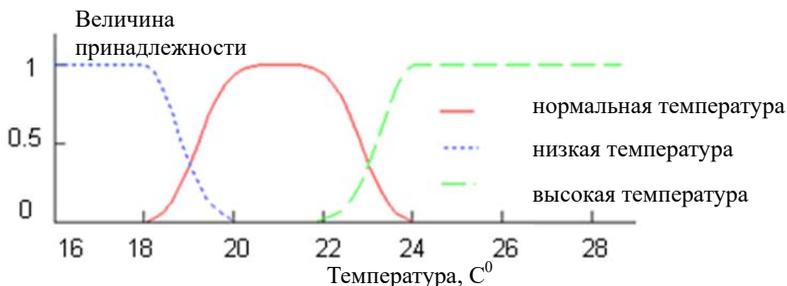


Рис. 5. Нечеткие множества для температуры в помещении

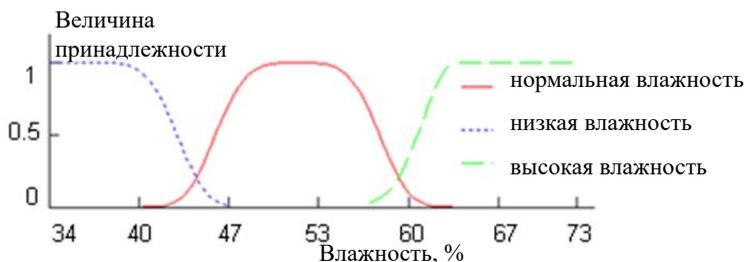


Рис. 6. Нечеткие множества для влажности воздуха в помещении

Нечеткие множества по температуре и влажности, представленные на рис. 5 и 6, сформированы на основании рекомендаций СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [28]. В соответствии с рекомендациями, значение температуры воздуха в учебной аудитории должно находиться в пределах 18-24 °С. В случае если температура в помещении ниже 18 °С, то она считается низкой и имеет низкую степень комфорта для человека. Если же температура воздуха выше 24 °С можно говорить о перегреве в помещении. В промежуточных значениях можно относить температуру физической среды к одной, либо к другой группе. Влажность воздуха в помещении также делится на три группы. Воздух нормальной влажности со значением 40-60 %, воздух высокой влажности со значением более 60 %. Сухой воздух с влажностью менее 40 %.

Качественная характеристика воздуха, такая как содержание углекислого газа, в нейронной сети выполняет роль уточняющего параметра. Это означает, что содержание углекислого газа будет уточнять режимы работы устройств климат-контроля, которые будут получены по сочетанию двух основных параметров. В связи с тем, что температура и влажность воздуха в помещении меняется существеннее и чаще, то по этим параметрам будет определяться основное смещение исходного режима работы устройств.

Нечеткие множества по содержанию углекислого газа представленные на рис. 7, сформированы на основании рекомендаций ГОСТ Р ЕН 13779-2007 «Вентиляция для нежилых зданий. Требования к рабочим характеристикам для вентиляционных и кондиционерных комнатных систем» [29]. Воздух с нормальным содержанием CO<sub>2</sub> – это воздух со значением CO<sub>2</sub> 0.01-0.05 %. Повышенное содержание CO<sub>2</sub> 0.05-0.15 %. Если содержание CO<sub>2</sub> высокое, то его диапазон выше 0.15 %. Параметры микроклимата в помещениях, согласно которых с 0.15 % у человека снижается внимание и концентрация, а начиная с 0.2 % при длительном нахождении в помещении наблюдается головная боль, тошнота и недомогания.

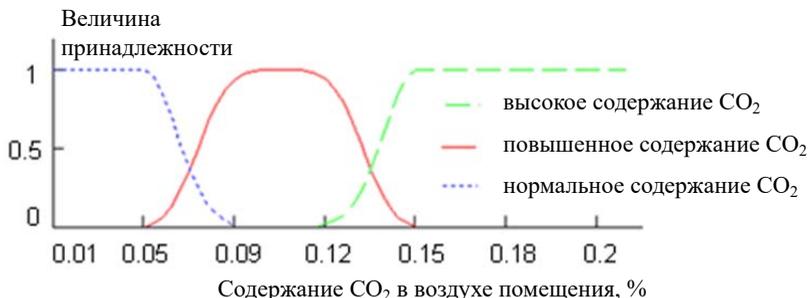


Рис. 7. Нечеткие множества по содержанию CO<sub>2</sub> в воздухе помещения

Далее каждому набору входных нечетких данных ставится в соответствие диапазон выходных управляющих воздействий на исполнительные аппараты устройств управления. Для этой цели создаются правила функционирования нейронная сеть.

**4.3. Создание обучающей выборки и логических правил работы нейронной сети.** Чтобы сформировать правила соответствия входных данных выходным, было проведено исследование связи режимов работы устройств климат-контроля: энергопроизводительность, расход воздуха, с параметрами температуры, влажности и содержания углекислого газа в воздухе помещения.

Данные по режимам работы кондиционеров брались из исследовательских работ [30, 31] с большой экспериментальной базой, а также из рекомендации экспертов по управлению режимами работы кондиционера при поддержании нормального температурного режима в помещении и сохранении качества воздуха. Несмотря на то, что многие данные из справочников и пособий были получены для кондиционеров других марок и годов выпуска, они остаются справедливыми для их современных аналогов.

Связь режимов работы вентиляции от качественных и количественных параметров воздуха в помещении описаны в справочниках для приточно-вытяжных вентиляционных установок, а также в пособиях по системам вентиляции и кондиционирования воздуха в закрытых помещениях.

В таблице 1 представлены обобщенные рекомендации по режимам работы кондиционера в зависимости от параметров физической среды. Представленные в таблице 1 данные использовались для обучения нейронной сети. Далее описание функционирования нейронной сети будет производится на примере кондиционера. Аналогичный по-

рядок настройки и функционирования нейронной сети справедлив для устройств вентиляции и отопления.

Таблица 1. Обобщенные рекомендации по режимам работы кондиционера в зависимости от параметров физической среды

№	Параметры физической среды помещения			Обобщенные рекомендуемые режимы работы кондиционера		
	Температура, T	Влажность, W	Содержание CO <sub>2</sub> , G	Энергопроизводительность (лето), kw	Энергопроизводительность (зима), kw	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /h
1	T <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>	0.5-1	7-8	1900-2150
2	T <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	1-1.5	8-9	2150-2350
3	T <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>3</sub>	1.5-2	9-10	2350-2650
4	T <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	2.5-3.5	9.5-11	2150-2350
5	T <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>2</sub>	3.5-4	11-12	2350-2650
6	T <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	4-5	12-13	2650-2900
7	T <sub>1</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>1</sub>	1-1.5	10.5-12	2350-2650
8	T <sub>1</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>2</sub>	1.5-2	12-13	2650-2900
9	T <sub>1</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>3</sub>	2-2.5	13-14	2900-3100
10	T <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>	2-4	1-3	1600-1800
11	T <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	4-6.5	3-5	1800-2000
12	T <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>3</sub>	6.5-8	5-8	2000-2200
13	T <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	2-4	2-4	1800-2000
14	T <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>2</sub>	4-6	4-6	2000-2200
15	T <sub>2</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	6-9	6-9	2200-2400
16	T <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>1</sub>	3-5	3-5	2300-2500
17	T <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>2</sub>	5-8	5-8	2500-2700
18	T <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>3</sub>	8-11	8-11	2700-2900
19	T <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>1</sub>	7-8	0.5-1	1700-1800
20	T <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	8-9	1-1.5	1800-1900
21	T <sub>3</sub>	W <sub>1</sub>	G <sub>3</sub>	9-10	1.5-2	1900-2000
22	T <sub>3</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	9.5-11	2.5-3.5	1800-1900
23	T <sub>3</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>2</sub>	11-12	3.5-4	1900-2000
24	T <sub>3</sub>	W <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	12-13	4-5	2000-2100
25	T <sub>3</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>1</sub>	10.5-12	1-1.5	1500-1600
26	T <sub>3</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>2</sub>	12-13	1.5-2	1600-1700
27	T <sub>3</sub>	W <sub>3</sub>	G <sub>3</sub>	13-14	2-2.5	1700-1800

Соответствие между входными характеристиками физической среды помещения и выходными параметрами регулирования описывается с помощью логических правил, представленных ниже:

Если  $T \in T_i$ ,  $W \in W_j$  и  $G \in G_z$  то  $P$  есть  $P_s$ ,  $Q$  есть  $Q_r$ ,

где:

$T_i$  – нечеткие данные по температуры;

$W_j$  – нечеткие данные по влажности;

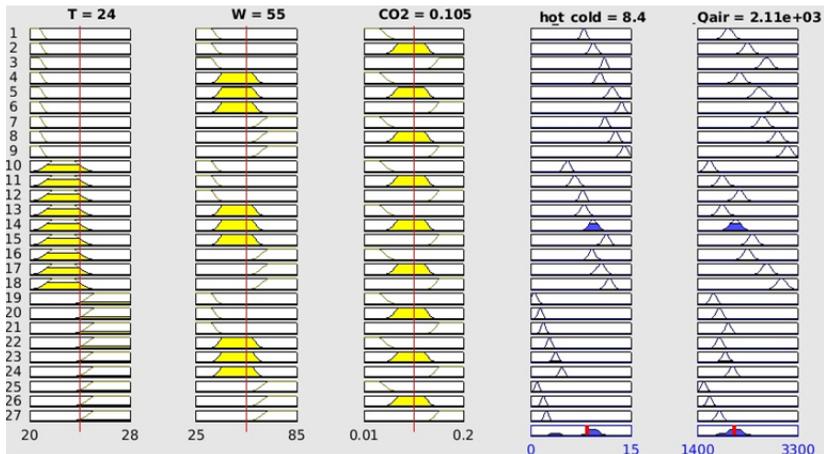
$G_z$  – нечеткие данные по содержания  $CO_2$  в воздухе;

$P_s$  – нечеткие данные по энергопроизводительность;

$Q_r$  – нечеткие данные по расходу воздуха;

$T, W, G, P, Q$  – значения температуры, влажности, содержания  $CO_2$ , энергопроизводительность, расход воздуха соответственно.

Правила функционирования нейронной сети представлены на рисунке 8. Правила включают логическую функцию «И», что указывает на необходимость выполнения сразу всех условий.



а)

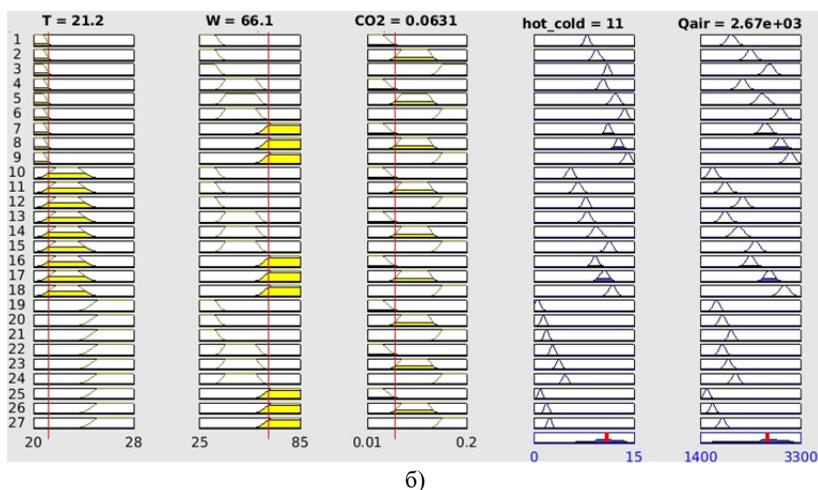


Рис. 8. Правила функционирования нейронной сети а) для входных параметров  $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $W=55\%$ ,  $G=0.105\%$  б) для входных параметров  $T=21.2^{\circ}\text{C}$ ,  $W=66.1\%$ ,  $G=0.063\%$

**4.4. Выбор обобщенных рекомендованных режимов работы устройств климат-контроля.** На четвертом слое нейронная сеть устанавливает соответствие между входными параметрами физической среды помещения и рекомендованными режимами работы устройств климат-контроля. Для тестирования адекватности работы разработанного алгоритма управления устройствами микроклимата умного дома была написан программный код в среде Scilab Fuzzy Logic. С целью практической реализации алгоритм управления нейронной сети был перенесен в среду CoDeSys для программируемых логических контроллеров.

**5. Оценка качества работы нейронной сети для управления режимами работы системы кондиционирования умного дома.** Для оценки качества работы сети обученная нейронная сеть проверялась на способность к обобщению на данных контрольной выборки – 75 векторов что составляет 15% от обучающей выборки. Также проводилось тестирование сети по данным тестовой выборки - 150 векторов что составляет 30 % от обучающей выборки. Результаты, полученные на практике и при использовании нейронной сети сопоставлены на рисунке 9.

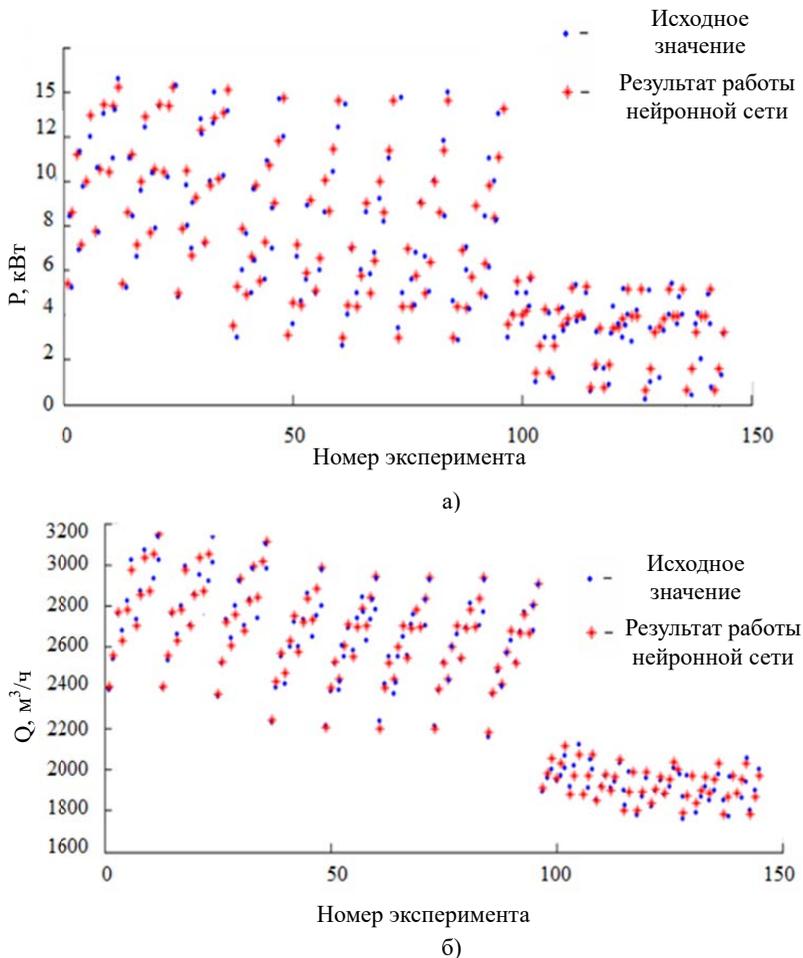


Рис. 9. Результат испытаний а) P - энергопроизводительность, б) Q - расход воздуха

По результатам тестирования нейронной сети видно, что присутствуют отклонения от реальных данных. Однако, они не носят существенного характера. Так, отклонение для параметра расход воздуха по абсолютной величине не превышают  $\pm 20$  м³/ч, а для параметра энергопроизводительность  $\pm 0.3$  кВт. В результате достоверность работы сети составила 0.95 и выше. Эксперимент указывает на преимущество использования гибридной структуры нейронной сети в сравне-

нии с классической, так как она в каждом случае активирует одну локальную нейронную сеть, в то время как классическая активирует всю сеть целиком. Это означает что быстродействие гибридной сети выше, при одинаковой точности. Также гибридная сети обладает гибкой системой переобучения. Так при переобучении сети достаточно адаптировать работу одной или нескольких локальных сетей, в то время как для классической сети приходится перестраивать всю архитектуру

**6. Моделирование работы нейронной сети для управления системой кондиционирования умного дома.** Рассмотрим, как изменяются в течение рабочего дня параметры физической среды в многофункциональном помещении университета. Замер параметров температуры, влажности и содержания  $\text{CO}_2$  производилась IoT датчиками, ретроспектива изменения параметров в течение рабочего дня представлена на рис. 10.

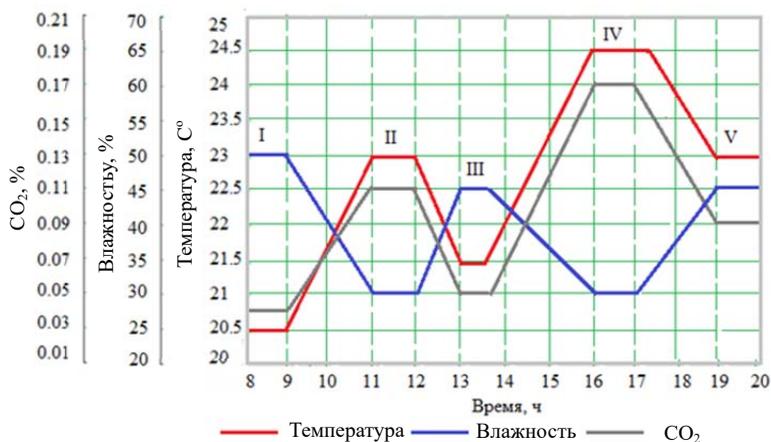


Рис. 10. Пример изменения параметров физической среды в помещении в течение рабочего дня

На рассматриваемом графике в промежутке времени с 8 по 20 часов выделены пять участков, на которых режимы работы устройств климат-контроля будут постоянными. Режимы работы между участками будут изменяться. Рассчитаем для каждого из пяти участков величину энергопроизводительности и расхода воздуха кондиционера. Рассмотрим порядок определения режимов работы кондиционера поэтапно на примере 2-го участка. На втором участке физическая среда помещения имеет температуру  $23\text{ C}^0$ , влажность  $30\%$  и содержание  $\text{CO}_2$  в воздухе  $0.11\%$ . Анализируя входные значения параметров физиче-

ской среды, система относит её состояние по температуре ко второй группе (рис. 5). По влажности к первой группе (рис. 6). По содержанию CO<sub>2</sub> ко второй группе (рис. 7). Степень принадлежности к той или иной группе окажет влияние на конечный результат.

В итоге для второго участка суточного графика состояния физической среды в помещении, с параметрами температуру 23 C<sup>0</sup>, влажность 30 % и содержание CO<sub>2</sub> в воздухе 0.11 %, рекомендованный режим работы для кондиционера будет соответствовать: по энергопроизводительности – 6.5 кВт, по расходу воздуха – 1880 м<sup>3</sup>/ч.

Для всех пяти участков рассматриваемого суточного графика аналогично рассчитываем рекомендованные режимы работы для кондиционера. Результаты по рекомендованным режимам работы кондиционера за рассмотренный промежуток времени при использовании нейронной сети представлены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетные данные работы гибридной нейронной сети

номер участка	Параметры физической среды помещения			Обобщенные рекомендуемые режимы работы кондиционера		
	Температура, T	Влажность, W	Содержание CO <sub>2</sub> , G	Энергопроизводительность (лето), kw	Энергопроизводительность (зима), kw	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /h
I	20.5	50	0.04	2.5	9.9	2160
II	23	30	0.11	6.5	6.5	1880
III	21.5	45	0.05	8.25	8.25	1930
IV	24.5	30	0.17	4.37	3.8	2100
V	23	45	0.09	9.35	9.35	2120

Полученные результаты адаптированы к возможным диапазонам изменения режимов работы кондиционера и отражают полученные предыдущими исследователями тенденции изменения режимов работы кондиционеров различных конструкций и функций.

**7. Разработка методики управления микроклиматом умного дома на основе использования ансамбля искусственных нейронных сетей.** Для управления совместной работой систем кондиционирования, вентиляции и отопления рационально использовать ансамбли искусственных нейронных сетей. Особенностью управления совмест-

ной работой нескольких киберфизических устройств является наличие единого информационного центра согласования их взаимодействия. Расчет предиктивного управления микроклимата умного дома в едином информационном центре происходит посредством прогнозирования режимов совместной работы устройств микроклимата на заданный промежуток времени путем итерационного расчета параметров регулирования киберфизических устройств (кондиционера, вентиляции и отопления).

На рис. 11 представлена схема связи устройств микроклимата умного дома через единый информационный центр согласования режимов работы. Взаимодействие устройств через единый центр осуществляется по средствам двунаправленных связей. Единым центром согласования режимов работы устройств кондиционирования, вентиляции и отопления будет являться цифровая модель микроклимата физической среды помещения.

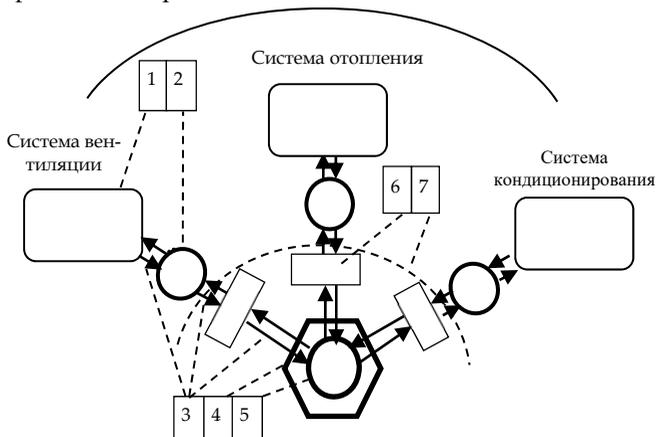


Рис. 11. Схема взаимодействия киберфизических устройств микроклимата умного дома, где 1 - устройства микроклимат; 2 – IoT датчики физической среды и регуляторы состояния физических устройств; 3- двунаправленные связи типа энергия – информация, информация-энергия, информация-информация; 4- единый информационный центр согласования режимов работы устройств, 5- блок управления режимами работы киберфизических устройств; 6 – блок фильтрации входной информации; 7 – граница физической и виртуальной среды

Экспериментальные исследования показали, что использование однотипных нейронных сетей для предиктивного управления дает ошибку прогнозирования состояния физической среды менее 5 % в 78% случаях [32]. Большой точности можно добиться, если объединить

разнотипные нейронные сети в единую систему. Поэтому для получения максимально возможной точности и универсальности был выбран способ построения системы прогнозирования параметров физической среды на основе ансамбля нейронных сетей. Структурная схема системы управления микроклиматом умного дома с использованием ансамбля нейронных сетей представлена на рисунке 12.

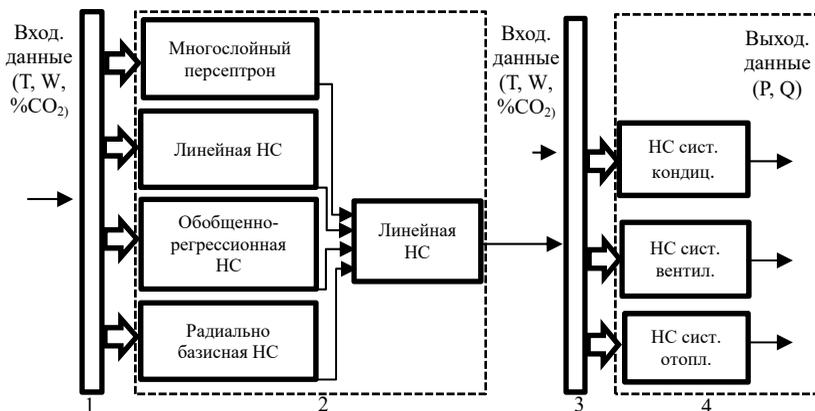


Рис. 12. Структурная схема системы управления микроклиматом умного дома с использованием ансамбля нейронных сетей, где 1 – блок консолидации данных о состоянии физической среды, 2 – блок прогнозирования состояния физической среды, 3 – блок обеспечения информационного взаимодействия киберфизических устройств, 4 – блок имитации режимов работы и выработки предиктивного управления устройствами климат-контроля

Представленная на рисунке 12 структура системы управления микроклиматом умного дома наглядно иллюстрирует разработанную методику управления устройствами климат-контроля в режиме реального времени. Состояние параметров физической среды в помещениях умного дома контролируются с помощью IoT датчики физической среды, расположенных в разных частях помещения. Информация о состоянии параметров физической среды поступает в блок консолидации, где производится фильтрация и подготовка данных для дальнейшей их обработки, а также в блок обеспечения информационного взаимодействия киберфизических устройств. После каждого изменения режима работы одного из киберфизических устройств система управления проводит прогнозирование состояния физической среды с целью выработки предиктивного управляющего воздействия на другие устройства для согласования их совместной работы. Таким образом, управляющий сигнал проходит цепочку взаимосвязанных устройств, в этом случае

для каждого из них определяет рациональный режим работы при минимальных затратах времени и энергии. Предиктивное управление микроклиматом умного дома производится путем рекурсивной процедуры сбора, анализа данных и выработки управляющих воздействий.

В среде Scilab был проведен анализ применимости различных нейронных сетей для решения задачи прогнозирования состояния физической среды умного дома. Нейронные сети, показавшие наибольшую эффективность, были использованы для формирования ансамбля нейронной сети. В ансамбль объединены следующие нейронные сети: многослойный персептрон, линейная, обобщенно-регрессионная и радиальная базисная сети. На вход этих сетей подаются одни и те же входные переменные о состоянии физической среды ( $T$ ,  $W$ ,  $\% \text{CO}_2$ ).

Ансамбли нейронных сетей имеют лучшее качество прогнозирования состояния физической среды, чем отдельные сети. Усреднение прогнозов по всем моделям сетей с различной структурой и обучение на основе различных множеств данных позволяет уменьшить дисперсию модели, не увеличивая её смещение. Это связано с тем, что при разных режимах работы устройств, и графиков изменения параметров физической среды более точные прогнозы дают различные виды нейронных сетей. При этом заранее неизвестно, какой вид сети будет давать наиболее точный прогноз. Поэтому каждая сеть обучается отдельно, а результирующий прогноз формируется как усредненная методом взвешенных наименьших квадратов величина. Для этого используется второй каскад, состоящий из линейной нейронной сети. На вход этой усредняющей сети подаются результаты прогнозов, полученных от отдельных нейронных сетей первого каскада.

**8. Практическая реализация системы управления микроклиматом умного дома.** Каждое устройство поддержки микроклимата помещения имеет уникальную цифровую модель, создающую взаимосвязь между реальным объектом, физической средой, IoT устройствами и его виртуальным аналогом. Также для каждого виртуального устройства разрабатывается нейронная сеть, создающая взаимосвязь контролируемых параметров физической среды и регулируемых величин исполнительных механизмов устройств климат-контроля. Взаимодействие реальных устройств, цифровых моделей, систем управления осуществляется через единый информационный центр согласования. Физически он представляет собой программируемый логический контроллер, а в качестве цифровой среды для реализации алгоритмов управления используется Scilab Fuzzy Logic и программная среда программируемых логических контроллеров CoDeSys. На рисунке 13 представлена схема интеграции модулей управления умным домом в

единое информационное пространство. Физически интеграция осуществляется по средствам интеграционной шины данных, а кибервзаимодействие осуществляется в цифровой среде проектирования на едином сервере сбора, обработки и хранения информации [33, 34].

При реализации на практике системы управления микроклиматом умного дома используются линейки промышленных IoT датчиков измеряющих в режиме реального времени температуру, влажность и содержание CO<sub>2</sub> в воздухе. Например, ПКГ100-CO<sub>2</sub> - промышленный датчик концентрации углекислого газа в воздухе и ПВТ100 - промышленный датчик влажности и температуры воздуха. Полученная информация фиксируется в нейронной сети контроллера, обрабатывается, а затем через команды управления передается на цифро-аналоговые преобразователи устройств управления или IoT регуляторы, которые управляют режимами их работы. В качестве управляющего микроконтроллера рекомендуется использовать ОВЕН ПЛК154 [35-37]. Для него в программной среде CoDeSys реализован программный код алгоритма управления режимами работы устройств климат-контроля, в зависимости от параметров физической среды помещения: температуры, влажности и содержания CO<sub>2</sub> в воздухе.

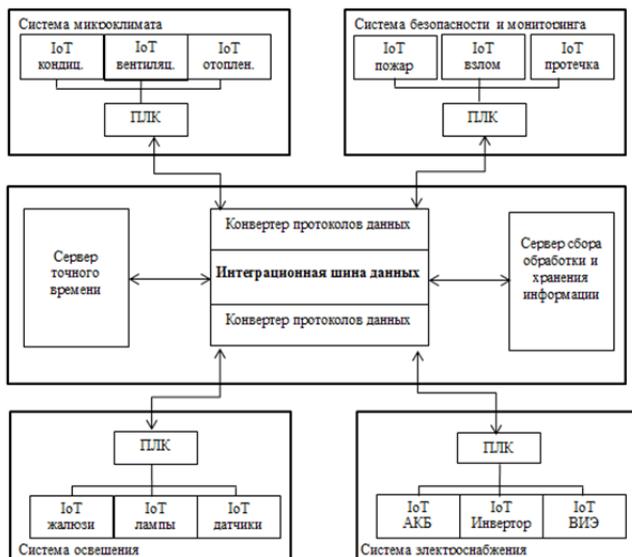


Рис. 13. Схема интеграции модулей управления умного дома в единое информационное пространство, где ПЛК-программируемый логический контроллер, АКБ – аккумуляторная батарея, ВИЭ – возобновляемый источник энергии, IoT – устройства с сетевыми интерфейсами взаимодействия (интернет вещей)

На рисунке 14 представлена функциональная схема информационного взаимодействия устройств климат-контроля многофункциональной аудитории и шкафа управления.

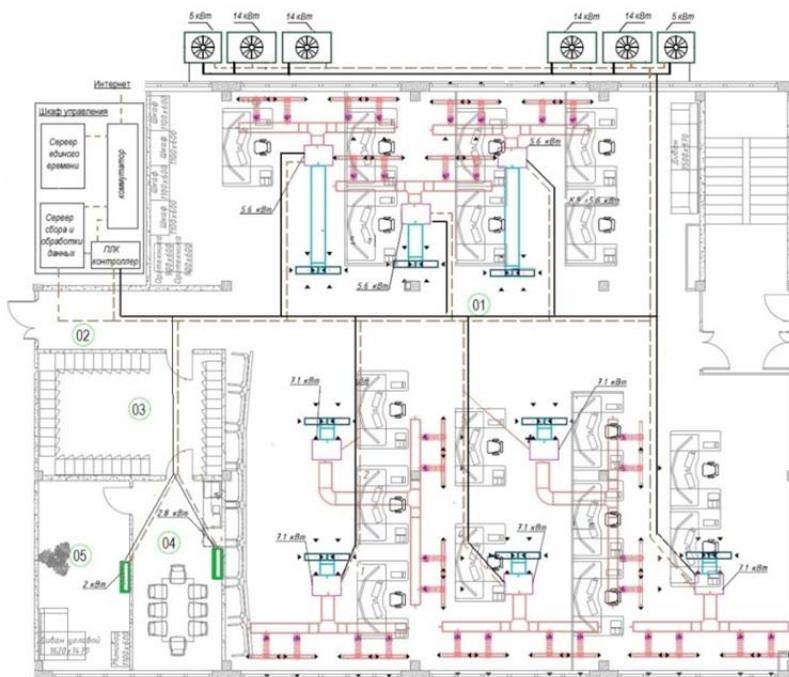


Рис. 14. Функциональная схема информационного взаимодействия шкафа управления и устройств климат-контроля, где сплошной линией обозначены цепи управления регуляторами устройств, а пунктирной цепи контроля состояния устройств

**9. Заключение.** Разработана методика обеспечения комфортного состояния микроклимата умного дома с использованием ансамбля нечетких искусственных нейронных сетей. Она реализована на примере управления устройствами климат-контроля умного дома путем прогнозирования параметров их функционирования.

Предлагаемая система управления микроклиматом в помещениях умного дома имеет ряд практических преимуществ, в сравнении с существующими узкоспециализированными решениями по домашней автоматизации. Во-первых, блок консолидации данных позволяет решить проблему массовой генерации данных, возникающей при некорректной работе цифровых датчиков и регуляторов умного дома по-

средством фильтрации входных данных и агрегации групп параметров. Во-вторых, блок информационного взаимодействия киберфизических устройств обеспечивает связь между устройствами климат-контроля, 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 позволяют осуществлять предиктивное управление с целью формирования рациональных режимов работы устройств при минимальных затратах времени и энергии.

Перечисленные технические преимущества системы управления микроклиматом умного дома 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 при их совместной работе. Единая цифровая среда моделирования сохраняет ресурс физических устройств, производя виртуальный расчет для всевозможных вариантов взаимодействия устройств между собой и физической средой. Целью управления на основе взаимодействующих киберфизических устройств является достижения минимума используемой мощности и информационного трафика при их совместной работе.

### Литература

1. Eungha Kim and Changsup Keum, Integrated community service platform system linked to smart home and smart city // 2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Vienna, 2016. pp. 380-382. doi: 10.1109/ICUFN.2016.7537053.
2. Eungha Kim, Smart city service platform associated with smart home // 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN), Da Nang, 2017. pp. 608-610. doi: 10.1109/ICOIN.2017.7899557.
3. Masera M., Bompard E.F., Profumo F., Hadjsaid N. Smart (electricity) grids for smart cities: assessing roles and societal impacts // Proceedings of the IEEE, 2018. Vol. 106. № 4. pp. 613-625. doi: 10.1109/JPROC.2018.2812212.
4. Cheng Z., Duan J., Chow M.-Y. To centralize or to distribute: that is the question: a comparison of advanced microgrid management systems // Industrial Electronics Magazine IEEE, 2018. vol. 12. № 1. pp. 6-24. doi: 10.1109 / IIE.2018.2789926.
5. Du Y., Hao T., Lukic S., Lubkeman D., Dubey A., Karsai G. Development of a controller hardware-in-the-loop platform for microgrid distributed control applications // Electronic Power Grid (eGrid) 2018 IEEE. 2018. pp. 1-6. doi: 10.1109/eGRID.2018.8598696.
6. V. Govindraj, M. Sathiyarayanan and B. Abubakar, Customary homes to smart homes using Internet of Things (IoT) and mobile application // 2017 International

- Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon), Bangalore, 2017. pp. 1059-1063. doi: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358532.
7. S.J. Clement, D.W. McKee, R. Romano, J. Xu, J.M. Lopez, D. Battersby, The Internet of Simulation: enabling agile model based systems engineering for cyber-physical systems // 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE), IEEE (2017). pp. 1-6. doi: 10.1109/SYSESE.2017.7994948.
  8. Y. Zhang, Y. Zhang, P. Ji, W. Xu, Z. Zhou, F. Tao. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey // *Int J Adv Manuf Technol* (2018). pp. 1-13. doi: 10.1016/j.jii.2017.08.001.
  9. Shvedenko, V.N., Mozokhin, A.E. Methodological Foundations for the Formation of Information Space and Digital Twin Objects in Smart Homes // *Autom. Doc. Math. Linguist.* 53, 303–308 (2019). doi: 10.3103/S0005105519060074.
  10. V.-H. Bui, A. Hussain, Y.-H. Im, and H.-M. Kim, An internal trading strategy for optimal energy management of combined cooling, heat and power in building microgrids // *Appl. Energy*. vol. 239. pp. 536-548. Apr. 2019.
  11. S. Huang, Y. Lin, V. Chinde, X. Ma, and J. Lian, Simulation-based performance evaluation of model predictive control for building energy systems // *Appl. Energy*. vol. 281, Jan. 2021, P. 116027.
  12. Álvarez, J. & Costa-Castelló, Ramon & Castilla, María del Mar. (2018). Repetitive Control to Improve Users' Thermal Comfort and Energy Efficiency in Buildings // *Energies*. 11(4): 976. doi: 10.3390/en11040976.
  13. Abhinandana, Boodi & Beddiar, Karim & Benamour, Malek & Amirat, Yassine & Benbouzid, Mohamed // (2018) Intelligent Systems for Building Energy and Occupant Comfort Optimization: A State of the Art Review and Recommendations. *Energies*. 11(10): 1-26. doi:10.3390/en11102604.
  14. Шведенко В.В., Мозохин А.Е. Методология организации полиструктурной системы обеспечения информационного взаимодействия и мониторинга процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электрической энергии // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2021. № 2 (60). С. 71-82.
  15. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 748–754. doi:10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754
  16. Z. Pezeshki and S.M. Mazinani, Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: A survey // *Artif. Intell. Rev.* vol. 52. no. 1. pp. 495-525, Jun. 2019.
  17. A. Esmaeilzadeh, M.R. Zakerzadeh, and A.Y. Koma, The comparison of some advanced control methods for energy optimization and comfort management in buildings // *Sustain. Cities Soc.* vol. 43. pp. 601-623. Nov. 2018.
  18. M. S. Ahmed, A. Mohamed, H. Shareef, R.Z. Homod, and J.A. Ali, Artificial neural network based controller for home energy management considering demand response events // in *Proc. Int. Conf. Adv. Electr., Electron. Syst. Eng. (ICAEEES)*. Nov. 2016. pp. 506-509.
  19. E. Isik and M. Inalli, Artificial neural networks and adaptive neurofuzzy inference systems approaches to forecast the meteorological data for HVAC: The case of cities for Turkey // *Energy*. vol. 154. pp. 7-16. Jul. 2018.
  20. A.Y. Abdelaziz and E.S. Ali, Cuckoo search algorithm based load frequency controller design for nonlinear interconnected power system // *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* vol. 73. pp. 632-643. Dec. 2015.

21. J.Wang, S. Li, H. Chen, Y. Yuan, and Y. Huang, Data-driven model predictive control for building climate control: Three case studies on different buildings // *Building Environ.* vol. 160. Aug. 2019. Art. no. 106204.
22. S. K. Howell, H. Wicaksono, B. Yuce, K. McGlinn, and Y. Rezgui, User centered neuro-fuzzy energy management through semantic-based optimization // *IEEE Trans. Cybern.* vol. 49. no. 9. pp. 3278-3292. Sep. 2019.
23. Лабинский А.Ю., Нефедьев С.А., Бардулин Е.Н. Использование нечеткой логики и нейронных сетей в системах автоматического управления // *Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России»*. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-nechetkoj-logiki-i-neuronnyh-setey-v-sistemah-avtomaticheskogo-upravleniya> (дата обращения: 01.11.2021).
24. Parvin, Khadija & Hossain Lipu, M.S. & Hannan, M.A. & Abdullah, Majid & Ker, Pin Jern & Begum, Rawshan & Mansor, Muhamad & Muttaqi, Kashem & Mahlia, T. & Dong, Z.Y.. (2021). Intelligent Controllers and Optimization Algorithms for Building Energy Management Towards Achieving Sustainable Development: Challenges and Prospects // *IEEE Access.* no. 9. pp. 41577 - 41602. doi:10.1109/ACCESS.2021.3065087.
25. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети /В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – СПб.: Питер, 2003.
26. Анил К., Мао Д.-Д. Введение в искусственные нейронные сети. – Мичиган, США: Мичиганский гос. ун-т; Исследовательский центр IBM в Альмадене, США, 2006.
27. Яхьяева, Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: Учебное пособие / Г.Э. Яхьяева. - М.: БИНОМ. ЛЗ, ИНТУИТ.РУ, 2012. - 316 с.
28. Оссовский, С. Нейронные сети для обработки информации: перев. с польского / С. Оссовский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
29. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" / Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 N 2. – М.: Минюст России, 2021. – 1142 с.
30. ГОСТ Р EN 13779-2007 Вентиляция для нежилых зданий. Требования к рабочим характеристикам для вентиляционных и кондиционерных комнатных систем. – М.: Минстрой России, 2007. – 43 с.
31. A. Garnier, J. Eynard, M. Caussanel, and S. Grieu, Predictive control of multizone heating, ventilation and air-conditioning systems in non-residential buildings // *Appl. Soft Comput.* vol. 37. pp. 847-862. Dec. 2015.
32. Z. Yong, Y. Li-Juan, Z. Qian, and S. Xiao-Yan, Multi-objective optimization of building energy performance using a particle swarm optimizer with less control parameters // *J. Building Eng.* vol. 32. Nov. 2020. Art. no. 101505.
33. Мозохин А. Е., Цифровые платформы интеллектуальных сервисов / А.Е. Мозохин, Б.А. Староверов // *Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов РЕЛАВЭКСПО-2019.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 240–245.
34. Guozeng Feng, Shuya Lei, Xinxin Gu, Yuejiao Guo, Junyi Wang Predictive control model for variable air volume terminal valve opening based on backpropagation neural network // *Building and Environment*, 2020. ISSN 0360-1323. doi:10.1016/j.buildenv.2020.107485
35. M. Ayani, M. Ganebäck, A.H.C. Ng Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning // *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Stockholm, May 16–18, 2018 (2018). pp. 243-248. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139

36. Y. Cai, B. Starly, P. Cohen, Y.S. Lee Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing // *Procedia Manuf*, 10 (2017). pp. 1031-1042. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.094
37. M. Macchi, I. Roda, E. Negri, L. Fumagalli Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management *IFAC-PapersOnLine*, 51 (2018). pp. 790-795. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.415

**Мозохин Андрей Евгеньевич** — канд. техн. наук, заместитель начальника, отдел эксплуатации автоматизированных систем управления, филиал ПАО "МРСК Центра" - "Костромаэнерго". Область научных интересов: автоматизация технологических процессов и производств, информационные системы управления, интеллектуальная энергетика, умный дом, цифровые двойники. Число научных публикаций — 40. mozokhin@mail.ru; проспект Мира, 53, 156003, Кострома, Россия; р.т.: +7(953)641-27-11.

A. MOZOHIN  
**METHODOLOGY FOR ENSURING A COMFORTABLE  
MICROCLIMATE STATE IN A SMART HOME USING AN  
ENSEMBLE OF FUZZY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

*Mozohin A. Methodology for Ensuring a Comfortable Microclimate State in a Smart Home Using an Ensemble of Fuzzy Artificial Neural Networks.*

**Abstract.** Analysis of the application of smart home technology indicates an insufficient level of controllability of its infrastructure, which leads to excessive consumption of energy and information resources. The problem of managing the digital infrastructure of human living space, is associated with a large number of highly specialized solutions for home automation, which complicate the management process. Smart home is considered as a set of independent cyber-physical devices aimed at achieving its goal. For coordinated work of cyber-physical devices it is proposed to provide their joint work through a single information center. Simulation of device operation modes in a digital environment preserves the resource of physical devices by making a virtual calculation for all possible variants of interaction of devices between themselves and the physical environment. A methodology for controlling the microclimate of a smart home using an ensemble of fuzzy artificial neural networks is developed, with the example of joint use of air conditioning, ventilation and heating. The neural network algorithm allows you to monitor the parameters of the physical environment, predict the modes of cyber-physical devices and generate control signals for each of them, ensuring the joint operation of devices with minimal resource consumption and information traffic. A variant of practical implementation of a smart home climate control system on the example of a multifunctional educational computer class is proposed. Hybrid neural networks of air conditioning, ventilation and heating systems were developed. The testing of the microclimate control system of a multifunctional university classroom using hybrid neural networks was carried out, a programmable logic controller of domestic production was used as a control device. The goal of management based on cooperating cyber-physical devices is to achieve a minimum of power and information traffic when they work together.

**Keywords:** smart home, artificial neural network ensemble, climate control system, management system, cyber-physical devices.

**Mozohin Andrey** — Ph.D., Deputy head, Department of operation of automated control systems, Branch IDGC of Centre — Kostromaenergo. Research interests: automation of technological processes and productions, information management systems, smart energy, smart home, digital twins. The number of publications — 40. mozokhin@mail.ru; 53, Prospect Mira Str., 156003, Kostroma, Russia; office phone: +7(953)641-27-11.

### References

1. Eungha Kim and Changsup Keum, Integrated community service platform system linked to smart home and smart city // 2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Vienna, 2016. pp. 380-382. doi: 10.1109/ICUFN.2016.7537053.
2. Eungha Kim, Smart city service platform associated with smart home // 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN), Da Nang, 2017. pp. 608-610. doi: 10.1109/ICOIN.2017.7899557.

3. Masera M., Bompard E.F., Profumo F., Hadjsaid N. Smart (electricity) grids for smart cities: assessing roles and societal impacts // Proceedings of the IEEE, 2018. Vol. 106. № 4. pp. 613-625. doi: 10.1109/JPROC.2018.2812212.
4. Cheng Z., Duan J., Chow M-Y. To centralize or to distribute: that is the question: a comparison of advanced microgrid management systems // Industrial Electronics Magazine IEEE, 2018. vol. 12. № 1. pp. 6-24. doi: 10.1109 / MIE.2018.2789926.
5. Du Y., Hao T., Lukic S., Lubkeman D., Dubey A., Karsai G. Development of a controller hardware-in-the-loop platform for microgrid distributed control applications // Electronic Power Grid (eGrid) 2018 IEEE. 2018. pp. 1-6. doi: 10.1109/eGRID.2018.8598696.
6. V. Govindraj, M. Sathiyarayanan and B. Abubakar, Customary homes to smart homes using Internet of Things (IoT) and mobile application // 2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon), Bangalore, 2017. pp. 1059-1063. doi: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358532.
7. S.J. Clement, D.W. McKee, R. Romano, J. Xu, J.M. Lopez, D. Battersby, The Internet of Simulation: enabling agile model based systems engineering for cyber-physical systems // 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE), IEEE (2017). pp. 1-6. doi: 10.1109/SYBOSE.2017.7994948.
8. Y. Cheng, Y. Zhang, P. Ji, W. Xu, Z. Zhou, F. Tao. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey // Int J Adv Manuf Technol (2018). pp. 1-13. doi: 10.1016/j.jii.2017.08.001.
9. Shvedenko, V.N., Mozokhin, A.E. Methodological Foundations for the Formation of Information Space and Digital Twin Objects in Smart Homes // Autom. Doc. Math. Linguist. 53, 303–308 (2019). doi: 10.3103/S0005105519060074.
10. V.-H. Bui, A. Hussain, Y.-H. Im, and H.-M. Kim, An internal trading strategy for optimal energy management of combined cooling, heat and power in building microgrids // Appl. Energy. vol. 239. pp. 536-548. Apr. 2019.
11. S. Huang, Y. Lin, V. Chinde, X. Ma, and J. Lian, Simulation-based performance evaluation of model predictive control for building energy systems // Appl. Energy. vol. 281, Jan. 2021, P. 116027.
12. Álvarez, J. & Costa-Castelló, Ramon & Castilla, María del Mar. (2018). Repetitive Control to Improve Users' Thermal Comfort and Energy Efficiency in Buildings // Energies. 11(4): 976. doi: 10.3390/en11040976.
13. Abhinandana, Boodi & Beddiar, Karim & Benamour, Malek & Amirat, Yassine & Benbouzid, Mohamed // (2018) Intelligent Systems for Building Energy and Occupant Comfort Optimization: A State of the Art Review and Recommendations. Energies. 11(10): 1-26. doi:10.3390/en11102604.
14. Shvedenko V.V., Mozokhin A.E. Metodologiya organizacii polistrukturnoj sistemy obespecheniya informacionnogo vzaimodejstviya i monitoringa processov generacii, transporta, raspredeleniya i potrebleniya elektricheskoy energii // Informacionno-ekonomicheskije aspekty standartizacii i tekhnicheskogo regulirovaniya. 2021. № 2 (60). S. 71-82
15. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. The concept of managing the network structure of intelligent devices in the digital transformation of the energy industry. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 748–754 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754
16. Z. Pezeshki and S.M. Mazinani, Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: A survey // Artif. Intell. Rev. vol. 52. no. 1. pp. 495-525, Jun. 2019.
17. A. Esmacilzadeh, M.R. Zakerzadeh, and A.Y. Koma, The comparison of some advanced control methods for energy optimization and comfort management in buildings // Sustain. Cities Soc. vol. 43. pp. 601-623. Nov. 2018.

18. M.S. Ahmed, A. Mohamed, H. Shareef, R.Z. Homod, and J.A. Ali, Artificial neural network based controller for home energy management considering demand response events // in Proc. Int. Conf. Adv. Electr., Electron. Syst. Eng. (ICAEEES). Nov. 2016. pp. 506-509.
19. E. Isik and M. Inalli, Artificial neural networks and adaptive neurofuzzy inference systems approaches to forecast the meteorological data for HVAC: The case of cities for Turkey // *Energy*. vol. 154. pp. 7-16. Jul. 2018.
20. A.Y. Abdelaziz and E.S. Ali, Cuckoo search algorithm based load frequency controller design for nonlinear interconnected power system // *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* vol. 73. pp. 632-643. Dec. 2015.
21. J. Wang, S. Li, H. Chen, Y. Yuan, and Y. Huang, Data-driven model predictive control for building climate control: Three case studies on different buildings // *Building Environ.* vol. 160. Aug. 2019. Art. no. 106204.
22. S.K. Howell, H. Wicaksono, B. Yuce, K. McGlinn, and Y. Rezgui, User centered neuro-fuzzy energy management through semantic-based optimization // *IEEE Trans. Cybern.* vol. 49. no. 9. pp. 3278-3292. Sep. 2019.
23. Labinskij A.YU., Nefed'ev S.A., Bardulin E.N. Ispol'zovanie nechetkoj logiki i nejronnyh setej v sistemah avtomaticheskogo upravleniya // *Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii»*. 2019. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-nechetkoj-logiki-i-nejronnyh-setej-v-sistemah-avtomaticheskogo-upravleniya> (дата обращения: 01.11.2021).
24. Parvin, Khadija & Hossain Lipu, M.S. & Hannan, M.A. & Abdullah, Majid & Ker, Pin Jern & Begum, Rawshan & Mansor, Muhamad & Muttaqi, Kashem & Mahlia, T. & Dong, Z.Y. (2021). Intelligent Controllers and Optimization Algorithms for Building Energy Management Towards Achieving Sustainable Development: Challenges and Prospects // *IEEE Access*. no. 9. pp. 41577 - 41602. doi:10.1109/ACCESS.2021.3065087.
25. Kruglov, V.V. Nechetkaya logika i iskusstvennye nejronnye seti [Tekst] /V.V. Kruglov, M.I. Dli, R.YU. Golunov. – SPb.: Piter, 2003.
26. Anil K., Mao D.-D. Vvedenie v iskusstvennye nejronnye seti. – Michigan, SSHA: Michiganskij gos. un-t; Issledovatel'skij centr IBM v Al'madene, SSHA, 2006.
27. YAh'yaeva, G.E. Nechetkie mnozhestva i nejronnye seti: Uchebnoe posobie / G.E. YAh'yaeva. - M.: BINOM. LZ, INTUIT.RU, 2012. - 316 s.
28. Ossovskij, S. Nejrionnye seti dlya obrabotki informacii: perev. s pol'skogo [Tekst] / S. Ossovskij. – M.: Finansy i statistika, 2004. – 344 s.
29. SanPiN 1.2.3685-21 "Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya" [Tekst] / Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vrachaRF ot 28.01.2021 N 2. – M.: Minyust Rossii, 2021. – 1142 s.
30. GOST R EN 13779-2007 Ventilyaciya dlya nezhilyh zdaniy. Trebovaniya k rabochim karakteristikam dlya ventilyacionnyh i kondicionermyh komnatnyh sistem. – M.: Minstroj Rossii, 2007. – 43 s.
31. A. Garnier, J. Eynard, M. Caussanel, and S. Grieu, Predictive control of multizone heating, ventilation and air-conditioning systems in non-residential buildings // *Appl. Soft Comput.* vol. 37. pp. 847-862. Dec. 2015.
32. Z. Yong, Y. Li-Juan, Z. Qian, and S. Xiao-Yan, Multi-objective optimization of building energy performance using a particle swarm optimizer with less control parameters // *J. Building Eng.* vol. 32. Nov. 2020. Art. no. 101505.
33. Mozokhin A.E., Cifrovye platformy intellektual'nyh servisov / A.E. Mozokhin, B.A. Staroverov // *Sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferencii molodyh*

- specialistov RELAVEKSPO-2019. – CHEboksary: Izd-vo CHuvash. un-ta, 2019. – S. 240–245.
34. Guozeng Feng, Shuya Lei, Xinxin Gu, Yuejiao Guo, Junyi Wang. Predictive control model for variable air volume terminal valve opening based on backpropagation neural network // *Building and Environment*, 2020. ISSN 0360-1323. doi:10.1016/j.buildenv.2020.107485
  35. M. Ayani, M. Ganebäck, A.H.C. Ng Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning // *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Stockholm, May 16–18, 2018 (2018). pp. 243-248. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139
  36. Y. Cai, B. Starly, P. Cohen, Y.S. Lee. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing // *Procedia Manuf*, 10 (2017). pp. 1031-1042. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.094
  37. M. Macchi, I. Roda, E. Negri, L. Fumagalli. Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management *IFAC-PapersOnLine*, 51 (2018). pp. 790-795. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.415