

И.Л. ШУБИН¹, А.С. СТРОНГИН¹, М.А. РАЗАКОВ¹¹Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва, Российская Федерация

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ ДЛЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. В работе представлен обзор используемых интеллектуальных систем в различных инженерных системах зданий, которые на данный момент активно разрабатываются инженерами в различных странах. Приведены данные истории развития и применения рассматриваемых систем для различных отраслей народного хозяйства. Описаны результаты практического применения и возникшие особенности эксплуатации устройств управления в различных инженерных системах обеспечения микроклимата (отопления, вентиляция, кондиционирования воздуха). Подробно выделены варианты регулирования систем жизнеобеспечения здания с помощью современных контроллеров, а также варианты их интеграции в совместную единую систему. Определены предполагаемые ключевые точки развития систем нейроуправления инженерным оборудованием в зданиях и сооружениях. Описаны возможные варианты внедрения нейроконтроллеров в здание (в т.ч. и многоступенчатое внедрение нейроконтроллера одной системы в глобальную систему-нейроконтроллер с несколькими инженерными системами). Результаты исследования представляют интерес для совершенствования систем управления инженерным оборудованием зданий и сооружений различного назначения с использованием элементов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: инженерные системы, автоматические системы управления, искусственный интеллект, нейроуправление, нейроконтроллер.

I.L. SHUBIN¹, A.S. STRONGIN¹, M.A. RAZAKOV¹¹Building Physics Institute, Moscow, Russian Federation

MODERN RESEARCH OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS USE FOR BUILDING AND STRUCTURES ENGINEERING SYSTEMS

Abstract. There is an overview of the intelligent systems use in different engineering systems of buildings which are designing in different countries. It has been presented the history of considered systems development and application for different sectors on national economy. Authors have described the results of practical application and control devices operation features in different engineering systems for providing microclimate (heating, ventilation and air conditioning). It has been detailed highlighted the options for regulating the building life support systems with modern controllers and integration them to joint unified system. Authors have determined the proposed key points of neural control systems development for engineering equipment in building and structures. Researchers have described possible options for introducing neurocontrollers to a building (including multi-stage introduction of single system neurocontroller to a global system neurocontroller with several engineering systems). The results of the research will be interested for the services operating engineering equipment of buildings and structures for different purposes. Also this information could be used by the planning services and developing companies which use modern automated control systems for engineering systems.

Keywords: engineering systems, automatic control systems, artificial intelligence, neurocontrol, neurocontroller.

Введение

Любые технологии промышленного производства имеют несколько уровней технологических процессов, в результате которых получается конечное изделие. Из-за усложнения конструкции изделий для их создания используются процессы, которые могут быть многоступенчатыми и противоположными по физическим явлениям. Поэтому на каждом этапе производства возрастает роль системы управления каждого элемента.

Современные интеллектуальные системы управления сегодня используют новые алгоритмы, программные пакеты, нейросетевые технологии, которые объединяют в себе несколько этапов технологического процесса: регулирование; анализ; моделирование и т.п. Цель всех этапов – выполнение определенных заданных алгоритмов (исходных данных), которые может назначить оператор, наладчик системы или непосредственно элемент программы, назначенный в виде анализатора. Некоторые технологии в своем составе не имеют элементов – анализаторов и как следствие являются технологиям более низких порядков, чем системы с уже предусмотренными модулями данного назначения.

Целью настоящей работы является исследование развития интеллектуальных и нейросетевых технологий от первичных элементов (цифровых двойников, математических моделей режимов работы оборудования и т.п.) до современных самоанализирующих и самообучающихся комплексов с помощью актуальных публикаций зарубежных и отечественных авторов, входящих в региональные и мировые реферативные базы данных (РИНЦ; Scopus; Web of Science).

Исходные направления исследований интеллектуальных и нейросетевых технологий

В самом начале использования интеллектуальных технологий их применение ограничивалось лишь обработкой больших массивов данных. В последующем данные системы с помощью новых данных обработки были интегрированы в нейросети и являлись её основным ядром. Первоначальным направлением применения нейросетевых технологий являлось исследование большого количества текстовых данных. В дальнейшем тексты усложнялись не количественными характеристиками (количество символов и слов), а качественными данными. Появились иностранные слова, которые не типичны для основного текста [1]. Примером может служить медицинская терминология на латинском языке, которая имеет не кириллические символы и способы построения слов. После данного этапа появилась возможность создания улучшенных алгоритмов для систем перевода с различных языков на требуемые в данной конкретной ситуации. Причем скорость и точность перевода значительно увеличилась [2]. Одновременно с текстовой работой велась и разработка систем распознавания изображений, которая также на основе исследований последних 10 – 15 лет снизила погрешность до 1 %. Также в последние 5 лет появились нейросетевые системы, которые выполняют как функции распознавания текста и генерации этих данных в изображения. Широкое распространение они на данный момент получили в индустрии развлечений и образовании. Основная цель этих разработок на данный момент это улучшение восприятия объектов, явлений и т.п. при их текстовом описании.

В банковской сфере данные технологии используют для проведения анализа большого количества операций. Аналогично анализ производится и на фондовых рынках для выявления определённых интересующих данных. Основная функция нейросетевых технологий, используемые в финансовом секторе экономики, это анализ определенных запросов в большом объеме данных (Big Data). Запросы могут быть связаны с определением числа операция, использующих конкретные финансовые инструменты или поиск определенной суммы денежных средств, переведённых из одной финансовой организации в другую. Цель этих поисков задает оператор и в основном эта информация необходима для аналитических отделов. Другим не маловажным способом использования нейросетевых технологий является анализ существующих трендов для отделов инновационного развития предприятий, которая в

перспективе может помочь организациям, использующим данные технологии, повысить прибыли компании [3].

Техническая сфера применения интеллектуальных технологий

В настоящее время активно развивается применение интеллектуальных технологий в топливно-энергетической отрасли. Их использование не ограничивается лишь 1 участником модели «Выработка энергии – Абонент», а используется на всех этапах. Охват систем достаточно широк и за пределами этой модели т.к. он включает в себя и этап добычи полезных ископаемых – основного топлива для генерации электрической или тепловой энергии [4].

В последнее время в результате внедрения интеллектуальных технологий в энергетике распространение в основном получили цифровые двойники – электронные модели элементов энергосистемы (генераторы, электродвигатели, турбинные установки и т.п.). Поэтому большое количество публикаций в данном направлении посвящено именно их созданию и попытке их интеграции в общую энергетическую систему (модель «Генерация-Абонент») [5].

В энергетике основной целью применения интеллектуальных технологий является оптимизация работы оборудования (исключение дополнительных потерь, влияющих в конечном итоге на коэффициент полезного действия), снижение дополнительных потерь энергии [6-11], а также прогнозирование стоимости энергии на основании изменения климатических характеристик [11]. Для системы дизель-генератора с использованием интеллектуальных технологий основными инструментами регулирования являются частотный преобразователь и сервопривод топливоподачи на которые поступает команда с блока экономичного режима, где производится расчет наиболее целесообразных режимов работы.

В работе Костылева А. В. представлена иной вариант создания системы – без дополнительных датчиков контроля. В данной работе приведена лишь математическая модель и 1 элемент регулирования. Система не является обучаемой, но способна задавать характеристики согласно модели и по исходным данным оператора. В связи с тем, что данная математическая модель является достаточно неполной из-за отсутствия датчиков контроля и некоторых параметров, в ней применяются элементы теории математического моделирования, которые производят замену недостающих факторов. К такого рода заменам также можно отнести теории нечетких множеств и логики, которые приведены в ряде других работ [7].

Из-за планового внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в централизованные системы генерации в отечественной энергосистеме передачи электрической энергии возникла проблема с надежностью системы [12]. Для решения данной проблемы использовалось несколько подходов: полное или частичное прекращение генерации энергии, установка комплексов хранения энергии, перенаправление энергии в другие области с её недостатком (в т.ч. и продажа в другие страны), использование энергии в системе освещения автодорог в дневное время (т.е. сброс энергии за счет его перерасхода). С целью прогнозирования работы системы с помощью существующего оборудования и при внедрении на определенных участках установок с ВИЭ были созданы нейросетевые программные комплексы, которые отслеживают возможности применения, приведенных выше, методов работы региональных систем [13,14].

Цифровые двойники имеют как полную детализацию всех происходящих процессов, так и частично неизвестную. В связи с тем, что достаточно сложно производить сопряжение цифровых двойников всех без исключения элементов энергетической системы, на текущем этапе внедрения интеллектуальных технологий возникла потребность замены некоторых характеристик на осреднённые значения [7,8]. Но это в свою очередь порождает снижение надежности и точности некоторых моделей в комплексе. Поэтому существует еще один подход, который не связан с полной детализацией цифровой модели – использование

существующих систем АСУ для определения фактических характеристик интересующих элементов системы [9], которые напрямую не зависят от показателей модели.

Использование цифровых двойников у абонента (здания) энергетической системы также возможно, но оно не является единственным, как и в случае с централизованными энергетическими системами. Интеллектуальные технологии в данном элементе системы имеют и некоторое обособленное и независимое направление развития. Ввиду того, что некоторые инженерные системы могут быть относительно независимыми, то возможно управление и анализ энергопотребляющих систем с помощью измерительного и регулирующего оборудования, расположенного непосредственно в здании [15,16].

Применение интеллектуальных технологий в строительной отрасли

В строительной отрасли использование интеллектуальных систем в первую очередь было связано с расчетом рисков и анализа проектной документации. Так как в них не присутствуют абсолютно все элементы нейросетевых технологий. Например, при определении инфраструктурных экологических рисков происходило сравнение определенных статических проектных величин, которые не изменяются в течении времени т.е. динамика изменения экологических показателей в течении времени в них никак не учитывалась [17]. При использовании интеллектуальных технологий для проектной документации их применение ограничилось лишь сравнением проектных решений с нормативными показателями, которые базировались на основных нормативно-правовых документах (Своды Правил; ГОСТ; СанПин и т.п.) [18]. Например, при сравнении проектных ветровых нагрузок производилось сравнение принятых проектных значений различных коэффициентов запаса, которые использовались в расчетах и данных из СП 20.13330.2012 «Нагрузки и воздействия». В дальнейшем данная практика распространилась и на проектные решения для всего жизненного цикла здания, которая дополнительно учитывала изменения и создание новых нормативных документов [19].

Неотъемлемой частью строительной отрасли являются инженерные системы зданий и сооружений. В некоторых из них сегодня применяется частичное нейруправление, а именно использование существующих показателей фактического напора в напорном трубопроводе из системы водоснабжения или водоотведения для определения режима работы основных перекачивающих насосов [20].

В работе О.И. Кисельчука и ряда других авторов приводится система нейруправления насосными установками [21]. Целевым назначением использования нейроконтроллера является оптимизация работы элементов насосного оборудования с максимальной эффективностью при различных количествах работающих агрегатов и их скорости. Принципиальная схема разработанной системы приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема нейруправления насосными агрегатами

В системе водоснабжения также как и в электрических сетях в связи с определенными изменениями в гидравлических режимах (из-за увеличения количества различных типов абонентов) происходят аварии, т.е. снижается надежность системы. И на данный момент инженерами решается аналогичная проблема с возможностью повышения надежности системы за счет использования цифровых двойников трубопроводов системы водоснабжения [20,21].

В работе И.А. Архарова обобщены все существующие виды регулирования работы различных элементов оборудования с помощью интеллектуальных систем [22], которые могут быть применены для всех видов промышленности. В работе приведены принципиальные схемы регуляторов, которые работают по принципам отклонения и возмущения, а также схемы регулирования при использовании нечеткой логики. Некоторые виды данных систем были представлены в работах, связанных с оборудованием на энергетических сетях генерации [5-8]. В исследовании рассмотрены структурные схемы регулирования с элементами нейронных технологий. Первый вариант системы потенциально может работать только с данными из одной системы с некоторой задержкой их получения. Вторым вариантом более динамичен и за счет оптимизации распределения показателей и определения веса каждого показателя в общей (глобальной системе) может обрабатывать больший объем информации.

Одним из наиболее сложных комплексов, где сегодня внедряются нейросетевые технологии, являются инженерные системы обеспечения микроклимата. В данном направлении большее распространение получили не цифровые двойники энергетических систем зданий, а использование данных из систем автоматизированного управления (АСУ) [23]. В основном это связано, с большим распространением автоматизации систем теплоснабжения и вентиляции как в децентрализованных, так и в централизованных системах. Дополнительной причиной большего распространения использования данных с АСУ является факт того, что цифровые модели инженерных систем достаточно сложно конструируемы и их появления было намного позже, чем систем АСУ. Поэтому использование данных с оборудования АСУ в данных инженерных системах имеет приоритетное значение.

Использование нейро-технологий в здании на базе существующего измерительного оборудования систем автоматизированного управления позволит достаточно точно проводить мероприятия по сбережению энергетических ресурсов и повысить эффективность существующего инженерного оборудования. В ряде практических результатов непосредственного применения всех типов нейросетевых технологий в системах отопления и вентиляции удалось добиться сокращения расхода тепловой энергии на 38 % и более 50 % [24,25]. В системах кондиционирования воздуха данная тенденция также прослеживается, но из-за наличия большего числа оборудования (холодильные машины, компрессоры и т.п.) и необходимости в большем числе операций-регулирования и времени на их проведение данный эффект может быть ниже [26-28].

В работе А. Krūmiņš достаточно подробно описан вариант интегрирования погодозависимых нейроконтроллеров с функцией предрегулирования в существующую систему АСУ. Энергосберегающий эффект значителен и за период исследования достигает 38%, что указывает на успешное применение, разработанной системы. Основными элементами данной системы являются – нейроконтроллер и программный комплекс, разработанный в среде Matlab Simulink (MS). Стоит отметить, что сред MS достаточно популярный инструмент в энергетике, который используется для сопряжения всего оборудования и создания математических алгоритмов целеполагания. Нейроконтроллер имеет несколько режимов записи – от оборудования регулирования и контроля систем автоматики, данных будущей погоды (посредством подачи запроса в базу данных предполагаемой погоды через некоторое время), данных из собственных отдельно подсоединенных датчиков контроля. Все эти данные могут быть направлены на исходные установочные данные непосредственно в систему АСУ.

Параллельно производится расчет и контроль параметров, а также их оптимизация (осреднение и т.п.) и преобразование в некоторую единую функциональную зависимость. Также в системе в реальном времени мониторятся и проверяются существующие параметры и их отклонения с моментальным регулированием. После установления параметров нейроконтроллер сохраняет показания всех параметров системы (положения регуляторов расхода, режим работы насосного оборудования и т.п.) и происходит дальнейший мониторинг системы. На рисунке 2 представлена блок-схема разработанной системы [24].



Рисунок 2 – Принципиальная схема интегрированной системы нейруправления в существующую систему автоматизации

Режим преднастройки включает в себя погодозависимую часть, которая может настроить инженерную систему с АСУ таким образом, чтобы она соответствовала режиму работы оборудования при целевой температуре воздуха через некоторое время с учетом инерционности системы, которая была определена в период самообучения. Данный режим может быть создан и с помощью других видов программных комплексов [28].

Аппаратная часть системы состоит из двух элементов: контроллера системы АСУ (ESP-8266 на базе Arduino) с присоединенными к ней датчиками температуры, расхода и т.п. и микроЭВМ (Raspberry Pi 3). К устройствам возможно подключение других видов датчиков и как следствие задание иных исходных данных с возможностью получения отличных от исходных зависимостей [29]. Передача данных из контроллера АСУ в микроЭВМ производится с помощью протоколов HTTP. МикроЭВМ может быть подсоединено к удаленной облачной подсистеме среды Matlab, где производится оптимизация работы оборудования, расчет положений оборудования и т.п.

В работе Б. Су дополнительно применялась система с цифровым двойником, а их результаты исследования базируются не только на фактически установленных системах АСУ с корректировкой данных, но и на комплексной теоретической модели [25]. Тем не менее, в их работе дополнительно приводится влияние времени отклика системы на энергопотребление в результате команды регулирования от нейросетевых контроллеров и их теоретических расчетов. Ввиду того, что передача сигнала происходит через радиочастотные каналы, а также производится параллельный непосредственный расчет математической модели, происходит некоторая задержка выполнения действий и как следствие более поздний отклик системы на команду. Влияние этих явлений на энергопотребление составляет от 0,2% до 43,92%. Проблему с запаздыванием сигналов присутствует и на датчиках без радиочастотной передачи данных. Моделированию данных типов устройств посвящено достаточно много работ т.к.

данная проблема присутствовала уже с прошлого века. При их расчетах (при процессе моделирования) возможно применение регулярного теплового режима Г.М. Кондратьева.

Относительно новым направлением в использовании нейроконтроллеров является их использование в диагностике инженерных систем [30,31]. Их основное назначение выявление неисправностей в работе систем. Основным принципом действия – является условие, что система при определенных исходных данных должна работать согласно расчетной модели с некоторым допустимым отклонением. При ненадлежащей работоспособности системы показатели не могут поддерживаться в течение некоторого отведенного промежутка время (заданного оператором) при определенных исходных данных. Данный принцип заложен в систему для определения вероятностных проблем.

Использование нейроконтроллеров для 1 инженерной системы можно охарактеризовать как локальную систему. Она охватывает лишь определенную инженерную систему. При использовании совокупности инженерных систем (отопления, вентиляция, освещение и т.п.) данную систему, состоящую из более чем 1 инженерной системы, можно охарактеризовать как глобальную систему [32]. Соединение нескольких систем может производиться как с помощью нейроконтроллеров каждой системы, так и с помощью единого контроллера, который будет охватывать несколько инженерных систем. При использовании нескольких контроллеров отклик системы будет значительно выше из-за меньшего использования вычислительных ресурсов и меньшего количества регулируемого оборудования, а при наличии одного контроллера на несколько систем будет значительно увеличено время регулирования системы. При этом возможна некоторая оптимизация вычислительных возможностей т.к. некоторые показатели будут относительно идентичными.

Анализ результатов исследования

Основной задачей на данном этапе развития нейросетевых технологий в системах обеспечения микроклимата является определение вариантов внедрения устройств в инженерные системы. Их внедрение возможно как на локальном уровне в рамках одной системы (минимум: без больших массивов обрабатываемых данных для не более чем 1 диктующего показателя регулирования) так и на глобальном уровне в рамках нескольких инженерных систем здания и с обработкой большого количества данных в т.ч. с более чем 1-им диктующим показателем (самый возможный максимум). Предполагаются два направления внедрения: локальный и глобальный. Варианты локального внедрения нейросетевого управления для здания можно разделить 2 типа: 1 инженерная система – 1 диктующий показатель микроклимата и 1 инженерная система – более 1 диктующего показателя микроклимата.

Варианты глобального внедрения нейросетевого управления для здания также можно разделить 2 типа: более 1 инженерной системы – не более 1 диктующего показателя микроклимата и более 1 инженерной системы – более 1 диктующего показателя микроклимата.

Не менее важным будет и определение режимов работы нейроконтроллера, которые требуются в зависимости от технологических факторов. Рекомендуемый период исследования процессов в здании – 1 год т.к. за этот промежуток времени система проведет анализ всех периодов года и их возможные варианты регулирования. Эти режимы можно выделить следующим образом: анализ текущих показателей при запуске существующего оборудования; анализ наиболее благоприятного (эффективного или энергосберегающего) места регулирования. Данный режим необходим при установке нейроконтроллеров в связке с котельным и насосным оборудованием, в которых возможно качественное и количественное регулирование; режим анализа данных; наикратчайшее время для регулирования системы;

наиболее энергосберегающий вариант регулирования системы при существующих заданных параметрах поддержания параметров; наиболее энергоэффективные промежуточные режим работы с переменным количеством оборудования. Данных режимов возможно много из-за технологических особенностей зданий. Например, в производственном секторе возможны посменные работы, где максимальное количество смен – 2. При отработке в 1 смене до 8 часов. Он является наиболее сложным и требующим анализа с позиции полученных данных; наиболее энергоэффективный режим работы с максимальным количеством оборудования; аварийный режим работы, соответствующий проектному режиму (он может быть использован в виде исходного режима).

Выводы

1. Нейросетевые и интеллектуальные технологии в настоящее время применяются в различных отраслях народного хозяйства с целью повышения безопасности и эффективности технологических процессов.
2. Нейроуправление инженерными системами зданий и сооружений представляет собой сложную многокомпонентную структуру, включающую внешние и внутренние данные (климатические характеристики и поддерживаемые параметры внутренней среды), анализирующие программные комплексы и регулирующие средства управления.
3. Одним из ключевых элементов нейросетевых технологий является анализирующий и регулирующий аппарат (нейроконтроллер), объединяющий информационные и технологические системы.
4. Интеллектуальные технологии управления инженерными системами зданий и сооружений являются важным инструментом повышения энергоэкономичности и надёжности эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ирхин И. А., Булатов В. Г., Воронцов К. В. Аддитивная регуляризация тематических моделей с быстрой векторизацией текста // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12, № 6. С. 1515-1528. doi:10.20537/2076-7633-2020-12-6-1515-1528.
2. Ирхин И. А., Воронцов К. В. Сходимость алгоритма аддитивной регуляризации тематических моделей // Труды института математики и механики УрО РАН. 2020. Т. 26, № 3. С. 56-68. doi:10.21538/0134-4889-2020-26-3-56-68.
3. Герасименко Н. А., Чернявский А. С., Никифорова М. А., Никитин М.Д., Воронцов К.В. Инкрементальное обучение тематических моделей для поиска трендовых тем в научных публикациях // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2022. Т. 508, № 1. С. 106-108. doi:10.31857/S2686954322070086.
4. Филиппов В. В. Анализ научно-технических работ по автоматическому управлению теплоэнергетических установок // Современные достижения научно-технического прогресса. 2023. № 3(8). С. 9-11. doi:10.18411/sdntp-05-2023-02.
5. Фролов В. Я., Жилиготов Р. И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки горного института. 2018. Т. 229. – С. 92-97.
6. Муртазин Т. Э., Шевченко А. А., Титов В. Г. Система векторного управления автономным электроприводом // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2023. Т. 26. № 4. С. 449-456. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-4-449-456.
7. Костылев А. В., Есаулкова Д. В., Казаков Е. Г. Применение нейроуправления в асинхронном электроприводе со скалярным управлением // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. 2014. № 1. С. 207-217.
8. Burneyster M. V., Bulatov R. V., Berdyshev I. I. Development of a Method for Optimizing the Voltage Mode Based on Fuzzy Logic // IEEE. С. 9782944. doi:10.1109/Inforino53888.2022.9782944.
9. Wu Z., Gao Z., Li D., Chen Y., Liu Y. On transitioning from PID to ADRC in thermal power plants // Control Theory and Technology. 2021. Т. 19. С. 3-18.
10. Бродач М.М., Шилкин Н.В. Нейронные сети: оптимальное управление отпуском тепловой энергии // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2019. №8. С. 52-57.

11. Блинова К. А., Курналеева А. А., Бурмейстер М. В., Булатов Р. В. Рыночный механизм управления режимами работы генерирующего оборудования электростанций // XXXIII Международная научно-практическая конференция «EUROPEAN RESEARCH»: сборник трудов. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 74-78.
12. Веренцов Л. А., Бурмейстер М. В., Стаценко Д. В., Маленкова Е. А. Оценка эквивалентной инерции в ЭЭС со значительной долей ВИЭ // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 10(148). С. 11-14.
13. Samoilov A. A., Sergeeva, M. M., Burmeyster, M. V., Kislova, E. A., Zaliznyi, S. A. Intelligent engineering of electric energy storage systems in the Russian Federation: Fundamentals // IEEE. 2021. С. 1-5.
14. Болдырев В.В., Горькавый М.А. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения // Учен. зап. КнАГТУ. 2021. № 3. С. 9-18.
15. Das H. P., Lin Y. W., Agwan U., Spangher L., Devonport A., Yang Y., Drgona J., Chong A., Schiavon S., Spanos C. J. Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings // Environmental Data Science. 2024. Т. 3. С. e1. doi:10.1017/eds.2023.43
16. Alanne K., Sierla S. An overview of machine learning applications for smart buildings // Sustainable Cities and Society. 2022. Т. 76. С. 103445.
17. Burkov V., Titarenko B. Economic mechanisms for environmental risk management // E3S Web of Conferences. 2019. Т. 91. С. 08009.
18. Галкина Е. В. Анализ инструментов верификации проектной документации // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 6. С. 95-97. doi:10.24153/2079-5920-2018-8-6-95-97.
19. Galkina E., Kuzina O. Building information model verification at the lifecycle stage of construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Т. 365 (5). С. 062031. doi:10.1088/1757-899X/365/6/062031.
20. Burian S. O., Kiselychnyk O., Pushkar M. V., Reshetnik V. S., Zemlianukhina H. Y. Energy-efficient control of pump units based on neural-network parameter observer // Technical Electrodynamics. 2020. № 1. С. 71-77. doi:10.15407/techned2020.01.071.
21. Gromov G. N., Primin O. G. Use of genetic algorithms for calibration of hydraulic models of water supply systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Т. 456. С. 012108. doi:10.1088/1757-899X/456/1/012108.
22. Мамедов В. М., Архаров И. А. Перспективы методов регулирования в инженерных системах // Холодильная техника. 2022. № 4. С. 213-220. doi:10.17816/RF321953.
23. Абдуллин В. В., Шнайдер Д. А., Курзанов С. Ю., Яворовский Ю. В. Использование технологии "интернета вещей" в отоплении зданий: упреждающее управление, распределённый мониторинг, интеллектуальная балансировка // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2018. № 8(200). С. 54-58.
24. Krūmiņš, A., Bogdanovs, N., Beļinskis, R., Mežale, K., Garjāns, M. Increasing Buildings Automation Systems Efficiency with Real-Time Simulation Trough Improved Machine Self-learning Algorithms // Springer Proceedings in Energy. 2019. С. 41-49. doi:10.1007/978-3-030-00662-4_4
25. Su B., Wang S., Li W. Impacts of uncertain information delays on distributed real-time optimal controls for building HVAC systems deployed on IoT-enabled field control networks // Applied Energy. 2021. Т. 300. С. 117383.
26. Şahin A. Ş. Performance analysis of single-stage refrigeration system with internal heat exchanger using neural network and neuro-fuzzy // Renewable energy. 2011. №. 10 (36). С. 2747-2752.
27. Pérez-Gomariz M., López-Gómez A., Cerdán-Cartagena F. Artificial neural networks as artificial intelligence technique for energy saving in refrigeration systems — A review // Clean Technologies. 2023. № 1 (5). С. 116-136.
28. Zhang Y., Zhou Z., Liu J., Yuan J. Data augmentation for improving heating load prediction of heating substation based on TimeGAN // Energy. 2022. Т. 260. С. 124919.
29. Li C., Cui C., Li M. A proactive 2-stage indoor CO2-based demand-controlled ventilation method considering control performance and energy efficiency // Applied Energy. 2023. Т. 329. С. 120288.
30. Zhao Y., Li T., Zhang X., Zhang C. Artificial intelligence-based fault detection and diagnosis methods for building energy systems: Advantages, challenges and the future // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Т. 109. С. 85-101.
31. Taheri S., Ahmadi A., Mohammadi-Ivatloo B., Asadi S. Fault detection diagnostic for HVAC systems via deep learning algorithms // Energy and Buildings. 2021. Т. 250. С. 111275.
32. Yang S., Wan M. P., Ng B. F., Dubey S., Henze G. P., Chen W., Baskaran K. Model predictive control for integrated control of air-conditioning and mechanical ventilation, lighting and shading systems // Applied Energy. 2021. №12 (300). С. 117325.

REFERENCES

1. Irkhin I.A., Bulatov V.G., Vorontsov K.V. Additive regularization of topic models with fast text vectorization. *Computer Research and Modeling*. 2020. Vol. 12. No. 6. Pp. 1515-1528. (rus).
2. Irkhin I.A., Vorontsov K.V. Convergence of the algorithm of additive regularization of topic models. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (Suppl.)*. 2021. Vol. 315. Suppl. 1. Pp. S128–S139. (rus).

3. Gerasimenko N. A., Chernyavsky A. S., Nikiforova M. A., Nikitin M. D., Vorontsov K. V. Inkremental'noye obucheniye tematiceskikh modeley dlya poiska trendovykh tem v nauchnykh publikatsiyakh [Incremental training of topic models for searching for trending topics in scientific publications]. *Doklady Rossijskoj Akademii Nauk. Matematika, Informatika, Processy Upravleniya*. 2022. vol. 508, no. 1. pp. 106-108. doi:10.31857/s2686954322070086. (rus).
4. Filippov V. V. Analiz nauchno-tehnicheskikh rabot po avtomaticheskomu upravleniyu teploenergeticheskikh ustanovok [Analysis of scientific and technical works on automatic control of thermal power plants]. *Sovremennyye dostizheniya nauchno-tehnicheskogo progressa*. 2023. Vol. 8. No. 3. Pp. 9-11. doi:10.18411/sdntp-05-2023-02. (rus).
5. Frolov V.Y., Zhiligitov R.I. Development of sensorless vector control system for permanent magnet synchronous motor in Matlab Simulink. *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 229. p. 92. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92. (rus).
6. Murtazin T. E., Shevchenko A. A., Titov V. G. Sistema vektornogo upravleniya avtonomnym elektroprivodom [Vector control system for an autonomous electric drive]. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2023. Vol. 26. No. 4. Pp. 449-456. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-4-449-456. (rus).
7. Kostylev A. V., Esaukova D. V., Kazakov E. G. Primeneniye neyrouravneniya v asinkhronnom elektroprivode so skalyarnym upravleniyem [Application of neural control in an asynchronous electric drive with scalar control]. *Energetika. Innovatsionnyye napravleniya v energetike. calst-tehnologii v energetike*. 2014. No. 1. Pp. 207-217. (rus).
8. Burmeyster M. V., Bulatov R. V., Berdyshev I. I. Development of a Method for Optimizing the Voltage Mode Based on Fuzzy Logic. *IEEE*. Pp. 9782944. doi:10.1109/Inforino53888.2022.9782944.
9. Wu Z., Gao Z., Li D., Chen Y., Liu Y. On transitioning from PID to ADRC in thermal power plants. *Control Theory and Technology*. 2021. Vol. 19. Pp. 3-18.
10. Brodach M.M., Shilkin N.V. Neyronnyye seti: optimal'noye upravleniye otpuskom teplovoy energii [Neural networks: optimal control of thermal energy supply]. AVOK: Ventilyatsiya, Otopleniye, Konditsionirovaniye Vozdukh, Teplosnabzheniye i Stroitel'naya Teplofizika. 2019. no. 8. pp. 52-57. (rus).
11. Blinova K. A., Kurnaleyeva A. A., Burmeyster M. V., Bulatov R. V. Rynochnyy mekhanizm upravleniya rezhimami raboty generiruyushchego oborudovaniya elektrostantsiy [Market mechanism for managing the operating modes of generating equipment of power plants]. XXXIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «EUROPEAN RESEARCH» [Proceedings of XXXIII International Scientific and Practical Conference «EUROPEAN RESEARCH»]. Penza: Nauka i Prosveshcheniye, 2021. Pp. 74-78. (rus).
12. Verentsov L. A., Burmeister M. V., Statsenko D. V., Malenkova E. A. Otsenka ekvivalentnoy inertsii v ees so znachitel'noy doley vie [Assessment of equivalent inertia in an eps with a significant share of renewable energy sources]. *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2023. Vol. 148. No. 10. Pp. 11-14. (rus).
13. Samoilov A. A., Sergeeva, M. M., Burmeyster, M. V., Kislova, E. A., Zaliznyi, S. A. Intelligent engineering of electric energy storage systems in the Russian Federation: Fundamentals // *IEEE*. 2021. Pp. 1-5.
14. Boldyrev V.V., Gorkavy M.A. Razrabotka intellektual'nogo modulya upravleniya avtomatizirovannoy avtonomnoy sistemoy energoobespecheniya [Development of an intelligent control module for an automated autonomous power supply system]. *Uchen. zap. KnaGTU*. 2021. No. 3. Pp. 9-18. (rus).
15. Das H. P., Lin Y. W., Agwan U., Spangher L., Devonport A., Yang Y., Drgona J., Chong A., Schiavon S., Spanos C. J. Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings. *Environmental Data Science*. 2024. Vol. 3. Pp. e1. doi:10.1017/eds.2023.43
16. Alanne K., Sierla S. An overview of machine learning applications for smart buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 76. Pp. 103445.
17. Burkov V., Titarenko B. Economic mechanisms for environmental risk management. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 91. Pp. 08009.
18. Galkina E.V. Analiz instrumentov verifikatsii proyektnoy dokumentatsii [Analysis of design documentation verification tools]. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2018. No. 6. Pp. 95-97. doi:10.24153/2079-5920-2018-8-6-95-97. (rus).
19. Galkina E., Kuzina O. Building information model verification at the lifecycle stage of construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. No. 5. Pp. 062031. doi:10.1088/1757-899X/365/6/062031.
20. Burian S. O., Kiselychnyk O., Pushkar M. V., Reshetnik V. S., Zemlianukhina H. Y. Energy-efficient control of pump units based on neural-network parameter observer. *Technical Electrodynamics*. 2020. No. 1. Pp. 71-77. doi:10.15407/techned2020.01.071.
21. Gromov G. N., Primin O. G. Use of genetic algorithms for calibration of hydraulic models of water supply systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. Pp. 012108. doi:10.1088/1757-899X/456/1/012108.
22. Vladislav M.M., Arkharov I.A. Prospects for control methods in engineering systems. *Refrigeration Technology*. 2022. Vol. 111. No. 4. Pp. 213–220. doi:10.17816/RF321953. (rus).
23. Abdullin V.V., Shnayder D.A., Kurzanov S. Yu., Yavorovsky Yu. V. IoT technology applications to building heating: predictive control, distributed monitoring, smart hydraulic balancing. Plumbing, Heating, Air-conditioning. 2018. Vol. 200. No. 8. Pp. 54-58. (rus).

24. Krūmiņš, A., Bogdanovs, N., Beļinskis, R., Mežale, K., Garjāns, M. Increasing Buildings Automation Systems Efficiency with Real-Time Simulation Through Improved Machine Self-learning Algorithms. *Springer Proceedings in Energy*. 2019. Pp. 41-49. doi:10.1007/978-3-030-00662-4_4
25. Su B., Wang S., Li W. Impacts of uncertain information delays on distributed real-time optimal controls for building HVAC systems deployed on IoT-enabled field control networks. *Applied Energy*. 2021. Vol. 300. Pp. 117383.
26. Şahin A. Ş. Performance analysis of single-stage refrigeration system with internal heat exchanger using neural network and neuro-fuzzy. *Renewable energy*. 2011. Vol. 36. No. 10. Pp. 2747-2752.
27. Pérez-Gomariz M., López-Gómez A., Cerdán-Cartagena F. Artificial neural networks as artificial intelligence technique for energy saving in refrigeration systems — A review. *Clean Technologies*. 2023. Vol. 5. No. 1. Pp. 116-136.
28. Zhang Y., Zhou Z., Liu J., Yuan J. Data augmentation for improving heating load prediction of heating substation based on TimeGAN. *Energy*. 2022. Vol. 260. Pp. 124919.
29. Li C., Cui C., Li M. A proactive 2-stage indoor CO₂-based demand-controlled ventilation method considering control performance and energy efficiency. *Applied Energy*. 2023. Vol. 329. Pp. 120288.
30. Zhao Y., Li T., Zhang X., Zhang C. Artificial intelligence-based fault detection and diagnosis methods for building energy systems: Advantages, challenges and the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 109. Pp. 85-101.
31. Taheri S., Ahmadi A., Mohammadi-Ivatloo B., Asadi S. Fault detection diagnostic for HVAC systems via deep learning algorithms. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 250. Pp. 111275.
32. Yang S., Wan M. P., Ng B. F., Dubey S., Henze G. P., Chen W., Baskaran K. Model predictive control for integrated control of air-conditioning and mechanical ventilation, lighting and shading systems. *Applied Energy*. 2021. Vol. 300. No. 12. Pp. 117325.

Информация об авторах

Шубин Игорь Любимович

ФГБУ «Научно-Исследовательский Институт Строительной Физики РААСН», г. Москва, Россия, д-р техн. наук, член-корр. РААСН, директор института, E-mail: niisf@niisf.ru

Стронгин Андрей Семенович

ФГБУ «Научно-Исследовательский Институт Строительной Физики РААСН», г. Москва, Россия, канд. техн. наук, с.н.с., заведующий лабораторией «Экологическая безопасность и энергоэффективность инженерного оборудования зданий», E-mail: strongin@yandex.ru

Разаков Мухаммет Азатович

ФГБУ «Научно-Исследовательский Институт Строительной Физики РААСН», г. Москва, Россия, инженер лаборатории «Экологическая безопасность и энергоэффективность инженерного оборудования зданий», E-mail: muhammet@nln.ru

Information about authors

Shubin Igor L.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, doctor in tech. sc., corr. member of RAACS, director, E-mail: niisf@niisf.ru

Strongin Andrew S.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, candidate in tech. sc., senior researcher, head of laboratory «Environmental safety and energy efficiency of buildings engineering equipment», E-mail: strongin@yandex.ru

Razakov Muhammet A.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, engineer of laboratory «Environmental safety and energy efficiency of buildings engineering equipment», E-mail: muhammet@nln.ru