УДК 681.5 DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6. 734-747

Автоматизация процессов компенсационно-предиктивного управления климат-системами интеллектуального здания

А.В. Кычкин, А.И. Дерябин, О.Л. Викентьева, Л.В. Шестакова
Пермский филиал «Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”», (НИУ ВШЭ — Пермь), 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, д. 38

АННОТАЦИЯ
Введение. На основе накопленного опыта в области автоматизации зданий и технических возможностей IoT формируется новый подход к управлению инженерными подсистемами, обеспечивающий заданные параметры качества на протяжении всего периода эксплуатации. В рамках этого подхода исследуются компенсационные и предиктивные алгоритмы, обеспечивающие контроль параметров климата в здании, на основе контроллеров IoT. Цель — повышение эффективности управления инженерными подсистемами технического обеспечения интеллектуальных зданий на основе системы управления (СУ) с компенсацией возмущающих воздействий и предсказание их изменений на базе контроллера IoT и аналитического сервера.
Материалы и методы. С целью повышения качества управления используются различные алгоритмы, основанные на анализе собираемых с контроллеров данных. Накопленная информация об объекте за весь период эксплуатации может использоваться для построения модели здания, которая применяется для реализации предиктивного управления, позволяющего заранее прогнозировать параметры, действующие на объект, и компенсировать их заранее в условиях инертности. Постоянная адаптация модели СУ к реальности дает возможность непрерывно оптимизировать настройки алгоритма регулирования, обеспечивая эффективную работу локальных контуров регулирования.
Результаты. Предложена структура СУ подсистемами интеллектуального здания с предсказанием и компенсацией возмущающих воздействий на базе контроллера IoT. Алгоритм компенсации обновляется в зависимости от динамики свойств объекта, качества регулирования и наличия данных, наиболее подходящих для идентификации.
Выводы. Возможности СУ на базе контроллера IoT и выработки компенсационно-предиктивного управляющего сигнала с размещением алгоритма управления на сервере в «облаке» продемонстрированы на модели управления температурой в помещении. Рассмотрены имитационные модели процесса изменения температуры помещения: без СУ; модель с ПИ-регулятором с компенсацией возмущающих воздействий; модель с компенсацией возмущающих воздействий для СУ на базе контроллера IoT. Структурная и параметрическая идентификация моделей осуществлена методом активного эксперимента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: киберфизическая система, система управления, интеллектуальное здание, кондиционирование и вентиляция, Интернет вещей, интеллектуальный анализ данных, предиктивная аналитика, энергосбережение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Кычкин А.В., Дерябин А.И., Викентьева О.Л., Шестакова Л.В.* Автоматизация процессов компенсационно-предиктивного управления климат-системами интеллектуального здания // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 6. С. 734–747. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.734-747

Compensation predictive automation of the smart house climate control systems

Aleksey V. Kychkin, Alexandr I. Deryabin, Olga L. Vikentyeva, Lidiia V. Shestakova
National Research University Higher School of Economics — Perm (HSE — Perm), 38 Studencheskaya st., Perm, 614070, Russian Federation

ABSTRACT
Introduction. The gained experience in the field of building automation and IoT technologies yields a new approach to the management of engineering subsystems that provides stated parameters of operation quality throughout the entire building lifecycle. This paper explores compensatory and predictive algorithms in the scope of the aforementioned approach to manifest control over building climate parameters utilizing IoT controllers. This research aims to improve the management efficiency of smart house engineering subsystems through the implementation of a control system (CS) capable to compensate disturbances and predict their variations using an IoT controller and an analytical server.
Materials and methods. In order to improve the quality of control, various algorithms based on analysis of data collected from controllers can be employed. The collected data about the object accumulated over the entire period of operation can be used to build a model for the purposes of predictive control. The predictive control allows to forecast the parameters having an effect on the object and compensate it beforehand under the inertia conditions. The continuous adaptation and

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 14. Выпуск 6, 2019
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 14. Issue 6, 2019

© А.В. Кычкин, А.И. Дерябин, О.Л. Викентьева, Л.В. Шестакова, 2019
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

adjustment of the CS model to operating conditions allows permanent optimizing the settings of the control algorithm ensuring the efficient operation of local control loops.
Results. The CS is based on an IoT controller and able to predict and compensate potential disturbances. The compensation algorithm is updated depending on the behavior of the object properties, quality of control and availability of data most suitable for identification.
Conclusions. The capabilities of the control system based on the IoT controller and generation of a compensatory and predictive control signal with the algorithm hosted at a cloud server are demonstrated on the indoor temperature control model. The following simulation models of the indoor temperature variation process are considered: model without CS, model with proportional plus integral controller with disturbance compensation and model with IoT controller-based CS with disturbance compensation. Structural and parametric identification of the models are accomplished by means of active experiment.

KEYWORDS: cyber-physical system, control system, smart house, air conditioning and ventilation, Internet of things, intellectual data analysis, predictive analytics, energy saving

FOR CITATION: Kychkin A.V., Deryabin A.I., Vikentyeva O.L., Shestakova L.V. Compensation predictive automation of the smart house climate control systems. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(6):734-747. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.734-747

ВВЕДЕНИЕ

На основе накопленного опыта в области автоматизации зданий и технических возможностей, появившихся с возникновением технологии IoT, формируется новый подход к управлению техническими объектами и подсистемами, обеспечивающий заданное качество управления на всем периоде эксплуатации.

Технология IoT позволяет подключить к процессу повышения качества управления зданием любые доступные сегодня инструменты, задействовать большие вычислительные и аналитические мощности. При этом в функции аппаратного обеспечения объекта управления (ОУ) входят измерение технологических параметров, реализация управляющих воздействий и передача информации в облачный сервер, хранящий информацию в единой базе данных (БД). Как правило, в этом случае используются специальные вертикально-специфичные IoT платформы, ориентированные на применение в системах «умный дом», и оптимизированные для сокращения сроков разработки решений по автоматизации.

Единая БД IoT платформы аккумулирует всю информацию обо всех объектах, подключенных к системе управления (СУ), например, данные по зданию или по нескольким зданиям, расположенным на разных территориях. Такая архитектура системы позволяет оптимизировать работу вычислительных мощностей, распределяя аналитические ресурсы облачного сервера между всеми пользователями системы. Общий подход к управлению типовыми технологическими объектами и единый алгоритм анализа работы СУ на основе IoT контроллеров позволяет быстрее накапливать информацию для оценки эффективности используемых алгоритмов управления и быстрее их оптимизировать.

Вопросы, связанные с управлением подсистемами интеллектуальных зданий, изучаются многими авторами. Так, в работах [1–2] рассматривается управление киберфизическими системами. В частности, вводится понятие киберфизического управления. Киберфизическое управление строится сетецентрически. В центре находится ядро управления. Ключевым в схеме является наличие интеллектуальных узлов оперативного управления или интеллектуальных узлов циклического управления.

В труде [3] разработана компьютерная модель интеллектуального здания, позволяющая моделировать работу основных инженерных подсистем здания и алгоритмов управления этими подсистемами. Авторы рассматривают интеллектуальное здание, как гибридную систему. Гибридность заключается в том, что взаимодействующие элементы системы и их поведение описываются как непрерывными, так и дискретными процессами. В качестве инструмента моделирования используется система Simulink пакета MatLab. Построены модели управления электрическим освещением помещения и СУ микроклиматом. Численные эксперименты позволили получить набор логических правил, который может использоваться при разработке алгоритмов управления интеллектуальным зданием.

В статье [4] исследована задача поддержания неравновесной конфигурации температурного поля в системе сообщающихся друг с другом помещений

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Том 14. Выпуск 6, 2019
Volume 14. Issue 6, 2019

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 14. Выпуск 6, 2019
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 14. Issue 6, 2019

(камер) с минимальными затратами энергии. Сформулирована задача оптимизации системы отопления, получены термодинамические характеристики идеальной системы отопления, учтены реальные условия реализуемости систем отопления и дано сравнение их характеристик с предельно возможными.

Разработке и реализации в пакете MatLab модели поведения тепловых процессов в помещении для АСУ энергосбережением здания посвящена публикация [5]. В основу математического моделирования положен метод дифференциальных балансных уравнений. В качестве зависимых переменных для составления баланса используется тепловая энергия, подведенная к объекту и рассеянная в окружающей среде. Численный эксперимент позволяет оценить коэффициенты параметров теплового контура (теплоемкость стен и перекрытий, теплоотдача отопительных приборов, коэффициенты излучения тепла); рассчитать экономию тепловой энергии при регулировании температуры внутри помещения в течение суток; оценить основные характеристики тепловых режимов помещения (время нагревания и остывания объекта при изменении параметров системы).

В публикации [6] исследуется влияние энергии солнечного излучения на тепловые процессы внутри здания. Предложена комплексная модель здания и блок имитации погодных условий для оценки потенциала энергосбережения типичных зданий и сооружений. Имитационная модель построена на базе приложения Simulink математического пакета MatLab. Результаты моделирования доказывают энергетическую эффективность многоконтурной СУ с распределенной структурой относительно централизованной системы с одним контуром регулирования.

Для управления энергосберегающими процессами в общественном здании предложена математическая модель, учитывающая лучистые и конвективные потоки [7]. Модель состоит из трех дифференциальных уравнений теплового баланса.

Разработаны математические модели теплового режима здания, в которых предложены разные варианты управляющего воздействия: мощность системы отопления, температура теплоносителя на входе в систему отопления и расход [8]. Построенные модели позволяют учитывать нестационарность температуры наружного воздуха.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Управление некоторым техническим ОУ подсистем здания обычно состоит в выработке команд, реализация которых обеспечивает целенаправленное изменение состояния этого объекта при соблюдении заранее обусловленных требований и ограничений [9]. Например, управление тепловым режимом внутри помещения может осуществляться путем изменения расхода подаваемого теплоносителя в соответствии с требуемой температурой при соблюдении минимизации затрат на потребление энергии. Частным случаем управления является сохранение некоторого желаемого состояния объекта в условиях, когда он получает непредвиденные воздействия со стороны внешней среды, нарушающие это состояние. В случае управления тепловым режимом помещения такими возмущениями может быть температура окружающей среды и температура теплоносителя.

На рис. 1 показана обобщенная схема адаптивного регулирования параметра ОУ. Схема состоит из ОУ с регулируемым параметром, регулятора, например ПИ-регулятора, блока адаптации алгоритма регулирования, предназначенного для выполнения настроек регулятора в зависимости от внешних условий.

На вход регулятора по каналу обратной связи подается сигнал о текущем состоянии ОУ y. Отклонение ε текущего состояния ОУ от желаемого значения x ведет к изменению управляющего воздействия на объект μ так, чтобы это отклонение было ликвидировано.

На базе такого класса алгоритмов, кроме одноконтурных систем стабилизации (задание постоянное) и следящих систем (задание изменяется пользователем или по заданной программе), строятся каскадные системы регулирования, системы с компенсацией возмущений, алгоритмы усовершенствованного регулирования.

Для ОУ подсистем зданий характерно изменение свойств в процессе эксплуатации. Так, например, динамические характеристики помещения, как тепловой режим, будут меняться в зависимости от времени года, нагрузки (количество людей, находящихся в помещении; работающих устройств, являющихся источником тепла). В таких условиях адаптивный алгоритм регулирования подстраивается под изменения ОУ, например, корректируя коэффициенты алгоритма регулирования (рис. 1), на основе статистических данных изменения выходной величины ОУ y и управляющего воздействия x.

Существуют различные классы адаптивных регуляторов, различающихся способами определения текущей модели объекта и вычисления параметров регулятора:

- **активный адаптивный регулятор** непрерывно вычисляет текущую дисперсию регулируемой величины. При превышении дисперсией заданного значения выдается сигнал на начало действий по перестройке параметров регулятора. С целью пере-

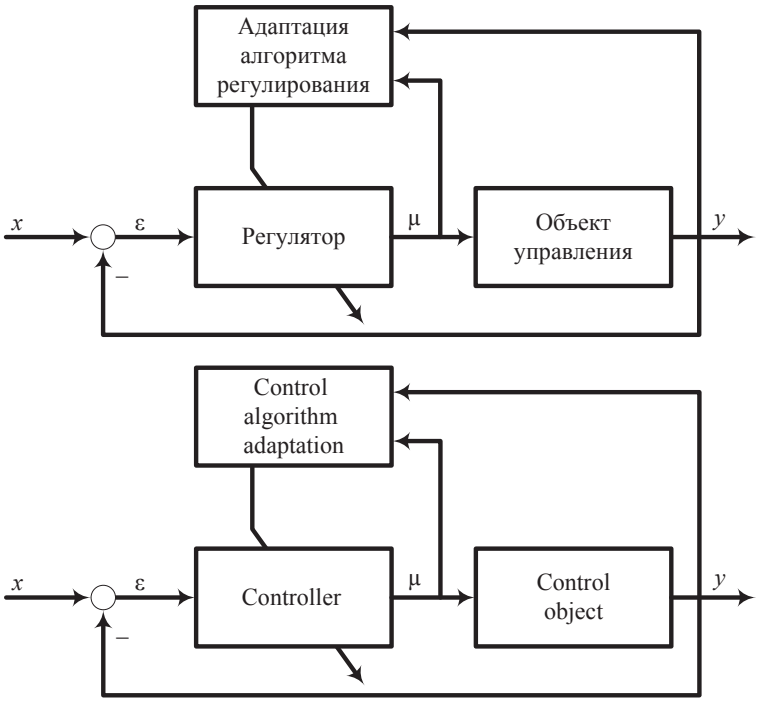

Рис. 1. Обобщенная схема адаптивного управления параметром ОУ

Fig. 1. Generalized flowchart of CO-parameter adaptive control

стройки параметров на вход объекта подается скачкообразный сигнал или ряд других специальных испытательных сигналов (импульсной, синусоидальной формы), измеряется реакция регулируемой величины на испытательный сигнал и строится актуальная модель объекта, например в виде передаточной функции (ПФ), на основании которой адаптируется алгоритм регулирования. При этом амплитуда испытательного сигнала должна быть такой, что его воздействие не привело бы к существенным отклонениям регулируемой величины, но быть различимой на фоне имеющихся возмущений и помех измерения;

- **адаптивный регулятор с текущей идентификацией** включает в себя блок идентификации объекта, который непрерывно получает информацию о состоянии ОУ и входном управляющем воздействии на объект и на основании полученных данных непрерывно идентифицирует модель ОУ. На основании модели объекта настройки регулятора непрерывно изменяются, таким образом, подстраиваясь под текущее состояние объекта. Такой подход включает в себя нетривиальную задачу идентификации объекта в замкнутом контуре по результатам пассивного эксперимента.

К современным алгоритмам управления относятся алгоритмы, основанные на использовании нейросетевых технологий, алгоритмов нечеткого управления (fuzzy logic), и других интеллектуальных методов, оперирующих сложным математическим аппаратом.

Снижение затрат на проектирование, внедрение и эксплуатацию технических объектов в зданиях дает применение технологий Интернета вещей (IoT) и облачных вычислений [10–12]. Распределение элементов адаптивного управления между объектом и облачным сервером приведено на рис. 2. Под облачным сервером будем понимать виртуальный сервер в виде онлайн-ресурса, в котором данные хранятся и обрабатываются на многочисленных распределенных в сети серверах, при условии, что архитектура сети остается не известной пользователям.

Схема, приведенная на рис. 2, включает три группы объектов. Первая группа состоит из пользователей здания, интеграторов технологического оборудования и операторов, принимающих решения по конкретным целям управления (ЛПР — лицо, принимающее решение), определяющим конкретные значения параметров ОУ здания, если в этом есть необходимость. Управление параметрами объекта оператор может осуществлять вручную при помощи модуля «Формирование задания», используя мобильное приложение или web-доступ к контроллеру IoT.

Вторая группа содержит ОУ и измерительно-управляющий контроллер IoT, реализующий алгоритм ПИД-регулятора и способный сохранять текущие конфигурации и сценарии регулирования.

Третья группа состоит из модулей облачных вычислений, реализующих модели объекта, алгоритмы адаптации, программного управления и **предиктивной аналитики** [13].

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 14. Issue 6, 2019
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Том 14. Выпуск 6, 2019

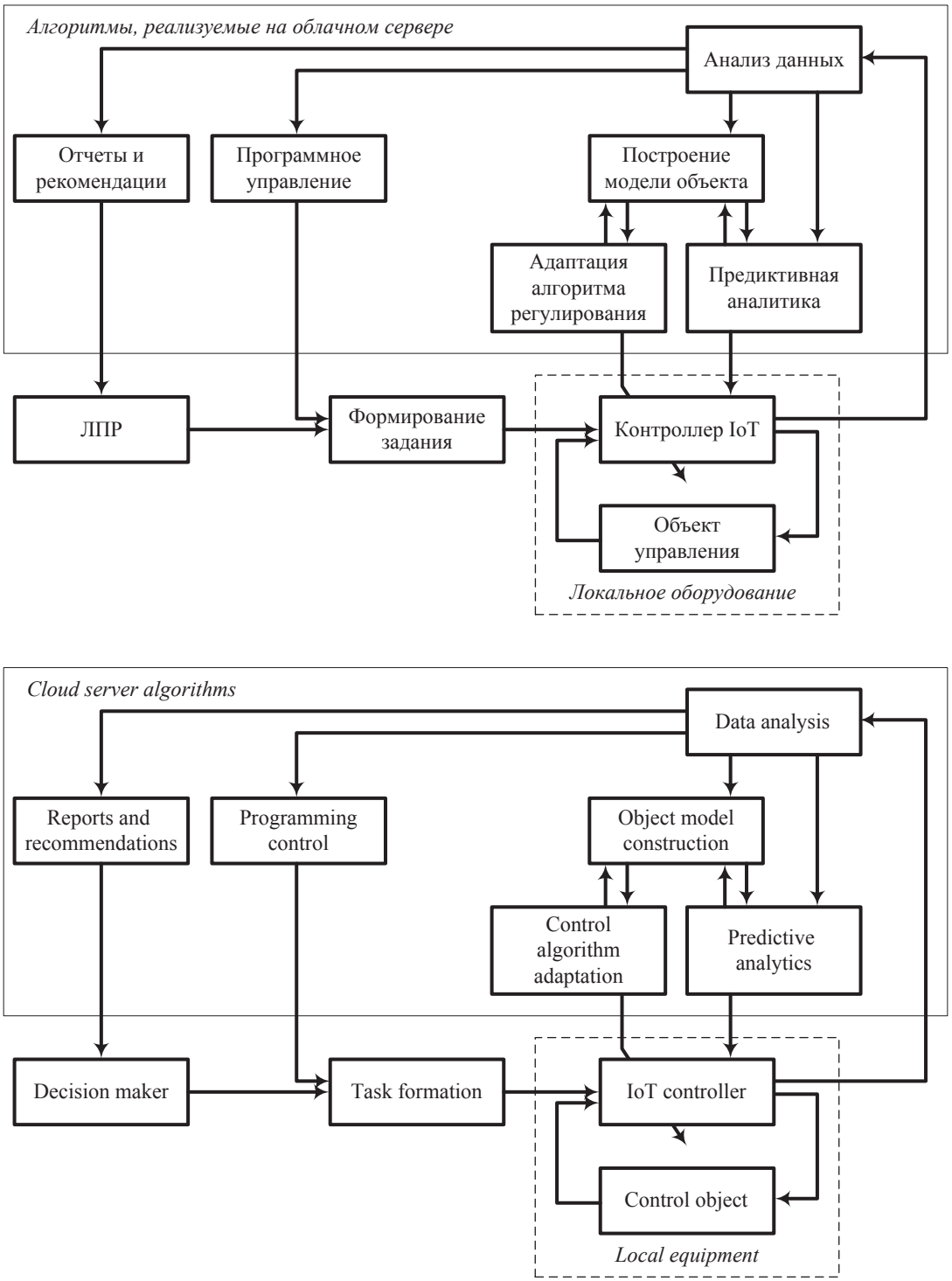

Рис. 2. Адаптивное управление объектом здания с облачным сервером

Fig. 2. Building object adaptive control with cloud server

Контроллер IoT осуществляет непрерывное регулирование технологического параметра по классическому алгоритму регулирования по обратной связи в соответствии с заданием, обеспечивая удовлетворительное состояние объекта при отсутствии связи с облачным сервером. ЛПР формирует сигналы задания контроллеру IoT в виде желаемых значений параметров объекта, например, желаемая температура в помещении [14, 15].

Данные, непрерывно собираемые с ОУ во время эксплуатации, передаются на облачный сервер. Блок анализа данных осуществляет агрегацию, трансформацию, предварительную обработку, например фильтрацию для зашумленных сигналов,

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 14. Выпуск 6, 2019
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 14. Issue 6, 2019

статистический анализ, оценку качества функционирования объекта. По результатам анализа полученной информации формируются отчеты и рекомендации ЛПР по повышению эффективности работы технологического объекта и СУ здания. На основании собранной информации о командах ЛПР в виде заданий в блоке программного управления формируется сценарий облачной логики — программа, по которой в сервера передается задание контроллеру IoT, учитывая и прогнозируя предпочтения ЛПР и изменения окружающей среды [16].

С целью повышения качества управления могут быть подключены различные алгоритмы улучшенного управления. Собранная информация об ОУ за весь период эксплуатации может применяться для построения модели объекта, используемая для реализации предиктивной аналитики, позволяющей определить и заранее компенсировать действующие на объект возмущения. Постоянная адаптация модели ОУ к реальным условиям дает возможность непрерывно адаптировать настройки алгоритма регулирования, обеспечивая оптимальную работу локальных контуров регулирования.

Метод **предиктивной аналитики** ОУ инженерных подсистем интеллектуального здания заключается в следующем:

- формирование БД измерительных и управляющих устройств, измерений, аварий и тревог, команд пользователя и сигналов управления, сценариев управления;
- автоматические измерения вектора климатических, технологических и энергетических показателей для различных помещений интеллектуального здания;
- автоматический расчет целевых показателей предиктивной модели для контролируемых участков, включая удельное энергопотребление, необходимые климатические показатели;
- сопоставление рассчитанных целевых показателей и показателей, полученных на основе статистических методов исследования истории наблюдений за зданием и его инженерными подсистемами;
- оценка изменения состояния инженерных подсистем здания на основе предиктивной модели.

Алгоритм компенсации обновляется в зависимости от динамики свойств объекта, качества регулирования и наличия данных, наиболее подходящих для идентификации.

Реализация компенсационного и предиктивного алгоритмов управления предполагает наличие ПФ соответствующих каналов объекта. ПФ регулятора известна. Как правило, идентификация каналов передачи ОУ осуществляется предварительно на этапе внедрения СУ, путем проведения активных экспериментов на объектах здания. Существуют различные методики активной идентификации. Одним из эффективных способов является ступенчатое воздействие на канал ОУ [17, 18].

По исследуемому каналу объекта, при отключенном регуляторе, реализуется ступенчатое возмущение. По полученному отклику объекта определяется ПФ исследуемого канала известным графическим или численным методом. Например, отношение разности уровня выходного сигнала до испытательного воздействия и после выхода на установившийся режим к величине «ступеньки» соответствует коэффициенту передачи. Время, необходимое на реакцию выходного сигнала на ступенчатое возмущение, соответствует запаздыванию, а время, когда выходной сигнал достигает 63 %, соответствует постоянной времени ОУ.

Активный эксперимент может быть проведен непосредственно для объекта во время эксплуатации здания в определенный период времени, что позволит сделать идентификацию не заметной для пользователя. При переходе в режим идентификации контроллер IoT отключает функцию автоматического регулирования и алгоритмы улучшенного управления и реализует на входе объекта испытательный сигнал ступенчатой формы, минимальной амплитуды, чувствительной ОУ. Отклик объекта обрабатывается в блоке анализа данных с целью определения параметров ПФ объекта. На основе полученных данных формируются алгоритмы компенсационно-предиктивного управления [19, 20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Имитационная модель процесса изменения температуры помещения без СУ

Возможности технологии управления на базе контроллера IoT и выработки управляющего сигнала с размещением алгоритма управления на облачном сервере продемонстрированы на модели управления температурой в помещении.

В качестве объекта исследования принято типовое офисное здание, площадью около 1000 м^2, имеющее четыре этажа. Здание выполнено по монолитно-каркасной технологии с заполнением наружных стен газоблоком марки D 500. Толщина наружных стен составляет 400 мм. Для отопления здания используется двухтрубная система с биметаллическими отопительными приборами. В качестве ОУ рассматривается температурный режим в помещениях объекта исследования. Основная задача регулирования — стабилизация комфортного температурного режима в помещениях здания на уровне 20 °C. Основными возмущающими воздействиями для такого ОУ можно считать:

- температуру внешней среды (атмосферы);
- температуру теплоносителя.

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 14. Issue 6, 2019
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Том 14. Выпуск 6, 2019

Управляющее воздействие — степень открытия клапана на линии подачи теплоносителя в систему отопления помещения, т.е. поддержание температуры в помещении осуществляется изменением положения клапана (регулированием расхода теплоносителя в отопительные приборы).

На рис. 3 приведена схема имитационной модели процесса изменения температуры помещения. Структурная и параметрическая идентификация модели осуществлена методом активного эксперимента.

Модель учитывает влияние:

- температуры окружающей среды с коэффициентом передачи 1, постоянной времени 300 мин, запаздыванием 300 мин;
- температуры теплоносителя с коэффициентом передачи 0,3, постоянной времени 150 мин, запаздыванием 150 мин;
- степень открытия клапана с коэффициентом передачи 5, постоянной времени 60 мин, запаздыванием 60 мин.

Начальные условия: при температуре окружающей среды 20 °C, температуре теплоносителя 20 °C и степени открытия клапана 50 %, температура в помещении равна 20 °C.

Степень открытия клапана и температура теплоносителя являются взаимосвязанными параметрами. При закрытом клапане температура теплоносителя не оказывает влияния на температуру в помещении и при температуре теплоносителя 20 °C степень открытия клапана не влияет на температуру в помещении.

На рис. 4 показан результат моделирования в течение 10 суток под действием возмущающих воздействий, в режиме постоянного значения управляющего воздействия — степени открытия клапана 47 %.

Сформированы сигналы, имитирующие изменение температуры окружающей среды, включающие случайные составляющие, суточные температурные перепады и изменение температуры в течение нескольких дней. Таким образом, температура окружающей среды изменяется в течение суток от более холодной в ночные часы до повышения на 3–5 °C к полудню, а также изменяется среднесуточная температура в течение 10 дней с учетом низкочастотных помех. Температура теплоносителя изменяется от 78 до 82 °C в течении всего периода эксплуатации. При заданных условиях, отсутствии системы автоматического регулирования (степень открытия клапана подачи теплоносителя постоянная — 47 %) температура в помещении изменяется от 15,1 до 23,4 °C. Для оценки качества процесса управления будем использовать величину среднеквадратичного отклонения, которая составила для данной модели 5,06.

2. Имитационная модель управления температурой в режиме управления ПИ-регулятором с компенсацией возмущающих воздействий

Повысить качество управления можно, используя вычислительные мощности облачного сервера, позволяющего рассчитывать компенсационные поправки, компенсирующие влияние возмущающих воздействий. ПФ компенсатора рассчитывается по формуле:

$$W_k(p) = \frac{-W_\lambda(p)}{W_{\text{рег}}(p)},$$

где $W_\lambda(p)$ — ПФ объекта по каналу компенсируемого возмущающего воздействия; $W_{\text{рег}}(p)$ — ПФ регулятора.

Построена имитационная модель процесса изменения температуры помещения в режиме управления ПИ-регулятором с компенсацией возмущающих воздействий (рис. 5).

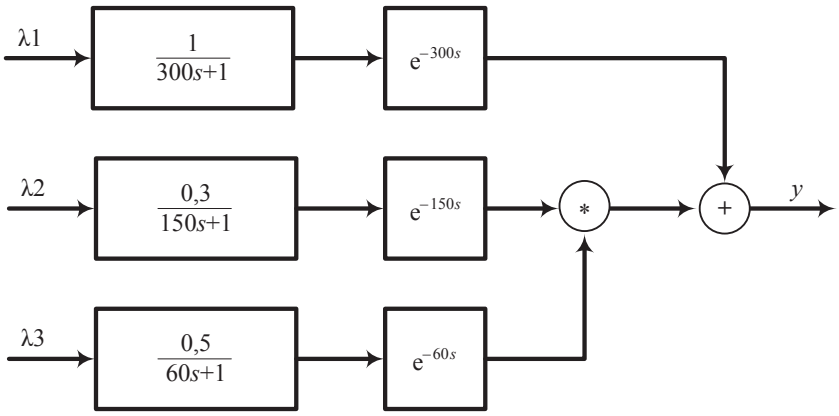

Рис. 3. Имитационная модель в среде OpenModelica процесса изменения температуры помещения: λ1 — температура окружающей среды; λ2 — температура теплоносителя; λ3 — степень открытия клапана подачи теплоносителя

Fig. 3. OpenModelica-specific simulation model of indoor temperature variation process: λ1 — ambient temperature; λ2 — heating medium temperature; λ3 — degree of opening of heating medium supply valve

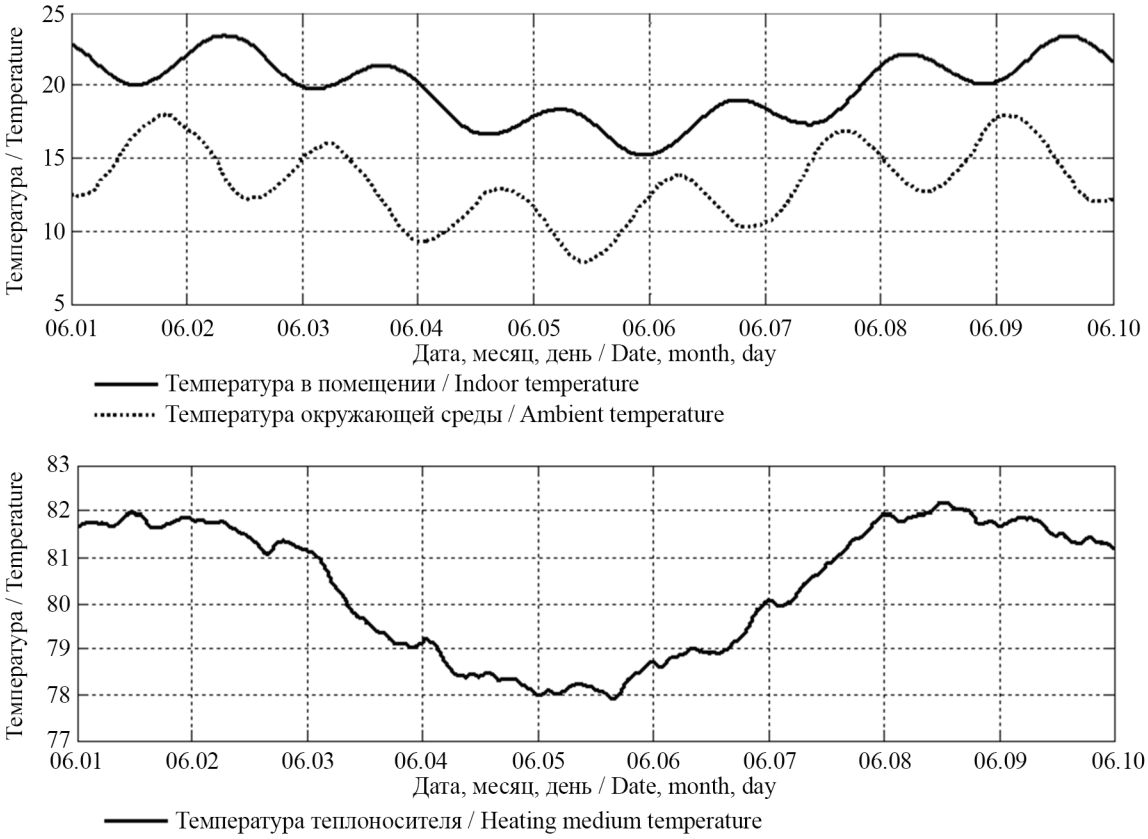

Рис. 4. Результат моделирования изменения температуры в помещении здания без системы управления

Fig. 4. Result of simulating indoor temperature variation without control system

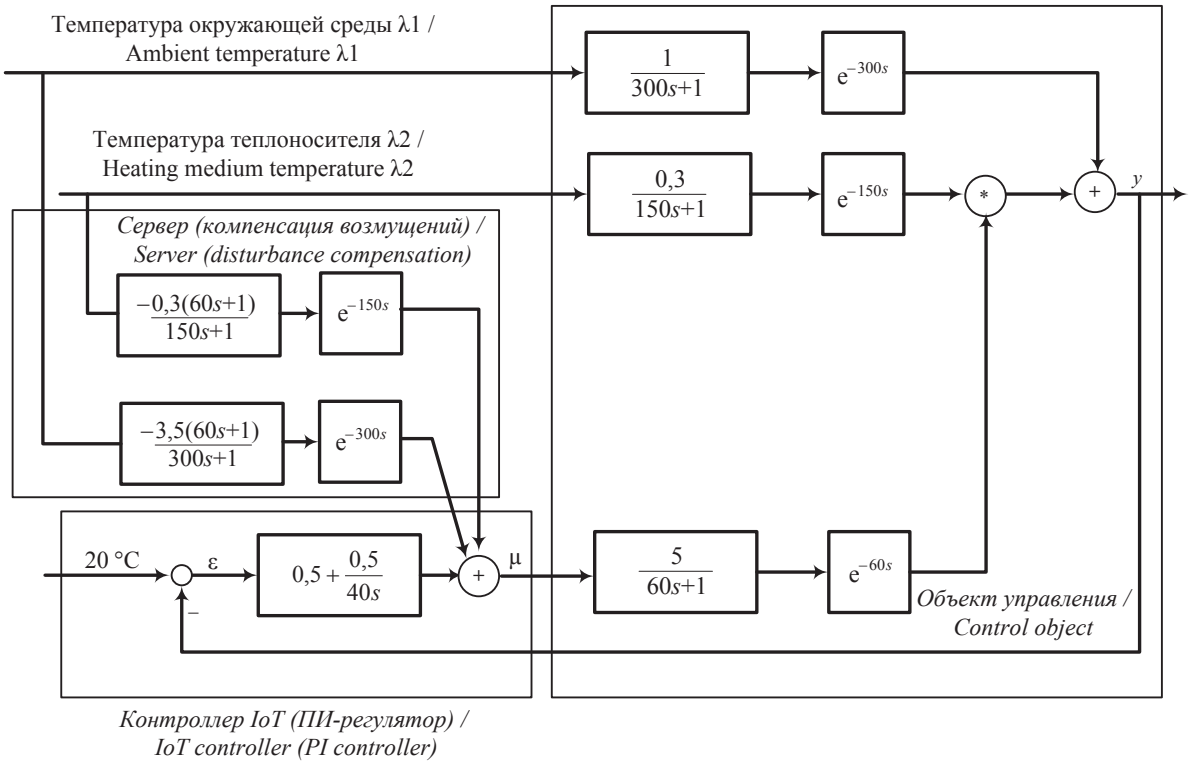

Рис. 5. Имитационная модель в среде OpenModelica СУ с ПИ-регулятором и компенсацией возмущающих воздействий

Fig. 5. OpenModelica-specific simulation model of control system with PI controller and disturbance compensation

Вестник МГСУ
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 14. Issue 6, 2019
ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online)
Том 14. Выпуск 6, 2019

На рис. 6 продемонстрирован результат имитационного моделирования процесса изменения температуры помещения под действием тех же возмущающих воздействий в режиме управления ПИ-регулятором и компенсационных воздействий, отправляемых из облачного сервера, при частоте опроса датчиков 1 мин, 1 ч, 3 ч, 6 ч.

Моделирование процессов управления проведено для разных периодов опроса датчиков с целью оценки изменений СКО для ситуаций, когда связи с облачным сервером может не быть в течение какого-то периода времени:

• при времени опроса датчиков 1 мин температура в помещении изменяется от 19,3 до 20,7 °С, СКО — 0,15.

• при времени опроса датчиков 1 ч температура в помещении изменяется от 19,2 до 20,9 °С, СКО — 0,23.

• при времени опроса датчиков 3 ч температура в помещении изменяется от 16,3 до 22,7 °С, СКО — 2,17.

• при времени опроса датчиков 6 ч температура в помещении изменяется от 12,2 до 32,4 °С, СКО — 35,4.

Увеличение времени опроса датчиков ухудшает качество регулирования, как и в случае с классическим алгоритмом регулирования. Однако при использовании алгоритмов компенсации контролируемых возмущений качество регулирования не уступает качеству регулирования системой с ПИ-регулятором при времени опроса датчиков 1 ч.

3. Разработка схемы компенсационно-предиктивного управления на базе контроллера IoT

Структура СУ с компенсацией возмущающих воздействий на базе облачного сервера и контроллера IoT представлена на рис. 7.

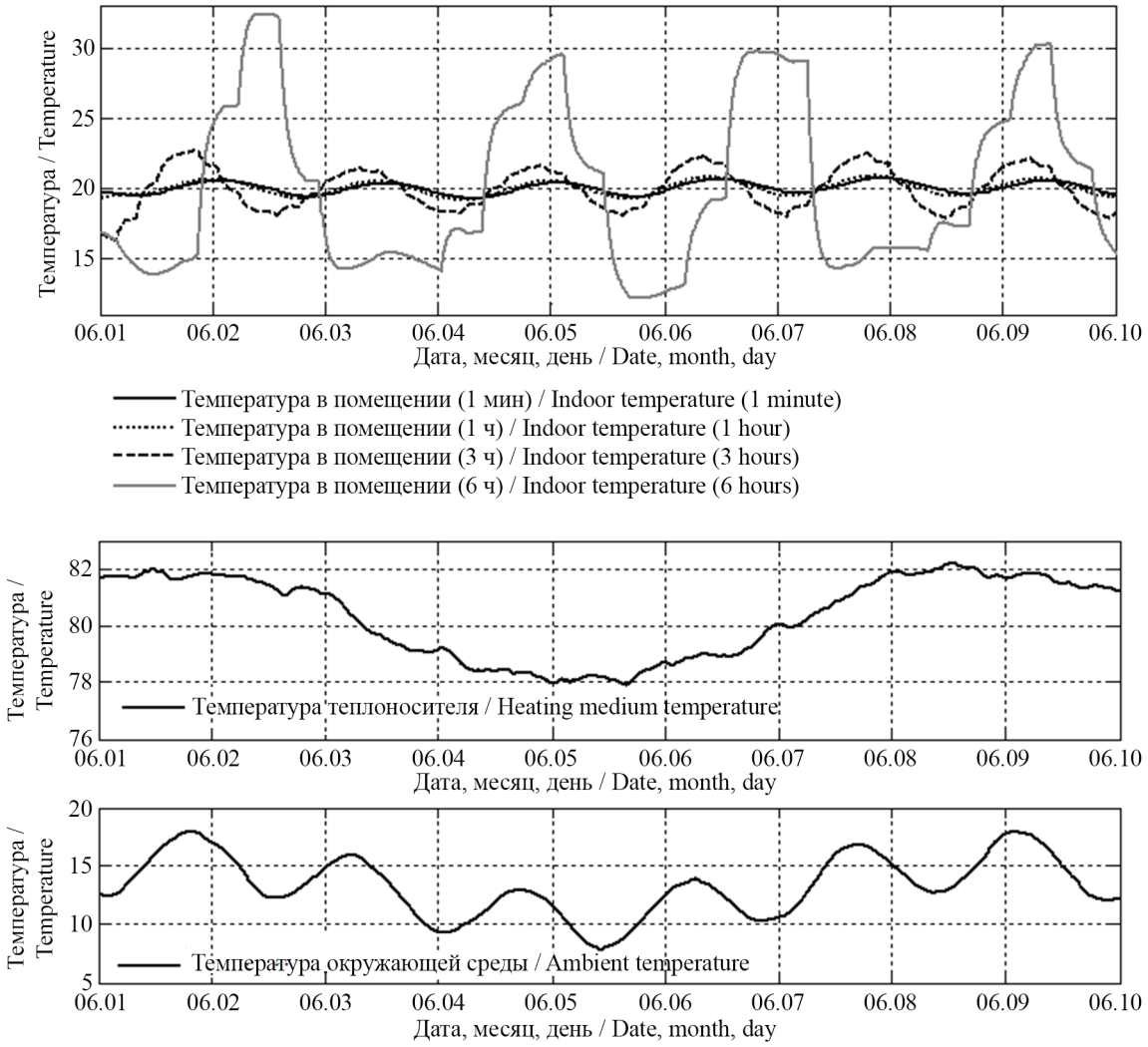

Рис. 6. Результат моделирования изменения температуры в помещении здания в режиме управления с ПИ-регулятором и компенсацией возмущающих воздействий

Fig. 6. Result of simulating indoor temperature variation at control mode with PI controller and disturbance compensation

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 14. Выпуск 6, 2019
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 14. Issue 6, 2019

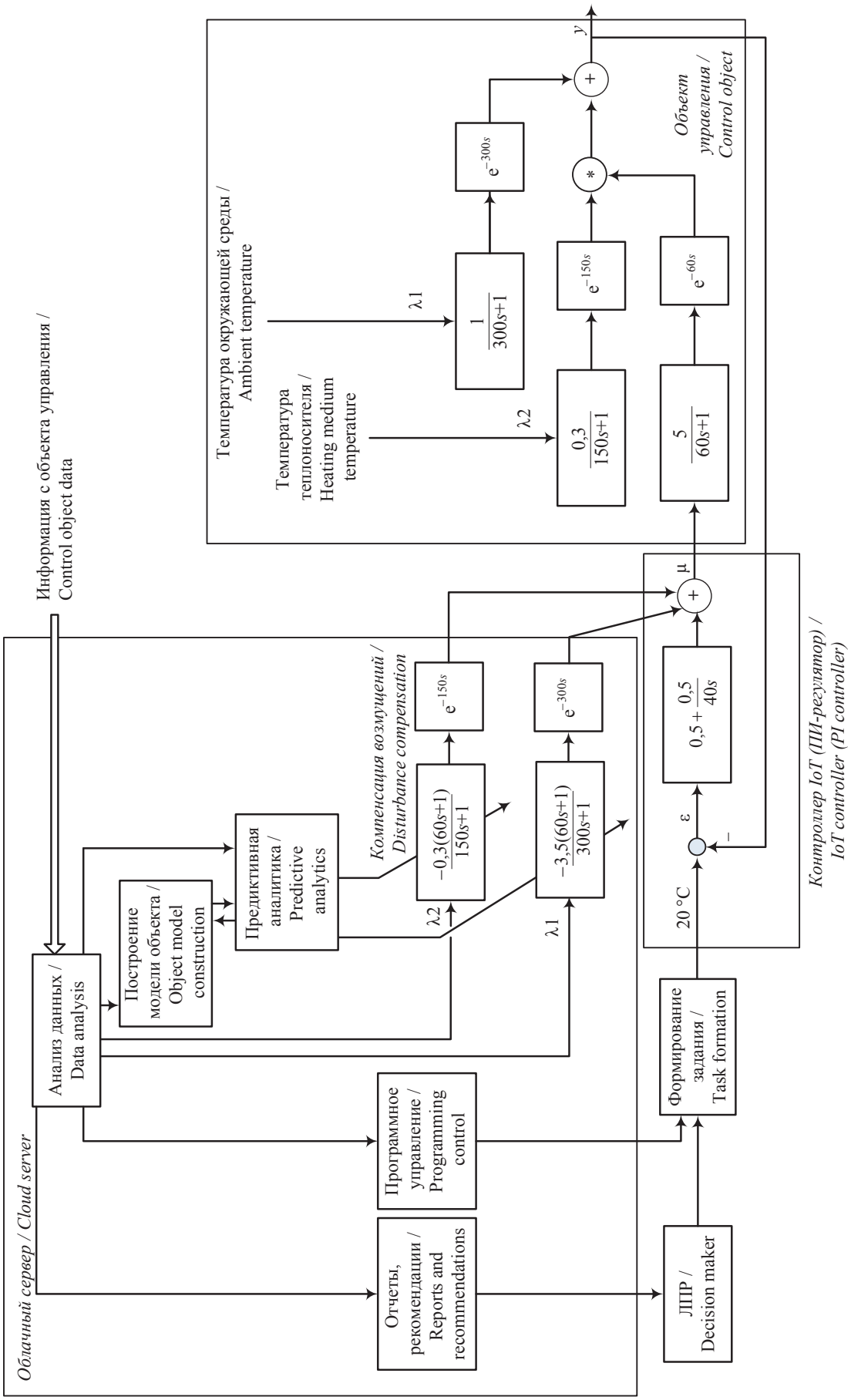

Рис. 7. Структура СУ с компенсацией возмущающих воздействий для СУ на базе контроллера IoT

Fig. 7. IoT controller based control system structure with disturbance compensation

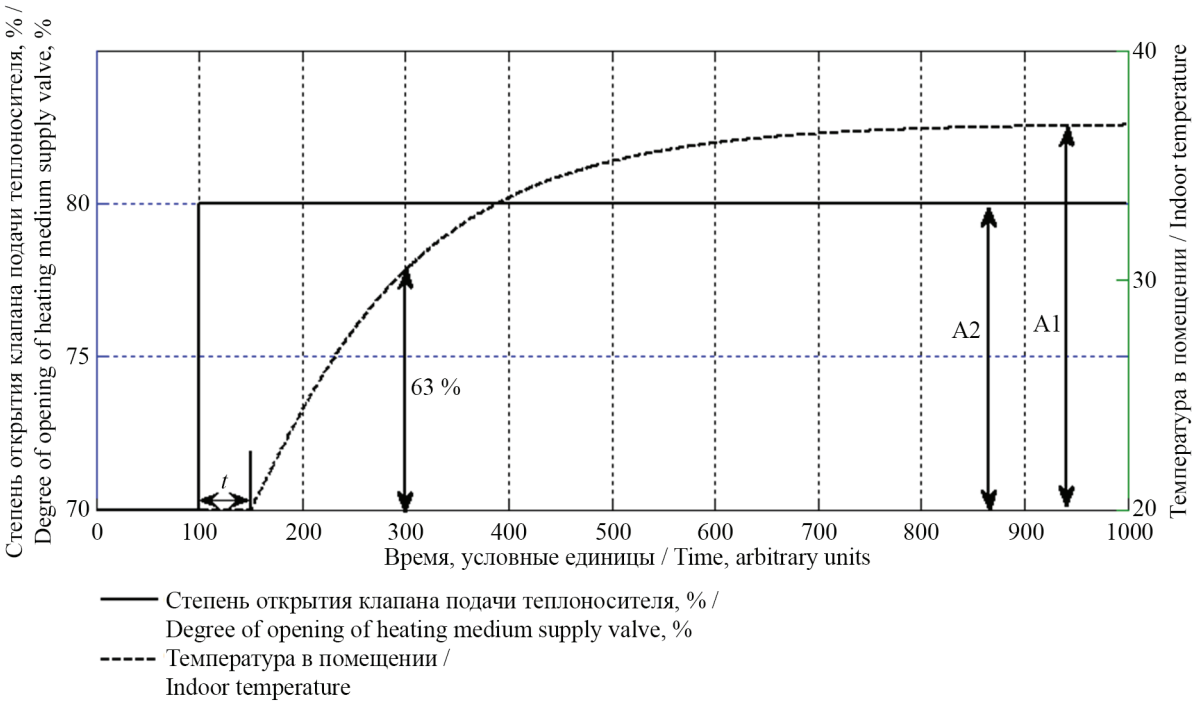

Рис. 8. Идентификация канала ОУ подсистемы интеллектуального здания

Fig. 8. Identification of CO channel of intellectual building subsystem

На рис. 8 показана реакция ОУ на ступенчатое изменение степени открытия клапана подачи теплоносителя с 70 до 80 %.

Ступенчатое возмущение подано в момент времени 100. Реакция на возмущение появилась в момент времени 150. Запаздывание по каналу составляет 50 ед. времени. При изменении входного воздействия на 10 % выход изменился на 16,74 °C, соответственно коэффициент передачи равен 1,674. В момент времени 300 выходная величина достигла 63 % установившегося состояния, таким образом, постоянная времени равна 150 ед. времени.

В процессе эксплуатации характеристики здания изменяются. Необходимо автоматически с определенным периодом проводить идентификацию каналов объекта в режиме эксплуатации, что возможно при работе с использованием контроллеров IoT в рамках концепции «интеллектуальное здание». Для этих целей в блоке построения модели (рис. 7) задается типовая модель ОУ, которая может быть использована для проведения активных экспериментов по идентификации классическими методами (например, рассмотренным ранее графическим методом).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Возможности повышения качества управления на базе контроллеров IoT с размещением алгоритма в облачном сервере продемонстрированы на модели управления температурой в помещении. Рассмотрены имитационные модели процесса изменения температуры помещения:

- модель процесса изменения температуры помещения без СУ;
- модель с ПИ-регулятором с компенсацией возмущающих воздействий;
- модель с компенсацией возмущающих воздействий для СУ на базе контроллера IoT.

Структурная и параметрическая идентификация моделей проведена методом активного эксперимента.

Контроллер IoT осуществляет непрерывное регулирование технологического параметра подсистемы отопления здания по классическому алгоритму регулирования по обратной связи в соответствии с заданием, обеспечивая удовлетворительное состояние объекта при отсутствии связи с облачным сервером в интервалах от 1 мин до 1 ч. ЛПР формирует сигналы задания контроллеру IoT в виде желаемых значений параметров объекта, например, желаемая температура в помещении.

Данные, накопленные за период эксплуатации объекта, непрерывно передаются в облачный сервер. Блок анализа данных осуществляет предварительную обработку данных, например фильтрацию зашумленных сигналов, статистический анализ, оценку качества функционирования объекта. По результатам анализа полученной информации форми-

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 14. Выпуск 6, 2019
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 14. Issue 6, 2019

руются отчеты и рекомендации ЛПР по повышению эффективности работы технологического объекта и СУ. На основании собранной информации о командах ЛПР в виде заданий в блоке программного управления формируется программа, по которой изменяется задание контроллеру IoT, учитывая и предвосхищая предпочтения ЛПР. Постоянная адаптация модели к реальным условиям позволяет непрерывно адаптировать настройки алгоритма регулирования, обеспечивая оптимальную работу локальных контуров регулирования.

В перспективе для реализации функций энергосбережения могут быть подключены различные алгоритмы интеллектуального анализа данных и энергетического менеджмента зданий. Собранная информация об объекте за весь период эксплуатации может в дальнейшем использоваться для построения модели энергопотребления объекта, используемой для реализации предиктивного управления, позволяющего заранее компенсировать действующие на объект возмущения и экономить энергоресурсы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кудж С.А., Цветков В.Я.* Сетецентрическое управление и киберфизические системы // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 2 (19). С. 86–92. DOI: 10.21777/2500-2112-2017-2-86-92

2. *Цветков В.Я.* Распределенное интеллектуальное управление // Государственный советник. 2017. № 1. С. 16–22.

3. *Zhu C., Leung V.C.M., Shu L., Ngai E.C.-H.* Green Internet of Things for smart world // IEEE Access. 2015. Vol. 3. Pp. 2151–2162. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2497312

4. *Кузьмин В.А.* Оптимальное отопление: поддержание неравновесного поля температур в многокамерной системе с минимумом затрат энергии // Программные системы: теория и приложения. 2018. Т. 9. № 3 (38). С. 29–47.

5. *Zhang J., Seet B.-C., Lie T.T.* Building information modelling for smart built environments // Buildings. 2015. Vol. 5. Issue 1. Pp. 100–115. DOI: 10.3390/buildings5010100

6. *Стрижак П.А., Морозов М.Н.* Математическое моделирование теплового режима здания с учетом инсоляционных теплопоступлений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 8. С. 36–46.

7. *Степанов В.М., Сергеева Т.Е.* Анализ математических моделей тепломассообменных процессов зданий для формирования управляющих воздействий электромеханической системы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 12. № 2. С. 158–164.

8. *Панферов В.И., Анисимова Е.Ю., Нагорная А.Н.* К теории математического моделирования теплового режима зданий // Вестник ЮУрГУ. 2006. № 14 (69). С. 128–132.

9. *Викентьева О.Л., Дерябин А.И., Шестакова Л.В., Кычкин А.В.* Синтез информационной системы управления подсистемами технического обеспечения интеллектуальных зданий // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 10 (109). С. 1191–1201. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.10.1191-1201

10. *Hou L., Zhao S., Xiong X., Zheng K., Chatzimisios P., Hossain M.S. et al.* Internet of things cloud: architecture and implementation // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. Issue 12. Pp. 32–39. DOI: 10.1109/MCOM.2016.1600398CM

11. *Lyakhomskii A.V., Perfil'eva E.N., Kychkin A.V., Genrikh N.* A software-hardware system of remote monitoring and analysis of the energy data // Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86. Issue 6. Pp. 314–319. DOI: 10.3103/S1068371215060103

12. *Tao F., Zuo Y., Xu L.D., Zhang L.* IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014. Vol. 10. Issue 2. Pp. 1547–1557. DOI: 10.1109/TII.2014.2306397

13. *Waczowicz S., Klaiber S., Bretschneider P., Konotop I., Westermann D., Reischl M. et al.* Data mining zur analyse der auswirkungen von preissignalen auf haushaltsstromkunden // at — Automatisierungstechnik. 2014. Vol. 62. Issue 10. Pp. 740–752. DOI: 10.1515/auto-2014-1108

14. *Ghayvat H., Liu J., Mukhopadhyay S.C., Gui X.* Wellness sensor networks: a proposal and implementation for smart home for assisted living // IEEE Sensors Journal. 2015. Vol. 15. Issue 12. Pp. 7341–7348. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2475626

15. *Park H., Rhee S.-B.* IoT-based smart building environment service for occupants' thermal comfort // Journal of Sensors. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2018/1757409

16. *Ицкович Э.Л.* Современные алгоритмы автоматического регулирования и их использование на предприятиях // Автоматизация в промышленности. 2007. № 6. С. 39–44.

17. *Ротач В.Я.* Об адаптивных системах управления с текущей идентификацией объекта // Автоматизация в промышленности. 2004. № 6. С. 3–6.

18. *Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M.* Internet of things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions // Future Generation Com-

Вестник МГСУ Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 14. Выпуск 6, 2019 Volume 14. Issue 6, 2019

puter Systems. 2013. Vol. 29. No. 7. Pp. 1645–1660. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010

19. *Lü X., Lu T., Kibert C.J., Viljanen M.* A novel dynamic modeling approach for predicting building energy performance // Applied Energy. 2014. Vol. 114. Pp. 91–103. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.08.093

20. *Chhokra A., Hasan S., Dubey A., Mahadevan N., Karsai G.* Diagnostics and prognostics using temporal causal models for cyber physical energy systems // Proceedings of the 8th International Conference on Cyber-Physical Systems — ICCPS '17. 2017. DOI: 10.1145/3055004.3064843

Поступила в редакцию 15 марта 2019 г.
Принята в доработанном виде 19 апреля 2019 г.
Одобрена для публикации 28 мая 2019 г.

Об авторах: **Кычкин Алексей Владимирович** — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий в бизнесе, **Пермский филиал «Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"» (НИУ ВШЭ — Пермь)**, 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, д. 38, avkychkin@hse.ru;

Дерябин Александр Иванович — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий в бизнесе, **Пермский филиал «Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"» (НИУ ВШЭ — Пермь)**, 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, д. 38, aderyabin@hse.ru;

Викентьева Ольга Леонидовна — кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующей кафедрой информационных технологий в бизнесе, **Пермский филиал «Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"» (НИУ ВШЭ — Пермь)**, 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, д. 38, ovikenteva@hse.ru;

Шестакова Лидия Валентиновна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий в бизнесе, **Пермский филиал «Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"» (НИУ ВШЭ — Пермь)**, 614070, г. Пермь, ул. Студенческая, д. 38, lshestakova@hse.ru.

REFERENCES

1. Kudzh S.A., Tsvetkov V.YA. Network-centric control and cyber-physical systems. *Educational Resources and Technologies*. 2017; 2(19):86-92. DOI: 10.21777/2500-2112-2017-2-86-92 (rus.).

2. Tsvetkov V.YA. Distributed intelligent control. *State Counselor*. 2017; 1:16-22. (rus.).

3. Zhu C., Leung V.C.M., Shu L., Ngai E.C.-H. Green internet of things for smart world. *IEEE Access*. 2015; 3:2151-2162. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2497312

4. Kuzmin V.A. Optimal heating: maintaining a non-equilibrium temperature field in a multi-chamber system with minimum energy consumption. *Program Systems: Theory and Applications*. 2018; 9:3(38):29-47. (rus.).

5. Zhang J., Seet B.-C., Lie T.T. Building information modelling for smart built environments. *Buildings*. 2015; 5(1):100-115. DOI: 10.3390/buildings5010100

6. Strizhak P.A., Morozov M.N. Mathematical simulation of building thermal regime including solar gains. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2015; 326(8):36-46. (rus.).

7. Stepanov V.M., Sergeeva T.E. Analysis of mathematical models of heat and mass transfer processes of buildings for the formation of the control actions of the electromechanical system. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2015; 12(2):158-164. (rus.).

8. Panferov V.I., Anisimova E.YU., Nagornaya A.N. On the theory of mathematical modeling of the thermal regime of buildings. *Bulletin of the South Ural State University*. 2006; 14(69):128-132. (rus.).

9. Vikentyeva O.L., Deryabin A.I., Shestakova L.V., Kychkin A.V. Synthesis of information system for smart house hardware management. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12:10(109):1191-1201. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.10.1191-1201 (rus.).

10. Hou L., Zhao S., Xiong X., Zheng K., Chatzimisios P., Hossain M.S. et al. Internet of things cloud: architecture and implementation. *IEEE Communications Magazine*. 2016; 54(12):32-39. DOI: 10.1109/MCOM.2016.1600398CM

11. Lyakhomskii A.V., Perfil'eva E.N., Kychkin A.V., Genrikh N. A software-hardware system of remote monitoring and analysis of the energy data. *Russian Electrical Engineering*. 2015; 86(6):314-319. DOI: 10.3103/S1068371215060103

12. Tao F., Zuo Y., Xu L.D., Zhang L. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing. *IEEE Transactions*

on Industrial Informatics. 2014; 10(2):1547-1557. DOI: 10.1109/TII.2014.2306397

13. Waczowicz S., Klaiber S., Bretschneider P., Konotop I., Westermann D., Reischl M. et al. Data mining zur analyse der auswirkungen von preissignalen auf haushaltsstromkunden. *at — Automatisierungstechnik*. 2014; 62(10):740-752. DOI: 10.1515/auto-2014-1108 (ger.).

14. Ghayvat H., Liu J., Mukhopadhyay S.C., Gui X. Wellness sensor networks: a proposal and implementation for smart home for assisted living. *IEEE Sensors Journal*. 2015; 15(12):7341-7348. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2475626

15. Park H., Rhee S.-B. IoT-based smart building environment service for occupants' thermal comfort. *Journal of Sensors*. 2018; 2018:1-10. DOI: 10.1155/2018/1757409

16. Itskovich E.L. Modern algorithms of automatic regulation and their use in enterprises. *Automation in industry*. 2007; 6:39-44. (rus.).

17. Rotach V.YA. On adaptive control systems with the current identification of the object. *Automation in industry*. 2004; 6:3-6. (rus.).

18. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*. 2013; 29(7):1645-1660. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010

19. Lü X., Lu T., Kibert C.J., Viljanen M. A novel dynamic modeling approach for predicting building energy performance. *Applied Energy*. 2014; 114:91-103. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.08.093

20. Chhokra A., Hasan S., Dubey A., Mahadevan N., Karsai G. Diagnostics and prognostics using temporal causal models for cyber physical energy systems. *Proceedings of the 8th International Conference on Cyber-Physical Systems — ICCPS '17*. 2017. DOI: 10.1145/3055004.3064843

Received March 15, 2019
Adopted in a modified form on April 19, 2019
Approved for publication May 28, 2019

Bionotes: **Aleksey V. Kychkin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Information Technologies in Business, **National Research University Higher School of Economics — Perm (NRU HSE — Perm)**, 38 Studencheskaya st., Perm, 614070, Russian Federation, avkychkin@hse.ru;

Alexandr I. Deryabin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Information Technologies in Business, **National Research University Higher School of Economics — Perm (NRU HSE — Perm)**, 38 Studencheskaya st., Perm, 614070, Russian Federation, aderyabin@hse.ru;

Olga L. Vikentyeva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Information Technologies in Business, **National Research University Higher School of Economics — Perm (NRU HSE — Perm)**, 38 Studencheskaya st., Perm, 614070, Russian Federation, ovikenteva@hse.ru;

Lidiia V. Shestakova — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Department of Information Technologies in Business, **National Research University Higher School of Economics — Perm (NRU HSE — Perm)**, 38 Studencheskaya st., Perm, 614070, Russian Federation, lshestakova@hse.ru.