
КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 681.518.5

АРХИТЕКТУРА СЕТЕВОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ЗДАНИЯ НА БАЗЕ IoT-УСТРОЙСТВ

ARCHITECTURE OF THE BUILDING MANAGEMENT SYSTEM BASED ON IoT DEVICES

Кычкин Алексей Владимирович
канд. техн. наук, доцент
E-mail: aleksey.kychkin@gmail.com

Дерябин Александр Иванович
канд. техн. наук, доцент
E-mail: paid2@yandex.ru

Викентьева Ольга Леонидовна
канд. техн. наук, доцент,
и. о. зав. кафедрой
E-mail: oleovic@rambler.ru

Шестакова Лидия Валентиновна
канд. физ.-мат. наук, доцент
E-mail: l.v.shestakova@gmail.com

**Национальный исследовательский университет
“Высшая школа экономики” (филиал), Пермь**

Аннотация: Рассмотрена задача проектирования архитектуры сетевого комплекса управления типовым модулем как единой современной автоматизированного здания или сооружения. С целью повышения эффективности эксплуатации здания в условиях больших объемов данных предложена архитектура сетевого управляющего комплекса, реализующая многоконтурное управление типовым модулем с применением облачных сценариев. Повышение эффективности эксплуатации здания заключается в использовании во внешнем контуре управления блоков интеллектуального анализа данных, обеспечивающих выявление систематического поведения пользователей типового модуля здания на основе данных с контроллеров IoT, статистической обработки информации на сервере системы и формировании управляющих воздействий в автоматическом и/или автоматизированном режимах. В качестве технологической базы сетевого комплекса управления зданием рассмотрен набор устройств и серверов Интернета вещей (Internet of Things — IoT). Реализация алгоритмов управления типовым модулем интеллектуального здания описывается моделью программного автомата, например, в виде логических схем алгоритмов.

Ключевые слова: информационная система, Интернет вещей, интеллектуальное здание, большие данные, интеллектуальный анализ данных, сценарий управления.

Kychkin Aleksey V.
Ph. D. (Tech.), Associate Professor
E-mail: aleksey.kychkin@gmail.com

Deryabin Alexandr I.
Ph. D. (Tech.), Associate Professor
E-mail: paid2@yandex.ru

Vikentyeva Olga L.
Ph. D. (Tech.), Associate Professor,
Acting Head of the Chair
E-mail: oleovic@rambler.ru

Shestakova Lidiia V.
Ph. D. (Phys.Math.), Associate Professor
E-mail: l.v.shestakova@gmail.com

**Branch of National Research University Higher
School of Economics, Perm**

Abstract: This work considers the problem of designing the architecture of a network management system for a generic module of a modern automated building. To improve the efficiency of building operation given the large influx of data, the architecture of the network management system implements multicontour management of a generic modules using cloud scenarios. Building operation efficiency is enhanced by using data mining blocks in the external control loop to detect the systematic behavior of users of a generic building module. This is based on data from IoT controllers, statistical processing of information on the system's server and generation of control actions in automatic and / or automated modes. As a technological base of the building management complex, a set of Internet of Things devices (IoT) is considered. The implementation of control algorithms for a typical intelligent building module is described by a software program model, for example, in the form of logical structure algorithms.

Keywords: information system, Internet of Things, smart building, big data, intellectual data analysis, management scenario.

ВВЕДЕНИЕ

Современные стандарты сертификации зданий (DGNB, LEED, Minergie, BREEAM) требуют их высокой энергоэффективности, которая может быть достигнута в существующих условиях только благодаря комплексной оптимизации работы всех подсистем [1]. Кроме этого, независимая система сертификации eu.bas обеспечивает оценку автоматике здания, используя критерии оценки по стандарту DIN EN 15232. В рамках обеспечения требований стандартов предлагается представить здание или сооружение, распределенное с точки зрения принципов управления, в виде комбинации типовых модулей — помещений или объектов инженерной инфраструктуры, что позволяет наиболее адекватно учесть набор субъективных факторов и ограничений, свойственных эргатическим системам.

Типовой модуль здания характеризуется набором измеряемых параметров, в числе которых можно выделить параметры энергоресурсопотребления, включая потребление электрической/тепловой энергии и воды, климатические параметры, данные о техническом состоянии оборудования и режимах работы и др. [2, 3]. Ключевой особенностью типового модуля здания выступает информация о наличии человека или группы людей с установленными для них режимами комфортного пребывания или пониженного энергопотребления, заданными в виде сценариев. Несмотря на то что большинство современных зданий являются автоматизированными, синтез сценариев эффективного управления их

типowymi модулями проводится вручную на основе стандартных шаблонов, изменение которых часто недопустимо.

В связи с развитием средств мониторинга и управления техническими системами на основе технологии “Интернет вещей” (Internet of Things — IoT) перспективным направлением повышения эффективности эксплуатации современных зданий становится процесс масштабного сбора данных с последующим анализом, выработкой решений и алгоритмов рационального управления [4—6]. В условиях больших данных, поступающих от устройств IoT, важной задачей является выявление систематического поведения пользователей типового модуля здания, интеллектуализация анализа и последующее формирование рекомендаций лицам, ответственным за содержание здания, и управляющих воздействий для оптимизации работы технологического оборудования [7, 8]. Исходя из этого принципа управления типовым модулем, возможна постановка целей проактивного (предсказательного) управления всем зданием на основе глобального вектора приоритетов.

МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТИПОВЫМ МОДУЛЕМ ЗДАНИЯ

Основной информационной единицей типового модуля современного интеллектуального здания выступает *Smart*-устройство (рис. 1), оснащенное датчиками и сенсорными элементами *Д*, исполнительными устройствами *ИУ* и вычислительными средствами. Примерами таких устройств являются: мультимедиа оборудование, бытовые и кухонные приборы, оргтехника, кондиционеры и системы климат-контроля, осветительные приборы, вентиляторы и насосы, системы контроля безопасности, протечек, освещенности и др. Встроенный в устройство микроконтроллер *МК* реализует алгоритм предварительной обработки сигналов с *Д* и формирование сигналов управления. Если такое устройство оснащено контроллером сети *КС* для организации доступа в компьютерную коммуникационную сеть Интернет по протоколам IPv4 и IPv6, то его можно считать Интернет устройством (*Internet Thing*).

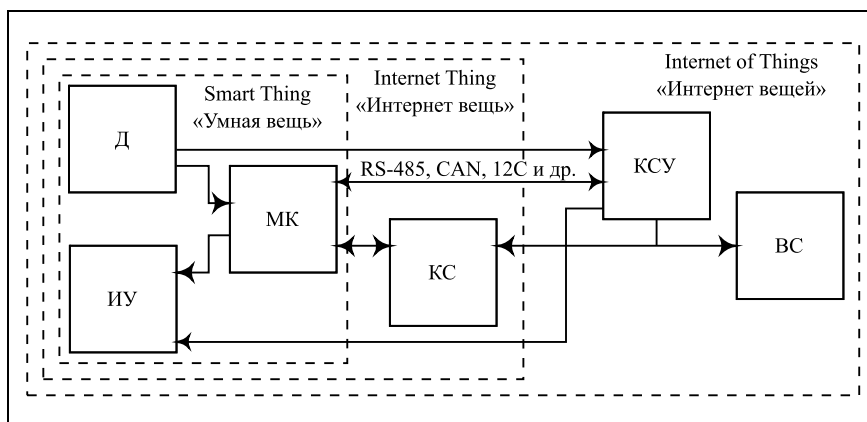


Рис. 1. Интернет вещей в системе управления типовым модулем здания

Доступ и управление “Умными” и “Интернет” устройствами (IoT-устройства) может осуществляться из локальной сети здания с помощью контроллера системы управления КСУ, оснащенного высокопроизводительным микропроцессором. Контроллеры локальной группы Интернета вещей могут обмениваться информацией между собой, а также с “умными” вещами при наличии коммуникационных средств связи, реализуя функцию шлюза, например $IoT \leftrightarrow Modbus RTU$. Устройство КСУ реализует алгоритмы группового управления объектами здания в локальной сети.

Множество цифровых элементов типового модуля автоматизированного здания подключается к внешнему серверу ВС, реализуемому в виде облачного сервиса сбора, анализа данных и управления, образуя “Интернет вещей” (*Internet of Things, IoT*), [9—11]. Вовлечение блока ВС в процесс управления приводит к оценке и последующей оптимизации параметров систем управления типовым модулем здания, что достигается благодаря автоматическому мониторингу большого числа типовых модулей, анализу и проактивному (предсказательному) управлению устройствами при соблюдении комфортных и безопасных режимов работы офисных сотрудников и персонала, включая пониженное энергопотребление, описываемых набором сценариев C_i .

Таким образом, реализация алгоритмов управления типовым модулем интеллектуального здания обеспечивается как минимум тремя типами цифровых устройств — МК, КСУ и ВС, каждый из которых может быть

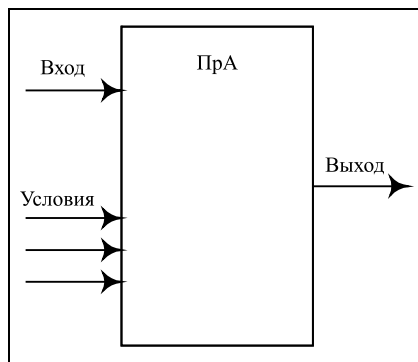


Рис. 2. Модель устройства Интернета вещей как программного автомата

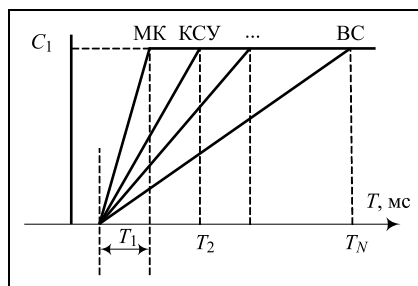


Рис. 3. Временные задержки при реализации сценария C_1

описан моделью программного автомата, упрощенный вид которого приведен на рис. 2 [12, 13]. Входными являются измерительные сигналы с подключаемых к устройству датчиков и счетчиков, условия — это специальные настроечные (конфигурационные) входы, на которое могут быть поданы пороговые значения и в сравнении с которыми решатель в составе программного автомата формирует выходной сигнал. В этом случае реализация программного автомата будет отличаться от реализации дискретных устройств [12] путем представления решающей функции, т. е. функции переходов/выходов, не в табличном виде, а в виде алгоритма. Таблица начальных состояний определяется вектором уставок по умолчанию инициализации управляющей программы. Память реализуется программным обра-

зом через логические, целочисленные переменные и переменные с плавающей точкой.

С учетом различных временных задержек в коммуникационных интерфейсах элементов управления типовым модулем здания, а также сложности расчетов возникают отклонения по времени реализации составных частей алгоритма — сценариев (рис. 3). Так, например, МК “Умной вещи” способен обработать входной сигнал при заданных условиях и сформировать выходной сигнал сценария C_1 в течение интервала времени T_1 . При обработке сигнала и формировании управляющего воздействия на КСУ время реакции будет намного выше ($T_2 > T_1$) из-за применения более медленных каналов беспроводной передачи информации. Использование ВС при реализации сценариев управления приведет к дополнительному росту времени реакции.

Увеличение времени реакции при использовании ВС до величины T_N обуславливается многократными задержками при передаче сообщений в информационной сети (рис. 4).

Контроллеры непосредственного управления “вещами” типового модуля здания (IoT-устройства) подключаются к существующей компьютерной коммуникационной сети здания с возможностью выхода в Интернет с помощью беспроводных точек доступа — WAP (Wireless Access Point). Множество WAP, покрывающих все рабочее пространство IoT-устройств в здании, участвует в передаче пакетов данных между собой, а также с локальным сервером Интернета вещей (IoT-сервером), реализация которого может быть

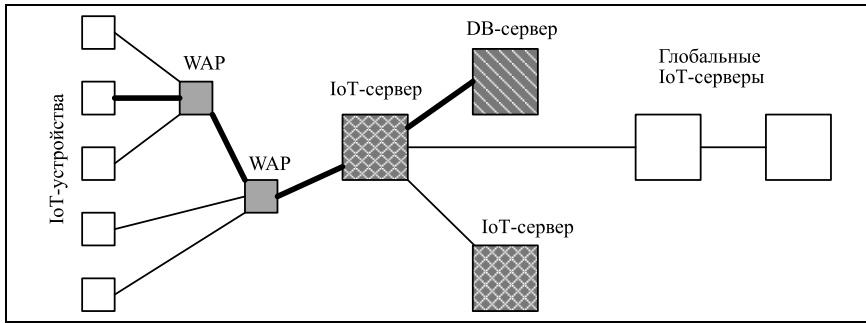


Рис. 4. Схема информационной сети Интернет вещей для зданий

обеспечена на базе КСУ или высокопроизводительной рабочей станции на базе ПК [14, 15]. Поток измерительной информации с IoT-устройств направляется на сервер базы данных (DB-сервер), реализующий накопление и структуризацию информации.

АРХИТЕКТУРА СЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ IoT-УСТРОЙСТВ

На рис. 5 изображена архитектура сетевого управляющего

комплекса здания на базе IoT-устройств [18, 19].

Задачами информационной системы управления являются сбор, обработка и анализ внутренних и внешних параметров здания и его инженерного оборудования с последующей установкой новых целевых значений, что достигается за счет применения:

— контура А, состоящего из IoT-устройства, датчиков Д и исполнительного устройства ИУ, реализующего обратную связь

по объекту управления в автоматическом режиме с помощью программ сценариев в МК;

— контура В, включающего интеллектуальные, цифровые датчики и счетчики ЦД, сеть МК_і, КСУ и инфраструктуру WAP, и реализующего обратную связь по объекту управления в автоматическом/автоматизированном режимах с помощью сценариев локальной системы управления;

— контура С, включающего коммуникационные средства выхода в глобальную сеть Интернет и внешние IoT-серверы, и реализующего обратную связь по объекту управления в автоматическом/автоматизированном режимах с помощью аналитического аппарата, в том числе интеллектуального анализа данных на основе технологий Data Mining [16, 17].

С помощью контура С и применения на IoT-серверах тех-

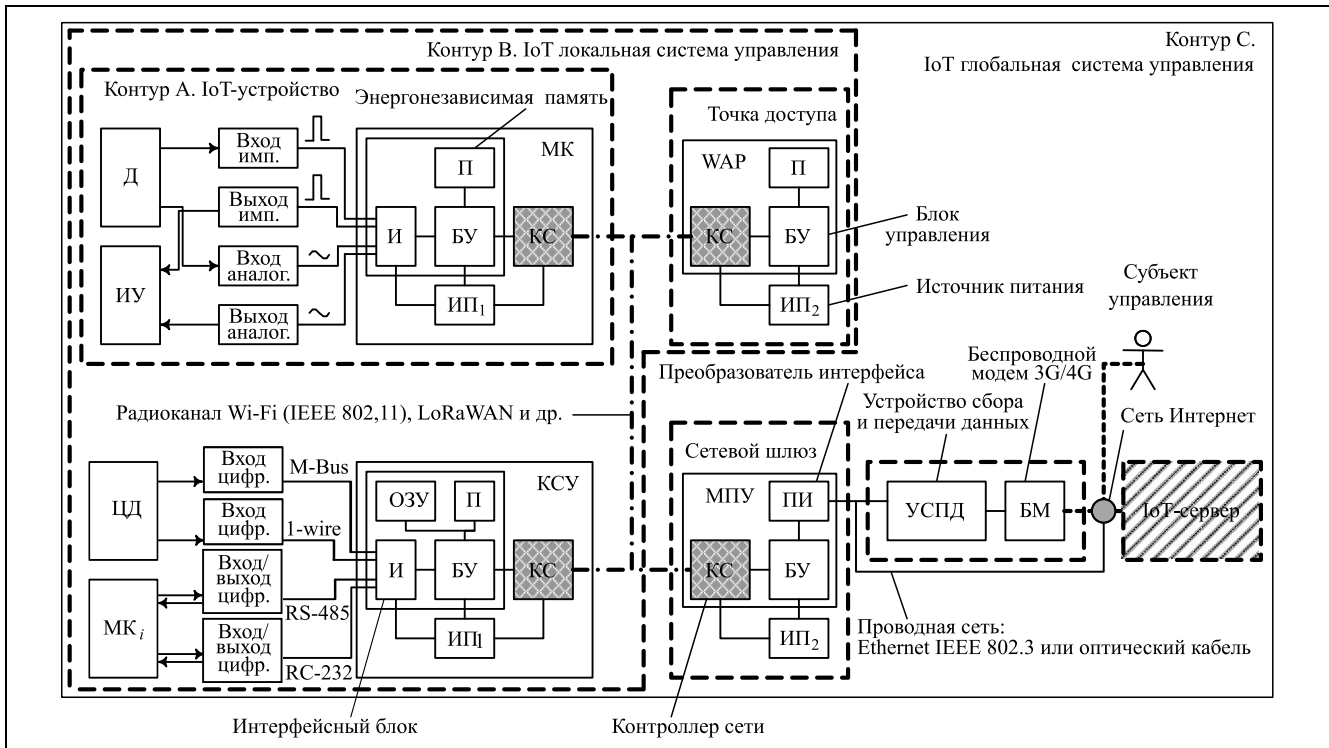


Рис. 5. Архитектура сетевого управляющего комплекса здания на базе IoT-устройств

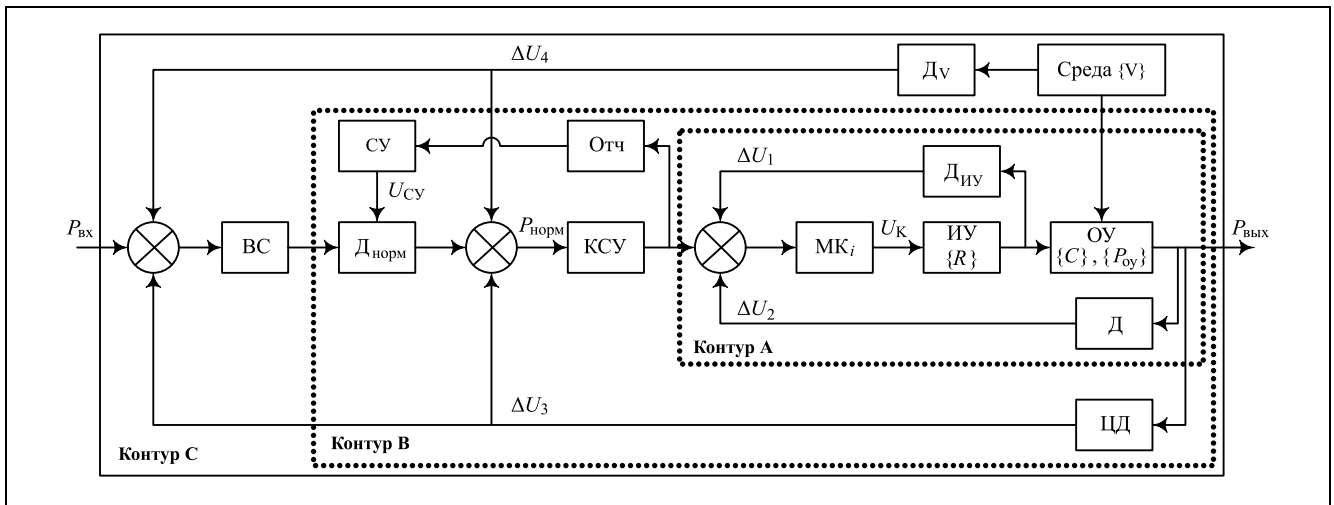


Рис. 6. Структурная схема системы многоконтурного управления зданием с помощью IoT

нологии Data Mining определяются зависимости внутренних параметров здания между собой и с внешними параметрами, рассчитываются целевые показатели эффективности, на основании которых можно определить отклонения нормативных и фактических показателей. На основе постоянного анализа данных с IoT-устройств и сопоставления их с заданными режимами управления зданием в виде сценариев возможно определить ошибочные функции работы систем автоматики, что реализуется благодаря постоянной адаптации и оптимизации параметров систем управления инженерным оборудованием зданий за счет автоматического мониторинга большого числа типовых модулей, анализа и проактивного (предсказательного) управления устройствами [20].

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ МНОГОКОНТУРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗДАНИЕМ С ПОМОЩЬЮ IoT

На основании предложенной архитектуры сетевого комп-

лекса многоконтурного управления типовым модулем здания на базе IoT-устройств построена структурная схема системы управления, обеспечивающая отслеживание изменений в здании и адаптацию сценариев к изменяющимся условиям (рис. 6). Элементы схемы системы управления могут быть описаны типовыми передаточными функциями апериодического звена I или II порядка, звена запаздывания и требуют дальнейшей идентификации [21].

Принцип работы контура A системы управления заключается в следующем. На объект управления ОУ, характеризуемый набором параметров $P_{oy} = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_k\}$, оказывает непосредственное воздействие исполнительный механизм ИМ, который использует набор ресурсов $\{R\}$. Под воздействием управляющего сигнала U_k и сценария управления объект меняет свое состояние таким образом, что для каждого перехода между состояниями существует однозначный сценарий C_j . Сигнал на ИУ подается с управляющего МК_i IoT-устройства, кото-

рый регулирует выходное воздействие ΔU_1 на ОУ с помощью датчика Д_{иу}, поступающее с датчиков исполнительных устройств и отражающее изменение их состояния. Для регистрации выходных параметров $P_{вых}$ с объекта управления используются датчики Д (ΔU_2 — воздействие, поступающее к управляющему МК с объекта управления).

Для решения проблемы, связанной с ростом задержек при обработке информации, используются блоки МК и КСУ, реализующие алгоритмы управления на основе модели дискретных автоматов, в частности ЛСА — логических схем алгоритмов. Применение ЛСА требует значительно меньшей вычислительной мощности IoT-устройства в сравнении с другими методами программирования контроллеров, описываемыми известными стандартами, в том числе IEC 61131-3 на языки программирования ПЛК; IEC 61131-5 на программирование связей между ПЛК и другими программируемыми системами; IEC 61131-7 на язык програм-

мирования нечеткого контроля и управления.

Контур B системы управления работает следующим образом. На вход управляющего $МК$; IoT -устройства подается сигнал с $КСУ$, который в свою очередь получает в качестве входных набор нормативных значений параметров, характеризующих состояние объекта управления $P_{норм}$, устанавливаемых субъектом управления $СУ$. На основе $P_{норм}$, значениях параметров объекта управления, полученных с цифровых датчиков и счетчиков $ЦД$, информации об имеющихся ресурсах и информации о возмущающих воздействиях внешней среды $\{V\}$ блок $КСУ$ формирует управляющие воздействия, реализуя управление группой IoT -устройств (ΔU_3 — воздействие, поступающее от цифровых датчиков и счетчиков, установленных на объекте управления, ΔU_4 — воздействие, поступающее из внешней среды). Блок $КСУ$ контура B может выполнять функции локального IoT -сервера системы управления.

В качестве субъекта управления зданием в таких системах выступает оператор, который использует блок $КСУ$ для получения отчетов ($Отч$) о состоянии $ОУ$ и устанавливает значения параметров исполнительного устройства в соответствии с нормативными значениями. В связи с тем, что параметры V и $P_{оу}$ имеют различные законы изменения во времени, а зависимость $P_{оу}$ от V не полностью определена, вся система управления обладает инерционностью и не позволяет быстро изменять величину $P_{оу}$ при изменении V . Кроме того, значение

$P_{норм}$ не всегда соответствует реальным условиям, зависящим от V и состояния $ОУ$.

В качестве решения данных проблем в состав IoT -системы управления зданием введен контур C , реализуемый на основе внешнего сервера, в котором в качестве субъекта управления будет выступать интеллектуальная система, использующая алгоритмы Data Mining. Идентификация зависимостей между параметрами исполнительных механизмов, параметрами объекта управления $P_{оу}$ и возмущениями внешней среды V позволяет спрогнозировать управляющие воздействия с учетом инерционности системы [22]. На вход системы в таком случае будет подаваться вектор регулируемых параметров объекта управления $P_{вх}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Управление зданием с помощью IoT -устройств подразумевает наличие нескольких контуров. Первый контур используется для реализации обратной связи по объекту управления в автоматическом режиме с помощью упрощенных сценариев, заложенных во встроенный микроконтроллер контроллера непосредственного управления “умной” или Интернет вещью. Второй контур реализует обратную связь в автоматическом/автоматизированном режимах с помощью сценариев системы группового управления с привлечением специализированных контроллеров локальной сети. Третий контур реализует обратную связь в автоматическом/автоматизированном режимах с помощью аналитического аппарата внешнего сервера.

Субъектом управления в многоконтурной системе выступает оператор здания, который использует удаленный интерфейс пользователя для вывода информации о состоянии технических подсистем и другого оборудования здания и устанавливает значения параметров в соответствии с нормативными значениями. Использование механизмов интеллектуального анализа данных во внешнем контуре управления зданием обеспечивает поиск зависимостей между параметрами исполнительных устройств и параметрами объектов управления, возмущениями внешней среды и параметрами объекта управления в технических подсистемах здания. Установленные зависимости предполагается использовать для предсказательного управления, способного сформировать управляющие сигналы заблаговременно с учетом инерционности системы.

Интеллектуальная информационная система Интернета вещей для эффективного управления зданием, построенная на базе предложенной архитектуры сетевого комплекса, позволит сформировать воздействия, предупреждающие нерациональное поведение системы, и снизить эксплуатационные расходы здания. Управление реализуется за счет включения внешнего контура, использующего интеллектуальный анализ данных на IoT -серверах. Предложенное решение рекомендуется принять в системах управления автоматизированными зданиями $BEMS$ (Building Energy Management System), имеющих IoT -устройства [23].

ЛИТЕРАТУРА

- Bauer M., Mösle P., Schwarz M. Green Building. Guidebook for Sustainable Architecture. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. — P. 210.
- Салихов Т. П., Худайаров М. Б. Энергомониторинг как инструмент повышения энергоэффективности жилых и общественных зданий // Энергосбережение и водоподготовка. — 2015. — № 5. — С. 54—60. [Salikhov T. P., Khudayarov M. B. Energy monitoring as a tool to improve the energy efficiency of residential and public buildings // Energy saving and water treatment. — 2015. — N 5 (97). — P. 54—60. (In Russian)]
- Потапенко Е. А., Воробьев Н. Д., Потапенко А. Н. Мониторинг систем отопления в составе автоматизированной системы диспетчерского управления // Известия вузов. Проблемы энергетики. — 2003. — № 5—6. — С. 120—123. [Potapenko E. A., Vorobiev N. D., Potapenko A. N. Monitoring heating systems as part of the automated dispatch control system // Proceedings of the universities. Energy Problems. — 2003. — N 5—6. — P. 120—123. (In Russian)]
- Gubbi J., et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future generation computer systems. — 2013. — Vol. 29, № 7. — P. 1645—1660.
- Kelly S. D. T., Suryadevara N. K., Mukhopadhyay S. C. Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes // IEEE Sensors Journal. — 2013. — Vol. 13, № 10. — P. 3846—3853.
- Tao F., et al. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2014. — Vol. 10, № 2. — P. 1547—1557.
- Guan L. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings // Building and Environment. — 2009. — Vol. 44, N 4. — P. 793—800.
- Кычкин А. В., Микрюков Г. П. Метод обработки результатов мониторинга группы энергопотребителей // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2016. — № 6. — С. 9—14. [Kichkin A. V., Mikryukov G. P. The method of processing the results of monitoring groups of energy consumers // Energy security and energy efficiency. — 2016, N 6. — P. 9—14. (In Russian)]
- Соколов М. Н., Смолянинова К. А., Якушева Н. А. Проблемы безопасности Интернет вещей: обзор // Вопросы кибербезопасности. — 2015. — № 5. [Sokolov M. N., Smolyaninova K. A., Yakusheva N. A. Internet of things security: an overview // Cybersecurity issues. — 2015. — No. 5. (In Russian)]
- Кычкин А. В., Артемов С. А., Белоногов А. В. Распределенная система энергомониторинга реального времени на основе технологии IoT // Датчики и системы. — 2017. — № 8—9. — С. 49—55. [Kichkin A. V., Artemov S. A., Belonogov A. V. Distributed real-time energy monitoring system based on IoT technology // Sensors and systems. — 2017. — No. 8—9 (217). — P. 49—55. (In Russian)]
- Дзюбенко И. Н., Татарникова Т. М. Модель сборки пакетов данных в территориально распределенной сети IoT // Научный альманах. — 2016. — № 8-1. — С. 204—207. [Dzyubenko I. N., Tatarnikova T. M. The model for building data packets in a territorially distributed IOT network. // Scientific almanac. — 2016. — N 8-1 (22). — P. 204—207. (In Russian)]
- Chivilikhin D., Shalyto A., Vyatkin V. Inferring Automata Logic From Manual Control Scenarios: Implementation in Function Blocks // In Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA'15), 2015. — P. 307—312.
- Глушков В. М. Кибернетика. Вопросы теории и практики. — М.: Наука, 1986. — 488 с. [Glushkov V. M. Cybernetics. Theory and practice cases. — Moscow: Science, 1986. — 488 p. (In Russian)]
- Кычкин А. В. Протокол беспроводного сбора энергоданных для систем мониторинга реального времени // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2014. — Т. 14, № 4. — С. 126—132. [Kychkin A. V. Wireless energy data collection protocol for real-time monitoring systems // Bulletin of South Ural State University. Series: Computer technology, management, electronics. — 2014. — Vol. 14, N 4. — P. 126—132. (In Russian)]
- Braga L. C., Braga A. R., Braga C. M. P. On the characterization and monitoring of building energy demand using statistical process control methodologies // Energy and Buildings. — 2013. — Vol. 65. — P. 205—219.
- 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. — С. 1191—1201. [Vikentyeva O. L., Deryabin A. I., Shestakova L. V., Kichkin A. V. Synthesis of the information management system for the subsystems of the technical support of intellectual buildings // Vestnik MSSU. — 2017. — Vol. 12, N 10 (109). — P. 1191—1201. (In Russian)]
- Костыгов А. М., Кычкин А. В., Борковец К. А. Прогнозирование электропотребления здания на основе селективного выбора нейронной сети // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2017. — Т. 15, № 9. — С. 75—82. [Kostygov A. M., Kichkin A. V., Borkovets K. A. Forecasting power consumption of a building on the basis of a selective choice of a neural network // Information-measuring and control systems. — 2017. — Vol. 15, N 9. — P. 75—82. (In Russian)]
- Кычкин А. В. Синтез системы удаленного энергетического мониторинга производства // Metallurg. — 2015. — № 9. — С. 20—27. [Kichkin A. V. Synthesis of remote energy monitoring systems of production // Metallurg. — 2015. — N 9. — P. 20—27. (In Russian)]
- Кычкин А. В. Программно-аппаратное обеспечение сетевого энергоучетного комплекса // Датчики и системы. — 2016. — № 7. — С. 24—32. [Kichkin A. V. Software and hardware network energy accounting complex // Sensors and Systems. — 2016. — N 7 (205). — P. 24—32. (In Russian)]
- Новиков В. В. Интеллектуальные измерения на службе энергосбережения // Энергоэксперт. — 2011. — № 3. — С. 68—70. [Novikov V. V. Intelligent measurement of energy savings in the service // Energoexpert. — 2011. — № 3. — P. 68—70. (In Russian)]
- Основы автоматического регулирования и управления / Под ред. В. М. Пономарева и А. П. Литвинова. — М.: Высшая школа, 1974. — 439 с. [Fundamentals of automatic regulation and management / Ed. V. M. Ponomarev and A. P. Litvinov. — Moscow: Higher School, 1974. — 439 p. (In Russian)]
- Menezes A. C., Cripps A., Bouchlaghem D., Buswell R. Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap // Applied Energy. — 2012. — Vol. 97. — P. 355—364.
- Mahdavi A., Schuss M., Suter G. et al. Recent advances in simulation-powered building systems control // In Proceedings of the 7th International IBPSA Conference (Building Simulation 2009), Glasgow, UK, 27—30 July 2009. — P. 267—268.