

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.3.3)

УДК 621.1.016

DOI: 10.24160/1993-6982-2026-1-135-139

Построение системы управления подачей теплоносителя на основании экспериментальных данных в индивидуальном тепловом пункте

С.В. Гужов, Д.Н. Темрина, А.А. Арбатский, Е.В. Крылова, А.О. Сорокина

Рассмотрена система автоматического управления температурой в здании высшей школы, получающем тепло из городской сети теплоснабжения. На основании экспериментальных данных, полученных в результате пассивного эксперимента, с использованием теории случайных процессов проведена их обработка. Принимая во внимание поведение реальных промышленных объектов, к рассмотрению принят нормальный закон распределения и найдены его числовые характеристики — математическое ожидание и дисперсия. С помощью метода корреляционного анализа установлены коэффициенты взаимосвязи между температурами на подающем и обратном трубопроводах и температурой наружного воздуха. На основе рассчитанных коэффициентов корреляции определен способ управления температурой в здании. Полученные результаты применимы в области теплоснабжения зданий городской застройки в условиях умеренного климата и имеют практический интерес в изучении работы тепловых пунктов.

Ключевые слова: система автоматического управления температурой, пассивный эксперимент, корреляционный анализ, случайный процесс.

Для цитирования: Гужов С.В., Темрина Д.Н., Арбатский А.А., Крылова Е.В., Сорокина А.О. Построение системы управления подачей теплоносителя на основании экспериментальных данных в индивидуальном тепловом пункте // Вестник МЭИ. 2026. № 1. С. 135—139. DOI: 10.24160/1993-6982-2026-1-135-139.

Development of a Heat Carrier Supply Control System Based on Experimental Data at an Individual Heat Point

S.V. Guzhov, D.N. Temrina, A.A. Arbatsky, E.V. Krylova, A.O. Sorokina

The article considers an automatic temperature control system in a higher school building that receives heat from the municipal heat supply network. The experimental data obtained from a passive experiment were processed using the theory of random processes. Taking into account the behavior of real industrial facilities, the normal distribution law is adopted for consideration, and its numerical characteristics in the form of mathematical expectation and variance are obtained. Using the correlation analysis method, the correlation coefficients between the temperatures in the delivery and return pipelines and the outdoor air temperature have been determined. Based on the calculated correlation coefficients, a method for controlling the temperature in the building has been determined. The obtained results are applicable in the field of heat supply to urban buildings under temperate climate conditions and are of practical interest in studying the operation of heat points.

Key words: automatic temperature control system, passive experiment, correlation analysis, stochastic process.

For citation: Guzhov S.V., Temrina D.N., Arbatsky A.A., Krylova E.V., Sorokina A.O. Development of a Heat Carrier Supply Control System Based on Experimental Data at an Individual Heat Point. Bulletin of MPEI. 2026;1:135—139. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2026-1-135-139.

Состояние вопроса по рассматриваемой проблеме

Процессы теплоснабжения имеют сложную структуру, вызванную многообразием влияющих факторов, нестабильностью протекания процесса, постоянно развивающимися новыми технологиями [1]. Одна из задач — определение в случайных процессах взаимозависимости факторов с целью выявления структуры автоматизированных систем управления. Одним из важнейших инструментов в статистических задачах управления являются корреляционные функции, необходимые для планирования экспериментов, подбора тестовых сигналов, оценки параметров объекта, определения шага дискретности, расчета настроек регуляторов, выбора алгоритмов оптимизации и многих других задач контроля, регулирования, оптимизации, управления объектами [2]. Особенность такого управления — невозможность проведения большого числа экспериментов при одинаковых условиях. Исходные данные для решения той или иной задачи представляют собой единичную реализацию конечной длительности. Поскольку проведение эксперимента на реальном производственном объекте может быть сопряжено с целым рядом трудностей, зачастую исследователь располагает только данными пассивного эксперимента, наблюдая и обрабатывая входные и выходные данные, без вмешательства в функционирование объекта.

Постановка задачи

Задача настоящего исследования — определение с помощью корреляционного анализа способа регулирования системы автоматического управления температурой в здании. Также необходим анализ методов обработки данных, полученных в результате пассивного эксперимента.

Методы решения и допущения

Для отображения характеристик объекта с целью будущих исследований и повышения эффективности работы оборудования необходима его модель [3 — 5]. Анализ информации о случайных процессах в технических системах управления позволяет представить модель случайного процесса следующим образом [6]:

$$Z(t) = B(t) + C(t) + X(t) + N(t),$$

где $B(t)$ — постоянная или медленно изменяющаяся непериодическая функция; $C(t)$ — гармонические функции с фиксированными периодами; $X(t)$ — случайный процесс с нулевым математическим ожиданием; $N(t)$ — случайная помеха измерения.

Функция $B(t)$ характеризуется медленными, продолжительными измерениями условий работы или параметров промышленного оборудования и характеристик сырья. Компонента $B(t)$ может быть рассчитана при помощи различных методов фильтрации. Ее вид во многих случаях можно определить при анализе диаграмм, записанных в сжатом масштабе времени. Гар-

монические функции $C(t)$ образуются вследствие разного вида повторяющихся процессов и явлений. Для определения этой составляющей можно использовать распространенный метод выделения скрытых периодичностей — корреляционный анализ. Случайная компонента $X(t)$ возникает в результате одновременного действия совокупности независимых или слабо связанных друг с другом факторов, которые можно сравнить по эффекту участия в формировании $X(t)$. Характеристики стационарного случайного процесса $X(t)$ могут быть получены с помощью методов статистики этих процессов. Помеха измерения $N(t)$ — совокупность разнообразных случайных процессов, возникающих в чувствительных элементах в каналах связи, измерительных устройствах и преобразователях. Определить данную компоненту можно, используя один из доступных методов фильтрации.

Расчет выполнен по основным формулам и законам математической статистики [7] и включает в себя определение математического ожидания, дисперсии для небольшого числа экспериментов, коэффициентов корреляции между экспериментальными величинами.

Результаты

Система автоматического управления температурой в здании представима в следующем виде (рис. 1) [9]. Вода системы отопления, нагретая в теплообменнике ТО сетевой водой, поступает в радиатор отопления РО, проходя регулируемый клапан с исполнительным механизмом ИМ. Управление задвижкой осуществляется с помощью программно-логического контроллера ПЛК, на который поступает информация о температуре наружного воздуха с датчика температуры Т.

Исследуемый объект — тепловой пункт, находящийся в учебном корпусе университета. Здание расположено в климатических условиях г. Москвы. Окна корпуса с внешней стороны ориентированы на северо-запад, влияние ветра с внутренней стороны незначительно ввиду ограничения территории другой частью здания. Класс энергетической эффективности ограждающих конструкций — С. Здание введено в эксплуатацию в 1943 г., стены и перекрытия выполнены из кирпича.

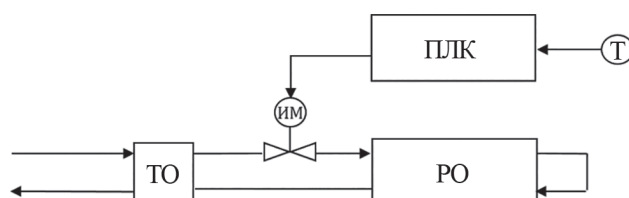


Рис. 1. Схема системы автоматического регулирования:

ТО — теплообменник; ИМ — исполнительный механизм регулирующего клапана; ПЛК — программно-логический контроллер; РО — радиатор отопления; Т — датчик температуры

Основные характеристики рассматриваемого корпуса

Этажность здания.....	4 этажа + подвал
Длина здания, м.....	120
Ширина здания, м.....	20
Длина стен на одном этаже, м.....	320
Высота стен на одном этаже, м.....	4,5
Температура внутреннего воздуха, °C.....	22
Температура наружного воздуха, °C.....	-20
Дата постройки, г.....	1951

Структурная схема системы представлена на рис. 2.

Регулируемой величиной $y(t)$ является температура воздуха в здании [10], поддерживаемая на уровне 20 ± 2 °C, а регулирующим воздействием $\mu(t)$ — перемещение регулирующего клапана исполнительного механизма. В качестве основного возмущающего воздействия $\lambda(t)$ в системе принято изменение температуры наружного воздуха. Помимо этого возможны различные внутренние изменения в системе: колебания давления воды, варьирование эксплуатационных условий, изменения влажности наружного воздуха, скорости и направления ветра, интенсивности солнечной радиации, однако они не рассматриваются ввиду меньшего влияния по сравнению с температурой наружного воздуха и трудоемкости вычислений. Вышеуказанные параметры могут быть учтены при расчете системы с помощью нейронных сетей [11].

Для проведения эксперимента выполнено исключение внешних воздействий на объект. Проведены измерения по трем параметрам: температура наружного воздуха $t_{\text{нв}}$, °C, температура прямой сетевой воды t_1 , °C

и температура воды в обратном трубопроводе t_2 , °C. По результатам эксперимента получен график, приведенный на рис. 3.

Один из подходов определения интервала дискретизации — оценка по максимальной скорости изменения сигнала. По оценкам [12] интервал дискретизации взят равным $\Delta T = 1/10$ мин. Фильтрация сигналов, заключающаяся в исключении высокочастотных помех, не проводилась, ввиду их незначительного влияния на дальнейшие результаты расчета. В рамках работы закон распределения случайной величины по аналогии с большинством промышленных объектов принят нормальным [7]. Данный закон удобен с точки зрения практического применения, поскольку является двухпараметрическим и имеет две числовые характеристики — математическое ожидание и дисперсию. Период времени, в течение которого проводился эксперимент — 72 ч.

Для рассматриваемой системы получены следующие результаты:

- математическое ожидание температуры прямой сетевой воды — $m_1 = 57,52$ °C;

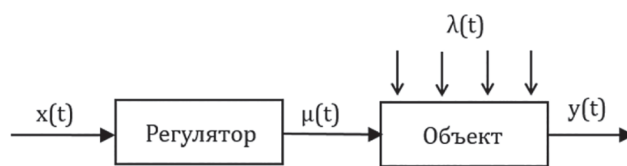


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического регулирования

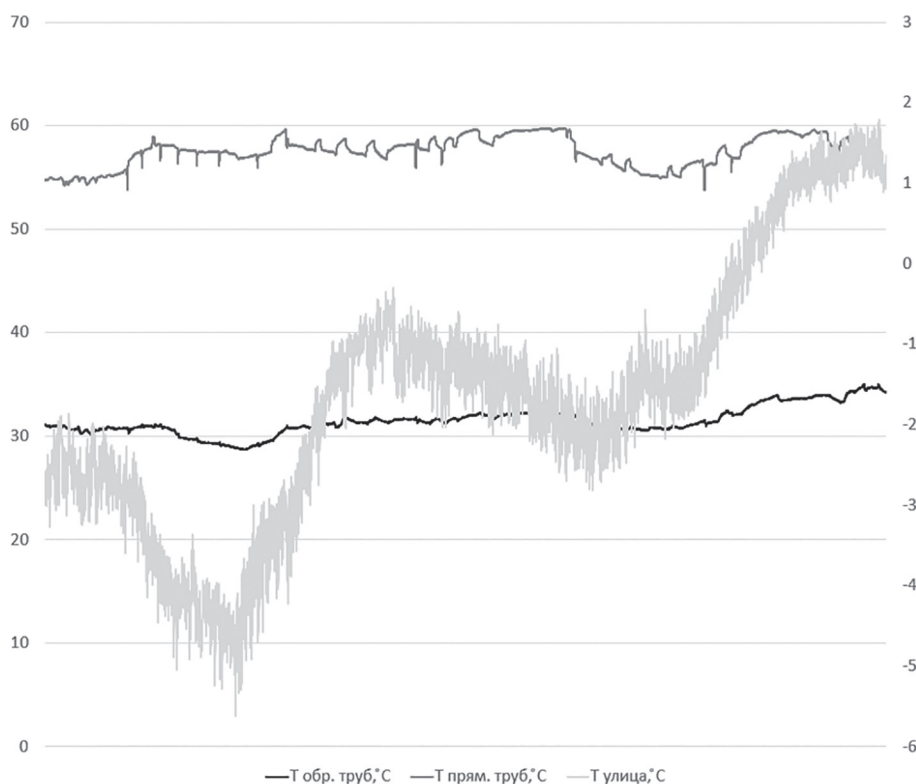


Рис. 3. График влияния температуры наружного воздуха на показания температуры в прямом и обратном трубопроводах

- математическое ожидание температуры обратной сетевой воды — $m_2 = 31,47\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- математическое ожидание температуры наружного воздуха — $m_{\text{нв}} = -1,63\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- дисперсия температуры прямой сетевой воды — $D_1 = 2,086\text{ }(^{\circ}\text{C})^2$;
- дисперсия температуры обратной сетевой воды — $D_2 = 1,798\text{ }(^{\circ}\text{C})^2$;
- дисперсия температуры наружного воздуха — $D_{\text{нв}} = 2,537\text{ }(^{\circ}\text{C})^2$.

По полученным результатам оценен коэффициент корреляции между показаниями температуры t_1 и $t_{\text{нв}}$. Его значение коэффициента составило $r_1 = 0,288$. Значение коэффициента корреляции между температурами t_2 и $t_{\text{нв}}$ — $r_2 = 0,909$.

Анализ полученных результатов

На основании значения коэффициента корреляции между t_1 и $t_{\text{нв}}$ сделан вывод, что коррекция температуры в помещении осуществляется посредством регулирования расхода прямой воды, а не изменения t_1 .

Относительно высокое значение коэффициента между температурами обратной воды и наружного воздуха связано с непосредственным влиянием $t_{\text{нв}}$ на теп-

лотери здания, а значение температуры в обратном трубопроводе напрямую зависит от параметров в самом помещении. Однако же непрямая пропорциональность между вышеуказанными величинами связана с неполным учетом всех возмущающих воздействий на объект.

Заключение

Совершенствование механизма систем регулирования в тепловых пунктах позволяет получить эмпирические модели указанных объектов. Эти модели дают возможность извлекать характеристики действующих в объекте возмущений и проводить анализ системы с учетом всех факторов, оказывающих воздействие на объект. Известная модель объекта, в свою очередь, предоставляет возможность улучшения существующих технологий и их распространения на подобные объекты.

Получены результаты по функционированию тепловых пунктов, рассмотрена система автоматического управления температурой в здании, при анализе экспериментальных данных которой сделан вывод о способе регулирования подачи теплоносителя в системе отопления.

Литература

1. Андрюшин А.В. и др. Цифровизация Российской электроэнергетики // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 6. С. 119—126.
2. Аракелян Э.К. и др. Подходы к повышению интеллектуальности АСУТП крупных электростанций путем решения оптимизационных задач блочного и станционного уровней // Управление развитием крупномасштабных систем: Труды XI Междунар. конф. Т. 3. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2018. С. 18—23.
3. Староверов, Б.А., Улыбышев С.К. Математическая модель теплоснабжения помещения как объекта динамического управления температурой // Вестник Ивановского гос. энергетического ун-та. 2023. № 3. С. 62—67.
4. Баскаков А.П., Мартюшев А.П., Захарченко Г.Я., Ведерников А.Н. Регулирование температуры внутри жилых и общественных помещений — перспективный и эффективный метод энергосбережения // Коммунальщик. 2006. № 7. С. 62.
5. Свитек А.С. Разработка алгоритма идентификации параметров моделей объектов на примере системы управления температурой // Инженерный вестник Дона. 2021. № 8(80). С. 140—150.
6. Волгин В.В., Каримов Р.Н. Оценка корреляционных функций в промышленных системах управления. М.: Энергия, 1979.
7. Пикина Г.А., Щедеркина Т.Е., Волгин В.В. Идентификация объектов управления в теплоэнергетике. М.: Издат. дом МЭИ, 2011.

References

1. Andryushin A.V. i dr. Tsifrovizatsiya Rossiyskoy Elektroenergetiki. Matematicheskie Metody v Tekhnologiyakh i Tekhnike. 2021;6:119—126. (in Russian).
2. Arakelyan E.K. i dr. Podkhody k Povysheniyu Intellektual'nosti ASUTP Krupnykh Elektrostantsiy Putem Resheniya Optimizatsionnykh Zadach Blochnogo i Stantsionnogo Urovney. Upravlenie Razvitiem Krupnomasshtabnykh Sistem: Trudy XI Mezhdunar. Konf. T. 3. M.: Institut Problem Upravleniya Im. V.A. Trapeznikova RAN, 2018:18—23. (in Russian).
3. Staroverov, B.A., Ulybyshev S.K. Matematicheskaya Model' Teplosnabzheniya Pomescheniya kak Ob'ekta Dinamicheskogo Upravleniya Temperaturoy. Vestnik Ivanovskogo Gos. Energeticheskogo Un-ta. 2023;3: 62—67. (in Russian).
4. Baskakov A.P., Martyushev A.P., Zakharchenko G.Ya., Vedernikov A.N. Regulirovanie Temperatury Vnutri Zhilykh i Obshchestvennykh Pomescheniy — Perspektivnyy i Effektivnyy Metod Energoberezheniya. Kommunal'shchik. 2006;7:62. (in Russian).
5. Svitek A.S. Razrabotka Algoritma Identifikatsii Parametrov Modeley Ob'ektov na Primere Sistemy Upravleniya Temperaturoy. Inzhenernyy Vestnik Dona. 2021; 8(80):140—150. (in Russian).
6. Volgin V.V., Karimov R.N. Otsenka Korrelyatsionnykh Funktsiy v Promyshlennykh Sistemakh Upravleniya. M.: Energiya, 1979. (in Russian).
7. Pikina G.A., Shchederkina T.E., Volgin V.V. Identifikatsiya Ob'ektov Upravleniya v Teploenergetike. M.: Izdat. dom MEI, 2011. (in Russian).

8. Волгин В.В., Щедеркина Т.Е. Определение вероятностных характеристик случайных процессов. М.: Изд-во МЭИ, 2004.

9. Dorf P., Bishop R. Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.

10. Панферов, С.В., Панферов В.И. Об определении средней температуры внутреннего воздуха при автоматизации систем отопления зданий // Труды Академэнерго. 2020. № 2(59). С. 97—108.

11. Осиповский Р.В., Проталинский О.М. Имитационное моделирование в задаче функциональной диагностики энергетического оборудования // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 9. С. 106—109.

12. Коновалов В.И. Идентификация и диагностика систем. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010.

8. Volgin V.V., Shchederkina T.E. Opredelenie Veroyatnostnykh Kharakteristik Sluchaynykh Protsessov. M.: Izd-vo MEI, 2004. (in Russian).

9. Dorf R., Bishop R. Sovremennye Sistemy Upravleniya. M.: Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2002. (in Russian).

10. Panferov, S.V., Panferov V.I. Ob Opredelenii Sredney Temperatury Vnutrennego Vozdukha pri Avtomatizatsii Sistem Otopleniya Zdaniy. Trudy Akademenergo. 2020;2(59):97—108. (in Russian).

11. Osipovskiy R.V., Protalinskiy O.M. Imitatsionnoe Modelirovanie v Zadache Funktsional'noy Diagnostiki Energeticheskogo Oborudovaniya. Matematicheskie Metody v Tekhnologiyakh i Tekhnike. 2022;9:106—109. (in Russian).

12. Konovalov V.I. Identifikatsiya i Diagnostika Sistem. Tomsk: Izd-vo Tomskogo Politekh. Un-ta, 2010. (in Russian).

Сведения об авторах:

Гужов Сергей Вадимович — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ»

Темрина Дарья Никитовна — студент НИУ «МЭИ», e-mail: TemrinaDN@mpei.ru

Арбатский Андрей Андреевич — кандидат технических наук, генеральный директор ООО «НИИ «Энергоэффективных технологий микроклимата»

Крылова Елена Владимировна — кандидат педагогических наук, доцент кафедры атомных электрических станций, заместитель директора по учебной работе Института тепловой и атомной энергетики НИУ «МЭИ»

Сорокина Анна Олеговна — студент НИУ «МЭИ», e-mail: SorokinaAO@mpei.ru

Information about authors:

Guzhov Sergey V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI

Temrina Dar'ya N. — Student, NRU MPEI, e-mail: TemrinaDN@mpei.ru

Arbatsky Andrey A. — Ph.D. (Techn.), General Director of the LLC «Research Institute «Energy Efficient Microclimate Technologies»

Krylova Elena V. — Ph.D. (Pedagogical), Assistant Professor of Nuclear Power Plants Dept., Deputy Director for Academic Affairs of Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering, NRU MPEI

Sorokina Anna O. — Student, NRU MPEI, e-mail: SorokinaAO@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 18.04.2025

The article received to the editor: 18.04.2025

Статья принята к публикации: 31.10.2025

The article has been accepted for publication: 31.10.2025