

# АЛГОРИТМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЕМ ВОЗДУХА И ВЕНТИЛЯЦИЕЙ ЗДАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА

Рассадин Ю.М., Терентьева М.А.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
rassadin@ipu.ru, terentmarina@gmail.com

*Аннотация.* Для централизованной системы кондиционирования воздуха и вентиляции разработан алгоритм поддержания требуемого микроклимата в помещениях различного назначения, учитывается тепло от оборудования, людей, внешней среды, а также концентрация углекислого газа. Интенсивность вентиляции и мощность системы кондиционирования рассматриваются как управляющее воздействие.

*Ключевые слова:* микроклимат, уравнения теплового баланса, ПИ-регулятор.

## Введение

В жилых зданиях, корпусах научно-исследовательских и образовательных организаций, с каждым годом уделяется все больше внимания качеству и эффективности их эксплуатации. Особое значение придается поддержанию микроклимата: температура должна быть комфортной для людей и безопасной для оборудования. Например, высокоточные приборы при работе выделяют значительное количество тепла, и без эффективного охлаждения могут перегреваться, что приводит к сбоям в работе и искажению данных. В зимний период неоптимальная температура это негативно сказывается на здоровье сотрудников и их продуктивности. Таким образом, создание комфортных условий – одна из ключевых задач для инженерных систем здания. Современные системы управления микроклиматом эволюционируют от простого контроля температуры к комплексным решениям, включающим мониторинг множества параметров: температуры, влажности, концентрации углекислого газа и скорости воздухообмена.

Целью данной работы стоит разработать алгоритм, обеспечивающий поддержание заданной температуры и допустимого уровня углекислого газа в различных помещениях с учетом различных тепловых нагрузок. Система управления основывается на следующих параметрах: коэффициент воздухообмена, определяющий долю подменяемого вентиляцией воздуха, и тепловая мощность системы кондиционирования. Разрабатываемый алгоритм должен назначать значения этих параметров, учитывая существенно различающуюся динамику тепловых процессов в серверной и гостиной, изменения концентрации углекислого газа в гостиной, а также суточные колебания наружной температуры и концентрации углекислого газа в наружном воздухе.

## 1. Постановка задачи

Помещение на полигоне ИПУ РАН имеет комнаты с разными требованиями к тепловому режиму. В серверной присутствует оборудование, которое выделяет большое количество тепла, поэтому важно поддерживать температуру на низком уровне. В то же время в гостиной, где нет такого оборудования, но работают сотрудники, необходимо поддерживать более высокий температурный уровень и контролировать концентрацию углекислого газа, так как люди выделяют значительно меньше тепла, но еще являются источником углекислого газа. Конечная цель работы заключается в разработке алгоритма управления для комплексной математической модели микроклимата в серверной и гостиной. Для этого требуется построить математическую модель теплообмена, учитывающую тепловые потоки между помещениями и с внешней средой, а также внутренние источники тепла от оборудования и людей. На основе модели необходимо сформулировать законы управления по обратной связи для поддержания заданных параметров температуры и уровня концентрации углекислого газа. Завершающим этапом является анализ поведения системы, включая оценку адекватности модели, эффективности управления и взаимовлияния помещений. Известные начальные параметры:

- Объем серверной комнаты:  $V_s = 40.6 \text{ м}^3$
- Объем гостиной комнаты:  $V_i = 71.187 \text{ м}^3$
- Плотность воздуха:  $\rho = 1.225 \text{ кг/м}^3$
- Начальная температура в серверной комнате:  $T_s(0) = 300 \text{ К}$
- Начальная температура в гостиной комнате:  $T_i(0) = 300 \text{ К}$
- Желаемая температура в серверной комнате:  $T_{des,s} = 293 \text{ К}$

- Желаемая температура в гостиной комнате:  $T_{des,g} = 296 \text{ K}$
- Тепловая мощность сервера:  $Q_{serv} = 1500 \text{ Вт}$
- Тепловыделение человека:  $W_{oc} = 120 \text{ Вт}$
- Удельная теплоемкость воздуха:  $c_p = 1005 \text{ Дж/(кг·К)}$

Временной промежуток – 2 дня, шаг – 0.1 секунда

Для корректного синтеза законов управления микроклиматом необходимо учитывать возмущающие воздействия внешней среды, которые существенно влияют на тепловой баланс здания и работу климатического оборудования. Про моделируем влияние внешней среды, для этого воспользуемся аналитической моделью суточных колебаний температуры наружного воздуха. В данной работе применим упрощенную, но физически обоснованную модель синусоидального изменения температуры:

$$T_{\text{погодн}}(t) = 274 + 3 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{86400}\right), \quad (1)$$

где  $t$  – время в секундах, 86400 – количество секунд в сутках (24 часа). Такой подход описан в работе [1], где рассматривается применение синусоидальных функций для воссоздания периодических изменений температуры.

При выводе уравнения теплового баланса системы будем основываться на микроклиматической модели, представленной в источнике [2]. Подобные модели теплового баланса, как и алгоритмы управления на их основе, активно применялись и в классических автоматизированных системах, в том числе реализованных на микроЭВМ, что подробно рассмотрено в [3]. В настоящей работе акцент сделан на регулировании температуры в помещениях, динамика температуры в которых, близкая к условиям в серверной и гостиной комнатах, описывается следующим образом:

$$\begin{cases} m_s c_p \frac{dT_s(t)}{dt} = Q_{\text{сервера}} + \alpha_1 m_s c_p (T_{\text{погодн}}(t) - T_s(t)), \\ m_g c_p \frac{dT_g(t)}{dt} = N_{oc}(t) W_{oc} + Q_{\text{heat}} + \alpha_2 m_g c_p (T_{\text{погодн}}(t) - T_g(t)), \end{cases} \quad (2)$$

где  $m_s = V_s \cdot \rho$ ,  $m_g = V_g \cdot \rho$ ,  $N_{oc}(t)$  – количество людей в помещении.

## 2. Синтез базового алгоритма обратной связи

Управляющими воздействиями системы выступают коэффициент воздухообмена, определяющий долю подменяемого вентиляцией воздуха в единицу времени ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) и тепловая мощность системы кондиционирования ( $Q_{\text{heat}}$ ).

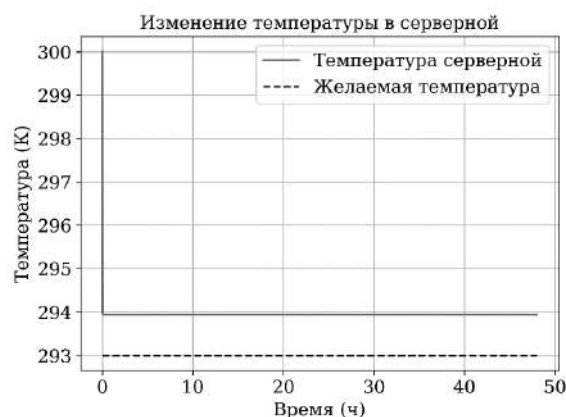


Рис. 1. Пример работы П-регулятора в серверной комнате

Сначала найдем  $\alpha_1$ . Пусть  $e_1 = T_s(t) - T_{des,s}$  – ошибка регулирования, отражающая отклонение текущей температуры  $T_s(t)$  от заданного значения  $T_{des,s}$ . Рассмотрим производную этой ошибки  $\dot{e}_1$ , поскольку именно динамика ошибки позволяет оценить, как быстро и устойчиво система реагирует на изменения и стремится к заданному значению [4]. Анализируя производную, можно разработать стратегию управления, обеспечивающую не только минимальную ошибку регулирования, но и желаемую динамику переходного процесса. Из системы (2) получим:

$$e_1 = \dot{T}_s(t) - \dot{T}_{des,s} = \frac{1}{m_s c_p} \left( Q_{сервера} + \alpha_1 m_s c_p (T_{погодн}(t) - T_s(t)) \right). \quad (3)$$

Для начала рассмотрим возможность применения П-регулятора в качестве закона управления для системы (3). Этот подход позволяет обеспечить простую и быструю реакцию системы на изменение температуры, однако его возможности ограничены при наличии постоянных внешних возмущений. В частности, для нашего случая (постоянного тепловыделения серверного оборудования) важно проанализировать, будет ли П-регулятор обеспечивать приемлемое качество управления. Замкнутая система (3) преобразуется в виде:

$$e_1 = \frac{1}{m_s c_p} \left( Q_{сервера} + m_s c_p (-k_1 e_1) \right) = \frac{Q_{сервера}}{m_s c_p} - k_1 e_1, \quad (4)$$

где  $k_1$  – коэффициент пропорциональной обратной связи. Когда система переходит в установившейся режим, начинается выполнение соотношения статики. Получим ошибку установившегося режима (4) при П-регуляторе:

$$\frac{de_1}{dt} = 0 \Leftrightarrow \frac{Q_{сервера}}{m_s c_p} - k_1 e_1 = 0 \Leftrightarrow e_1 = \frac{Q_{сервера}}{k_1 m_s c_p}. \quad (5)$$

Видно, что чем больше коэффициент пропорциональной обратной связи, тем меньше ошибка регулирования. Если нужно, чтобы  $e_1 < \Delta$ , где  $\Delta$  — требуемая точность регулирования, то из (5) можно получить коэффициент усиления для обратной связи, который обеспечит требуемую точность.

На рис. 1 видно, что желаемая температура  $T_{des,s} = 293\text{K}$  не была достигнута даже при наличии допустимого отклонения. Это свидетельствует о наличии установившейся ошибки, вызванной постоянным тепловыделением серверного оборудования, которое можно рассматривать как внешнее стационарное возмущение. В таких условиях пропорциональный регулятор не способен обеспечить необходимое качество управления. Для компенсации постоянного возмущения и устранения статической ошибки воспользуемся ПИ-регулятором. Получим:

$$\alpha_1 m_s c_p (T_{погодн}(t) - T_s(t)) = m_s c_p (-k_1 e_1 - k_{i1} \Delta t \sum_{j=1}^n e_{j1}), \quad (6)$$

где  $k_{i1}$  – коэффициент интегральной составляющей. Так как  $T_s(t) = e_1 + T_{des,s}$ , то можно назначить:

$$\alpha_1 = \frac{1}{T_{погодн}(t) - e_1 - T_{des,s}} (-k_1 e_1 - k_{i1} \Delta t \sum_{j=1}^n e_{j1}). \quad (7)$$

Заметим, что ПИ-регулятор эффективен в решении задач управления для систем с постоянными возмущениями. Этот подход широко применяется в теории автоматического управления [5].

На рис. 2 видно, что желаемая температура  $T_{des,g} = 296\text{K}$  не была достигнута с помощью П-регулятора из-за воздействия внешних неконтролируемых возмущений от присутствующих в помещении людей. Хотя количество людей в помещении может меняться, на некоторых продолжительных промежутках времени будем считать его постоянным. Кроме того, существенно то, что характер изменений этой величины является ступенчатым. Поэтому, аналогично (6)-(7), воспользуемся ПИ-регулятором. Получим:

$$Q_{heat} + \alpha_2 m_g c_p (T_{погодн}(t) - T_g(t)) = m_g c_p (-k_2 e_2 - k_{i2} \Delta t \sum_{j=1}^n e_{j2}), \quad (8)$$

где  $k_{i2}$  – коэффициент интегральной составляющей.

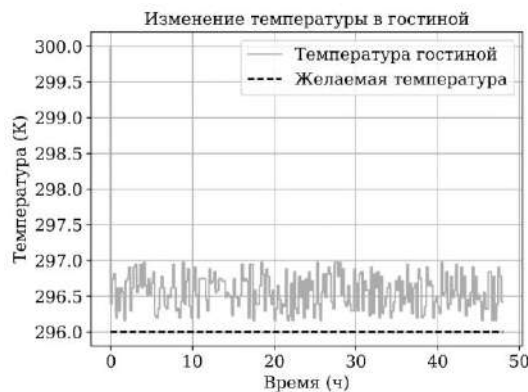


Рис. 2. Пример работы П-регулятора в гостиной комнате

Рассмотрим возможные варианты выбора управляющих воздействий в уравнении (8). Можно перекрыть вентиляцию и тогда  $Q_{heat}$ , т.е. система кондиционирования, полностью обрабатывает ПИ-регулятор. Однако, для иллюстрации работоспособности алгоритма назначим:

$$Q_{heat} = \frac{1}{2} m_g c_p (-k_2 e_2 - k_{i2} \Delta t \sum_{j=1}^n e_{j2}), \alpha_2 = \frac{1}{2(T_{погодн}(t) - T_g(t))} (-k_2 e_2 - k_{i2} \Delta t \sum_{j=1}^n e_{j2}).$$

### 3. Исследование и настройка регуляторов

В ходе исследования были найдены наиболее подходящие параметры управления вентиляцией серверной комнаты. Известно, что  $k_1 > \frac{1500}{m_s c_p} \approx 0,03$  и  $k_{i1} \neq 0$ .

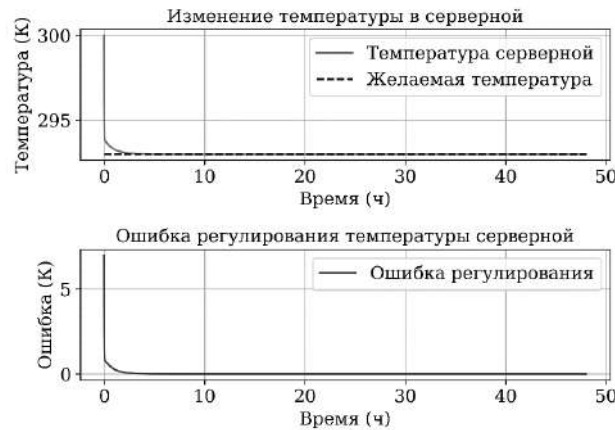


Рис. 3. Результат работы

На рис. 3 представлены результаты моделирования при  $k_1 = \frac{1600}{m_s c_p}$ ,  $k_{i1} = \frac{0,5}{m_s c_p}$ . Показан лучший результат настройки: температура быстро достигла заданного значения без колебаний. Такое поведение достигается благодаря низким коэффициентам пропорциональной составляющей и интегральной составляющей. Таким образом, именно этот вариант можно рассматривать как наиболее эффективный. Настройка регуляторов при наличии ограничений на управление описана в [6].

Далее были найдены наиболее подходящие параметры управления вентиляцией гостиной. Известно, что  $k_2 > \frac{3600}{m_g c_p} \approx 0,04$  и  $k_{i2} \neq 0$ .

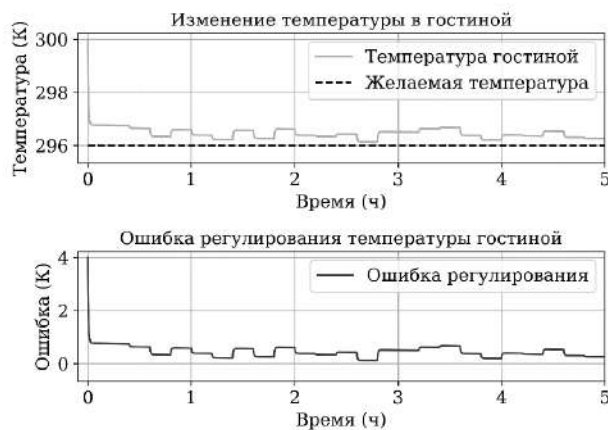


Рис. 4. Результаты моделирования

На рис. 4 представлены результаты моделирования при  $k_1 = \frac{3700}{m_g c_p}$ ,  $k_{i2} = \frac{0,1}{m_g c_p}$ . Показан лучший результат настройки: температура стремится к желаемой с отклонением в  $\Delta = 1$  К, а ошибка регулирования стремится к нулю. Таким образом, именно этот вариант можно рассматривать как наиболее эффективный.

#### 4. Заключение

В работе разработана модель динамики температуры для серверной и гостиной, учитывающая тепловые нагрузки от оборудования, людей и суточные колебания наружной температуры. На основе ПИ-регулирования создан мультирежимный алгоритм управления вентиляцией и кондиционированием, демонстрирующий устойчивую работу в различных условиях. В серверной достигается быстрое регулирование без перерегулирования, а в гостиной система эффективно компенсирует случайные изменения тепловой нагрузки, удерживая температуру в допустимых пределах. Модель может стать основой для развития систем управления микроклиматом с расширением на учёт теплопотерь, влажности и качества воздуха [7]. Перспективным направлением является применение предиктивных стратегий (МРС) для повышения адаптивности и энергоэффективности системы.

#### Литература

1. *Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S.* Fundamentals of Heat and Mass Transfer: 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. – 997 p.
2. *Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina E., Bischi A., Turitsyn K.* Model Predictive Control of Indoor Microclimate: Existing Building Stock Comfort Improvement // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – Vol. 179. – P. 219–228. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.046.
3. *Бесекерский В.А., Изранцев В.А.* Системы автоматического управления с микроЭВМ. Ленинград: Машиностроение, 1987. – 312 с.
4. *Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В.* Блочный синтез систем управления роботами-манипуляторами в условиях неопределенности. М.: ЛЕНАНД, 2014. – 208 с.
5. *Мирошник И.В.* Теория автоматического управления. Линейные системы: учебное пособие. Санкт-Петербург: Питер, 2005. – 336 с. (Серия «Учебное пособие»).
6. *Уткин А.В., Уткин В.А.* Синтез систем стабилизации при односторонних ограничениях на управляющие воздействия // *Проблемы управления*. – 2020. – № 3. – С. 3–14.
7. ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI). Atlanta: ASHRAE, 2017. URL: <https://studylib.es/doc/8956387/2017-ashrae-handbook-fundamentals-si.pdf>.