

СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ В ЗАДАЧЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЙ

Ю.М. Рассадин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117342, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: rassadin@ipu.ru

Ключевые слова: микроклимат, комфорт, интеллектуальная энергетика, система сбора данных, наблюдатель состояния.

Аннотация: В работе описан подход к информационному обеспечению методов регулирования микроклимата помещений. Описана система сбора данных о базовых характеристиках внутренней среды здания, развернутая на электроэнергетическом полигоне ИПУ. Температура воздуха, влажность, освещенность и содержание углекислого газа измеряются каждые 5–15 минут. Рассмотрена постановка задачи регулирования температуры воздуха в помещении. При построении динамической модели объекта учтены исполнительные устройства, погодные условия и собственная тепловая инерция конструкций здания, обсуждается подход к эмпирической идентификации параметров модели. Для неизмеряемого подпространства состояния предложен наблюдатель состояния с разрывными корректирующими воздействиями. Результаты могут быть использованы при решении задач обеспечения комфорта, прогнозирования и оптимизации энергопотребления зданий методами управления с предсказывающими моделями.

1. Введение

В структуре энергопотребления жилых и офисных зданий первое место занимают системы отопления и кондиционирования воздуха (СОК). По различным оценкам, на них приходится от 50 до 70 процентов всей расходуемой энергии. Таким образом, оптимизация потребления для этого класса устройств, пусть даже на 5-10 процентов, повлечет за собой ощутимое снижение общего уровня расхода энергии. Для жилых и офисных зданий можно выделить два базовых критерия, на которые опираются эксплуатирующие службы: суммарный расход энергии и комфорт – уровень удовлетворенности находящихся внутри людей от окружающей среды. Совершенствование и комбинирование этих критериев, порой противоречащих друг другу, представляет собой основной научный интерес. В этом классе задач все компоненты СОК рассматриваются как исполнительные устройства, а динамические модели объектов, построенные на уравнениях теплового баланса, включают в себя динамику всех основных микроклиматических характеристик: температуры, относительной влажности, освещенности, концентрации вредных примесей и

углекислого газа. Это обстоятельство определило потребность в дополнительных измерительных комплексах, охватывающих микроклиматические переменные.

Микроклиматическая подсистема создавалась как вспомогательный измерительный инструмент для экспериментов по предсказанию энергопотребления. Однако высокий интерес к объекту мониторинга, а также простота разворачивания сетей из автономных датчиков привели к тому, что к 2023 году система стала вполне самостоятельным инструментом для различных исследований и инженерных задач. Созданную подсистему можно условно выделить в сектор, способный выработать постановки задач управления, не затрагивающие специфику энергопотребления. Составные части микроклиматической системы следят за качеством воздуха в общественных пространствах и на спортивных объектах Института, в реальном времени на официальном сайте ИПУ транслируются погодные условия, непрерывно измеряется температура в центральной серверной, морозильной камере столовой, данными о влажности почвы обеспечен агро-полигон.

В этой работе описываются подходы к синтезу управления в задачах обеспечения комфорта внутренней среды для зданий общественного назначения, которые предлагает Центр интеллектуальной цифровой электроэнергетики ИПУ РАН. Наши подходы основываются на теории устойчивости, анализе свойств управляемости и наблюдаемости, методах скользящих режимов и методах оптимизации линейных задач. При постановке задач мы стараемся применять подход «серого ящика», т.е. комбинировать математическое описание динамики протекающих процессов с анализом накопленных данных для параметрической идентификации моделей. Основным интересом является разработка методов построения динамической модели микроклимата для здания. Подобные модели необходимы при решении задач обеспечения комфорта, прогнозирования и оптимизации энергопотребления зданий методами управления с предсказывающими моделями.

2. Постановка задачи

В последнее время все большее внимание уделяется проблемам обеспечения высокого уровня комфорта для людей внутри зданий, фокус смещается с экономии энергозатрат [1] на обеспечение оптимального уровня комфорта для человека. Стоит отметить, что такая эволюция целевого функционала по-прежнему требует минимизации потребления ресурсов, что приводит к двум конкурирующим оптимизационным формулировкам. Итоговая задача оптимизации становится минимаксной при различных весах двух конфликтующих функционалов [2]. В статье рассматривается проблема регулирования температуры воздуха в помещении, которая является результатом декомпозиции, например, задачи подготовки помещения к некоторому заранее запланированному событию.

Рассмотрим динамику температуры в помещении, описываемую уравнениями

$$(1) \quad \begin{aligned} C_P m \dot{T} &= U(T_{out} - T) + U^*(T^* - T) + Q_h + Q_{hum} N_{hum} + C_P \alpha (T_{vent} - T) \\ C^* m^* \dot{T}^* &= -U^*(T^* - T) \end{aligned}$$

где C_P – теплоемкость помещения, m – масса воздуха в помещении, U – коэффициент теплопередачи между воздухом в помещении и снаружи, U_i – тот же коэффициент для i -го смежного помещения, T – температура воздуха внутри помещения, T_{out} –

температура наружного воздуха. $Q_{hum}N_{hum}$ – количество тепла, выделяемое посетителями, Q_h – тепло от приборов отопления, $C_r\alpha(T_{vent} - T)$ – тепло, удаляемое вентиляцией. Переменная T^* включает в себя внутреннюю температурную инерцию помещения и суммарный коэффициент инерции U^* [1].

2.1. Система сбора данных

В данном разделе описывается структура данных. Более подробно измерительный полигон описан в работе [3], а также со структурой измерений можно ознакомиться на сайте Центра¹. На настоящий момент в корпусах ИПУ развернуты три локальных полигона микроклиматических измерений, каждый из которых объединяет несколько соседствующих помещений. Беспроводные датчики микроклимата собирают показания температуры, влажности, концентрации углекислого газа, освещенности и пр. Данные собираются на центральном сервере, они доступны «онлайн» и при обработке интерполируются для синхронизации по времени. Дополняют климатическую сеть две метеостанции на территории ИПУ и веб-камера, следящая за корпусом. Массив накопленных данных, охватывающий три последних года, также доступен для ознакомления на сайте Центра. На основе этих данных было проведено несколько исследований [4], основной целью которых была параметрическая идентификация различных динамических моделей, которые в дальнейшем будут использованы в процедурах синтеза обратной связи.

3. Синтез базового закона управления

В этом разделе мы рассмотрим синтез закона обратной связи для задачи управления комфортом. На первом этапе необходимо получить эталонный закон обратной связи, который составляется в предположении, что все переменные и динамические параметры известны, измерены и т.д. В данной работе рассматривается проблема регулирования температуры в помещении. В эксплуатации зданий эта проблема возникает, когда необходимо подготовить помещение к какому-либо запланированному событию.

В нашем случае во втором уравнении системы (1) нет управляющего воздействия, но оно может появиться при подогреве полов. Таким образом, можно сказать, что динамика системы описывается первым уравнением, а второе уравнение появилось в результате расширения пространства состояний для более точной аппроксимации. В условиях нашего эксперимента система (1) может быть сведена к

$$(2) \quad \begin{aligned} C_{pm}\dot{T} &= U(T_{out} - T) + U^*(T^* - T) + W_{h/c}, \\ C^*m^*\dot{T}^* &= -U^*(T^* - T), \end{aligned}$$

Для обеспечения желаемой температуры воздуха выберем пропорциональный закон управления $W_{h/c} = -k(T - T_d)$, где k – коэффициент усиления, а T_d – уставка по температуре. Температура наружного воздуха может рассматриваться как внешнее возмущение, что приводит к конечной точности $\Delta(T - T_d) < \epsilon$. В рамках нашей задачи погодные условия могут быть приблизительно описаны

¹<https://energy.ipu.ru/datasets>

постоянными или очень медленно меняющимися переменными. Поэтому для повышения точности управления мы можем использовать метод ПИ-регулятора. Для синтеза соответствующего закона управления введем расширенное пространство состояний для помещения

$$(3) \quad \begin{aligned} \dot{I} &= T - T_d \\ C_P m \dot{T} &= U(T_{out} - T) + U^*(T^* - T) + W_{h/c}, \\ C^* m^* \dot{T}^* &= -U^*(T^* - T), \end{aligned}$$

где I – интеграл по рассогласованию регулирования. Для системы (3) закон обратной связи может быть получен блочным методом [5]. На первом шаге мы задаем виртуальное управление $T = -k_1 I$. Второй шаг – обеспечение этого соотношения путем задания реального управляющего воздействия:

$$W_{h/c} = -k_2(T + k_1 I),$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты усиления блочного алгоритма, в терминах ПИ-регулирования получаем $P_I = k_1 \cdot k_2$, $P = k_2$.

4. Наблюдатель состояния для средней радиационной температуры

Одной из важных проблем в обеспечении комфорта является оценка неизмеряемых переменных. Иногда переменные трудно измерять непрерывно, иногда датчики стоят дорого. Поэтому мы рассмотрели возможность использования теории наблюдателей [6] для оценки средней радиационной температуры. Эта переменная состояния важна для прогнозирования комфорта и может быть измерена тепловизионными датчиками или датчиками «черный шар».

Рассмотрим ситуацию, когда средняя радиационная температура не может быть измерена напрямую. В системе (1) T^* можно рассматривать как среднюю радиационную температуру. В случае, когда она не измеряется, мы можем использовать метод наблюдателя, чтобы получить оценки для синтеза управления с обратной связью. Рассмотрим более общий вид

$$(4) \quad \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= A\mathbf{x} + B\mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = C\mathbf{x}, \\ \dot{\mathbf{z}} &= A\mathbf{z} + B\mathbf{u} + V(C\mathbf{x} - C\mathbf{z}), \end{aligned}$$

где $\mathbf{x} = \text{col}(T, T^*)$, A – (2×2) – матрица коэффициентов из (1), $B = \text{col}(1, 0)$ – коэффициенты для управления, $C = (1, 0)$ – матрица выходных коэффициентов. Матрица наблюдаемости для этой системы имеет полный ранг:

$$(5) \quad O = \begin{pmatrix} C \\ CA \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ a_{11} & a_{12} \end{pmatrix}, \quad \text{rank}(O) = \dim(O),$$

что означает, что система наблюдаема и есть возможность получить весьма точные оценки для неизмеряемых переменных.

Синтез корректирующей матрицы V должен сделать замкнутую систему (4)

устойчивой, что приводит к сходимости вектора наблюдателя $|\mathbf{z} - \mathbf{x}| \rightarrow 0$ к текущим значениям вектора состояния. Для этого необходимо, чтобы все действительные части собственных значений матрицы $(A - VC)$ были отрицательными:

$$(6) \quad \operatorname{Re}(\lambda_{1,2}) < 0, \quad \det(A - VC - \lambda E) = 0.$$

Существует и другой способ получения оценок вектора состояния – с помощью наблюдателей на скользящем режиме [5].

$$(7) \quad \begin{aligned} \dot{z}_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}z_2 + Bu + v_1, \\ \dot{z}_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}z_2 + v_2, \end{aligned}$$

где v_1 и v_2 выбираются в качестве сигнум-функций с достаточно большими отрицательными коэффициентами усиления. На первом этапе мы можем выбрать $v_1 = -M_1 \operatorname{sign}(x_1 - z_1)$. После наступления скользящего режима мы можем использовать процедуру фильтрации для получения эквивалента переменной коррекции переключения $v_{1,eq} = e_2$. Выход этого фильтра может быть использован для задания второго корректирующего входа $v_2 = -M_2 \operatorname{sign}(e_2)$. В обоих случаях после сходимости процедуры наблюдения мы получаем расчетное значение средней радиационной температуры в текущем помещении.

5. Заключение

В работе описан подход к информационному обеспечению задач регулирования микроклиматом, постановка которых является следствием более крупного проекта по прогнозированию и управлению энергопотреблением. Система сбора данных дополнена упрощенной динамической моделью объекта и соответствующими ей алгоритмами, а именно базовым законом обратной связи и наблюдателем состояния для неизмеряемых величин.

Список литературы

1. Ryzhov A.A., Ouerdane H., Грязина Е.Н., 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.
2. Baranova D., Sovetnikov D., Semashkina D., Borodinecs A. Correlation of energy efficiency and thermal comfort depending on the ventilation strategy // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 205. P. 503-510.
3. Rassadin Yu., Pashchenko A. Microclimate Monitoring System Design for the Smart Grid Analysis and Constructive Parameters Estimation // *IFAC PapersOnline*. 2022. Vol. 55, No. 9. P. 479-484.
4. Пашченко А.Ф., Рассадин Ю.М. Оценка взаимосвязи параметров микроклимата с учетом тепловой инерции внешних стен здания // Труды 15-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2022). М.: ИПУ РАН, 2022. С. 1216-1224.
5. Utkin V., Guldner J., Shi J. *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems* / 2nd ed.. CRC Press.
6. Квакернаак Х., Сиван Р. *Линейные оптимальные системы управления*. М.: Мир, 1977. 650 с.