

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ И МИКРОКЛИМАТОМ БОЛЬШИХ МНОГОЗОННЫХ ЗДАНИЙ

Колодкина А. С.¹

(Ярославский промышленно-экономический колледж, Ярославль)

Марьясин О. Ю.², Огарков А. А.³

(Ярославский государственный технический университет,
Ярославль)

Рассмотрена задача энергоэффективного управления микроклиматом больших многозонных зданий. Для решения указанной задачи предлагается использовать метод иерархического распределенного прогнозирующего оптимального управления (МРС-подход). Данный метод позволяет достичь минимума глобального критерия качества и выполнение ограничений для всей системы с учетом взаимосвязей между подсистемами. При реализации иерархического распределенного МРС-алгоритма возникает проблема скоординированного решения задачи математического программирования для каждой из подсистем. Для решения глобальной задачи математического программирования авторы предлагают метод, основанный на методе декомпозиции путем разделения ресурсов. Авторами доказано, что если локальные задачи оптимизации имеют решение при определенных допущениях на множества допустимых решений локальных задач, то и задача координации будет иметь допустимое оптимальное решение. Результаты численных экспериментов показали преимущества использования предложенного авторами подхода для управления микроклиматом больших многозонных зданий. Сравнение различных вариантов реализации МРС-алгоритма показало, что иерархический распределенный МРС-алгоритм обеспечивает требуемое качество поддержания микроклимата с учетом выполнения глобальных ограничений при наименьшем энергопотреблении. Наличие различных видов энергоресурсов позволяет, например, при резком увеличении потребления тепловой энергии в часы пик, связанное с ее расходом на бытовые нужды, увеличить, для поддержания требуемого микроклимата, расход электроэнергии.

Ключевые слова: микроклимат, энергоресурсоэффективность, Model Predictive Control, иерархическое оптимальное управление, MATLAB.

¹ Анна Сергеевна Колодкина, преподаватель (anuta_25@mail.ru).

² Олег Юрьевич Марьясин, к.т.н., доцент (maryasin2003@yandex.ru).

³ Андрей Алексеевич Огарков, аспирант (drivemox@mail.ru).

Введение

В области жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) постоянно происходят большие энергетические потери. Только на энергоснабжение жилых, промышленных и общественных зданий расходуется около 35% потребляемых в России энергетических ресурсов. При этом потенциал энергосбережения в области ЖКХ составляет более 30%, из которых около 30% приходится на коммунальные инженерные системы и до 70% – на здания и сооружения [2]. От эффективного использования энергоресурсов в ЖКХ зависит не только сохранение окружающей природной среды, но и уменьшение стоимости предоставляемых потребителям жилищно-коммунальных услуг.

Одной из основных причин больших энергетических потерь в области ЖКХ является низкая автоматизация существующих систем тепло- и энергоснабжения зданий, не позволяющая производить погодозависимое, оптимальное управление энергопотреблением и микроклиматом с учетом индивидуальных характеристик зданий. Особенно это касается больших многоэтажных, многосекционных зданий, зданий, соединенных между собой системой переходов, больших спортивных, культурных и торгово-развлекательных центров.

В настоящее время, с одной стороны, наблюдаются тенденции снижения стоимости потребительской электроники и микропроцессорной техники, увеличения уровня автоматизации и интеллектуализации инженерных систем зданий, широкое распространение распределенных систем управления, систем типа «Интеллектуальное здание», «Зеленое здание» и «Умный дом». С другой, происходит переход от централизованных систем энергообеспечения к децентрализованным системам, в том числе с использованием нетрадиционных источников энергии. Все это приводит к тому, что практически в каждом помещении здания может работать своя локальная система управления микроклиматом.

Новые тенденции дают возможность совершенствования си-

стем управления инженерным оборудованием зданий и снижения больших энергетических потерь в области ЖКХ. В частности, вместо традиционных двухпозиционных/трехпозиционных или ПИД-регуляторов для управления микроклиматом помещений могут использоваться более сложные алгоритмы автоматического и оптимального управления.

В зарубежных публикациях широко представлены работы, в которых для управления микроклиматом зданий предлагаются системы адаптивного и оптимального регулирования, системы на базе нечеткой логики и с использованием нейросетевых и генетических алгоритмов. Обзор таких работ можно найти, например, в [9]. В настоящее время в зарубежной научной прессе наиболее активно обсуждается подход, использующий прогнозирующие модели для управления энергопотреблением и микроклиматом зданий. Этот подход получил название Model Predictive Control (MPC) [8] и уже давно хорошо зарекомендовал себя при применении в других областях, например в нефтехимии [12]. К достоинствам MPC-подхода можно отнести то, что оптимальный регулятор, синтезированный в соответствии с данным подходом, обеспечивает соблюдение ограничений на управляющие и выходные переменные и позволяет достичь компромисс между робастностью и качеством регулирования. Однако, как и большинство оптимальных систем, он требует знания модели объекта управления. И здесь достоинством MPC-подхода является то, что поскольку он реализует закон управления с обратной связью по состоянию и управление рассматривается и реализуется на очень коротком промежутке времени, то для синтеза управления достаточно использовать лишь приближенные, линейные модели. Кроме того, прогнозирующие свойства MPC-регулятора позволяют эффективно подавлять контролируемые возмущения, учитываемые в модели.

1. Математическая модель микроклимата многозонного здания

Рассмотрим задачу управления микроклиматом здания, состоящего из множества зон (секций, помещений). Условием выделения зоны будем считать наличие у зоны собственной системы управления микроклиматом. Это может быть свой индивидуальный тепловой пункт (ИТП), электрический обогреватель или конвектор, газовый обогреватель, это может быть любая смешанная система отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК или HVAC, как их называют на западе). Предполагается, что ИТП или другое климатическое оборудование имеет средства автоматического управления по заданной программе.

Так как зоны здания имеют общие ограждающие конструкции, то на микроклимат в каждой зоне оказывает влияние микроклимат в соседней зоне. Это влияние тем сильнее, чем выше разность параметров микроклимата в соседних зонах, больше площадь общих ограждающих конструкций и выше их коэффициенты тепло и массопередачи.

Составим математическую модель микроклимата многозонного здания. Для простоты будем полагать, что зоны имеют одинаковый материал внешних стен и перекрытий между зонами. В основу математической модели положены уравнения теплового и материального баланса здания [3].

Динамика микроклимата здания без учета термической массы ограждающих конструкций (стен, окон, пола, потолка), инфильтрации тепла, влаги и газов через ограждающие конструкции, солнечной радиации и бытовых тепло-, влаго- и газовыделений может быть описана системой дифференциальных уравнений

$$(1) \quad \left\{ \begin{array}{l} c\rho V_i \frac{dT_i(t)}{dt} = \sum_{s=1, s \neq i}^{S_i} k_{in} F_s^{in} (T_s(t) - T_i(t)) + \\ + \sum_{r=1}^{R_i} k_e F_r^{ext} (T_E(t) - T_i(t)) + cG_{ni} (T_{ni}(t) - T_i(t)) + \\ + q_i, i = 1, \dots, N, \\ \rho V_i \frac{dW_i(t)}{dt} = G_{ni} (W_{ni}(t) - W_i(t)), i = 1, \dots, N, \\ \rho V_i \frac{dC_i(t)}{dt} = G_{ni} (C_{ni}(t) - C_i(t)), i = 1, \dots, N, \end{array} \right.$$

где c – теплоемкость воздуха; ρ – плотность воздуха; V_i – объем i -й зоны, $i = 1, 2, \dots, N$; T_i – температура i -й зоны, °C; t – время; S_i – число внутренних ограждающих конструкций i -й зоны; k_{in} – коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций между зонами; F_s^{in} – площадь ограждающих конструкций между зонами, $s = 1, 2, \dots, S_i$; R_i – число внешних ограждающих конструкций i -й зоны; k_e – коэффициент теплопередачи внешних ограждающих конструкций i -й зоны; F_r^{ext} – площадь внешних ограждающих конструкций i -й зоны, $r = 1, 2, \dots, R_i$; T_E – температура наружной среды; G_{ni} – расход приточного воздуха i -й зоны; T_{ni} – температура приточного воздуха i -й зоны; q_i – тепло, полученное от системы теплоснабжения i -й зоны; W_i – влажность воздуха i -й, г; W_{ni} – влажность приточного воздуха i -й зоны; C_i – концентрация CO₂ в воздухе i -й зоны, ppm; C_{ni} – концентрация CO₂ в приточном воздухе i -й зоны. Параметры T_{ni} , W_{ni} , C_{ni} зависят от температуры T_E , влажности W_E , концентрации CO₂ наружного воздуха C_E и реализации системы ОВК.

Структура модели микроклимата здания, соответствующая системе (1), для двухмерного случая описывается схемой, фрагмент которой показан на рис. 1. Здесь индекс i для удобства восприятия разделен на два индекса: индекс i действует по горизонтали, j – по вертикали. Вектор $X_{ij} = \{T_{ij}, W_{ij}, C_{ij}\}$ – вектор параметров микроклимата здания. Вектор $X_E = \{T_E, W_E, C_E\}$ – вектор параметров наружной среды. Такая структура соответствует, например, многоэтажному зданию с последовательным расположением зон. В общем случае структура модели будет описываться трехмерной схемой.

Более точную модель температурного режима здания можно получить, если учесть термическую массу ограждающих кон-

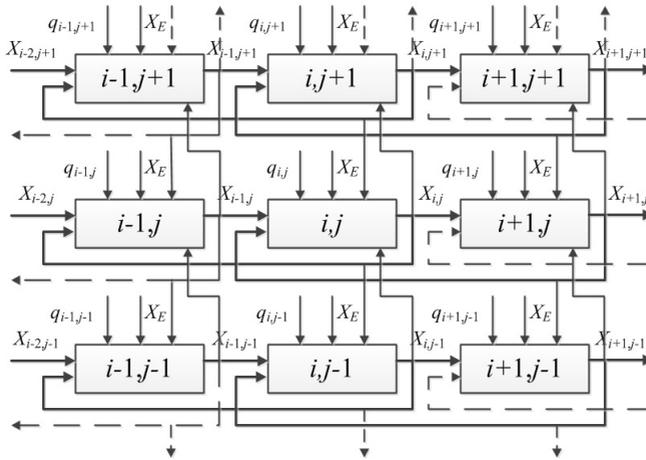


Рис. 1. Структура модели многозонного здания

струкций (стен, окон, пола, потолка). В этом случае к системе уравнений (1) добавляются уравнения

$$(2) \quad \begin{cases} c_{fij} \rho_{fij} V_{fij} \frac{dT_{fij}(t)}{dt} = \alpha_{fij} F_{ij}^{in} (T_i(t) - T_{fij}(t)) - \\ - k_{fij} F_{ij}^{in} (T_{fij}(t) - T_{ei}(t)), i = 1, \dots, N, \\ j = 1, \dots, n, \end{cases}$$

где n – число ограждающих конструкций i -й зоны; c_{fij} – теплоемкость j -й ограждающей конструкции i -й зоны; ρ_{fij} – плотность j -й ограждающей конструкции i -й зоны; V_{fij} – объем j -й ограждающей конструкции i -й зоны; T_{fij} – температура внутренней стенки j -й ограждающей конструкции i -й зоны, °C; α_{fij} – коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности стены j -й ограждающей конструкции i -й зоны; k_{fij} – коэффициент теплопередачи j -й ограждающей конструкции i -й зоны от внутренней поверхности ограждающей конструкции к наружному воздуху; T_{ei} – температура внешней среды: $T_{ei} = T_E$, если j -я ограждающая конструкция является внешней, и $T_{ei} = T_l$, $l \neq i, l = 1, 2, \dots, N$, если j -я ограждающая конструкция является внутренней. Коэффициенты теплопередачи k_{in} и k_e в системе уравне-

ний (1) при этом заменяются на коэффициенты теплоотдачи α_{fij} с внутренней поверхности стены j -й ограждающей конструкции i -й зоны. Массопередачей через ограждающие конструкции мы пренебрегаем в силу ее малости.

Учет термической массы ограждающих конструкций приводит, с одной стороны, к повышению достоверности модели [5], а с другой – к значительному увеличению размерности модели, и, следовательно, к увеличению ее сложности.

В уравнениях (1) не учитывается влияние таких факторов, как инфильтрация, солнечная радиация и бытовые тепловыделения, что естественно приводит к погрешностям определения параметров микроклимата в помещении i -й зоны. Оценка таких факторов осложняется их случайным характером и сложностью измерения. Поэтому учесть их влияние можно только путем мониторинга параметров микроклимата в каждой зоне. Это легко позволяют сделать современные системы типа «Интеллектуальное здание» или «Умный дом».

2. Оптимальное управление энергопотреблением и микроклиматом здания

2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поставим задачу оптимального управления микроклиматом здания. В качестве критерия оптимальности будем использовать критерий типа

$$(3) \quad J = \sum_{i=1}^N J_i,$$

где $J_i = J_i(q_i)$ – критерий оптимальности i -й зоны, где $q_i = \{q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im}, \dots, q_{iM_i}\}$ – расход энергоресурсов для i -й зоны; q_{im} – расход m -го вида энергоресурсов i -й зоны; M_i – число видов энергоресурсов, потребляемых i -й зоной. Критерий (3) должен соответствовать цели, связанной с поддержанием требуемых значений параметров микроклимата здания и одновременной минимизацией расхода энергоресурсов с учетом их стоимости.

Тогда задача оптимального управления энергопотреблением и микроклиматом здания может быть записана в виде

$$(4) \quad J = \sum_{i=1}^N J_i \rightarrow \min_{q_i},$$

при ограничениях задаваемых уравнениями (1), (2), локальными ограничениями

$$(5) \quad \begin{cases} T_{imin}(t) \leq T_i \leq T_{imax}(t), & i = 1, \dots, N, \\ \varphi_{imin} \leq \varphi_i \leq \varphi_{imax}, & i = 1, \dots, N, \\ C_i \leq C_{imax}, i = 1, 2, \dots, N, & i = 1, \dots, N, \\ q_{immin}(t) \leq q_{im}(t) \leq q_{immax}(t), & m = 1, \dots, M_i, \\ i = 1, \dots, N, \end{cases}$$

и глобальным ограничением

$$(6) \quad \sum_{i=1}^N q_{im}(t) \leq q_{mmax}(t), m = 1, \dots, M,$$

где T_{imin}, T_{imax} – минимальное и максимальное значение температур в помещении i -й зоны; $\varphi_{imin}, \varphi_{imax}$ – минимальное и максимальное значение относительной влажности в помещении i -й зоны; C_{imax} – максимальное содержание CO_2 в воздухе i -й зоны; q_{immin}, q_{immax} – минимальное и максимальное количество m -го вида энергоресурса на энергоснабжение i -й зоны; q_{mmax} – максимальное количество m -го вида энергоресурса на энергоснабжение всего здания. Пределы q_{immax}, q_{mmax} задаются с учетом ограничений мощности соответствующих инженерных систем и климатического оборудования.

Если пренебречь несущественными нестационарными эффектами, заключающимися в зависимости коэффициентов модели (1), (2) от ее параметров, и нелинейностями, то уравнения модели микроклимата (1), (2) могут быть записаны в виде системы линейных уравнений состояния

$$(7) \quad \begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + \sum_{l=1, l \neq i}^{L_i} A_l x_l(t) + B_i u_i(t) + G_i w_i(t), \\ y_i(t) = C_i x_i(t), i = 1, \dots, N, \end{cases}$$

где $x_i = \{T_i, T_{fij}, \varphi_i, C_i\}$ – вектор переменных состояния i -й зоны; $x_l = \{T_l\}$ – вектор переменных состояния l -й зоны, $l \neq i, l = 1, 2, \dots, L_i$; L_i – число зон, граничащих с i -й зоной; $u_i = \{q_i\}$ – вектор управляющих переменных i -й зоны;

$w_i = \{T_E, T_{ni}, \varphi_{ni}, C_{ni}\}$ – вектор внешних контролируемых возмущений для i -й зоны; $y_i = \{T_i, \varphi_i, C_i\}$ – вектор выходных измеряемых переменных i -й зоны; $A_i, A_l, B_i, G_i, C_i, i = 1, 2, \dots, N$, – соответствующие матрицы уравнений состояния.

Тогда задача оптимального управления энергопотреблением и микроклиматом здания заключается в минимизации критерия (3) при локальных ограничениях (7) и

$$(8) \quad \begin{cases} y_{imin}(t) \leq y_i \leq y_{imax}(t), & i = 1, \dots, N, \\ u_{imin}(t) \leq u_i \leq u_{imax}(t), & i = 1, \dots, N, \end{cases}$$

и глобальном ограничении

$$(9) \quad \sum_{i=1}^N u_{im}(t) \leq U_m(t), m = 1, \dots, M.$$

Перейдем от непрерывного описания системы к дискретному с сохранением обозначения соответствующих векторов и матриц. Уравнения (7), (8), (9) в этом случае заменяются на уравнения

$$(10) \quad \begin{cases} x_{ik+1} = A_i x_{ik} + \sum_{l=1, l \neq i}^{L_i} A_l x_{lk} + B_i u_{ik} + G_i w_{ik}, \\ y_{ik} = C_i x_{ik}, i = 1, \dots, N, k = 0, \dots, N_p, \end{cases}$$

$$(11) \quad \begin{cases} y_{ikmin} \leq y_k \leq y_{ikmax}, i = 1, \dots, N, k = 0, \dots, N_p, \\ u_{ikmin} \leq u_k \leq u_{ikmax}, i = 1, \dots, N, k = 0, \dots, N_p - 1, \end{cases}$$

$$(12) \quad \sum_{i=1}^N u_{ikm} \leq U_{mk}, m = 1, \dots, M, k = 0, \dots, N_p - 1,$$

где N_p – интервал времени на котором осуществляется управление.

2.2. ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для решения задачи оптимального управления, описываемой системой (10), (11), (12) и критерием (3), будем использовать МРС-подход. Этот подход может быть реализован в различной форме: централизованной, децентрализованной и распределенной [16].

Для централизованного МРС-алгоритма (сМРС) поставленная задача оптимального управления рассматривается в целом,

как задача централизованного управления многомерным объектом. Однако при большом числе зон из-за высокой размерности задачи увеличиваются вычислительные затраты на ее решение, а следовательно, увеличивается время на реализацию оптимального управления. Это может привести к снижению качества управления. Поэтому для решения поставленной задачи мы будем использовать принцип декомпозиции, в соответствии с которым общая задача разбивается на ряд локальных задач оптимизации (подзадач), размерность каждой из которых значительно меньше размерности общей задачи [6]. При этом каждая подзадача реализуется с помощью своей локальной подсистемы управления. Локальные подсистемы могут быть автономными или обмениваться информацией между собой и с верхним уровнем управления. В последнем случае может быть построена иерархическая структура управления. Вопрос о рациональном разбиении общей задачи на подзадачи в данной статье не рассматривается.

Рассмотрим так называемую неперекрывающуюся декомпозицию, когда каждой зоне здания будет соответствовать своя отдельная подсистема. В этом случае каждая i -я локальная подсистема будет решать задачу оптимального управления:

$$(13) \quad J_i \rightarrow \min_{u_i}$$

при ограничениях (10), (11). Если связи между подсистемами и глобальное ограничение (12) игнорируются, то в таком случае получается децентрализованная система оптимального управления. Децентрализованная система функционирует как совокупность автономных подсистем. Игнорирование взаимосвязей приводит к ошибкам, которые тем больше, чем сильнее характер связей между подсистемами. Игнорирование глобального ограничения может нанести урон системе в целом и привести к отключению ее от централизованной системы энергоснабжения. Децентрализованной системе соответствует децентрализованный MPC-алгоритм (dMPC). Данный вариант управления будет эффективным и применим тогда, когда параметры микроклимата в соседних зонах здания постоянно равны или близки по значению, а суммы потребления энергоносителей локальными подсистемами

далеки от предельно допустимых.

Если подсистемы могут обмениваться между собой информацией о значениях параметров микроклимата в каждой зоне по каналам связи, то тогда возможно построение распределенной системы оптимального управления. В распределенной системе учитываются связи между подсистемами, что повышает качество управления микроклиматом, но локальные задачи оптимизации (13) решаются подсистемами нескоординированно. Это может привести к тому, что минимум суммы локальных критериев оптимальности не будет достигать минимума критерия J для централизованной задачи управления. Кроме того, в данном случае необходимость передачи информации между подсистемами требует организации сети связи между ними. Однако в настоящее время ввиду широкого распространения сетевых технологий это обстоятельство не является ограничивающим фактором. Все сказанное относительно глобального ограничения (12) для децентрализованной системы оптимального управления остается справедливым и для распределенной системы. Распределенной системе соответствует распределенный MPC-алгоритм (DMPC). Такой вариант управления может использоваться тогда, когда в целях упрощения система управления не разделяется на уровни и не ставится задача координации локальных подсистем. Пример использования распределенного MPC-алгоритма для задачи оптимального управления тепловым режимом здания можно найти в работе [13].

Если в распределенной системе оптимального управления учитываются связи между подсистемами и необходима координация решения локальных задач оптимизации (13) с целью достижения минимума глобального критерия J , то в этом случае требуется построение иерархической распределенной системы оптимального управления. В такой системе на нижнем уровне будут решаться локальные задачи оптимизации, а на верхнем уровне – задача координации. Данному варианту соответствует иерархический распределенный MPC-алгоритм (HDMPC).

2.3. ИЕРАРХИЧЕСКИЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ MPC-АЛГОРИТМ

Известно [17], что решение задачи оптимального управления с ограничениями, с использованием MPC-подхода, сводится к решению на каждом шаге задачи математического программирования. Требование достижения минимума глобального критерия, учета связей между подсистемами и выполнения глобальных ограничений приводит к необходимости совместного решения локальных задач оптимизации в рамках единой глобальной задачи. При высокой размерности глобальной задачи ее решение может быть связано с большими вычислительными затратами. Для решения сложных задач оптимизации, задач с аддитивно-сепарабельным видом критерия оптимальности и с блочно-диагональной структурой части ограничений традиционно используются методы иерархической оптимизации (декомпозиционные методы оптимизации). Эти методы в основном были разработаны в 60-80-х годах и детально описаны в [1, 4, 7, 10].

Применение методов иерархической оптимизации для решения задач оптимального управления энергопотреблением и микроклиматом зданий с использованием MPC-алгоритмов описано в [11, 14, 15]. В работе [14] описывается применение классического метода Данцига–Вульфа для решения задачи оптимального управления тепловым режимом многозонного здания. При этом задача, решаемая MPC-алгоритмом на каждом шаге, приводится к задаче линейного программирования. В работе [15] для решения задачи, подобной задаче в [14], используется метод декомпозиции Бендерса (Benders' decomposition). Здесь так же, как и в [14], решается задача линейного программирования.

В работе [11] для решения задачи оптимального управления микроклиматом здания используется метод декомпозиции путем распределения ресурсов, ранее описанный в [4]. При этом локальные задачи и задача координации представляют собой задачи линейного программирования. Так как целевая функция координирующей задачи может быть не дифференцируемой в отдельных точках, то для ее решения используется Бандл-метод (bundle

method).

Использование линейного критерия в работах [11, 14, 15] изменяет цель задачи оптимального управления и при переходе к задаче линейного программирования приводит к увеличению числа ограничений. Поэтому авторы предлагают использовать естественный для задач оптимального управления линейными динамическими системами квадратичный критерий оптимальности

$$(14) \quad \begin{cases} J_i = \sum_{k=0}^{k=N_p} ([y_{ik} - y_{zik}]^\top Q_i [y_{ik} - y_{zik}] + \\ + u_i^\top R_i u_i), i = 1, \dots, N, \end{cases}$$

где y_{zi} – заданное значение параметров микроклимата i -й зоны; Q_i – неотрицательно-определенная матрица; R_i – положительно-определенная матрица. Квадратичный критерий (14) позволяет не только экономить энергоресурсы, но и обеспечивать требуемое качество параметров микроклимата в динамических режимах, например, при переходе с одного режима на другой, более энергосберегающий, при отсутствии людей в помещении в нерабочее время. При этом решение задачи оптимального управления i -й подсистемы, описываемой уравнениями (10) с ограничениями (11) и критерием (14), сводится к решению на каждом шаге задачи квадратичного программирования

$$(15) \quad \begin{cases} J_i = v_i^\top H_i v_i + f_i^\top v_i \rightarrow \mathbf{min}_{v_i}, \\ L_{yi} v_i \leq b_{yi}, i = 1, \dots, N, \\ L_{ui} v_i \leq b_{ui}, i = 1, \dots, N, \end{cases}$$

где

$$v_i = \begin{pmatrix} u_{i0} \\ u_{i1} \\ \vdots \\ u_{iN_p-1} \end{pmatrix},$$

а матрицы $H_i, f_i, L_{yi}, b_{yi}, L_{ui}, b_{ui}$ зависят от матриц модели A_i, A_l, B_i, G_i, C_i , весовых матриц Q_i, R_i и векторов ограничений $y_{ikmin}, y_{ikmax}, u_{ikmin}, u_{ikmax}$. Здесь необходимо отметить что вектор v_i формируется из значений управления в текущий момент времени u_{i0} и предсказанных значений управления на $N_p - 1$

шагов вперед. При этом состояние системы на k -м шаге $k = 1, \dots, N_p - 1$ будет определяться как

$$(16) \quad \begin{cases} x_{ik} = A_i^k x_{i0} + \sum_{j=0}^{k-1} A_i^{k-1-j} \sum_{l=1, l \neq i}^{L_i} A_l x_{lj} + \\ + \sum_{j=0}^{k-1} A_i^{k-1-j} B_i u_{ij} + \sum_{j=0}^{k-1} A_i^{k-1-j} G_i w_{ij}, \\ i = 1, \dots, N, k = 0, \dots, N_p. \end{cases}$$

Напомним, что МРС-алгоритмом на текущем шаге реализуется только управление u_{i0} , после чего горизонт N_p сдвигается на следующий такт времени, он становится текущим и процесс повторяется.

Задачу (15) мы будем считать локальной задачей оптимизации, решаемой на каждом шаге i -й подсистемой. Тогда глобальная задача для всех N подсистем будет иметь вид

$$(17) \quad \begin{cases} J = \sum_{i=1}^N J_i \rightarrow \mathbf{min}_{v_i} \\ \sum_{i=1}^N v_{im} \leq V_m, m = 1, \dots, M. \end{cases}$$

Для решения задачи (17) авторы предлагают метод, основанный на методе явной декомпозиции [1] (известным также под названием метода предсказания взаимодействий, прямого метода) и методе декомпозиции путем разделения ресурсов. Согласно предлагаемому методу локальные подсистемы используют информацию о текущих измеренных значениях параметров x_{i0} i -й зоны, текущих измеренных и прогнозных значениях параметров x_l , l -й зоны $l \neq i, l = 1, 2, \dots, L_i$, текущих измеренных и прогнозных значениях контролируемых возмущений w_i для решения локальных задач

$$(18) \quad \begin{cases} J_i(b_{uiz}) = v_i^\top H_i v_i + f_i^\top v_i \rightarrow \mathbf{min}_{v_i}, \\ L_{yi} v_i \leq b_{yi}, i = 1, \dots, N, \\ L_{ui} v_i \leq b_{uiz}, i = 1, \dots, N, \end{cases}$$

где b_{uiz} – заданные значения ограничений на энергоресурсы для i -й зоны. Здесь в качестве координирующих переменных выступают b_{uiz} и $y_{ip} = \{T_{ip}, \varphi_{ip}, C_{ip}\}$ – заданные (прогнозные) значения переменных связей между подсистемами.

Выполнение условий $y_i = y_{ip}$ для координирующих переменных y_{ip} равносильно введению дополнительных ограничений $|y_i - y_{ip}| \leq \varepsilon_{1i}$, где ε_{1i} – точность выполнения условий $y_i = y_{ip}$. Эти дополнительные ограничения в виде $y_i - \varepsilon_{1i} \leq y_{ip}$

и $-y_i - \varepsilon_{1i} \leq -y_{ip}$ могут быть введены внутрь условий $L_{ui}v_i \leq b_{uiz}, i = 1, \dots, N$. С помощью данного приема авторы фактически приводят метод явной декомпозиции к методу декомпозиции путем разделения ресурсов. Это позволяет, в рамках единого подхода, учитывать и связи между подсистемами и объем расходуемых ими энергоресурсов. Для улучшения разрешимости локальных задач коэффициенты ε_{1i} могут быть увеличены.

В результате решения локальных задач получаем значения оптимального расхода m -го вида энергоресурсов на энергоснабжение i -й зоны v_{im}^* при ограничениях $b_{uimz}, m = 1, \dots, M$, и значение критерия оптимальности i -й зоны $J_i(b_{uiz})$. Координатор использует информацию о $J_i(b_{uiz})$ от подсистем нижнего уровня для решения задачи координации в виде

$$(19) \quad \begin{cases} J = \sum_{i=1}^N J_i(b_{uiz}) \rightarrow \min_{b_{uiz}} \\ \sum_{i=1}^N b_{uimz} \leq U_m, m = 1, \dots, M. \end{cases}$$

Обозначим множества $D_i = \{v_i \mid L_{xi}v_i \leq b_{xi}\}$ и $V_i = \{b_{uiz} \mid \exists v_i \in D_i, \text{ такое, что } L_{ui}v_i \leq b_{uiz}\}$. Тогда можно сформулировать следующую теорему.

Теорема 1. Пусть выполнены следующие условия:

- а) множества D_i непусты, компактны и выпуклы;
- б) функции $J_i(b_{uiz})$ и $L_{ui}v_i$ непрерывны и выпуклы на D_i ;
- в) задача (18) имеет допустимое решение.

Тогда задача координации (19) имеет допустимое оптимальное решение.

Доказательство. Предположения о выпуклости $J_i(b_{uiz}), L_{ui}v_i$ и D_i обеспечивают, что множество V_i выпукло и что $J_i(b_{uiz})$ выпукла на V_i , так что задача координации является задачей выпуклого программирования. Так как значения b_{uiz} мы выбираем сами с учетом выполнения глобального ограничения, то допустимость решения задачи (18) приводит к тому, что координирующая задача также имеет допустимое решение. Из компактности D_i вместе с непрерывностью $J_i(b_{uiz})$ и $L_{ui}v_i$ следует, что подзадача i имеет оптимальное решение, поскольку она имеет допустимое. Следовательно координирующая задача также будет иметь оптимальное решение.

Для решения локальных задач (18) могут быть использованы эффективные методы решения задач квадратичного программирования. Функции $J_i(b_{uiz})$ могут быть недифференцируемы в некоторых точках по переменным b_{iz} , и разрывы производных могут оказаться в критических точках, например в минимуме. Поэтому для решения координирующей задачи (19) могут использоваться методы недифференцируемой оптимизации, например, метод возможных направлений или Бандл-метод. Кроме того, для решения координирующей задачи могут использоваться любые численные методы решения задач нелинейного программирования, использующие только значения целевой функции, например, комплексный метод Бокса, генетические алгоритмы и т.д.

3. Проведение численных экспериментов

Авторами были исследованы различные варианты решения задачи оптимального управления, описываемой системой (10), (11), (12) и критерием (3) на интервале времени от 0 до 24 ч. Для реализации математических моделей и выполнения расчетов использовался пакет программ MATLAB.

Расчеты проводились для здания, состоящего из девяти зон общей площадью 1280 м². План здания показан на рис. 2. Из рис. 2 видно, что зона 1 имеет общие ограждающие конструкции почти со всеми другими зонами здания, за исключением зон 4 и 7. Остальные зоны также имеют общие ограждающие конструкции с соседними зонами.

В качестве источников тепла рассматривалось центральное водяное отопление и электрическое отопление с возможностью местного регулирования температуры. Значение T_{imin} принималось 20 °С, T_{imax} – 22 °С, φ_{imin} – 30%, φ_{imax} – 60%, C_{imax} – 800 ppm. Для водяного отопления значение q_{imax} принималось от 5 до 20 кВт, в зависимости от размеров зоны, для электрического отопления – от 2 до 5 кВт. Цены на энергоносители принимались по текущим тарифам на отопление и электроэнергию. Возмущения по параметрам внешней среды моделировались пе-

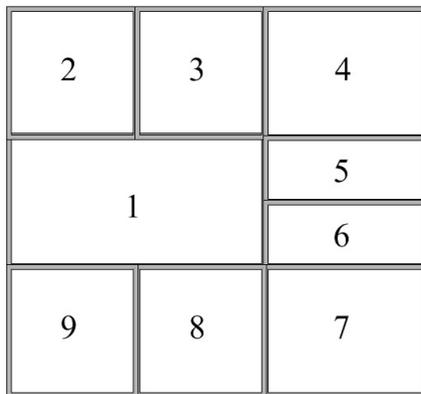


Рис. 2. План здания, состоящего из девяти зон

риодическими функциями на интервале времени от 0 до 24 ч. Эти возмущения учитываются в уравнениях модели и поэтому будут активно подавляться MPC-алгоритмом.

Влияние на параметры микроклимата таких не учитываемых случайных факторов, как инфильтрация через ограждающие конструкции, солнечная радиация, бытовые тепло-, влаго-, газовыделения и погрешности измерения моделировалось с помощью добавления случайной составляющей x_{wik} . В реальной системе текущие значения параметров микроклимата определяются в результате измерений. Полученные значения параметров микроклимата передаются по сети всем соседним зонам.

При выполнении численных экспериментов рассматривались следующие варианты организации оптимального управления: централизованное оптимальное управление, децентрализованное оптимальное управление, распределенное оптимальное управление, иерархическое оптимальное управление с использованием предложенного авторами метода. Полученные в результате проведения нескольких серий экспериментов результаты численных экспериментов для каждого варианта оптимального управления приведены в таблице 1.

Наибольшее энергосбережение достигается при децентрали-

Таблица 1. Результаты численных экспериментов

Используемый MPC-алгоритм	Потребление энергоресурсов, руб.
Централизованный	2425,5
Децентрализованный	2303,8
Распределенный	2533,1
Иерархический распределенный	2381,4

зованном управлении. Это объясняется тем, что в этом варианте подсистемы минимизируют свои затраты без учета существующих связей между подсистемами. Наименьшее энергосбережение достигается для распределенного варианта. Отсутствие координации для этого варианта приводит, как и ожидалось, к увеличению потребления энергоресурсов. Потребление энергоресурсов для централизованного и иерархически распределенного варианта практически одинаково.

Параметры микроклимата во всех зонах в течении всего времени эксперимента находились в пределах заданных ограничений. Нарушение ограничений может происходить, если общие ограничения на энергоресурсы примут такие значения, при которых количество подводимой энергии будет недостаточно для поддержания заданного микроклимата здания. Данные о средних за сутки расходах энергоносителей для зон 1–5 приведены в таблице 2, для зон 6–9 – в таблице 3.

В таблицах 2 и 3 рассматривается два режима потребления энергоносителей. Первый режим – когда общие ограничения потребления тепловой энергии по всему зданию всегда выполняются ($U_1 = 60$ кВт). Так как тариф на электроэнергию больше тарифа на отопление, то в этом режиме для поддержания микроклимата в помещении будет расходоваться только тепловая энергия. Однако такое положение может сильно измениться в часы пик. Дело в том, что тепловая энергия может тратиться на горячее водоснабжение, а электрическая энергия используется для

Таблица 2. Данные о расходах энергоносителей зон 1-5

Номер зоны	1	2	3	4	5
<i>Общее ограничение потребления тепловой энергии 60 кВт</i>					
Среднее потребление тепловой энергии, кВт	10	5,3	5,2	5,4	3,2
Среднее потребление электрической энергии, кВт	0	0	0	0	0
<i>Общее ограничение потребления тепловой энергии 45 кВт</i>					
Среднее потребление тепловой энергии, кВт	9,3	4,8	4,7	5,1	2,8
Среднее потребление электрической энергии, кВт	1	0,7	0,7	0,8	0,3

освещения и других бытовых нужд. Поэтому в часы пик значения ограничений U_1 для тепловой и U_2 для электрической энергии будут существенно снижаться. В крайнем случае в эти часы, ограничения на энергоресурсы могут привести к невозможности соблюдения требуемого микроклимата в помещениях.

Таблица 3. Данные о расходах энергоносителей зон 6-9

Номер зоны	6	7	8	9
<i>Общее ограничение потребления тепловой энергии 60 кВт</i>				
Среднее потребление тепловой энергии, кВт	3,2	5,4	5,1	5,5
Среднее потребление электрической энергии, кВт	0	0	0	0
<i>Общее ограничение потребления тепловой энергии 45 кВт</i>				
Среднее потребление тепловой энергии, кВт	2,8	5,1	4,6	4,8
Среднее потребление электрической энергии, кВт	0,4	0,8	0,6	0,7

Описанную ситуацию иллюстрирует второй режим, когда общие ограничения потребления тепловой энергии по всему зда-

нию снижаются до такого значения ($U_1 = 45$ кВт), при котором уже невозможно поддерживать микроклимат в помещении только за счет использования тепловой энергии. В этом случае включается электрическое отопление. При этом общее ограничение на потребление электрической энергии ($U_2 = 20$ кВт), расходуемой на отопление, не достигается.

На рис. 3 показаны графики изменения расхода тепла от водяного и электрического отопления для второй зоны при иерархическом оптимальном управлении. Сплошной линией показан расход тепла от водяного отопления, пунктирной – расход от электрического отопления. На рис. 3б показана ситуация, когда из-за необходимости учета глобального ограничения (12) в часы пик на короткое время становится невозможным использование одного вида энергоресурсов. Для поддержания требуемого микроклимата в такие моменты может резко возрасти расход альтернативного энергоносителя.

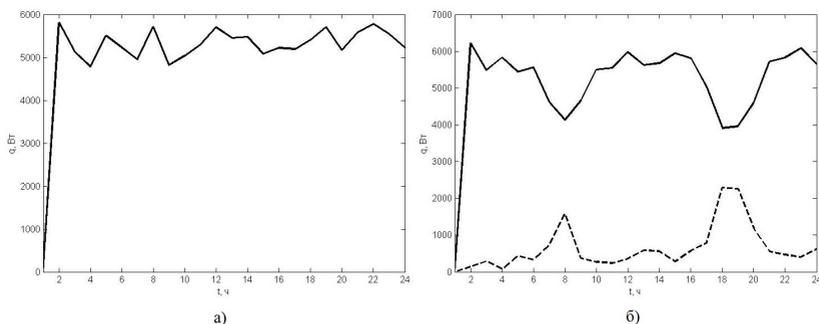


Рис. 3. Графики изменения расходов различных видов энергоресурсов: а) высокий уровень U_1 ; б) при снижении U_1 в часы пик

4. Выводы и перспективы

Таким образом, авторами предложен иерархический распределенный MPC-алгоритм, на каждом шаге которого реализуется процедура иерархической оптимизации, включающая итеративное решение локальных задач и задачи координации. Достоинством предложенного MPC-алгоритма является то, что, используя простые и доступные модели, он обеспечивает качественное управление микроклиматом в помещениях здания под действием случайных возмущений при минимизации энергозатрат и изменяющихся ограничениях на доступные энергоресурсы. Это позволяет более точно поддерживать заданный микроклимат в помещениях, существенно снизить расход энергоресурсов и исключить возникновение аварийных ситуаций, связанных с нарушением энергоснабжения. Результаты численных экспериментов подтвердили указанные положения.

Предложенный метод оптимального управления может применяться для управления энергопотреблением и микроклиматом больших многозонных зданий. Учитывая общую тенденцию широкого распространения распределенных систем управления (DCS-систем), такой подход к построению систем оптимального управления многозонными зданиями может стать все более перспективным.

Литература

1. АРТАМОНОВ А.Г., ВОЛОДИН В.М., АВДЕЕВ В.Г. *Математическое моделирование и оптимизация плазмохимических процессов*. – М.: Химия, 1989. – 224 с.
2. БАШКИН Б.В. *Энергосбережение в ЖКХ* / под. ред. Л.В. Примака, Л.Н. Чернышова. – М.: Академический Проект; Альма Матер, 2011. – 622 с.
3. БОГОСЛОВСКИЙ В.Н., СКАНАВИ А.Н. *Отопление*. – М.: Стройиздат, 1991. – 735 с.
4. ЛЭСДОН Л. *Оптимизация больших систем*. – М.: Наука, 1975. – 432 с.

5. МАРЬЯСИН О.Ю., КОЛОДКИНА А.С. *Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей* // Вестник СамГТУ. – 2017. – №1(53). – С. 122–132.
6. МЕССАРОВИЧ М., МАКО Д., ТАКАХАРА И. *Теория иерархических многоуровневых систем.* – М.: Мир, 1973. – 344 с.
7. СИНГХ М., ТИТЛИ А. *Системы: декомпозиция, оптимизация и управление.* – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
8. VARATA F.A., IGREJA J.M., NEVES-SILVA R. *Model predictive control for thermal house comfort with limited energy resources* // Proc. of the 10th Portuguese Conference on Automatic Control, Funchal, Portugal, July 16–18, 2012. – P. 146–151.
9. DOUNIS A.I., CARAISCOS C. *Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment: A review* // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – No. 13(7). – P. 1246–1261.
10. FINDEISEN W. *Control and coordination in hierarchical system.* – N. Y.: Willey, 1980. – 480 p.
11. LAMOUDI M.Y., ALAMIR M. BEGUERY P. *Distributed constrained Model Predictive Control based on bundle method for building energy management* // Proc. of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), Orlando, USA, December 12–15, 2011. – P. 8118–8124.
12. MORARI M., LEE J. *Model predictive control: past, present and future* // Computers and Chemical Engineering. – 1999. – Vol. 23. – P. 667–682.
13. MOROSAN P.D., BOURDAIS R., DUMUR D., BUISSON J. *Building temperature regulation using a distributed model predictive control* // Energy and Buildings. – 2010. – No. 42(9). – P. 1445–1452.

14. MOROSAN P.D., BUISSON J., BOURDAIS R. *Distributed MPC for Multi-zone Temperature Regulation with Coupled Constraints* // Proc. of the 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, August 28 – September 2, 2011. – P. 1552–1557.
15. MOROSAN P.D., BUISSON J., BOURDAIS R. *A distributed MPC strategy based on Benders decomposition applied to multi-source multizone temperature regulation* // Journal of Process Control. – 2011. – No. 21(5). – P. 729–737.
16. SCATTOLINI R. *Architectures for distributed and hierarchical Model Predictive Control – A review* // Journal of Process Control. – 2009. – No. 19. – P. 723–731.
17. WANG L. *Model Predictive Control System Design and Implementation using MATLAB*. – Springer-Verlag London Limited, 2009. – 396 p.

OPTIMAL CONTROL FOR BUILDING ENERGY AND COMFORT MANAGEMENT OF LARGE MULTI-ZONE BUILDINGS

Anna Kolodkina, Yaroslavl Industrial and Economical College, Yaroslavl, Assistant (anuta__25@mail.ru).

Oleg Maryasin, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, PhD in Technique, Associate Professor (maryasin2003@yandex.ru).

Andrey Ogarkov, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Postgraduate (drivemox@mail.ru).

Abstract: In this article, the problem of energy-efficient control of the indoor environment of large multi-zone buildings is considered. To solve this problem, it is proposed to use the hierarchical, distributed, predictive optimal control method (MPC approach). This method allows you to achieve a minimum of the global quality criterion and the implementation of restrictions for the whole system, taking into account the interrelationships between subsystems. When implementing a hierarchical distributed MPC-algorithm, there arises the problem of coordinated solution for the mathematical programming problems for each of the subsystems. To solve the global problem of mathematical programming, the authors propose a method based on the decomposition method via resource sharing. The authors prove that under certain assumptions on sets of admissible solutions for local problems, if the local optimization problems have a solution, then the coordination problem will have an admissible optimal solution. Numerical results are presented in order to illustrate the effectiveness of the proposed control strategy. As a result of comparison of various variants of the optimal control implementation, it is established that hierarchical distributed approach provides the best compliance with the limitations and the greatest energy saving. The availability of various types of energy resources allows, for example, in case of a sharp increase in the household needs consumption of thermal energy during peak hours, to increase the input of electricity to maintain the required microclimate.

Keywords: indoor environment, energy and resource efficiency, Model Predictive Control, hierarchical optimal control, MATLAB.

УДК 697.341

ББК 38.9

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии В.Н. Бурковым.*

Поступила в редакцию 20.11.2017.

Дата опубликования 30.09.2018.