

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ

М.М. Тверской, Д.В. Румянцев

STATEMENT OF A PROBLEM OF BUILDING THERMAL CONDITION OPTIMAL CONTROL AT DUAL HEATING SYSTEM

M.M. Tverskoy, D.V. Rumyantsev

Рассмотрен принцип управления тепловым режимом здания при наличии в системе отопления радиаторного и воздушного приборов отопления. Сформулирована задача оптимального управления тепловым режимом здания в соответствии с предложенным критерием при наличии ограничений.

Ключевые слова: тепловой режим здания, комбинированное отопление, оптимальное управление.

The principle of thermal condition control of a building with air and radiator sources in the heating system is considered in the article. The problem of building thermal condition optimal control, in terms of given criteria and appropriate boundary conditions, is stated in the article.

Keywords: building thermal condition, dual heating system, optimal control.

Введение

Тепловой режим здания зависит от множества параметров, определяющих тепловую обстановку здания [1]. Для оценки этих параметров используются различные показатели. Показателем, характеризующим взаимодействие между людьми и окружающей тепловой обстановкой (тепловым режимом здания), является уровень теплового комфорта, определяемый интенсивностью теплообмена между человеком и окружающей его средой. Интенсивность отдачи тепла человеком зависит от тепловой обстановки в помещении, которая характеризуется температурой воздуха, радиационными условиями, а также влажностью и подвижностью внутреннего воздуха [1].

Американским обществом инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха «ASHRAE» был предложен показатель теплового комфорта *PMV* (Predictive Mean Vote – прогнозируемая средняя оценка). Согласно [2] про-

гнозируемая средняя оценка (*PMV*) – показатель, с помощью которого прогнозируется среднее значение ощущения к температуре большой группы людей на основе баланса температуры тела человека. Баланс температуры достигается, когда вырабатываемое телом человека тепло равно потере телом тепла в окружающую среду. *PMV* введен международным стандартом ISO7730 [3].

Однако выражение для расчета *PMV* является достаточно сложным и содержит параметры, на которые сложно и не предполагается воздействовать при управлении тепловым режимом здания. К таким параметрам, например, относятся скорость движения воздуха в помещении и его влажность.

Согласно ГОСТ 30494–96, регламентирующему параметры микроклимата в жилых и общественных зданиях, комплексным показателем, характеризующим тепловую обстановку в помещении, может являться результирующая температура, определяемая по следующей зависимости:

Тверской Михаил Михайлович – д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, заведующий кафедрой автоматизации механосборочного производства, Южно-Уральский государственный университет; julisus@mail.ru

Румянцев Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры автоматизации механосборочного производства, Южно-Уральский государственный университет; dimfirst@gmail.com

Tverskoy Mikhail Mikhailovich – Doctor of Science (Engineering), Professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Head of Mechanical Assembly Production Automation Department, South Ural State University; julisus@mail.ru

Rumyantsev Dmitry Vladimirovich – post-graduate student of Mechanical Assembly Production Automation Department, South Ural State University; dimfirst@gmail.com

$$T_{SU} = b_1 T_r + b_2 T_a, \quad (1)$$

где T_a – температура воздуха в помещении, °С; T_r – радиационная температура помещения, °С; b_1, b_2 – коэффициенты, принимающие значения по 0,5 при скорости движения воздуха в помещении ниже 0,2 м/с или 0,4 и 0,6 соответственно при скорости движения воздуха от 0,2 до 0,6 м/с.

Радиационная температура помещения может быть рассчитана как:

$$T_r = \frac{\sum S_i T_i}{\sum S_i}, \quad (2)$$

где S_i – площадь внутренней поверхности ограждений и наружной поверхности отопительных приборов, м²; T_i – температура внутренней поверхности ограждений и наружной поверхности отопительных приборов, °С.

Результирующая температура является более предпочтительным показателем, характеризующим тепловой комфорт в помещении, чем индекс *PMV*, поскольку при использовании комбинированного отопления (с радиационными и конвективными источниками тепла) такие параметры T_{SU} , как температура воздуха в помещении и радиационная температура, являются контролируемыми.

Комбинированные системы отопления

В настоящее время довольно часто используются системы отопления, содержащие комбинацию нескольких различных приборов отопления, например, воздушного и радиаторного с жидкостным теплоносителем. Также встречаются приборы отопления, состоящие из радиатора, создающего радиационную составляющую, и воздушного вентилятора, при включении которого обеспечивается повышение конвективной составляющей прибора [4]. Кроме того, в некоторых случаях в качестве воздушного отопления можно использовать систему приточной вентиляции с нагревом воздуха от теплоносителя, при наличии возможности переключения ее в режим рециркуляции воздуха.

Причины, по которым используются комбинированные системы отопления, могут быть различными [5, 6]. Воздушное отопление обладает меньшей инерционностью и позволяет нагреть воздух в помещении за относительно короткий промежуток времени. Температура внутренней поверхности стен помещения может быть ниже, чем при радиаторном отоплении, что снижает трансмиссионные потери тепла (через ограждающие конструкции). Радиаторное отопление содержит радиационную составляющую, позволяющую предавать тепло за счет инфракрасного излучения. Поэтому при радиаторном отоплении температура воздуха помещения может иметь более низкое значение, чем при воздушном отоплении. Это снижает инфильтрационные тепловые потери, которые имеют значительную величину при высоком воздухообмене, например, при включенной принудительной вентиляции. В соответствии с [7]

конвективные приборы воздушного отопления могут быть предпочтительнее в помещениях с отсутствующей или отключенной принудительной вентиляцией, а также при низком уровне воздухообмена. Но поскольку воздушное отопление требует дополнительных затрат электроэнергии, вызванных наличием воздушного вентилятора, то эффективность его применения с учетом суммарной энергии будет зависеть от стоимости электроэнергии. В то же время согласно [7] применение отопления с радиационной составляющей, каким является радиаторное отопление, более выгодно с точки зрения потребления энергии при высоком воздухообмене.

Комбинация приборов отопления с различными свойствами позволяет использовать их индивидуальными преимуществами в единой системе отопления и избавиться от основных недостатков.

В России комбинированное отопление наиболее часто применяется в выставочных залах, торговых центрах и других объектах с прерывистым графиком работы. Комбинированные системы отопления работают по следующему принципу. Радиаторное отопление рассчитывается как дежурное из условия обеспечения минимально допустимой температуры воздуха в помещении на уровне 12 °С [8]. В качестве основного отопления используется воздушное, что не всегда является выгодным с точки зрения потребления энергии.

Функционирование системы автоматического управления тепловым режимом здания при комбинированной системе отопления

Рассмотрим принцип, по которому должна работать система управления комбинированным отоплением с прерывистым графиком работы. При настройке такой системы управления отоплением пользователь, кроме уставок результирующей температуры в дежурном и рабочем режимах соответственно, задает время начала и окончания рабочего режима для помещения, а также стоимостные показатели тепловой и электрической энергии с учетом ночного и дневного тарифов.

Задача системы управления заключается в автоматическом поддержании заданной результирующей температуры в соответствующих режимах при минимальном потреблении суммарной приведенной энергии. Поскольку здание и система отопления имеют значительную инерционность, то при переходе из дежурного режима в рабочий тепловая нагрузка системы отопления должна быть увеличена заблаговременно таким образом, чтобы в заданный момент времени начала рабочего режима уровень результирующей температуры в помещении был не менее минимально допустимого уровня, необходимого для комфортного состояния людей. Также с целью экономии энергии тепловая нагрузка системы отопления должна быть снижена за такой промежуток времени до окончания рабочего режима, чтобы в заданный момент

окончания рабочего режима значение результирующей температуры в помещении соответствовало минимально допустимому уровню. Моменты времени начала увеличения и снижения тепловой нагрузки система управления должна определять исходя из заданного графика работы, статических и динамических параметров воздушной и радиаторной систем отопления и самого помещения, а также распределять нагрузку между источниками тепла таким образом, чтобы количество потребляемой приведенной энергии за цикл работы (24 часа) было минимальным.

Подобные задачи рассмотрены в работах [9, 10], но представленный в них алгоритм ориентирован на систему с однотипными приборами отопления и требует переработки для использования в комбинированной системе.

Постановка задачи

Целью оптимального управления тепловым режимом здания при комбинированной системе отопления является минимизация общих затрат энергии на отопление при поддержании заданного уровня теплового комфорта.

В связи с наличием различных видов потребляемой энергии в системе отопления (тепловой и электрической), а также различных тарифов на указанную энергию в зависимости от времени суток будем выражать суточные затраты на энергию в виде следующего стоимостного показателя:

$$C_E = \sum_{i=1}^n c_i^{\text{Э}} (E_i^{\text{ЭП}} + E_i^{\text{ЭВ}}) + \sum_{j=1}^m c_j^{\text{Т}} (E_j^{\text{ТП}} + E_j^{\text{ТВ}}), \quad (3)$$

где $c_i^{\text{Э}}$, $c_j^{\text{Т}}$ – стоимостные коэффициенты для соответствующего тарифа электрической и тепловой энергии соответственно; $E_i^{\text{ЭП}}$, $E_i^{\text{ЭВ}}$ – количество электрической энергии, потребленное по i -му тарифу радиаторным и воздушным отоплением соответственно; $E_j^{\text{ТП}}$, $E_j^{\text{ТВ}}$ – количество тепловой энергии, потребленное по j -му тарифу радиаторным и воздушным отоплением соответственно; n , m – количество различных тарифов, действующих в течение цикла работы системы отопления по заданному графику (за 24 часа) для электрической и тепловой энергии соответственно.

Количество потребленной электрической и тепловой энергии за время определенного тарифа можно рассчитать по следующим формулам:

$$E_i^{\text{ЭП}} = \int_{t_{0i}}^{t_i} q(t)^{\text{ЭП}} dt; \quad E_i^{\text{ЭВ}} = \int_{t_{0i}}^{t_i} q(t)^{\text{ЭВ}} dt; \quad (4)$$

$$E_j^{\text{ТП}} = \int_{t_{0j}}^{t_j} q(t)^{\text{ТП}} dt; \quad E_j^{\text{ТВ}} = \int_{t_{0j}}^{t_j} q(t)^{\text{ТВ}} dt, \quad (5)$$

где $q^{\text{ЭП}}$, $q^{\text{ЭВ}}$ – электрическая мощность, потребляемая радиаторным и воздушным отоплением соответственно; $q^{\text{ТП}}$, $q^{\text{ТВ}}$ – тепловая мощность,

потребляемая радиаторным и воздушным отоплением соответственно; t_{0i} , t_i – пределы интегрирования, представляющие собой время начала и окончания i -го тарифа для электрической энергии соответственно; t_{0j} , t_j – пределы интегрирования, представляющие собой время начала и окончания j -го тарифа для тепловой энергии соответственно.

Значения тепловых и электрических мощностей, используемых в (4) и (5), могут быть получены из математической модели объекта управления.

Объектом управления в данном случае будет являться отапливаемое помещение. В результате исследования, проведенного кафедрой строительной физики Чалмерского технологического университета (Швеция), была получена математическая модель такого объекта [11]. Она включает в себя выражения, описывающие статические и динамические характеристики отдельных элементов и конструкций здания, но при этом имеет достаточно сложную структуру и требует упрощения. Модель, разработанная в диссертационной работе [12], имеет более простую структуру и в то же время позволяет получить динамику изменения радиационной температуры и температуры внутреннего воздуха помещения. Однако в [12] не учитывается инерционность приборов отопления, что может потребовать доработки данной модели.

Из [11] путем упрощения и преобразования была получена математическая модель, представляющая собой систему уравнений в переменных состояниях:

$$\begin{cases} \frac{dT_{a,int}}{dt} = a_{1,1}T_{a,int} - a_{1,2}T_{surf} + a_{1,5}Q^B + \\ + a_{1,6}Q_{conv}^P + a_{1,11}T_{a,ven}; \\ \frac{dT_{surf}}{dt} = a_{2,1}T_{a,int} - a_{2,2}T_{surf} + a_{2,3}T_w + a_{2,7}Q_{rad}^P; \\ \frac{dT_w}{dt} = a_{3,2}T_{surf} - a_{3,3}T_w + a_{3,4}T_{surf,ext}; \\ \frac{dT_{surf,ext}}{dt} = a_{4,3}T_w - a_{4,4}T_{surf,ex} + a_{4,10}T_{a,ext}; \\ \frac{dQ^B}{dt} = -a_{5,5}Q^B + a_{5,8}u^B; \\ \frac{dQ_{rad}^P}{dt} = -a_{6,7}Q_{rad}^P + a_{6,9}u^P; \\ \frac{dQ_{conv}^P}{dt} = -a_{7,6}Q_{conv}^P + a_{7,9}u^P, \end{cases} \quad (6)$$

где $a_{m,n}$ – постоянный коэффициент, соответствующий номеру строки m и столбца n матрицы коэффициентов правой части системы уравнений (6); переменные состояния: $T_{a,int}$ – температура внутреннего воздуха; T_{surf} – температура внутренней поверхности ограждения; T_w – температура слоя внутри ограждения; $T_{surf,ext}$ – температура наруж-

ной поверхности ограждения; Q^B – конвективные теплопоступления от воздушного отопления; Q^{rad} – радиационные теплопоступления от радиаторного отопления; Q_{conv}^P – конвективные теплопоступления от радиаторного отопления; *управляющие воздействия*: u^P – сигнал управления приборами радиаторного отопления; u^B – сигнал управления приборами воздушного отопления; *возмущающие воздействия*: $T_{a,ext}$ – температура наружного воздуха; $T_{a,ven}$ – температура воздуха, поступающего в помещение от приточной вентиляции.

Согласно (1) и (2) уравнение выхода будет иметь вид:

$$T_{SU} = b_1 \frac{\sum S_i T_i}{\sum S_i} + b_2 T_a. \quad (7)$$

Пусть температуры внутренних поверхностей ограждений одинаковы и равны T_{surf} , температуры наружной поверхности приборов радиаторного отопления также примем одинаковыми и равными T^P , суммарную площадь внутренних поверхностей ограждений и наружных поверхностей приборов радиаторного отопления обозначим как S_{surf} и S^P соответственно. Тогда (7) примет вид:

$$T_{SU} = b_1 \frac{S_{surf} T_{surf} + S^P T^P}{S_{surf} + S^P} + b_2 T_a. \quad (8)$$

Тепловую мощность радиаторного отопления можно рассчитать по следующей формуле:

$$q^{TP} = Q_{rad}^P + Q_{conv}^P = K^P S^P (T^P - T_{a,int}), \quad (9)$$

где K^P – коэффициент теплопередачи приборов радиаторного отопления.

Выразив из (9) T^P и подставив в (8), после соответствующих преобразований получим уравнение выхода в следующем виде:

$$T_r = z_1 T_{a,int} + z_2 T_{surf} + z_5 Q_{conv}^P + z_6 Q_{rad}^P, \quad (10)$$

где z_n – постоянный коэффициент, с номером n , определяемый в процессе идентификации математической модели объекта управления.

Коэффициенты из системы (6) и уравнения (10) могут быть получены в процессе параметрической идентификации модели объекта и зависят от таких постоянных, как тепловая емкость воздуха и материала ограждающих конструкций; тепловое сопротивление материала ограждающих конструкций; площадь внутренних поверхностей ограждения и наружных поверхностей приборов радиаторного отопления; плотность воздуха; коэффициенты передачи приборов воздушного и радиаторного отопления; постоянные времени приборов воздушного и радиаторного отопления.

Ограничения, накладываемые переменные состояния, включают в себя ограничения на температуру воздуха и радиационную температуру в

помещении. Пределы изменения этих переменных ограничены по ГОСТ 30494–96 [13]. Поскольку помещение эксплуатируется в двух режимах (рабочем и дежурном), то целесообразно сформировать различные ограничения вектора переменных состояния для рабочего и дежурного режимов. Важно также учитывать ограничение тепловой мощности приборов отопления.

Введем ошибку поддержания результирующей температуры:

$$e(t) = T_{SU}^S(t) - T_{SU}^R(t), \quad (11)$$

где $T_{SU}^S(t)$ и $T_{SU}^R(t)$ – установленная и реальная траектория изменения результирующей температуры во времени соответственно.

Представив ошибку результирующей температуры как ограничение, получим однокритериальную задачу оптимального управления с критерием оптимальности:

$$J_C(\mathbf{U}, \mathbf{X}) = \int_0^T C_E(t) dt \rightarrow \min, \quad (12)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} e_{\min}^{\text{раб}} \leq e^{\text{раб}}(t) \leq e_{\max}^{\text{раб}}; \quad e_{\min}^{\text{деж}} \leq e^{\text{деж}}(t) \leq e_{\max}^{\text{деж}}; \\ T_{a,\min}^{\text{раб}} \leq T_a^{\text{раб}}(t) \leq T_{a,\max}^{\text{раб}}; \quad T_{a,\min}^{\text{деж}} \leq T_a^{\text{деж}}(t) \leq T_{a,\max}^{\text{деж}}; \\ T_{r,\min}^{\text{раб}} \leq T_r^{\text{раб}}(t) \leq T_{r,\max}^{\text{раб}}; \quad T_{r,\min}^{\text{деж}} \leq T_r^{\text{деж}}(t) \leq T_{r,\max}^{\text{деж}}; \\ Q^B(t) \leq Q_{\max}^B; \quad Q^P(t) \leq Q_{\max}^P, \end{aligned}$$

где C_E – суточные затраты на энергию, определяемые по зависимости (3); $e_{\min}^{\text{раб}}$, $e_{\max}^{\text{раб}}$, $e_{\min}^{\text{деж}}$, $e_{\max}^{\text{деж}}$ – ошибка, ее нижняя и верхняя границы соответственно, в рабочем и дежурном режимах; $T_a^{\text{раб}}$, $T_{a,\min}^{\text{раб}}$, $T_{a,\max}^{\text{раб}}$, $T_a^{\text{деж}}$, $T_{a,\min}^{\text{деж}}$, $T_{a,\max}^{\text{деж}}$ – температура воздуха, ее нижняя и верхняя границы соответственно, в рабочем и дежурном режимах; $T_r^{\text{раб}}$, $T_{r,\min}^{\text{раб}}$, $T_{r,\max}^{\text{раб}}$, $T_r^{\text{деж}}$, $T_{r,\min}^{\text{деж}}$, $T_{r,\max}^{\text{деж}}$ – радиационная температура, ее нижняя и верхняя границы соответственно, в рабочем и дежурном режимах; Q^B , Q_{\max}^B , Q^P , Q_{\max}^P – тепловая мощность, ее верхняя граница соответственно, для приборов воздушного и радиаторного отопления.

Переключение между рабочим и дежурным режимами происходит за счет изменения уставок и допустимых границ ошибки, температуры воздуха и радиационной температуры в помещении.

Заключение

Несмотря на то что системы комбинированного отопления находят свое применение в зданиях различного назначения, на сегодняшний день существующие алгоритмы управления такими системами не используют весь потенциал для экономии затрат на энергию.

Принцип работы системы автоматического управления тепловым режимом здания при комби-

нированной системе отопления, рассмотренный в статье, позволяет более рационально использовать энергию при работе по заданному графику. При этом учитываются динамические и статические свойства как источников тепла, так и объекта управления, а также тарифы на электрическую и тепловую энергию, потребляемую системой отопления.

Решение поставленной задачи оптимального управления позволит наилучшим образом распределять тепловую нагрузку между приборами отопления, что снизит суммарные затраты энергии на систему отопления, сохраняя значение результирующей температуры, характеризующей уровень теплового комфорта в помещении, в заданных пределах.

Литература

1. *Отопление и вентиляция: учеб. для вузов. В 2 ч. Ч. 1: Отопление* / П.Н. Каменев, А.Н. Сканди, В.Н. Богословский и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975. – 483 с.
2. ГОСТ Р ИСО 7730–2009. *Эргономика тепловой среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта.* – М.: Стандартинформ, 2011. – 48 с.
3. ISO 7730:2005(E). *Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.* – Switzerland, 2005. – 60 с.
4. Табуничиков, Ю.А. *Экспериментальное исследование оптимального управления расходом энергии* / Ю.А. Табуничиков, М.М. Бродач // АВОК. – 2006. – № 1. – С. 32–36.
5. Бродач, М.М. *Отопление соборов – практика альтернативных решений* / М.М. Бродач // «АВОК». – 2004. – № 2. – http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2342
6. Грудинин, В.С. *Адаптивная компьютерная система управления микроклиматом* / В.С. Грудинин // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* – 2007. – № 9. – С. 137–142.
7. Малявина, Е.Г. *Тепловая нагрузка на системы лучистого отопления. Сравнительный анализ* / Е.Г. Малявина // АВОК. – 2009. – № 7. – С. 48–58.
8. СНиП 41-01–2003. *Отопление, вентиляция и кондиционирование.* – М.: Госстрой России: ГУ ЦПП, 2008. – 58 с.
9. Панферов, В.И. *Об экономии энергии при оптимальном управлении режимом прерывистого отопления* / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова // *Инженерные системы.* – 2009. – № 5. – С. 32–35.
10. Панферов, В.И. *Об оптимальном управлении отоплением зданий как процессом с распределенными параметрами* / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника».* – 2009. – Вып. 9. – № 3 (136). – С. 24–28.
11. Angela, S.K. *HAM-Tools International Building Physics Toolbox Block documentation Report: R-02:6* / S.K. Angela. – Sweden: Department of Building Physics Chalmers Institute of Technology, 2008. – 58 с.
12. Нагорная, А.Н. *Математическое моделирование и исследование нестационарного теплового режима зданий: дис. ... канд. техн. наук* / А. Н. Нагорная. – Челябинск, 2008. – 150 с.
13. ГОСТ 30494–96. *Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.* – М.: Госстрой России: ГУ ЦПП, 1999. – 7 с.

Поступила в редакцию 9 февраля 2012 г.