

УДК 697.341

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

О.Ю. Марьясин¹, А.С. Колодкина²

¹Ярославский государственный технический университет
Россия, 150023, г. Ярославль, Московский пр-т, 88

²Ярославский промышленно-экономический колледж
Россия, 150023, г. Ярославль, ул. Гагарина, 8

Рассмотрена задача энергоэффективного управления тепловым режимом зданий. Предлагается подход, основанный на декомпозиции общей задачи управления на две подзадачи. Задача верхнего уровня – определение оптимального количества тепла, необходимого для поддержания требуемого теплового режима здания. Задача нижнего уровня – выработка заданного количества тепла путем изменения параметров теплоносителя (температуры, расхода). Для решения задачи верхнего уровня предлагается использовать MPC-подход. Для реализации данного подхода были разработаны математические модели теплового режима здания и системы теплоснабжения. В результате сравнения различных алгоритмов управления установлено, что использование MPC-регуляторов обеспечивает наилучшее качество управления и наибольшую энергоэффективность.

Ключевые слова: система теплоснабжения, управление тепловым режимом зданий, математическая модель, MPC, MATLAB, Simulink.

Важную роль в решении проблемы энергосбережения в системах теплоснабжения зданий играют автоматизированные индивидуальные тепловые пункты (ИТП), осуществляющие погодозависимое управление теплоснабжением. ИТП действительно позволяют сэкономить значительное количество тепла за счет учета изменения температуры воздуха снаружи здания, и даже учесть индивидуальные характеристики здания путем подстройки температурного графика. Но множество факторов, влияющих на температуру внутри помещений, таких как инфильтрация наружного воздуха, солнечная радиация, производственные и бытовые тепловыделения, остаются неучтенными и приводят к отклонению температурного режима помещений от требуемого. Поэтому основным показателем, необходимым для определения комфортного температурного режима, будет оставаться температура внутри помещений.

Учитывая современные тенденции снижения стоимости потребительской электроники и микропроцессорной техники и повышения уровня автоматизации и интеллектуализации инженерных систем зданий, можно утверждать, что необходимым дополнением к автоматизированным ИТП должны стать системы мониторинга температуры внутри помещений здания. Они могут отслеживать температуру внутри помещений, где люди находятся длительное время, или только в отдельных «контрольных помещениях». Все чаще такие системы бывают уже встроены в современные системы отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК или HVAC, как их называют на Западе).

*Олег Юрьевич Марьясин (к.т.н., доц.), доцент кафедры кибернетики.
Анна Сергеевна Колодкина, преподаватель.*

Новые тенденции дают возможность совершенствования систем управления инженерным оборудованием зданий. В частности, вместо традиционных ПИД-регуляторов с изменением задания по температурным графикам для управления тепловым режимом помещений могут использоваться более сложные алгоритмы автоматического и оптимального управления.

В западных 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 [1]. В западной научной прессе [2] в последнее время активно обсуждается подход, использующий прогнозирующие модели для управления температурным режимом зданий, – Model Predictive Control (МРС). Этот подход уже давно хорошо зарекомендовал себя при применении в других областях, например в нефтехимии [3]. К сожалению, в нашей стране данный подход практически неизвестен широкой научной общественности.

К достоинствам МРС-подхода можно отнести то, что оптимальный регулятор, синтезированный в соответствии с данным подходом, обеспечивает отсутствие в системе статической ошибки, соблюдение ограничений на управляющие и выходные переменные и обеспечивает компромисс между робастностью и качеством регулирования. Однако, как и большинство оптимальных систем, он требует знания модели объекта управления. И здесь достоинством МРС-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.

Авторами предлагается подход к решению задачи управления тепловым режимом зданий, основанный на декомпозиции общей задачи оптимального управления на две более простые задачи. Первая задача – определение оптимального количества тепла, необходимого для поддержания требуемого теплового режима здания. Вторая – выработка заданного количества тепла путем изменения параметров теплоносителя (температуры, расхода). Таким образом, в данном случае система оптимального управления тепловым режимом здания будет включать два уровня иерархии. На верхнем уровне решается первая задача, и в результате ее решения определяются параметры теплоносителя, которые передаются на нижний уровень управления. Для решения задачи верхнего уровня предлагается использовать МРС-подход. На нижнем уровне решается задача получения тепла в соответствии с заданным значением, полученным от верхнего уровня. Для систем водяного отопления это задача автоматического управления ИТП, для систем воздушного отопления это задача подогрева воздуха в системе вентиляции/кондиционирования.

В качестве критерия оптимальности в задаче верхнего уровня используется критерий типа

$$J = \int_{t_0}^{t_1} [[T(t) - T_s]^T Q [T(t) - T_s] + q(t)^T R q(t)] dt, \quad (1)$$

где $T(t)$ – температура воздуха внутри здания;
 $T_s(t)$ – заданная температура в здании;
 q – тепло, полученное от системы теплоснабжения здания;
 Q – неотрицательно-определенная матрица;

R – положительно-определенная матрица.

Матрицы Q и R определяют требования к качеству процесса управления и экономии тепла.

Концептуально предлагаемый подход описывается схемой, показанной на рис. 1. Применение такой схемы для решения задач управления различными процессами с использованием MPC-подхода на верхнем уровне управления обсуждается, например, в работе [4]. Такие системы в зарубежной литературе описываются термином *plantwide optimization*. Рассматриваемая авторами структурная схема системы управления тепловым режимом показана на рис. 2, где $T(t)$ – температура внутри помещения, $T_T(t)$ – температура теплоносителя, $T_z(t)$ – задание по температуре внутреннего воздуха, $T_{Tz}(t)$ – задание по температуре теплоносителя. Вместо температуры теплоносителя может регулироваться расход теплоносителя или оба параметра одновременно. Это зависит от типа системы отопления и того, какой из методов регулирования тепла (качественный, количественный или качественно-количественный) является предпочтительным.

HVAC-система на рис. 2 представляет собой, например, систему отопления с автоматизированным ИТП. В этом случае внутренний контур – это контур регулирования по температуре прямой/обратной воды в ИТП. Внешний контур на рис. 2 – это контур регулирования температуры внутри помещения, компенсирующий влияние таких возмущений, как изменение температуры воздуха снаружи здания, инфильтрация наружного воздуха, влияние солнечной радиации, производственных и бытовых тепловыделений.

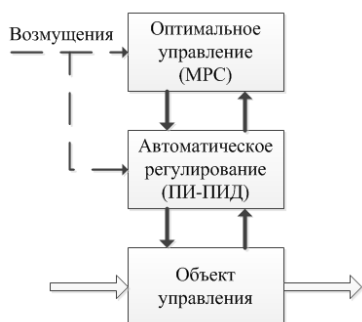


Рис. 1. Двухуровневая схема оптимального управления

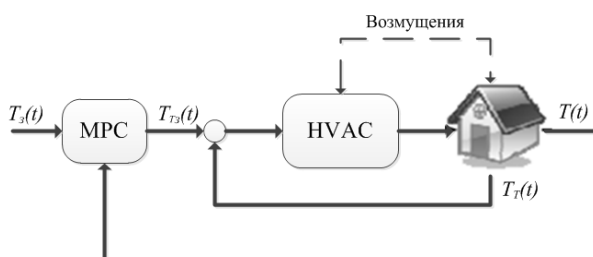


Рис. 2. Функциональная схема системы управления тепловым режимом

Из литературных источников, в которых двухуровневая схема с использованием MPC-подхода на верхнем уровне применяется для решения задачи управления тепловым режимом здания, авторам удалось найти лишь работу [5]. Представленная в работе [5] структура системы управления температурным режимом отличается от схемы, показанной на рис. 2, тем, что оба контура, на верхнем и нижнем уровне, используют одну и ту же выходную переменную – температуру внутри помещения $T(t)$. При этом в работе [5] не раскрывается, что представляет собой HVAC-система. Все это вызывает вопросы относительно возможности реализации системы, описанной в работе [5], на практике.

Для реализации предложенного подхода авторы разработали математические модели для каждого из уровней управления. На верхнем уровне это модель теп-

лового режима здания, на нижнем уровне – модель системы теплоснабжения здания.

Для целей управления тепловым режимом здания пригодны пока только динамические модели с сосредоточенными параметрами. Использование математических моделей с распределенными параметрами в настоящее время затруднительно из-за их высокой вычислительной сложности. Более перспективным подходом, по мнению авторов, является использование секционных математических моделей, включающих математические модели теплового режима отдельных частей здания, секций или помещений и складывающихся затем в полную математическую модель всего здания.

Авторами предложена математическая модель теплового режима помещения, в основу которой положено уравнение теплового баланса здания в виде

$$\sum_{i=1}^N [Q_{от i} + Q_{вент i} + \sum_{j=1}^n Q_{ра д i j} + \sum_{k=1, k \neq i}^S Q_{сек i k} + Q_{быт i} - Q_{вену i} - \sum_{j=1}^n Q_{огр i j} - \sum_{j=1}^n Q_{инф i j}] = 0, \quad (2)$$

где N – число секций (помещений) здания;
 $Q_{от i}$ – тепло, полученное от системы отопления i -той секции;
 $Q_{вент i}$ – тепло, полученное от системы вентиляции i -той секции;
 n – число ограждающих конструкций помещения;
 $Q_{ра д i j}$ – тепло от проникающей в помещение солнечной радиации через j -тую ограждающую конструкцию для i -той секции;
 S – число секций, находящихся по соседству с i -той секцией;
 $Q_{сек i k}$ – тепло, полученное от секции k , находящейся по соседству с i -той секцией;
 $Q_{быт i}$ – бытовые тепlopоступления i -той секции (от людей, оборудования и т. д.);
 $Q_{вену i}$ – тепло, удаляемое системой вентиляции из i -той секции;
 $Q_{огр i j}$ – тепlopотери через j -тую ограждающую конструкцию i -той секции;
 $Q_{инф i j}$ – тепlopотери на инфильтрацию воздуха через j -тую ограждающую конструкцию i -той секции.

Динамика теплового режима одной секции здания (помещения) без учета инфильтрации, радиационных и бытовых тепловыделений из уравнения (2), но с учетом термических масс ограждающих конструкций может быть описана как

$$c_{оzi} \rho_{оzi} V_{оzi} \frac{dT_{оzi}}{dt} = \alpha_{оzij} F_{оzij} (T_i - T_{оzij}) - k'_{оzij} F_{оzij} (T_{оzij} - T_{ниj}), \quad i=1, \dots, N, \quad j=1, \dots, n;$$

$$c \rho V_i \frac{dT_i}{dt} = k_{оmi} F_{оmi} (T_{оmi} - T_i) + c G_{ni} (T_{ni} - T_i) + \sum_{k=1, k \neq i}^S c G_{ki} (T_k - T_i) Q_{отв i} -$$

$$- c G_{yi} (T_{yi} - T_i) - \sum_{j=1}^n \alpha_{оzij} F_{оzij} (T_i - T_{оzij}), \quad i=1, \dots, N,$$

где $c_{оzi}$ – теплоемкость j -той ограждающей конструкции, Дж/кг $^{\circ}$ C;
 $\rho_{оzi}$ – плотность j -той ограждающей конструкции, кг/м 3 ;

V_{oji} – объем j -той ограждающей конструкции, м^3 ;
 T_{oji} – температура внутренней стенки j -ой ограждающей конструкции, $^{\circ}\text{C}$;

α_{oji} – коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности стены j -той ограждающей конструкции, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{C}$;

F_{oji} – площадь j -той ограждающей конструкции i -той секции, м^2 ;

T_i – температура внутри помещения i -той секции, $^{\circ}\text{C}$;

k'_{oji} – коэффициент теплопередачи j -той ограждающей конструкции от внутренней поверхности ограждающей конструкции к наружному воздуху, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{C}$;

T_{nij} – температура воздуха снаружи здания T_n или температура внутри соседнего помещения, $^{\circ}\text{C}$;

c – теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/\text{кг}^{\circ}\text{C}$;

ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;

V_i – объем i -той секции, м^3 ;

k_{omi} – коэффициент теплопередачи отопительного прибора, $\text{кВт}/\text{м}^2\text{C}$;

F_{omi} – поверхность отопительных приборов i -той секции, м^2 ;

T_{omi} – температура в системе отопления i -той секции, $^{\circ}\text{C}$;

G_{ni} – расход приточного воздуха на вентиляцию i -той секции, $\text{кг}/\text{ч}$;

T_{ni} – температура приточного воздуха i -той секции, $^{\circ}\text{C}$;

G_{ki} – расход воздуха из k -той в i -тую секцию, $\text{кг}/\text{ч}$;

T_k – температура воздуха k -той секции, $^{\circ}\text{C}$;

G_{yi} – расход удаляемого воздуха из i -той секции, $\text{кг}/\text{ч}$;

T_{yi} – температура удаляемого воздуха из i -той секции, $^{\circ}\text{C}$.

Взяв за основу математическую модель (3), авторы разработали компьютерную модель теплового режима помещения в системе Simulink пакета программ MATLAB [6]. При реализации модели теплового режима помещения были использованы теплотехнические компоненты раздела Thermal библиотеки Simscape.

Системы теплоснабжения зданий состоят из множества компонентов, основными из которых являются отопительные приборы, теплообменники, насосы, трубопроводы, запорные и регулирующие клапаны, приборы автоматического контроля и регулирования. Эти компоненты функционируют на основе законов гидравлики, теплотехники, механики, электротехники и уравнений материально-го и теплового балансов.

Авторы разработали математические модели основных элементов системы теплоснабжения [7] в форме систем обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений. В качестве основы модели системы теплоснабжения используется модель секционного отопительного прибора (радиатора) как наиболее распространенного в России. Радиатор можно рассматривать как теплообменник «вода – воздух», действующий по принципу противотока. Поскольку скорость движения воздуха в помещении пренебрежимо мала по сравнению со скоростью течения воды, а температура воздуха принимается одинаковой по высоте радиатора и квазипостоянной по времени, то уравнением относительно воздуха можно пренебречь. Тогда уравнения математической модели для одной секции радиатора с учетом тепловой емкости стенки могут быть записаны как

$$\frac{dT_i}{dt} = -\frac{v}{h} (T_{ei} - T_{ei0}) - R(T_{ei} - T_{cmi}), i=1, \dots, r, \quad (4)$$

$$\frac{dT_{cmi}}{dt} = R_{1cm}(T_{ei} - T_{cmi}) - R_{2cm}(T_{cmi} - T_n), i=1, \dots, r,$$

где r – число секций;

T_{ei} – температура воды внутри i -той секции, °C;

T_{ei0} – температура воды на входе i -той секции, °C;

v – скорость воды, м/с, $v = G/(\rho S)$;

G – массовый расход воды, кг/с;

ρ – плотность воды, кг/м³;

S – площадь поперечного сечения секции, м²;

h – высота секции, Вт/м³°C, м;

R – коэффициент, $R = \alpha_1 \Pi / (Sc\rho)$;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от воды к стенке;

Π – периметр, м;

c – теплоемкость воды, кДж/кг°С;

T_{cmi} – температура стенки i -той секции, °C;

R_{1cm}, R_{2cm} – коэффициенты, $R_{1cm} = \alpha_1 \Pi / (S_{cm} c_{cm} \rho_{cm})$, $R_{2cm} = \alpha_2 \Pi / (S_{cm} c_{cm} \rho_{cm})$;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, Вт/м³°C;

S_{cm} – площадь поперечного сечения стенки, м²;

c_{cm} – теплоемкость стенки, кДж/кг°С;

ρ_{cm} – плотность стенки, кг/м³; T_n – температура в помещении, °C.

Модели отопительного прибора и других элементов системы теплоснабжения реализованы в системе Simulink пакета MATLAB, что позволило исследовать статические и динамические характеристики оборудования и выявить их зависимость от конкретных физических параметров. На этой основе созданы модели системы отопительных приборов (стояка отопления) для однотрубных и двухтрубных схем, которые, в свою очередь, используются в моделях ИТП с зависимой и независимой схемой присоединения системы отопления к центральной тепловой сети. На рис. 3 приведена блок-диаграмма Simulink, моделирующая работу однотрубной системы отопления с тремя стояками с зависимой схемой присоединения к центральной тепловой сети.

На рис. 3 блоки подсистем (Subsystem...Subsystem14) включают блок-диаграммы, основанные на модели (4) отопительного прибора. Подобным образом могут быть промоделированы системы отопления с любым количеством стояков для зданий любой этажности.

Для общественных и производственных зданий снижение температуры в помещениях в нерабочее время суток, в выходные и праздничные дни дает возможность существенно уменьшить потребление энергоресурсов. Для этого применяют «прерывистое» отопление – с временным понижением подачи тепла или полным отключением от системы центрального отопления. Реализация «прерывистого» режима отопления предполагает возможность изменения подачи тепла (расхода или температуры теплоносителя) в системе отопления по заданной программе. При этом экономия тепла должна сочетаться с требованиями сохранения допустимых тепловых и гидравлических режимов системы отопления.

Для проверки предложенного выше подхода к решению задачи управления тепловым режимом зданий, а также выявления подходящих алгоритмов реализации «прерывистого» режима и определения размеров получаемой при этом экономии авторами разработаны компьютерные модели в системе Simulink пакета программ MATLAB.

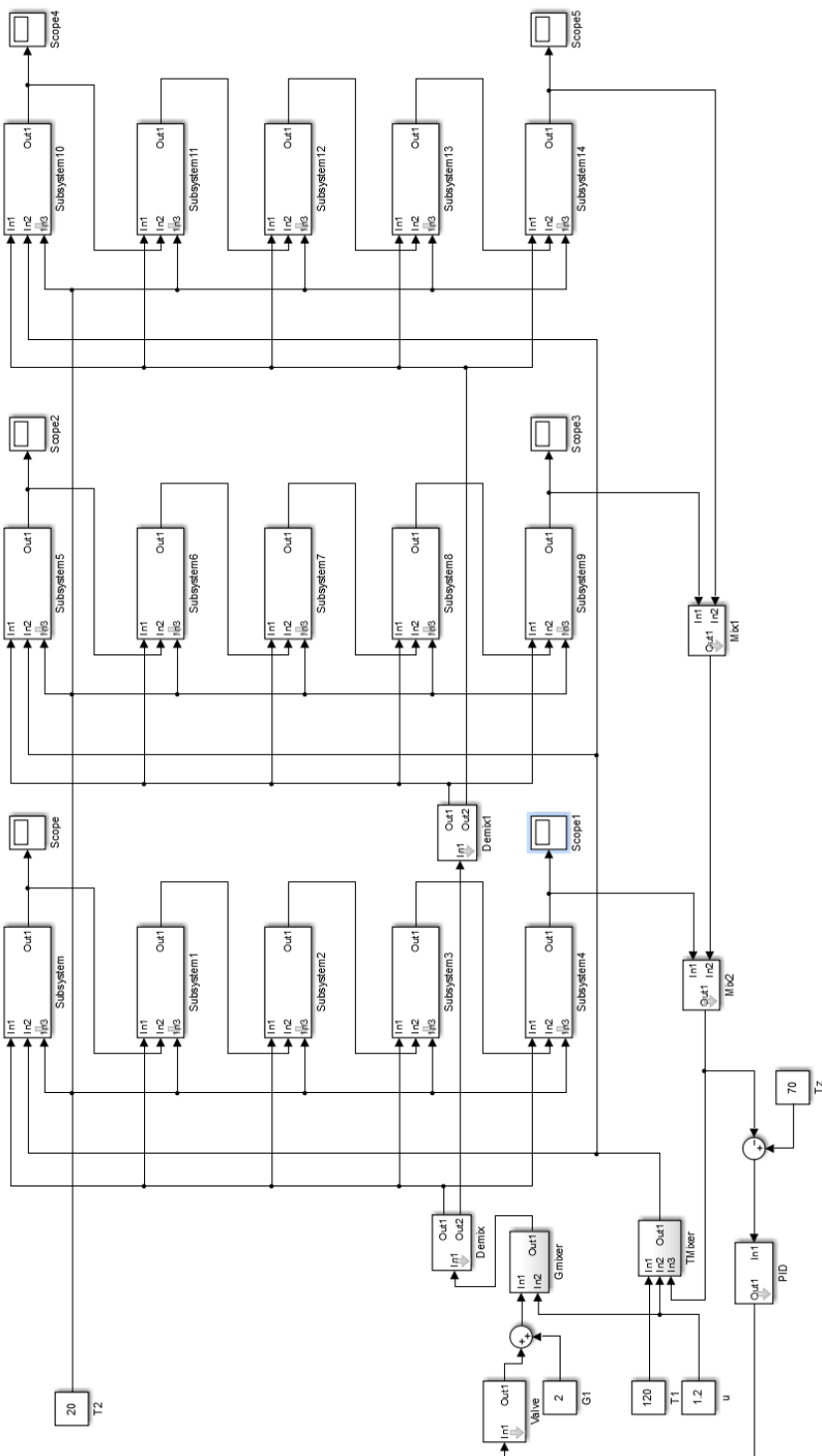


Рис. 3. Блок-диаграмма Simulink однотрубной системы отопления с зависимой схемой присоединения

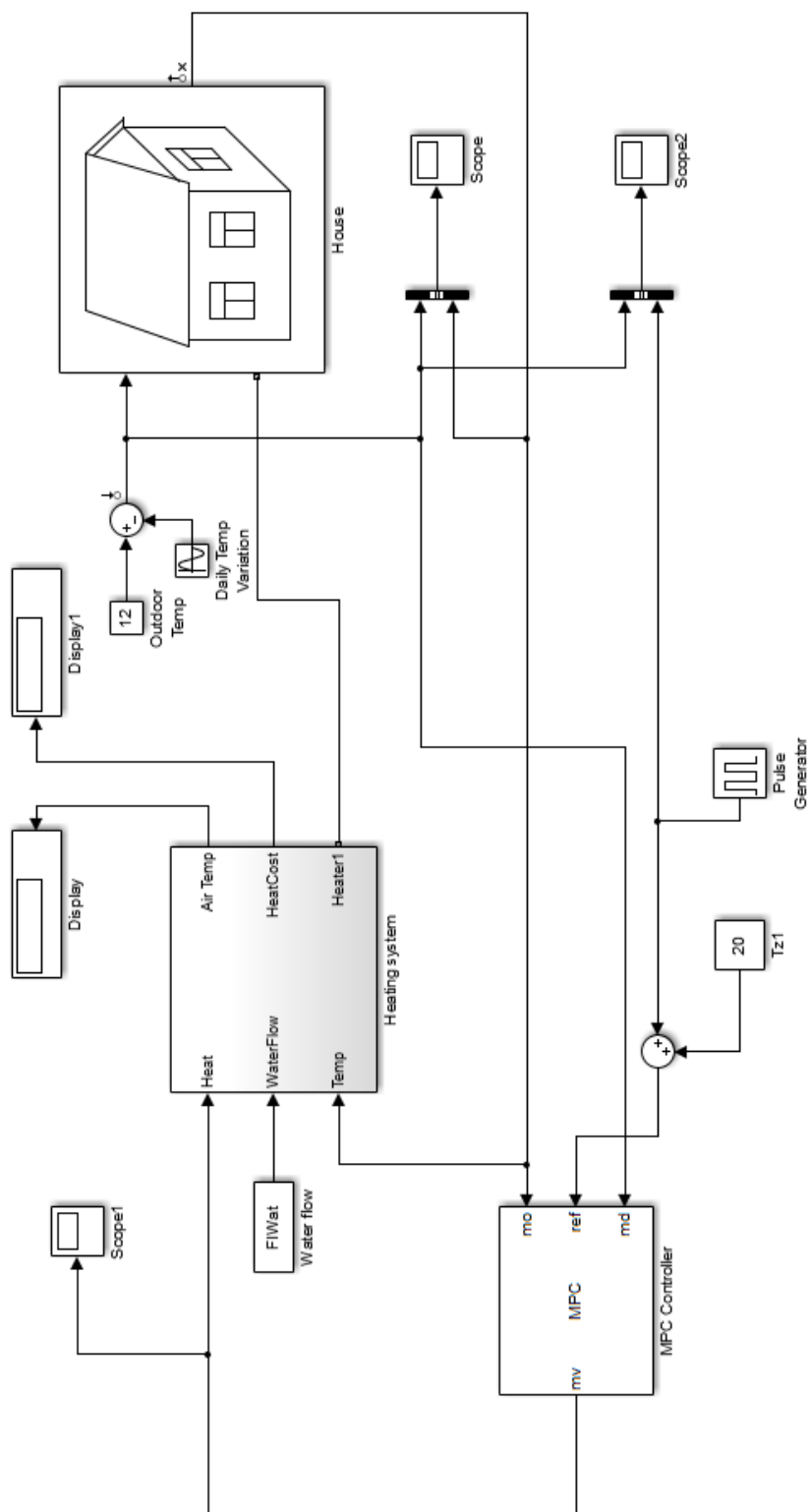


Рис 4. Блок-диаграмма Simulink системы управления с MPC-регулятором, реализующим «прерывистый» режим отопления

Данные компьютерные модели включают следующие основные подсистемы: модель теплового режима здания, основанную на модели (3), подсистему, моделирующую систему теплоснабжения, подобную показанной на рис. 3, и подсистему, моделирующую систему автоматического управления теплоснабжением с использованием различных видов регуляторов. Блок-диаграмма Simulink системы автоматического регулирования теплового режима помещения с MPC-регулятором, реализующая «прерывистый» режим отопления в ночное время с 0 до 6 часов, показана на рис. 4.

В схеме на рис. 4 подсистема House содержит блок-диаграмму модели теплового режима здания, построенную с использованием теплотехнических компонентов Thermal библиотеки Simscape. Основу модели составляют параллельные цепочки элементов, представляющие передачу тепла через ограждающие конструкции (стены, окна, пол и потолок (крышу)). Каждая цепочка включает в себя конвективный теплообмен между наружным воздухом и ограждающей поверхностью, передачу тепла теплопроводностью через ограждающую поверхность и конвективный теплообмен между ограждающей поверхностью и внутренним воздухом помещения. Выходным сигналом подсистемы является температура воздуха внутри контрольных помещений здания.

Подсистема Heating system моделирует работу однотрубной системы отопления с верхней разводкой с зависимой схемой присоединения к центральной тепловой сети. Подсистема включает внутренний контур регулирования по температуре обратной воды из системы отопления. Регулирование осуществляется по качественному методу путем изменения степени открытия трехходового регулирующего клапана. Подсистема Heating system имеет выход Heat Cost, который может использоваться для определения суммарного количества тепла, затраченного на обогрев здания.

В качестве регулятора верхнего уровня в системе управления используется MPC-регулятор (блок MPC Controller). Данный регулятор использует модель объекта управления, включающую модель теплового режима задания и модель системы отопления, полученную путем линеаризации представленной компьютерной модели. На вход MPC-регулятора заводится значение температуры наружного воздуха, которая выступает в качестве основного контролируемого возмущения для системы. Подобным образом, за счет усложнения регулятора могут быть учтены и другие контролируемые возмущения. Прогнозирующие свойства MPC-регулятора позволяют эффективно подавлять контролируемые возмущения, учитываемые в модели. Задание регулятора по температуре внутреннего воздуха в рабочее время равно 20 °С. Задание регулятора в ночное время с 0 до 6 часов снижается с 20 до 16 °С. MPC-регулятор не является адаптивной системой, но с помощью настройки можно добиться повышения робастности системы к воздействию неконтролируемых возмущений за счет некоторого ухудшения качества работы системы регулирования [8].

С полученными компьютерными моделями были проведены различные численные эксперименты. В частности, для сравнения различных алгоритмов, реализующих «прерывистый» режим отопления, авторы провели численные эксперименты для трех различных вариантов системы управления на верхнем уровне. На рис. 5 показаны полученные переходные процессы изменения температуры в помещении в течение 48 часов (двух суток).

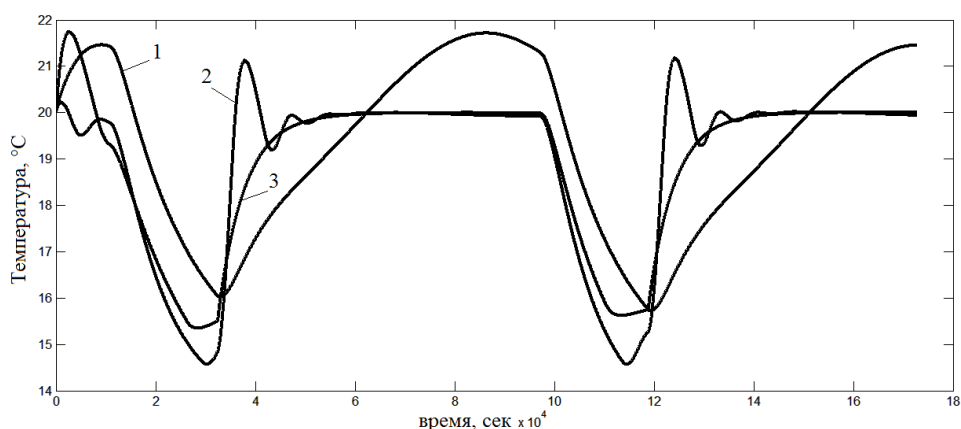


Рис. 5. Переходные процессы различных алгоритмов, реализующих «прерывистый режим» отопления:
1 – с двухпозиционным регулятором; 2 – с ПИД-регулятором; 3 – с MPC- регулятором

Переходный процесс в замкнутой системе с двухпозиционным (релейным) регулятором имеет затянутый характер, с наличием «перетопов», когда температура в помещении поднимается выше 20 °C. Это приводит к дополнительным потерям тепла – около 8 %. Анализ графиков показывает, что MPC-регулятор позволяет получить по сравнению с другими алгоритмами наилучшее качество регулирования при высокой экономии тепла.

Полученные математические модели и алгоритмы были использованы при выборе алгоритма, реализующего «прерывистый» режим отопления в здании корпуса «Д» Ярославского технического университета. Этот корпус в настоящее время служит полигоном для испытания различных энергосберегающих инновационных проектов, реализованных в рамках мероприятия «Решение комплексных проблем по приоритетному направлению «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика»: разработка интеллектуальных энергоэффективных систем для производства и потребления энергоресурсов» программы стратегического развития вуза.

Испытания показали, что при реализации «прерывистого» режима отопления обеспечивается экономия тепла около 20 % по сравнению с системой без «прерывистого» регулирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dounis A.I. and Caraiscos C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 13(7), 2009. – 1246-1261 pp.
2. Wang L. *Model Predictive Control System Design and Implementation using MATLAB*. Springer-Verlag London Limited, 2009, 396 pp.
3. Morari M. and Lee J. Model predictive control: past, present and future, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 23, 1999. – 667-682 pp.
4. Scattolini R. Architectures for distributed and hierarchical Model Predictive Control – A review. *Journal of Process Control*, 19, 2009, 723-731 pp.
5. Barata F.A., Igreja J.M., Neves-Silva R. Model predictive control for thermal house comfort with limited energy resources. In: 10th Portuguese Conference on Automatic Control, Funchal, Portugal, 2012. – 146-151 pp.
6. Колодкина А.С., Марьясин О.Ю. Компьютерное моделирование системы автоматического управления тепловым режимом здания // Тр. 26-й Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях». Т. 1. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2013. – С. 69-71.

7. Колодкина А.С., Марьясин О.Ю. Математическое моделирование элементов системы тепло-снабжения зданий // Тр. 25-й Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях». Т. 8. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012. – С. 50-53.
8. Kothare M.V., Balakrishnan V., Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*, 32, 1996, 1361-1379 pp.

Статья поступила в редакцию 13 января 2017 г.

MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR BUILDING TEMPERATURE REGULATION

O.Yu. Maryasin¹, A.S. Kolodkina²

¹Yaroslavl State Technical University
88, Moscow avenue, Yaroslavl, 150023, Russian Federation

²Yaroslavl Industrial and Economical College
8, Gagarin st., Yaroslavl, 150023, Russian Federation

The paper deals with the problem of energy efficient thermal management of buildings. The approach based on the decomposition of the general task into two subtasks is proposed. Top level task is to determine the optimal amount of heat required to maintain the desired thermal regime of the building. The object of the lower level is the generation of heat by changing the heat medium parameters (temperature, flow rate). To solve the problem of the upper level the use of MPC-approach is proposed. To implement this approach mathematical models of the thermal regime of buildings and the heating system were developed. As a result comparison of different control algorithms that provides the best quality control and the highest energy efficiency is found by the use of MPC-controllers.

Keywords: heat supply system, temperature control in buildings, mathematical model, MPC, MATLAB, Simulink.