

УДК 681.513.5

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ЗДАНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ

<sup>1</sup>Румянцев Д.В., <sup>2</sup>Тверской М.М.

<sup>1</sup>ООО «ИКП «Никас», Челябинск, e-mail: dimfirst@gmail.com;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск, e-mail: julius@mail.ru

В статье показана возможность практической реализации алгоритма упреждающего управления в составе системы управления тепловыми процессами здания при комбинации воздушного и радиаторных приборов отопления. Рассмотрена параметрическая идентификация математической модели объекта управления в процессе работы системы управления на основе статистических данных об объекте. Приведены результаты экспериментальных данных, полученные в процессе функционирования системы управления для поддержания результирующей температуры по заданному графику в эксплуатируемом помещении. В качестве целевой функции использовались суммарные затраты на энергию в пределах заданного горизонта прогнозирования. Экспериментальные данные были получены для различных погодных условий, при использовании в качестве источников энергии электрического котла и теплового насоса, и городской тепловой сети. Анализ полученных результатов показал, что экономический эффект от использования алгоритма упреждающего управления существенно зависит от условий работы системы и может быть значительным.

**Ключевые слова:** оптимальное управление тепловым режимом здания, упреждающее управление, комбинированное отопление

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF HOUSE TEMPERATURE OPTIMAL CONTROL STRATEGY WITH COMBINED HEATING SYSTEM

<sup>1</sup>Rumyantsev D.V., <sup>2</sup>Tverskoy M.M.

<sup>1</sup>ООО «ИКП «Никас», Chelyabinsk, e-mail: dimfirst@gmail.com;

<sup>2</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, e-mail: julius@mail.ru.

Combined heating systems with several types of heat sources and different energy sources are frequently used in our days due to energy cost minimization. Therefore determination of temperature optimal control strategy becomes very important problem. The possibility of practical realization of building heating control system with air and radiators heat sources based on model predictive control (MPC) is shown in this article. The real-time parametric identification of thermodynamic model of the building based on statistical data of controlled object is considered. The experimental results were collected during comfort temperature maintenance in the utilized room according preset trajectory according to occupancy schedule. The fitness function of energy cost is used in the MPC algorithm with finite receding predictive horizon. Presented results were collected for different weather condition. There were used electrical heater and heat pump and although city centralized heat network as thermal energy sources. Analyze of experimental results has shown that economical effect from using MPC algorithm in multi-objective heating control system is depend on system working condition and can be significant.

**Keywords:** optimal heating control, model predictive control, combined heating

На практике часто встречаются комбинированные системы отопления, включающие в себя приборы радиаторного и воздушного отопления. Комбинированное отопление преимущественно используется в зданиях общественного и производственного типа. Кроме комбинаций приборов отопления различного типа, в настоящее время все более часто встречаются комбинации различных источников тепловой энергии в одной системе отопления.

Применение систем комбинированного отопления, как правило, вызвано задачей более эффективного распределения тепловой энергии при заданном уровне теплового комфорта в помещении. Однако существующие алгоритмы управления тепловыми процессами зданий в большинстве своем

не пригодны для систем комбинированного отопления. В литературе также недостаточно информации об экспериментальных исследованиях функционирования систем управления тепловыми процессами зданий при комбинированном отоплении. В связи с этим на практике используются классические алгоритмы управления с жестко заданной логикой работы, зачастую не обеспечивающие минимальные затраты на энергию систем отопления или не выдерживающие заданный график теплового комфорта.

Ранее, в работе [5], была выполнена постановка задачи упреждающего управления тепловыми процессами зданий при комбинированной системе отопления. В [3] был подробно рассмотрен алгоритм упреждающего управления на основе метода линейного

программирования, решающий данную задачу. В данной статье экспериментально показана возможность практической реализации системы управления тепловыми процессами зданий при комбинированном отоплении с использованием алгоритма упреждающего управления.

### Объект управления

Для проведения экспериментального исследования работы алгоритма упреждающего управления тепловым режимом здания было выбрано помещение лаборатории Центра коллективного пользования в энергетике и энергосбережении при Южно-Уральском государственном университете. Данное помещение содержит основное оборудование, входящее в состав «Полунатурной установки моделирования гибридных систем энергоснабжения», которое необходимо для организации комбинированной системы отопления. Основные характеристики помещения:

– площадь и объем соответствуют 142 м<sup>2</sup> и 497 м<sup>3</sup>;

– площадь ограждений (внутренних поверхностей стен): 183 м<sup>2</sup>;

– площадь стен, граничащих с другими отапливаемыми помещениями: 56,7 м<sup>2</sup>.

В помещении имеются классические приборы радиаторного отопления и воздушное отопление, представляющее собой вентиляционную установку с возможностью переключения в режим полной рециркуляции воздуха.

Нагрев теплоносителя для приборов радиаторного отопления осуществляется электрически котлом до температуры (65–70)°С. Нагрев теплоносителя, поступающего к теплообменнику вентиляционной установки (установки воздушного отопления), происходит в резервуарном нагревателе, за счет теплового насоса, до температуры (65–70)°С.

### Модель объекта управления

В статье [3] была представлена уточненная термодинамическая дискретная математическая модель здания для комбинированной системы отопления в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{a,int}(k+n) = b_i - [s_{i,1}u^B(k) + \dots + s_{i,n}u^B(k+n-1) + \\ + s_{i,N+1}u^P(k) + \dots + s_{i,N+n}u^P(k+n-1)]; \\ T_{surf}(k+n) = b_i - [s_{i,1}u^B(k) + \dots + s_{i,n}u^B(k+n-1) + \\ + s_{i,N+1}u^P(k) + \dots + s_{i,N+n}u^P(k+n-1)]; \\ Q^B(k+n) = b_i - [s_{i,1}u^B(k) + \dots + s_{i,n}u^B(k+n-1)]; \\ Q_{rad}^P(k+n) = b_i - [s_{i,1}u^P(k) + \dots + s_{i,n}u^P(k+n-1)]; \\ Q_{conv}^P(k+n) = b_i - [s_{i,1}u^P(k) + \dots + s_{i,n}u^P(k+n-1)]; \\ T_{su}(k+n) = b_i - [s_{i,1}u^B(k) + \dots + s_{i,n}u^B(k+n-1) + \\ + s_{i,N+1}u^P(k) + \dots + s_{i,N+n}u^P(k+n-1)], \end{array} \right. \quad (4)$$

ограничения в каноническом виде представлены следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1(k+n) = \beta_{10} - a_{10,5}Q^B(k+n); \\ x_2(k+n) = \beta_{11} - [a_{11,7}Q_{rad}^P(k+n) + a_{11,6}Q_{conv}^P(k+n)]; \\ x_3(k+n) = \beta_{12} - a_{12,9}u^P(k+n); \\ x_4(k+n) = \beta_{13} - a_{13,8}u^B(k+n); \\ x_6(k+n) = b_i - [s_{i,1}u^B(k) + \dots + s_{i,n}u^B(k+n-1) + s_{i,N+1}u^P(k) + \dots + \\ + s_{i,N+n}u^P(k+n-1) - s_{i,2N+n}x_5(k+n)]. \end{array} \right. \quad (5)$$

Критерий оптимальности при релейном управлении вентилятором отопления имеет вид

$$C_E(k) = b_0 + \sum_{n=1}^N \left[ \gamma_{k+n}^{\Delta} \cdot x^{\Delta B}(k+n-1) + \gamma_{k+n}^{\Gamma} (s_{0,1}u^B(k) + s_{0,n}u^B(k+n-1) + \right. \\ \left. + s_{0,N+n}u^P(k+n-1)) \right] \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $k$  – номер текущего шага;  $n$  – номер шага прогнозирования ( $n = 1 \dots N$ );  $s_{ij}$  – постоянные коэффициенты;  $b_i$  и  $\beta_i$  – свободные члены;  $T_{air}^{int}$  – температура воздуха в помещении;  $T_{surf}^{int}$  – средняя температура внутренних поверхностей ограждающих конструкций;  $T_{su}$  – результирующая температура [1];  $Q_{conv}^p$  – конвективные теплопоступления от воздушного отопления;  $Q_{conv}^r$  – конвективные теплопоступления от радиаторного отопления;  $Q_{rad}^p$  – радиационные теплопоступления от радиаторного отопления;  $u^p, u^B$  – управляющие воздействия воздушного и радиаторного приборов отопления;  $x^{ЭВ} \in \{0, 1\}$  – переменная, соответствующая состоянию вентилятора воздушного отопления (0 – вентилятор отключен, 1 – вентилятор включен);  $x_1 \dots x_5$  – вспомогательные переменные, добавленные для преобразования ограничений, заданных в виде неравенств в равенства;  $x_6$  – вспомогательная переменная, добавленная для обеспечения условия неотрицательности свободных членов.

Чтобы учесть возмущение, возникающее от колебания температуры подающе-

гося теплоносителя, добавим в модель дополнительные переменные состояния:  $T_{boil}$  – температура теплоносителя, поступающего от электрического котла;  $T_{pump}$  – температура теплоносителя, поступающего от резервуарного нагревателя. Другим возмущающим воздействием является температура уличного воздуха  $T_{a,ext}$ . В представленной модели учитываются значения возмущающих воздействий только для текущего шага. Поэтому их значения являются известными и включены в свободные члены соответствующих уравнений.

### Система управления

На рис. 1 приведена структурно-функциональная схема системы управления тепловыми процессами здания для описанного ранее объекта управления.

Для измерения температур используют пассивные датчики  $T1-T8$  без повышенной точности ST-PT1000 компании Polar Bear, широко применяемые при автоматизации инженерных систем зданий.

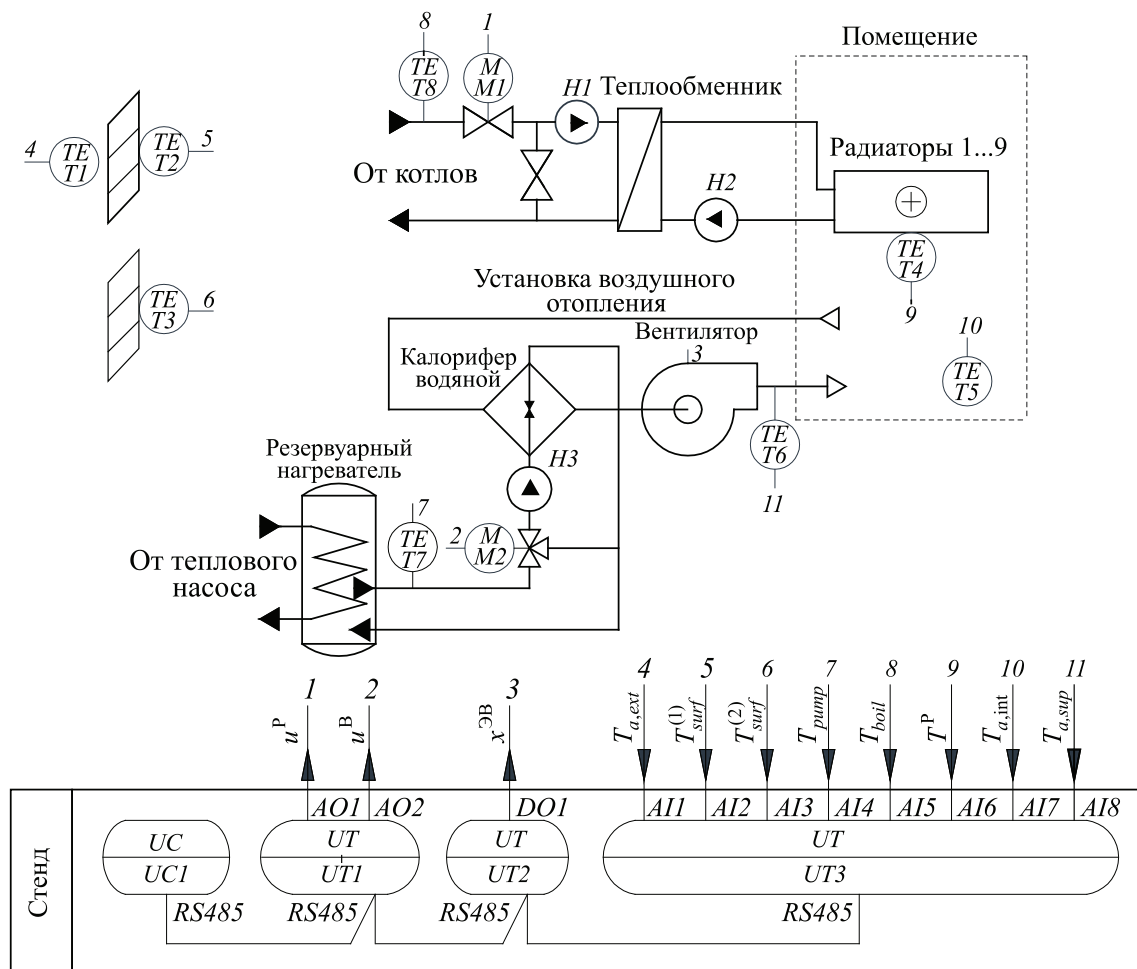


Рис. 1. Структурно-функциональная схема системы управления

Теплоснабжение радиаторов отопления организовано по независимой схеме (через теплообменник). Постоянный расход теплоносителя через радиаторы отопления обеспечивается насосом Н2. Тепловая мощность радиаторов регулируется централизованно с помощью электропривода двухходового клапана М1 (Тип клапана и привода Johnson Controls ANSI 250 DN15 и VA7810GGA11 соответственно). Регулирование тепловой мощности установки воздушного отопления осуществляется с помощью привода трехходового клапана М2 (Тип клапана и привода: ESBE VRG130 и Belimo HT24-SR-T соответственно).

Управление приточным вентилятором происходит дискретно (включен или выключен) с помощью электромагнитного пускателя.

Основой системы управления является персональный компьютер *UCI*. Управляющая программа с алгоритмом упреждающего управления и параметрической идентификацией реализована в среде моделирования Simulink v8.0 программы MatLab. Взаимодействие с исполнительными устройствами и датчиками осуществляется через дискретные и аналоговые модули ввода и вывода ОВЕН типа МУ110 (*UTI-UT3*). Связь программы MatLab с модулями выполнена через OPC-Сервер по протоколу Modbus RTU.

Эксперименты проводились в период с 17.11.2014 г. по 29.12.2014 г. При проведении экспериментов следующие параметры и условия оставались неизменными:

- время начала и окончания рабочего режима 7:00 и 18:00 соответственно;
- время дневного тарифа на электроэнергию: с 7:00 до 23:00 включительно;
- длительность шага дискретизации  $h$  выбрана на основе результатов моделирования исходя из оценки быстродействия теплообменных процессов и составляет 2400 секунд;
- количество шагов горизонта прогнозирования  $N$  выбрано исходя из оценки максимальной длительности прогрева помещения при переходе из дежурного режима в рабочий и составляет 4 шага. Длительность горизонта прогнозирования составляет 2 часа 40 минут или около 2,7 часа.

Нижнее ограничение температуры воздуха в общественных и административно-бытовых помещениях для дежурного режима может быть установлено на уровне  $+12^{\circ}\text{C}$  [4]. Но поскольку экспериментальное помещение использовалось ежедневно и за время дежурного режима температура воздуха не успевала снижаться более чем на  $2-4^{\circ}\text{C}$ , для проверки работоспособно-

сти алгоритма было установлено нижнее ограничение результирующей температуры в дежурном режиме на  $+19^{\circ}\text{C}$ , а в рабочем режиме на  $+22^{\circ}\text{C}$ .

### Параметрическая идентификация модели объекта управления

Алгоритм параметрической идентификации основан на методе наименьших квадратов и был подробно рассмотрен в [2].

Для проведения параметрической идентификации необходимо получить исходные данные в виде обучающих примеров, которые представляют собой наборы значений переменных состояния, управляющих и возмущающих воздействий в дискретные моменты времени. В процессе сбора обучающих данных алгоритм упреждающего управления не функционирует, и задача системы управления – обеспечить изменение термодинамического состояния объекта таким образом, чтобы переменные состояния и управляющие воздействия принимали значения из диапазона, близкие к тому, в котором они будут изменяться в процессе работы алгоритма упреждающего управления. И, кроме того, необходимо обеспечить как можно более равномерное распределение данных переменных в пределах их установленных диапазонов изменения.

Для выполнения этих требований можно использовать следующий подход. Управляющие воздействия изменяются случайным образом в дискретные моменты времени в пределах от 0 до 100%. Среднее значение тепловой мощности приборов отопления при этом будет 50%. Но если температурные показатели начинают выходить за установленные границы, то пределы изменения управляющих воздействий могут быть изменены соответствующим образом, смещая среднее значение тепловой мощности. Изменение границ управляющих воздействий происходит по пропорциональному закону в зависимости от разницы между реальным значением и минимальным ограничением результирующей температуры.

Из рис. 2 видно, что результирующая температура меняется в относительно небольших пределах и большую часть времени остается в диапазоне, соответствующем рабочему режиму. При работе системы упреждающего управления в дежурном режиме это может вызвать большую ошибку прогнозирования, чем в рабочем. Однако так как помещение в дежурном режиме не эксплуатируется, то точность поддержания температуры не является критичной.

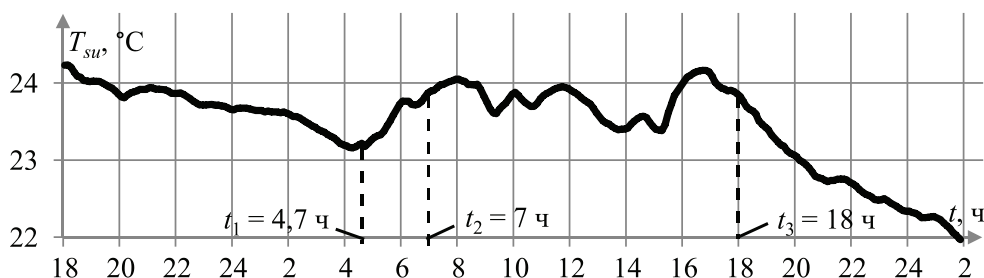


Рис. 2. Графики изменения температуры в процессе сбора обучающих данных

Температура уличного воздуха изменялась в следующих пределах:

- с 18:00 первых суток до 16:00 вторых суток: от  $-7$  до  $-14^{\circ}\text{C}$ ;
- с 16:00 вторых суток до 02:00 третьих суток: от  $-14$  до  $-21^{\circ}\text{C}$ .

После получения каждого нового примера обучающих данных проводится параметрическая идентификация модели и оценивается ошибка прогнозирования результирующей температуры для текущего шага на основе ранее полученных данных. Если в течение 12 часов (18 шагов) ошибка не превышает заданной величины ( $0,5^{\circ}\text{C}$ ), то система управления начинает использовать в рабочем режиме алгоритм оптимизации с идентифицированной математической моделью объекта, а в дежурном остается старый алгоритм генерирования управляющих воздействий случайным образом. При этом сбор данных и идентификация модели продолжается, пока ошибка не снизится ниже установленного значения ( $0,3^{\circ}\text{C}$ ).

После выполнения идентификации с объемом обучающих данных в 27 примеров, что составляет 72 часа, максимальное отклонение прогнозируемой результирующей температуры от реальной составило  $-0,352^{\circ}\text{C}$ . Снижение погрешности прогнозирования ниже  $\pm 0,3$  произошло при количестве примеров больше 90 (240 часов).

### Функционирование алгоритма упреждающего управления

#### Условия для проведения эксперимента 1:

- при действии дневного тарифа стоимость  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  электроэнергии в 3 раза дороже стоимости  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  тепловой энергии;
- при действии ночного тарифа стоимость  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  электроэнергии равна стоимости  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  тепловой энергии;
- температура уличного воздуха с 2:00 до 11:00:  $-8^{\circ}\text{C}$ ; с 11:00 до 2:00:  $-6^{\circ}\text{C}$ .

В результате проведения эксперимента были получены графики изменения температур и управляющих воздействий, показанные на рис. 3, 4.

Из приведенных графиков видно, что в рабочем режиме используется только радиаторное отопление ( $u^P$ ). Воздушное отопление ( $u^B$ ) используется только для прогрева помещения при переходе из дежурного режима в рабочий, при этом на протяжении этого промежутка времени действует ночной тариф на электроэнергию. Воздушное отопление остается включенным только в течение одного шага горизонта прогнозирования и работает с тепловой мощностью, близкой к максимальной, в то время как радиаторное отопление начинает прогрев за два шага до начала рабочего режима. Это объясняется дополнительными затратами на электроэнергию при работе воздушного отопления и меньшими тепловыми потерями при минимальном времени перехода из дежурного режима в рабочий.

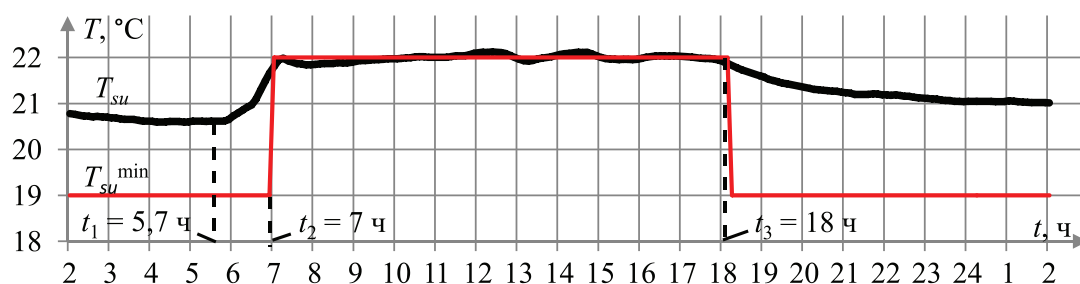


Рис. 3. Графики изменения температуры при проведении эксперимента 1

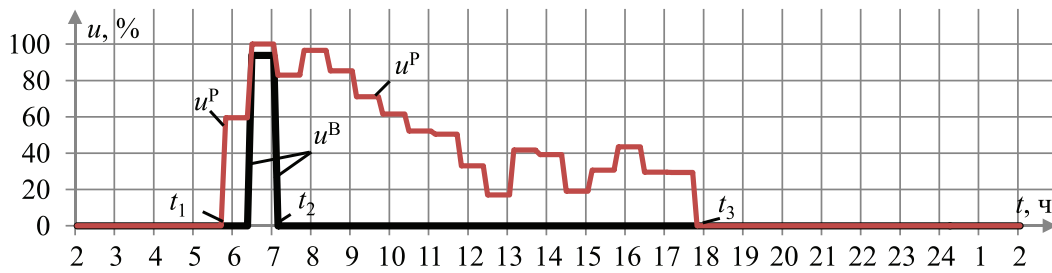


Рис. 4. Графики изменения управляющих воздействий при проведении эксперимента 1

Условия для проведения эксперимента 2:

– стоимости энергии аналогичны стоимостям, принятым в эксперименте 1;

– температура уличного воздуха с 2:00 до 18:00 от  $-12$  до  $-15^\circ\text{C}$ ; с 18:00 до 2:00: от  $-15$  до  $-20^\circ\text{C}$ .

Результаты эксперимента показаны на рис. 5, 6.

Так как электрическая мощность, потребляемая вентилятором воздушного отопления при его работе, остается постоянной и не зависит от величины  $u^B$ , то можно сделать вывод, что при данных условиях, для поддержания результирующей температуры, тепловая энергия от радиаторного отопления используется эффективнее, чем от воздушного. Подобный эффект можно объяснить повышенными тепловыми потерями за счет инфильтрации, снижающи-

ми эффективность воздушного отопления. Другой причиной может являться изменение направления и скорости движения конвективных потоков при работе воздушного отопления, которые могут в значительной степени влиять на температурные показания датчиков и условия комфорта.

Эксперименты 1–2 были выполнены для наиболее распространенных условий, когда тепловая и электрическая энергия получаются из различных и с точки зрения потребителя независимых источников. Ниже будут приведены результаты экспериментов, полученных для реальных условий используемого помещения, при которых нагрев теплоносителя для радиаторного отопления осуществляется электрическим котлом, теплоносителя воздушного отопления – тепловым насосом.

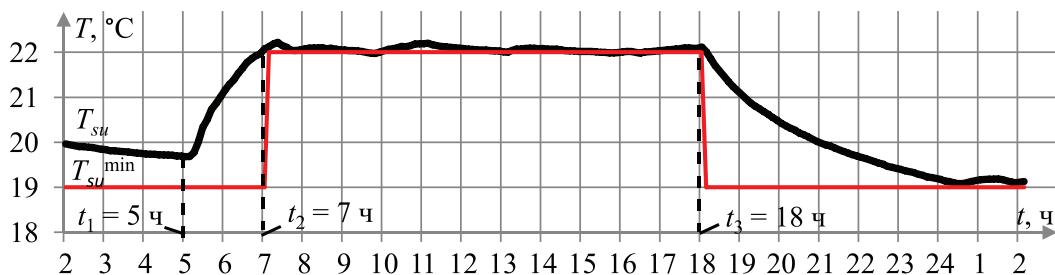


Рис. 5. Графики изменения температуры при проведении эксперимента 2

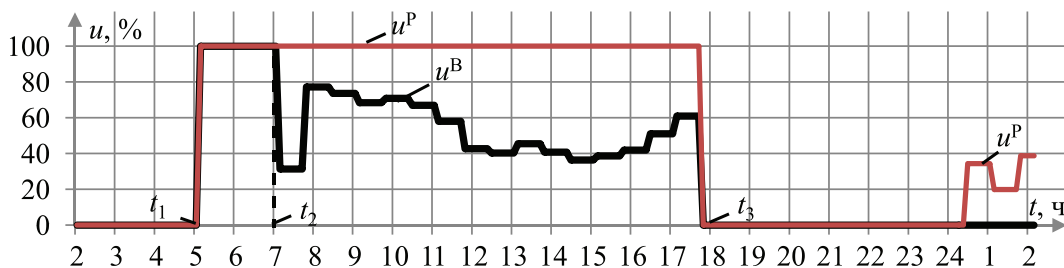


Рис. 6. Графики изменения управляющих воздействий при проведении эксперимента 2

Условия для проведения эксперимента 3:

- стоимость тепловой энергии радиаторного отопления равна стоимости электроэнергии (для нагрева используется электрод котел);
- стоимость тепловой энергии воздушного отопления в 2,5 раза ниже стоимости электроэнергии (используется тепловой насос);
- температура уличного воздуха от  $-5$  до  $-6$  °С.

Результаты эксперимента показаны на рис. 7, 8.

Согласно полученным результатам использование воздушного отопления при данных условиях более выгодно, так как его тепловая энергия, полученная от теплово-

го насоса, обходится значительно дешевле с учетом дополнительных энергозатрат на работу приточного вентилятора. Радиаторное отопление используется только в течение двух шагов.

Далее будет рассмотрен эксперимент при условиях, аналогичных эксперименту 4, но при значительно более низкой температуре уличного воздуха.

Условия для проведения эксперимента 4:

- температура уличного воздуха с 22:00 до 4:00: от  $-17$  до  $-20$  °С; с 4:00 до 12:00: от  $-25$  до  $-17$  °С; с 12:00 до 22:00: от  $-17$  до  $-7$  °С.

Полученные результаты показаны на рис. 9, 10.

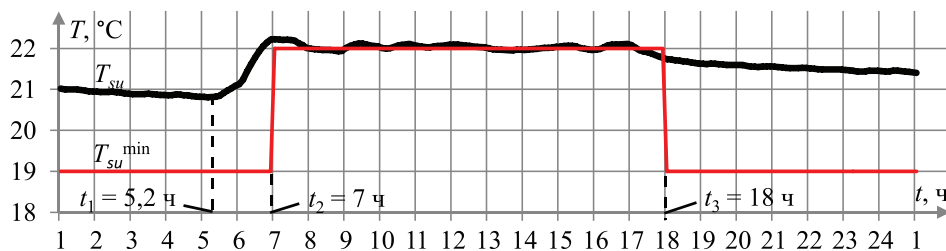


Рис. 7. Графики изменения температуры при проведении эксперимента 3

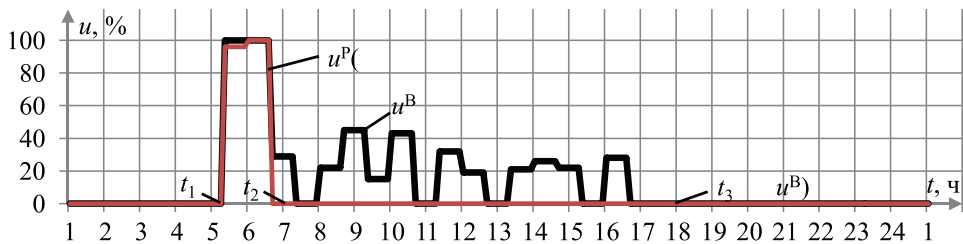


Рис. 8. Графики изменения управляющих воздействий при проведении эксперимента 3

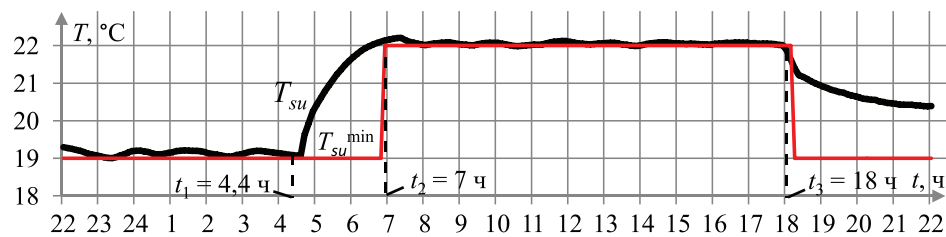


Рис. 9. Графики изменения температуры при проведении эксперимента 4

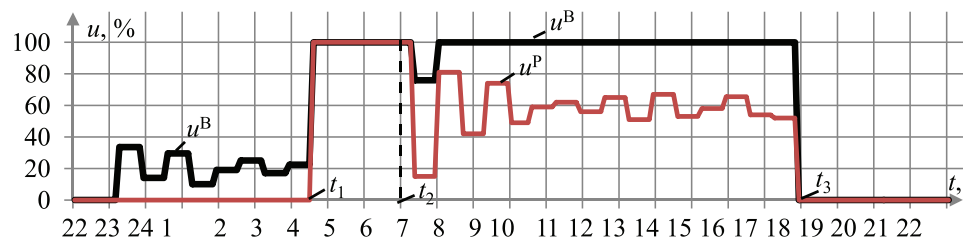


Рис. 10. Графики изменения управляющих воздействий при проведении эксперимента 4

В рабочем режиме воздушное отопление используется с максимальной тепловой мощностью, как экономически наиболее выгодное. Радиаторное отопление при этом обеспечивает недостающую тепловую мощность, необходимую для поддержания результирующей температуры. В дежурном режиме, до начала прогрева помещения, используется только воздушное отопление.

Максимальное отклонение температуры по результатам всех экспериментов составило  $+0,22^{\circ}\text{C}$  в эксперименте 2, в момент времени 7 ч, из-за перерегулирования при прогреве помещения и  $-0,23^{\circ}\text{C}$  в эксперименте 3, в момент времени 18 ч.

На графиках изменения результирующих температур, показанных на рис. 5 и 10, можно заметить, что в период поддержания температуры на минимальной границе при дежурном режиме точность регулирования несколько меньше, чем при рабочем режиме. Причиной этого является то, что основное количество данных, по которым проводилась параметрическая идентификация, сосредоточено в диапазоне результирующей температуры от  $21$  до  $24^{\circ}\text{C}$ .

В результате анализа затрат на энергию, потребляемую при проведении экспериментов, были сделаны следующие выводы. При алгоритме управления с жесткой логикой, когда радиаторное отопление было бы фоновым, а воздушное отопление использовалось для догрева воздуха помещения до заданной величины, на время рабочего режима, дополнительные затраты приведенной энергии (электрическая энергия приводится к тепловой), для условий эксперимента 1, составили бы  $97,36$  МДж (или  $82\%$ ). Однако для эксперимента 2 дополнительные затраты отсутствовали бы, так как низкая уличная температура в любом случае вынуждает использовать установку воздушного отопления на протяжении всего рабочего режима. Если принять, что при алгоритме с жесткой логикой воздушное отопление является фоновым, радиаторное – догревающим, а время прогрева является фиксированным и соответствует эксперименту 2 (при уличной температуре  $-25^{\circ}\text{C}$ ), то для эксперимента 1 дополнительные затраты от классического алгоритма управления составили бы  $7,56$  МДж приведенной энергии, или  $6,4\%$ . Отметим, что для условий, когда температура уличного воздуха будет ниже  $-25^{\circ}\text{C}$ , дополнительные затраты от алгоритма с жесткой логикой будут отсутствовать, но не будут выполнены условия ограничения по минимальной результирующей температуре в начале рабочего режима, так как понадобится более длительный прогрев, чем принятый фиксированный.

Из вышеприведенного анализа можно сделать вывод, что экономия приведенной энергии от использования алгоритма упреждающего управления зависит от погодных условий, а также от располагаемой тепловой мощности приборов отопления и может быть значительной. Кроме того, использование разработанной системы управления позволяет обеспечить поддержание теплового комфорта в заданных пределах и с допустимой погрешностью.

### Список литературы

1. ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: Стандартинформ, 2013.
2. Румянцев Д.В. Алгоритм параметрической идентификации термодинамической модели тепловых процессов здания при комбинированном отоплении // Фундаментальные и прикладные научные исследования. Сборник статей международной научно-практической конференции. – М.: Европейский фонд инновационного развития, 2015. – С. 59-62.
3. Румянцев Д.В. Алгоритм упреждающего управления тепловыми процессами здания при комбинированной системе отопления / Д.В. Румянцев, М.М. Тверской // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–24. – С. 5371–5376.
4. СП 60.13330.2012 Отопление, Вентиляция и Кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. – М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2012.
5. Тверской М. М. Управление тепловым режимом здания при комбинированной системе отопления / М.М. Тверской, Д.В. Румянцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Вып. 13. – № 4. – С. 4–15.

### References

1. GOST 30494-2011 Zdaniya zhilye i obsetvennyye. Parametry mikroklimate v pomescheniyah. Moscow, Standartinform, 2013.
2. Rummyantsev D.V. Algoritm parametriceskoy identifikatsii termodinamicheskoy modeli teplovykh protsessov zdaniya pri kombinirovannom otoplenii. Moscow, Fundamentalnye i prikladnye nauchnye issledovaniya. Sbornik statey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Europeyskiy fond innovatsionnogo razvitiya, 2015, pp. 59–62.
3. Rummyantsev D.V., Tverskoy M.M. Algoritm uprezhduschego upravleniy teplovimi protsessami zdaniya pri kombinirovannoy sisteme otopleniya. Moscow, Fundamentalnye issledovaniya. Issuer 2–24, 2015, pp. 5371–5376.
4. SP 60.13330.2012 Otoplenie, Ventilyatsiya i Konditsionirovanie vozduha. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 41-01-2003. Moscow, Gosstroy Rossii, FGUP TsPP, 2012.
5. Tverskoy M.M., Rummyantsev D.V. Upravlenie teplovim rejimom zdaniya pri kombinirovannoy sisteme otopleniya. Chelyabinsk, Vestnik SUSU. «Komputernye tehnologii, upravlenie, radioelektronika», 2013. Issue 13, no. 4, pp. 4–15.

### Рецензенты:

Панферов В.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск;

Казаринов Л.С., д.т.н., профессор, декан факультета «Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск.