

УДК 697.3 + 681.513.5

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ

М.М. Тверской, Д.В. Румянцев

В статье проведен анализ существующих алгоритмов управления температурным режимом здания при комбинированном отоплении. Рассмотрены особенности задачи оптимального управления температурным режимом здания и приведено обоснование использования алгоритма квазиоптимального упреждающего управления со скользящим горизонтом прогнозирования для решения данной задачи. Представлены и проанализированы результаты моделирования работы алгоритма упреждающего управления температурным режимом здания в системе отопления с воздушным и радиаторными приборами отопления.

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

Задача управления системой комбинированного отопления является многомерной задачей, зависящей от таких параметров, как термодинамические характеристики объекта управления, так и от видов, и стоимости первичных энергоносителей.

Однако на практике для управления комбинированными системами отопления используются алгоритмы, не отвечающие современным требованиям к решению поставленной задачи. Например, в [6] описывается комбинированная система отопления, состоящая из базисной части водяного отопления и догревающей части – для натопа в виде воздушного отопления. Водяное отопление при этом является не регулируемым.

В более ранней литературе [3] приведена система комбинированного отопления состоящая из центральной воздушной системы отопления и индивидуальных приборов отопления играющих роль доводчиков температуры, и устанавливаемых в помещениях для догрева температуры воздуха до комфортного значения. В прерывистом режиме работы индивидуальные приборы отопления осуществляют также поддержание минимальной температуры воздуха в дежурном режиме при отключенном центральном воздушном отоплении.

В [4] для зрительных залов и клубов предлагается система отопления представляющая собой комбинацию конверторных приборов отопления и воздушного отопления, совмещенного с вентиляцией. Тепловая нагрузка на конверторные приборы отопления определяется из условия снижения температуры воздуха помещения до минимально допустимого значения в нерабочее время. Догрев температуры воздуха до комфортного значения в рабочее время выполняется системой воздушного отопления.

Приведенные алгоритмы управления комбинированным отоплением были предложены для конкретных условий и не являются универсальными. Также эффективность данных алгоритмов в приведенной литературе оценивается путем расчетов или экспериментального сравнения с другими алгоритмами, что усложняет разработку систем управления и не гарантирует минимальные затраты на энергию при использовании этих алгоритмов. Кроме того, не объясняется каким образом будет выполняться прогрев помещения к моменту начала рабочего режима при прерывистом графике работы.

Классическим подходом для решения задач оптимального управления температурным режимом здания является использование принципа максимума Понтрягина [1, 5]. Существенным недостатком классических методов оптимального управления является поиск стратегии оптимального управления в начальный момент времени для всего временного интервала управления. Это может привести к существенной ошибке в процессе функционирования системы управления и сделать стратегию управления не оптимальной по отношению к реальному объекту из-за возникновения непредвиденных или неучтенных изменений возмущающих воздействий и других условий, влияющих на состояние объекта управления. Поэтому использование классических методов поиска оптимального управления на длительном временном интервале в большинстве случаев не является эффективным. Так, например, в работе [1] принцип максимума Понтрягина используется для поиска оптимальной стратегии управления тепловым режимом здания с прерывистым графиком работы, но только на временном интервале перехода из дежурного режима в рабочий.

В качестве альтернативы классическим методам на практике широко применяется алгоритм упреждающего управления [12–14].

Принцип работы алгоритма упреждающего управления заключается в прогнозировании состояния объекта управления исходя из математической модели объекта, в пределах заданного временного интервала и поиск управляющих воздействий на основе полученного прогноза, обеспечивающих минимальное значение критерия оптимальности. При этом расчет управляющих воздействий повторяется через фиксированный промежуток времени, а временной интервал, в пределах которого выполняется прогнозирование, сдвигается вперед на соответствующую величину.

Из-за приведенных особенностей алгоритм упреждающего управления удобнее всего представлять в дискретном виде. Тогда траектория изменения состояния системы будет состоять из шагов, зафиксированных в дискретные моменты времени. Расчет управляющих воздействий происходит для каждого текущего шага, а прогноз выполняется на заданное количество шагов вперед, которое принято называть скользящим горизонтом прогнозирования. В связи с тем, что расчет выполняется для ограниченного

горизонта прогнозирования, полученная стратегия управления будет оптимальной только для временного отрезка соответствующего горизонту прогнозирования и может не быть оптимальной для всего временного интервала, на котором осуществляется управление. Поэтому решение, полученное в результате работы алгоритма упреждающего управления, является квазиоптимальным или субоптимальным. В [2] для приближения квазиоптимального решения к оптимальному предлагается выбирать «достаточно большой горизонт прогнозирования» исходя из принципа, что дальнейшее увеличение горизонта прогнозирования не приводит к существенному влиянию на результат решения задачи. Увеличение горизонта прогнозирования также повышает устойчивость системы управления [11]. Но метод выбора «достаточно большого горизонта прогнозирования» не является однозначным, поскольку если решение не изменяется в определенных пределах значений горизонта прогнозирования, это не означает, что оно не изменится при дальнейшем увеличении. Более того чрезмерное увеличение горизонта прогнозирования может сказаться на качестве управления из-за увеличения ошибки прогнозирования [10]. Кроме того, на практике, при поиске оптимального управления объектом приходится иметь дело с процессами, долгосрочный прогноз которых крайне затруднителен или дает большую ошибку, а в некоторых случаях прогноз в принципе не представляется возможным. Например, при управлении тепловыми процессами помещения, прогнозирование погодных условий в долгосрочной перспективе может привести к значительной ошибке, а спонтанное изменение уставок или возникновение таких неучтенных возмущающих воздействий как теплотери от открытия окон, внештатные тепловыделения от оборудования и теплотери от вентиляции невозможно спрогнозировать.

Здание с точки зрения управления его тепловыми процессами является многомерным объектом с наличием различного рода возмущающих воздействий и событий, которые сложно спрогнозировать. Поэтому, использование в качестве основы системы управления тепловыми процессами здания алгоритма упреждающего управления позволит получить более эффективную стратегию управления при практической реализации, чем классические методы оптимизации. Также методы численного решения задачи упреждающего управления не требуют сложных аналитических выводов и используют стандартные подходы. Большое количество математических преобразований при решении задачи упреждающего управления также не создает трудности при использовании современных вычислительных машин.

В работе [9] была выполнена постановка задачи упреждающего управления тепловым режимом здания при комбинации приборов воздушного и радиаторного отопления. Решение задачи заключается в поиске стратегии управления минимизирующей затраты на энергию в пределах скользящего

горизонта прогнозирования, с учетом зависимых от времени суток тарифов на энергию и при прерывистом режиме работы системы отопления. Поддержание теплового комфорта осуществляется за счет ограничения результирующей температуры помещения [7] T_{su} в заданных пределах для рабочего и дежурного режимов.

Ниже приведены результаты моделирования управления тепловым режимом здания, полученные в результате решения данной задачи.

Моделирование проводилось для случая, при котором управление вентилятором воздушного отопления осуществляется релейно. Для моделирования использовалось программное обеспечение MatLab v8.0.0.783. В качестве модели реального объекта управления выступала математическая модель в дифференциальном виде, представленная в работе [8].

В таблице 1 приведены характеристики объекта управления.

Таблица 1

Характеристики объекта управления

№	Наименование	Значение	Ед. изм.	Примечание
1	Толщина слоя материала в конструкции стены (среднего слоя)	0,35	м	материал: бетонная плита
2	Толщина внутреннего слоя стены	0,010	м	цементная штукатурка
3	Толщина наружного слоя стены	0,010	м	цементная штукатурка
4	Площадь ограждающих поверхностей	120	м ²	
5	Объем помещения	300	м ³	
6	Постоянная времени радиатора отопления	0,85	ч	
7	Постоянная времени воздушного отопления	0,03	ч	
8	Тепловая мощность радиаторного отопления	4000	Вт	
9	Тепловая мощность воздушного отопления	4000	Вт	
10	Электрическая мощность вентилятора воздушного отопления	80	Вт	

Параметры алгоритма упреждающего управления:

- длительность шага $h = 1600$ секунд;
- горизонт прогнозирования $N = 3$.

Условия для моделирования:

- температура уличного воздуха изменяется по синусоидальному закону с амплитудой $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и периодом 24 часа;

- стоимость электрической энергии равна стоимости тепловой энергии на всем протяжении моделирования;
 - электрическая мощность вентилятора воздушного отопления 100 Вт.
 - рабочий режим длится в период с 8:00 до 19:30;
 - результирующую температуру T_{su} для рабочего режима примем равной $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, для дежурного режима $10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Результаты моделирования показаны на рис. 1, 2.

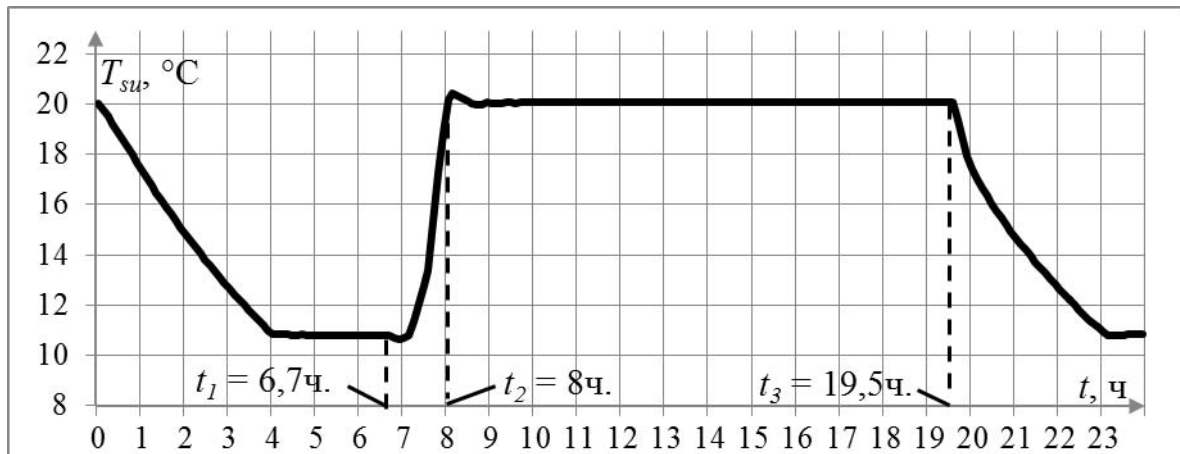


Рис. 1. Графики изменения температур при низкой стоимости электроэнергии

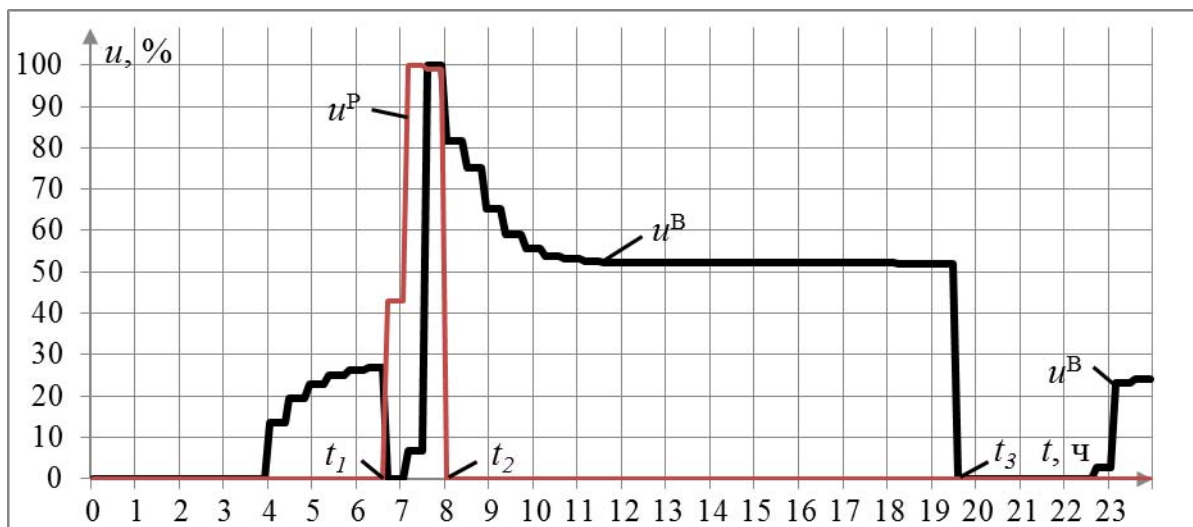


Рис. 2. Графики изменения управляющих воздействий при низкой стоимости электроэнергии

Из анализа полученных графиков можно отметить, что для поддержания результирующей температуры T_{su} используется преимущественно воздушное отопление (u^B). Радиаторное отопление (u^P) используется только при переходе из дежурного режима в рабочий. Данную стратегию можно объяс-

нить низкими инфильтрационными тепловыми потерями и относительно малыми затратами на электроэнергию вентилятора воздушного отопления.

Для оценки влияния стоимости электроэнергии на стратегию управления проведем моделирование при следующих отличительных условиях:

– стоимость электрической энергии в 3 раза выше стоимости тепловой энергии в течение дневного тарифа на электрическую энергию и равна стоимости тепловой энергии во время действия ночного тарифа;

– время действия дневного тарифа на электрическую энергию совпадает со временем рабочего режима.

Результаты данного моделирования приведены на рис. 3, 4.

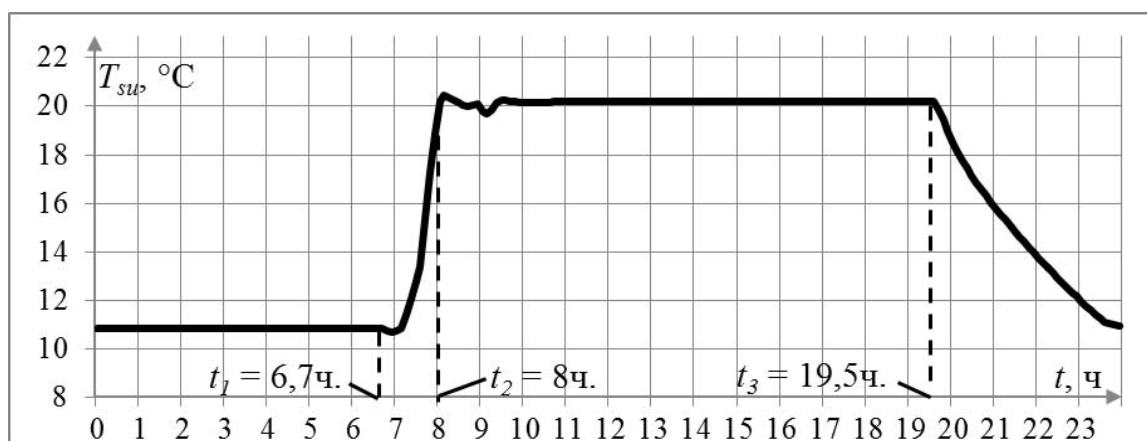


Рис. 3. Графики изменения температур при высокой стоимости электроэнергии в дневное время

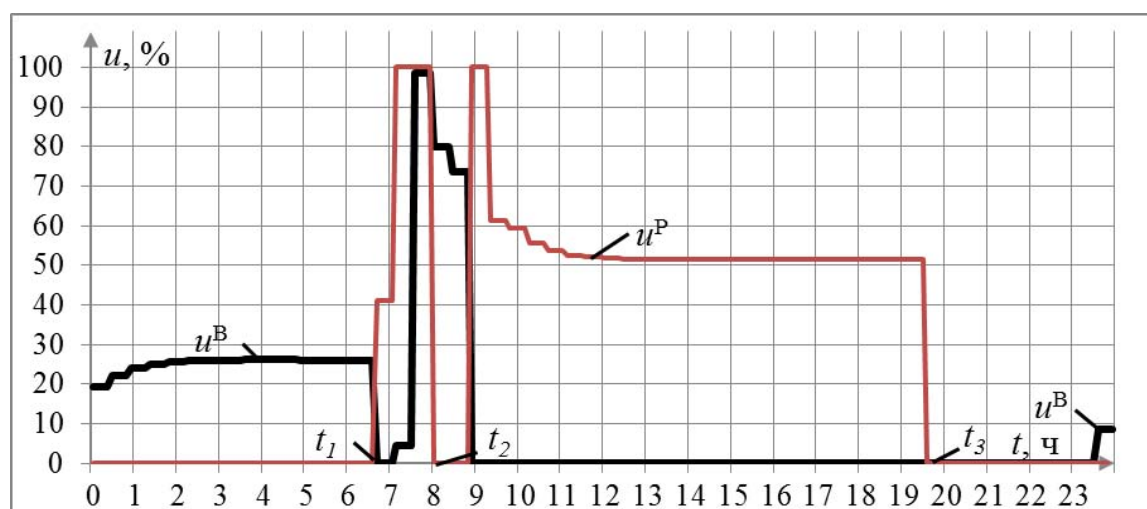


Рис. 4. Графики изменения управляющих воздействий при высокой стоимости электроэнергии в дневное время

Из полученных графиков видно, что стратегия управления в рабочем режиме изменилась и для поддержания результирующей температуры используется радиаторное отопление.

Выводы

Приведенный в данной статье анализ показал, что использование алгоритмов упреждающего управления для решения задач оптимального управления температурным режимом здания, при практической реализации, может быть более эффективным подходом по сравнению с классическими методами оптимизации.

Представленные результаты моделирования управления температурным режимом здания при комбинации воздушного и радиаторных приборов отопления в прерывистом режиме работы поддаются обоснованию, и подтверждают возможность практического применения алгоритмов упреждающего управления со скользящим горизонтом прогнозирования для систем комбинированного отопления зданий.

Библиографический список

1. Анисимова, Е.Ю. Оптимизация температурных режимов общественно-административных и производственных зданий: дис. ... канд. техн. наук / Е.Ю. Анисимова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 172 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 т. Т.5: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.
3. Отопление и вентиляция. Учебник для вузов. В 2-х ч. Ч. 1. Отопление / П.Н. Каменев и др. – М.: Стройздат, 1975. – 483 с.
4. Fuzzy Control of HVAC Systems Optimized by Genetic Algorithms / J. Benitez, J. Casillas, O. Cordon и др. // Applied Intelligence. – 2003. – № 18. – С. 155–177.
5. Панферов, В.И. Об оптимальном управлении отоплением зданий как процессом с распределенными параметрами / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2009. – Вып. 9. – № 3 (136). – С. 24–28.
6. Сканави, А.Н. Отопление: Учебник для вузов / А.Н. Сканави, Л.М. Махов. – М.: АСВ, 2008. – 576 с.
7. СНиП 23-01-99 Строительная климатология. – М.: Госстрой России, ГУ ЦПП, 2003.
8. Тверской, М.М. Постановка задачи оптимального управления тепловым режимом здания при комбинированной системе отопления / М.М. Тверской, Д.В. Румянцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 16. – № 23 (282). – С. 16–20.
9. 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.
10. Ding, B.C. Modern predictive control / B.C. Ding. – New York: CRC Press, 2010. – 266 с.

11. Megias D. Min–max constrained quasi-infinite horizon model predictive control using linear programming / D. Megias, J. Serrano, C. de Prada // *Journal of Process Control*. – 2002. – № 4. – С. 495–505.

12. Tatjewski, P. *Advanced control of industrial processes* / P. Tatjewski. – Warszawa: Springer-Verlag London Limited, 2007. – 348 с.

13. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control / F. Oldewurtel, A. Parisio, C. N. Jones etc. // *Energy and Buildings*. – 2011. – 13 p.

14. Valencia-Palomo, G. Efficient suboptimal parametric solutions to predictive control for PLC applications / G. Valencia-Palomo, J.A. Rossiter // *Control Engineering Practice*. – 2011. – № 7. – С. 732–743.