УДК 697.1

А. С. КУЦЕНКО, С. В. КОВАЛЕНКО, В. И. ТОВАЖНЯНСКИЙ

ОПТИМАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ

Проаналізовано різні підходи до математичного моделювання теплових процесів будівель, що опалюються. Запропоновано спрощені теплова, електрична та відповідна математична моделі, що дозволяють з достатнім для практики ступенем точності моделювати теплові процеси будівель. На підставі запропонованої математичної моделі обгрунтований закон управління тепловою потужністю, що дозволяє підтримувати постійну комфортну температуру внутрішнього повітря незалежно від зовнішніх погодних умов. Для реалізації запропонованого закону управління необхідна інформація про середні температури огорожі і внутрішнього наповнення будівлі формується динамічним спостерігачем стану. Наведено результати комп'ютерного моделювання, які підтверджують ефективність запропонованого алгоритму управління.
Ключові слова: тепловий стан, електрична модель, математична модель, закон управління тепловою потужністю, спостерігач стану.

Проанализированы различные подходы к математическому моделированию тепловых процессов отапливаемых зданий. Предложены упрощенные тепловая, электрическая и соответствующая математическая модели, позволяющие с достаточной для практики степенью точности моделировать тепловые процессы зданий. На основании предложенной математической модели обоснован закон управления тепловой мощностью, позволяющий поддерживать постоянную комфортную температуру внутреннего воздуха независимо от внешних погодных условий. Для реализации предложенного закона управления требуемая информация о средних температурах ограждения и внутреннего наполнения здания формируется динамическим наблюдателем состояния. Приведены результаты компьютерного моделирования, которые подтверждают эффективность предложенного алгоритма управления.
Ключевые слова: тепловое состояние, электрическая модель, математическая модель, закон управления тепловой мощностью, наблюдатель состояния.

Different approaches to mathematical modelling of the thermal processes of heated buildings were analysed. The simplified thermal, electric and corresponding mathematical models which allow modelling thermal processes of buildings with a sufficient degree of accuracy for practical use are offered. The offered mathematical model contains three criteria of similarity, which allows analysing and forecasting of the thermal processes of families of similar buildings in the relative dimensionless time. On the grounds of the offered mathematical model the control law of thermal capacity is substantiated, that allows maintaining a constant comfortable indoor air temperature regardless of external weather conditions. The initial information for the implementation of the offered control law is the temperatures of indoor and outdoor air. For implementation of the offered control law the required information about average temperatures of the enclosure and building internal filling is formed by dynamic observer of the state. The results of the computer modelling, which prove the efficiency of the offered control algorithm are given.
Keywords: thermal state, electric model, mathematical model, control law of thermal capacity, observer of the state.

Введение. При оценке эффективности процесса теплоснабжения используются два основных критерия – это качество теплоснабжения и энергоэффективность. Первый критерий характеризует стабильность поддержания заданной комфортной температуры внутри отапливаемых помещений. Второй – расход тепловой и других видов энергии на поддержание комфортной температуры. Эти критерии взаимосвязаны, поскольку неудовлетворительная стабилизация теплового состояния помещений здания, обусловленная неэффективной системой управления теплоснабжением, в условиях значительных изменений погодных условий приводит к необходимости «ручного» управления температурой внутреннего воздуха путем принудительной вентиляции или дотопа на основе использования дополнительных энергоресурсов. В обоих случаях имеют место необратимые энергетические потери, величина которых растет с ухудшением качества процесса стабилизации температурного режима здания [1].

Для эффективного управления тепловым состоянием отапливаемого здания необходимо иметь математическую модель тепловых процессов в основных элементах конструкции здания: внешнем ограждении, внутренних перегородках и полезном наполнении, отопительных приборах и т. д. Некоторые подходы к построению таких математических моделей изложены в работе [2]. Предлагаемые в [2] математические модели основаны на описании тепловых процессов дифференциальными уравнениями в частных производных. Несмотря на то, что такой подход позволяет сформировать математические модели максимально адекватные реальным тепловым процессам, их применение для решения задач синтеза систем управления теплоснабжением крайне затруднительно, поскольку методы современной теории управления в основном ориентированы на управление процессами в системах с сосредоточенными параметрами. В ряде работ [3–5] предлагается переход к конечномерному аналогу распределенного теплового процесса. В [3] показано, что даже одномерное представление динамических свойств ограждения здания позволяет с достаточной для практики степенью точности моделировать тепловые процессы в отапливаемых помещениях.

Целью настоящей работы является синтез оптимального закона управления тепловой мощностью отапливаемого здания по критерию минимума отклонения температуры воздуха от ее комфортного значения на основе упрощенных математических моделей тепловых процессов зданий.

Тепловая и электрическая модели. Рассматривается упрощенная тепловая модель отапливаемого помещения, структура которой приведена на рис. 1

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

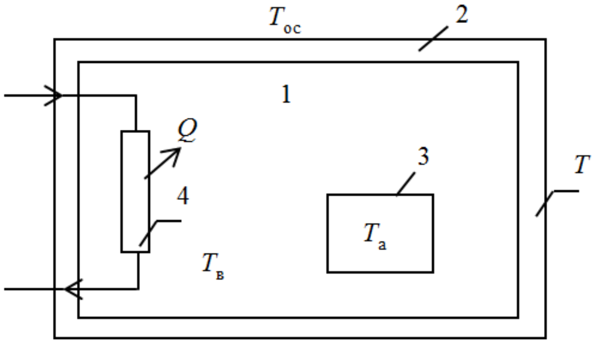

Рис. 1 – Тепловая модель процесса теплоснабжения. 1 – внутренний воздух, 2 – внешнее ограждение, 3 – внутреннее наполнение, 4 – источник теплоты (отопительный прибор)

Все элементы тепловой модели предполагаются однородными по теплофизическим параметрам и по термодинамическому состоянию.

На рис. 1 $T_{\text{в}}$, T, $T_{\text{а}}$, $T_{\text{ос}}$ – температуры внутреннего воздуха, внешнего ограждения, внутреннего наполнения и окружающей среды соответственно, Q – тепловой поток отопительного прибора.

Предложенная на рис. 1 тепловая модель, несмотря на ее простоту (она не учитывает различий в теплофизических характеристиках отдельных фрагментов внешнего ограждения и внутреннего наполнения, а также распределенности температурных полей), тем не менее, отражает суть взаимодействия ее основных элементов между собой и окружающей средой.

Предложенной тепловой модели поставим в соответствие ее электрическую аналогию (рис. 2)

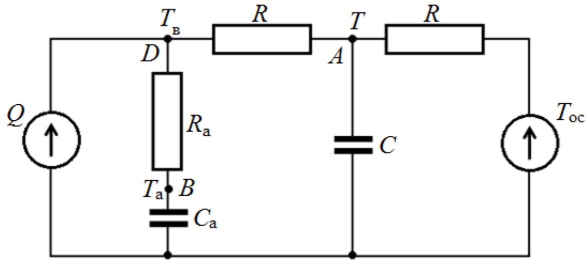

Рис. 2 – Электрический аналог упрощенной тепловой модели

На рис. 2 $2R$ и $R_{\text{а}}$ – тепловые сопротивления внешнего ограждения и внутренних аккумуляторов; C, $C_{\text{а}}$, $C_{\text{в}}$ – теплоемкости ограждения, внутренних аккумуляторов и внутреннего воздуха.

Математическая модель. Применяя 1-й закон Кирхгофа к узлам A, B и D, получим следующую систему дифференциальных уравнений

$$C\frac{dT}{dt}=\frac{T_{\text{в}}-T}{R}-\frac{T-T_{\text{ос}}}{R},$$
$$C_{\text{а}}\frac{dT_{\text{а}}}{dt}=\frac{T_{\text{в}}-T_{\text{а}}}{R_{\text{а}}}, \tag{1}$$
$$C_{\text{в}}\frac{dT_{\text{в}}}{dt}=Q-\frac{T_{\text{в}}-T}{R}-\frac{T_{\text{в}}-T_{\text{а}}}{R_{\text{а}}}.$$

После ряда преобразований, с учетом квазистатичности процесса изменения $T_{в}$, получим следующую упрощенную математическую модель теплового процесса здания

$$\tau\frac{dT}{dt}=T_{\text{в}}-2T+T_{\text{ос}},$$
$$\tau_{\text{а}}\frac{dT_{\text{а}}}{dt}=T_{\text{в}}-T_{\text{а}}, \tag{2}$$
$$T_{\text{в}}=\frac{1}{1+\rho}\left(q+T+\rho T_{\text{а}}\right).$$

где $\tau=RC$, $\tau_{\text{а}}=R_{\text{а}}C_{\text{а}}$ – постоянные времени процессов во внешнем ограждении и внутреннем наполнении здания, $\rho=R/R_{\text{а}}$, $q=QR$ – температурный эквивалент подводимой тепловой мощности.

Для окончательного формирования математической модели в виде системы дифференциальных уравнений в форме Коши подставим алгебраическое выражение для $T_{в}$ из (2) в первое и второе уравнения системы (2). В результате получим:

$$\frac{dT}{d\psi}=-(1+2\rho)T+\rho T_{\text{а}}+(1+\rho)T_{\text{ос}}+q,$$
$$\frac{dT_{\text{а}}}{d\psi}=\xi T-\xi T_{\text{а}}+\xi q, \tag{3}$$
$$T_{\text{в}}=\frac{1}{1+\rho}\left(q+T+\rho T_{\text{а}}\right),$$

где $\xi=\tau/\tau_{\text{а}}$ – отношение постоянных времени, $\psi=\dfrac{t}{\tau(1+\rho)}$ – безразмерное время.

Полученная математическая модель линейна и стационарна. Она состоит из двух уравнений состояния относительно переменных T и $T_{\text{а}}$, а также уравнения выхода для $T_{\text{в}}$. Система (3) зависит от управляющего воздействия q, которое входит в уравнение выхода, и от возмущающего воздействия $T_{\text{ос}}(t)$.

Существенным является то, что (3) содержит всего два безразмерных параметра подобия ξ, ρ, описывающих взаимоотношения конструктивных параметров здания, а ее решение рассматривается в безразмерном относительном времени ϑ.

В векторно-матричной форме система (3) запишется как

$$\begin{pmatrix}\dot T\\ \dot T_{\text{а}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-(1+2\rho) & \rho\\ \xi & -\xi\end{pmatrix}\begin{pmatrix}T\\ T_{\text{а}}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}1\\ \xi\end{pmatrix}q+\begin{pmatrix}(1+\rho)\\ 0\end{pmatrix}T_{\text{ос}},$$
$$T_{\text{в}}=\frac{1}{1+\rho}\begin{pmatrix}1 & \rho\end{pmatrix}\begin{pmatrix}T\\ T_{\text{а}}\end{pmatrix}+\frac{1}{1+\rho}q. \tag{4}$$

Для оценки собственных чисел отапливаемого помещения составим характеристическое уравнение системы (4)

$$\begin{vmatrix} -(1+2\rho)-\lambda & \rho \\ \xi & -\xi-\lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Раскрывая определитель, получим

$$(\xi+\lambda)(1+2\rho+\lambda)-\xi\rho=0$$

или окончательно

$$\lambda^2+\lambda(1+2\rho+\xi)+(1+\rho)\xi=0. \qquad (5)$$

Нетрудно убедиться, что корни уравнения (5) вещественны и отрицательны. Действительно, решение (4) имеет вид

$$\lambda=-\frac{1+2\rho+\xi}{2}\pm\sqrt{\frac{(1+2\rho+\xi)^2}{4}-(1+\rho)\xi}.$$

Для слагаемых подкоренного выражения имеет место следующее неравенство

$$\frac{(1+2\rho+\xi)^2}{4}>(1+\rho)\xi. \qquad (6)$$

Для доказательства (6) выполним элементарные алгебраические действия

$$1+4\rho^2+\xi^2+4\rho+2\xi+4\rho\xi>4\xi+4\rho\xi. \qquad (7)$$

Из (7) следует

$$(1-\xi)^2+4\rho^2+4\rho>0. \qquad (8)$$

Поскольку все слагаемые в (8) положительные числа, то неравенство (6) доказано. Таким образом, корни характеристического уравнения (4) вещественны.

Отрицательность корней очевидна из структуры решения (5) и положительности чисел ρ и ξ.

Оптимальный закон управления. Из уравнения выхода системы (3) очевиден закон управления тепловой мощностью, обеспечивающий поддержание постоянной (комфортной) температуры помещения $T_в^*$

$$q=(1+\rho)T_в^*-T-\rho T_а. \qquad (9)$$

Как видно из (9), полученный закон управления основан на принципе обратной связи по вектору состояния $(T,T_а)$ и позволяет поддерживать температуру внутреннего воздуха на комфортной отметке $T_в=T_в^*$.

Для исследования процессов изменения параметров теплового процесса при законе управления (9) подставим (9) в (3). В результате получим:

$$\frac{dT}{d\vartheta}=-2T+T_в^*+T_{ос},$$
$$\frac{dT_а}{d\vartheta}=\xi\left(T_в^*-T_а\right), \qquad (10)$$

где $\vartheta=t/\tau$ – безразмерное время.

Из (10) следует, что исходная система уравнений распалась на два независимых дифференциальных уравнения. Уравнение для $T_а$ описывает экспоненциально сходящийся процесс $T_а(t)\underset{t\to\infty}{\to}T_в^*$ с постоянной экспоненты $-\xi$. Таким образом, в установившемся режиме закон управления (9) примет вид

$$q=T_в^*-T. \qquad (11)$$

Рассмотрим первое из уравнений системы (10). Его решение содержит 2 составляющие: переходную $T_1(\vartheta)$, обусловленную начальным значением $T(0)$, и вынужденную $T_2(\vartheta)$, обусловленную $T_в^*$ и $T_{ос}(\vartheta)$. Составляющая $T_1(\vartheta)$, как известно, является решением однородного уравнения

$$\frac{dT_1}{d\vartheta}=-2T_1,$$

решение которого имеет вид

$$T_1(\vartheta)=Ce^{-2\vartheta}.$$

Эта составляющая на достаточно длительном временном интервале стремиться к нулю. Т.е. при рассмотрении длительных временных интервалов, соответствующих отопительному сезону, этой составляющей можно пренебречь. Для оценки вынужденной составляющей $T_2(\vartheta)$ будем предполагать, что $T_{ос}(\vartheta)$ меняется по гармоническому закону

$$T_{ос}(\vartheta)=\Delta T\sin\omega\vartheta+\bar{T}_{ос}, \qquad (12)$$

где ΔT – амплитуда, ω – круговая частота, $\bar{T}_{ос}$ – среднее значение температурных колебаний.

Следует отметить, что круговая частота колебаний ω зависит от соотношения между реальным временем t и безразмерным ϑ, т.е. определяется динамическими характеристиками здания:

$$\omega=2\pi\cdot l,$$

где l – количество суток в интервале соответствующем постоянной времени τ внешнего ограждения.

Как известно из теории линейных дифференциальных уравнений вынужденная составляющая решения при гармоническом воздействии (12) имеет вид

$$T_2(\vartheta)=A\sin\omega\vartheta+B\cos\omega\vartheta+D, \qquad (13)$$

ISSN 2079-0023 (print)
ISSN 2410-2857 (online)

где A, B и D постоянные, которые находятся в результате подстановки (12) и (13) в (10) и приравнивания коэффициентов при $\sin\omega\vartheta$ и $\cos\omega\vartheta$, а также постоянных слагаемых в правой и левой частях полученного выражения. В результате вынужденная составляющая $T_2(\vartheta)$ примет вид

$$T_2(\vartheta)=\frac{T_в^*+\bar{T}_{ос}}{2}+\frac{2\Delta T}{\omega^2+4}\sin\omega\vartheta-\frac{\Delta T\omega}{\omega^2+4}\cos\omega\vartheta\,. \quad (14)$$

Полученный результат (14) можно преобразовать к виду

$$T_2(\vartheta)=\frac{\Delta T}{\sqrt{\omega^2+4}}\sin(\omega\vartheta-\phi)+\frac{T_в^*+\bar{T}_{ос}}{2}\,, \quad (15)$$

где $\phi=\mathrm{arctg}\dfrac{\omega}{2}$ – отставание $T(\vartheta)$ по фазе от $\bar{T}_{ос}(\vartheta)$.

Изменение тепловой мощности в соответствии с (15) и (11) запишется как

$$q(\vartheta)=\frac{T_в^*-\bar{T}_{ос}}{2}-\frac{\Delta T}{\sqrt{\omega^2+4}}\sin(\omega\vartheta-\phi)\,. \quad (16)$$

Из (16) следует, что колебания подводимой тепловой мощности относительно ее среднего значения при оптимальной стабилизации температуры воздуха в помещении отстают по фазе на угол ϕ от колебаний температуры окружающей среды и противоположны по знаку.

Реализация закона управления в форме (9) требует знания текущих значений переменных состояния T и $T_а$. В то же время фактически измеряемыми являются температуры внутреннего воздуха и окружающей среды. Для нахождения температур T и $T_а$ можно воспользоваться наблюдателем вектора состояния Люенбергера [6].

Для системы (4), имеющей структуру

$$\dot{x}=Ax+Bu+Dv,\qquad y=Cx+Fu, \quad (17)$$

где x, u, v, y – векторы состояния, управления, возмущения и выхода соответственно, а A, B, C, D, E – матрицы соответствующих размерностей, система дифференциальных уравнений для оценки $\hat{x}$ вектора состояния запишется как

$$\dot{\hat{x}}=A\hat{x}+Bu+Dv+L(y-C\hat{x}-Fu)\,, \quad (18)$$

где L – матрица, формирующая динамические характеристики наблюдателя. Ее выбор позволяет обеспечить требуемую степень достоверности оценки вектора состояния $\hat{x}$. Структурная схема системы управления с наблюдателем состояния приведена на рис. 3.

Альтернативный подход к нахождению оценки вектора состояния $\hat{T}$ и $\hat{T}_а$ основан на решении системы (2) в предположении известных величин $T_в$ и $T_{ос}$ на входе (2).

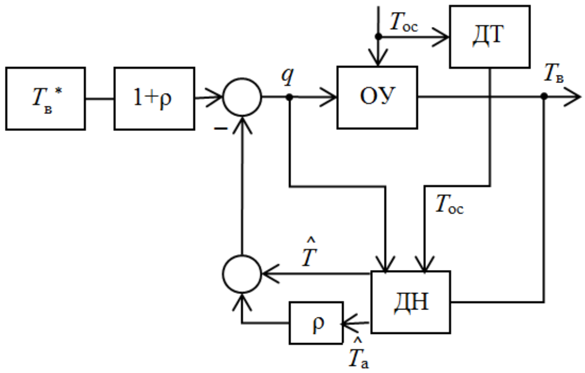

Рис. 3 – Структурная схема регулятора температуры с наблюдателем вектора состояния. ОУ – объект управления, ДН – динамический наблюдатель, ДТ – датчик температуры окружающей среды.

С учетом введенных обозначений такая система примет вид

$$\frac{d\hat{T}}{d\vartheta}=-2\hat{T}+T_{ос}+T_в,\qquad \frac{d\hat{T}_а}{d\vartheta}=-\xi\hat{T}_а+\xi T_в, \quad (19)$$

а соответствующий (9) закон управления запишется как

$$q=(1+\rho)T_в^*-\hat{T}-\rho\hat{T}_а\,. \quad (20)$$

Нетрудно показать, что замкнутая система «объект–наблюдатель–регулятор» (3), (18), (19) асимптотически устойчива, а ее положение равновесия соответствует комфортной температуре $T_в=T_в^*$. Структурная схема предлагаемой системы стабилизации температуры помещения имеет тот же вид, что и система на рис. 3. Существенное различие состоит в том, что для реализации наблюдателя (18) не требуется дополнительной информации о текущем расходе тепловой мощности q, что упрощает структуру системы управления. Кроме того, в отличие от наблюдателя Люенбергера, такой наблюдатель не содержит неопределенных коэффициентов усиления, выбор которых достаточно произволен и неформализован.

На рис. 4 приведены графики изменения теплового потока отопительного прибора в температурном эквиваленте и температуры внутреннего воздуха при гармоническом изменении температуры окружающей среды. Как видно из рис. 4 после завершения переходного процесса температура помещения поддерживается в соответствии с $T_в^*=20\ ^\circ\mathrm{C}$. Также на рисунке виден фазовый сдвиг между экстремумами суточной температуры окружающей среды и экстремумами графика изменения мощности отопительного прибора.

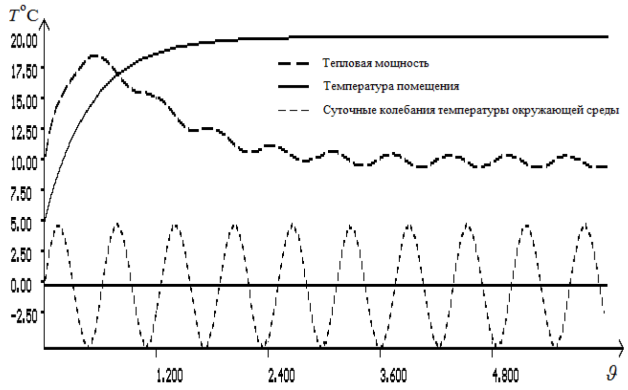

Рис. 4 – Графики изменения тепловой мощности, температуры окружающей среды и температуры помещения

Учитывая тот факт, что в установившемся режиме $T_а = T_в^*$, то закон управления тепловой мощностью можно упростить:

$$q = T_в^* - \hat{T} ,$$

где оценка $\hat{T}$ определяется путем интегрирования первого уравнения системы (19). Соответствующие графики изменения тепловой мощности и температуры внутреннего воздуха приведены на рис. 5.

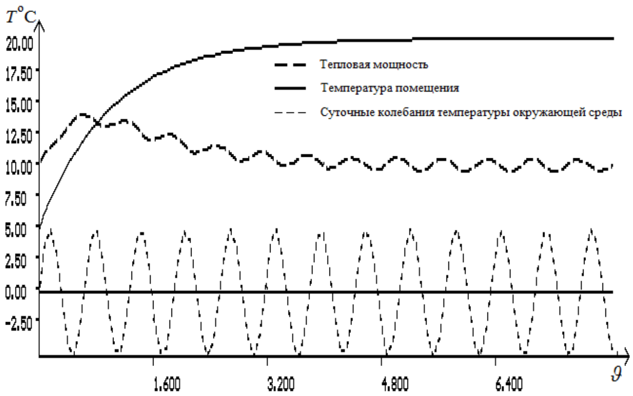

Рис. 5 – Графики изменения тепловой мощности, температуры окружающей среды и температуры помещения при упрощенном алгоритме управления

Как видно из рис. 4 и 5 упрощение алгоритма управления тепловой мощностью сказывается только на длительности переходного процесса при запуске системы. В установившемся режиме оба алгоритма управления дают одинаковые результаты.

Переходные процессы установления комфортной температуры в помещении при различных способах управления тепловой мощностью приведены на рис. 6 и рис. 7. Графики рис. 6 соответствуют традиционному «погодному» регулятору тепловой мощности, реализующему постоянный уровень теплового потока, определяемого статическими характеристиками здания, а также значениями внешней и комфортной температур.

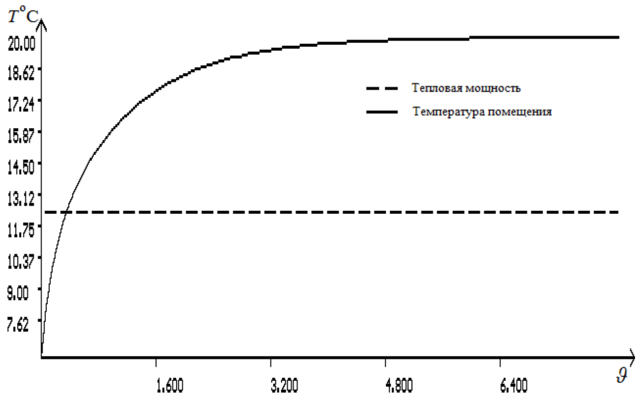

Рис. 6 – Переходной процесс при «погодном» регулировании тепловой мощности

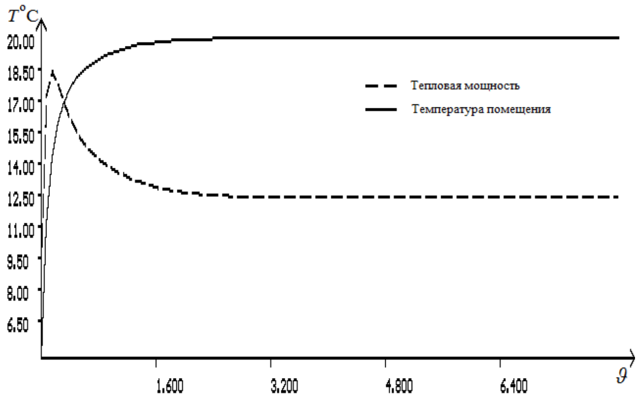

Рис. 7 – Переходной процесс при оптимальном законе регулирования тепловой мощности

Графики рис. 7 построены для предлагаемого закона регулирования (20). Нетрудно увидеть существенное сокращение длительности переходного процесса во втором случае. Платой за это является дополнительный расход теплоты в самом начале переходного процесса.

Выводы. Предложенный закон управления тепловой мощностью, основанный на измерениях температуры внутреннего и внешнего воздуха позволяет получить эффективное решение задачи стабилизации комфортной температуры отапливаемого помещения. Для практической реализации предложенного закона необходимой информацией является величина постоянной времени здания, которая может быть вычислена на основании данных о его геометрии и конструкционных материалах, а также на основании экспериментальных данных по кривым разогрева (охлаждения) внутреннего воздуха.

Список литературы

1. *Вороновский Г. К.* Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях / *Г. К. Вороновский*. – Х. : Харьков, 2002. – 240 с.
2. *Табунщиков А. Ю.* Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / *Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач*. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
3. *Куценко А. С.* Системный подход к математическому моделированию тепловых процессов зданий / *А. С. Куценко, С. В. Коваленко, В. И. Товажнянский* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №4/4 (70) – С. 9–12.

4. *Atam E.* Control-Oriented Thermal Modeling of Multizone Buildings: Methods and Issues / *Ercan Atam, Lieve Helsen* // IEEE Control Systems, Volume 36, 2016. – P. 86–111.
5. *Lin Y.* Issues in identification of control-oriented thermal models of zones in multi-zone buildings / *Y. Lin, T. Middelkoop, P. Barooah* // in Proc. IEEE Conf. Decision and Control, Hawai, Dec. 10–13, 2002. – P. 6932–6937.
6. *Кузовков Н. Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства / *Н. Т. Кузовков*. – М. : «Машиностроение», 1976. – 184 с.

References (transliterated)

1. Voronovskiy G. K. *Usovershenstvovanie praktiki operativnogo upravleniya krupnymi teplofikatsionnymi sistemami v novykh ekonomicheskikh usloviyakh* [Improvement of the operational management practices of the large district heating systems in the new economic conditions]. Kharkov, Kharkov Publ., 2002. 240 p.
2. Tabunshchikov A. Yu. Brodach M. M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoy effektivnosti zdaniy* [Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2002. 194 p.
3. Kutsenko A. S., Kovalenko S. V., Tovazhnyanskiy V. I. Sistemnyy podkhod k matematicheskomu modelirovaniyu teplovykh protsessov zdaniy [Systematic approach to the mathematical modeling of the thermal processes of buildings] *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. 2014, no 4/4 (70), pp. 9–12.
4. Atam E., Helsen L. Control-Oriented Thermal Modeling of Multizone Buildings: Methods and Issues. *IEEE Control Systems*, 2016, vol. 36, pp. 86–111.
5. Lin Y., Middelkoop T., Barooah P. Issues in identification of control-oriented thermal models of zones in multi-zone buildings, *IEEE Conf. Decision and Control* (10–13 Dec., 2002, Hawai). Hawai, 2002, pp. 6932–6937.
6. Kuzovkov N. T. *Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva* [Modal control and watching devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 184 p.

Поступила (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимальна стабілізація теплового стану будівлі / О. С. Куценко, С. В. Коваленко, В. І. Товажнянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 37 (1209). – С. 3–8. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

Оптимальная стабилизация теплового состояния здания / А. С. Куценко, С. В. Коваленко, В. И. Товажнянский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 37 (1209). – С. 3–8. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.

Optimal stabilization of the thermal state of the building / A. S. Kutsenko, S. V. Kovalenko, V. I. Tovagnyansky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No 37 (1209). – P. 3–8. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Куценко Олександр Сергійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системного аналізу і управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м Харків; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Куценко Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Kutsenko Alexander Serhiyovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Systems Analysis and Control National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) 707-61-03; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Коваленко Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри системного аналізу і управління; тел.: (057) 707-66-54; e-mail: kovalsvt@rambler.ru.

Коваленко Сергей Владимирович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры системного анализа и управления; тел.: (057) 707-66-54; e-mail: kovalsvt@rambler.ru.

Kovalenko Sergey Vladimirovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Systems Analysis and Control; tel.: (057) 707-66-54; e-mail: kovalsvt@rambler.ru.

Товажнянський Володимир Ігоревич – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: vtovazhnianskyi@mail.ru.

Товажнянский Владимир Игоревич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант; тел.: (057) 707-61-03; e-mail: vtovazhnianskyi@mail.ru.

Tovagnyansky Vladimir Igorevych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student; tel.: (057) 707-61-03; e-mail: vtovazhnianskyi@mail.ru.