

**С. В. КОВАЛЕНКО**, старший преподаватель НТУ «ХПИ»;  
**В. И. ТОВАЖНЯНСКИЙ**, аспирант НТУ «ХПИ»

## ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА

Целью настоящей статьи является сравнительный анализ различных по структуре САУ теплоснабжением. В статье предлагается простейшая тепловая, электрическая и математическая модели теплоснабжения, а также структурная схема комбинированной САУ, позволяющие путем соответствующего изменения некоторых параметров модели, анализировать широкую гамму регуляторов и провести их сравнение между собой. Сравнительный анализ различных вариантов структур регуляторов подтвердил существенное уменьшение времени переходных процессов при использовании комбинированного принципа управления теплоснабжением.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, автоматическое управление, индивидуальный тепловой пункт, электрическая и математическая модели, переходные процессы.

**Введение.** Теплоснабжение зданий является одним из основных процессов в жилищно-коммунальной сфере. В подавляющем большинстве случаев этот процесс на абонентском конце неуправляем. Управление отпуском тепла осуществляется качественным регулированием температуры теплоносителя теплогенерирующим предприятием по погодному графику. Особенностью этого процесса является наличие двух взаимосвязанных критериев характеризующих качество теплоснабжения. Первый критерий – это обеспечение требуемой комфортности т.е. поддержание стабильной комфортной температуры внутреннего воздуха. Второй критерий – тепловая экономичность. Так [1], снижение температуры помещения вследствие погодных или каких-либо технических возмущений приводит к необходимости повышать тепловую мощность за счет подключения дополнительных источников тепла, а повышение температуры компенсируется принудительной вентиляцией помещений. Кроме того качественное регулирование отпуска теплоты никак не учитывает статических и тем более динамических характеристик отдельных зданий, входящих в отопительный район, что приводит к существенному разбросу температур и расходов теплоты различными зданиями. Выходом из этой ситуации является широкое внедрение автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов (ИТП). Основной целью ИТП является автоматическое поддержание комфортной температуры внутреннего воздуха здания в не зависимости от возмущений погодных условий, а также возмущений параметров теплоносителя.

**Обзор литературы.** Проблема автоматического управления теплоснабжением с одной стороны имеет многолетнюю историю и ее основные положения изложены в [2, 3]. Несмотря на глубокий и всесторонний анализ ос-

новных задач, составляющих проблему автоматизации теплоснабжения, в этих работах рассматривается в основном квазистатическая модель тепловых процессов здания. Динамические характеристики здания появляются в работах [4, 5]. В работе [6] внешнее ограждение рассматривается как система, состоящая из слоев с сосредоточенными параметрами. Это позволяет описывать тепловой процесс в здании в виде системы обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, что значительно упрощает процедуру синтеза параметров системы автоматического управления (САУ) теплоснабжением. В работе [7] отмечается, что наиболее перспективным принципом управления температурой внутреннего воздуха является комбинированный, когда в структуру САУ вводится канал компенсации основного возмущения температуры наружного воздуха, а сигнал управления по отклонению температуры помещения от ее комфортного значения используется в качестве стабилизирующего управления, поддерживающего требуемую температуру внутреннего воздуха.

**Постановка задачи исследования.** Как было отмечено выше, комбинированная САУ теплоснабжением предположительно должна обеспечить наилучшее качество процесса стабилизации температуры внутреннего воздуха. В то же время, какие-либо конкретные сравнительные характеристики качества процесса регулирования температуры внутреннего воздуха для различных структур САУ теплоснабжения отсутствуют. Ниже будет проведено упрощенное сравнительное исследование переходных процессов в САУ температурой внутреннего воздуха при различных структурных схемах системы управления.

**Математическая модель теплового процесса здания.** Воспользуемся подходом, изложенным в [6]. Этот подход предполагает конечномерную аппроксимацию распределенного процесса распространения тепла через внешнее ограждение. Там же показано, что с достаточной степенью точности можно ограничиться одномерной аппроксимацией. Предполагая, что помещение имеет форму параллелепипеда с одинаковыми по толщине гранями, упрощенную электрическую аналогию можно представить в виде, изображенном на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

$R$  – тепловое сопротивление половины толщины стены;

$C$  – тепловая емкость стены здания; (величины  $R$  и  $C$  отнесены к единице площади поверхности);

$C_g$  – теплоемкость внутреннего воздуха, которой в дальнейшем будем пренебрегать в связи с большим различием плотностей воздуха и материала ограждения;

$T, T_g, T_{oc}$  – температуры стены, внутреннего и внешнего воздуха, соответственно, выраженные в  $^{\circ}\text{C}$ ;

$Q$  – регулируемая мощность источника тепла.

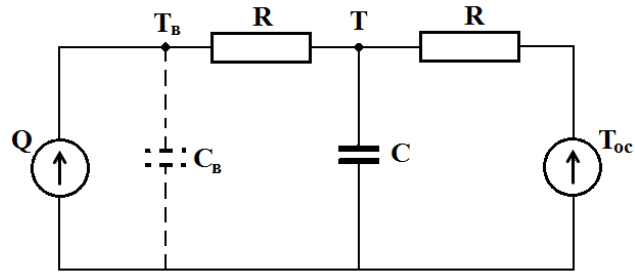


Рис. 1 – Электрическая аналогия теплового процесса здания

Запишем уравнение 1-го закона Кирхгофа для узлов  $T$  и  $T_г$ :

$$C \frac{dT}{dt} = \frac{T_г - T}{R} - \frac{T - T_{oc}}{R}, \quad (1)$$

$$Q = \frac{T_г - T}{R}.$$

После ряда преобразований система (1) примет следующий вид

$$\tau \frac{dT}{dt} = -T + RQ + T_{oc}, \quad (2)$$

$$T_г = RQ + T,$$

где  $\tau = RC$  – постоянная времени здания.

Если теперь ввести безразмерное время  $\vartheta$  в соответствии с соотношением  $t = \tau\vartheta$ , а в качестве управляющей переменной  $q$  рассматривать величину  $RQ = q$ , то окончательно, упрощенная математическая модель теплового процесса отапливаемого здания примет вид

$$\dot{T} = -T + q + T_{oc}, \quad (3)$$

$$T_г = T + q.$$

Согласно терминологии, принятой в теории управления, первое из уравнений (3) представляет собой уравнение состояния, а второе – уравнение выхода;  $T$  – переменная состояния,  $T_г$  – выходная переменная,  $q$  – управления,  $T_{oc}$  – измеряемое возмущение.

**Структурная схема комбинированной САУ теплоснабжением.** Общий вид структурной схемы комбинированной САУ изображен на рис. 2.

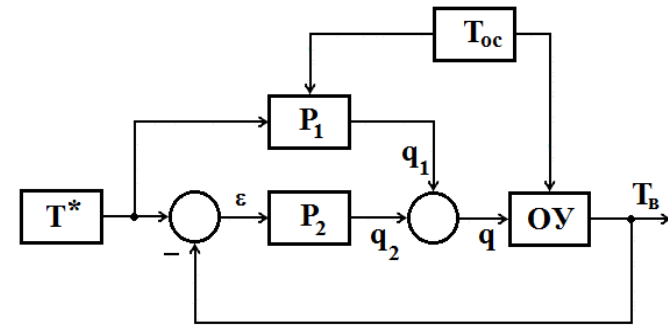


Рис. 2 – Структурная схема комбинированной САУ

На рис. 2 приняты такие обозначения:

$P_1$  – регулятор-компенсатор прямого действия,

$P_2$  – регулятор замкнутого контура управления по отклонению температуры внутреннего воздуха от комфортного значения  $T^*$ ;

$q_1$  и  $q_2$  – тепловые потоки, вырабатываемые регуляторами  $P_1$  и  $P_2$  соответственно;

$OY$  – объект управления, описываемой математической моделью (3).

**Математическая модель комбинированной САУ.** В соответствии со структурной схемой рис. 2 и математической моделью объекта управления (3) выведем систему дифференциальных уравнений комбинированной САУ теплоснабжением, выбрав в качестве регулятора  $P_2$  ПИ-регулятор.

$$\dot{T} + T = (q_1 + q_2) + T_{oc},$$

$$T_г = T + (q_1 + q_2),$$

$$q_2 = K(T^* - T_г) + J \int_0^{\vartheta} (T^* - T_г) dt, \quad (4)$$

$$q_1 = K_{II}(T^* - T_{oc})$$

Последнее соотношение получено на основе первых двух уравнений системы (3) в предположении  $q_2 = 0$  и стационарности процесса ( $\dot{T} = 0$ ).

Полученное значение  $q_2$  при  $K_{II} = 0,5$  по сути является равновесным для системы (4) при использовании только управления по возмущающему воздействию.

Переходя к операторной форме записи, и исключая переменную  $T$ , трудно получить дифференциальное уравнение, связывающее  $T_g$  с величинами задания  $T^*$  и температуры окружающей среды  $T_{oc}$ :

$$\begin{aligned} & [(1+K)P^2 + (1+2K+J)P + 2J]T_g = \\ & = [(K+K_{II})P^2 + [2(K+K_{II})+J]P + 2J]T^* - [K_{II}P^2 - (1-2K_{II})P]T_{oc}. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученное дифференциальное уравнение в операторной форме (5), позволяет анализировать переходные процессы в САУ теплоснабжением как по задающему воздействию  $T^*$  так и по возмущающему –  $T_{oc}$ . Кроме того, выбирая коэффициенты  $K_{II}$ ,  $K$ ,  $J$  соответствующим образом, можно исследовать переходные процессы для различных типов регуляторов, включая регуляторы прямого действия, по отклонению, комбинированные, а также регуляторы  $P_2$ , функционирующие как П-, И- или ПИ-регуляторы.

Для вычисления тепловой мощности и расхода теплоты воспользуемся соотношениями (3). Из второго уравнения (3) следует

$$q = T_g - T, \quad (6)$$

а из первого, с учетом (6), следует

$$\dot{T} = -2T + T_g + T_{oc}. \quad (7)$$

Подставляя результат интегрирования уравнения (5), (7) и интегрируя (7), получим температуру ограждения  $T(t)$ , и далее из (6) величину тепловой мощности. Расход теплоты  $\bar{Q}$  находится по формуле

$$\bar{Q}(\vartheta) = \int_0^{\vartheta} q(s) ds. \quad (8)$$

**Результаты численного моделирования.** На рис. 3, а–г, и рис. 4, а–г, представлены результаты численного моделирования переходных процессов САУ теплоснабжением по задающему и возмущающему воздействиям для различных регуляторов.

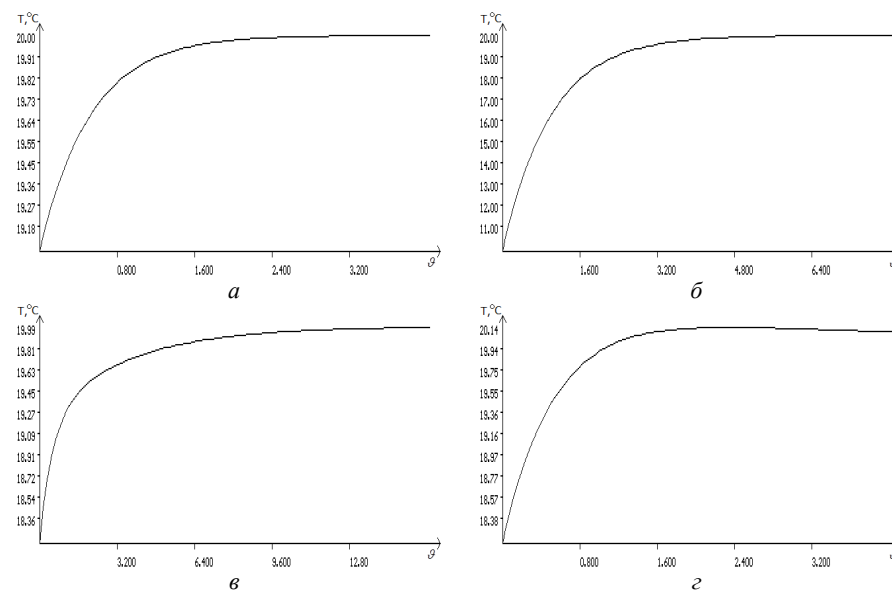


Рис. 3 – Переходные процессы по задающему воздействию для: а – П-регулятора и компенсатора; б – компенсатора; в – ПИ-регулятора; г – ПИ-регулятора и компенсатора

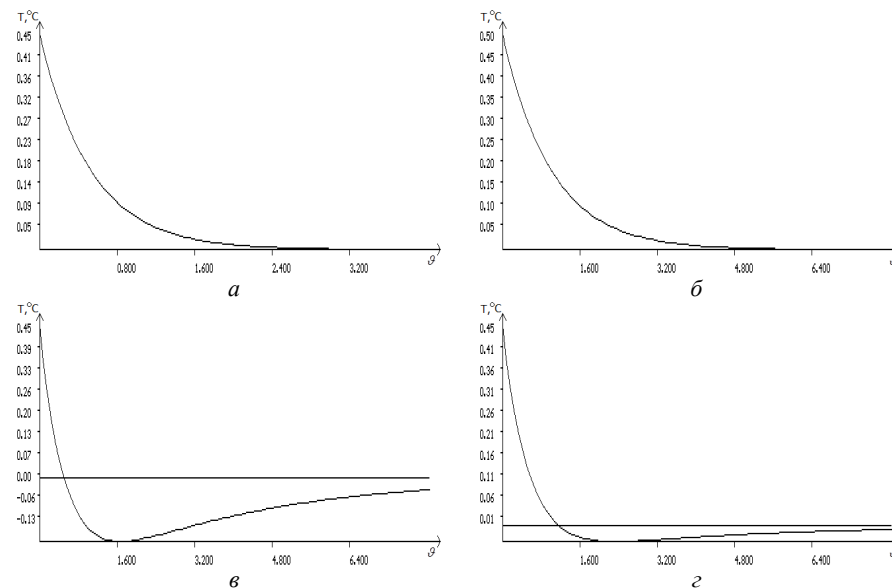


Рис. 4 – Переходные процессы по возмущающему воздействию для: а – П-регулятора и компенсатора; б – компенсатора; в – ПИ-регулятора; г – ПИ-регулятора и компенсатора

**Выводы.** Полученные численные результаты позволяют сделать заключение о существенном улучшении переходных процессов для комбинированных систем управления. Особенно следует выделить структуру САУ, состоящую из П-регулятора и компенсатора, позволяющую получить апериодические переходные процессы как по задающему, так и по возмущающему воздействиям.

**Список литературы:** 1. Вороновский Г. К. Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях / Г. К. Вороновский. – Х.: Изд-во «Харьков», 2002. – 240 с. 2. Чистович С. А. Автоматизация установок и систем теплоснабжения и отопления / С. А. Чистович - Л.: Стройиздат. – 1975. – 159 с. 3. Сафонов А. П. Автоматизация систем централизованного теплоснабжения / А. П. Сафонов – М.: Энергия. – 1974. – 273 с. 4. Табунщиков Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с. 5. Панферов В. И. К теории математического моделирования теплового режима зданий / В. И. Панферов, Е. Ю. Анисимова, А.Н. Нагорная // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2006. № 14, вып. 4. – С. 128–132. 6. 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. 7. Панферов В. И. Некоторые проблемы энергоснабжения и автоматизации в системах теплоснабжения зданий / С. В. Панферов, А. И. Теленик, В. И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. - № 22, вып. 12 – С. 79–86.

**Bibliography (transliterated):** 1. Voronovsky, G. K. *Usovershenstvovaniye praktiki operativnogo upravleniya krupnymi teplofikatsionnymi sistemami v novykh ekonomicheskikh usloviyakh*. Kharkov: Kharkov, 2002. Print. 2. Chistovich, S. A. *Avtomatizatsiya ustanovok i sistem teplosnabzheniya i otopleniya*. Leningrad: Stroyizdat, 1975. Print. 3. Safonov, A. P. *Avtomatizatsiya sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya*. Moskva: Energiya, 1974. Print. 4. Tabunshchikov, Yu. A., and M. M. Borodach. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya teplovoyy effektivnosti zdany*. Moskva: AVOK-PRESS, 2002. Print. 5. Panferov, V. I., and A. N. Anisimova. «K teorii matematicheskogo modelirovaniya teplovogo rezhima zdany.» *Vestnik YuUrGU* 4 (2006): 128–132. Print. 6. Kutsenko, A. S., S. V. Kovalenko, and V. I. Tovazhnyansky. «Sistemny podkhod k matematicheskomu modelirovaniyu teplovykh protsessov zdany.» *Vostochno-evropeysky zhurnal peredovykh tekhnology* 4/4(70) (2014): 9–12. Print. 7. Panferov, S. V., A. I. Telenik, and V. I. Panferov. «Nekotorye problemy energosnabzheniya i avtomatizatsii v sistemakh teplosnabzheniya zdany.» *Vestnik YuUrGU* 12 (2010): 79–86. Print.

*Поступила (received) 13.12.2014*