

УДК 681.51

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ*

И.А. Данилушкин, Д.М. Камилова

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Решается задача построения системы автоматического управления температурой воды, идущей к потребителю в закрытой зависимой системе теплоснабжения с насосным смешением. Предложена модель объекта управления, учитывающая пространственное распределение процесса теплоотдачи в виде замкнутой нелинейной динамической системы с переменным коэффициентом усиления в обратной связи. Коэффициент усиления в обратной связи выступает в качестве управляющего воздействия. По результатам активного эксперимента проведена идентификация модели. С помощью численного моделирования динамической системы проведены синтез и исследование системы автоматического управления. В статье приведены результаты идентификации объекта управления, исследован характер переходных процессов в системе автоматического управления по управлению и по возмущению.

Ключевые слова: система теплоснабжения, автоматическое управление, температура теплоносителя, объект с распределенными параметрами, процесс теплоотдачи, идентификация, насос смешения.

Типовая структура системы водяного теплоснабжения приведена на рис. 1. Система относится к классу закрытой зависимой системы теплоснабжения с насосным смешением [1]. Оборудование, обеспечивающее регулирование температуры теплоносителя, размещено в центральном тепловом пункте.

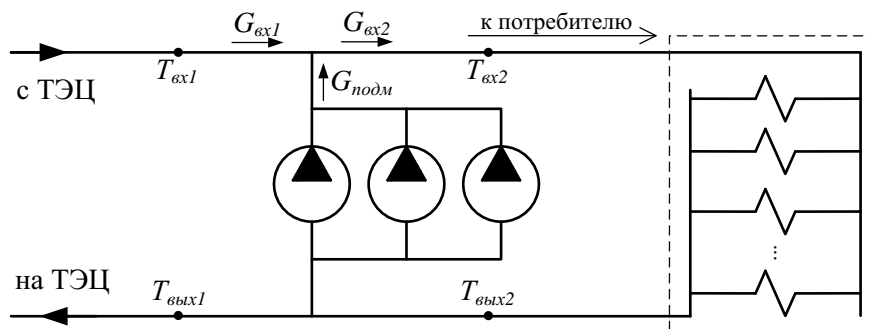


Рис. 1. Структурная схема системы водяного отопления

Горячая вода поступает от источника по прямому трубопроводу к потребителю. По обратному трубопроводу вода возвращается от потребителя к источнику.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-08-00446-а.

Иван Александрович Данилушкин (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Дилорам Мухиддиновна Камилова, магистрант.

ку. Температура воды, поступающей к потребителю, регулируется с помощью подмеса обратной воды. Регулирование расхода обратной воды на подмес осуществляется с помощью трех параллельно включенных центробежных насосов с асинхронным электроприводом. Производительность насосов выбрана исходя из следующих соображений: в номинальном режиме функционирования системы теплоснабжения должны работать два насоса, а один – находиться в резерве. Управление насосами осуществляется с помощью преобразователей частоты, обеспечивающих плавное регулирование скорости вращения электропривода и, как следствие, расхода обратной воды на подмес.

Рассматриваемая схема теплоснабжения (см. рис. 1) призвана в первую очередь ограничить максимальную температуру воды, поступающей к потребителю, поскольку экономически целесообразно поддерживать температуру воды в подающей линии 150 °С и более [1]. Однако в настоящее время поставщик энерго-ресурсов предъявляет жесткие требования к поддержанию температуры обратной воды, которая задается зависимостью от температуры наружного воздуха. В статье приведено решение задачи построения системы автоматического управления температурой обратной воды за счет управления электроприводами насосов подмеса.

Структура и параметры потребителей, подключенных к центральному тепловому пункту, неизвестны, но в целом можно считать, что к подающему трубопроводу равномерно подключены нагревательные приборы. Теплоотдача в такой системе может быть достаточно точно описана гиперболическим уравнением первого порядка, учитывающим движение теплоносителя и отдачу тепла пропорционально разности температур теплоносителя и окружающей среды в каждой точке x по всей длине движения [2, 3]:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} + v \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = \alpha(T_{cp}(t) - T(x,t)), \quad 0 \leq x \leq l, \quad t > 0 \quad (1)$$

с краевыми и начальными условиями

$$T(0,t) = T_{ex2}(t), \quad T(x,0) = T_0(x) \equiv 0, \quad (2)$$

где v – «скорость» потока; α – коэффициент теплообмена, учитывающий в данном случае параметры взаимодействия температуры теплоносителя и окружающей среды; $T_{cp}(t)$ – температура окружающей среды; l – длина трубы; $T_0(x)$ – начальное распределение температуры; $T_{ex2}(t)$ – функция изменения температуры теплоносителя на входе объекта управления.

Начальное распределение температуры для удобства принято равным нулю. Тогда для краевой задачи (1), (2) стандартизирующая и передаточная функция примут вид [3, 4]

$$w(x,p) = \alpha T_{cp}(p) + v\delta(x)T_{ex2}(p); \quad (3)$$

$$W(x,\xi,p) = 1(x-\xi) \cdot \frac{1}{v} \cdot e^{-\frac{p+\alpha}{v}(x-\xi)}. \quad (4)$$

Температура воды в точке l , $T(l,t)$ – это температура обратной воды $T_{облх2}(t)$ (см. рис. 1). Ее значение с помощью (3), (4) может быть найдено из выражения [3, 4]

$$T(l,p) = \int_0^l W(x,\xi,p)w(\xi,p)d\xi. \quad (5)$$

Вычисление интеграла (5) позволяет представить процесс теплоотдачи в ви-

де суммы двух передаточных функций (рис. 2) [5], где

$$W_{cp}(p) = \frac{\alpha}{p + \alpha} \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha \cdot l}{v}\right) \cdot \exp\left(-\frac{l}{v} p\right) \right); \quad (6)$$

$$W_{ex}(p) = \exp\left(-\frac{\alpha \cdot l}{v}\right) \cdot \exp\left(-\frac{l}{v} p\right). \quad (7)$$

В роли управляющего воздействия выступает температура теплоносителя $T_{ex2}(p)$ после подмеса на входе потребителя. Возмущающим воздействием является температура окружающей среды $T_{cp}(p)$.

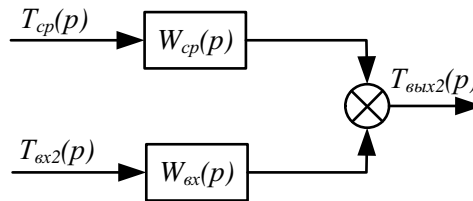


Рис. 2. Модель процесса теплоотдачи

Вследствие большой инерционности температуры окружающей среды и малого ее влияния на выходную величину объекта было принято решение исключить из рассмотрения передаточную функцию, описывающую влияние температуры окружающей среды на поведение объекта управления.

Температуру воды после подмеса T_{ex2} можно выразить через расход G_{ex1} и температуру T_{ex1} воды от источника, расход $G_{подм}$ и температуру $T_{вых2}$ обратной воды и суммарный расход G_{ex2} воды на потребителя. Согласно уравнению баланса

$$G_{ex2} \cdot T_{ex2} = G_{ex1} \cdot T_{ex1} + G_{подм} \cdot T_{вых2}. \quad (8)$$

Тогда с учетом того, что $G_{ex2} = G_{ex1} + G_{подм}$, получим

$$T_{ex2} = \frac{G_{ex1} \cdot T_{ex1} + G_{подм} \cdot T_{вых2}}{G_{ex2}} = \frac{G_{ex1} \cdot T_{ex1} + G_{подм} \cdot T_{вых2}}{G_{ex1} + G_{подм}} = \frac{T_{ex1} + G_{подм}/G_{ex1} \cdot T_{вых2}}{1 + G_{подм}/G_{ex1}}. \quad (9)$$

Расход воды на подмес $G_{подм}$, в свою очередь, определяется количеством работающих насосов. Таким образом, модель объекта управления включает в себя модель процесса теплоотдачи, охваченную обратной связью с нелинейным коэффициентом усиления, который определяется мощностью работающих насосов и влияет на соотношение расходов прямой и обратной воды, поступающей на вход объекта. Производительность насосов является управляющим воздействием, а температура теплоносителя в прямом контуре трубопровода – возмущающим воздействием. Структурная схема объекта управления представлена на рис. 3. Здесь N – суммарная мощность включенных насосов, K_1 , K_2 , T_1 , τ – параметры модели, подлежащие идентификации. K_1 определяет влияние мощности включенных насосов на соотношение расходов прямой воды от источника и воды на подмес, K_2 определяется коэффициентом теплообмена. Аперiodическое звено с постоянной времени T_1 введено в модель исходя из практических соображений о том, что параметры теплообмена имеют некоторую инерционность при отклике на изменение внешних условий, не учитываемых в постановке крае-

вой задачи (1), (2). Постоянная времени τ – транспортное запаздывание, определяемое временем прохождения потока воды по трубопроводной системе и нагревательным приборам потребителя.

Эксперимент, в ходе которого были получены данные для идентификации объекта управления, проводился в трех режимах. На первом этапе эксперимента объект был выведен в установившийся режим с двумя включенными насосами. На втором этапе были включены три насоса. На третьем этапе были отключены два насоса, один насос оставался в работе. Исходные данные для идентификации приведены на рис. 4. Переключения происходили на 377 и 4693 секундах эксперимента. Анализ графика $T_{ex2}(t)$ показал, что измерения параметра сильно зашумлены, предположительно из-за неудачно выбранного места установки датчика, поэтому измеренные значения параметра не использовались для идентификации. Расчет значений $T_{ex2}(t)$ производился по выражению (9), что и отображено в модели (см. рис. 3).

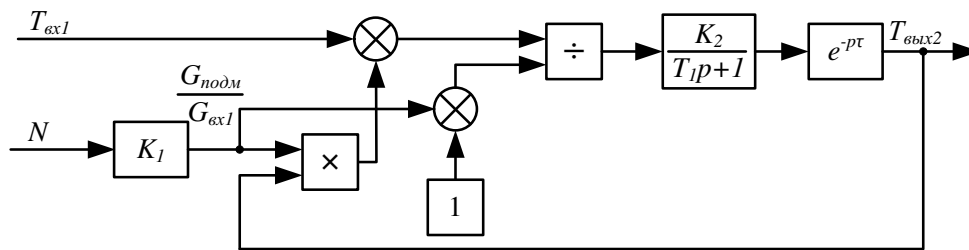


Рис. 3. Модель объекта управления

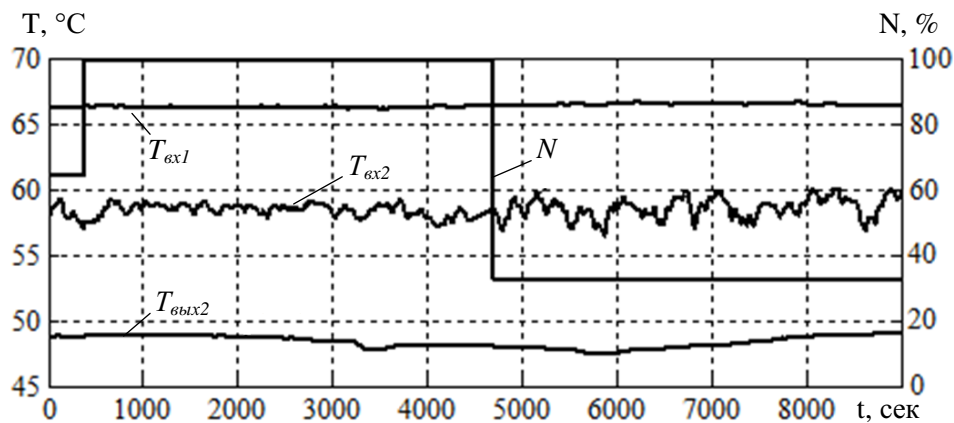


Рис. 4. Экспериментальные данные и моменты переключения режимов эксперимента

В качестве критерия параметрической идентификации был выбран квадратичный функционал качества, который представляет собой сумму квадратов отклонений значений y_M , полученных при моделировании, от экспериментальных значений y , полученных в те же моменты времени.

$$J(y, y_M, \beta) = \sum_{j=1}^N e^2(t_j) = \sum_{j=1}^N (y(t_j) - y_M(t_j, \beta))^2 \rightarrow \min_{\beta}, \quad (10)$$

где $\beta = [K_1 \ K_2 \ T_1 \ \tau]$ – вектор параметров модели.

На рис. 5 и 6 показаны графики поведения реального объекта управления, построенные на основе экспериментальных значений.

В результате идентификации получены следующие значения параметров: $K_1 = 0.4187$, $K_2 = 0.7768$, $T_1 = 2709$, $\tau = 1608$, график поведения модели объекта управления представлен на рис. 6.

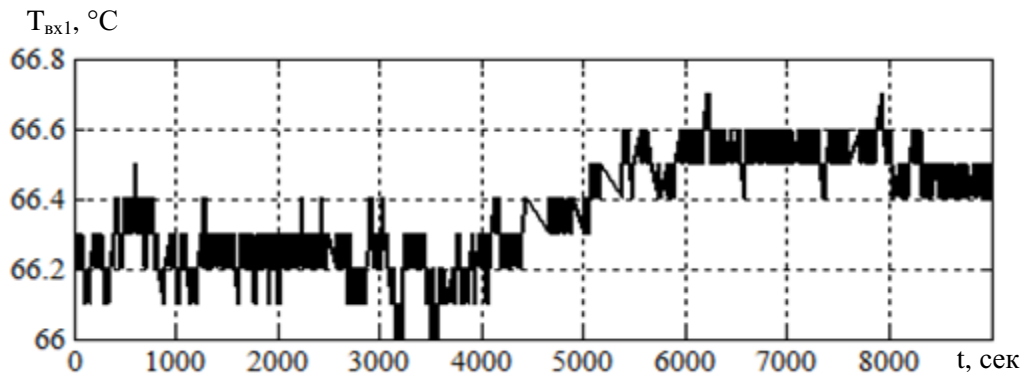


Рис. 5. График экспериментальных данных температуры воды от источника

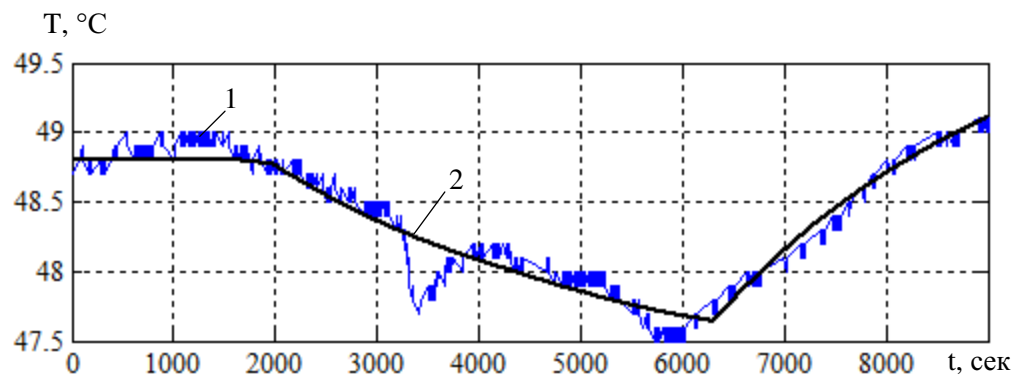


Рис. 6. Переходные характеристики:
1 – реального объекта управления; 2 – идентифицированной модели

Для управления температурой воды после подмеса синтезирована система управления с обратной связью по температуре воды обратного контура (рис. 7). Увеличение мощности двигателей приводит к снижению температуры, поэтому сигнал ошибки по управляемой величине инвертируется.

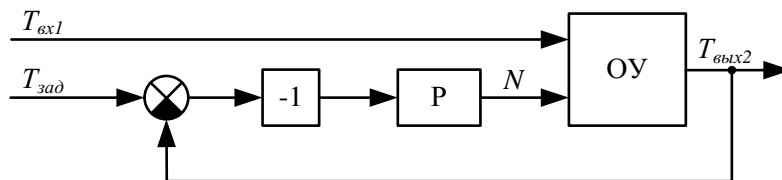


Рис. 7. Структурная схема системы автоматического управления:
P – регулятор; ОУ – объект управления

В качестве регулятора используется ПИ-регулятор, так как он обладает наилучшими характеристиками при управлении объектами с запаздыванием [6].

Поиск оптимальных параметров ПИ-регулятора выполнен численным методом на базе компьютерной модели системы автоматического регулирования в среде моделирования динамических систем Simulink пакета Matlab и библиотеки Optimization Toolbox. Для этого в качестве критерия был выбран минимум дисперсии ошибки. Параметры ПИ-регулятора с параллельной структурой: $K_p = 0.2713$, $T_I = 7.7669 \cdot 10^{-5}$.

На рис. 8 показан график переходного процесса системы при изменении задания температуры обратной воды с 49 до 51 °С. На рис. 9 показана реакция системы на изменение температуры прямой воды от источника T_{ex1} с 66,4 до 68 °С.

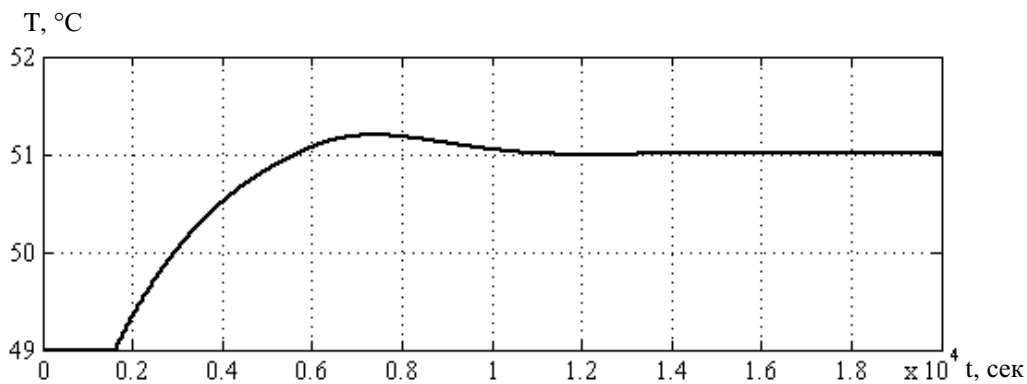


Рис. 8. Переходный процесс системы с ПИ-регулятором

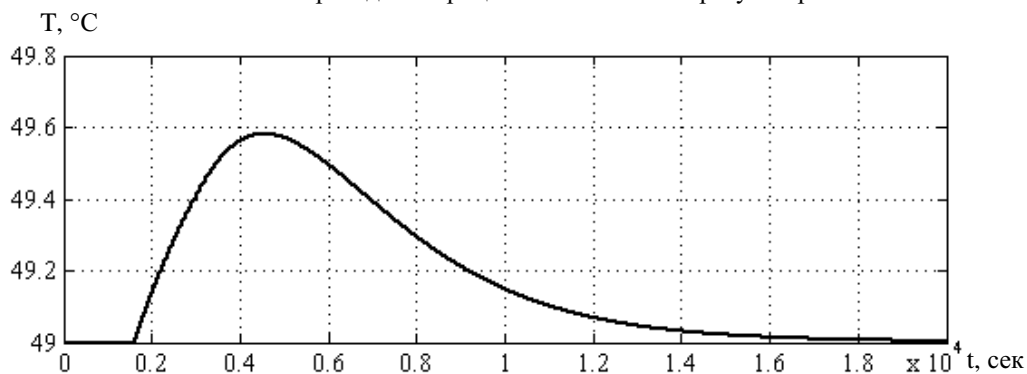


Рис. 9. Реакция системы на возмущающее воздействие T_{ex1}

Как видно из рис. 8 и 9, система автоматического управления с ПИ-регулятором имеет близкий к апериодическому переходный процесс по управлению и монотонный переходный процесс по возмущению со стороны температуры прямой воды от источника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов. – 7-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
2. Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 368 с.

3. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1979. – 224 с.
4. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
5. Данилушкин И.А., Россеев Н.Н. Синтез системы автоматического управления температурным полем трубчатого теплообменника // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2006. – Вып. 40. – С. 5–11.
6. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 541 с.

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2015 г.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF HEATING AGENT TEMPERATURE

I.A. Danilushkin, D.M. Kamilova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

This paper deal with the problem of building an automatic system to control the temperature of water which is supplied to the consumer via a closed dependent heat supply system equipped with mixing pumps. The paper suggests a model of control object which considers the spatial distribution of heat transfer process as a nonlinear dynamic closed-loop system with variable feedback gain. The feedback gain works as a command variable. The model is identified on the basis of the results of active experiment. Automatic control system is synthesized and studied by means of numerical simulation of dynamic system. The paper lists the results of the control object identification and investigates the transition behavior of the automatic control system in terms of control and disturbance.

Keywords: *heat supply system, automatic control, temperature of heating agent, plant with distributed parameters, heat-transfer process, identification, mixing pump.*

*Ivan A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Diloram M. Kamilova, Graduate student.*