

## **ДИНАМИКА ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ОТОПИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ «УМНОГО ДОМА»**

С.И. Поляков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

В статье рассмотрены вопросы моделирования управления отоплением помещения. Получена динамика объекта – отопительной системы жилого дома. Выведено уравнение динамики датчика температуры. Динамические погрешности определены динамическими характеристиками датчика температуры. Определена динамическая погрешность при ступенчатом изменении входного сигнала.

Ключевые слова: «Умный дом», отопление, датчик температуры, уравнение динамики, динамическая погрешность, постоянные времени.

## **DYNAMICS OF THE TEMPERATURE SENSOR OF THE «SMART HOME» HEATING SYSTEM**

S.I. Polyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

The article deals with the issues of modeling the control of room heating. The dynamics of the object-the heating system of a residential building-is obtained. The equation of the dynamics of the temperature sensor is derived. Dynamic errors are determined by the dynamic characteristics of the temperature sensor. The dynamic error is determined for a stepwise change in the input signal.

Keywords: Smart home, heating, temperature sensor, dynamic equation, dynamic error, time constants.

В последнее время все более широко внедряется в повседневную жизнь такое понятие как управление «умными» объектами различного социального назначения. Прежде всего, это понятие относится к зданиям и сооружениям

промышленного и гражданского назначения, наземному транспорту, объектам социально-культурного быта [1].

Понятие «умный» дом, «умная» остановка общественного транспорта, «умная» улица предполагает всестороннее их исследование, моделирование, а впоследствии и разработку систем управления для реализации возложенных на них функций и задач, стоящих перед объектами.

Наиболее ответственным объектом в составе «умного дома» является его отопительная система и средства автоматического управления ею. Виртуальное моделирование измерительной технологической цепочки состоящей из датчика температуры, контроллера-регулятора температуры и исполнительных элементов открывает возможности исследования динамики отопительной системы и динамических погрешностей датчика температуры [2].

Синтез структурного моделирования системы управления отоплением позволяет получить наиболее приемлемый вариант и на его основе выбрать необходимый и достаточный состав технических средств автоматического управления отоплением.

Такой подход при создании автоматического управления отоплением в составе «умного» жилого дома решает задачу создания микроклимата внутри помещения в условиях современного жилого дома [3, 4].

Необходимо получить математическое описание теплового объекта управления – отопительной системы.

Как известно, для этого воспользуемся одним из трех методов для получения математического аппарата: аналитическим методом, аналитико-экспериментальным или экспериментальным методом.

Аналитический метод предполагает изучение динамики объекта средствами теории автоматического управления и привлечение классического математического аппарата, с помощью которого может быть изучен данный объект. Однако на этот путь становятся редко, так как для большинства объектов автоматизации, в силу сложности протекания в них процессов, трудно применить известные математические закономерности.

Кроме этого, зачастую возникает проблема гармонической линеаризации уравнений объекта или привлечение метода малых отклонений и так далее.

В силу сказанного аналитический путь описания объекта применяется крайне редко. Поэтому, предпочтение отдается аналитико-экспериментальному методу. В соответствии с которым, сначала приводят уравнения, которые для

исследуемого объекта являются базовыми и исходными. К ним можно отнести закономерности балансов: энергетического, материального и теплового.

Здесь рассматриваются, прежде всего, системы и элементы тепловой автоматики, которая, как известно, отличается высокой инерционностью и поэтому с помощью вторичных приборов может быть легко выполнена регистрация теплового процесса.

Кроме этого, необходим учет тепла при совершении расчета с производителями тепловой энергии. Здесь необходимо выделить определенную группу приборов и вторичных средств автоматизации, относящихся к тепловой автоматике, по реализуемым ими функциям.

Инерционность датчика несет еще один риск, особенно датчика температуры, состоящая в соизмеримости с инерционностью самого исследуемого объекта – отопительной системы. Поэтому при выборе датчика руководствуются, прежде всего, его динамическими свойствами [5].

Для датчика температуры необходимо получить его уравнение динамики.

Из уравнения Ньютона определим количество тепла, передаваемого элементу, погруженному в среду, теплоемкость которой существенно больше теплоемкости погружаемого элемента

$$\frac{dW}{dt} = kF(\theta_c - \theta_d),$$

где  $\theta_d$  – температура датчика,  $F$  – поверхность элемента,  $k$  – коэффициент передачи стенок датчика,  $\theta_c$  – температура среды,  $W$  – количество теплоты.

Количество теплоты, которое аккумулируется погруженным в среду датчиком температуры, может быть определено по следующей формуле

$$W = cV\gamma\theta_d,$$

где  $V$  – объем датчика,  $c$  – удельная теплоемкость материала датчика,  $\theta_d$  – температура датчика,  $\gamma$  – удельный вес.

Второе выражение продифференцируем по времени

$$\frac{dW}{dt} = cV\gamma \frac{d\theta_d}{dt},$$

воспользовавшись уравнением теплового баланса, запишем

$$kF(\theta_c - \theta_d) = cv\gamma \frac{d\theta_d}{dt},$$

откуда в стандартной форме записи получим

$$\frac{cV\gamma}{kF} \frac{d\theta_d}{dt} + \theta_d = \theta_c.$$

$\frac{cV\gamma}{kF}$  обозначим через  $T$  [с].

Тогда

$$T \frac{d\theta_d}{dt} + \theta_d = \theta_c, \quad (1)$$

то есть динамика датчика описывается инерционным звеном первого порядка.

Уравнение статики имеет вид  $\theta_d = \theta_c$ .

Отметим, например, что для термопары типа ХК в отсутствии защитной оболочки, как реального датчика температуры, постоянная времени составляет  $T=15\dots 20$  с, а при наличии защитной оболочки постоянная времени значительно выше  $T=450\dots 500$  с. В защитной оболочке термометр сопротивления ТСМ имеет  $T=350\dots 400$  с. Для сравнения отметим, что постоянная времени датчика давления меньше единиц секунд, а для датчиков уровня – секунды.

В настоящее время тепловые процессы могут быть сведены к типовым, и для их автоматизации разработаны типовые схемы. Это оказалось возможным и целесообразным из-за того, что некоторые тепловые объекты являются универсальными, применимыми для многих систем управления.

Динамические погрешности в первую очередь определяются динамическими характеристиками датчика. Это объясняется тем, что выходные сигналы датчика подключаются на промежуточные преобразователи (усилители, фильтры, ...), которые могут считаться безынерционными по сравнению с датчиками. Большинство датчиков описываются диффузными уравнениями первого и второго порядка. Такие измерительные преобразователи термометры (манометрические, жидкостные, термоэлектрические) описываются, как показано выше, диффузным уравнением (1) первого порядка

$$T \frac{dz(t)}{dt} + z(t) = k_{ном} x(t), \quad (2)$$

где  $T$  - постоянная времени датчика. Это единственный параметр, определяющий инерционность измерительного преобразователя данного вида. Составим дифференциальное уравнение, описывающее взаимодействие датчика с конкретной средой. Уравнение теплового баланса с учётом теплового действия тока  $I$ , протекающего через датчик от измерительной схемы, имеет вид:

$$I^2 R - G_{\Theta}(\Theta - \Theta_{cp}) - \xi S(\Theta - \Theta_{cp}) - C_n S [(\Theta/100)^4 - (\Theta_{cm}/100)^4] - mc \frac{d\Theta}{dt} = 0, \quad (3)$$

где  $I^2 R$  – теплота Джоуля-Ленца, выделяющаяся в преобразователе;

$G_{\theta}(\theta - \theta_{cp})$  – тепловой поток за счёт теплопроводности между датчиком с температурой  $\theta$  и контролируемой средой с температурой  $\theta_{cp}$ ;  $G_{\theta}$  – тепловая проводимость среды;  $\xi S(\theta - \theta_{cp})$  – тепловой поток вследствие конвекции, зависящей от площади поверхности датчика  $S$ , коэффициента теплоотдачи  $\xi$  и разности  $\theta - \theta_{cp}$ . Четвёртое слагаемое определяет тепловой поток за счёт теплого излучения датчика и стенок контролируемого объекта, внутри которого он находится;  $C_{II}$  – приведенный коэффициент лучеиспускания;  $\theta_{cm}$  – температура внутренней поверхности стенки объекта;  $mc \frac{d\Theta}{dt}$  характеризует теплоту идущую на изменение теплосодержания датчика при его нагреве или остывании;  $m$  – масса датчика;  $c$  – удельная теплоёмкость материала датчика.

Если пренебречь тепловым излучением и принять минимальный излучаемый ток  $I$ , то (3) примет вид:

$$(\Theta - \Theta_{cp})(G_{\theta} + \xi S) + mc \frac{d\Theta}{dt} = 0$$

$$\text{или } T \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = \Theta_{cp}$$

$$\text{где } T = \frac{mc}{G_{\theta} + \xi S}.$$

Постоянная времени  $T$  зависит от  $m$  – массы, площади  $S$ , и удельной теплоёмкости  $c$ , но и от условий эксплуатации, определяющих значение  $G_{\theta}$  и  $\xi$ . Для инженерных расчётов  $T$  осуществляется по формуле:

$$T = \frac{mc}{\xi_n S},$$

где  $\xi_n$  – значение коэффициента теплоотдачи, определяемое по справочным материалам.

Динамическая погрешность средства измерения описывается дифференциальными уравнениями первого порядка. Динамическая погрешность при ступенчатом изменении входного сигнала на величину  $\Delta x$ :

$$(2) \rightarrow T \frac{dz(t)}{dt} + z(t) = k\Delta x \quad (4)$$

Однородное уравнение  $T \frac{dz(t)}{dt} + z(t) = 0$  или  $Tpz(p) + z(p) = 0$ .

Характеристическое уравнение  $Tp + 1 = 0$  корень  $p = -\frac{1}{T}$

Свободное колебание

$$z_c(t) = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{t}{T}}$$

Общее решение  $z(t) = z_b(t) + z_c(t)$

Для нахождения вынужденного решения  $Z_b(t)$  для момента, когда свободные колебания окончились и  $\frac{dZ(t)}{dt} = 0$

Из уравнения (4):

$$z_b(t) = k_{ном} \Delta x$$

Вынужденные колебания

$$z(t) = k_{ном} \Delta x + Ae^{-\frac{t}{T}} \quad (5)$$

Для вычисления постоянной величины  $A$  воспользуемся начальными условиями

$t = 0$ ,  $z(0) = 0$ , тогда уравнение (5):

$$0 = k_{ном} \Delta x + A ; A = -k_{ном} \Delta x$$

И, окончательно, общее решение имеет вид:

$$z(t) = k_{ном} \Delta x \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (6)$$

Абсолютная динамическая погрешность есть разность между результатом измерения, определяемым по номинальной характеристике (6) и действительным значением измеряемого параметра  $\Delta x$  :

$$Y_{дин}(t) = \frac{z(t)}{k_{ном}} - \Delta x = \frac{k_{ном} \Delta x (1 - e^{-\frac{t}{T}})}{k_{ном}} - \Delta x = \Delta x - \Delta x e^{-\frac{t}{T}} - \Delta x = \Delta x e^{-\frac{t}{T}}$$

Относительная динамическая погрешность, %:

$$\xi_{дин}(t) = \frac{Y_{дин}(t)}{\Delta x} 100\% = \frac{-\Delta x e^{-\frac{t}{T}}}{\Delta x} 100 = -100 e^{-\frac{t}{T}}, \%$$

В заключении отметим: выполнена оценка динамических свойств датчика температуры, определена динамическая погрешность датчика температуры при ступенчатом изменении входного сигнала.

#### Список литературы

1. Поляков, С.И. Моделирование системы управления отоплением «умного» жилого дома / С.И. Поляков, В.И. Акимов, А.В. Полуказаков // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 1. – С. 68-76.
2. Сазонова, С.А. Особенности решения задач управления функционированием системами теплоснабжения / С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 67-73.

3. Сазонова С.А. Особенности формирования обобщенной модели управления системами теплоснабжения / С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 73-80.

4. Сазонова С.А. Особенности формулировки прикладных задач управления функционированием системами теплоснабжения / С.А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 80-88.

5. Сазонова, С.А. Математическое моделирование параметрического резерва систем теплоснабжения с целью обеспечения безопасности при эксплуатации / С.А. Сазонова, С.Д. Николенко, А.В. Звягинцева // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 71-77.