

УДК 681.586.67

Определение времени термической реакции термопреобразователей сопротивления

Е.Д. Маршалов, А.Н. Никоноров, И.К. Муравьев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: edm@su.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При эксплуатации и наладке современных систем управления важное значение имеют точность и качество выполненных измерений. Самыми распространенными являются температурные измерения. Одним из основных показателей датчиков температуры является время термической реакции. Динамические свойства датчиков оказывают влияние на параметры настройки автоматических регуляторов и, соответственно, на качество работы АСУТП в целом, однако изучены значительно хуже статических свойств. Поэтому задача исследования динамических свойств датчиков температуры является актуальной и востребованной.

Материалы и методы: Выбран метод определения динамических характеристик датчиков температуры, заключающийся в снятии кривой разгона при скачкообразном изменении температуры среды, окружающей датчик, от одного установившегося значения до другого. Решение поставленной задачи осуществлено с применением платиновых термопреобразователей сопротивления, высокоточного метрологического оборудования, использован метод совмещения кривых разгона по «нулевым линиям».

Результаты: Получены переходные характеристики для четырех термопреобразователей сопротивления при различных изменениях температуры. В результате обработки полученных переходных характеристик рассчитаны их оценки для доверительной вероятности 0,95. Показано, как диаметр монтажной части датчиков температуры оказывает влияние на их динамические характеристики. Установлено, что при помещении датчиков в одинаковую технологическую среду с одинаковой скоростью обтекания датчика технологической средой большое влияние на динамические характеристики оказывает диаметр монтажной части, что обусловлено особенностями теплопроводности для различных толщин стенки датчика; длина монтажной части не играет значительной роли ввиду того, что чувствительный элемент датчика температуры находится на его рабочем конце, т.е. чувствительные элементы всех исследованных датчиков находились в одинаковом температурном поле.

Выводы: Полученные в ходе проведения экспериментов динамические характеристики датчиков температуры показывают, что при изменении диаметра монтажной части термопреобразователя сопротивления в 2,5 раза время термической реакции изменяется в 4 раза. Полученные результаты могут быть полезны при выборе датчиков температуры для технологических объектов управления, а также при проектировании и вводе в действие АСУТП, при настройке автоматических систем регулирования для оптимизации качества работы регуляторов, при реализации технологических защит и блокировок.

Ключевые слова: термопреобразователь сопротивления, динамические характеристики, время термической реакции, калибратор температуры, система регулирования, переходные процессы.

Determination of thermal response time of thermal resistance transducers

E.D. Marshalov, A.N. Nikonorov, I.K. Muravyov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: edm@su.ispu.ru

Abstract

Background: Accuracy and quality of measurements are important characteristics in operation and adjustment of modern control systems. The most common characteristics are temperature measurements. One of the main indicators of temperature sensors is thermal response time. Dynamic properties of the sensors influence the settings of automatic controls and, consequently, the quality of the control system as a whole, but they are studied much worse than the static properties. Therefore, it is quite urgent and important to study dynamic properties of temperature sensors.

Materials and methods: The authors have chosen a method of determining dynamic characteristics of temperature sensors which consists in removing the acceleration curve when the temperature of the medium surrounding the sensor changes abruptly from one steady-state value to another. The problem set was solved by using platinum thermal resistance transducers, precision calibration equipment, and the method of combining acceleration curves at «zero lines».

Results: The authors have obtained transient characteristics for four thermal resistance transducers at different temperature changes. By processing the obtained transient characteristics, the authors calculated their values for the confidence level of 0,95. It is shown how the diameter of the mounting part of the temperature sensors influences their dynamic characteristics. It has been shown that when the sensors are placed in the same processing medium with the same velocity of sensor flow with the processing medium, the dynamic characteristics are greatly affected by the mounting part diameter, which is caused by the thermal conductivity characteristics of the sensor for different sensor wall thicknesses; the length of the mounting part does not play a significant role because the temperature-sensitive sensor element is located at its working end, i.e. the sensitive elements of all the sensors were tested in the same temperature field.

Conclusions: The dynamic characteristics of the temperature sensors obtained experimentally show that when the diameter of the mounting part of the thermal resistance transducer is changed by a factor of 2,5, the time of the thermal reaction changes by a factor of 4. The obtained results can be used when choosing temperature sensors for technological control objects, as well as when designing and commissioning automated process control systems, and when setting up automatic control systems to optimize the quality of the regulators, while implementing technological protections and interlocks.

Key words: thermal resistance transducer, dynamic characteristics, thermal response time, temperature calibrator, control system, transitional processes.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.054-059

Введение. В настоящее время подавляющее большинство технологических процессов полностью или хотя бы частично автоматизировано. При эксплуатации и наладке современных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) важное значение имеют точность и качество выполненных измерений. Значения измеряемых величин должны оперативно обновляться и поступать на приборы для дальнейшей обработки. Управление технологическим процессом невозможно без точных и своевременных показаний приборов. На них строится вся дальнейшая работа системы управления и последующие шаги оператора. Самыми распространенными являются температурные измерения [1, 2].

В промышленности применяется множество различных технических средств для измерения температуры, отличающихся принципом действия, диапазоном измерений, условиями эксплуатации, конструкцией, возможностью дистанционной передачи показаний и т.п. Тем не менее можно выделить и общие показатели, применимые к большинству датчиков температуры, например класс допуска (характеризующий точность измерений) и время термической реакции (характеризующее быстродействие датчика). Определение погрешности датчиков температуры, являющейся статической характеристикой, – штатная процедура, регулярная для технологических объектов управления. К тому же вопросы поверки датчиков давно изучены и широко описаны в литературе и нормативной документации.

Иначе обстоят дела с определением динамических характеристик датчиков температуры. В каталогах и технических руководствах для датчиков температуры приводится лишь время термической реакции, зачастую не указывается даже среда, для которой представлена данная величина. Динамические свойства датчиков влияют на параметры настройки систем управления и, соответственно, на качество работы АСУТП в целом. Поэтому задача исследования динамических свойств датчиков температуры является актуальной и востребованной.

Известно большое число методов определения динамических характеристик различных датчиков температуры. Методы отличаются сложностью, трудоемкостью и точностью,

каждый из методов имеет свою область применения, учитывает особенности использования технологического объекта и обладает определенными преимуществами и недостатками.

Влияние тепловой инерции датчика начинает сказываться при измерении нестационарных температур и проявляется в том, что датчик не успевает мгновенно следить за изменением температуры среды. Время, которое требуется для изменения показаний датчика температуры на определенный процент полного изменения при ступенчатом изменении температуры среды, называется временем термической реакции датчика.

Целью работы является определение экспериментальным путем времени термической реакции датчиков температуры.

Наиболее распространенными в промышленности датчиками температуры являются термопреобразователи сопротивления (ТС) [1–3]. Они представляют собой универсальные измерительные приборы, предназначенные для измерения температуры жидких, твердых, газообразных и сыпучих сред. В термопреобразователе сопротивления измеряемая температура преобразуется в электрическое сопротивление. Далее сигнал поступает на измерительный прибор, где отображается и при необходимости регистрируется измеренное значение. В исследовании при подключении датчиков к измерительному прибору применена трехпроводная схема подключения для компенсации влияния температуры окружающей среды.

Методы исследования. В работе выбран метод определения динамических характеристик датчиков температуры, заключающийся в снятии кривой разгона при скачкообразном изменении температуры среды, окружающей датчик, от одного установившегося значения до другого установившегося значения. В целях повышения точности измерения датчик температуры помещался в тепловое градиентное поле и перемещался скачкообразно в поле по направлению градиента из одного фиксированного положения в другое. Перемещение датчика в новое фиксированное положение производилось за время, значительно меньшее величины времени запаздывания и постоянной времени [4–7].

Метод определения динамических характеристик является экспериментально-

расчетным и состоит в непосредственной регистрации переходной характеристики датчиков в тепловом регулярном режиме первого рода и в последующем расчетном определении параметров динамической характеристики.

При проведении экспериментов соблюдались следующие условия:

- температура воздуха в помещении с измерительной аппаратурой была $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ и не изменялась более чем на 1°C в течение 1 ч работы;

- относительная влажность воздуха в помещении находилась в пределах от 40 до 60 %;

- действие вибрации в помещении не вызывало колебания средств измерений;

- в помещении не было дыма, газов и паров, вызывающих загрязнение деталей измерительных приборов и регистрирующей аппаратуры.

Исследовались характеристики платиновых термопреобразователи сопротивления с номинальной статической характеристикой 100П, обеспечивающие высокую точность измерений. Основные характеристики датчиков представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики ТС

Наименование	Заводской номер	Длина монтажной части, мм	Диаметр монтажной части, мм	Диапазон измерений температуры, $^\circ\text{C}$
ТС-1388/5	№10300	250	4	$-50...+250$
ТС-1388/5	№10295	250	6	$-50...+350$
ТС-1088/5	№6780	320	8	$-50...+350$
ТС-1088/2	№6783	500	10	$-50...+350$

При определении переходных характеристик датчиков выполнялись следующие операции:

- внешний осмотр датчиков;
- регистрация выходного сигнала чувствительных элементов датчиков.

При внешнем осмотре датчиков было установлено соответствие требованиям, которые предъявляются в документации к их внешнему виду. Испытуемые датчики были исправными (годными к эксплуатации) и имели статическую градуировку в соответствии с нормативной документацией.

Для создания температурного поля использован сухоблочный калибратор температуры погружного типа Элемер-КТ-650, позволяющий воспроизводить температуру в диапазоне от $+50$ до $+650^\circ\text{C}$. Основными функциональными частями калибратора являются термостатирующий блок и прецизионный измеритель-регулятор температуры. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности воспроизведения температуры калибратора составляет $\pm 0,08^\circ\text{C}$. Глубина погружения датчиков – 190 мм.

Для отображения и регистрации полученных значений температуры был использован многоканальный технологический регистратор РМТ-59, предназначенный для измерения, регистрации и контроля температуры и других электрических величин, преобразованных в электрические сигналы силы и напряжения постоянного тока или активное сопротивление. Предел допускаемой основной приведенной погрешности прибора составляет $\pm 0,2\%$.

Эксперименты проводились по следующей методике. В начале проводимых экспериментов термопреобразователи сопротивления были подключены к входам аналого-цифрового преобразователя регистратора РМТ-59 и размещены на лабораторном столе. Затем РМТ-59 посредством экранного меню был настроен для работы с нужными первичными измерительными преобразователями. На экране регистратора отображались текущие значения измеряемой температуры в виде чисел, графиков и гистограмм одновременно.

На калибраторе температуры КТ-650 последовательно устанавливались требуемые значения температуры. Эксперименты проводились при следующих значениях температуры: 50, 100, 150, 200, 250, 300 и 350°C . Ввиду того, что верхний предел диапазона измерений термопреобразователя сопротивления ТС-1388/5 с диаметром монтажной части 4 мм составляет 250°C , для него не проводились измерения при температурах 300 и 350°C .

Время выхода калибратора КТ-650 на рабочий режим, т.е. момента времени, когда величина отклонения текущей температуры от заданной находится в пределах допускаемой основной погрешности, составляло 20–30 мин.

После выхода калибратора КТ-650 на рабочий режим датчики температуры поочередно помещались в калибратор температуры КТ-650. На многоканальном технологическом регистраторе РМТ-59 отображались и регистрировались переходные процессы по температуре с дискретностью 1 с.

Результаты исследования. Для каждого значения температуры проводилось по 5 экспериментов. В ходе проведения экспериментов для датчиков температуры с диаметром монтажной части 10, 8 и 6 мм были сняты по 35 переходных процессов, для датчиков температуры с диаметром монтажной части 4 мм – 25 переходных процессов. В общей сложности в ходе проведенных исследований были получены 130 переходных процессов для исследуемых термопреобразователей сопротивления.

Анализ полученных данных выполнен на персональном компьютере с использованием специализированного программного обеспечения DataViewStudio, ПК «Тренд». Предварительный анализ и первоначальная обработка архивных данных, собранных многоканальным

технологическим регистратором PMT-59, выполнены в программе DataViewStudio.

Для сопоставления и анализа динамических характеристик все переходные процессы, полученные при различных температурах, приведены к диапазону 0–100 %. На рис. 1 показаны приведенные к диапазону 0–100 % переходные характеристики изменения температуры для термопреобразователя сопротивления ТС-1088/2 с диаметром монтажной части 10 мм при изменении температуры от 20 до 100 °С.

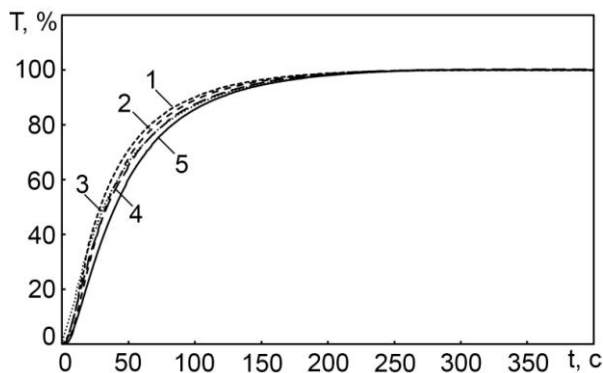


Рис. 1. Переходные характеристики изменения температуры при ступенчатом возмущении: 1–5 – при проведении экспериментов с 1 по 5

Оценки переходных характеристик получены путем применения методики совмещения кривых разгона по «нулевым линиям» в специализированном программном комплексе «Тренд». Построение интервальных оценок точности (границ доверительных интервалов) выполнено для заданной доверительной вероятности 0,95. Оценка семейства переходных характеристик изменения температуры, приведенных к диапазону 0–100 %, для термопреобразователя сопротивления ТС-1088/2 с диаметром монтажной части 10 мм при изменении температуры от 20 до 100 °С представлена на рис. 2.

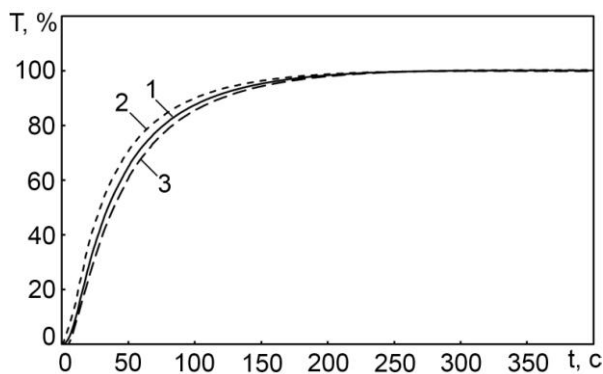


Рис. 2. Оценка семейства переходных характеристик изменения температуры при ступенчатом возмущении: 1 – оценка семейства переходных характеристик; 2 – верхняя граница доверительного интервала; 3 – нижняя граница доверительного интервала

В ходе исследований время термической реакции испытуемых датчиков определялось

как время от начала переходного процесса до ординаты, равной 90, т.е. время, за которое температура датчиков изменилась на 90 %. Требования к времени термической реакции обычно устанавливаются техническим заданием на АСУТП исходя из особенностей конкретных узлов измерения и регулирования.

В результате обработки всех 130 переходных характеристик, полученных для исследуемых термопреобразователей сопротивления, найдены оценки семейств переходных характеристик изменения температуры, приведенных к диапазону 0–100 %, для различных термопреобразователей сопротивления. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Время термической реакции исследуемых датчиков представлено в табл. 2.

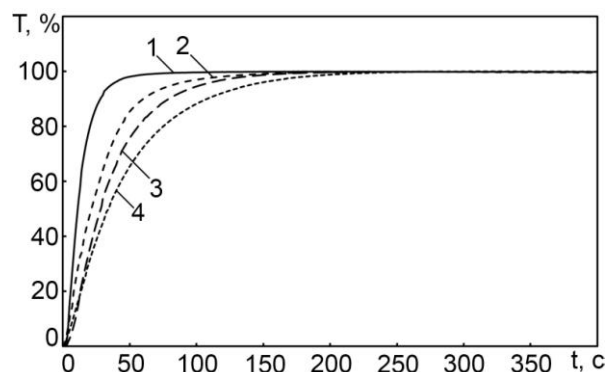


Рис. 3. Динамические характеристики датчиков температуры для диаметров монтажной части: 1 – 4 мм; 2 – 6 мм; 3 – 8 мм; 4 – 10 мм

Таблица 2. Время термической реакции ТС

Наименование	Диапазон измерений температуры, °С	Длина монтажной части, мм	Диаметр монтажной части, мм	Время термической реакции, с
ТС-1388/5	-50...+250	250	4	27
ТС-1388/5	-50...+350	250	6	60
ТС-1088/5	-50...+350	320	8	79
ТС-1088/2	-50...+350	500	10	108

Выводы. Результаты исследований динамических характеристик датчиков температуры показали, что при помещении датчиков в одинаковую технологическую среду с одинаковой скоростью обтекания датчика технологической средой большое влияние на динамические характеристики оказывает диаметр монтажной части. Различная тепловая инерция обусловлена особенностями теплопроводности для различных толщин стенки датчика. При этом длина монтажной части не играет значительной роли, ввиду того что чувствительный элемент датчика температуры находится на его рабочем конце, т.е. чувствительные элементы всех исследованных датчиков находились в одинаковом температурном поле.

Полученные в ходе проведения экспериментов динамические характеристики датчиков температуры показывают, что при изменении диаметра монтажной части ТС в 2,5 раза

время термической реакции изменяется в 4 раза. Полученные результаты могут быть полезны при выборе датчиков температуры для технологических объектов управления, а также при проектировании и вводе в действие АСУТП, при настройке автоматических систем регулирования для оптимизации качества работы регуляторов, при реализации технологических защит и блокировок.

Список литературы

1. **Маршалов Е.Д.** Исследование динамических характеристик термопреобразователей сопротивления: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии». В 4 т. Т. 2. – Иваново, 2015. – С. 263–266.
2. **Маршалов Е.Д.** Экспериментальное исследование датчиков температуры // Труды VI Междунар. науч.-техн. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи». В 2 т. Т. 2. – Иваново, 2015. – С. 341–342.
3. **Use of a data measurement system for studying the characteristics of temperature sensors / V.A. Dubovitskii, L.P. Sebina, M.V. Godunov, E.M. Maksimova // Fibre Chemistry. – 2011. – Vol. 42, no. 6. – P. 399–403.**
4. **Сабитов А.Ф., Сафина И.А.** Идентификация динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 211–218.
5. **Иосифов В.П.** Определение полных динамических характеристик средств измерений с применением рекуррентных процедур // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 126–131.
6. **Froehlich T., Augustin S., Ament C.** Temperature-Dependent Dynamic Behavior of Process Temperature Sensors // International Journal of Thermophysics. – 2015. – Vol. 36, no. 8. – P. 2115–2123.
7. **Вавиловская С.Л., Захаров Д.Л., Корнеев М.В.** Автоматизация определения динамических и скоростных характеристик датчиков температуры на установке воздушной УВ-010 ЦИАМ // Автоматизация в промышленности. – 2016. – Т. 4. – С. 28–29.

Маршалов Евгений Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, декан факультета информатики и вычислительной техники,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. А, ауд. 221,
телефон (4932) 26-97-58,
e-mail: edm@su.ispu.ru

Marshalov Yevgeny Dmitrievich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Dean of the IT and Computer Science Faculty,
address: Ivanovo, 34 Rabfakovskaya St., Building A, Room 221,
telephone (4932) 26-97-58,
e-mail: edm@su.ispu.ru

Никоноров Андрей Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. А, ауд. 219б,
телефон (4932) 26-97-57,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Nikonorov Andrei Nikolayevich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Control Systems,
address: Ivanovo, 34 Rabfakovskaya St., Building A, Room 219б (219b),
telephone (4932) 26-97-57,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

References

1. **Marshalov, E.D.** Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik termopreobrazovateley soprotivleniya [Research into dynamic characteristics of thermal resistance]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii: «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii»*. V 4 t., t. 2 [A collection of scientific works of the International Scientific Conference «The Condition and Prospects of Developing Electric Power and Heat Technologies». In 4 vol., vol. 2]. Ivanovo, 2015, pp. 263–266.
2. **Marshalov, E.D.** Eksperimental'noe issledovanie datchikov temperatury [Experimental research into temperature sensors]. *Trudy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi»*. V 2 t., t. 2 [Proceedings of the VIth International Scientific Conference «Power Industry: Viewpoint of the Youth». In 2 vol., vol. 2]. Ivanovo, 2015, pp. 341–342.
3. **Dubovitsky, V.A., Sebina, L.P., Godunov, M.V., Maksimova, E.M.** Use of a data measurement system for studying the characteristics of temperature sensors. *Fibre Chemistry*, 2011, vol. 42, no. 6, pp. 399–403.
4. **Sabitov, A.F., Safina, I.A.** Identifikatsiya dinamicheskikh kharakteristik aviatsionnykh datchikov temperatury gazov [Identification of dynamic characteristics of gas temperature sensors in aviation]. *Pribory i metody izmereniy*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 211–218.
5. **Iosifov, V.P.** Opredelenie polnykh dinamicheskikh kharakteristik sredstv izmereniy s primeneniem rekurrentnykh protsedur [Determination of complete dynamic characteristics of measuring instruments by using recurrent procedures]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 1(17), pp. 126–131.
6. **Froehlich, T., Augustin, S., Ament, C.** Temperature-Dependent Dynamic Behavior of Process Temperature Sensors. *International Journal of Thermophysics*, 2015, vol. 36, no. 8, pp. 2115–2123.
7. **Vavirovskaya S.L., Zakharov D.L., Korneev M.V.** Avtomatizatsiya opredeleniya dinamicheskikh i skorostnykh kharakteristik datchikov temperatury na ustanovke vozduшной UV-010 TsiAM [Automation of determining dynamic and high-speed characteristics of temperature sensors in the air installation UV-010 of the Central Institute of Aviation Motors]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2016, vol. 4, pp. 28–29.

Муравьев Игорь Константинович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
старший преподаватель кафедры систем управления,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. А, ауд. 215,
телефон (4932) 26-97-57,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Muravyov Igor Konstantinovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Senior Lecturer of the Department of Control Systems,
address: Ivanovo, 34 Rabfakovskaya St., Building A, Room 215,
telephone (4932) 26-97-57,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru