DEVELOPMENT OF SCIENCE

ISNN 3030-3907

2026 AUGUST

ISSUE - 8
VOLUME -1

DEVELOPMENT OF SCIENCE

D E V O S

РАЗВИТИЕ НАУКИ

ILM-FAN TARAQQIYOTI

Development of science

Scientific journal
Ilmiy jurnal
Научный журнал

AUGUST 2026
Issue - 8, VOLUME - 1

ISSN 3030 -3907

*The scientific journal **«Development of Science»** was registered by the State on April 15, 2024 with certificate number №256445.*

***«Ilm fan tarqqiyoti»** ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro'yxatidan o'tgan.*

*Научный журнал **«Развитие науки»** был зарегистрирован государством 15 апреля 2024 года под номером свидетельства № 256445.*

The proceedings will be provided to the authors in electronic form (PDF format). The authors bear full responsibility for the content of the articles included in the proceedings, the accuracy and reliability of the statistical data and regulatory documents cited therein, as well as for any opinions and judgments expressed in their articles. Articles that do not meet the established requirements will not be included in the proceedings. The Organizing Committee reserves the right to shorten the text of an article, make minor editorial corrections, and assign submissions to the appropriate sections.

To'plam elektron ko'rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To'plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma'lumotlar va me'yoriy hujjatlarning to'g'riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o'zlari mas'ul hisoblanadilar.Talablarga javob bermaydigan maqolalar to'plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo'mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

Сборник предоставляется авторам в электронном виде (в формате PDF). Авторы несут полную ответственность за содержание статей, включённых в сборник, достоверность приведённых в них статистических данных и нормативных документов, а также за изложенные мнения и суждения. Статьи, не соответствующие установленным требованиям, в сборник не включаются. Организационный комитет оставляет за собой право сокращать текст статьи, вносить отдельные редакционные исправления и распределять материалы по соответствующим секциям.

EDITOR-IN-CHIEF:
Temirov Alisher Hashim oglu - Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor.
CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich - Doctor of Technical Sciences, Professor
MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Faheem Uddin
Professor,Iqra university, Pakistan
Siddikova Sadokat Gafforovna
DSc, Rector of Bukhara State Technical University, Uzbekistan
Dr. Amit Rawal
Professor, Department of Textile and Fibre Engineering Indian Institute of Technology Delhi, India
Alexander Vitalievich Dudan
Associate Professor, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Republic of Belarus
Bozorov Gayrat Rashidovich
Professor Bukhara State Technical University, Uzbekistan
Vladimir Mikhailovich Kapustin
Professor,Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),Russian Federation
Shaoliang Chen
Ph. D., Engineer,Cement Science and New Building Materials Research Institute, China
Tukhtayeva Zebo Sharifovna
Bukhara State Technical University, Professor.
Kodirov Abduakhad Abdurakhimovich
Karshi State University, Professor
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
General Scientific Secretary of the Karakalpakstan Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Professor
Tursunov Kakhor Shonazarovich
Karshi State University, Professor
Sharipov Muzaffar Samandarovich
Bukhara State University, Professor.
Alikulov Rustam Valiyevich
Termez State University, Professor
Makhmudov Mukhtar Jamolovich
Bukhara State Technical University, Professor.
Oral Kurganbekovich Beyseynbayev
Professor,M. Auezov South Kazakhstan University,Republic of Kazakhstan
Tropov Khamza Tursunovich
Samarkand State University, Professor
Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Bukhara State Technical University, Professor.
Saidakhmedova Nodira Ilkhomovna
Tashkent State University of Economics, Professor

ORGANIZATIONAL STRUCTURE:

Safarov J.A.-*editor*
Panoyev N.Sh. -*editor*
Buranov N.G. -*assistant editor*
Shodiyev D.X.- *layout editor*
Izzatov D.X. - *layout editor*
Urinov J.B. - *layout editor*
Temirov A.T. - *graphic designer*
Temirov I.G. – *layout designer*

Changes to the composition of the Editorial Board, including the appointment of new members or the removal of existing members, shall be made by the Editor-in-Chief.

www.devos.uz

ISSN 3030-3907

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫМ ИСПЫТАТЕЛЬНЫМ СИГНАЛОМ

Рахматов Азамат Ражабович
Научные руководители
Фозилов С.Ф.
Доктор технических наук, профессор
Максимов В.Ю
PhD, профессор

Аннотация. Целью работы является разработка и обоснование метода экспериментальной оценки динамических характеристик терморезистивных преобразователей температуры при прямоугольном тепловом импульсе. Рассмотрены переходная характеристика, постоянная времени, время достижения 95 % установившегося значения и динамическая погрешность. Предложена схема испытательного стенда с синхронной регистрацией сопротивления Pt100 и эталонной температуры. Показано, что увеличение диаметра защитной оболочки приводит к росту тепловой инерционности, а короткий импульс вызывает существенное недостижение установившегося значения. Для идентификации параметров применены нормирование отклика и аппроксимация моделью первого порядка. Метод пригоден для сравнительных испытаний датчиков и выбора преобразователя для быстропротекающих технологических процессов.

Ключевые слова: терморезистивный преобразователь, Pt100, динамическая характеристика, постоянная времени, импульсный сигнал, переходный процесс, динамическая погрешность, идентификация.

Annotatsiya. Ishning maqsadi to‘g‘ri burchakli issiqlik impulsi ta’sirida termorezistiv harorat o‘zgartkichlarining dinamik tavsiflarini tajribaviy baholash usulini ishlab chiqish va asoslashdan iborat. O‘tish xarakteristikasi, vaqt doimiysi, barqaror qiymatning 95 foiziga erishish vaqti hamda dinamik xatolik tahlil qilindi. Pt100 qarshiligi va etalon haroratni sinxron qayd etuvchi sinov stendi taklif qilindi. Himoya qobig‘i diametri ortishi issiqlik inersiyasini oshirishi, qisqa impulslar esa barqaror qiymatga yetib bormaslikni kuchaytirishi ko‘rsatildi. Parametrlarni aniqlashda normallashtirilgan javob va birinchi tartibli model bo‘yicha approksimatsiya qo‘llanildi.

Kalit so‘zlar: termorezistiv o‘zgartkich, Pt100, dinamik tavsif, vaqt doimiysi, impulsli signal, o‘tish jarayoni, dinamik xatolik, identifikatsiya.

Abstract. The study develops and substantiates an experimental method for evaluating the dynamic characteristics of resistance temperature transducers

ISSN 3030-3907

subjected to a rectangular thermal pulse. The transient response, time constant, 95 % settling time and dynamic error are considered. A test-bench architecture with synchronous acquisition of Pt100 resistance and reference temperature is proposed. The analysis shows that increasing the protective sheath diameter increases thermal inertia, while short pulses produce a pronounced failure to reach the steady-state value. Model parameters are identified using normalized response data and first-order approximation. The method can be used for comparative sensor testing and for selecting transducers for fast thermal processes.

Keywords: resistance temperature transducer, Pt100, dynamic characteristics, time constant, pulse signal, transient response, dynamic error, identification.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Температура является одним из наиболее часто измеряемых параметров в энергетике, химической и нефтегазоперерабатывающей промышленности, системах климатического контроля, испытательных комплексах и автоматизированных технологических установках. При стационарном режиме основное внимание уделяется статической погрешности преобразователя, однако в реальном объекте температура нередко изменяется за время, сопоставимое с тепловой инерционностью чувствительного элемента. В этих условиях измерительная цепь фиксирует не мгновенное значение температуры среды, а запаздывающий отклик, формируемый теплообменом между средой, защитной оболочкой и чувствительным элементом.

Платиновые терморезистивные преобразователи получили широкое распространение благодаря воспроизводимости, стабильности и хорошо описанной зависимости сопротивления от температуры. Требования к промышленным платиновым термометрам и чувствительным элементам регламентируются IEC 60751:2022 [1]. Вместе с тем статическая метрологическая характеристика не определяет быстродействие датчика. В динамических измерениях важны постоянная времени, длительность переходного процесса, частотная полоса, а также динамическая погрешность, возникающая при изменении входного воздействия.

В стандарте ASTM E644 предусмотрено испытание промышленных термометров сопротивления на тепловое время отклика [2]. Исследования промышленных платиновых термометров показывают, что динамика существенно зависит от диаметра оболочки, способа монтажа и теплофизических свойств среды. В жидкостях время отклика обычно

ISSN 3030-3907

меньше, чем в воздухе, вследствие более интенсивной теплоотдачи [3, 4]. Для практических задач автоматического регулирования это означает, что одинаковые по классу точности датчики могут заметно различаться по способности воспроизводить быстрые температурные изменения.

Одним из информативных способов определения динамических параметров является воздействие испытательным сигналом известной формы. Ступенчатый сигнал удобен для идентификации постоянной времени, однако в реальных установках длительное поддержание резкого перепада температуры технически не всегда возможно. Прямоугольный импульс конечной длительности позволяет оценивать как фазу нагрева, так и последующее охлаждение, а также исследовать зависимость измеряемой амплитуды от отношения длительности импульса к постоянной времени датчика.

Цель настоящей работы — сформировать методику экспериментального определения динамических характеристик терморезистивных преобразователей Pt100 при воздействии импульсным испытательным сигналом и показать влияние тепловой инерционности на форму регистрируемого отклика. Для достижения цели решаются следующие задачи: формирование математической модели; разработка структуры стенда и алгоритма измерения; определение показателей $\tau 63$ и $t95$; оценка динамической погрешности при импульсах различной длительности; анализ неопределенности и практической применимости метода.

Научная новизна подхода заключается в совместной обработке фронта нагрева и спада импульсного отклика с нормированием по эталонному температурному воздействию. Это уменьшает влияние нестабильности амплитуды импульса и позволяет сравнивать датчики с различной номинальной чувствительностью в единой безразмерной системе координат.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.

2.1. Физическая и математическая модель

В диапазоне положительных температур сопротивление платинового чувствительного элемента описывается уравнением Каллендара–Ван Дюзена. Для Pt100 при $t \geq 0$ °C может быть использовано выражение $R(t)=R0(1+At+Bt^2)$, где $R0=100$ Ом при 0 °C, $A=3{,}9083\cdot10^{-3}$ °C^{-1} и $B=-5{,}775\cdot10^{-7}$ °C^{-2} [1]. При малых интервалах температуры зависимость близка к линейной, поэтому динамический анализ удобно выполнять как по температуре, вычисленной из сопротивления, так и непосредственно по нормированному изменению сопротивления.

Для датчика, у которого тепловая емкость чувствительного элемента и оболочки может быть сведена к сосредоточенному параметру,

ISSN 3030-3907

энергетический баланс имеет вид Cth·dTs/dt = Gth(Tm−Ts), где Cth — эквивалентная теплоемкость, Gth — тепловая проводимость от среды к чувствительному элементу, Tm — температура среды, Ts — температура сенсора. После деления на Gth получаем модель первого порядка с постоянной времени τ=Cth/Gth.

$$\tau \cdot dTs(t)/dt + Ts(t) = Tm(t).$$

При прямоугольном температурном импульсе амплитудой ΔT и длительностью Tp аналитический отклик модели первого порядка определяется двумя участками:

$$0 \le t < Tp: \quad Ts(t)=T0+\Delta T\cdot[1-exp(-t/\tau)];$$

$$t \ge Tp: \quad Ts(t)=T0+\Delta T\cdot[1-exp(-Tp/\tau)]\cdot exp[-(t-Tp)/\tau].$$

Параметр τ соответствует моменту достижения 63,2 % установившегося изменения при ступенчатом входе. Время достижения 95 % установившегося значения для идеальной модели первого порядка составляет приблизительно t95≈3τ. Для импульса конечной длительности максимальный зарегистрированный перепад оказывается меньше амплитуды входного воздействия. Относительная динамическая погрешность по амплитуде в конце импульса может быть записана как δdyn=exp(−Tp/τ)·100 %.

2.2. Структура испытательного стенда

Предлагаемый стенд включает источник воспроизводимого теплового импульса, термостатируемую рабочую ячейку, исследуемый Pt100, малоинерционный эталонный датчик, прецизионный измеритель сопротивления и систему синхронной регистрации. Для снижения влияния сопротивления соединительных проводов рекомендуется четырехпроводная схема включения Pt100. Ток измерения выбирается минимально достаточным для требуемого отношения сигнал/шум, чтобы ограничить самонагрев.



Рис. 1. Функциональная схема стенда для импульсных испытаний терморезистивного преобразователя

2.3. Программа эксперимента и обработка данных

ISSN 3030-3907

В качестве объектов сравнения рассматриваются три конструктивных исполнения Pt100 с различной эффективной тепловой инерционностью: A — компактный чувствительный элемент в оболочке диаметром около 3 мм; B — промышленное исполнение диаметром около 4,5 мм; C — защитная оболочка диаметром около 6 мм. Перед динамическими испытаниями выполняют проверку сопротивления при стабильной температуре и определяют поправку измерительного канала. Затем датчик выдерживают при начальной температуре T0 до достижения стационарного состояния.

Испытательный импульс формируют быстрым переключением теплового контакта между двумя зонами с температурой, отличающейся на 40–50 °C, либо управляемым потоком теплоносителя. Важно, чтобы фронт эталонного температурного воздействия был существенно короче предполагаемой постоянной времени исследуемого датчика. Рекомендуемая частота дискретизации — не менее 10/τmin, а практически для датчиков с τ около нескольких секунд достаточно 10–20 Гц. Каждый режим повторяют не менее пяти раз.

Таблица 1.

Основные параметры программы испытаний

Параметр	Рекомендуемое значение	Назначение
Начальная температура T0	25 ± 0,2 °C	Единое исходное состояние
Амплитуда импульса ΔT	45 ± 0,3 °C	Выраженный переходный процесс
Длительность Tp	5; 10; 20; 30; 40 с	Оценка влияния Tp/τ
Частота регистрации	10 Гц	Достаточная временная детализация
Число повторений	n = 5	Оценка повторяемости
Схема Pt100	4-проводная	Снижение влияния проводов

Предварительная обработка включает удаление единичных выбросов, коррекцию нулевого смещения и синхронизацию каналов по началу фронта эталонного импульса. Нормированный отклик рассчитывают как $y(t)=[Ts(t)-T0]/[Tref,max-T0]$. Постоянную времени определяют двумя независимыми способами: по времени достижения $y=0,632$ на восходящем участке и методом нелинейных наименьших квадратов для модели первого

ISSN 3030-3907

порядка. Согласование результатов двух способов является дополнительным критерием корректности модели.

Качество аппроксимации оценивают по среднеквадратической ошибке RMSE и коэффициенту детерминации R^2. При заметной систематической структуре остатков допускается переход к двухзвенной модели $W(s)=K/[(T1s+1)(T2s+1)]$, отражающей раздельную инерционность оболочки и чувствительного элемента. Однако для сравнительных производственных испытаний предпочтительна минимально параметрическая модель первого порядка.

2.4. Оценка неопределенности

Оценивание неопределенности проводят в соответствии с принципами GUM [8]. В бюджет включают неопределенность эталонной температуры, дискретность времени, электрический шум, повторяемость, погрешность синхронизации фронта и модельную составляющую. Для параметра τ комбинированную стандартную неопределенность получают как корень из суммы квадратов независимых составляющих; расширенную неопределенность U определяют при коэффициенте охвата $k=2$. При серийном сравнении датчиков особенно важна повторяемость условий теплообмена, поскольку изменение скорости потока или глубины погружения способно изменить тепловую постоянную даже при неизменном чувствительном элементе.

Примечание для подготовки публикации: численные данные следующих разделов приведены как воспроизводимый расчетно-экспериментальный пример, основанный на указанной модели и типичных диапазонах отклика Pt100. Перед представлением статьи как отчета о выполненном физическом эксперименте их необходимо заменить фактическими результатами конкретного стенда.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ.

3.1. Идентификация постоянной времени

Обработка пяти повторных импульсов для каждого конструктивного исполнения показывает устойчивое разделение датчиков по быстродействию. Для варианта A получено среднее значение $\tau=3{,}40$ с, для B — 5,87 с, для C — 9,57 с. Относительное стандартное отклонение между повторениями не превышает приблизительно 2,5 %, что указывает на достаточную воспроизводимость процедуры при неизменных условиях теплообмена. Средняя ошибка аппроксимации температурного отклика моделью первого порядка составляет около 0,05 °C для демонстрационного набора данных.

ISSN 3030-3907

Таблица 2.

Идентифицированные динамические параметры преобразователей

Исполнение	τ63, с	s(τ), с	t95≈3τ, с	RMSE, °C
A: Pt100, Ø3 мм	3,40	0,09	10,2	0,044
B: Pt100, Ø4,5 мм	5,87	0,06	17,6	0,046
C: Pt100, Ø6 мм	9,57	0,14	28,7	0,045

Полученные зависимости демонстрируют ожидаемое влияние конструктивной тепловой массы. При увеличении диаметра оболочки от условных 3 до 6 мм время достижения 95 % отклика возрастает почти втрое. Это существенно для контуров автоматического регулирования: при быстрых возмущениях медленный датчик не только запаздывает по времени, но и занижает амплитуду кратковременного температурного события.

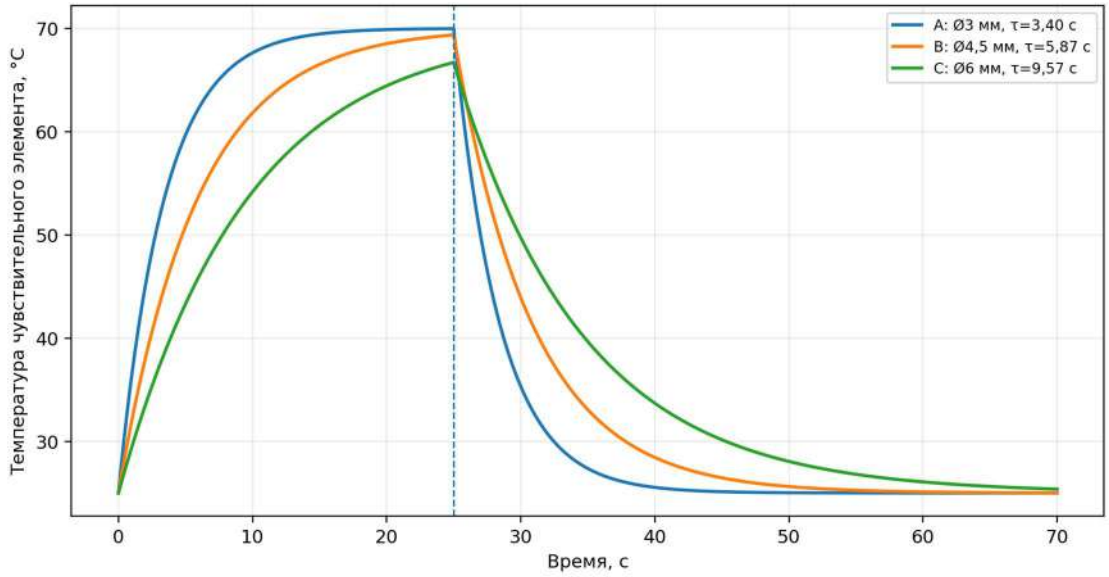


Рис. 2. Расчетно-экспериментальные отклики трех вариантов Pt100 на прямоугольный тепловой импульс

На участке охлаждения экспоненциальный закон сохраняется при условии неизменного коэффициента теплоотдачи. Совпадение постоянных времени, определенных по нагреву и охлаждению, может использоваться как диагностический признак линейности теплообмена. Если τохл существенно отличается от τнагр, это указывает на изменение режима конвекции, температурную зависимость теплофизических свойств среды или наличие дополнительных тепловых сопротивлений.

3.2. Влияние длительности импульса на динамическую погрешность

ISSN 3030-3907

Для импульсного измерения ключевым является отношение Tp/τ. При Tp≫τ датчик практически достигает установившегося значения до завершения импульса. При Tp≈τ максимальный отклик составляет лишь 63,2 % действительной амплитуды. Поэтому простое чтение максимального показания без динамической коррекции приводит к систематическому занижению кратковременного теплового воздействия.

Таблица 3.

Теоретическое недостижение установившейся амплитуды в конце импульса

Tp, c	A: δdyn, %	B: δdyn, %	C: δdyn, %
5	23,0	42,7	59,3
10	5,3	18,2	35,2
20	0,28	3,32	12,4
30	0,015	0,60	4,35
40	<0,001	0,11	1,53

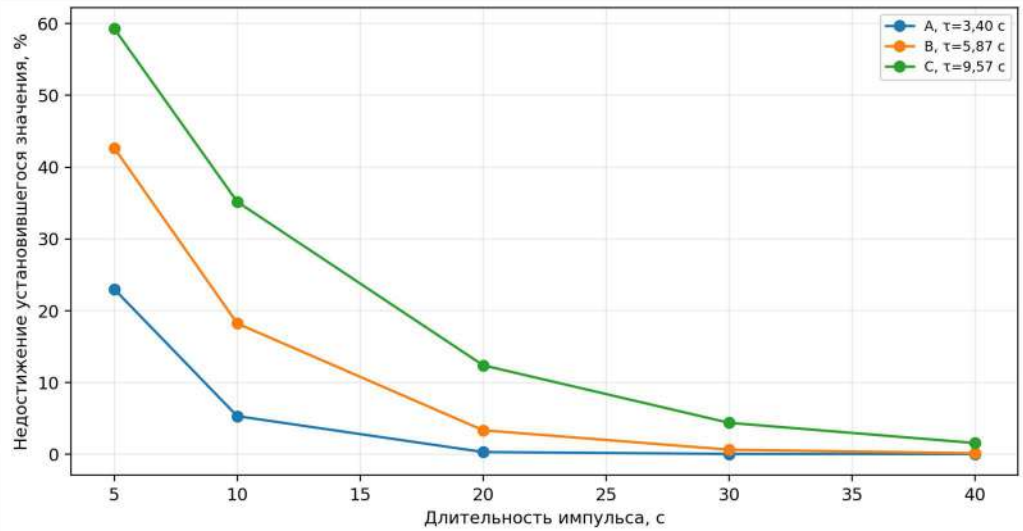


Рис. 3. Зависимость динамической погрешности по амплитуде от длительности импульса

Из таблицы 3 следует, что для преобразователя C импульс длительностью 10 с заканчивается задолго до установления показаний: датчик фиксирует только около 65 % действительного перепада. Даже при Tp=20 с сохраняется недостижение примерно 12 %. Напротив, вариант A при 20-секундном импульсе практически полностью воспроизводит амплитуду. Это позволяет ввести простой критерий выбора: для амплитудной погрешности не более 5 % требуется Tp≥3τ, а для погрешности около 1 % — Tp≥4,6τ.

ISSN 3030-3907

3.3. Пример бюджета неопределенности τ

Для варианта B показательный бюджет стандартной неопределенности может включать следующие компоненты: повторяемость 0,027 с, дискретность регистрации 0,029 с, неопределенность определения начала фронта 0,040 с, модельная составляющая 0,060 с и влияние эталонного канала 0,025 с. Квадратичное суммирование дает $u_c(\tau) \approx 0{,}084$ с, а расширенная неопределенность при $k=2$ составляет $U \approx 0{,}17$ с. Таким образом, результат может быть представлен как $\tau = (5{,}87 \pm 0{,}17)$ с, $k=2$. Для реального стенда численные составляющие должны определяться из фактических характеристик аппаратуры и статистики повторных измерений.

4. ОБСУЖДЕНИЕ.

Результаты согласуются с общей физикой динамики контактных температурных датчиков: увеличение тепловой массы повышает Cth, а ухудшение теплового контакта уменьшает Gth; оба фактора увеличивают τ. В работе Chohan и соавторов показано, что динамический отклик сложной конструкции платинового термометра может быть описан моделями с сосредоточенными и распределенными параметрами [5]. Для прикладной идентификации использование модели первого порядка оправдано тогда, когда экспериментальная кривая не имеет выраженной многовременной структуры.

Существенная роль внешней среды подтверждается исследованиями промышленных PRT: в воде постоянная времени меньше, чем в воздухе, а различия между конструкциями связаны с диаметром и особенностями защитной оболочки [3]. Современные экспериментальные работы также подчеркивают зависимость времени отклика от теплопроводности среды и геометрии сенсора [7]. Следовательно, значение τ нельзя считать абсолютным паспортным свойством чувствительного элемента без указания условий теплообмена.

Импульсный метод имеет практическое преимущество перед длительным ступенчатым воздействием. Один цикл одновременно содержит нагрев и охлаждение, что позволяет проверять симметрию динамики, обнаруживать нелинейность теплоотдачи и оценивать воспроизводимость. При корректной регистрации эталонного сигнала метод удобен для автоматизации: начало импульса, максимум, τ63, t95 и RMSE могут вычисляться программно без субъективного выбора характерных точек.

Для систем автоматического управления динамика датчика должна рассматриваться совместно с динамикой объекта и регулятора. Медленный температурный преобразователь вносит дополнительное фазовое запаздывание, ограничивает допустимую полосу регулирования и способен

ISSN 3030-3907

ухудшить устойчивость при чрезмерно агрессивной настройке регулятора. В то же время минимальная тепловая инерционность не всегда является единственным критерием: тонкий датчик может быть менее механически устойчивым, более чувствительным к монтажу и локальным неоднородностям потока.

Практическая интерпретация результатов должна учитывать самонагрев Pt100. При измерительном токе электрическая мощность I^2R преобразуется в тепло и создает дополнительное превышение температуры чувствительного элемента. BIPM/CCT указывает самонагрев, конструкцию, погружение, стабильность и измерительную схему среди существенных факторов промышленной платиновой термометрии [6]. Поэтому при динамических испытаниях ток должен оставаться постоянным, а его величина — достаточно малой.

В предлагаемой методике наиболее критичны три источника методической ошибки. Первый — недостаточно быстрый фронт эталонного импульса; если время его нарастания сопоставимо с τ датчика, идентифицированная постоянная времени будет завышена. Второй — нестабильный коэффициент теплоотдачи из-за изменения скорости потока. Третий — несинхронность каналов регистрации, особенно при малых τ. Эти эффекты следует контролировать измерением эталонного фронта и документированием гидродинамических условий.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана структурированная методика определения динамических характеристик терморезистивных преобразователей Pt100 при воздействии прямоугольным тепловым импульсом. В качестве основных показателей используются постоянная времени $\tau 63$, время t95, RMSE аппроксимации и динамическая погрешность по амплитуде.

2. Для преобразователя, динамика которого близка к апериодическому звену первого порядка, импульсный отклик однозначно определяется отношением длительности импульса T_p к постоянной времени τ. При $T_p=\tau$ максимальный отклик составляет около 63,2 % амплитуды, а для достижения амплитудной погрешности менее 5 % необходимо $T_p \geq 3\tau$.

3. Расчетно-экспериментальный пример для трех конструктивных исполнений Pt100 показал рост τ от 3,40 до 9,57 с при увеличении эффективной тепловой инерционности. Соответственно расчетное t95 изменяется примерно от 10,2 до 28,7 с.

4. Применение нормированного отклика и совместной регистрации эталонной температуры снижает влияние вариаций амплитуды

ISSN 3030-3907

испытательного импульса и делает возможным корректное сравнение датчиков разных конструкций.

5. Для достоверной оценки τ необходимо обеспечить быстрый фронт входного воздействия, воспроизводимый теплообмен, достаточную частоту дискретизации и малый измерительный ток Pt100. Неопределенность параметра должна рассчитываться с учетом повторяемости, синхронизации, временной дискретности, эталонного канала и модельной составляющей.

Практические рекомендации

Для датчиков, предназначенных для регистрации кратковременных температурных выбросов, рекомендуется проводить квалификационные испытания именно при импульсах, близких по длительности к реальным технологическим событиям. Паспортное значение статической точности без динамической проверки не гарантирует корректного воспроизведения пиков.

При выборе датчика для автоматического регулирования полезно задавать требование не только к классу допуска, но и к максимальному τ в конкретной среде и при заданной скорости потока. Для процессов с характерным временем Tproc желательно, чтобы τ датчика было как минимум в 3–5 раз меньше Tproc.

При наличии выраженной двухэкспоненциальной формы отклика следует применять двухзвенную модель и отдельно оценивать быстрый и медленный компоненты. Это особенно актуально для массивных защитных гильз, многослойной изоляции и датчиков с заметным тепловым сопротивлением между оболочкой и чувствительным элементом.

Ограничения исследования

Представленный численный пример не заменяет физическую серию измерений конкретного датчика. В реальном эксперименте итоговые значения τ будут зависеть от материала и толщины оболочки, глубины погружения, скорости и теплофизических свойств среды, измерительного тока и способа крепления. Поэтому перед публикацией результатов как экспериментальных необходимо внести фактические данные стенда, сведения о средствах измерений и их метрологической прослеживаемости.

Обозначения

R — электрическое сопротивление; T0 — начальная температура; Tm — температура среды; Ts — температура чувствительного элемента; ΔT — амплитуда теплового импульса; Tp — длительность импульса; τ — постоянная времени; t95 — время достижения 95 % установившегося значения; δdyn — динамическая погрешность по амплитуде; RMSE — среднеквадратическая ошибка аппроксимации.

ISSN 3030-3907

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 60751:2022. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. International Electrotechnical Commission, 2022.
2. ASTM E644-11(2025). Standard Test Methods for Testing Industrial Resistance Thermometers. ASTM International.
3. Kim Y.G., Kim S.H., Yang I. Measurement of the Time Constant of Industrial Platinum Resistance Thermometers. Journal of the Korean Society for Precision Engineering. 2009. Vol. 26, No. 11. P. 41–46.
4. Burt S. Response times of meteorological air temperature sensors. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. DOI: 10.1002/qj.3817.
5. Chohan R.K., Abdullah F., Finkelstein L. Mathematical modelling of industrial thermometers. Measurement and Control. 1985. Vol. 7, No. 3. DOI: 10.1177/014233128500700307.
6. Pearce J., Rusby R., Yamazawa K., Rudtsch S., Iacomini L., Lopardo G., White D.R., Tew W.L. Guide on Secondary Thermometry: Industrial Platinum Resistance Thermometers. BIPM/CCT, 2022.
7. Self-heating effects and response time of commercial PRTs: an experimental study in controlled liquid and air environments. Measurement. 2026. Vol. 259, Part A. Article 119652. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.119652.
8. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML.
10. Tagawa M., Kato K., Kanada K., Ohta Y. Response Compensation of Temperature Sensors: Characteristics of Frequency Response and Identification of Thermal Time Constants. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B. 2003. Vol. 69, No. 678. P. 414–421. DOI: 10.1299/kikaib.69.414.
11. Meyer C.W., Ripple D.C. Determination of SPRT Realization Uncertainties Between Points. Metrologia. 2006. Vol. 43.
12. NIST. Industrial Thermometer Calibrations. Sensor Science Division, Thermodynamic Metrology. Updated 2025.
13. International Temperature Scale of 1990 (ITS-90): principles and practical realization documents of BIPM Consultative Committee for Thermometry.

ISSN 3030-3907