

На правах рукописи



**Федосов Иван Игоревич**

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ САМОДИАГНОСТИКИ  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В АСУ ТП**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации,  
статистика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2024

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** **Шестаков Александр Леонидович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-измерительной техники ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Официальные оппоненты:** **Королев Павел Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-измерительные системы и технологии» ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

**Клячкин Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

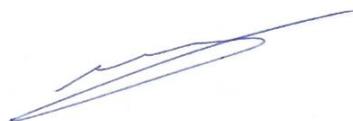
Защита состоится 24 декабря 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.437.02 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», расположенном по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», а также на сайте <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243702-d-21229803/fedosov-ivan-igorevich>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по адресу 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет, тел. (351) 267-91-23.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., доцент



А.В. Голлай

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Измерения в промышленности играют важнейшую роль в обеспечении непрерывной работы производства и качества выходного продукта. Процесс цифровизации производства и перехода к концепции Industry 4.0 включает, в том числе, внедрение большого количества средств измерений, объединенных в сенсорные сети. При этом одним из ключевых вопросов эффективности сенсорных сетей остается достоверность получаемых данных об измеряемых физических величинах.

Реализация многих технологических процессов в промышленности требует информации о температуре промышленного оборудования и технологических процессов. Непрерывный контроль температуры в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП) определяет качество и эффективность работы оборудования, а также безопасность технологического процесса. В качестве средств измерения температуры в АСУ ТП наибольшее распространение получили термоэлектрические преобразователи (ТЭП) за счет широкого диапазона измерения температур, относительно высокой точности измерения и сравнительно низкой стоимости. Однако эксплуатация ТЭП в промышленных условиях приводит к изменению термоэлектрических свойств термопарных материалов и росту погрешности измерения температуры.

Достоверность показаний средств измерения может быть обеспечена комплексом мер. К таким мерам относят соблюдение методики измерений, периодическую поверку, а также разработку и внедрение интеллектуальных датчиков с возможностью самодиагностики. Идея интеллектуального датчика рассматривалась Таймановым Р. Е., Сапожниковой К. В., Clarke D. W., Henry M. P., которыми были сформулированы основные принципы функционирования таких датчиков. В том числе, сформирован подход к качественной оценке достоверности результата измерения датчика на основе статусов. Также в работах показано, что увеличение доли интеллектуальных средств измерения повысит достоверность получаемой информации, что увеличит эффективность алгоритмов управления и принятия решений в АСУ ТП.

Существующие исследования рассматривают различные подходы к самодиагностике датчиков температуры на основе термоэлектрических преобразователей, включая датчик с несколькими независимыми термопарами; датчик с термопарой и реперной ячейкой с фазовым переходом первого рода; датчик с возможностью дополнительного токового нагрева термопары; датчик в виде ТЭП с числом термоэлектродов больше двух. Описанные подходы позволяют сформировать дополнительную информацию о состоянии ТЭП на основе различных физических принципов, однако, все рассмотренные решения имеют ограничения, связанные с возможностью проведения самодиагностики ТЭП в каждой точке измерения, устойчивостью к параметрам технологического процесса и величине обнаруживаемого дрейфа ТЭП. Следовательно, разработка и исследование новых методов получения и обработки информации для повышения достоверности контроля температуры в АСУ ТП с помощью ТЭП представляет собой актуальную задачу.

**Цель работы** – предложить новые алгоритмы обработки информации для оценки достоверности измерения температуры с использованием термоэлектрических преобразователей в АСУ ТП.

**Задачи исследования:**

- 1) разработать методику получения дополнительной информации для самодиагностики ТЭП на основе новой измерительной схемы;
- 2) разработать имитационную модель изменения фактической статической характеристики ТЭП относительно номинальной статической характеристики для формирования синтетических данных ТЭП с различной степенью деградации;
- 3) разработать метод обработки получаемой дополнительной информации от четырехэлектродного ТЭП для формирования результата измерения и вектора диагностических признаков;
- 4) разработать метод оценки достоверности измерения четырехэлектродного ТЭП на основе статуса результата измерений и критерий назначения статусов;

5) экспериментально оценить адекватность полученной имитационной модели и алгоритмов обработки информации для четырехэлектродного ТЭП.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы обработки информации для самодиагностики и оценки достоверности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями в АСУ ТП.

**Методы исследования** основаны на теории системного анализа, имитационном моделировании систем, методе оптимизации Левенберга-Марквардта, непараметрическом статистическом методе проверки гипотезы об однородности распределений Лемана-Розенблатта, теории планирования эксперимента.

### **Научная новизна**

1. Разработана имитационная модель и алгоритм формирования ансамбля синтетических данных для двухпроводной и четырехпроводной измерительных схем ТЭП, позволяющие воспроизводить фактические статические характеристики ТЭП с задаваемой степенью отклонения от номинальных статических характеристик для последующего использования синтетических данных при разработке методов самодиагностики ТЭП.

2. Предложен метод валидации имитационной модели и алгоритма формирования ансамбля синтетических ТЭП на основе метода коррелированной проверки с использованием непараметрического статистического критерия Лемана-Розенблатта.

3. Разработаны методы обработки измеряемых ТЭДС в четырехэлектродном ТЭП, позволяющие сформировать результат измерения, устойчивый к дрейфу характеристик отдельных термоэлектродов, а также выделить вектор диагностических признаков для самодиагностики четырехэлектродного ТЭП.

4. Разработана методика формирования статуса для каждого измерения четырехэлектродного ТЭП и предложена система из трех статусов ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ, каждый из которых характеризует достоверность полученного результата измерения ТЭП относительно уровня допускаемых отклонений.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Методика получения дополнительной информации о состоянии ТЭП на основе четырехэлектродной измерительной схемы и имитационная модель ТЭП для формирования синтетических данных с различной степенью отклонения фактических статических характеристик отдельных термоэлектродов в четырехэлектродном ТЭП от номинальных статических характеристик.

2. Метод обработки информации в четырехэлектродном ТЭП для формирования результата измерения и вектора диагностических признаков.

3. Метод обработки информации в четырехэлектродном ТЭП для оценки достоверности показаний ТЭП на основе статуса результата измерения и критерий назначения статуса результата измерения.

4. Алгоритмическое обеспечение для обработки информации о векторе термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) для синтетических или экспериментальных четырехэлектродных ТЭП.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» в следующих областях исследования (пунктах паспорта специальности):

**п.3:** разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта;

**п.4:** разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта;

**п.5:** разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

**Достоверность результатов работы** подтверждена корректным применением теоретических методов системного анализа и имитационного моделирования, результатом имитационного моделирования и статистической

проверкой разработанных методов обработки информации на имитационной модели, экспериментальной проверкой адекватности предложенных имитационной модели и алгоритмов обработки информации.

**Теоретическая значимость работы** заключается:

– в разработанной имитационной модели фактической статической характеристики термоэлектрического преобразователя и алгоритма генерирования синтетических данных для двухэлектродного и четырехэлектродного ТЭП;

– в предложенной процедуре валидации имитационной модели с использованием метода коррелированной проверки и критерия однородности;

– в разработке концепции формирования статуса результата измерения, методов обработки информации и критерия назначения статуса для ТЭП.

**Практическая значимость работы** заключается

– в предложенном алгоритме генерирования синтетических данных для двухэлектродных и четырехэлектродных измерительных схем ТЭП (свидетельство на программу для ЭВМ №2023683816);

– в предложенной измерительной схеме ТЭП с возможностью формирования дополнительной информации для повышения достоверности измерения температуры (патент на полезную модель №227175);

– в разработанном способе оценки достоверности результата измерения четырехэлектродного ТЭП (патент на изобретение №2789611), реализованном в соответствующем алгоритмическом обеспечении (свидетельство на программу для ЭВМ № 2024664023).

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы были доложены на следующих конференциях и семинарах:

1. XXII Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике (г. Москва, 2020).

2. Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) (г. Екатеринбург, 2020).

3. Круглый стол «Интеллектуальное производство» (г. Челябинск, 2022).

4. 2023 Global Smart Industry Conference (г. Челябинск, 2023).

5. 33rd Symposium Metrology and Metrology Assurance (Sozopol, 2023).

6. 34rd Symposium Metrology and Metrology Assurance (Sozopol, 2024).

**Публикация результатов работы.** По материалам диссертационной работы опубликовано 4 статьи, в том числе 3 публикации в изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (К1 и К2), 1 публикация в зарубежном издании, рецензируемом в базе Scopus. Получены 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель и 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 97 источников. Диссертационная работа изложена на 150 страницах, включая 62 рисунка, 15 таблиц и 1 приложение.

**Реализация результатов исследования.** Полученные результаты диссертационной работы внедрены в АО НИИ НПО «ЛУЧ» (Росатом) в задачах контроля температуры объектов использования атомной энергии.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и отражена научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** выполнен анализ применения термоэлектрических ТЭП в АСУ ТП и показаны негативные последствия роста погрешности измерения температуры с использованием ТЭП, приводящие к снижению эффективности и опасным режимам технологических процессов АСУ ТП.

Исследованы причины роста погрешности измерения ТЭП и показано, что воздействие типовых факторов технологических процессов, таких как высокие температуры, окислительные и восстановительные среды, циклический нагрев и охлаждение приводит к изменению характеристик ТЭП. Основной вклад в погрешность измерения ТЭП вносит изменение химического состава и структуры термоэлектродов, а также возникновение в них неоднородности.

Существующие подходы к самодиагностике термоэлектрических преобразователей позволяют сформировать дополнительную информацию о состоянии ТЭП на основе различных физических принципов. Однако, все рассмотренные решения имеют ограничения по величине обнаруживаемого дрейфа ТЭП, возможности проведения самодиагностики ТЭП в каждой точке измерения и устойчивости метода самодиагностики к параметрам технологического процесса.

**Во второй главе** описаны измерительная схема термоэлектрического преобразователя с возможностью получения дополнительной диагностической информации, предложен способ построения и валидации имитационной модели отклонения фактической статической характеристики ТЭП от номинальной.

Промышленные термопары представляют собой термоэлектрические преобразователи из двух термоэлектродов, объединенных в общий спай. Сформированный спай термопары помещается в зону измеряемой температуры, а свободные концы термоэлектродов подключаются к измерительному прибору. Тогда, возникающее значение термоэлектродвижущей силы (ТЭДС)

$$E_{AB}(T, T_{\text{хол}}) = \int_{T_{\text{хол}}}^T (S_A(T) - S_B(T)) dT = e_A(T, T_{\text{хол}}) - e_B(T, T_{\text{хол}}), \quad (1)$$

где  $T, T_{\text{хол}}$  – температура рабочего и холодного спаев термопары;  $E_{AB}(T, T_{\text{хол}})$  – ТЭДС термопары, состоящей из проводников А и В;  $S_A(T), S_B(T)$  – дифференциальные ТЭДС проводников;  $e_A(T, T_{\text{хол}}), e_B(T, T_{\text{хол}})$  – индивидуальные ТЭДС отдельных проводников термопары. Термоэлектрические свойства ТЭП полностью определены дифференциальной ТЭДС проводников  $S_A(T), S_B(T)$ , которая зависит от физико-химических свойств материалов и температуры процесса. Для стандартного двухэлектродного ТЭП в каждой температурной точке  $T$  возможно получить одно значение ТЭДС  $E_{AB}$ .

В данной работе предложена новая измерительная схема термоэлектрического преобразователя, позволяющая получить дополнительную информацию о состоянии ТЭП. Предлагаемая измерительная схема включает две термопары из стандартных термопарных материалов с нормированными характеристиками, объединенных в общий спай (рисунок 1). В результате, на выходе четырехэлектродного ТЭП формируется вектор ТЭДС  $\vec{E}_{ij}(T)$

$$\vec{E}_{ij} = \begin{bmatrix} E_{12}(T) \\ E_{13}(T) \\ E_{14}(T) \\ E_{23}(T) \\ E_{24}(T) \\ E_{34}(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1(T) - e_2(T) \\ e_1(T) - e_3(T) \\ e_1(T) - e_4(T) \\ e_2(T) - e_3(T) \\ e_2(T) - e_4(T) \\ e_3(T) - e_4(T) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $e_1(T) \dots e_4(T)$  – индивидуальные ТЭДС отдельных термоэлектродов в составе ТЭП, возникающие при измеряемой температуре процесса  $T$  и температуре свободных концов  $T_{\text{хол}} = 0$ .

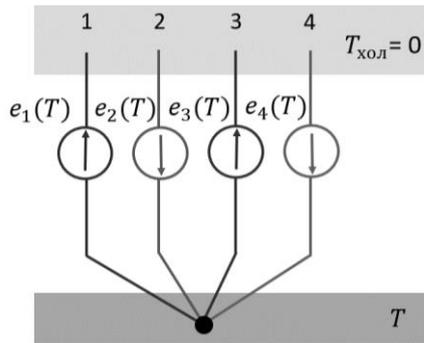


Рисунок 1 – Измерительная схема четырехэлектродного ТЭП

Исследование свойств предложенной измерительной схемы выполнено на основе имитационной модели фактической статической характеристики (ФСХ) термоэлектрического преобразователя. Модель позволяет получить различные варианты отклонения ФСХ ТЭП от номинальной статической характеристики (НСХ), которая описывает исправный ТЭП. В данной работе предложена структура имитационной модели ФСХ двухэлектродного ТЭП в виде полинома, который отличается от полинома НСХ  $M$ -младшими членами

$$E_{\text{мод}}^*(T) = a_0^* + a_1^*T + \dots + a_m^*T^m + a_M^*T^M + \sum_{i=M+1}^N a_i T^i + C(T), \quad (3)$$

где  $E_{\text{мод}}^*(T)$  – моделируемая ТЭДС термопары;  $T$  – заданная температура процесса;  $a_0^* \dots a_M^*$  – коэффициенты при младших степенях полинома;  $a_{M+1} \dots a_N$  – коэффициенты при старших степенях полинома;  $C(T)$  – неполиномиальное слагаемое, входящее в состав НСХ для некоторых типов ТЭП. Младшие коэффициенты ФСХ ТЭП  $a_m^*$  для  $m = 0 \dots M$  изменяются следующим образом

$$a_m^* = a_m \pm \Delta a_m = a_m \pm p \cdot a_m, \quad (4)$$

где  $\Delta a_m$  – отклонение моделируемого коэффициента  $a_m^*$  от номинального значения  $a_m$ ;  $p$  – случайная величина для моделирования  $a_m^*$ , лежащая в некотором

диапазоне  $p \in [0 \dots p_{max}]$ . В данном исследовании для моделирования ФСХ использованы младшие коэффициенты от 0 до 3 степени, равномерный закон распределения случайной величины  $p$  и максимальный уровень изменения каждого коэффициента  $p_{max}$ , который зависит от нормируемого максимального отклонения ФСХ ТЭП от НСХ  $\Delta T_{max}(T)$ .

На основе предложенной модели разработан алгоритм получения синтетических двухэлектродных ТЭП с задаваемой степенью отклонения ФСХ от НСХ в диапазоне температур  $T_k \in [T_{min}, T_{max}]$ ,  $k = 1 \dots K$ , где  $K$  – количество температурных точек в диапазоне моделирования. Алгоритм позволяет сгенерировать ансамбль синтетических ТЭП с заданной долей измерений  $D$  за пределом допуска

$$D = \frac{\sum_{q=1}^Q \left(\frac{r_q}{K}\right)}{Q}, \quad (5)$$

где  $r_q$  – число значений температур  $T_{mod\ k}^*$  синтетических ТЭП, для которых  $\Delta T_{mod\ k}^* \geq \Delta T_{доп}(T_k)$ ;  $\Delta T_{доп}(T_k)$  – допускаемое отклонение в соответствующей температурной точке  $T_k$ ;  $Q$  – количество ТЭП в ансамбле. Полученный ансамбль синтетических ТЭП описывается матрицей младших коэффициентов  $A_{mod}^*$ .

Для проверки адекватности имитационной модели разработана процедура валидации из 3 этапов. На первом этапе валидации необходимо оценить, насколько согласуются используемые в модели допущения с теорией. Полиномиальное описание НСХ ТЭП принято в стандартах и следует из теории термоэлектрических цепей, при этом в качестве функции НСХ используют полиномом 8...10 степени. Для повышения точности измерения применяют процедуру калибровки ТЭП, которая строится как коррекция НСХ с использованием полинома 1...3 степени. В предложенной имитационной модели предложен обратный подход, позволяющий смоделировать малые отклонения ФСХ ТЭП от НСХ с помощью младших коэффициентов полинома НСХ от 0 до 3 степени. Поскольку априорные данные об изменении отдельных коэффициентов НСХ при деградации ТЭП отсутствуют, имитационная модель использует равномерный закон распределения. Равномерный закон позволяет получить максимально разнообразные варианты

отклонения ФСХ ТЭП от НСХ, в том числе наиболее трудные для обнаружения при самодиагностике. Таким образом, предложенные структура и параметры имитационной модели согласуются с теоретическим описанием НСХ ТЭП и подходами имитационного моделирования.

На втором этапе валидации необходимо оценить принципиальную способность имитационной модели ТЭП описывать отклонения ФСХ ТЭП от НСХ. Оценка проводится с использованием исторических экспериментальных данных о ТЭП из различных источников, представленных в виде матрицы  $\{T_{\text{эк}}, E_{\text{эксп.к}}^*\}_{k=1}^K$  для каждого ТЭП, где  $T_{\text{эк}}$  – фактическое значение температуры процесса, полученное эталонным средством измерения,  $E_{\text{эксп.к}}^*$  – измеренное значение ТЭДС исследуемого ТЭП,  $K$  – число экспериментальных точек. Полученные экспериментальные данные должны быть представлены для одного типа ТЭП в одинаковом диапазоне температур. Представим экспериментальные данные ТЭП с использованием уравнения имитационной модели (3), получим следующую систему относительно неизвестных младших коэффициентов  $a_0^* \dots a_3^*$

$$\begin{cases} a_0^* + a_1^* T_{\text{э1}} + a_2^* T_{\text{э1}}^2 + a_3^* T_{\text{э1}}^3 + V(T_{\text{э1}}) = E_{\text{эксп.1}}^* \\ \dots \\ a_0^* + a_1^* T_{\text{эк}} + a_2^* T_{\text{эк}}^2 + a_3^* T_{\text{эк}}^3 + V(T_{\text{эк}}) = E_{\text{эксп.к}}^* \\ \dots \\ a_0^* + a_1^* T_{\text{эк}} + a_2^* T_{\text{эк}}^2 + a_3^* T_{\text{эк}}^3 + V(T_{\text{эк}}) = E_{\text{эксп.К}}^* \end{cases} \quad (6)$$

где  $V(T) = \sum_{i=M+1}^N a_i T^i + C(T)$  – слагаемое, не включающее искомым вектор младших коэффициентов. В матричном виде система имеет вид

$$\mathbf{T}\mathbf{w} + \mathbf{V} = \mathbf{E}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{w} = \{a_0^*, a_1^*, a_2^*, a_3^*\}^T$  – вектор-столбец искомым младших коэффициентов;  $\mathbf{T}$  – измерений фактической температуры процесса

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & T_{\text{э1}} & T_{\text{э1}}^2 & T_{\text{э1}}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_{\text{эк}} & T_{\text{эк}}^2 & T_{\text{эк}}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_{\text{эк}} & T_{\text{эк}}^2 & T_{\text{эк}}^3 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{V} = \{V(T_{\text{э1}}), \dots, V(T_{\text{эк}}), \dots, V(T_{\text{эк}})\}^T$  – вектор-столбец свободных членов;

$\mathbf{E} = \{E_{\text{эксп.1}}^*, \dots, E_{\text{эксп.к}}^*, \dots, E_{\text{эксп.К}}^*\}^T$  – вектор-столбец измерения ТЭДС ТЭП.

Поскольку число уравнений  $K$  больше числа искомым младших коэффициентов в векторе  $\mathbf{w}$  и набор измерений  $\{T_{\text{эк}}, E_{\text{эксп } k}^*\}_{k=1}^K$  имеет случайные погрешности измерений, поиск наилучшего вектора  $\mathbf{w}$ , обеспечивающего решение системы (7), осуществлен на основе критерия минимизации функции ошибки между левой и правой частями системы

$$\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{E} - (\mathbf{T}\mathbf{w} + \mathbf{V}), \quad (8)$$

где  $\boldsymbol{\gamma} = \{\gamma_1, \dots, \gamma_k, \dots, \gamma_K\}^T$  – вектор-столбец ошибки аппроксимации. В качестве критерия минимизации при поиске вектора коэффициентов  $\mathbf{w}$  используем квадратичный критерий минимума функции ошибки  $Y(\mathbf{w})$

$$Y(\mathbf{w}) = \sum_{k=1}^K \gamma_k^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Результаты расчетов показали, что матрица  $\mathbf{T}^T\mathbf{T}$  при определенных условиях плохо обусловлена, что нарушает устойчивость получаемого решения. В связи с этим, для поиска вектора коэффициентов  $\mathbf{w}$  использован итерационный алгоритм Левенберга-Марквардта, который отличается высокой скоростью сходимости, позволяет находить решения для переменных, отличающихся на несколько порядков, и обладает встроенным параметром регуляризации для плохо обусловленных задач. Суть метода состоит в итерационном поиске вектора  $\mathbf{w}$

$$\mathbf{w}_{n+1} = \mathbf{w}_n + \Delta\mathbf{w}_n, \quad (10)$$

где  $n + 1$  – новый шаг моделирования;  $n$  – текущий шаг моделирования. Оценка приращения  $\Delta\mathbf{w}_n$  на  $n$ -ом шаге в алгоритме рассчитывается как

$$\Delta\mathbf{w}_n = (\mathbf{J}^T\mathbf{J} + \lambda \cdot \mathbf{I})^{-1}\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\gamma}_n), \quad (11)$$

где  $\boldsymbol{\gamma}_n$  – значение вектора-столбца ошибки аппроксимации на  $n$ -ом шаге алгоритма;  $\lambda$  – параметр регуляризации алгоритма;  $\mathbf{I}$  – единичная матрица;  $\mathbf{J}$  – матрица Якоби, которая составляется из значений частных производных функции  $E_{\text{мод}}^*(T)$  по каждому элементу вектора  $\mathbf{w}$  в точках  $T_{\text{эк}}$ .

Результатом аппроксимации каждой ФСХ ТЭП в ансамбле является вектор младших коэффициентов  $\mathbf{w}$ . Объединяя все полученные вектора, получаем ансамбль младших коэффициентов  $\mathbf{A}_{\text{эксп}}^*$ , рассчитанных на основе экспериментальных данных для исследуемых ТЭП.

Далее, введем метрику  $\xi_k$  – рассогласование между экспериментальными данными и их аппроксимацией в каждой  $k$ -ой температурной точке

$$\xi_k = |\Delta T_{\text{эксп } k}^* - \Delta T_{\text{мод } k}^*|, \quad (12)$$

где  $\Delta T_{\text{эксп } k}^*$  – отклонение температуры ТЭП от фактической температуры процесса (эталоны),  $\Delta T_{\text{мод } k}^*$  – отклонение температуры ТЭП от фактической температуры процесса в полученной аппроксимации. Величина  $\xi_k$  характеризует способность предложенной имитационной модели на основе изменения младших коэффициентов  $a_0^* \dots a_3^*$  воспроизводить отклонения ФСХ от НСХ, схожие с экспериментальными реализациями.

На третьем этапе валидации необходимо оценить подобие данных на выходе алгоритма генерирования синтетических данных и исторических экспериментальных данных о ФСХ ТЭП. Выходные данные алгоритма – ансамбль векторов младших коэффициентов  $A_{\text{мод}}^*$ , который имеет стохастическую природу за счет случайной величины  $p$  в уравнении моделирования коэффициентов. Выходные данные эксперимента – ансамбль векторов младших коэффициентов  $A_{\text{эксп}}^*$ , который имеет стохастическую природу за счет воздействия совокупности влияющих факторов на ТЭП в процессе эксплуатации. Сравнение ансамблей коэффициентов  $A_{\text{мод}}^*$  и  $A_{\text{эксп}}^*$  выполнено на основе метода коррелированной проверки, который обеспечивает надежность статистического сравнения.

Для сравнения выборок соответствующих коэффициентов  $U = \{a_{\text{мод } jm}^*\}_{j=1}^{Q_{\text{мод}}}$  и  $V = \{a_{\text{эксп } im}^*\}_{i=1}^{Q_{\text{эксп}}}$ ,  $m = 0 \dots 3$  использован непараметрический критерий однородности Лемана-Розенблатта. Критерий обеспечивает проверку нулевой гипотезы о том, что обе выборки  $U$  и  $V$  извлечены из неизвестных непрерывных распределений, принадлежащих одной генеральной совокупности. Статистика  $\omega$  критерия однородности Лемана-Розенблатта рассчитывается как

$$\omega = B \left[ Q_{\text{эксп}} \sum_{i=1}^{Q_{\text{эксп}}} (r_i - i)^2 + Q_{\text{мод}} \sum_{j=1}^{Q_{\text{мод}}} (s_j - j)^2 \right] - C, \quad (13)$$

где  $B = \frac{1}{Q_{\text{мод}} Q_{\text{эксп}} (Q_{\text{мод}} + Q_{\text{эксп}})}$ ;  $C = \frac{4Q_{\text{мод}} Q_{\text{эксп}} - 1}{6(Q_{\text{мод}} + Q_{\text{эксп}})}$ ;  $r_i$  – порядковый номер  $i$ -го коэффициента  $a_{\text{эксп } im}^*$  в объединенном вариационном ряду;  $Q_{\text{эксп}}$  – количество

ТЭП в выборке экспериментальных данных;  $s_j$  – порядковый номер  $j$ -го коэффициента  $a_{\text{мод } jm}^*$  в объединенном вариационном ряде;  $Q_{\text{мод}}$  – количество ТЭП в выборке синтетических данных,  $m$  – номер младшего коэффициента,  $m = 0 \dots 3$ . В случае, когда значение критической статистики не превосходит порогового значения при заданном уровне значимости  $\alpha$ , нулевая гипотеза об однородности выборок соответствующих коэффициентов не отклоняется.

Разработанная схема валидации применена для ТЭП хромель-алюмель (ХА), для которой из доступных экспериментальных данных было получено 45 наборов измерений вида  $\{T_{\text{эк}}, E_{\text{эксп.к}}^*\}_{k=1}^K$ , из которых 34 представлено в одинаковом диапазоне  $T_{\text{эк}} \in 100 \dots 800^\circ\text{C}$  с шагом  $100^\circ\text{C}$ ,  $K = 8$ . В итоге, по найденным измерениям ТЭП сформирован ансамбль экспериментальных данных, объем  $Q = 33$ . Расчет метрики  $\xi_k$  показывает, что величина рассогласования между моделью и экспериментом не превосходит 0,5 допускаемого отклонения ТЭП  $\Delta T_{\text{доп}}(T_k)$  для всех измерений, а для 95% измерений в ансамбле  $\xi_k \leq 0.25\Delta T_{\text{доп}}$ . При этом проверка однородности синтетических и экспериментальных данных подтверждает гипотезу об однородности для уровня  $\alpha = 0,01 \dots 0,05$  (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты проверки однородности для ТЭП ХА

	$a_0^*$	$a_1^*$	$a_2^*$	$a_3^*$
$\omega$	0,64	0,40	0,37	0,39
$\alpha$	0,01	0,05	0,05	0,05

Адаптация имитационной модели ФСХ ТЭП для предложенной четырехэлектродной измерительной схемы ТЭП (рисунок 1) заключается в переходе к моделированию ФСХ отдельных термоэлектродов в составе ТЭП. Индивидуальная ТЭДС  $e_{\text{мод}}^*(T)$  каждого термоэлектрода имеет вид

$$e_{\text{мод}}^*(T) = b_0^* + \dots + b_m^* T^m + \dots + b_M^* T^M + \sum_{i=M+1}^N b_i T^i + C(T), \quad (14)$$

где  $T$  – температура процесса;  $b_0 \dots b_M$  – коэффициенты при младших степенях полинома;  $b_{M+1} \dots b_N$  – коэффициенты при старших степенях полинома;  $C(T)$  – неполиномиальное слагаемое. Тогда компоненты вектора ТЭДС  $\vec{E}_{ij}^*_{\text{мод}}$  в четырехэлектродном ТЭП

$$E_{ij \text{ мод}}^*(T) = e_{\text{мод } i}^*(T) - e_{\text{мод } j}^*(T), \quad (15)$$

где  $(i, j = \overline{1 \dots 4}, i \neq j)$  – номер термоэлектрода в составе четырехэлектродного ТЭП. Уравнение моделирование индивидуальных ТЭДС  $e_{\text{мод}}^*(T)$  основано на изменении младших коэффициентов ФСХ термоэлектрода  $b_m^*$ , которые при  $m = 0 \dots M$  изменяются следующим образом

$$b_m^* = b_m \pm \Delta b_m = b_m \pm p \cdot b_m, \quad (16)$$

где  $\Delta b_m$  – отклонение моделируемого коэффициента  $b_m^*$  от номинального значения  $b_m$ ;  $p$  – случайная величина для моделирования  $b_m^*$ , лежащая в некотором диапазоне  $p \in [0 \dots p_{\text{max}}]$ , где  $p_{\text{max}}$  зависит от нормируемого максимального отклонения ФСХ от НСХ  $\Delta T_{\text{max}}(T)$ . Параметры имитационной модели и алгоритм формирования синтетических данных четырехэлектродного ТЭП получены аналогично случаю моделирования двухэлектродного ТЭП.

**В третьей главе** представлены алгоритмы обработки информации для формирования результата и статуса измерения четырехэлектродного ТЭП (рисунок 2). Исследование и настройка алгоритмов на основе синтетических данных с различной долей измерений за пределом допуска:  $D = 0\%$  (номинальный ТЭП),  $D = 10\%$  (ТЭП в процессе эксплуатации) и  $D = 50\%$  (предаварийный ТЭП). В работе были рассмотрены следующие четырехэлектродные ТЭП: хромель-алюмель-нихросил-нисил (ХАНН), хромель-копель-железо-константан (ХКЖК), хромель-алюмель-хромель-копель (ХАХК).

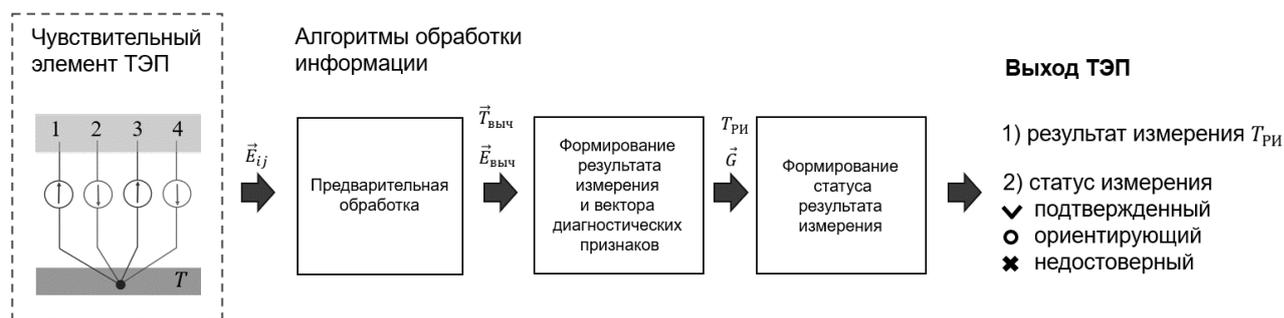


Рисунок 2 – Схема обработки информации для четырехэлектродного ТЭП

Далее все рассуждения по обработке информации рассмотрены на примере ТЭП ХАНН. Предварительная обработка вектора ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$  включает выделение высокочувствительных к температуре пар термоэлектродов, дифференциальная

ТЭДС которых выше 30 мкВ/°С. Полученные по данным парам ТЭДС будут использоваться для вычисления вектора температур  $\vec{T}_{\text{выч}}$  ТЭП ХАНН

$$\vec{T}_{\text{выч}} = \{T_{\text{ХА}}, T_{\text{НихрНис}}, T_{\text{НихрА}}, T_{\text{НисХ}}\}, \quad (17)$$

где  $T_{\text{ХА}}, T_{\text{НихрНис}}$  – температуры, вычисляемые по стандартным обратным функциям для термопар «хромель-алюмель» и «нихросил-нисил»;  $T_{\text{НихрА}}, T_{\text{НисХ}}$  – температуры пар «нихросил-алюмель» и «нисил-хромель», вычисляемые по индивидуальным обратным функциям. Остальные ТЭДС с низкой чувствительностью к температуре объединяются в вектор ТЭДС  $\vec{E}_{\text{выч}}$  ТЭП ХАНН

$$\vec{E}_{\text{выч}} = \{E_{\text{НихрХ}}, E_{\text{НисА}}\}, \quad (18)$$

где  $E_{\text{НихрХ}}, E_{\text{НисА}}$  – ТЭДС пар «нихросил-хромель» и «нисил-алюмель».

Расчет результата измерения четырехэлектродного ТЭП выполнен на основе взвешенного среднего элементов  $\vec{T}_{\text{выч}}$

$$T_{\text{РИ}} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i T_{\text{выч } i}}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad (19)$$

где  $w_i$  – веса каждой компоненты  $T_{\text{выч } i}$ ,  $N$  – число элементов в векторе  $\vec{T}_{\text{выч}}$ . Для стандартных термоэлектродных пар значения весов приняты  $w_i = 1$ , для дополнительных термоэлектродных пар принято  $w_i = 0,5$ . Сравнение результата измерения четырехэлектродного ТЭП ХАНН выполнено с результатами измерения по стандартным парам («нихросил-нисил» и «хромель-алюмель») на рисунке 3.

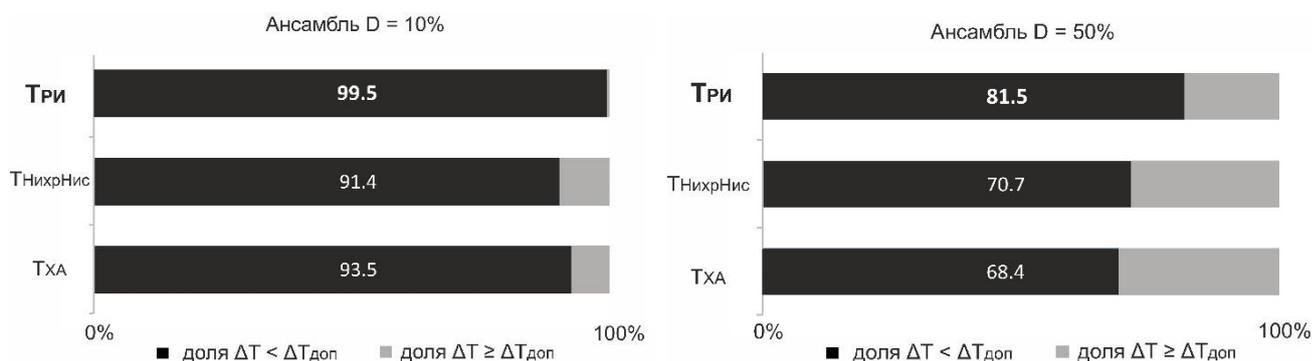


Рисунок 3 – Схема обработки информации для четырехэлектродного ТЭП

В результате сравнения на синтетических ансамблях  $D = 10\%$  и  $D = 50\%$ , доля измерений в пределах допуска для четырехэлектродного ТЭП больше на 6–13% по сравнению со стандартными термопарами.

Вектор диагностических признаков четырехэлектродного ТЭП  $\vec{G}$  включает четыре элемента, два из которых вычисляются по вектору температур  $\vec{T}_{\text{выч}}$ , два – по вектору ТЭДС  $\vec{E}_{\text{выч}}$

$$\vec{G} = \{R_0, IQR_0, \varepsilon_{\text{НихрХ}}, \varepsilon_{\text{НисА}}\}, \quad (20)$$

где  $R_0 = \frac{\max(\vec{T}_{\text{выч}}) - \min(\vec{T}_{\text{выч}})}{\Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{ри}})}$  – размах вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ , нормированный на вычисленную

величину допускаемого отклонения четырехэлектродного ТЭП  $\Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{ри}})$ ;

$IQR_0 = \frac{Q_1(\vec{T}_{\text{выч}}) - Q_3(\vec{T}_{\text{выч}})}{\Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{ри}})}$  – нормированное межквартильное расстояние вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ ,

при этом  $Q_1$  и  $Q_3$  соответственно первый и третий квартили вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ .

Параметры  $\varepsilon_{\text{НихрХ}} = \frac{|E_{\text{НихрХ}}^* - \hat{E}_{\text{НихрХ}}(T_{\text{ри}})|}{\Delta E_{\text{доп}}(T_{\text{ри}})}$  и  $\varepsilon_{\text{НисА}} = \frac{|E_{\text{НисА}}^* - \hat{E}_{\text{НисА}}(T_{\text{ри}})|}{\Delta E_{\text{доп}}(T_{\text{ри}})}$  – нормированные

невязки ТЭДС, определяемые как разность измеренного значения  $E_{\text{НихрХ}}^*$  и

$E_{\text{НисА}}^*$  ТЭДС и соответствующей оценки  $\hat{E}_{\text{НихрХ}}(T_{\text{ри}})$  и  $\hat{E}_{\text{НисА}}(T_{\text{ри}})$ , рассчитанной по

полученному результату измерения  $T_{\text{ри}}$  с использованием НСХ соответствующих

пар термоэлектродов,  $\Delta E_{\text{доп}}(T_{\text{ри}})$  – вычисленная величина допускаемого

отклонения ТЭДС четырехэлектродного ТЭП  $\Delta E_{\text{доп}}(T_{\text{ри}})$ .

Полученный вектор диагностических признаков  $\vec{G}$  является безразмерным, при этом для исправного ТЭП все элементы вектора

$$\vec{G} = \{0,0,0,0\}. \quad (21)$$

Чувствительность вектора диагностических признаков продемонстрирована для трех ТЭП ХАНН с различной степенью деградации (таблица 2).

Таблица 2 – Исследуемые ТЭП ХАНН при  $T = 900^\circ\text{C}$

Номер ТЭП	1	2	3
$T_{\text{ри}}, ^\circ\text{C}$	901,03	897,75	911,17
$\Delta T_{\text{ри}}, ^\circ\text{C}$	1,03	-2,25	-11,17
$\Delta T_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$	6,75	6,75	6,75

Изменение каждого элемента вектора диагностических признаков при переходе от ТЭП №1 из ансамбля  $D = 0\%$  к ТЭП №3 из ансамбля  $D = 50\%$  показаны на рисунке 4. Отметим, что с ростом отклонения  $\Delta T_{\text{ри}}$  все элементы вектора  $\vec{G}$  существенно возрастают.

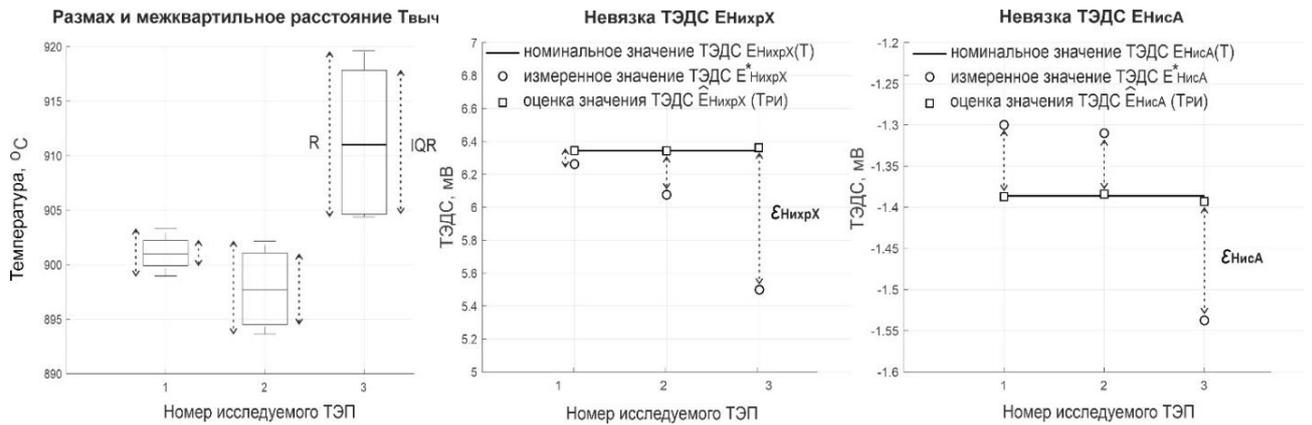


Рисунок 4 – Чувствительность элементов вектора  $\vec{G}$  к деградации ТЭП

На основе выделенного вектора диагностических признаков предложен подход к оценке достоверности каждого результата измерения четырехэлектродного ТЭП. Определим отклонение каждого элемента вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  и результата измерения  $T_{\text{ри}}$  от фактической температуры процесса

$$\Delta T_{\text{выч } m} = |T_{\text{выч } m} - T|, \quad (22)$$

$$\Delta T_{\text{ри}} = |T_{\text{ри}} - T|, \quad (23)$$

где  $m$  – номер элемента в векторе  $\vec{T}_{\text{выч}}$ . В процессе эксплуатации ТЭП последовательно проходит три метрологических состояния:

1. **Исправный ТЭП.** Отклонение всех элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  находятся в допуске ( $\Delta T_{\text{выч } m} < \Delta T_{\text{доп}}(T)$ ), тогда отклонение результата измерения  $T_{\text{ри}}$  гарантированно в допуске,  $\Delta T_{\text{ри}} < \Delta T_{\text{доп}}(T)$ .

2. **Нормальный ТЭП.** Отклонение одного или нескольких элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  вышли за допуск ( $\Delta T_{\text{выч } m} \geq \Delta T_{\text{доп}}(T)$ ), при этом отклонение результата измерения  $T_{\text{ри}}$  находится в пределах допуска,  $\Delta T_{\text{ри}} < \Delta T_{\text{доп}}(T)$ .

3. **Неисправный ТЭП.** Отклонение одного или нескольких элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  вышли за допуск ( $\Delta T_{\text{выч } m} \geq \Delta T_{\text{доп}}(T)$ ) и отклонение результата измерения  $T_{\text{ри}}$  также вышло за допуск,  $\Delta T_{\text{ри}} \geq \Delta T_{\text{доп}}(T)$ .

В работе введены три статуса для оценки достоверности результата измерения: ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ, которые определяются по совокупности элементов вектора  $\vec{G}$ . Границы статусов относительно обобщенного вектора диагностических признаков представлены на рисунке 5, где показан наихудший вариант с точки зрения чувствительности  $\vec{G}$ .

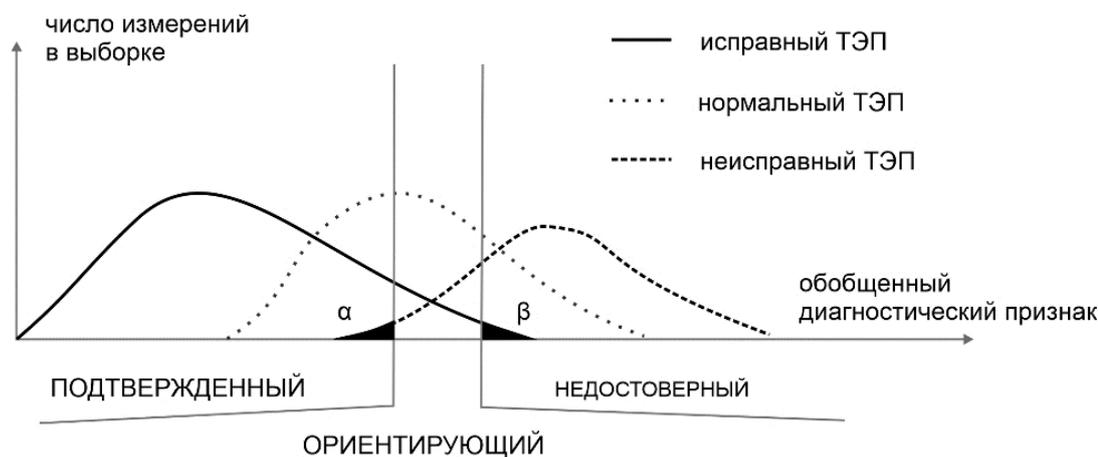


Рисунок 5 – Формирование статусов результата измерения ТЭП

Границы статусов зависят от вероятности пропуска неисправности  $\alpha$  и ложных срабатываний  $\beta$ , которые используются для формирования логических переменных  $s_\alpha$  и  $s_\beta$ . Определим границы статусов следующим образом

$$s_\alpha = ((R_0 < [R_0]_\alpha) \text{ И } (IQR_0 < [IQR_0]_\alpha)) \text{ И } \left( (\varepsilon_{\text{НихрХ}} < [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha) \text{ ИЛИ } (\varepsilon_{\text{НисА}} < [\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha) \right), \quad (24)$$

$$s_\beta = ((R_0 < [R_0]_\beta) \text{ ИЛИ } (IQR_0 < [IQR_0]_\beta)) \text{ И } \left( (\varepsilon_{\text{НихрХ}} < [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta) \text{ И } (\varepsilon_{\text{НисА}} < [\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta) \right), \quad (25)$$

где  $[R_0]_\alpha$ ,  $[IQR_0]_\alpha$ ,  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha$ ,  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha$  – пороговые значения элементов вектора  $\vec{G}$  для условия  $s_\alpha$ ,  $[R_0]_\beta$ ,  $[IQR_0]_\beta$ ,  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta$ ,  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta$  – пороговые значения для условия  $s_\beta$ . Введенные логические переменные используются в критерии назначения статусов результата измерений

ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ:  $s_\alpha = 1$ ;

ОРИЕНТИРУЮЩИЙ:  $(s_\alpha = 0) \text{ И } (s_\beta = 1)$ ; (26)

НЕДОСТОВЕРНЫЙ:  $s_\beta = 0$ .

Логические выражения (24) – (26) обеспечивают назначение статуса ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ только в случае выполнения неравенств в (24) для  $R_0$ ,  $IQR_0$  и хотя бы для одной из невязок ( $\varepsilon_{\text{НихрХ}}$  или  $\varepsilon_{\text{НисА}}$ ). В свою очередь, статус НЕДОСТОВЕРНЫЙ назначается, в случае, когда хотя бы одна из невязок  $\varepsilon_{\text{НихрХ}}$  или  $\varepsilon_{\text{НисА}}$  больше порогового значения или оба значения  $R_0$  и  $IQR_0$  больше порогового значения. Введенные статусы нацелены на раннее обнаружение роста отклонения результата измерения ТЭП от фактической температуры процесса.

После настройки пороговых значений для заданных уровней алгоритм оценки статусов результата измерений был протестирован на смешанном ансамбле синтетических данных ( $D = 0 \dots 50\%$ , 6600 измерений). На рисунке 6 показано распределение измерений по каждому из статусов.

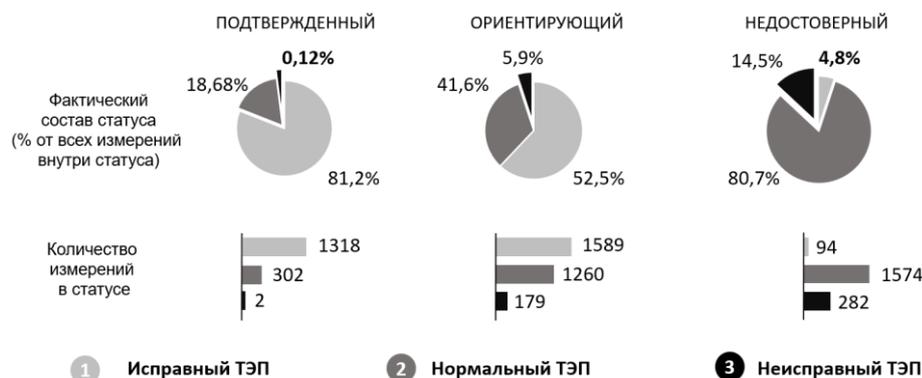


Рисунок 6 – Проверка алгоритма оценки статуса на смешанном ансамбле синтетических данных для ТЭП ХАНН

В четвертой главе приведены результаты экспериментальной проверки предложенной измерительной схемы, имитационной модели и алгоритмов обработки информации для четырехэлектродного ТЭП. Результаты определения результата и статуса измерения для ТЭП ХАНН после серии из 10 экспериментов представлены на рисунке 7, где видна чувствительность назначаемых статусов к росту отклонения вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  и результата  $T_{\text{ри}}$  от фактической температуры  $T$ .

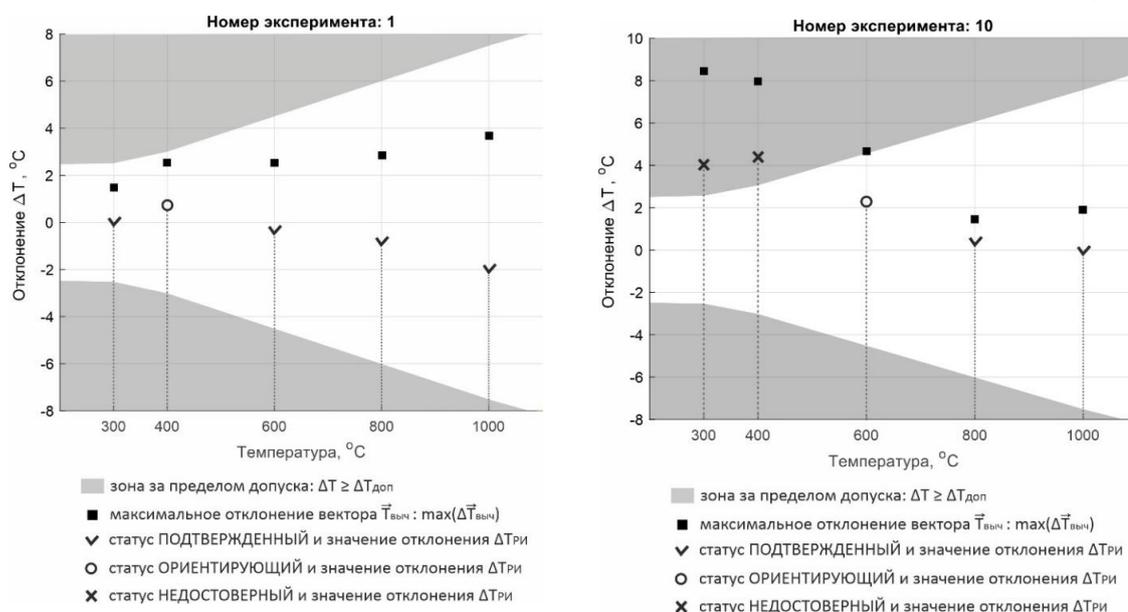


Рисунок 7 – Примеры оценки статуса результата измерения для ТЭП ХАНН в различной степени деградации

В заключении приведены основные выводы и результаты работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложены алгоритмы получения и обработки информации для оценки достоверности измерения температуры с использованием термоэлектрических преобразователей (ТЭП) в АСУ ТП.

1. Предложена новая измерительная схема ТЭП, которая включает четыре термоэлектрода из стандартных термопарных материалов, объединенные в общий спай. Четырехэлектродный ТЭП в каждой температурной точке  $T$  формирует вектор значений термоэлектродвижущей силы (ТЭДС)  $\vec{E}_{ij}$  вместо одного значения ТЭДС для обычной термопары. Разработана методика получения дополнительной информации на основе новой измерительной схемы для оценки достоверности измерения температуры с помощью ТЭП.

2. Разработана имитационная модель фактической статической характеристики (ФСХ) термоэлектрического преобразователя и алгоритмическое обеспечение для формирования синтетических данных двухэлектродных и четырехэлектродных ТЭП на основе имитационной модели. Имитационная модель позволяет получить разнообразные варианты синтетических ТЭП с настраиваемым уровнем отклонения ФСХ ТЭП от номинальной статической характеристики (НСХ). Модель основана на стохастическом моделировании коэффициентов полинома НСХ от 0 до 3 степени с использованием равномерно распределенной случайной величины.

3. Разработан метод валидации предложенной имитационной модели ФСХ ТЭП. Метод состоит из оценки соответствия выбранной структуры модели реальным ФСХ ТЭП и проверки однородности выходных синтетических данных модели и экспериментальных данных ТЭП. Разработанный метод валидации подтвердил адекватность имитационной модели двухэлектродного и четырехэлектродного ТЭП на экспериментальных данных.

4. Разработаны методы обработки измеряемого вектора ТЭДС в четырехэлектродном ТЭП для определения результата измерения ТЭП и формирования вектора диагностических признаков. Предложенный способ

определения результата измерения четырехэлектродного ТЭП на 5 – 25% уменьшает долю измерений ТЭП за пределом допуска по сравнению с стандартными термопарами в составе ТЭП. Компоненты вектора диагностических признаков изменяются в 1,5 – 5 раз при росте отклонения ФСХ ТЭП от НСХ и выходе результата измерения ТЭП за пределы допускаемых отклонений.

5. Предложен метод оценки статуса результата измерения ТЭП и критерий назначения статусов ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ на основе вектора диагностических признаков. Разработанный метод оценки статуса позволяет получить статус каждого измерения четырехэлектродного ТЭП с задаваемыми вероятностями пропуска неисправности  $\alpha$  и ложных срабатываний  $\beta$ . Настройка пороговых значений критерия назначения статусов выполняется с использованием синтетических данных для каждого типа ТЭП.

6. Разработано алгоритмическое обеспечение для обработки информации в четырехэлектродном ТЭП, позволяющее в каждой температурной точке диапазона ТЭП получить результат измерения температуры и статус результата измерения без необходимости калибровки каждого отдельного экземпляра ТЭП.

7. Выполнена экспериментальная проверка разработанной имитационной модели и алгоритмов обработки информации для четырехэлектродного ТЭП хромель-алюмель-нихросил-нисил (ХАНН). Алгоритм оценки адекватности модели четырехэлектродного ТЭП показал максимальную величину рассогласования между моделью и экспериментом не более 0,2 от допускаемого отклонения на полученном наборе экспериментальных данных. Метод формирования результата измерения четырехэлектродного ТЭП обеспечил число измерений ТЭП в пределах допуска на 9,2% больше по сравнению с термопарой «нихросил-нисил». Алгоритм оценки статусов результата измерения подтвердил возможность назначения трех статусов ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ для ТЭП в различной степени деградации, при этом полученные вероятности  $\alpha$  и  $\beta$  не превосходят заданный пороговый уровень 0,05.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Датчик температуры с функцией оценки достоверности результата измерений на основе новой измерительной схемы термоэлектрического преобразователя / И.И. Федосов // Автоматизация в промышленности. №11, 2023. – С. 39–45.
2. Алгоритм генерирования синтетических данных термопар на основе имитационной модели / И.И. Федосов, А.Л. Шестаков // Приборы и системы. Управление, контроль диагностика. №3, 2024. – 14 с.
3. Метод оценки статуса результата измерения для четырехэлектродной измерительной схемы термоэлектрического преобразователя / И.И. Федосов // Автоматизация в промышленности. №9, 2024 – С. 30–34.

### Публикации в изданиях, индексируемых Scopus:

4. Synthetic data generation for thermocouples. An original approach to simulation modelling of a measurement function / I. Fedosov, A. Shestakov // 2023 XXXIII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance, Sozopol, Bulgaria, 2023. – P. 1–5.

### Патенты:

5. Способ определения достоверности результатов измерения термоэлектрического преобразователя: пат. №2789611 Российская Федерация, МПК G01K 15/00, G01K 7/02 / И.И. Федосов, А.Л. Шестаков; ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»; заявка №: 2022117696, от 30.06.2022.
6. Термоэлектрический преобразователь: пат. №227175 Российская Федерация, МПК G01K 7/02 / И.И. Федосов, В.В. Синицин; ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»; заявка №: 2023124789, от 27.09.2023.
7. Свидетельство на программу для ЭВМ №2023683816 «Программа имитационного моделирования погрешности термопар»; заявка №2023682187 от 26.10.2023.
8. Свидетельство на программу для ЭВМ №2024664023 «Программа для оценки статуса результата измерения четырехэлектродного термоэлектрического преобразователя»; заявка №2024662391 от 03.06.2024.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FENU-2023-0010 (2023010ГЗ)).

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета  
Подписано в печать 18.10.2024. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,16.

Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 295/386.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.