

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)



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

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор Шестаков А.Л.

Челябинск – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В АСУ ТП И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИХ ТОЧНОСТИ НА ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ .....	10
1.1 Примеры использования ТЭП в АСУ ТП.....	10
1.2 Причины дрейфа характеристик ТЭП в процессе эксплуатации.....	14
1.3 Подходы к обеспечению метрологической достоверности средств измерения в АСУ ТП .....	16
1.4 Подходы к самодиагностике ТЭП.....	18
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ                МОДЕЛЬ                ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ .....	29
2.1 Новая измерительная схема ТЭП .....	29
2.2 Способ имитационного моделирования двухэлектродного ТЭП.....	34
2.3 Валидация имитационной модели двухэлектродного ТЭП .....	41
2.4 Способ имитационного моделирования четырехэлектродного ТЭП.....	63
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 .....	70
3. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТАТУСА РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНОГО ТЭП .....	72
3.1 Схема обработки информации для четырехэлектродного ТЭП .....	72
3.2 Предварительная обработка вектора ТЭДС .....	74
3.3 Формирование результата измерения.....	80
3.4 Формирование вектора диагностических признаков .....	85
3.5 Метод обработки информации для оценки достоверности показаний ТЭП и критерий назначения статуса.....	97
3.6 Оценка эффективности алгоритма обработки информации четырёхэлектродного ТЭП на синтетических данных.....	111
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	116

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ И МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНОГО ТЭП .....	118
4.1 Планирование эксперимента.....	118
4.2 Оценка адекватности имитационной модели ТЭП.....	119
4.3 Оценка эффективности алгоритмов обработки информации ТЭП .....	128
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	138
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	150

## ВВЕДЕНИЕ

**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 [1,2]. При этом одним из ключевых вопросов эффективности сенсорных сетей остается достоверность получаемых данных об измеряемых физических величинах [3,4].

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 чаще всего применяют термоэлектрические преобразователи (термопары, ТЭП), термосопротивления, пирометры, термисторы [5]. При этом наибольшее распространение получили именно термоэлектрические преобразователи 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 ТЭП.

Достоверность показаний средств измерения может быть обеспечена комплексом мер. К таким мерам относят соблюдение методики измерений, применение средств измерения утвержденного типа и периодическую поверку [6], а также разработку и внедрение интеллектуальных датчиков с возможностью самодиагностики. Идея интеллектуального датчика рассматривалась Таймановым Р.Е. и Сапожниковой К.В. в работах [7,8], D.W.Clarke и M.P. Henry в работах [9,10], где были сформулированы основные принципы функционирования и требования к таким датчикам. В том числе, сформирован подход к качественной оценке достоверности результата измерения датчика на основе статусов, который

отражен в стандартах [11,12]. Также в работах [3,13,14] показано, что увеличение доли интеллектуальных средств измерения повысит достоверность получаемой информации, что увеличит эффективность алгоритмов управления в АСУ ТП.

Существующие исследования рассматривают различные подходы к самодиагностике датчиков температуры на основе термоэлектрических преобразователей, включая датчик с несколькими независимыми термопарами [15,16]; датчик температуры с термопарой и реперной ячейкой с фазовым переходом первого рода [17–19]; датчик температуры с возможностью дополнительного токового нагрева термопары [20,21]; датчик температуры в виде термоэлектрического преобразователя с числом термоэлектродов больше двух [22,23]. 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. Также, с точки зрения алгоритмов обработки информации, данные решения используют, в основном, сравнение измеряемой температуры ТЭП или диагностического параметра с опорным значением температуры. При этом вопросы надежности такого сравнения, строгие правила формирования оценки достоверности отдельного измерения и статистическое оценивание получаемых результатов в исследованиях представлены слабо. 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 оценки достоверности показаний ТЭП на основе новой четырехэлектродной измерительной схемы ТЭП;

2) разработать имитационную модель изменения фактической статической характеристики ТЭП относительно номинальной статической характеристики для формирования синтетических данных ТЭП с различной степенью деградации для двухэлектродной и четырехэлектродной измерительных схем;

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 предложить 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. Разработан метод обработки измеряемых ТЭДС в четырехэлектродном ТЭП, позволяющий 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 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 обработке 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 [24]);

- в предложенной измерительной схеме ТЭП с возможностью формирования дополнительной информации для повышения достоверности измерения температуры (патент на полезную модель [25]);

- в разработанном способе оценки достоверности результата измерения четырехэлектродного ТЭП (патент на изобретение [26]), реализованном в соответствующем алгоритмическом обеспечении (свидетельство на программу для ЭВМ [27]).

**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 (USBEREIT) (г. Екатеринбург, 2020).
3. Круглый стол «Интеллектуальное производство» (г. Челябинск, 2022).
4. 2023 Global Smart Industry Conference (г. Челябинск, 2023).
5. 33rd Scientific 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 [28] и К2 [29,30], 1 публикация зарубежном издании, рецензируемом в наукометрической базе Scopus [31]. 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. Работа изложена на 150 страницах, включая 62 рисунков, 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 (Приложение А).

## 1. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В АСУ ТП И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИХ ТОЧНОСТИ НА ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ

Реализация многих технологических процессов в промышленности требует информации о температуре промышленного оборудования и обрабатываемых материалов. Непрерывный контроль температуры в технологическом процессе определяет качество выходного продукта, эффективность работы и ресурс оборудования, а также безопасность технологического процесса. Наиболее широкое распространение в промышленности получили термоэлектрические преобразователи (термопары, ТЭП), которые составляют более 60% всех датчиков температуры на производстве [5,32]. Востребованность термопар обусловлена широким диапазоном измерения температуры от  $-200$  до  $2500^{\circ}\text{C}$  [33], точностью измерения [34] и сравнительно высоким быстродействием [35]. Рассмотрим опыт применения термоэлектрических преобразователей в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), а также проанализируем причины дрейфа характеристик ТЭП и подходы к обеспечению точности измерения температуры с помощью ТЭП.

### 1.1 Примеры использования ТЭП в АСУ ТП

В металлургической промышленности ТЭП используются для контроля температуры при плавке в домнах и вакуумных печах, а также разливке металла. Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) включает блок-кристаллизатор, участвующий в формировании корочки слябов с использованием принудительно охлаждаемых стенок. Непрерывный контроль температуры стенок кристаллизатора (Рисунок 1.1) позволяет предотвратить разрушение стенки и прорыв металла.

Применение ТЭП для измерения температуры стенок кристаллизатора обусловлено высоким быстродействием и низкой погрешностью измерения, что необходимо для обнаружения аварийных режимов работы кристаллизатора. Например, резкое изменение температуры стенки на  $10^{\circ}\text{C}$  и более свидетельствует о нарушении режима работы кристаллизатора и образовании залипания металла на

стенке [36]. Производители Magmatex [37] и Wuhan CenterRise M&C [38] используют термопары К (хромель-алюмель), Е (хромель-константан) и L (хромель-копель) типов с требуемой погрешностью измерения до  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Всего блок кристаллизатора, в зависимости от размеров, включает до 184 термопар [39]. Отметим, что дрейф метрологических характеристик термопар в данном случае приводит к невозможности своевременного обнаружения залипания металла, что в свою очередь может вызвать расплавление стенки кристаллизатора с последующим дорогостоящим ремонтом.

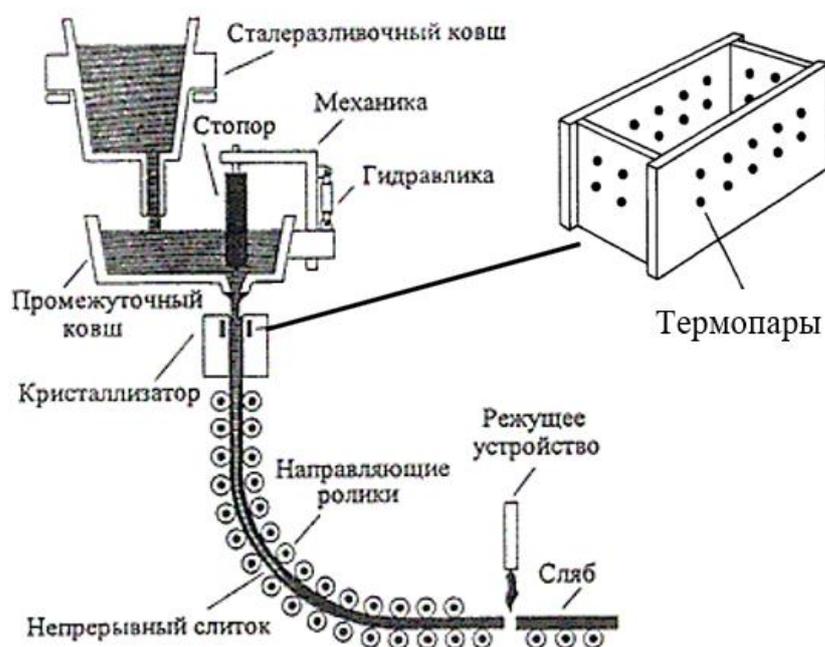


Рисунок 1.1 – Использование термопар в составе машины непрерывной литья заготовок для оценки целостности стенок кристаллизатора [36]

В электроэнергетике термопары используются для контроля температуры в топке, турбине, котлах и других агрегатах тепловых электростанций (ТЭС) и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). На ТЭС средней мощности регламентируются до 150 точек измерения [40], при этом крупные ТЭЦ включают до 950 точек измерения температуры, свыше 560 из которых составляют термопары [41]. Например, в системе управления температурой пара после котла (Рисунок 1.2), ТЭП используются для измерения температуры непосредственно на выходе пароохладителя ( $T_2$ ) и перед подачей пара на турбину ( $T_1$ ).

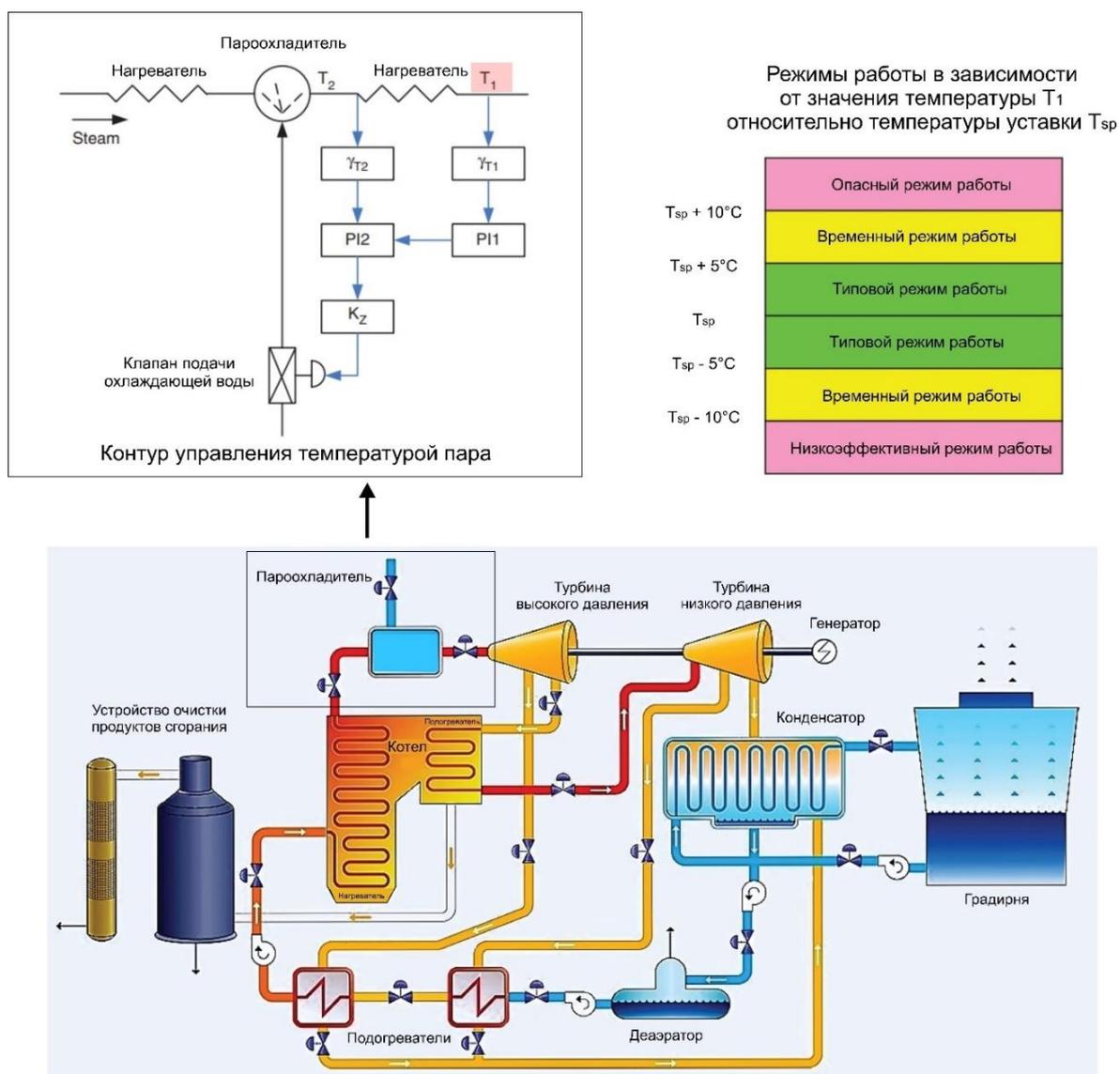


Рисунок 1.2 – Использование термопар в тепловых электростанциях [42]

Температура  $T_1$  должна соответствовать значению уставки  $T_{sp}$  с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$  в номинальном режиме работы пароохладителя. Превышение температурой  $T_1$  значения  $T_{sp}$  на  $10^\circ\text{C}$  и более приводит к опасным режимам работы и перегреву элементов оборудования, что вызывает снижение ресурса поверхностей нагрева на 20 ... 40% [43]. С другой стороны, снижение температуры  $T_1$  ниже значения  $T_{sp}$  на  $10^\circ\text{C}$  и более приводит к существенному снижению эффективности генерации [42]. Таким образом рост погрешности ТЭП при эксплуатации в электроэнергетике оказывает существенное влияние на эффективность и безопасность работы оборудования. Типовые термопары для ТЭС и ТЭЦ – это термопары N (нихросил-нисил), K (хромель-алюмель), L (хромель-копель), J (железо-константан) [44].

В нефтехимии термопары используются для контроля температур в процессах бурения и нефтепереработки. Технологические циклы дистилляция, гидрокрекинга и флюид-каталитического крекинга требуют строгого поддержания температуры в течение длительного времени для обеспечения экономической эффективности и безопасности процессов [45]. Диапазон измерения температур в нефтехимических процессах составляет от 50°C до 750°C [46], измерение которых осуществляется с использованием термопар К (хромель-алюмель), L (хромель-копель), J (железо-константан) типов. Например, в установках каталитического крекинга (Рисунок 1.3) термопары используются при измерении температур при управлении процессами в регенераторах, реакторах и дистилляционных колоннах. Контур управления температурой процесса (ТС, temperature control) выделены на рисунке 1.3 зеленым цветом, каждый из контуров использует ТЭП для измерения температуры.

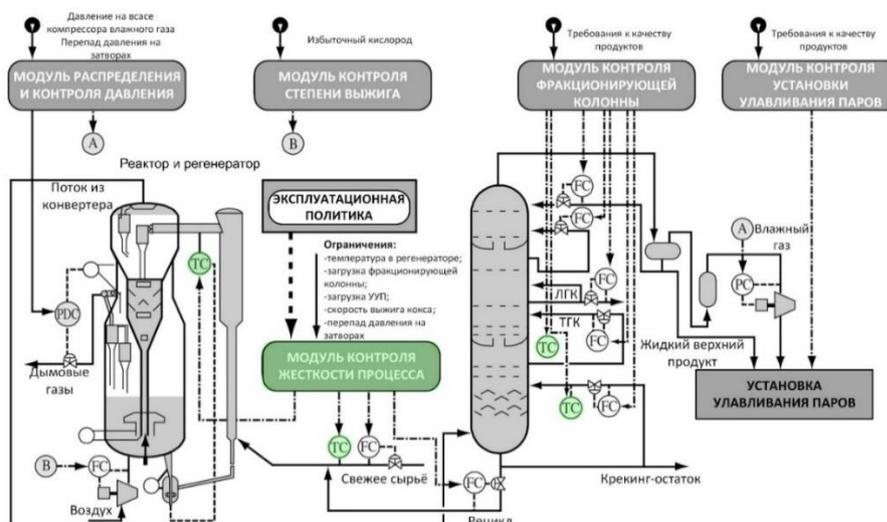


Рисунок 1.3 – Использование термопар в установках каталитического крекинга с флюидизированным катализатором [47]

При этом рост погрешности термопар до 15°C и более приводит к изменению качества продукции и снижению производительности лифт-реактора [48]. Также при росте погрешности на 40°C приводит к существенному снижению производительности при крекинге этилена [49]. Таким образом, точность измерения температуры с помощью ТЭП в нефтехимии оказывает прямое влияние на качество выходного продукта и эффективность производства.

## 1.2 Причины дрейфа характеристик ТЭП в процессе эксплуатации

Деградация ТЭП при эксплуатации возникает при воздействии различных эксплуатационных факторов [35,50], включая:

- длительное воздействие высоких температур;
- существенное влияние окислительной или восстановительной среды,
- циклический нагрев и охлаждение;
- механические воздействия и вибрации;
- воздействие ионизирующих излучений.

Воздействие одного или совокупности указанных факторов приводит к изменению химического состава и структуры термоэлектродов [51,52], развитию термоэлектрической неоднородности [53,54], снижению сопротивления изоляции, охрупчиванию и разрушению термоэлектродов или спая, нарушению контакта между термопарой и объектом [43]. Подобные изменения в ТЭП нередко возникают в течении межповерочного интервала [52] и могут значительно исказить информацию о фактической температуре технологического процесса. В качестве иллюстрации приведем примеры деградации термоэлектрических характеристик среднетемпературных ТЭП К, N, J, L-типов (Рисунок 1.4 – 1.5).

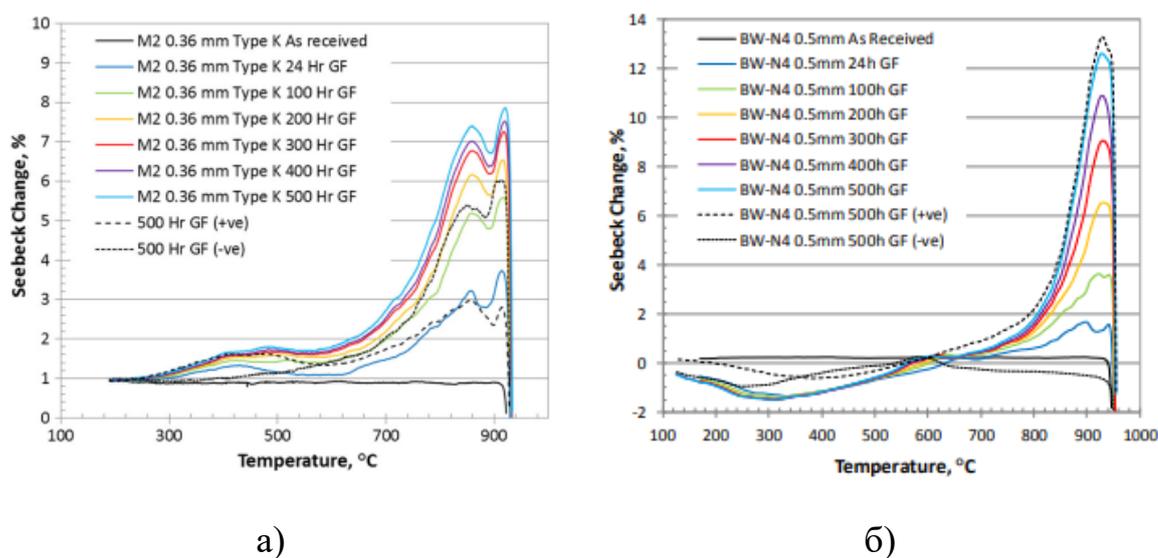


Рисунок 1.4 – Деградация ТЭП К-типа (а) [55] и N-типа (б) [56] в процессе эксплуатации под влиянием перегрева

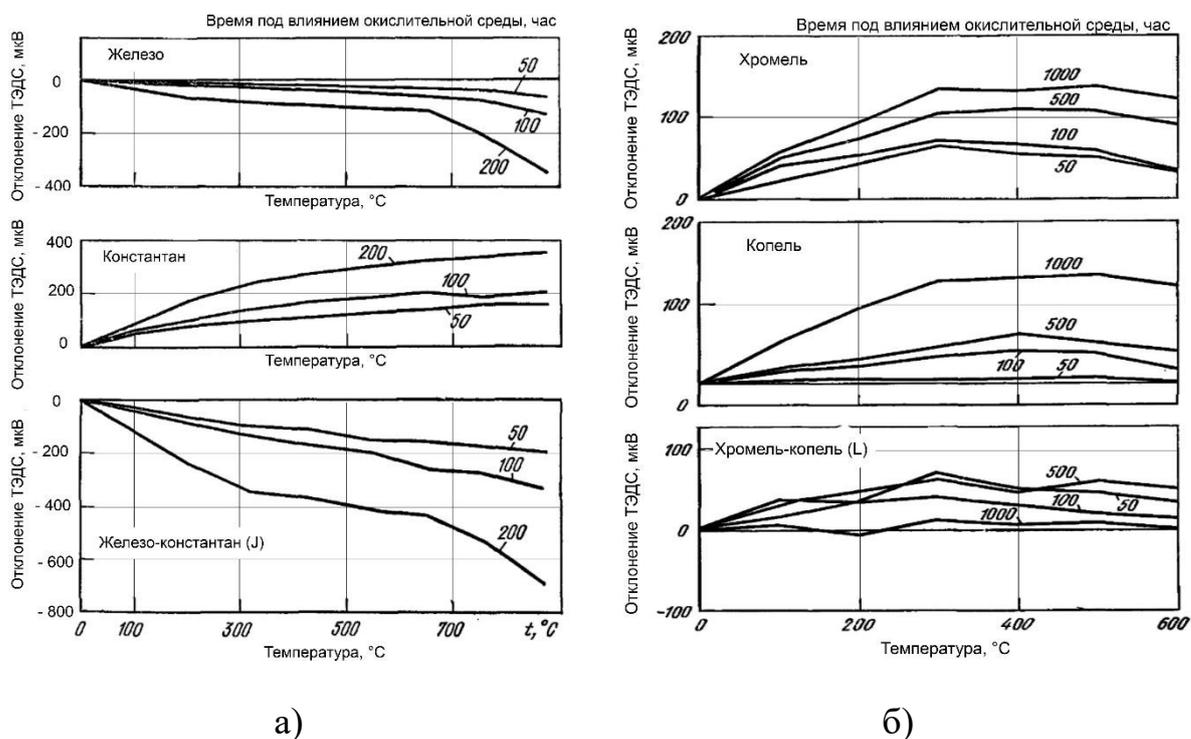


Рисунок 1.5 – Отклонение ТЭДС от номинальных значений для ТЭП J-типа (а) и L-типа (б) под влиянием окислительной среды [50]

На рисунке 1.4 показано изменение дифференциальной термоэлектродвижущей силы (коэффициента Зеебека) термопар К и N типов, величина изменения может достигать от -2 до +15% от номинального значения. Исследование [57] показывает, что существенный дрейф характеристик данных ТЭП может возникать уже после 100 часов эксплуатации. На рисунке 1.5 показан дрейф ТЭДС термопар J и L типов при эксплуатации в условиях окислительных сред, цифры у графиков – время эксплуатации в часах. В данном случае, заметные отклонения от номинальных характеристик происходят спустя 100...200 часов эксплуатации ТЭП. При этом важно отметить, что ведущие отечественные компании-производители термоэлектрических преобразователей устанавливают межповерочный интервал 1...4 года для ТЭП К, N, L, J-типов [58,59]. Таким образом, вопрос разработки методов для обеспечения точности измерений температуры с помощью ТЭП в АСУ ТП представляет актуальную задачу исследования.

### **1.3 Подходы к обеспечению метрологической достоверности средств измерения в АСУ ТП**

Метрологическая исправность средства измерения означает, что все его нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям [60]. Практическая оценка метрологической исправности средств измерений реализуется посредством периодических поверок через заданный промежуток времени, называемый межповерочным интервалом. Определение межповерочного интервала обычно осуществляется производителем средства измерений на основании моделирования зависимости точности средства измерения от времени наработки или на основе экономической целесообразности [61].

Проблема оценки достоверности показаний средств измерений на основе межповерочного интервала состоит в отсутствии актуальной информации о метрологических характеристиках датчика в процессе эксплуатации и стоимости поверочных процедур. Проведение поверки требует остановки технологического процесса, демонтажа средства измерения, лабораторных испытаний по поверке и повторной установки средства измерения. В результате, с одной стороны, дорогостоящая процедура поверки и сопутствующие расходы способствуют запросу на увеличение межповерочного интервала. С другой стороны, рост межповерочного интервала приводит к увеличению интервала времени, в течение которого отсутствует информация о метрологической исправности средства измерения, соответственно, снижается надежность получаемой информации. Таким образом, задача разработки методов оценки достоверности показаний датчиков в процессе эксплуатации практически востребована.

Разработка и внедрение методов самодиагностики и метрологического самоконтроля средств измерений позволит определять достоверность получаемой от датчика информации в процессе эксплуатации. Метрологический самоконтроль может быть реализован для диагностики всей измерительной системы [62], отдельного измерительного канала системы или его элементов [63,64], отдельного датчика.

Концепция интеллектуального датчика с встроенной возможностью самодиагностики рассматривалась Таймановым Р.Е. и Сапожниковой К.В. в работах [7,8]. Интеллектуальный датчик должен формировать дополнительную информацию, связанную с ростом неопределенности измерения основной физической величины. Развитие концепции совместно с Генри М.П. в работе [65] выявило потребность введения качественной оценки достоверности результата измерения интеллектуального датчика – статуса результата измерения. Кроме того, в работе [65] показана необходимость стандартизации терминов и подходов в области самодиагностики и метрологического самоконтроля датчиков.

Результатом работ по стандартизации метрологического самоконтроля стал ГОСТ 8.673–2009 по интеллектуальным датчикам и измерительным системам [11]. Стандарт вводит определения ключевых терминов, в том числе, определяет статус результата измерения как качественную оценку, характеризующую риск использования результата измерения, и вводит следующие 5 статусов:

1. Подтвержденный – результат измерения подтвержден дополнительной информацией о метрологическом состоянии датчика. Данный статус обеспечивает безопасное управление оборудованием в ответственных ситуациях.

2. Нормальный – результат измерения не подтвержден дополнительной информацией, присваивается результату измерения датчика в течение межповерочного интервала. Данный статус обеспечивает безопасное управление оборудованием в обычных ситуациях.

3. Ориентирующий – результат измерения может быть недостоверным в связи с появлением дефекта в датчике. Данный статус показывает, что результат измерений может быть применен только для ориентировочной оценки параметров технологического процесса.

4. Экстраполированный – результат измерения восстановлен на основе данных из предыдущего интервала времени, поступающая текущая измерительная информация недостоверна. Данный статус дает основание для задержки принятия решений по управлению оборудованием до прихода актуального результата измерений.

5. Недостоверный – результат измерения недостоверный и не может быть использован для управления технологическим процессом. Датчик со статусом «недостоверный» требует немедленного технического обслуживания.

Совокупность трех статусов «подтвержденный», «ориентирующий» и «недостоверный» соответствует трехзонной системе оценки риска в соответствии с ГОСТ Р ЕН 614-1-2003 [66]. Следовательно, датчик с метрологическим самоконтролем должен иметь, как минимум, три статуса для оценки достоверности результата измерения.

Способы получения дополнительной информации для формирования статуса результата измерения основаны на структурной, временной, информационной избыточности, а также на комбинации этих видов избыточности в интеллектуальном средстве измерения [11]. Далее рассмотрим различные способы получения дополнительной информации о состоянии термоэлектрических преобразователей, алгоритмы обработки полученной информации и подходы к формированию диагностических критериев для оценки достоверности показаний ТЭП. Рассматриваемые способы включают как уже реализованные промышленные решения, так и перспективные решения, описанные в патентах и научных исследованиях.

#### **1.4 Подходы к самодиагностике ТЭП**

Существующие подходы к самодиагностике ТЭП в процессе эксплуатации включают следующие технические решения: датчик температуры с несколькими независимыми термопарами; датчик температуры с термопарой и реперной ячейкой с фазовым переходом первого рода; датчик температуры с возможностью дополнительного токового нагрева термопары; датчик температуры в виде термоэлектрического преобразователя с числом термоэлектродов больше двух. Рассмотрим подробнее каждый из вариантов ТЭП и методы обработки информации для данной измерительной схемы, которые позволяют реализовать функцию самодиагностики ТЭП.

### Использованием нескольких независимых термопар в составе ТЭП.

Наиболее простой способ повышения достоверности измерений термоэлектрических преобразователей – дублирование, когда две независимых термопары размещаются в непосредственной близости друг от друга в общей керамической изоляции или термопарном кабеле (Рисунок 1.6). Данный вариант конструкции ТЭП выпускают ведущие отечественные приборостроительные компании [15,16].

Алгоритм обработки измерительной информации для двух термопар состоит из следующих шагов:

- 1) измерение ТЭДС и вычисление температуры на основе каждой термопары;
- 2) расчет разности температур между термопарами, в случае превышения разностью заданного порогового значения формируется вывод о неисправности датчика.

Преимуществом данный подхода к формированию избыточности внутри ТЭП является использование стандартных термопар. Однако даже при обнаруженной разности между термопарами, невозможно определить какая из термопар дает достоверное измерение температуры. Также метод нечувствителен к синхронному дрейфу показаний термопар, выполненных из одинаковых термопарных материалов.

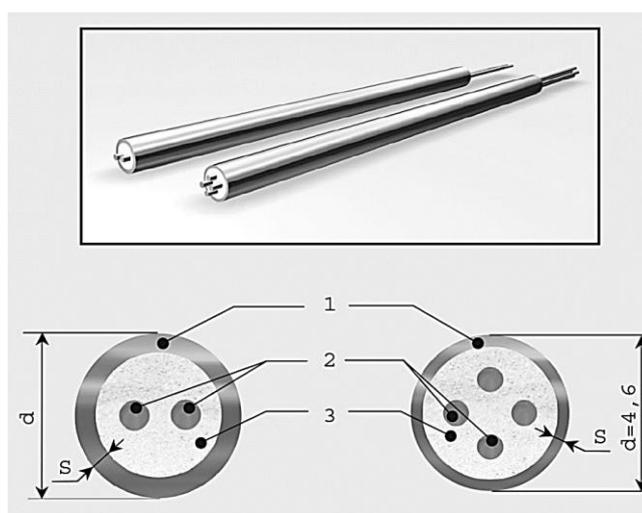


Рисунок 1.6 – Термопарный кабель с одной и двумя парами термоэлектродов 1 – оболочка кабеля, 2 – термоэлектроды, 3 – минеральная изоляция [67]

Разновидностью данного подхода можно считать конструкцию сенсора с дополнительным каналом для установки эталонного датчика [68]. Предлагаемое решение обеспечивает периодическое сличение показаний рабочей термопары и эталонного средства измерения. Однако данная оценка носит периодический характер и требует остановки технологического процесса для установки и подключения эталонного датчика, что вносит дополнительные затраты пользователя и ограничения на применение метода.

### **Использование реперной ячейки с фазовым переходом первого рода.**

Научной группой под руководством Machin G. (NPL) [17,69,70] исследован подход по использованию миниатюрных реперных ячеек для калибровки высокотемпературных термопар без извлечения из рабочего процесса. Конструктивно ячейка состоит из графитовой емкости, которая заполняется металлом и имеет паз для помещения в ячейку термопары (Рисунок 1.7). После заполнения, металл формируют сплав металл-углерод (Me-C), температура которого известна и является реперной температурой.

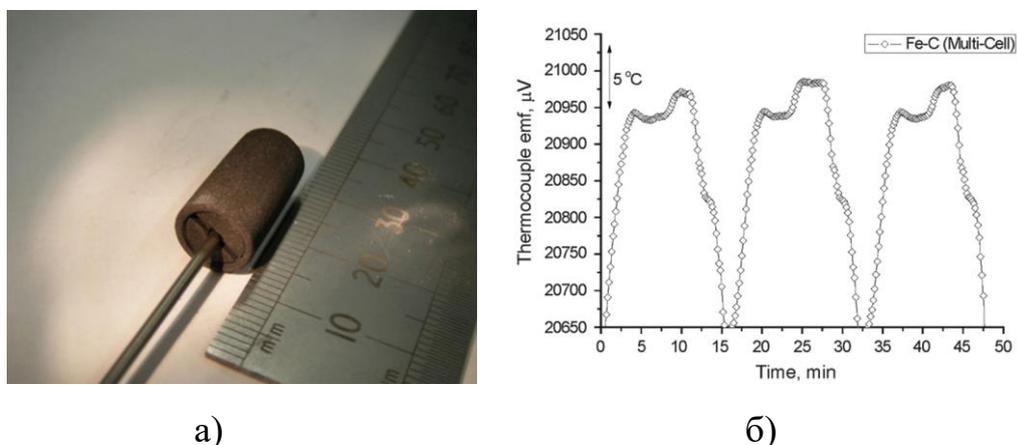


Рисунок 1.7 – Конструкция и внешний вид реперной ячейки [70]

а) конструкция термопары с реперной ячейкой;

б) «плато» фазовых переходов в выходном сигнале термопары

Процедура обработки данных от термопары с реперной ячейкой строится следующим образом:

1) измерение ТЭДС термопары и обнаружение «плато» фазового перехода при плавлении/кристаллизации реперного сплава Me-C;

2) вычисление температуры термопары и сравнение с известной температурой плавления материала.

Предложенная конструкция исследовалась для различных материалов ячеек, типов термопар и изоляционных материалов. Однако данный подход имеет существенные ограничения, связанные в первую очередь с обнаружением «плато» в реальной эксплуатации, поскольку форма и стабильность «плато» сильно зависят от тепловых условий процесса. Кроме того, термопара с встроенной ячейкой в процессе эксплуатации должна множество раз проходить через плато, что возможно только при циклических технологических процессах. Наконец, данный подход позволяет реализовать только одну реперную точку рабочем диапазоне температур термопары, а изготовление реперной ячейки существенно усложняет и удорожает конструкцию датчика.

### Использование токового нагрева ТЭП.

Метод контролируемого токового воздействия (LCSR) реализует избыточность информации от термопары посредством периодического нагрева термопары электрическим током [20]. Схема реализации метода включает устройство формирования тока и цепь измерения ТЭДС термопары (Рисунок 1.8).

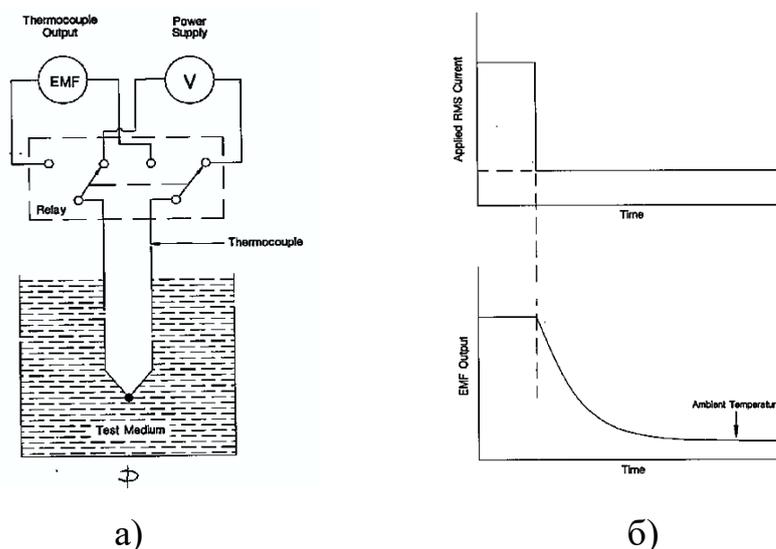


Рисунок 1.8 – Функциональная схема LCSR метода и вид получаемого отклика

- а) схема экспериментальной установки для LCSR метода;
- б) отклик термопары, получаемый для LCSR метода [20]

Алгоритм получения и обработки информации в данном случае включает два последовательных этапа:

1) нагрев термопары с помощью электрического тока в течение определенного времени на несколько градусов относительно температуры процесса;

2) фиксация выходного сигнала термопары в процессе остывания (Рисунок 1.8б) и анализ полученного отклика.

Основное развитие метода, разработка устройства для диагностики и программного обеспечения выполнено в исследованиях Н.М. Hashemian [71,72]. Ограничения данного метода связаны, в первую очередь, с необходимостью использовать мощный источник тока для нагрева термопары, поскольку проводники имеют низкое омическое сопротивление. Также метод требует постоянства рабочих условий во время проведения испытания. Кроме того, непосредственно процедура испытания занимает 30-40 минут, в течение которых актуальная информация о фактической температуре процесса недоступна.

Одна из альтернатив данного метода – контролируемый нагрев зоны холодного спая термопары [73]. Данное решение реализовано с помощью внешнего нагревателя, расположенного в зоне холодного спая термопары. Однако нагрев холодного спая не дает информации о реальном изменении характеристик термопары, так как создает градиент температур в другой зоне проводников ТЭП. Кроме того, реализация данного метода также требует не менее 30 минут, в течение которых актуальная информация о температуре процесса недоступна.

### **Метод диагностики на основе ТЭП с избыточным количеством термоэлектродов**

Стандартная термопара состоит из спая двух проводников, на холодных концах которого возникает ТЭДС при наличии градиента температур вдоль проводников. В патенте US 6239351B1 [22] рассмотрена конструкцию термоэлектрического преобразователя из трех термоэлектродов (Рисунок 1.9), два из которых представляют собой стандартную термопару, а третий – чистый металл со стабильной характеристикой, например, платину. Предложенная конструкция

позволяет получить дополнительную информацию и эквивалентна трем термопарам, измеряющим температуру в одной точке (Рисунок 1.9).

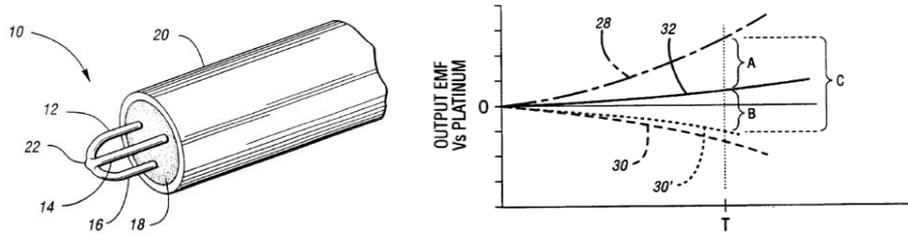


Рисунок 1.9 – Конструкция термопары с тремя проводниками и получаемы значения ТЭДС на выходе ( $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$ ) [22]

Алгоритм обработки информации в трехэлектродной термопаре представлен на рисунке 1.10 и состоит из следующих шагов:

- 1) измерение и сохранение ТЭДС  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$ ;
- 2) поиск в предварительно сформированной градуировочной таблице значения  $E_{B'}$ , которое соответствует измеренному значению  $E_A$ ;
- 3) принятие решения о исправности термопары на основе сравнения  $E_B$  и  $E_{B'}$ , а также на основе сравнения  $E_A$  с заданным пороговым значением  $K$ .

Для работы алгоритма необходима предварительная калибровка трехэлектродного ТЭП и формирование таблицы значений ТЭДС в соответствующих температурных точках.

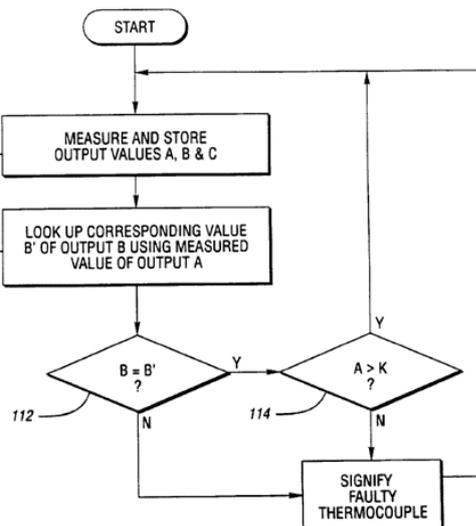


Рисунок 1.10 – Алгоритм формирования сигнала о неисправности для термопары с 3 проводниками [22]

Схожий отечественный патент RU 2129708C1 [23] описывает термоэлектрический преобразователь из трех термоэлектродов, два из которых представляют собой стандартные термопарные материалы, а дополнительный термоэлектрод выполнен из чистого металла (например, железо, никель или платина). В результате калибровки ТЭП получают зависимости ТЭДС каждого из стандартных термоэлектродов относительно дополнительного термоэлектрода, на рисунке 1.11 данные зависимости показаны в виде линий I и II.

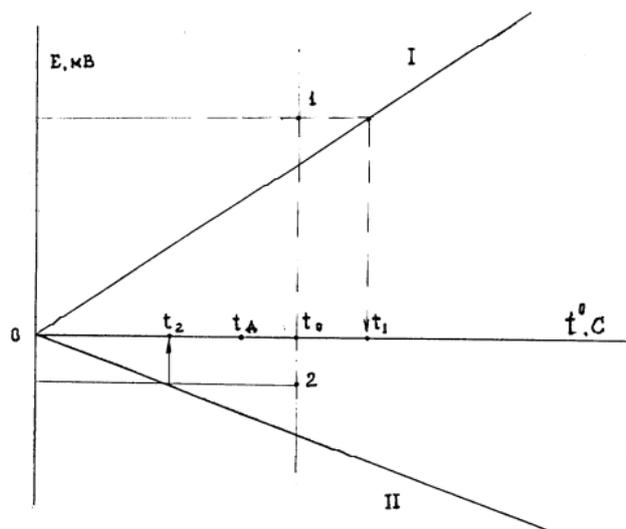


Рисунок 1.11 – Реализации способа самодиагностики в трехэлектродном ТЭП [23]

Представленный способ диагностики включает следующие шаги:

- 1) расчет температуры по основной термоэлектрической паре  $t_0$  и вспомогательным термоэлектрическим парам  $t_1$ ,  $t_2$ ;
- 2) сравнение измеренных ТЭДС  $E_1, E_2$  при температуре  $t_0$  с исходными значениями, полученными на этапе калибровки.
- 3) формирование вывода об исправности термоэлектрического преобразователя на основе проведенного сравнения.

Заявленная конструкция трехэлектродного ТЭП расширяет количество измеряемых ТЭДС в каждой температурной точке и представляет простую в изготовлении измерительную схему. Однако реализуемые способы диагностики имеют ряд недостатков. Во-первых, каждый из способов требует предварительной калибровки ТЭП, на котором формируется калибровочная таблица [22] или

вычисляются характеристики  $E_1(t), E_2(t)$  [23]. Во-вторых, вычисленные значения температур  $t_1, t_2$  по соответствующим вспомогательным термоэлектрическим парам могут иметь значительную ошибку из-за низкой чувствительности ТЭДС дополнительных термоэлектродных пар к температуре. Кроме того, описанные алгоритмы обработки информации не уточняют способ формирования пороговых значений при оценке достоверности показаний ТЭП.

### **Сравнение методов самодиагностики термоэлектрических преобразователей**

Рассмотренные способы получения диагностической информации и обработки информации для оценки метрологического состояния ТЭП можно сравнить с точки зрения следующих пользовательских характеристик:

1. Величина обнаруживаемого отклонения показаний ТЭП от фактической температуры процесса. Данное значение может быть выражено относительно допускаемого отклонения  $\Delta T_{\text{доп}}$  для каждого типа термопар, которые нормированы в стандарте [34].

2. Устойчивость к измерениям технологических процессов. Некоторые методы самодиагностики могут работать в любых условиях, другие – требуют специальных температурных профилей процесса, например, циклическое изменение температуры или квазистационарные участки процесса.

3. Скорость выполнения процедуры самодиагностики. В процессе выполнения самодиагностики, датчик может передавать или не передавать актуальную информацию о процессе.

Сравнение рассмотренных методов по выбранным осям (Рисунок 1.12) приведено для следующих методов:

- 1 – ТЭП с тремя термоэлектродами;
- 2 – две независимых термопары в составе одного ТЭП;
- 3 – метод токового нагрева (LCSR) ТЭП для диагностики;
- 4 – метод с использованием реперной ячейки в составе ТЭП.

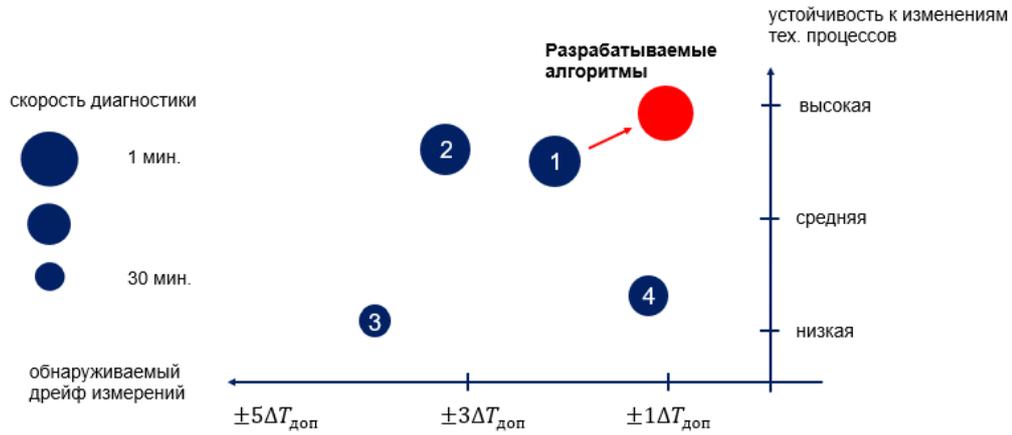


Рисунок 1.12 – Сравнение методов самодиагностики ТЭП

Проведем анализ сравнение существующих методов самодиагностики ТЭП. Метод 4 реализует прямое сличение результата измерения ТЭП с реперной температурой и способен обнаруживать величину отклонения результата измерения ТЭП на уровне допуска  $\pm\Delta T_{\text{доп}}$ . При этом метод 4 имеет высокие требования к технологическому процессу, такие как цикличность нагрева и охлаждения, а также ограничения на скорость изменения температуры. Кроме того, время диагностики с использованием метода 4 составляет не менее 10 минут для реализации точки фазового перехода.

Метод 3 реализует оценку достоверности результата измерения ТЭП по косвенному признаку – параметрам кривой охлаждения ТЭП. Чувствительность данного метода относительно невысока, поэтому величина обнаруживаемого отклонения ТЭП составляет более  $\pm 3\Delta T_{\text{доп}}$ . Также метод 3 имеет требование к стационарности технологического процесса при проведении диагностики, а время диагностики составляет не мене 30 минут.

Метод 2 реализует косвенную оценку состояния ТЭП на основе рассогласования показаний между двумя независимыми термопарами. Метод 2 устойчив к различным вариантам технологического процесса, но не позволяет обнаружить ранний дрейф метрологических характеристик ТЭП. При синхронном дрейфе каждой из термопар в составе величина обнаруживаемого отклонения составляет порядка  $\pm 3\Delta T_{\text{доп}}$ .

Метод 1 за счет дополнительного термоэлектрода позволяет получить дополнительные измерения ТЭДС на выходе ТЭП, напрямую связанные с дрейфом значения ТЭДС основной термоэлектродной пары. Метод 1 имеет разрешающую способность по величине обнаруживаемого отклонения ТЭП на уровне  $\pm 2\Delta T_{\text{доп}}$ . Также метод 1 не имеет особенных требований к технологическому процессу и позволяет выполнять диагностику при каждом измерении температуры. Однако использование метода 1 требует проведение процедуры калибровки перед началом эксплуатации для каждого ТЭП. Кроме того, описание метода с использованием дополнительного термоэлектрода ТЭП в [22] и [23] предлагает только наиболее простые алгоритмы для обработки получаемой дополнительной информации для самодиагностики ТЭП и не оценивает эффективность получаемых результатов. Таким образом, результаты сравнения методов (Рисунок 1.12) позволяют сформировать направление разработки новых методов и алгоритмов самодиагностики ТЭП в процессе эксплуатации в составе АСУ ТП.

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

В соответствии с указанной целью в рамках данной диссертационной работы необходимо решить **следующие задачи**:

1) разработать методику получения дополнительной информации для оценки достоверности показаний ТЭП на основе новой четырехэлектродной измерительной схемы ТЭП;

2) разработать имитационную модель изменения фактической статической характеристики ТЭП относительно номинальной статической характеристики для формирования синтетических данных ТЭП с различной степенью деградации для двухэлектродной и четырехэлектродной измерительных схем;

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 предложить критерий назначения статусов;

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

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

### 2.1 Новая измерительная схема ТЭП

Промышленные термопары представляют собой термоэлектрические преобразователи (ТЭП) из двух термоэлектродов, объединенных в общий спай. Сформированный спай термопары помещается в зону измеряемой температуры, а свободные концы термоэлектродов подключаются к измерительному прибору. Возникающее значение термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) на свободных концах термоэлектродов зависит от температуры рабочего ( $T$ ) и свободного спаев ( $T_{\text{хол}}$ ) термоэлектрического преобразователя

$$E_{AB}(T, T_{\text{хол}}) = \int_{T_{\text{хол}}}^T (S_A(T) - S_B(T)) dT = e_A(T, T_{\text{хол}}) - e_B(T, T_{\text{хол}}), \quad (2.1)$$

где  $T_1, T_2$  – температура горячего 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 проводника, которая зависит от физико-химических свойств материалов и температуры процесса [50]. Высокая однородность свойств промышленно выпускаемой термоэлектродной проволоки обеспечивает воспроизводимость дифференциальной ТЭДС материалов, что позволяет получить стандартизованные номинальные статические характеристики (НСХ) для основных типов промышленных термопар. НСХ термопар описывают зависимость ТЭДС термопары от температуры и для большинства промышленных термопар представлены в стандартах [34]. Также могут быть получены зависимости для индивидуальных ТЭДС  $e(T)$  отдельных проводников ТЭП, которые представлены в справочниках [74,75].

Стандартизованные НСХ ТЭП представляют в виде полинома

$$E_{\text{изм}}(T) = \sum_{i=0}^N a_i T^i + C(T), \quad (2.2)$$

где  $E_{\text{изм}}(T)$  – измеряемая ТЭДС термопары;

$T$  – фактическая температура процесса;

$a_0 \dots a_N$  – коэффициенты полинома;

$C(T)$  – нелинейное слагаемое, включаемое в НСХ для некоторых видов термоэлектрических преобразователей (например, экспоненциальное). Максимальная степень полинома  $N$  в уравнении (2.2) достигает  $N = 8 \dots 10$  в зависимости от типа ТЭП.

Значение температуры процесса по измеренной ТЭДС  $E_{\text{изм}}(T)$  рассчитывается с помощью обратной функции  $F_{\text{обр}}(E_{\text{изм}})$

$$T_{\text{изм}} = F_{\text{обр}}(E_{\text{изм}}(T)). \quad (2.3)$$

Обратные функции для ТЭП также стандартизованы и представлены в виде полиномиальных или кусочно-полиномиальных функций [34].

Эксплуатация термоэлектрического преобразователя приводит к изменению термоэлектрических свойств входящих в него проводников. Обозначим  $E_{\text{изм}}^*(T)$  – фактическая статическая характеристика термоэлектрического преобразователя (ФСХ), которая отклоняется от НСХ  $E_{\text{изм}}(T)$  на некоторую величину  $\Delta E(T)$

$$E_{\text{изм}}^*(T) = E_{\text{изм}}(T) + \Delta E(T) \quad (2.4)$$

Отклонение ФСХ от НСХ на величину  $\Delta E(T)$  приводит к отклонению измеренной температуры ТЭП  $T_{\text{изм}}^*$  от фактической температуры процесса

$$T_{\text{изм}}^* = F_{\text{обр}}(E_{\text{изм}}^*(T)) = T + \Delta T(T) \quad (2.5)$$

где  $\Delta T(T)$  – отклонение ФСХ от НСХ термоэлектрического преобразователя, выраженное в температурном эквиваленте. Фактически, величина  $\Delta T(T)$  представляет собой составляющую погрешности измерения температуры процесса с помощью ТЭП, которая вызвана изменением термоэлектрических свойств проводников ТЭП [11].

Допускаемые пределы отклонения ФСХ термоэлектрического преобразователя от НСХ нормируются в виде максимально возможного

отклонения  $\Delta T_{\text{доп}}(T)$  [34]. Величина  $\Delta T_{\text{доп}}(T)$  зависит от типа ТЭП, класса допуска и фактической температуры процесса. Термоэлектрический преобразователь признается метрологически исправным в случае, когда фактическое значение отклонения  $\Delta T(T)$  не превышает допускаемое

$$\Delta T(T) < \Delta T_{\text{доп}}(T) \quad (2.6)$$

Функция метрологического самоконтроля или самодиагностики средства измерений осуществляет автоматическую проверку метрологической исправности датчиков в процессе эксплуатации [11,12]. В случае термоэлектрических преобразователей, функция метрологического самоконтроля должна оценивать справедливость соотношения (2.6) для каждого результата измерения  $T_{\text{изм}}^*$ . Контроль величины отклонения  $\Delta T(T)$  результата измерения ТЭП от фактической температуры процесса может быть реализован различными способами – с помощью прямого или диагностического метрологического самоконтроля [12]. Вне зависимости от способа, функция метрологического самоконтроля требует получения дополнительной информации, связанной с состоянием термоэлектрического преобразователя.

В данной работе предложена новая измерительная схема термоэлектрического преобразователя, позволяющая получить дополнительную информацию о метрологическом состоянии ТЭП. Предлагаемая измерительная схема включает две термопары из стандартных термопарных материалов с нормированными характеристиками, объединенных в общий спай (Рисунок 2.1).

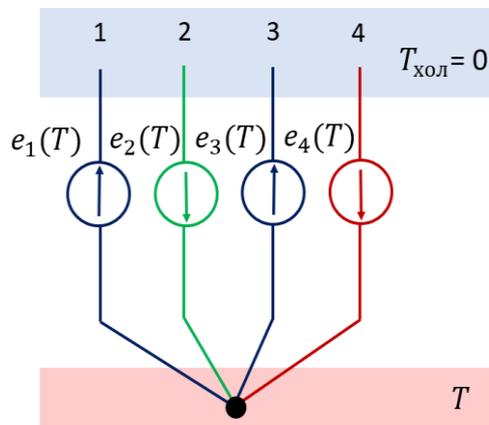


Рисунок 2.1 – Измерительная схема четырехэлектродного ТЭП

В результате объединения термоэлектродов, на выходе ТЭП формируется вектор ТЭДС  $\vec{E}_{ij}(T)$ , доступных для непосредственного измерения

$$\vec{E}_{ij} = \begin{bmatrix} E_{12}(T) \\ E_{13}(T) \\ E_{14}(T) \\ E_{23}(T) \\ E_{24}(T) \\ E_{34}(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1(T) - e_2(T) \\ e_1(T) - e_3(T) \\ e_1(T) - e_4(T) \\ e_2(T) - e_3(T) \\ e_2(T) - e_4(T) \\ e_3(T) - e_4(T) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

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  $T_{хол} = 0$ .

В отличие от двухэлектродной термопары, предлагаемая измерительная схема четырехэлектродного ТЭП предоставляет дополнительную информацию (вектор ТЭДС вместо одного значения) в каждой точке измерения температуры. Также, по сравнению с существующими решениями по диагностике термопар, предложенная измерительная схема ТЭП позволяет:

- реализовать непрерывную диагностику ТЭП в процессе эксплуатации;
- минимизировать изменение конструкции ТЭП;
- исключить влияние измерительной схемы ТЭП на результат измерений.

Новая измерительная схема ТЭП для работы в среднетемпературном диапазоне ( $0 \leq T \leq 1200^\circ\text{C}$ ) может быть реализована следующим образом:

1) хромель-алюмель (тип К) и нихросил-нисил (тип N) в диапазоне температур  $0 \dots 1200^\circ\text{C}$ , маркировка получаемого преобразователя ХАНН;

2) хромель-копель (тип L) и железо-константан (тип J) в диапазоне температур  $0 \dots 750^\circ\text{C}$ , маркировка получаемого преобразователя ХКЖК.

3) хромель-алюмель (тип К) и хромель-копель (тип L) в диапазоне температур  $0 \dots 800^\circ\text{C}$ , маркировка получаемого преобразователя ХАХК.

Измерительная схема четырехэлектродного ТЭП и получаемый вектор измерений  $\vec{E}_{ij}$  позволяют сформировать результат измерения ТЭП, устойчивый к изменению индивидуальных ТЭДС отдельных электродов, а также выделить вектор диагностических признаков для последующей самодиагностики ТЭП.

Рассмотрим влияние изменения индивидуальной ТЭДС  $e_i$  одного термоэлектрода на получаемый вектор  $\vec{E}_{ij}$ . Пусть ФСХ ТЭДС второго проводника  $e_2^*(T)$  имеет отличие от НСХ такое, что

$$e_2^*(T) = e_2(T) - de(T) \quad (2.8)$$

где  $e_2(T)$  – индивидуальная НСХ второго проводника;

$de(T)$  – положительная величина изменения ТЭДС. Тогда согласно системе (2.7), измеряемое ТЭДС  $E_{12}$  увеличится, ТЭДС  $E_{23}$  и  $E_{24}$  уменьшатся, а  $E_{13}$ ,  $E_{14}$  и  $E_{34}$  – не изменятся. Следовательно, предлагаемая четырехэлектродная измерительная схема ТЭП имеет чувствительность к изменению характеристик термоэлектродов и способна обнаружить изменения индивидуальных ТЭДС. Кроме того, измерительная схема имеет «дифференциальный характер» – изменение одной индивидуальной ТЭДС вызывает изменения нескольких ТЭДС в векторе  $\vec{E}_{ij}$  с разным знаком. Учет этого факта позволит сформировать результат измерения ТЭП, устойчивый к изменению ТЭДС отдельных электродов.

Оценка свойств измерительной схемы четырехэлектродного ТЭП требует данных об изменении индивидуальных ТЭДС отдельных электродов. Пример (2.8) показывает чувствительность вектора  $\vec{E}_{ij}$  к изменению индивидуальных ТЭДС, однако, слабо отражает реальные возможные изменения ТЭДС  $e_1(T) \dots e_4(T)$  при эксплуатации ТЭП. В свою очередь, существующие экспериментальные данные об отклонении ФСХ ТЭП от НСХ представлены только для стандартных двухэлектродных термопар. Кроме того, как было показано в разделе 1.2, объем и репрезентативность таких данных ограничены для большинства типов термопар.

Преодоление указанных ограничений в данной работе достигается получением синтетических данных об изменениях ТЭДС ТЭП. Синтетические данные – искусственные данные, имитирующие поведение объектов реального мира [76,77]. Процедура создания синтетических данных должна учитывать набор ограничений, связанных с физикой моделируемого процесса. В данном исследовании предложена процедура формирования синтетических данных с на основе новой имитационной модели ТЭП.

## 2.2 Способ имитационного моделирования двухэлектродного ТЭП

Имитационная модель фактической статической характеристики (ФСХ) термоэлектрического преобразователя (ТЭП) предназначена для генерирования различных вариантов отклонения ФСХ ТЭП от номинальной статической характеристики (НСХ). Применение имитационной модели позволит получить разнообразные синтетические данные ФСХ ТЭП с настраиваемым уровнем отклонения ФСХ от НСХ. Ключевые требования к синтетическим данным, генерируемым моделью:

- воспроизведение отклонений ФСХ ТЭП от НСХ независимо от влияющих факторов;
- моделирование любого типа термопар;
- сходимость модельных и экспериментальных данных.

Соответствие модели указанным требованиям независимости отклонений и универсальности модели достигается на этапах формирования структуры и настройки параметров модели. Проверка сходимости модельных и экспериментальных данных реализована с использованием разработанной процедуры валидации модели на основе статистических критериев. Далее подробно рассмотрены структура модели, процедура настройки и валидации.

В данной работе предложена структура имитационной модели ФСХ в виде полинома, который отличается от базового уравнения НСХ (2.1)  $M$ -младшими членами

$$E_{\text{мод}}^*(T) = a_0^* + a_1^*T + \dots + a_m^*T^m + a_M^*T^M + \sum_{i=M+1}^N a_i T^i + C(T), \quad (2.9)$$

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.

Младшие коэффициенты ФСХ ТЭП  $a_m^*$  для  $m = 1 \dots M$  изменяются следующим образом

$$a_m^* = a_m \pm \Delta a_m = a_m \pm p \cdot a_m \quad (2.10)$$

где  $\Delta a_m$  – отклонение коэффициента  $a_m^*$  от номинального значения  $a_m$ ;

$p$  – случайная величина для моделирования  $a_m^*$  в некотором диапазоне

$$p \in [0 \dots p_{max}] \quad (2.11)$$

где  $p_{max}$  – параметр имитационной модели, определяющий диапазон изменения случайной величины  $p$ . При этом для нулевого коэффициента  $a_0^*$  уравнение (2.10) имеет вид

$$a_0^* = a_0 \pm \Delta a_0 = a_0 \pm p \cdot E_0^* \quad (2.12)$$

где  $E_0^*$  – параметр имитационной модели, определяющий максимальную величину изменения коэффициента  $a_0^*$ . Отдельное уравнение для моделирования коэффициента  $a_0^*$  обусловлено близостью к 0 вклада нулевого слагаемого в НСХ ТЭП, поскольку номинальное значение коэффициента  $a_0 \rightarrow 0$ . При этом фактический вклад  $a_0^*$  в ФСХ ТЭП при эксплуатации может быть существенно отличным от 0, что показано в исследованиях, например [52].

Имитационная модель включает следующие параметры:

1) максимальная степень младшего члена полинома  $M$ , используемая для моделирования  $E_{\text{мод}}^*(T)$ ;

2) закон распределения случайной величины  $p$  для моделирования случайного изменения коэффициентов  $a_m^*$ ;

3) диапазон изменения каждого из моделируемых коэффициентов  $a_m^* \in [a_m - \Delta a_m \dots a_m + \Delta a_m]$ , где отклонение  $\Delta a_m$  зависит от диапазона изменения случайной величины  $p_{max}$ . В случае  $m = 0$ , диапазон изменения коэффициента  $a_0^*$  зависит также от  $E_0^*$ .

Выбор данных параметров определяет соответствие имитационной модели реальному процессу [78] и должен учитывать свойства термоэлектрических преобразователей, а также особенности изменения их характеристик в процессе эксплуатации.

Максимальная степень младших коэффициентов  $M$  в полиноме ФСХ определена на основе подхода к калибровке термоэлектрических преобразователей. Калибровка термоэлектрического преобразователя – процедура

построения индивидуальной характеристики ТЭП, которая определяет зависимость ТЭДС преобразователя от температуры  $E_{\text{инд}}(T)$  [79]. Данная процедура весьма дорогостоящая, поэтому применяется преимущественно для эталонных термопар. Отечественный и зарубежный стандарты [79,80] по калибровке ТЭП предлагают строить индивидуальную градуировочную характеристику ТЭП как отклонение от НСХ

$$E_{\text{инд.}}(T) = E_{\text{НСХ}}(T) + dE(T) \quad (2.13)$$

где  $E_{\text{НСХ}}(T)$  – НСХ ТЭП

$dE(T)$  – функция отклонения индивидуальной характеристики от НСХ. Функция отклонения  $dE(T)$  представляется в виде полинома 1...3 степени, коэффициенты которого рассчитываются методом наименьших квадратов по экспериментальным данным в нескольких калибровочных точках [79,80]. Таким образом, процедура калибровки компенсирует отклонение фактической статической характеристики ТЭП от номинальной посредством поправки  $dE(T)$ .

Предлагаемая имитационная модель аналогичным образом описывает ФСХ ТЭП, как отклонение от НСХ. По аналогии с процедурой калибровки, в рассматриваемой модели принята максимальная степень младших коэффициентов  $M = 3$ .

Выбор закона распределения случайной величины при имитационном моделировании, обычно, основан на априорных данных о процессе [78]. В случае термоэлектрических преобразователей, процесс изменения ФСХ ТЭП при эксплуатации изучен слабо – отсутствует достаточная экспериментальная выборка для оценки закона распределения отдельных коэффициентов при деградации ТЭП. В связи с отсутствием априорных данных, предлагаемая модель изменения коэффициентов  $\Delta a_m$  в уравнении (2.10) использует равномерный закон распределения. Применение равномерного закона распределения с границей изменения коэффициентов  $\pm \Delta a_m$  позволяет с равной вероятностью получить все возможные варианты отклонения коэффициентов  $a_m^*$  относительно их номинальных значений  $a_m$ . В итоге, полученные сочетания коэффициентов  $a_m^*$

обеспечивают максимально разнообразные варианты отклонения ФСХ ТЭП от НСХ, в том числе наиболее трудные для обнаружения при самодиагностике.

Выбор диапазона изменения коэффициентов  $\pm \Delta a_m$  определяет степень отклонения моделируемой ФСХ ТЭП  $E_{\text{мод}}^*(T)$  от НСХ. Предлагаемая модель описывает отклонение ФСХ ТЭП от НСХ в некотором диапазоне, в котором рассчитанная температура  $T_{\text{мод}}^*$  отличается от фактической температуры  $T$  на величину  $\Delta T_{\text{мод}}^*$ . Нормируем этот диапазон сверху, ограничив максимальное значение отклонения ФСХ ТЭП от НСХ  $\Delta T_{\text{max}}(T)$

$$\Delta T_{\text{мод}}^* < \Delta T_{\text{max}}(T) \quad (2.14)$$

причем

$$\Delta T_{\text{max}}(T) > \Delta T_{\text{доп}}(T) \quad (2.15)$$

Предлагаемый подход определения  $\Delta T_{\text{max}}(T)$  позволяет обеспечить сходимость синтетических и экспериментальных данных, исключая такие варианты ФСХ ТЭП, отклонение которых от НСХ значительно превышает допускаемую величину  $\Delta T_{\text{доп}}(T)$  и не может быть представлено предлагаемой имитационной моделью. Также, введенное ограничение  $\Delta T_{\text{max}}(T)$  позволяет определить значение параметра  $E_0^*$  следующим образом

$$E_0^* = \min(\Delta E_{\text{max}}(T)), T \in [T_{\text{min}}, T_{\text{max}}], \quad (2.16)$$

где  $\Delta E_{\text{max}}(T)$  – выраженное в ТЭДС максимальное значение отклонения ФСХ ТЭП от НСХ  $\Delta T_{\text{max}}(T)$ . Такой выбор обеспечивает отличный от 0 вклад составляющей  $a_0^*$  в значение ФСХ ТЭП при моделировании. Максимальное значение случайной величины  $p_{\text{max}}$  в выражении (2.11) связано с  $\Delta T_{\text{max}}(T)$ , но выбирается независимо. Выбор значений  $\Delta T_{\text{max}}(T)$  и  $p_{\text{max}}$  описан подробнее далее при рассмотрении алгоритма генерирования синтетических данных и процедуры валидации имитационной модели ТЭП.

Алгоритм генерирования синтетических данных ФСХ ТЭП позволят получить ансамбль синтетических ТЭП с настраиваемым уровнем отклонения ФСХ от НСХ на основе предложенной имитационной модели. Пусть моделирование выполняется в диапазоне температур  $T_k \in [T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ ,  $k = 1 \dots K$ ,

где  $K$  – количество температурных точек в диапазоне моделирования. Так как каждая ФСХ ТЭП характеризуется своим набором коэффициентов  $a_m^*$ ,  $m = 0 \dots 3$ , ансамбль синтетических ТЭП представляется в виде матрицы

$$A_{\text{мод}}^* = \begin{bmatrix} a_{10}^* & a_{11}^* & a_{12}^* & a_{13}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{q0}^* & a_{q1}^* & a_{q2}^* & a_{q3}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{Q0}^* & a_{Q1}^* & a_{Q2}^* & a_{Q3}^* \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

где  $A_{\text{мод}}^*$  – матрица младших коэффициентов, полученная с помощью имитационного моделирования каждого  $q$ -го ТЭП в ансамбле;

$Q$  – количество ТЭП в ансамбле. Для каждого  $q$ -го ТЭП в ансамбле определим долю температурных точек  $d_q$ , в которых полученное значение отклонения  $\Delta T_{\text{мод } k}^*$  температуры ТЭП от температуры процесса вышло за пределы допуска  $\Delta T_{\text{доп}}(T_k)$

$$d_q = \frac{r_q}{K} * 100\% \quad (2.18)$$

где  $r_q$  – число значений температур  $T_{\text{мод } k}^*$  из  $K$ , для которых  $\Delta T_{\text{мод } k}^* \geq \Delta T_{\text{доп}}(T_k)$ . Для полученного ансамбля ТЭП доля температурных точек  $D$ , отклонение которых вышло за пределы допуска, определяется как

$$D = \frac{\sum_{q=1}^Q d_q}{Q} \quad (2.19)$$

где  $d_q$  – доля температурных точек за пределами допуска для ТЭП в ансамбле с индексом  $q$ ;

$q = 1 \dots Q$  – номер ТЭП в ансамбле.

Применение получаемых синтетических данных ФСХ ТЭП для настройки и проверки методов самодиагностики требует наличия ансамблей синтетических данных с различной долей  $D$  температурных точек за пределами допуска. Следовательно, доля температурных точек  $D$  является выходным параметром алгоритма, который должен соответствовать некоторому заданному целевому значению  $D_t$  с определенной точностью  $\theta$

$$|D_t - D| < \theta \quad (2.20)$$

Алгоритм генерации синтетических данных (Рисунок 2.2) состоит из 4 шагов.

**Шаг 0** – Выбор моделируемого типа ТЭП и диапазона температур. На данном шаге определяются тип моделируемого ТЭП, НСХ ТЭП и обратная функция для расчета температур, функция допуска  $\Delta T_{\text{доп}}(T)$ , число температурных точек в диапазоне  $k = 1 \dots K$  и диапазон температур  $T_k \in [T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ .

**Шаг 1** – Задание параметров моделирования. На данном шаге необходимо задать максимальный уровень ошибки  $\Delta T_{\text{max}}(T)$ , диапазон изменения младших коэффициентов  $p_{\text{max}}$  и величину  $E_0^*$ , количество ФСХ ТЭП в ансамбле  $Q$ , целевое значение доли температурных точек  $D_t$  в ансамбле за пределами допуска и допускаемое отклонение  $\theta$ .

**Шаг 2** – Моделирование. Шаг моделирования включает:

2.1. Получение значения случайной величины  $p$  с использованием генератора случайных чисел (ГСЧ) с заданным равномерным законом распределения,  $p \in [0 \dots p_{\text{max}}]$ .

2.2. Расчет вектора младших коэффициентов  $\{a_m^*\}_{m=0}^3$

2.3. Вычисление выходных параметров смоделированного ТЭП:  $E_{\text{мод } k}^*$ ,  $T_{\text{мод } k}^*$ ,  $\Delta T_{\text{мод } k}^*$ .

2.4 Проверка выполнения условия (2.14) для  $k$ -ых температурных точек,  $k = 1 \dots K$ . В случае, если условие выполнено, полученная ФСХ ТЭП фиксируется в ансамбле и осуществляется переход на следующий шаг  $q = q + 1$ . Если условие (2.14) не выполнено, осуществляется повтор моделирования данного шага моделирования с 2.1.

**Шаг 3** – Оценка результата моделирования. Здесь необходимо вычислить фактическое долю температурных точек  $D$  за пределами допуска по полученному ансамблю и сравнить с целевым значением  $D_t$ . В случае, если разница между ними не превосходит  $\theta$  (2.20), то генерация синтетических данных выполнена успешно.

Выходные данные алгоритма – ансамбль векторов младших коэффициентов  $A_{\text{мод}}^*$ , соотношение температурных точек  $D$  для полученного ансамбля соответствует целевому значению  $D_t$  с заданным уровнем  $\theta$  (Рисунок 2.2).

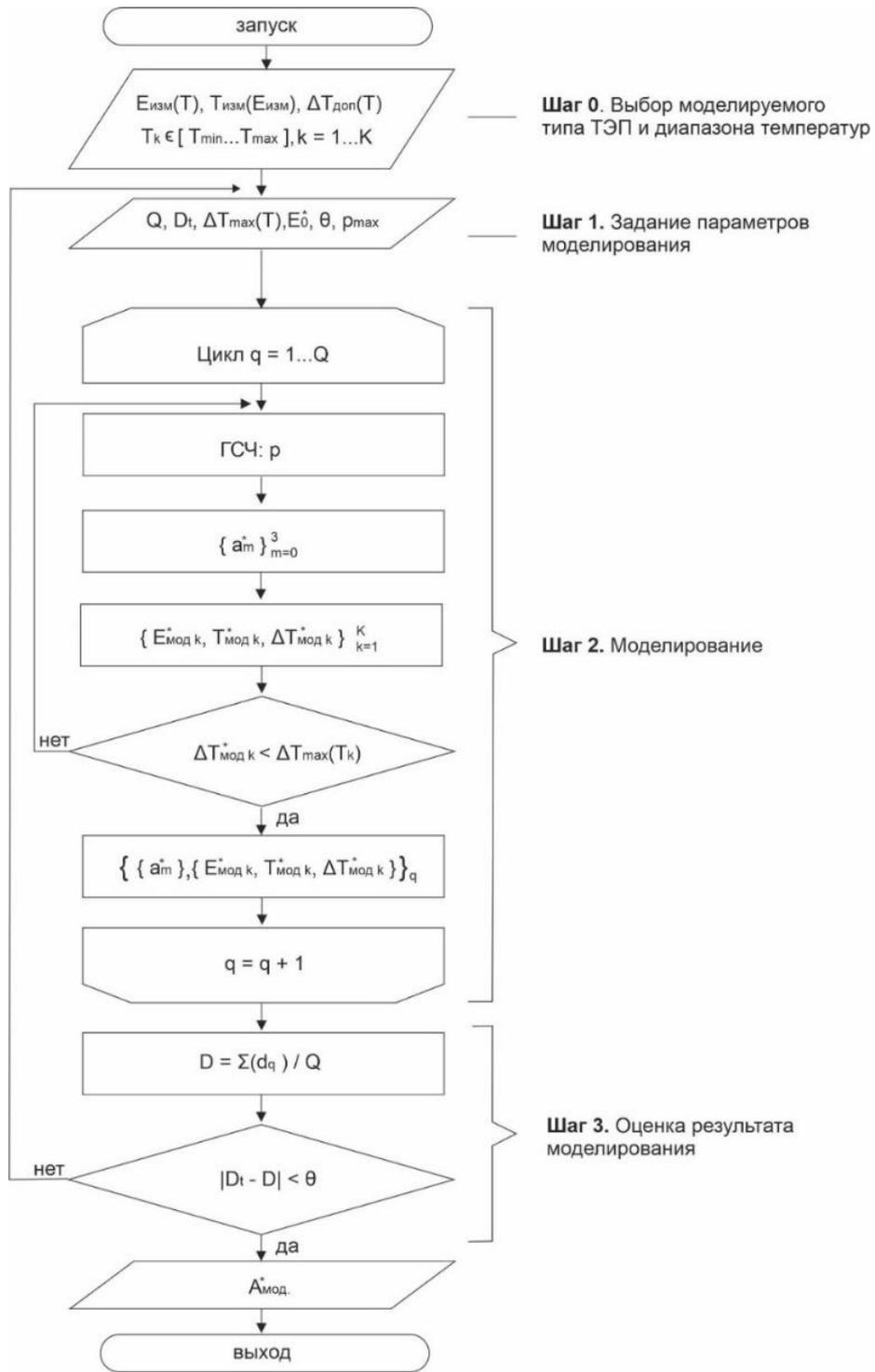


Рисунок 2.2 – Алгоритм генерирования синтетических данных ФСХ ТЭП

Параметры на шагах 0 и 1 алгоритма могут быть выбраны следующим образом. Выбор типа моделируемого ТЭП на шаге 0 однозначно определяет прямые функции для вычисления ТЭДС, обратные функции для вычисления температур и функцию допускаемого отклонения в соответствии со стандартом на ТЭП [34]. Выбор параметров на шаге 1 зависит от требований ансамблю ФСХ ТЭП

при исследовании методов метрологического самоконтроля. Пример требований к ансамблю, сформированных в результате исследования:

- количество ТЭП в ансамбле,  $Q = 100$ ;
- целевое значение доли температурных точек,  $D_t = 5\%$ ;
- допускаемое отклонение  $\theta$  фактической доли температурных точек  $D$  в ансамбле от целевого значения  $D_t$ ,  $\theta = 1\%$ ;
- максимально допускаемое отклонение ФСХ ТЭП от НСХ  $\Delta T_{max}(T)$  в синтетических данных,  $\Delta T_{max}(T) = 3 \cdot \Delta T_{доп}(T)$ ;
- диапазон изменения  $p_{max}$  случайной величины  $p$  при моделировании младших коэффициентов  $a_m^*$ :  $p_{max} = 0,2$ .
- максимальная величина изменения  $E_0^*$  коэффициента  $a_0^*$ :  $E_0^* = 0.3$  мВ.

В зависимости от параметров моделирования на шаге 1, возможны следующие ситуации неуспешного завершения алгоритма на шаге 2:

а) Итоговое значение параметра  $D$  отличается от целевого значения параметра  $D_t$  на величину, большую  $\theta$  (2.20). В случае, если  $D > D_t + \theta$ , необходимо уменьшить диапазон изменения коэффициентов  $a_m^*$  посредством уменьшения параметра  $p_{max}$ . В случае, если  $D < D_t - \theta$ , необходимо увеличить диапазон изменения коэффициентов  $a_m^*$  посредством увеличения параметра  $p_{max}$ .

б) Существенной рост времени выполнения алгоритма или зависание алгоритма на шаге 2. Данная ситуация связана с тем, что параметры  $\Delta T_{max}(T)$  и  $p_{max}$  подобраны неверно относительно друг друга и алгоритм генерирует ТЭП с слишком большим отклонением ФСХ от НСХ. В этом случае необходимо уменьшить  $p_{max}$  или увеличить  $\Delta T_{max}(T)$  в зависимости от целевого параметра  $D_t$ .

### 2.3 Валидация имитационной модели двухэлектродного ТЭП

Задача этапа валидации имитационной модели – подтвердить, что разработанная имитационная модель адекватна моделируемой системе. Принципиально выделяют 3 основных этапа валидации модели [78,81].:

1. Проверка согласованности допущений модели с существующей теорией для моделируемой системы.

2. Оценка соответствия выбранной структуры и параметров модели реальной системе на основе экспериментальных данных.

3. Оценка подобия выходных данных модели и выходных данных моделируемой системы количественными и качественными методами.

На первом этапе валидации необходимо оценить, насколько согласуются используемые в модели допущения с теорией. В предлагаемой имитационной модели ФСХ ТЭП, отклонение ФСХ от НСХ моделируется с помощью младших коэффициентов полинома НСХ. Выбранная степень младших коэффициентов  $M = 3$  взята из процедуры калибровки ТЭП, которая позволяет получить индивидуальную статическую характеристику ТЭП в виде коррекции НСХ полиномом 1...3 степени [79,80]. Выбор 1...3 степени корректирующего полинома обусловлен необходимостью коррекции малых отклонений ФСХ ТЭП от базового полинома НСХ 8...10 степени, величина отклонений находится вблизи допуска  $\Delta T_{\text{доп}}(T)$ . Полиномиальное описание НСХ ТЭП принято в стандартах [34] и следует из теории термоэлектрических цепей [50].

На втором этапе валидации необходимо оценить, насколько выбранная структура и параметры модели соответствуют моделируемой системе. В рассматриваемой задаче, данный этап включает оценку принципиальной способности имитационной модели ТЭП моделировать отклонения ФСХ ТЭП от НСХ  $\Delta T(T)$ . Оценка будет проводиться с использованием исторических экспериментальных данных о ТЭП из различных источников.

Экспериментальные данные о ФСХ ТЭП могут быть представлены следующим образом. Для заданного температурного диапазона  $T_{\text{эк}} \in [T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ ,  $k = 1 \dots K$ , фиксируется фактическая температура процесса  $T_{\text{эк}}$  с помощью эталонного средства измерения, класс точности (разряд) которого выше класса точности ТЭП [79]. Для исследуемого ТЭП фиксируется одно из следующих значений в каждой  $k$ -ой температурной точке:

- измеренное ТЭДС ТЭП  $E_{\text{эксп } k}^*$ ;
- рассчитанная температура ТЭП  $T_{\text{эксп } k}^*$ ;
- рассчитанное отклонение ФСХ ТЭП от НСХ  $\Delta T_{\text{эксп } k}^*$

$$\Delta T_{\text{эксп.}k}^* = T_{\text{эксп.}k}^* - T_{\text{эк}} \quad (2.21)$$

где  $T_{\text{эк}}$  – измерение температуры эталонным средством измерения. Показания исследуемого ТЭП в виде  $E_{\text{эксп.}k}^*$ ,  $T_{\text{эксп.}k}^*$ , или  $\Delta T_{\text{эксп.}k}^*$  эквивалентны и могут быть приведены друг к другу по формулам (2.2) – (2.5) при известной фактической температуре процесса  $T_{\text{эк}}$ . Далее в процедуре валидации используется набор измерений  $\{T_{\text{эк}}, E_{\text{эксп.}k}^*\}_{k=1}^K$  для каждого ТЭП.

Экспериментальные значения ФСХ ТЭП для одинаковых типов ТЭП формируют ансамбль экспериментальных данных. Ансамбль экспериментальных данных  $E_{\text{эксп}}^*$  представляет собой отсчеты ТЭДС ТЭП  $E_{\text{эксп.}qk}^*$  в каждой температурной точке диапазона  $T_{\text{эк}} \in [T_{\min}, T_{\max}]$

$$E_{\text{эксп}}^* = \begin{bmatrix} E_{\text{эксп.}11}^* & \cdots & E_{\text{эксп.}1k}^* & \cdots & E_{\text{эксп.}1K}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{\text{эксп.}q1}^* & \cdots & E_{\text{эксп.}qk}^* & \cdots & E_{\text{эксп.}qK}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{\text{эксп.}Q1}^* & \cdots & E_{\text{эксп.}Qk}^* & \cdots & E_{\text{эксп.}QK}^* \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

где  $k = 1 \dots K$  – номер температурной точки в диапазоне;

$q = 1 \dots Q$  – номер ТЭП в ансамбле. Ключевые требования для включения ФСХ ТЭП в ансамбль – одинаковый тип ТЭП, диапазон и шаг изменения температуры  $T_{\text{эк}}$ . Каждому ТЭП в ансамбле соответствует матрица температур  $T_{\text{эксп}}$ , включающая отсчеты фактической температуры процесса  $T_{\text{эк.}qk}$

$$T_{\text{эксп}} = \begin{bmatrix} T_{\text{эк.}11} & \cdots & T_{\text{эк.}1k} & \cdots & T_{\text{эк.}1K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{\text{эк.}q1} & \cdots & T_{\text{эк.}qk} & \cdots & T_{\text{эк.}qK} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{\text{эк.}Q1} & \cdots & T_{\text{эк.}Qk} & \cdots & T_{\text{эк.}QK} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Отметим, что в ансамбль могут быть включены как результаты единичных экспериментов для отдельного экземпляра ТЭП, так и повторные эксперименты для конкретного экземпляра ТЭП в процессе эксплуатации. Данная особенность формирования ансамбля экспериментальных данных позволяет получить максимально разнообразные случаи отклонения ФСХ ТЭП от НСХ при ограниченном объеме доступных исторических экспериментальных данных.

Обработка данных в полученном ансамбле выполняется одинаково для каждой экспериментальной ФСХ ТЭП с индексом  $q$ , которая представлена набором измерений  $\{T_{эк}, E_{эксп k}^*\}_{k=1}^K$ . Для полученных экспериментальных данных необходимо построить аппроксимацию данного набора измерений с использованием функции  $E_{мод}^*(T)$  вида (2.9). Преобразуем  $E_{мод}^*(T)$  следующим образом

$$E_{мод}^*(T) = a_0^* + a_1^*T + a_2^*T^2 + a_3^*T^3 + V(T) \quad (2.24)$$

где  $V(T) = \sum_{i=M+1}^N a_i T^i + C(T)$  – слагаемое, не включающее искомый вектор младших коэффициентов. Задача поиска вектора младших коэффициентов сводится к решению следующей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\begin{cases} a_0^* + a_1^*T_1 + a_2^*T_1^2 + a_3^*T_1^3 + V(T_1) = E_1^* \\ \dots \\ a_0^* + a_1^*T_k + a_2^*T_k^2 + a_3^*T_k^3 + V(T_k) = E_k^* \\ \dots \\ a_0^* + a_1^*T_K + a_2^*T_K^2 + a_3^*T_K^3 + V(T_K) = E_K^* \end{cases} \quad (2.25)$$

или в матричном виде

$$T\mathbf{w} + \mathbf{V} = \mathbf{E} \quad (2.26)$$

где  $\mathbf{w} = \{a_0^*, a_1^*, a_2^*, a_3^*\}^T$  – вектор-столбец искомых младших коэффициентов, размерность  $4 \times 1$ ;

$T$  – матрица преобразования на основе измерений фактической температуры процесса, размерность  $K \times 4$

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

$\mathbf{V} = \{V(T_1), \dots, V(T_k), \dots, V(T_K)\}^T$  – вектор-столбец свободных членов, размерность  $K \times 1$ ;

$\mathbf{E} = \{E_1, \dots, E_k, \dots, E_K\}^T$  – вектор-столбец измерения ТЭДС ТЭП, размерность  $K \times 1$ .

Поскольку число уравнений  $K$  больше числа искоемых младших коэффициентов  $M$  и набор измерений  $\{T_{\Delta k}, E_{\text{эксп } k}^*\}_{k=1}^K$  имеет случайные погрешности измерений, поиск наилучшего вектора  $\mathbf{w}$ , обеспечивающего решение СЛАУ (2.26), осуществляется на основе критерия минимизации функции ошибки между левой и правой частями СЛАУ. Такая постановка задачи представляет задачу линейной регрессии и традиционно решается с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [82]. Определим ошибку между левой и правой частью СЛАУ (2.26) следующим образом

$$\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{E} - (\mathbf{T}\mathbf{w} + \mathbf{V}) \quad (2.27)$$

где  $\boldsymbol{\gamma} = \{\gamma_1, \dots, \gamma_k, \dots, \gamma_K\}^T$  – вектор-столбец ошибки аппроксимации, размерность  $K \times 1$ .

В качестве критерия минимизации в МНК используется квадратичный критерий минимума функции ошибки  $Y(\mathbf{w})$

$$Y(\mathbf{w}) = \sum_{k=1}^K \gamma_k^2 \rightarrow \min \quad (2.28)$$

или в матричном виде

$$Y(\mathbf{w}) = \boldsymbol{\gamma}^T \boldsymbol{\gamma} \rightarrow \min, \quad (2.29)$$

с учетом (2.27), получаем

$$Y(\mathbf{w}) = (\mathbf{E} - (\mathbf{T}\mathbf{w} + \mathbf{V}))^T (\mathbf{E} - (\mathbf{T}\mathbf{w} + \mathbf{V})) \rightarrow \min \quad (2.30)$$

Условия минимума функции ошибки достигается при равенстве нулю производной функции ошибки по вектору  $\mathbf{w}$

$$\frac{\partial Y(\mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} = 0 \quad (2.31)$$

Тогда, подставляя (2.30) в (2.31)

$$\frac{\partial \left( (\mathbf{E} - (\mathbf{T}\mathbf{w} + \mathbf{V}))^T (\mathbf{E} - (\mathbf{T}\mathbf{w} + \mathbf{V})) \right)}{\partial \mathbf{w}} = 0,$$

откуда, вычисляя производную,

$$2\mathbf{T}^T \mathbf{T}\mathbf{w} - 2\mathbf{T}^T (\mathbf{E} - \mathbf{V}) = \mathbf{0}$$

и преобразуя, получаем вектор младших коэффициентов  $\mathbf{w}$

$$\mathbf{w} = (\mathbf{T}^T \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^T (\mathbf{E} - \mathbf{V}) \quad (2.32)$$

Метод наименьших квадратов (МНК) позволяет получить несмещенные, состоятельные и эффективные оценки вектора коэффициентов  $\mathbf{w}$  в (2.32) при выполнении следующих условий: погрешность измерения фактической температуры  $T_{\text{эксп}}$  должна быть намного меньше погрешности измерения ТЭДС  $E_{\text{эксп}}^*$ , дисперсии случайных составляющих погрешностей измерений  $E_{\text{эксп}}^*$  должны быть одинаковы и постоянны, случайные составляющие погрешности должны иметь нормальный закон распределения [82]. В данной задаче, поскольку экспериментальные данные ФСХ ТЭП для отдельных ТЭП в ансамбле получены из разных источников, выполнение условий МНК для ансамбля ТЭП не гарантируется. Кроме того, результаты расчетов показали, что матрица  $\mathbf{T}^T \mathbf{T}$  в (2.32) при определенных условиях плохо обусловлена, что нарушает устойчивость решения, получаемого с помощью МНК [83]. Таким образом, применение МНК не гарантирует корректное получение и последующее адекватное сравнение оценок вектора младших коэффициентов  $\mathbf{w}$  для различных ТЭП в ансамбле.

Применение одного из оптимизационных методов поиска параметров для нелинейных регрессионных моделей позволяет преодолеть ограничения классического МНК для данной задачи. Используем алгоритм Левенберга-Марквардта [84,85], который осуществляет поиск вектора младших коэффициентов  $\mathbf{w}$  итерационным методом, стремясь к минимизации квадратичной ошибки  $Y(\mathbf{w})$  (2.29). Данный алгоритм отличается высокой скоростью сходимости, позволяет находить решения для переменных, отличающихся на несколько порядков, и обладает встроенным параметром регуляризации.

Пусть имеется начальный вектор значений коэффициентов  $\mathbf{w}^0$ . На каждом новом  $(n + 1)$ -ом шаге моделирования вектор  $\mathbf{w}^{n+1}$  рассчитывается как

$$\mathbf{w}^{n+1} = \mathbf{w}^n + \Delta \mathbf{w}^n \quad (2.33)$$

где  $n + 1$  – новый шаг моделирования;

$n$  – текущий шаг моделирования,  $n \geq 0$ .

Для оценки приращения  $\Delta \mathbf{w}^n$  на  $n$ -ом шаге в алгоритме Левенберга-Марквардта используется следующее соотношение [85]

$$\Delta \mathbf{w}^n = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \cdot \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T (\boldsymbol{\gamma}^n) \quad (2.34)$$

где  $\mathbf{y}^n$  – значение вектора-столбца ошибки аппроксимации на  $n$ -ом шаге алгоритма, получаемое подстановкой  $\mathbf{w}^n$  в (2.27), размерность  $4 \times 1$ ;

$\lambda$  – параметр регуляризации алгоритма;

$I$  – единичная матрица, размерность  $4 \times 4$ ;

$J$  – матрица Якоби, которая составляется из значений частных производных функции  $E_{\text{мод}}^*(T)$  по каждому элементу вектора  $\mathbf{w}$  в точках  $T_k$  следующим образом, размерность  $K \times 4$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_1)}{\partial w_0} & \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_1)}{\partial w_1} & \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_1)}{\partial w_2} & \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_1)}{\partial w_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_k)}{\partial w_0} & \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_k)}{\partial w_1} & \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_k)}{\partial w_2} & \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_k)}{\partial w_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_K)}{\partial w_0} & \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_K)}{\partial w_1} & \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_K)}{\partial w_2} & \frac{\partial E_{\text{мод}}^*(\mathbf{w}, T_K)}{\partial w_3} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Параметр регуляризации алгоритма  $\lambda$  определяет скорость сходимости алгоритма и итоговое значение функции ошибки  $Y(\mathbf{w})$ , а также повышает устойчивость алгоритма при плохой обусловленности матрицы  $J^T J$ . Подбор параметра регуляризации может осуществляться различными способами [85,86], в данной работе использован способ из [86], реализация которого представлена далее.

Блок-схема на рисунке 2.3 демонстрирует ключевые шаги определения вектора младших коэффициентов  $\mathbf{w}$  на основе алгоритма Левенберга-Марквардта.

**Шаг 0** – Определение начальных значений. Начальное приближение вектора младших коэффициентов  $\mathbf{w}^0$  выбирается на основе НСХ ТЭП (2.2)

$$\mathbf{w}_0 = \{a_0, a_1, a_2, a_3\} \quad (2.36)$$

Начальное значение функции ошибки  $Y(\mathbf{w}_0)$  вычисляется подстановкой  $\mathbf{w}_0$  в (2.30). Начальное приближение  $\lambda^0$  в соответствии с [86] выбрано:

$\lambda^0 = 0.01$ . Алгоритм запускается с значения  $n = 0$ . Также на шаге 0 задается пороговое значения функции ошибки  $[Y]_{tol}$ .

**Шаг 1** – Вычисление приращения вектора  $\Delta \mathbf{w}^n$ . Приращение вычисляется следующим образом:

- рассчитывается матрица  $J$  по (2.35);
- рассчитывается  $\gamma^n$  подстановкой  $w^n$  в (2.27);
- выполняются все матричные операции по (2.34) и определяется  $\Delta w^n$  при значении параметра регуляризации  $\lambda^n$ .

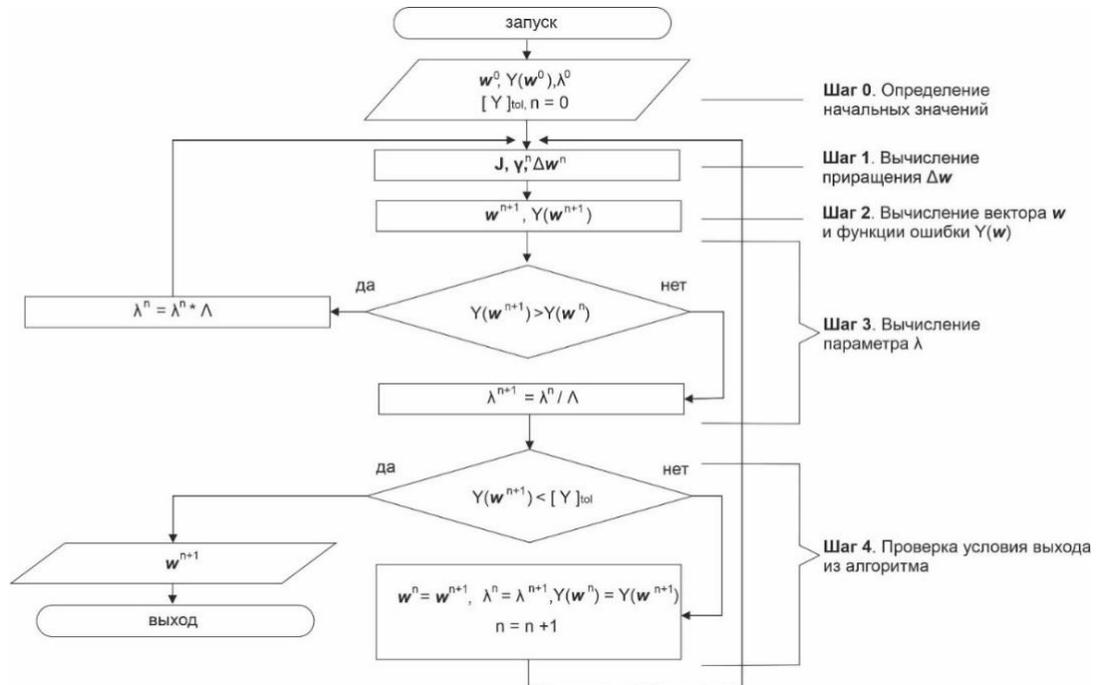


Рисунок 2.3 – Алгоритм расчета вектора младших коэффициентов Левенберга-Марквардта

**Шаг 2** – Вычисление нового значения вектора младших коэффициентов  $w$  и значения функции ошибки  $Y(w)$ . На этом шаге рассчитывается новое значение вектора  $w^{n+1}$  согласно (2.33) и определяется новое значение функции ошибки  $Y(w^{n+1})$ .

**Шаг 3** – Вычисление нового значения параметра регуляризации  $\lambda$ . Значение параметра  $\lambda^{n+1}$  определяется из следующего условия:

- если значение функции ошибки на  $(n + 1)$ -ом шаге возросло по сравнению с значением функции ошибки на  $n$ -ом шаге ( $Y(w^{n+1}) > Y(w^n)$ ), то

$$\lambda^n = \lambda^n \cdot \Lambda \quad (2.37)$$

где  $\Lambda$  – постоянный параметр, и осуществляется переход на шаг 1 без изменения индекса  $n$ .

- если значение функции ошибки на  $(n + 1)$ -ом шаге уменьшилось по сравнению с значением на  $n$ -ом шаге ( $Y(\mathbf{w}^{n+1}) < Y(\mathbf{w}^n)$ ), то

$$\lambda^{n+1} = \lambda^n / \Lambda \quad (2.38)$$

и осуществляется переход на шаг 4.

**Шаг 4** – Проверка глобального условия выхода из алгоритма и переход на следующий шаг  $n + 1$ . Алгоритм останавливается на  $n$ -ом шаге при условии,  $Y(\mathbf{w}^{n+1}) < [Y]_{tol}$ . В случае, если  $Y(\mathbf{w}^{n+1}) > [Y]_{tol}$ , то осуществляется переход на  $n + 1$  шаг с использованием следующего переназначения переменных  $n$ -го шага:  $\mathbf{w}^n = \mathbf{w}^{n+1}$ ;  $\lambda^n = \lambda^{n+1}$ ;  $Y(\mathbf{w}^n) = Y(\mathbf{w}^{n+1})$ ;  $n = n + 1$ .

Выходные данные алгоритма – вектор младших коэффициентов  $\mathbf{w}^{n+1}$ , обеспечивающий значение функции ошибки  $Y(\mathbf{w}^{n+1})$  меньше установленного порогового значения  $[Y]_{tol}$ .

Параметры  $[Y]_{tol}$  и  $\Lambda$  являются параметрами алгоритма. Допустимое значение функции ошибки  $[Y]_{tol}$  выбирается в зависимости от требуемой точности аппроксимации, по результатам расчетов параметр  $[Y]_{tol}$  составлял  $[Y]_{tol} = 0.01$  и менее. Коэффициент изменения параметра регуляризации  $\Lambda$  может быть выбран различным способом, согласно [86] выбрано значение  $\Lambda = 10$ .

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 значений ФСХ ТЭП (2.22)

$$\mathbf{A}_{\text{эксп}}^* = \begin{bmatrix} a_{10}^* & a_{11}^* & a_{12}^* & a_{13}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{q0}^* & a_{q1}^* & a_{q2}^* & a_{q3}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{Q0}^* & a_{Q1}^* & a_{Q2}^* & a_{Q3}^* \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

где  $\mathbf{A}_{\text{эксп}}^*$  – матрица младших коэффициентов, полученная с помощью аппроксимации каждой  $q$ -й экспериментальной ФСХ ТЭП в ансамбле;

$Q$  – количество ТЭП в ансамбле экспериментальных данных. Каждая строка матрицы  $\mathbf{A}_{\text{эксп}}^*$  характеризует аппроксимацию ФСХ ТЭП с помощью модельной

функции  $E_{\text{мод}}^*(T)$ . Далее, по этой функции могут быть вычислены параметры каждого ТЭП в каждой  $k$ -ой точке температурного диапазона:  $E_{\text{мод } k}^*$ ,  $T_{\text{мод } k}^*$ ,  $\Delta T_{\text{мод } k}^*$ .

Итоговый шаг второго этапа валидации – сравнение отклонений ФСХ ТЭП от НСХ  $\Delta T(T)$ , наблюдаемых в экспериментальных данных и в полученной аппроксимации для каждого  $q$ -го ТЭП в ансамбле. Отклонение температуры ТЭП от фактической температуры процесса (эталона)  $\Delta T_{\text{эксп } k}^*$  в каждой  $k$ -ой точке определяется по (2.21)

$$\Delta T_{\text{эксп } k}^* = T_{\text{эксп } k}^* - T_{\text{эк}}^*$$

где  $T_{\text{эк}}^*$  – измерение температуры эталонным средством измерения. Соответственно, отклонение температуры ТЭП от фактической температуры процесса в полученной аппроксимации  $\Delta T_{\text{мод } k}^*$

$$\Delta T_{\text{мод } k}^* = T_{\text{мод } k}^* - T_{\text{эк}}^*$$

Введем метрику  $\xi_k$  – рассогласование между экспериментальными данными и их аппроксимацией в каждой  $k$ -ой точке

$$\xi_k = |\Delta T_{\text{эксп } k}^* - \Delta T_{\text{мод } k}^*| \quad (2.40)$$

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. Введем допустимый уровень рассогласования  $\xi_{\text{доп}}(T)$ , который для формируемого ансамбля экспериментальных данных рассчитывается в соответствующих температурных точках  $T_{\text{эк}}^*$ . Тогда рассогласование  $\xi_k$  должно быть меньше допустимого уровня

$$\xi_k < \xi_{\text{доп}}(T_{\text{эк}}^*), k = 1 \dots K \quad (2.41)$$

где  $\xi_{\text{доп}}(T_{\text{эк}}^*)$  – максимально допустимое рассогласование между экспериментальным значением  $\Delta T_{\text{эксп } k}^*$  и полученным в аппроксимации значением  $\Delta T_{\text{мод } k}^*$ . В данном исследовании принято следующее значение параметра  $\xi_{\text{доп}}(T)$

$$\xi_{\text{доп}}(T) = 0,5 \Delta T_{\text{доп}}(T) \quad (2.42)$$

Предлагаемая имитационная модель позволяет воспроизвести такие ФСХ для заданного типа ТЭП, отклонение  $\Delta T_{\text{мод } k}^*$  которых отличается от отклонения  $\Delta T_{\text{эксп } k}^*$  экспериментальных данных не более чем на 0,5 допустимого отклонения

$\Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$  в каждой  $k$ -ой точке температурного диапазона. Выполнение неравенства (2.41) отделяет те экспериментальные случаи, в которых ФСХ ТЭП не может быть описана с помощью предлагаемой имитационной модели. Соответствующие экспериментальные данные, не удовлетворяющие условию (2.40), должны быть исключены из ансамбля. Тогда, обозначим  $Q_{\text{эксп}}$  – объем ансамбля экспериментальных данных, где все экспериментальные ФСХ ТЭП соответствуют условию (2.40).

Ранее при настройке параметров имитационной модели было введено требование, чтобы величина моделируемого отклонения ФСХ ТЭП от НСХ  $\Delta T_{\text{мод}}^*(T)$  не превосходила заданного уровня  $\Delta T_{\text{max}}(T)$  ((2.14) – (2.15))

$$\Delta T_{\text{мод}}^*(T) < \Delta T_{\text{max}}(T)$$

Данное требование позволило исключить из результатов имитационного моделирования такие варианты ФСХ ТЭП, отклонение которых от НСХ значительно больше допусаемого отклонения. С другой стороны, для сформированного ансамбля экспериментальных данных условие (2.40) исключает такие варианты ФСХ ТЭП, которые не могут быть описаны имитационной моделью. Тогда, значение параметра  $\Delta T_{\text{max}}(T)$

$$\Delta T_{\text{max}}(T) = v * \Delta T_{\text{доп}}(T) \quad (2.43)$$

$$v = \frac{\max(\{\Delta T_{\text{эксп } k}^*\}_{k=1}^K)}{\Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})} \quad (2.44)$$

где  $v$  – величина отношения наибольшего отклонения  $\Delta T_{\text{эксп } k}^*$  из всего ансамбля экспериментальных данных к соответствующему значению допусаемого отклонения ФСХ от НСХ  $\Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$ ;

$q = 1 \dots Q_{\text{эксп}}$  – число экспериментальных реализаций ФСХ в ансамбле.

Определение  $\Delta T_{\text{max}}(T)$  в соответствии с (2.43) – (2.44) позволяет настроить имитационную модель с учетом реального диапазона отклонения ФСХ ТЭП от НСХ в исторических экспериментальных данных.

В итоге, второй этап валидации подтверждает соответствие структуры имитационной модели ФСХ ТЭП с изменением младших коэффициентов  $a_0^* \dots a_3^*$  реальным экспериментальным данным. Допустимая величина рассогласования

между имитационной моделью и реальным ТЭП определяется введенным параметром  $\xi_{\text{доп}}(T)$ . Также второй этап валидации позволяет уточнить значение параметра имитационной модели  $\Delta T_{\text{max}}(T)$ , приближая результаты имитационного моделирования к реальным экспериментальным данным.

На третьем этапе валидации необходимо оценить подобие данных на выходе алгоритма генерирования синтетических данных ФСХ ТЭП и исторических экспериментальных данных о ФСХ ТЭП с использованием статистических методов. Выходные данные алгоритма – ансамбль векторов младших коэффициентов  $A_{\text{мод}}^*$  (2.17), который имеет стохастическую природу за счет случайной величины  $p$  в уравнении моделирования коэффициентов (2.10). Выходные данные эксперимента – ансамбль векторов младших коэффициентов  $A_{\text{эксп}}^*$  (2.39), который имеет стохастическую природу за счет воздействия совокупности влияющих факторов на ТЭП в процессе эксплуатации. Каждый из коэффициентов в соответствующем ансамбле  $\{a_{\text{мод } qt}^*\}_{q=1}^Q$  и  $\{a_{\text{эксп } qt}^*\}_{q=1}^{Q_{\text{эксп}}}$ ,  $t = 0 \dots 3$ , представляет собой выборку случайной величины с некоторым законом распределения. Соответственно, сравнение соответствующих коэффициентов из  $A_{\text{мод}}^*$  и  $A_{\text{эксп}}^*$  должно выполняться с использованием статистических методов.

Один из методов для оценки подобия синтетических и экспериментальных данных – метод коррелированной проверки [78]. Метод сравнивает данные на выходе имитационной модели системы и экспериментальные данные реальной системы при условии, что имитационная модель использует такие же входные параметры, которые были установлены или наблюдались при эксперименте над реальной системой. Введение такого требования позволяет существенно повысить надежность статистического сравнения выходных данных моделируемой и реальной системы [78]. В рассматриваемой задаче, применение метода коррелированной проверки выглядит следующим образом (Рисунок 2.4).

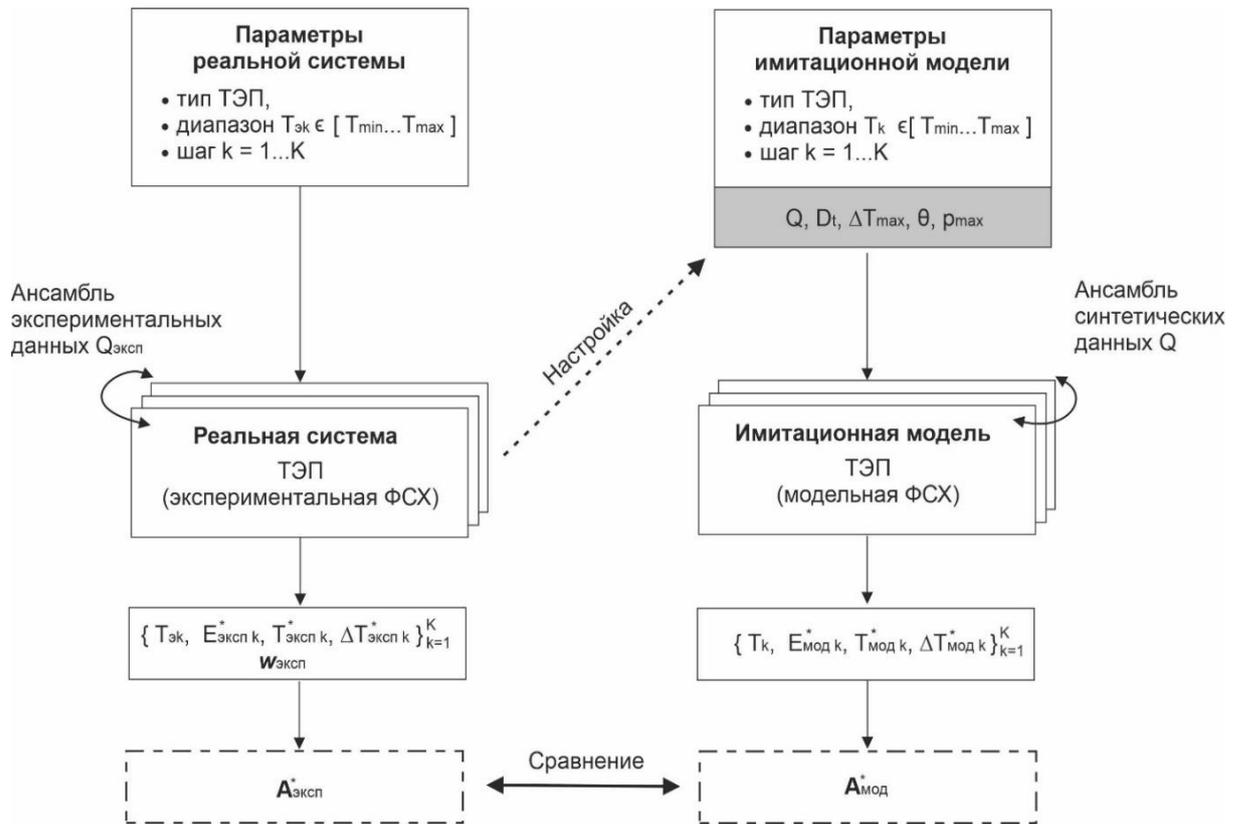


Рисунок 2.4 – Схема метода коррелированной проверки

Реальная система – термоэлектрический преобразователь (ТЭП), который характеризуется фактической статической характеристикой (ФСХ). ТЭП эксплуатируется в некоторых условиях, что приводит к отклонению ФСХ ТЭП от НСХ. Получение информации об экспериментальной ФСХ ТЭП производится посредством измерения ТЭДС ТЭП  $E_{эксп k}^*$  при измерении фактической температуры процесса  $T_{эк}$  с помощью эталонного средства измерений, в результате получают набор измерений  $\{T_{эк}, E_{эксп k}^*\}_{k=1}^K$ . Как было показано на втором этапе валидации, по результатам обработки полученного набора измерений для ТЭП рассчитываются значения температуры ТЭП  $T_{эксп k}^*$ , определяется отклонение температуры ТЭП  $\Delta T_{эксп k}^*$  от температуры эталонного средства измерений и рассчитывается вектор младших коэффициентов  $w_{эксп} = \{a_{эксп 0}^*, a_{эксп 1}^*, a_{эксп 2}^*, a_{эксп 3}^*\}^T$ . Из нескольких ТЭП одинакового типа, измерения для которых проводились в одинаковом диапазоне  $T_{эк} \in [T_{min}, T_{max}]$  в экспериментальных точках  $k = 1 \dots K$ , формируется ансамбль экспериментальных

данных объемом  $Q_{\text{эксп}}$ . Рассчитанные векторы  $\mathbf{W}_{\text{эксп}}$  объединяются в матрицу  $\mathbf{A}_{\text{эксп}}^*$  (2.39), описывающую данный ансамбль.

Имитационная модель реальной системы (ТЭП) описывает ФСХ ТЭП в виде уравнения (2.9), младшие коэффициенты которого определяются по формуле (2.10) с использованием случайной величины  $p \in [0 \dots p_{\text{max}}]$ . В соответствии с методом коррелированной проверки, алгоритм генерирования синтетических данных ФСХ ТЭП (Рисунок 2.2) должен использовать входные параметры аналогичные эксперименту: тип ТЭП, диапазон и значение температуры  $T_k \in [T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$  в экспериментальных точках  $k = 1 \dots K$ . Данные входные параметры используются на шаге 0 алгоритма. Кроме того, для запуска алгоритма необходимо определить параметры на шаге 1 ( $Q, D_t, \Delta T_{\text{max}}(T), \theta, p_{\text{max}}$ ):

- размер ансамбля синтетических данных  $Q_{\text{мод}}$  определяется на основе полученного экспериментального ансамбля,  $Q_{\text{мод}} = Q_{\text{эксп}}$ ;

- целевое значение доли температурных точек  $D_t$  за пределами допуска для ансамбля синтетических данных определяется на основе фактического значения доли температурных точек  $D_{\text{эксп}}$  за пределами допуска в ансамбле экспериментальных данных (расчет по формуле (2.19)),  $D_t = D_{\text{эксп}}$ ;

- максимальное значение отклонения ФСХ от НСХ  $\Delta T_{\text{max}}(T)$  определяется на основе соотношений (2.43) – (2.44);

- параметры алгоритма  $\theta$  и  $p_{\text{max}}$  остаются настраиваемыми.

Таким образом, исторические экспериментальные данные используются как для настройки алгоритма генерирования синтетических данных, так и для последующей проверки. На выходе алгоритма получаем ансамбль синтетических данных, описываемый матрицей  $\mathbf{A}_{\text{мод}}^*$ , объем ансамбля  $Q_{\text{мод}}$ . Для завершения третьего этапа валидации остается определить методы сравнения данных на выходе модели  $\mathbf{A}_{\text{мод}}^*$  и эксперимента  $\mathbf{A}_{\text{эксп}}^*$ .

Сравнение данных имитационной модели и реальной системы может быть выполнено на основе субъективных или объективных методов оценки подобия [81,87]. Предпочтительными методами сравнения являются объективные методы,

основанные на статистических критериях и позволяющие численно оценить степень подобия данных. В данной работе для оценки подобия выборок коэффициентов  $A_{\text{мод}}^*$  и  $A_{\text{эксп}}^*$  использован непараметрический критерий однородности Лемана-Розенблатта в качестве объективного критерия.

Критерий однородности Лемана-Розенблатта позволяет проверить однородность двух выборок [88] соответствующих коэффициентов  $U = \{a_{\text{мод } jm}^*\}_{j=1}^{Q_{\text{мод}}}$  из  $A_{\text{мод}}^*$  (2.17) и  $V = \{a_{\text{эксп } im}^*\}_{i=1}^{Q_{\text{эксп}}}$  из  $A_{\text{эксп}}^*$  (2.39), где  $m = 0 \dots 3$ . Пусть выборки соответствующих  $m$ -ных коэффициентов упорядочены по возрастанию, причем, в общем случае  $Q_{\text{мод}} \neq Q_{\text{эксп}}$

$$\begin{aligned} a_{\text{мод } 1m}^* < \dots < a_{\text{мод } jm}^* < \dots < a_{\text{мод } Q_{\text{мод}}m}^* \\ a_{\text{эксп } 1m}^* < \dots < a_{\text{эксп } im}^* < \dots < a_{\text{эксп } Q_{\text{эксп}}m}^* \end{aligned} \quad (2.45)$$

где  $j, i$  – соответствующие индексы для выборки синтетических значений коэффициентов и значений коэффициентов, рассчитанных по экспериментальным данным. Для оценки однородности выборок необходимо проверить гипотезу  $H_0$  о том, что обе выборки извлечены из неизвестных непрерывных распределений  $U \in F(z), V \in G(z)$ , для которых выполнено

$$H_0: F(z) = G(z) \forall z \quad (2.46)$$

где  $z$  – случайная величина, характеризующая некоторую генеральную совокупность. Гипотеза  $H_0$  утверждает, что выборки  $U$  и  $V$  для соответствующего  $m$  извлечены из одной генеральной совокупности, следовательно, при увеличении числа измерений их средние значения и дисперсии будут стремиться друг к другу [89].

Статистика  $\omega$  критерия однородности Лемана-Розенблатта рассчитывается

$$\omega = B \left[ Q_{\text{эксп}} \sum_{i=1}^{Q_{\text{эксп}}} (r_i - i)^2 + Q_{\text{мод}} \sum_{j=1}^{Q_{\text{мод}}} (s_j - j)^2 \right] - C \quad (2.47)$$

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  $a_{\text{эксп } im}^*$  в объединенном вариационном ряде;

$Q_{\text{эксп}}$  – количество элементов  $a_{\text{эксп } im}^*$  в выборке  $\{a_{\text{эксп } im}^*\}_{i=1}^{Q_{\text{эксп}}}$ ;

$s_j$  – порядковый номер  $a_{\text{мод } jm}^*$  в объединенном вариационном ряде;

$Q_{\text{мод}}$  – количество элементов  $a_{\text{мод } jm}^*$  в выборке  $\{a_{\text{мод } jm}^*\}_{j=1}^{Q_{\text{мод}}}$ .

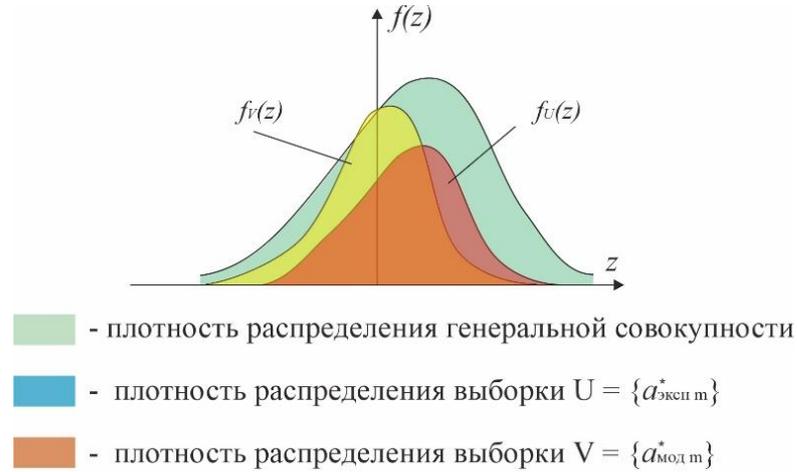


Рисунок 2.5 – Иллюстрация плотности распределения  $f(z)$  для двух однородных выборок, извлеченных из одной генеральной совокупности

Выполнение условия

$$\omega < \omega_{\text{порог}}(\alpha) \quad (2.48)$$

означает, что гипотеза  $H_0$  об однородности двух выборок не отклоняется для заданного уровня значимости  $\alpha$ , значения  $\omega_{\text{порог}}(\alpha)$  представлены в справочниках [88,90]. Важно отметить, что критерий обладает достаточной мощностью для объема выборок  $Q_{\text{мод}}, Q_{\text{эксп}} > 20$  при  $Q_{\text{мод}} = Q_{\text{эксп}}$  [89,91].

В итоге, третий этап валидации подтверждает адекватность разработанного алгоритма генерирования синтетических данных ФСХ ТЭП в случае подтверждения однородности выборок соответствующих коэффициентов. Однородность проверяется для выборки  $\{a_{\text{эксп } qt}^*\}_{q=1}^{Q_{\text{эксп}}}$  из ансамбля экспериментальных данных  $A_{\text{эксп}}^*$  и выборки  $\{a_{\text{мод } qt}^*\}_{q=1}^{Q_{\text{мод}}}$  из ансамбля синтетических данных  $A_{\text{мод}}^*$ , при  $t = 0 \dots 3$ . При этом параметры алгоритма генерирования синтетических данных настраиваются на основе метода коррелированной проверки с использованием параметров ансамбля экспериментальных данных.

Далее рассмотрен пример настройки и валидации алгоритма генерирования синтетических данных ФСХ ТЭП для ТЭП хромель-алюмель (ХА). Выбор ТЭП ХА для демонстрации возможностей предложенного алгоритма генерирования синтетических данных обусловлен изученностью данного типа ТЭП и доступностью необходимого объема исторических экспериментальных данных.

### **Пример настройки и валидации имитационной модели для ТЭП хромель-алюмель (ХА).**

Для термоэлектрического преобразователя хромель-алюмель (ХА) из доступных исторических экспериментальных данных было получено 45 наборов измерений вида  $\{T_{эк}, \Delta T_{эксп.k}^*\}_{k=1}^K$ , из них только 34 набора измерений представлено в одинаковом диапазоне  $T_{эк} \in 100 \dots 800^\circ\text{C}$  с шагом  $100^\circ\text{C}$ ,  $K = 8$ . По найденным измерениям сформирован ансамбль экспериментальных данных объемом  $Q = 34$ .

Стандартные функции для вычисления ТЭДС  $E^{XA}(T)$ , температуры  $T^{XA}(E^{XA})$  и допусаемого отклонения ФСХ от НСХ для ТЭП ХА из [34] имеют вид

- зависимость ТЭДС от температуры, при  $T = 0 \dots 1000^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} E^{XA}(T) = & (-1.8 \cdot 10^{-2}) + (3.9 \cdot 10^{-2})T + (1.9 \cdot 10^{-5})T^2 \\ & + (-9.9 \cdot 10^{-8})T^3 + (3.2 \cdot 10^{-10})T^4 + (-5.6 \cdot 10^{-13})T^5 + (5.6 \cdot 10^{-16})T^6 \\ & + (3.2 \cdot 10^{-19})T^7 + (9.7 \cdot 10^{-23})T^8 + (-1.2 \cdot 10^{-26})T^9 + \\ & (1.2 \cdot 10^{-1})e^{(-1.2 \cdot 10^{-4})(T-126.9)^2} \end{aligned} \quad (2.49)$$

- обратная зависимость температуры от ТЭДС, при  $E^{XA} = 0 \dots 20,6$  мВ

$$\begin{aligned} T^{XA}(E^{XA}) = & 0 + (2.5 \cdot 10)E^{XA} + (7.9 \cdot 10^{-2})(E^{XA})^2 + (-2.5 \cdot 10^{-1})(E^{XA})^3 \\ & + (8.3 \cdot 10^{-2})(E^{XA})^4 + (-1.2 \cdot 10^{-2})(E^{XA})^5 + (9.8 \cdot 10^{-3})(E^{XA})^6 \\ & + (-4.4 \cdot 10^{-5})(E^{XA})^7 + (1.1 \cdot 10^{-6})(E^{XA})^8 + (-1.1 \cdot 10^{-8})(E^{XA})^9 \end{aligned} \quad (2.50)$$

- обратная зависимость температуры от ТЭДС, при  $E^{XA} = 20,7 \dots 54,9$  мВ

$$\begin{aligned} T_{XA}(T) = & (-1.3 \cdot 10^2) + (4.8 \cdot 10)E^{XA} + (-1.6)(E^{XA})^2 + (5.5 \cdot 10^{-2})(E^{XA})^3 \\ & + (-9.7 \cdot 10^{-4})(E^{XA})^4 + (8.8 \cdot 10^{-6})(E^{XA})^5 + (-3.1 \cdot 10^{-8})(E^{XA})^6 \end{aligned} \quad (2.51)$$

- допусаемое отклонение ФСХ от НСХ

$$\Delta T_{доп}^{XA}(T) = \begin{cases} 2,5, & 0 \leq T < 333 \\ 0,0075 * T, & 333 \leq T \leq 800 \end{cases} \quad (2.52)$$

Далее необходимо провести расчет вектора младших коэффициентов  $\mathbf{w}_{\text{эксп}}$  для каждого  $q$ -го ФСХ ТЭП в ансамбле. Поиск вектора  $\mathbf{w}_{\text{эксп}}$  осуществляется с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта (Рисунок 2.3), который минимизирует функцию ошибки  $Y(\mathbf{w}_{\text{эксп}})$  ((2.28) – (2.30)) приближения экспериментальных данных  $\{T_{\text{эк}}, E_{\text{эксп},k}^*\}_{k=1}^K$  с помощью функции  $E_{\text{мод}}^*(T)$  вида (2.24). В данной работе использовалась готовая реализация алгоритма Левенберга-Марквардта в пакете научных вычислений MATLAB [92]. Используемые параметры алгоритма:

- начальное значение параметра регуляризации  $\lambda^0 = 0.01$ ;
- максимальное значение пороговой функции ошибки  $[Y]_{\text{tol}} = 0.01$ ;
- начальное приближение вектора искомых младших коэффициентов

$$\mathbf{w}_0 = \{a_0, a_1, a_2, a_3\}$$

где  $a_0 = -1.8 \cdot 10^{-2}$ ,  $a_1 = 3.9 \cdot 10^{-2}$ ,  $a_2 = 1.9 \cdot 10^{-5}$ ,  $a_3 = -9.9 \cdot 10^{-8}$  – значения коэффициентов в соответствии с НСХ ТЭП (2.49). В случае успешной сходимости алгоритма, значение  $[Y]_{\text{tol}}$  уменьшалось и алгоритм запускался снова. Значение коэффициента  $\Lambda$  изменения параметра регуляризации в (2.37) – (2.38) является внутренним постоянным параметром, в данной реализации алгоритма  $\Lambda = 10$ .

Пошаговый результат работы алгоритма (Рисунок 2.6) отражает уменьшение функции ошибки  $Y(\mathbf{w}_{\text{эксп}}^n)$  (*Residual*) и значения параметра регуляризации  $\lambda^n$  (*Lambda*) с каждой итерацией алгоритма  $n$ . В данной реализации алгоритма [92] считается, что алгоритм успешно сходится, если максимальное абсолютное значение градиента (*First-Order optimality*) не превосходит  $[Y]_{\text{tol}} \cdot 10^{-4}$ . После успешного завершения алгоритма выводится финальное значение функции ошибки  $Y(\mathbf{w}_{\text{эксп}}^{n+1})$  (*sse*). За счет выбора начального приближения  $\mathbf{w}_0$  из номинальных значений, алгоритм сходится за 3 – 5 итераций. Результирующее значение функции ошибки  $Y(\mathbf{w}_{\text{эксп}}^{n+1})$  для каждого рассчитанного вектора младших коэффициентов  $\mathbf{w}_{\text{эксп}}$  в ансамбле экспериментальных данных не превосходит  $Y(\mathbf{w}_{\text{эксп}}^{n+1}) \leq 0,01$  (Рисунок 2.7).

a0, a1, a2, a3 coefficients

Iteration	Func-count	Residual	First-Order optimality	Lambda	Norm of step
0	5	0.168216	1.48e+08	0.01	0
1	10	0.00294805	0.000158	0.001	0.0159779
2	15	0.0029479	9.58e-07	0.0001	0.000957543

Success. Fitting converged to a solution.  
sse =0.0029479

Рисунок 2.6 – Пошаговый вывод работы алгоритма Левенберга-Марквардта в MATLAB

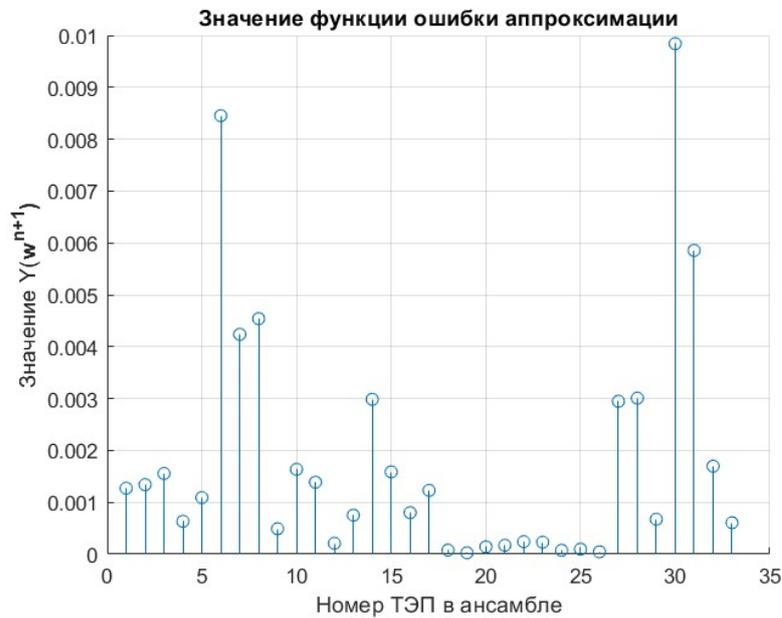


Рисунок 2.7 – Финальное значение функции ошибки  $Y(w^{n+1})$  для каждого ТЭП в ансамбле экспериментальных данных

Для полученных аппроксимаций ФСХ ТЭП рассчитывался параметр  $\xi_k$  в соответствии с (2.40) и сравнивался с  $\xi_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$ , который для ТЭП ХА согласно (2.42) и (2.52) имеет вид

$$\xi_{\text{доп}}(T) = 0,5\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХА}}(T) = \begin{cases} 1,25, & 0 \leq T < 333 \\ 0,00375 * T, & 333 \leq T \leq 800 \end{cases} \quad (2.53)$$

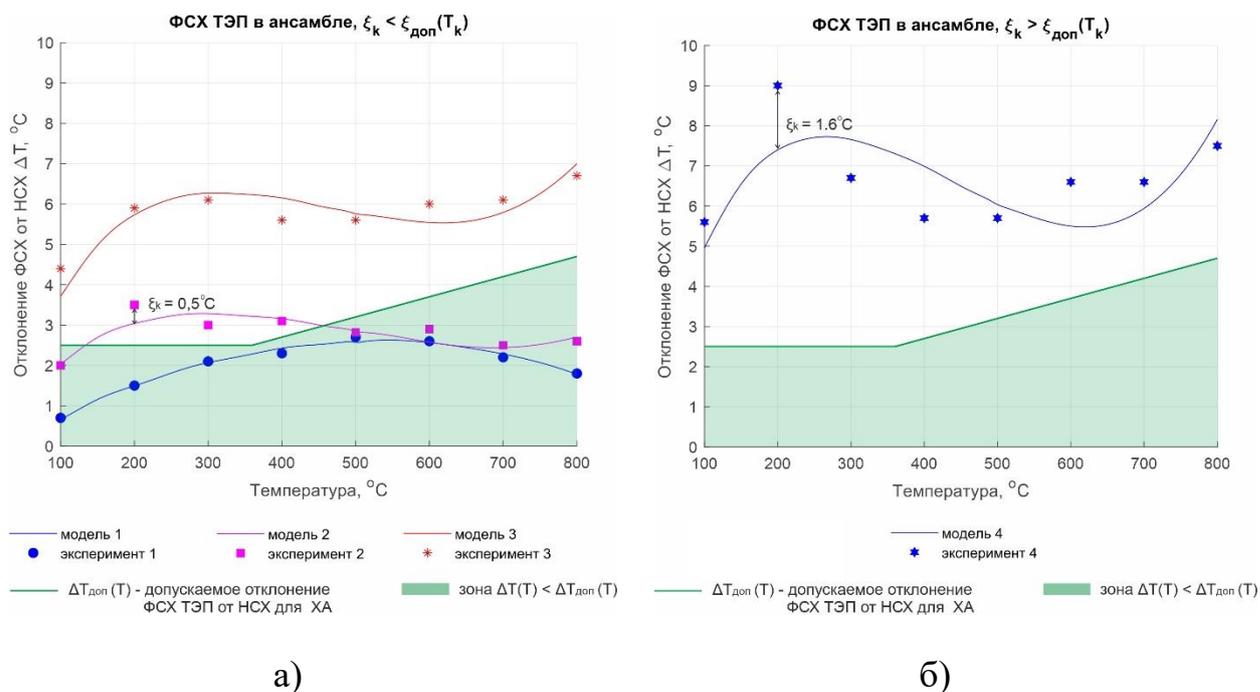


Рисунок 2.8 – Пример аппроксимации экспериментальных ФСХ ТЭП:

- а) соответствующие условию  $\xi_k < \xi_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$  при  $k = 1 \dots K$   
 б) нарушающие условия  $\xi_k < \xi_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$  хотя бы при одном значении  $k$

Варианты полученных аппроксимаций ФСХ ТЭП представлены на рисунке 2.8. В случае, когда условие (2.42)

$$\xi_k < \xi_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$$

выполнено для всех точек диапазона  $k = 1 \dots 8$  (Рисунок 2.8а), полученная ФСХ ТЭП остается в ансамбле экспериментальных данных. Отметим, что имитационная модель хорошо аппроксимирует как отклонение ФСХ ТЭП от НСХ  $\Delta T_{\text{эксп } k}^*$  в пределах допуска  $\Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$  (модель 1, Рисунок 2.8а), так и за пределами допуска  $\Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$  (модель 3, Рисунок 2.8а). В случае, когда условие (2.42) не выполнено хотя бы в одной  $k$ -ой точке, полученная ФСХ ТЭП должна быть исключена из ансамбля. Например (Рисунок 2.8б), ФСХ ТЭП №4 ансамбля при  $k = 2$  имеет рассогласование  $\xi_k = 1,6^\circ\text{C}$ , что превышает  $\xi_{\text{доп}}(200) = 1,23^\circ\text{C}$ . В рассматриваемом ансамбле только одна ФСХ ТЭП нарушает условие (2.42), объем ансамбля экспериментальных данных после исключения данной ФСХ:  $Q_{\text{эксп}} = 33$ .

Рассмотрим полученные значения рассогласования  $\xi_k$  по ансамблю (Рисунок 2.9). Общее число измерений в ансамбле

$$Q_{\text{эксп}} \cdot K = 33 \cdot 8 = 264$$

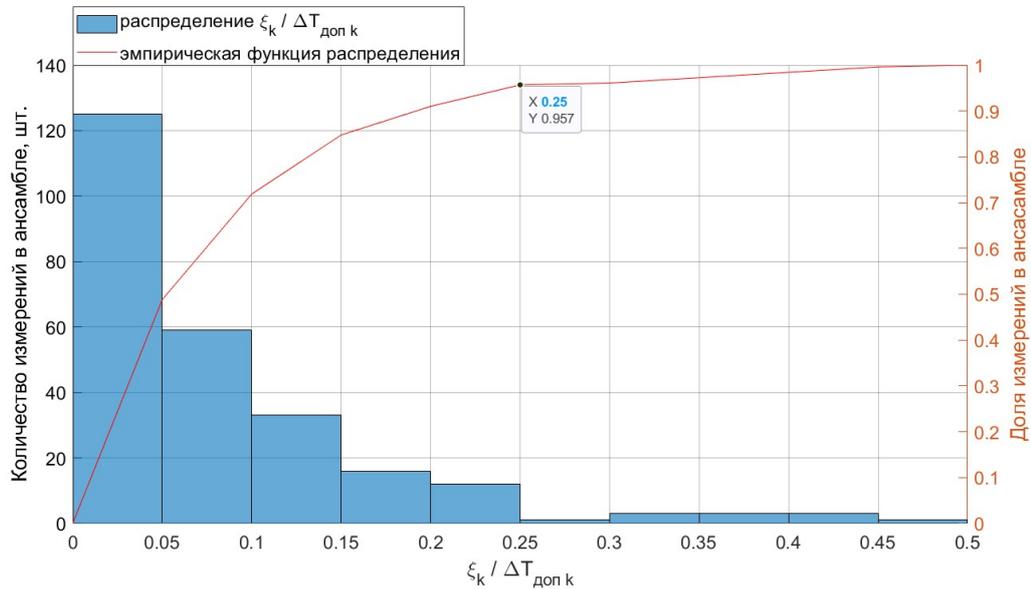


Рисунок 2.9 – Распределение рассогласования  $\xi_k$  по ансамблю после исключения реализаций ФСХ ТЭП, в которых  $\xi_k > \xi_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$ ,  $Q_{\text{эксп}} = 33$

Представим распределение относительного значения  $\xi_k / \Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$  на рисунке 2.9, где по оси X представлено распределение относительного значения  $\xi_k / \Delta T_{\text{доп } \text{эк}}$  по интервалам  $[0 \dots 0.05] \dots [0.45 \dots 0.5]$ . По оси Y слева фиксируется количество измерений в ансамбле экспериментальных данных, для которых относительное значение  $\xi_k / \Delta T_{\text{доп } \text{эк}}$  попадает в соответствующий интервал. Например, в интервал  $\xi_k / \Delta T_{\text{доп } \text{эк}} \in [0.05 \dots 0.1]$  попадает 59 измерений из ансамбля. По оси Y справа фиксируется доля измерений в ансамбле, для которых относительное значение  $\xi_k / \Delta T_{\text{доп } \text{эк}}$  меньше указанной правой границы соответствующего интервала. Например, для отмеченного маркера, доля измерений с относительным значением  $\xi_k / \Delta T_{\text{доп } k} \leq 0.25$  составляет 0.957 от всех измерений. Таким образом, введенное в (2.42) допускаемое значение рассогласования  $\xi_{\text{доп}}(T_k) = 0,5 \Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$  сохраняет большую часть ФСХ ТЭП в сформированном ансамбле экспериментальных данных. При этом большинство экспериментальных точек ( $> 95\%$ ) представляются с помощью имитационной

модели с величиной  $\xi_k \leq 0.25\Delta T_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$ . Фактическое выполнение условия  $\xi_k < \xi_{\text{доп}}(T_{\text{эк}})$  для всех точек измерения в ансамбле экспериментальных данных подтверждает соответствие структуры имитационной модели ФСХ ТЭП, полученной на основе стандартов калибровки ТЭП [79,80], реальным экспериментальным данным. В результате аппроксимации ансамбля экспериментальных данных получена матрица младших коэффициентов  $A_{\text{мод}}^*$ .

Далее необходимо настроить алгоритм генерирования синтетических данных ФСХ ТЭП и сформировать ансамбль синтетических значений младших коэффициентов  $A_{\text{мод}}^*$ . При настройке алгоритма генерирования синтетических данных ФСХ ТЭП были использованы следующие параметры, рассчитанные на основе ансамбля экспериментальных данных в соответствии с методом коррелированной проверки: тип ТЭП: хромель-алюмель (ХА);  $T_k \in 100 \dots 800^\circ\text{C}$  с шагом  $100^\circ\text{C}$ ,  $K = 8$ ;  $Q = Q_{\text{эксп}} = 33$ ;  $D_t = D_{\text{эксп}} = 63\%$ ;  $\Delta T_{\text{max}}(T) = 4\Delta T_{\text{доп}}(T)$ ;  $E_0^* = 0,4$  мВ. Для настраиваемых параметров алгоритма  $\theta$  и  $p_{\text{max}}$  были приняты следующие значения:  $\theta = 10\%$ ;  $p_{\text{max}} = 0,4$ .

После формирования ансамбля синтетических данных, необходимо провести оценку однородности выборок соответствующих коэффициентов  $\{a_{\text{мод } jm}^*\}_{j=1}^{Q_{\text{мод}}}$  из  $A_{\text{мод}}^*$  (2.17) и  $\{a_{\text{эксп } im}^*\}_{i=1}^{Q_{\text{эксп}}}$  из  $A_{\text{эксп}}^*$  (2.39), где  $m = 0 \dots 3$ . Для выборок каждого  $m$ -го коэффициента формировался вариационный ряд вида (2.45) и рассчитывалась критическая статистика  $\omega$  с использованием соотношения (2.47). Соответствующие максимальные уровни значимости  $\alpha$ , при которых гипотеза  $H_0$  об однородности выборок коэффициентов не отвергается, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчета критической статистики  $\omega$  и максимальный уровень значимости для коэффициентов  $a_0 \dots a_3$

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

Полученные результаты по критерию Лемана-Розенблатта подтверждают однородность выборок соответствующих младших коэффициентов в экспериментальных и синтетических данных. Следовательно, разработанный алгоритм формирования синтетических данных на основе равномерного закона распределения случайной величины  $p \in [0 \dots p_{max}]$  в формуле (2.10) и введенного ограничения  $\Delta T_{max}(T)$  в соответствии с (2.43) – (2.44) обеспечивает закон распределения вероятности изменения каждого коэффициента в имитационной модели близкий к закону распределения в экспериментальных данных. Далее представлена адаптация имитационной модели и алгоритма формирования синтетических данных для предложенной измерительной схемы четырехэлектродного ТЭП.

#### 2.4 Способ имитационного моделирования четырехэлектродного ТЭП

Адаптация имитационной модели фактической статической характеристики (ФСХ) термоэлектрического преобразователя (ТЭП) для предложенной четырехэлектродной измерительной схемы ТЭП (Рисунок 2.1) заключается в переходе к моделированию ФСХ отдельных термоэлектродов в составе ТЭП. Индивидуальная ТЭДС  $e_{\text{мод}}^*(T)$  каждого термоэлектрода моделируется следующим образом

$$e_{\text{мод}}^*(T) = b_0^* + \dots + b_m^* T^m + \dots + b_M^* T^M + \sum_{i=M+1}^N b_i T^i + C(T), \quad (2.54)$$

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 определяются в соответствии с системой (2.7) по синтетическим ТЭДС отдельных термоэлектродов  $e_{\text{мод}}^*(T)$

$$E_{ij \text{ мод}}^*(T) = e_{\text{мод } i}^*(T) - e_{\text{мод } j}^*(T), \quad (2.55)$$

где  $(i, j = \overline{1 \dots 4}, i \neq j)$  – номер термоэлектрода в составе четырехэлектродного ТЭП.

Уравнение моделирование индивидуальных ТЭДС  $e_{\text{мод}}^*(T)$  (2.54) основано на изменении младших коэффициентов ФСХ термоэлектрода  $b_m^*$ , которые при  $m = 1 \dots M$  изменяются следующим образом

$$b_m^* = b_m \pm \Delta b_m = b_m \pm p \cdot b_m, \quad (2.56)$$

где  $\Delta b_m$  – отклонение коэффициента  $b_m^*$  от номинального значения  $b_m$ ;

$p$  – случайная величина для моделирования  $b_m^*$  в некотором диапазоне

$$p \in [0 \dots p_{\text{max}}], \quad (2.57)$$

где  $p_{\text{max}}$  – параметр имитационной модели, определяющий диапазон изменения случайной величины  $p$ . При этом для нулевого коэффициента  $b_0^*$  уравнение (2.56) имеет вид

$$b_0^* = b_0 \pm \Delta b_0 = b_0 \pm p \cdot e_0^*, \quad (2.58)$$

где  $\Delta b_0$  – отклонение коэффициента  $b_0^*$  от номинального значения  $b_0$ ;

$e_0^*$  – параметр имитационной модели, определяющий максимальную величину изменения коэффициента  $b_0^*$ . Отдельное уравнение для моделирования коэффициента  $b_0^*$  обусловлено близостью к нулю его вклада в НСХ индивидуальной ТЭДС, поскольку номинальное значение коэффициента  $b_0 \rightarrow 0$  для большинства материалов термоэлектродов [74]. При этом итоговый вклад нулевого слагаемого в вклад  $b_0^*$  в ФСХ пары термоэлектродов  $E_{\text{мод } ij}^*(T)$  может быть существенно отличным от 0, что показано в исследованиях [52].

Уравнение моделирования индивидуальных ТЭДС  $e_{\text{мод}}^*(T)$  (2.54) имеет аналогичную структуру и параметры, как и уравнение моделирования ТЭДС двухэлектродного ТЭП (2.9).

Максимальная степень  $M$  и закон распределения случайной величины  $p$  при моделировании индивидуальных ФСХ  $e_{\text{мод } i}^*(T)$  и  $e_{\text{мод } j}^*(T)$  ( $i, j = \overline{1 \dots 4}, i \neq j$ ) должны реалистично описывать  $E_{ij \text{ мод}}^*(T)$ . Для моделирования индивидуальных ТЭДС  $e_{\text{мод}}^*(T)$  были приняты максимальная степень младших коэффициентов  $M = 3$  и равномерный закон распределения случайной величины  $p$  аналогично имитационной модели двухэлектродного ТЭП. Тогда сумма  $e_{\text{мод } i}^*(T)$  и  $e_{\text{мод } j}^*(T)$  в выражении (2.55) сохраняет максимальную степень  $M = 3$  для  $E_{ij \text{ мод}}^*(T)$ .

Диапазон изменения коэффициентов  $\pm \Delta b_m$  определяет величину отклонения моделируемой индивидуальной ФСХ  $e_{\text{мод}}^*(T)$  от НСХ. В каждой  $k$ -ой точке измерения на основе рассчитанных индивидуальных ТЭДС  $e_{\text{мод } i}^*(T_k)$  и  $e_{\text{мод } j}^*(T_k)$  ( $i, j = \overline{1 \dots 4}, i \neq j$ ) вычисляются значения ТЭДС  $E_{ij \text{ мод}}^*(T_k)$  и формируется вектор  $\vec{E}_{ij \text{ мод}}^*$  согласно (2.55). Вычисление вектора температур  $\vec{T}_{\text{мод } k}^*$  на основе ТЭДС  $E_{ij \text{ мод}}^*(T_k)$  осуществляется с использованием соответствующих обратных функций вида (2.5) для ТЭДС с высокой чувствительностью к температуре. Количество элементов  $h$  в векторе температур  $\vec{T}_{\text{мод } k}^*$  составляет  $h = 2 \dots 6$  в зависимости от используемых материалов термоэлектродов при реализации четырехэлектродной измерительной схемы ТЭП. Для каждой рассчитанной температуры в векторе  $\vec{T}_{\text{мод } k}^*$  определяется отклонение от температуры процесса  $T_k$ , в результате формируется вектор отклонений  $\Delta \vec{T}_{\text{мод}}^*(T_k)$ . Введем условие нормировки получаемого вектора отклонений  $\Delta \vec{T}_{\text{мод } k}^*$  таким образом, чтобы максимальное значение вектора в каждой  $k$ -ой точке измерения не превосходило заданного максимального значения  $\Delta T_{\text{max}}(T_k)$

$$\max \left( \Delta \vec{T}_{\text{мод}}^*(T_k) \right) < \Delta T_{\text{max}}(T_k), \quad (2.59)$$

причем

$$\Delta T_{\text{max}}(T_k) > \Delta T_{\text{доп}}(T_k), \quad (2.60)$$

где в данном случае  $\Delta T_{\text{доп}}(T_k)$  – назначенное допускаемое отклонение для четырехэлектродного ТЭП. Предлагаемый подход определения  $\Delta T_{\text{max}}(T_k)$  позволяет обеспечить соответствие синтетических и экспериментальных данных, исключая такие комбинации индивидуальных ФСХ  $e_{\text{мод } i}^*(T)$  и  $e_{\text{мод } j}^*(T)$  ( $i, j = \overline{1 \dots 4}, i \neq j$ ) в предложенной измерительной схеме ТЭП, которые приводят к значительным отклонениям элементов вектора температур  $\vec{T}_{\text{мод } k}^*$  от температуры процесса  $T_k$ . Также, введенное ограничение  $\Delta T_{\text{max}}(T_k)$  позволяет определить значение параметра  $e_0^*$  следующим образом

$$e_0^* = \min(\{\Delta E_{max}(T_k)\}_{k=1}^K), T_k \in [T_{min}, T_{max}], \quad (2.61)$$

где  $\Delta E_{max}(T_k)$  – выраженное в ТЭДС максимальное значение отклонения ФСХ четырехэлектродного ТЭП от НСХ  $\Delta T_{max}(T)$ ;  $[T_{min}, T_{max}]$  – температурный диапазон моделирования ТЭП.

Алгоритм генерирования синтетических данных в случае четырехэлектродного ТЭП расширяет алгоритм для двухэлектродного ТЭП и позволит получить ансамбль четырехэлектродных ТЭП с настраиваемым уровнем отклонения ФСХ отдельных термоэлектродов на основе имитационной модели (2.54). Пусть моделирование выполняется в диапазоне температур  $T_k \in [T_{min}, T_{max}]$ ,  $k = 1 \dots K$ , где  $K$  – количество температурных точек в диапазоне моделирования. Каждая индивидуальная ФСХ  $e_{мод j}^*(T)$  характеризуется своим набором коэффициентов  $b_m^*$ ,  $m = 0 \dots 3$ . Для моделирования одной реализации четырехэлектродного ТЭП нужно независимо получить 4 вектора коэффициентов  $\{b_m^*\}_{m=0}^3$  для каждого термоэлектрода. Тогда ансамбль ТЭП может быть представлен в виде совокупности матриц  $\vec{B}_{мод}^*$

$$\mathbf{B}_j^* = \begin{bmatrix} b_{10}^* & b_{11}^* & b_{12}^* & b_{13}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{q0}^* & b_{q1}^* & b_{q2}^* & b_{q3}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{Q0}^* & b_{Q1}^* & b_{Q2}^* & b_{Q3}^* \end{bmatrix}, j = 1 \dots 4 \quad (2.62)$$

$$\vec{B}_{мод}^* = \{\mathbf{B}_1^*, \mathbf{B}_2^*, \mathbf{B}_3^*, \mathbf{B}_4^*\} \quad (2.63)$$

где  $\mathbf{B}_j^*$  – матрица младших коэффициентов для  $j$ -го термоэлектрода;

$Q$  – количество смоделированных ТЭП в ансамбле;

$\vec{B}_{мод}^*$  – совокупность матриц младших коэффициентов каждого термоэлектрода ТЭП, характеризующая каждый  $q$ -й ТЭП в ансамбле синтетических данных.

Оценка состава полученного ансамбля ТЭП выполняется также на основе доли температурных точки  $d$ , в которых значения температур в векторе  $\vec{T}_{мод k}^*$  вышло за пределы допуска  $\Delta T_{доп}(T_k)$

$$d = \frac{r}{K \cdot h} * 100\% \quad (2.64)$$

где  $r$  – число значений температур в векторе  $\vec{T}_{\text{мод } k}^*$ , для которых  $\Delta T_{\text{мод } k}^* \geq \Delta T_{\text{доп}}(T_k)$ .

$h$  – общее число температур в векторе  $\vec{T}_{\text{мод } k}^*$ ;

$K$  – количество температурных точек в диапазоне моделирования. Для ансамбля ТЭП, доля температурных точек  $D$ , отклонение которых вышло за пределы допуска определяется как

$$D = \frac{\sum_{q=1}^Q d_q}{Q} \quad (2.65)$$

где  $d_q$  – доля температурных точек за пределами допуска для ТЭП в ансамбле с индексом  $q$ ;

$q = 1 \dots Q$  – номер ТЭП в ансамбле.

Каждый полученный ансамбль синтетических данных  $\vec{B}_{\text{мод}}^*$  характеризуется определенной величиной доли  $D$ . Введем целевое значение  $D_t$  на входе алгоритма, которому должно соответствовать выходное значение  $D$  с определенной точностью  $\theta$  (аналогично (2.20))

$$|D_t - D| < \theta \quad (2.66)$$

Алгоритм генерации синтетических данных для четырехэлектродного ТЭП (Рисунок 2.10) состоит из 4 шагов.

**Шаг 0** – Выбор моделируемого типа ТЭП и диапазона температур. На данном шаге определяется тип моделируемого четырехэлектродного ТЭП и задается диапазон температур  $T_k \in [T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ , а также число точек в диапазоне  $k = 1 \dots K$  и шаг между ними. Для каждого термоэлектрода ТЭП необходимо определить номинальную статическую характеристику (НСХ) каждого термоэлектрода  $e_j(T), j = 1 \dots 4$ . Также в зависимости от типа ТЭП определяется количество элементов  $h$  в векторе температур  $\vec{T}_{\text{мод } k}^*$ , обратные функции для расчета этих температур по соответствующим ТЭДС  $\vec{E}_{\text{мод } k}^*$ , функция допуска  $\Delta T_{\text{доп}}(T)$  для предложенной измерительной схемы ТЭП.

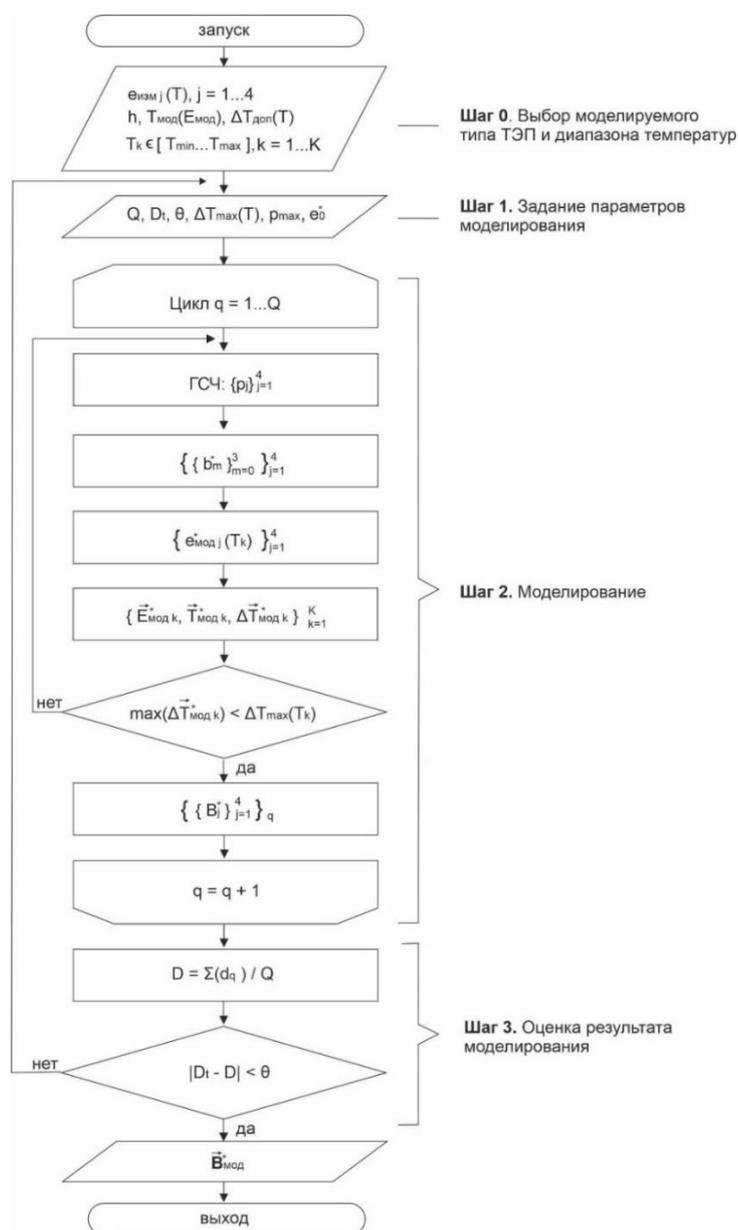


Рисунок 2.10 – Алгоритм генерирования синтетических данных для четырех электродного ТЭП

**Шаг 1** – Задание параметров моделирования. На данном шаге необходимо задать количество ФСХ ТЭП в ансамбле  $Q$ , целевое значение доли температурных точек  $D_t$  в ансамбле за пределами допуска и допускаемое отклонение  $\theta$  фактического значения  $D$  от целевого  $D_t$ . Также на данном этапе необходимо задать максимальный уровень ошибки  $\Delta T_{max}(T)$ , выбрать диапазон изменения младших коэффициентов  $p_{max}$  и рассчитать величину  $e_0^*$  на основе  $\Delta T_{max}(T)$  согласно выражению (2.61).

**Шаг 2** – Моделирование. Шаг моделирования включает:

2.1. Получение значения случайной величины  $p$  с использованием генератора случайных чисел (ГСЧ) с заданным равномерным законом распределения,  $p \in [0 \dots p_{max}]$ . Значение  $p$  генерируется независимо для каждой индивидуальной  $e_{\text{мод } j}^*(T), j = 1 \dots 4$ , получаем вектор значений  $\{p_j\}_{j=1}^4$ .

2.2. Расчет векторов младших коэффициентов  $\{b_m^*\}_{m=0}^3$  согласно выражениям (2.56), (2.58) для каждого  $j$ -го термоэлектрода.

2.3 Вычисление индивидуальных ТЭДС  $e_{\text{мод } j}^*(T_k)$  каждого  $j$ -го термоэлектрода согласно уравнению (2.54).

2.4. Вычисление выходных параметров смоделированного ТЭП:  $\vec{E}_{\text{мод } k}^*, \vec{T}_{\text{мод } k}^*, \Delta \vec{T}_{\text{мод } k}^*$ .

2.5 Проверка выполнения условия (2.59) для каждого элемента вектора отклонений  $\Delta \vec{T}_{\text{мод } k}^*$  в  $k$ -ой температурной точке,  $k = 1 \dots K$ . В случае, если условие выполнено, полученная ТЭП фиксируется в ансамбле и осуществляется переход на следующий шаг  $q = q + 1$ . Если условие (2.59) не выполнено, осуществляется повтор моделирования данного шага моделирования с 2.1.

**Шаг 3** – Оценка результата моделирования. На этом этапе вычисляется фактическая доля температурных точек  $D$  за пределами допуска по полученному ансамблю ТЭП и сравнивается с целевым значением  $D_t$ . В случае, если разница между ними не превосходит  $\theta$  (2.66), то генерация синтетических данных выполнена успешно.

Выходные данные алгоритма – ансамбль младших коэффициентов  $\vec{B}_{\text{мод}}^*$ , отдельных термоэлектродов ТЭП, соотношение температурных точек  $D$  для которого соответствует целевому значению  $D_t$  с заданным уровнем  $\theta$ .

В результате, адаптированный алгоритм генерирования синтетических данных позволяет получить ансамбль ФСХ ТЭП для предложенной четырехэлектродной измерительной схемы ТЭП. Полученные ансамбли синтетических данных с долей температурных точек  $D$  за пределами допускаемого отклонения  $\Delta T_{\text{доп}}(T)$  используются в следующих главах при разработке методов формирования результата измерения ТЭП и оценки его достоверности в главе 3.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Предложена новая измерительная схема ТЭП для получения дополнительной информации о метрологической исправности ТЭП. Рассматриваемая измерительная схема ТЭП включает четыре термоэлектрода из стандартных термопарных материалов, объединенные в общий спай. Четырехэлектродный ТЭП в каждой температурной точке  $T$  формирует вектор значений термоэлектродвижущей силы (ТЭДС)  $\vec{E}_{ij}(T)$ .

2. Разработана имитационная модель описания фактической статической характеристики (ФСХ) термоэлектрического преобразователя для получения различных вариантов отклонения ФСХ ТЭП от номинальной статической характеристики (НСХ). Модель позволяет получить разнообразные варианты синтетических ТЭП с настраиваемым уровнем отклонения ФСХ ТЭП от НСХ, полученные варианты ТЭП объединяются в ансамбль синтетических данных. Модель основана на стохастическом изменении младших коэффициентов полинома НСХ с использованием равномерно распределенной случайной величины и адаптирована для рассматриваемого четырехэлектродного ТЭП.

3. Предложен метод валидации имитационной модели ТЭП на основе метода коррелированной проверки с использованием непараметрического статистического критерия Лемана-Розенблатта. Предложенный метод валидации включает формирование ансамбля экспериментальных данных ТЭП с различной степенью отклонения ФСХ от НСХ, оценку возможности представления экспериментальных данных с помощью имитационной модели, генерирование ансамбля синтетических данных и проверку однородности полученных ансамблей синтетических и экспериментальных данных. Результаты моделирования для ТЭП хромель-алюмель (ХА) подтвердили возможность представления экспериментальных ФСХ ТЭП с помощью имитационной модели с величиной рассогласования менее  $0,5\Delta T_{\text{доп}}$  во всем диапазоне температур ТЭП. Кроме того, статистическая проверка однородности сформированного ансамбля синтетических

данных и экспериментальных данных для ТЭП ХА подтвердила однородность выборок соответствующих младших коэффициентов для  $\alpha = 0,01$  и выше.

4. Разработано алгоритмическое обеспечение для генерирования синтетических данных ФСХ ТЭП и валидации имитационной модели для двухэлектродных ТЭП. Полученное алгоритмическое обеспечение адаптировано для предложенной четырехэлектродной измерительной схемы ТЭП и позволяет получать ансамбли синтетических данных четырехэлектродных ТЭП с различной степенью отклонения ФСХ термоэлектродов от НСХ.

### 3. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТАТУСА РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНОГО ТЭП

#### 3.1 Схема обработки информации для четырехэлектродного ТЭП

Предложенная измерительная схема четырехэлектродного термоэлектрического преобразователя (ТЭП) на рисунке 3.1 позволяет получить вектор измерений термоэлектродвижущей силы (ТЭДС)  $\vec{E}_{ij}(T)$  в каждой температурной точке.

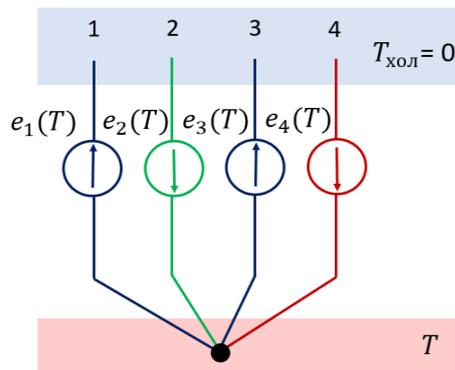


Рисунок 3.1 –Измерительная схема четырехэлектродного ТЭП

$$\vec{E}_{ij} = \begin{bmatrix} E_{12}(T) \\ E_{13}(T) \\ E_{14}(T) \\ E_{23}(T) \\ E_{24}(T) \\ E_{34}(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1(T) - e_2(T) \\ e_1(T) - e_3(T) \\ e_1(T) - e_4(T) \\ e_2(T) - e_3(T) \\ e_2(T) - e_4(T) \\ e_3(T) - e_4(T) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Обработка получаемого вектора  $\vec{E}_{ij}$  включает три последовательных этапа в соответствии с рисунком 3.2: предварительную обработку и формирование векторов  $\vec{T}_{\text{выч}}$  и  $\vec{E}_{\text{выч}}$ , расчет результата измерения  $T_{\text{ри}}$  и выделение вектора диагностических признаков  $\vec{G}$ , оценку статуса результата измерения.

Разработка методов обработки информации на каждом этапе основана на предложенной имитационной модели ТЭП и получаемых синтетических данных. Модель позволяет сформировать синтетические ТЭП с уникальными сочетаниями индивидуальных ТЭДС отдельных термоэлектродов  $e_1(T) \dots e_4(T)$  для любой температурной точки в диапазоне моделирования. Каждый ансамбль

синтетических данных характеризуется долей измерений за пределами допуска  $D$ , определяемой по формулам (2.65) – (2.66). Не теряя общности рассуждений, далее рассмотрены следующие три ансамбля с различной долей  $D$ :

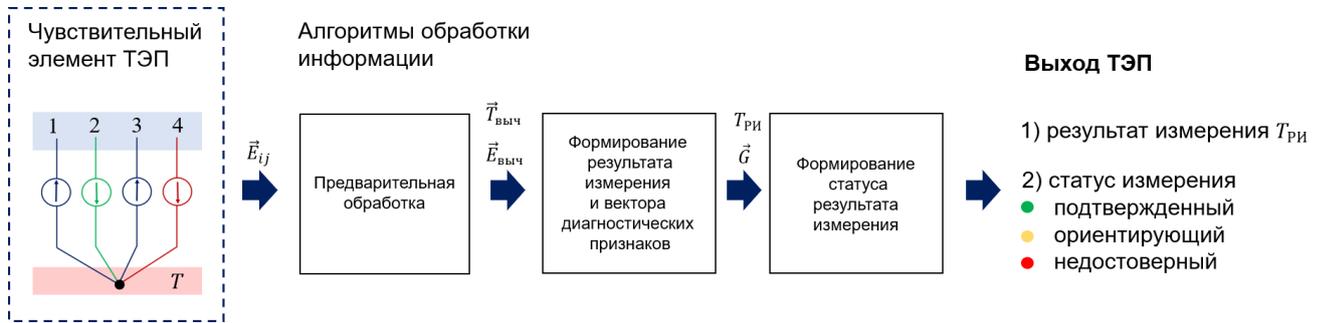


Рисунок 3.2 – Структурная схема обработки информации для четырехэлектродного ТЭП

**Ансамбль 1:**  $D = 0\%$ . Ансамбль описывает такие ТЭП, фактические статические характеристики (ФСХ) которых близки к номинальным статическим характеристикам (НСХ).

**Ансамбль 2:**  $D = 10\%$ . Ансамбль описывает такие ТЭП, ФСХ которых начали изменяться под воздействием влияющих факторов, однако, отличие ФСХ от НСХ незначительно и находится вблизи допустимых значений.

**Ансамбль 3:**  $D = 50\%$ . Ансамбль описывает такие ТЭП, ФСХ которых существенно отличаются от НСХ.

Таким образом, разработка и настройка методов и алгоритмов обработки информации для четырехэлектродного ТЭП построена на основе трех ансамблей синтетических данных для каждого из исследуемых среднетемпературных ТЭП. В работе исследовались следующие ТЭП для среднетемпературного диапазона  $0 \dots 1000^\circ\text{C}$ .

1. Хромель-алюмель-нихросил-нисил (ХАНН). Исследуемый диапазон температур при моделировании ТЭП:  $0 \dots 1000^\circ\text{C}$ . Функция допустимого отклонения  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)$  получена на основе функций допустимых отклонений  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХА}}(T)$  и  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{НН}}(T)$  для термопар 2-го класса допуска по стандарту [34], которые одинаковы и имеют вид

$$\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T) = \min(\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХА}}(T), \Delta T_{\text{доп}}^{\text{НН}}(T)) = \begin{cases} 2,5; & 0 \leq T < 333; \\ 0,0075 * T; & 333 \leq T \leq 1000 \end{cases} \quad (3.2)$$

2. Хромель-копель-железо-константан (ХКЖК). Исследуемый диапазон температур при моделировании ТЭП: 0 ... 500°C. Функция допускаемого отклонения  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХКЖК}}(T)$  получена на основе функций допускаемых отклонений  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХК}}(T)$  для термопар 2-го класса допуска и  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ЖК}}(T)$  для термопар 1-го класса допуска по стандарту [34]. Способ получения  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХКЖК}}(T)$  – выбор наименьшего значения из  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХК}}(T)$  и  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ЖК}}(T)$  в соответствующих температурных точка, тогда

$$\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХКЖК}}(T) = \min(\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХК}}(T), \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ЖК}}(T)) = \begin{cases} 1,5; & 0 \leq T < 375; \\ 0,004 * T; & 375 \leq T \leq 500 \end{cases} \quad (3.3)$$

3. Хромель-алюмель-хромель-копель (ХАХК). Исследуемый диапазон температур при моделировании ТЭП: 0 ... 800°C. Функция допускаемого отклонения  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАХК}}(T)$  получена на основе функций допускаемых отклонений  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХК}}(T)$  и  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХА}}(T)$  для термопар 2-го класса допуска по стандарту [34]. Способ получения  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАХК}}(T)$  – выбор наименьшего значения из  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХК}}(T)$  и  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХА}}(T)$  в соответствующих температурных точках, тогда

$$\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАХК}}(T) = \min(\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХК}}(T), \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХА}}(T)) = \begin{cases} 2,5; & 0 \leq T < 360; \\ 0,7 + 0,005 * T; & 360 \leq T \leq 800 \end{cases} \quad (3.4)$$

Дальнейшие рассуждения подробно приводятся для ТЭП ХАНН.

### 3.2 Предварительная обработка вектора ТЭДС

Формирование четырехэлектродного ТЭП посредством объединения двух стандартных термоэлектродных пар с ТЭДС  $E_{12}$  и  $E_{34}$  в общий спай (Рисунок 3.1) позволяет измерить дополнительные ТЭДС  $E_{13}$ ,  $E_{14}$ ,  $E_{23}$  и  $E_{24}$  для каждой из получаемых дополнительных термоэлектродных пар. Значение ТЭДС каждой термоэлектродной пары в составе ТЭП зависит от чувствительности  $S_{ij}(T)$  пары термоэлектродов, согласно теории [50]

$$E_{ij}(T_1, T_2) = \int_{T_1}^{T_2} S_{ij}(T) dT = e_i(T_1, T_2) - e_j(T_1, T_2) \quad (3.5)$$

где  $E_{ij}(T_1, T_2)$  – ТЭДС термопары, состоящей из  $i$ -го и  $j$ -го термоэлектродов;

$T_1, T_2$  – температура горячего и холодного спаев термопары;

$S_{ij}(T)$  – чувствительность термопары, состоящей из  $i$ -го и  $j$ -го термоэлектродов;

$e_i(T_1, T_2), e_j(T_1, T_2)$  – индивидуальные ТЭДС  $i$ -го и  $j$ -го термоэлектродов.

Значения чувствительности  $S_{ij}(T)$  дополнительных пар для всех рассматриваемых ТЭП вычисляется на основе справочных данных [50,74,75] следующим образом

$$S_{ij}(T) = S_i(T) - S_j(T) \quad (3.6)$$

где  $S_i(T), S_j(T)$  – чувствительность  $i$ -го и  $j$ -го термоэлектродов ТЭП относительно эталона сравнения, в качестве эталона сравнения для рассматриваемых ТЭП используется чистая платина.

На этапе предварительной обработки вектора ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$  выделим высокочувствительные и низкочувствительные к температуре значения ТЭДС. По высокочувствительным ТЭДС может быть рассчитан вектор температур  $\vec{T}_{\text{выч}}$ , а низкочувствительные ТЭДС объединяются в вектор  $\vec{E}_{\text{выч}}$  для последующего использования при формировании вектора диагностических признаков  $\vec{G}$ .

В состав ТЭП ХАНН входят стандартные термоэлектродные пары «хромель - алюмель» и «нихросил - нисил». При формировании четырехэлектродного ТЭП ХАНН возникают дополнительные термоэлектродные пары: «нихросил-алюмель», «нисил-хромель», «нихросил - хромель» и «нисил - алюмель». Оценка чувствительности полученных дополнительных термоэлектродных пар в сравнении со стандартными на рисунке 3.3 показывает, что для дополнительных пар «нихросил-алюмель», «нисил-хромель» чувствительность  $S_{ij}(T)$  превосходит 30 мкВ/°С во всем диапазоне температур и сопоставима с чувствительностью стандартных термоэлектродных пар.

В свою очередь, для дополнительных пар «нихросил - хромель» и «нисил - алюмель» чувствительность  $S_{ij}(T)$  существенно ниже чувствительности стандартных термоэлектродных пар «хромель - алюмель» и «нихросил - нисил». Тогда для ТЭП ХАНН вектор температур  $\vec{T}_{\text{выч}}$

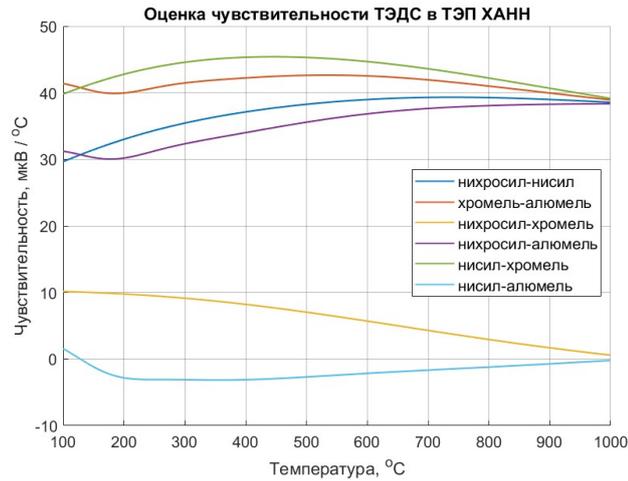


Рисунок 3.3 – Чувствительность ТЭДС к температуре для стандартных и дополнительных термоэлектродных пар в ТЭП ХАНН

$$\vec{T}_{\text{выч}} = \{T_{XA}, T_{\text{НихрНис}}, T_{\text{НихрА}}, T_{\text{НисХ}}\} \quad (3.7)$$

где  $T_{XA}, T_{\text{НихрНис}}$  – температуры, вычисляемые по стандартным обратным функциям для термопар «хромель-алюмель» и «никросил-никсил»;

$T_{\text{НихрА}}, T_{\text{НисХ}}$  – температуры пар «никросил-алюмель» и «нисил-хромель», вычисляемые по индивидуальным обратным функциям.

Вектор низкочувствительных ТЭДС  $\vec{E}_{\text{выч}}$  для ТЭП ХАНН

$$\vec{E}_{\text{выч}} = \{E_{\text{НихрХ}}, E_{\text{НисА}}\} \quad (3.8)$$

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

Вычисление температур для дополнительных термоэлектродных пар в большинстве случаев выполняется с использованием индивидуальных обратных функций преобразования вида

$$T_{ij} = F_{\text{обр}}(E_{ij}) = \sum_{m=0}^M r_m E_{ij}^m \quad (3.9)$$

где  $T_{ij}$  – вычисляемая температура для дополнительной термоэлектродной пары из  $i$ -го и  $j$ -го термоэлектродов;

$E_{ij}$  – ТЭДС пары из  $i$ -го и  $j$ -го термоэлектродов;

$r_m$  – коэффициенты индивидуальной обратной функций для соответствующей дополнительной термоэлектродной пары;

$M$  – максимальная степень индивидуальной обратной функции.

Предлагаемая процедура расчета коэффициентов для индивидуальных обратных функций построена на основе метода наименьших квадратов (МНК) и использует справочные данные [50,74,75]. В рабочем диапазоне температур ТЭП из справочных данных сформированы матрицы индивидуальных ТЭДС для каждого  $i$ -го и  $j$ -го термоэлектродов  $\{T_k^*, e_{ik}^*\}, \{T_k^*, e_{jk}^*\}$ , где  $T_k^*$  – значение температуры в каждой  $k$ -ой температурной точке,  $k = 1 \dots K$ ;  $e_{ik}^*$  и  $e_{jk}^*$  – значения индивидуальных ТЭДС  $i$ -го и  $j$ -го термоэлектродов в соответствующих температурных точках.

Далее, определим значение ТЭДС  $E_k^*$  соответствующей термоэлектродной пары на основе соотношения (3.5) в каждой  $k$ -ой температурной точке

$$E_k^* = e_{ik}^* - e_{jk}^*, \quad (3.10)$$

и для каждого  $T_k^*$  сформируем уравнение (3.9), которые объединены в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида

$$\begin{cases} r_0 + r_1 E_1^* + (r_2 E_1^*)^2 + \dots + (r_m E_1^*)^m + \dots + (r_M E_1^*)^M = T_1^* \\ \dots \\ r_0 + r_1 E_k^* + (r_2 E_k^*)^2 + \dots + (r_m E_k^*)^m + \dots + (r_M E_k^*)^M = T_k^* \\ \dots \\ r_0 + r_1 E_K^* + (r_2 E_K^*)^2 + \dots + (r_m E_K^*)^m + \dots + (r_M E_K^*)^M = T_K^* \end{cases} \quad (3.11)$$

или в матричном виде

$$\mathbf{E}\mathbf{r} = \mathbf{T} \quad (3.12)$$

где  $\mathbf{r} = \{r_0, r_1, \dots, r_m, \dots, r_M\}^T$  – вектор-столбец искомых коэффициентов индивидуальной обратной функции преобразования, размерность  $(M + 1) \times 1$ ;

$\mathbf{E}$  – матрица преобразования на основе рассчитанных значений ТЭДС дополнительной термоэлектродной пары, размерность  $K \times (M + 1)$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & E_1^* & \dots & (E_1^*)^m & \dots & (E_1^*)^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & E_k^* & \dots & (E_k^*)^m & \dots & (E_k^*)^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & E_K^* & \dots & (E_K^*)^m & \dots & (E_K^*)^M \end{bmatrix}$$

$\mathbf{T} = \{T_1, \dots, T_k, \dots, T_K\}^T$  – вектор-столбец табличных значений температуры для данной термоэлектродной пары, размерность  $K \times 1$ .

Для определения вектора коэффициентов  $\mathbf{r}$ , число коэффициентов должно быть меньше числа температурных точек

$$M + 1 < K$$

Также, для получения несмещенных, состоятельных и эффективных оценок коэффициентов на основе МНК требуется выполнения условий [82]: погрешность измерения температуры  $T_k^*$  должна быть намного меньше погрешности измерения индивидуальной ТЭДС  $e_{ik}^*$ , дисперсии случайных составляющих погрешностей измерений  $e_{ik}^*$  статистически одинаковы во всех измерениях ТЭДС, случайные составляющие погрешности распределены по нормальному закону. Поскольку используемые справочные данные получены в лабораторных условиях и усреднялись для большого количества термоэлектрических преобразователей, считаем, что требуемые условия применения МНК выполняются.

Для расчета вектора коэффициентов  $\mathbf{r}$ , определим невязку между левой и правой частью СЛАУ (3.12) следующим образом

$$\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{T} - \mathbf{E}\mathbf{r} \quad (3.13)$$

где  $\boldsymbol{\gamma} = \{\gamma_1, \dots, \gamma_k, \dots, \gamma_K\}^T$  – вектор-столбец ошибки расчета температуры по дополнительной термоэлектродной паре, размерность  $K \times 1$ . В качестве критерия минимизации в МНК используется квадратичный критерий минимума функции ошибки  $Y(\mathbf{r})$

$$Y(\mathbf{r}) = \boldsymbol{\gamma}^T \boldsymbol{\gamma} \rightarrow \min, \quad (3.14)$$

Условия минимума функции ошибки  $Y(\mathbf{r})$  достигается при равенстве нулю производной функции ошибки по вектору  $\mathbf{r}$

$$\frac{\partial Y(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{r}} = 0 \quad (3.15)$$

Тогда, подставляя (3.13) и (3.14) в (3.15)

$$\frac{\partial ((\mathbf{T} - \mathbf{E}\mathbf{r})^T (\mathbf{T} - \mathbf{E}\mathbf{r}))}{\partial \mathbf{r}} = 0,$$

откуда, вычисляя производную, получаем вектор коэффициентов  $\mathbf{r}$

$$\mathbf{r} = (\mathbf{E}^T \mathbf{E})^{-1} \mathbf{E}^T \mathbf{T} \quad (3.16)$$

Рассчитанные коэффициенты индивидуальных обратных функций для рассматриваемых ТЭП приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Коэффициенты обратных функций для вычисления температуры по дополнительным ТЭДС

Коэффициент обратной функции	Дополнительная термоэлектродная пара				
	АК	НихрА	НисХ	ЖК	КонстХ
$r_0$	1.53e-1	5.68e-3	3.06e-3	-1.05e-1	2.30e-1
$r_1$	4.17e1	3.20e1	2.77e1	1.80e1	1.69e1
$r_2$	-2.54e0	2.25e-1	-4.09e-1	-1.65e-1	-2.15e-1
$r_3$	1.78e-1	-3.60e-4	1.43e-2	6.26e-3	6.30e-3
$r_4$	-7.03e-3	-4.79e-3	-2.48e-4	-1.06e-4	-1.25e-4
$r_5$	1.45e-4	4.29e-4	1.49e-6	5.61e-7	1.46e-6
$r_6$	-1.20e-6	-1.67e-5	2.62e-8	-	-7.13e-7
$r_7$	-	3.12e-7	-3.56e-10	-	-
$r_8$	-	-2.30e-9	-	-	-

Для оценки применимости полученных индивидуальных обратных функций, по каждой из дополнительных термоэлектродных пар выполнен расчет температуры и определен модуль абсолютного отклонения температуры  $\Delta T_k$  в каждой  $k$ -ой температурной точке

$$\Delta T_k = |T_k - F_{\text{обр}}(E_{ij}(T_k))| \quad (3.17)$$

где  $T_k$  – заданная температурная точка в диапазоне моделирования четырехэлектродного ТЭП;

$E_{ij}(T_k)$  – значение ТЭДС термоэлектродной пары в составе ТЭП;

$F_{\text{обр}}()$  – индивидуальная обратная функция, рассчитанная для соответствующей термоэлектродной пары.

В таблице 3.2 представлены максимальные значения отклонения  $\Delta T_k$  при расчете температуры по индивидуальным обратным функциям для дополнительных термоэлектродных пар в составе ТЭП ХАХК, ХАНН, ХКЖК. Также в таблице 3.2 представлены максимальные значения отклонения  $\Delta T_k$  при расчете температуры по обратным функциям из [34] для стандартных термоэлектродных пар.

Таблица 3.2 – Максимальное значение отклонения температуры для дополнительных и стандартных термоэлектродных пар

Тип ТЭП	$\max(\Delta T_k), ^\circ\text{C}$				
	дополнительные пары			стандартные пары	
ХАНН	<i>НихрА</i>	<i>НисХ</i>	-	<i>НН</i>	<i>ХА</i>
	0,347	0,091	-	0,070	0,062
ХКЖК	<i>ЖК</i>	<i>КонстХ</i>	-	<i>ХК</i>	<i>ЖКонст</i>
	0,171	0,124	-	0,041	0,033
ХАХК	<i>Х2К</i>	<i>Х1А</i>	<i>АК</i>	<i>Х1К</i>	<i>Х2А</i>
	0,061	0,109	0,461	0,051	0,050

По результатам расчета видим, что некоторые из дополнительных термоэлектродных пар имеют сопоставимое значение максимального отклонения температуры со стандартными термоэлектродными парами, например, пара НисХ в ТЭП ХАНН, а некоторые существенно большее значение отклонения, например, пара АК в ТЭП ХАХК. Этот факт должен учитываться при формировании результата измерения  $T_{\text{ри}}$  на основе вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ .

В данном разделе представлена процедура предварительной обработки получаемого от четырехэлектродного ТЭП вектора ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$ , позволяющая сформировать вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  и  $\vec{E}_{\text{выч}}$  для четырехэлектродных ТЭП. Важно отметить, что для вычисления температур в векторе  $\vec{T}_{\text{выч}}$  по ТЭДС дополнительных термоэлектродных пар используются индивидуальные обратные функции преобразования, коэффициенты которых рассчитаны на основе табличных данных для соответствующих термопарных материалов. Это позволяет использовать предложенную измерительную ТЭП без необходимости индивидуальной калибровки каждого ТЭП перед началом эксплуатации.

### 3.3 Формирование результата измерения

В стандартном термоэлектрическом преобразователе результат измерения  $T_{\text{ри}}$  вычисляется на основе измеренного значения ТЭДС с использованием обратной функции преобразования [34]. Предложенная четырехэлектродная измерительная схема ТЭП позволяет рассчитать результат измерения ТЭП на основе вектора рассчитанных температур  $\vec{T}_{\text{выч}}$  несколькими способами. Выбор

способа расчета  $T_{РИ}$  в четырехэлектродном ТЭП учитывает следующие предпосылки:

1) использование нескольких элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  позволит уменьшить отклонение  $T_{РИ}$  от фактической температуры процесса по сравнению со стандартной термопарой даже при дрейфе характеристик некоторых из термоэлектродов;

2) часть из элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  имеет большее отклонение от фактической температуры процесса при номинальном состоянии ТЭП (Таблица 3.2).

В работе исследовались два варианта расчета результата измерения четырехэлектродного ТЭП ( $T_{РИ1}$  и  $T_{РИ2}$ ) в каждой температурной точке

$$T_{РИ1} = \frac{T_{ХА} + T_{\text{НихрНис}}}{2} \quad (3.18)$$

$$T_{РИ2} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i T_{\text{выч } i}}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3.19)$$

где  $w_i$  – веса каждой компоненты в векторе  $\vec{T}_{\text{выч}}$ ,  $N$  – число элементов в векторе  $\vec{T}_{\text{выч}}$ , для ТЭП ХАНН  $N = 4$ . Значения весов для стандартных термоэлектродных пар приняты  $w_i = 1$ , для дополнительных термоэлектродных пар принято  $w_i = 0,5$ , что учитывает большую величину отклонения температуры, рассчитываемой по индивидуальным обратным функциям дополнительных термоэлектродных пар.

Предложенные варианты вычисления результата измерения  $T_{РИ1}$  и  $T_{РИ2}$  сравнивались с результатами измерения, полученными по стандартным парам термоэлектродов, в случае ТЭП ХАНН

$$T_{РИ3} = T_{\text{НихрНис}} \quad (3.20)$$

$$T_{РИ4} = T_{ХА} \quad (3.21)$$

Сравнение выполнялось на полученных ансамблях синтетических данных ( $D = 0\%$ ,  $D = 10\%$ ,  $D = 50\%$ ) с использованием следующих подходов:

1) определение разброса результата измерения в отдельных точках диапазона измерения на основе диаграмм размаха;

2) расчет среднеквадратического отклонения результата измерения и расчет доли температурных точек ( $V, \%$ ), отклонение результата измерения в которых превышает допустимое значение, в отдельных точках диапазона измерения;

3) расчет доли температурных точек ( $V, \%$ ) по всему диапазону измерения ТЭП, отклонение результата измерения в которых за пределами допуска.

Результаты расчета  $T_{\text{РИ1}} \dots T_{\text{РИ4}}$  для ТЭП хромель-алюмель-нихросил-нисил (ХАНН) показывают существенно меньшую величину отклонения результата измерения  $T_{\text{РИ2}}$  по сравнению с другими вариантами определения результата измерения ТЭП. На рисунке 3.4 и в таблице 3.3 показаны результаты расчетов для ансамбля номинальных ТЭП, зона за пределами допустимых отклонений показана красным цветом ( $\Delta T_{\text{РИ}} \geq \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)$ , формула (3.2)). В данном случае, результат измерения  $T_{\text{РИ2}}$  практически сопоставим с  $T_{\text{РИ1}}$  и имеет меньшее значение СКО только в температурной точке  $800^\circ\text{C}$ . При этом оба результата измерения четырехэлектродного ТЭП  $T_{\text{РИ1}}$  и  $T_{\text{РИ2}}$  имеют меньшее значение СКО, чем результаты измерения  $T_{\text{РИ3}}$  и  $T_{\text{РИ4}}$ .

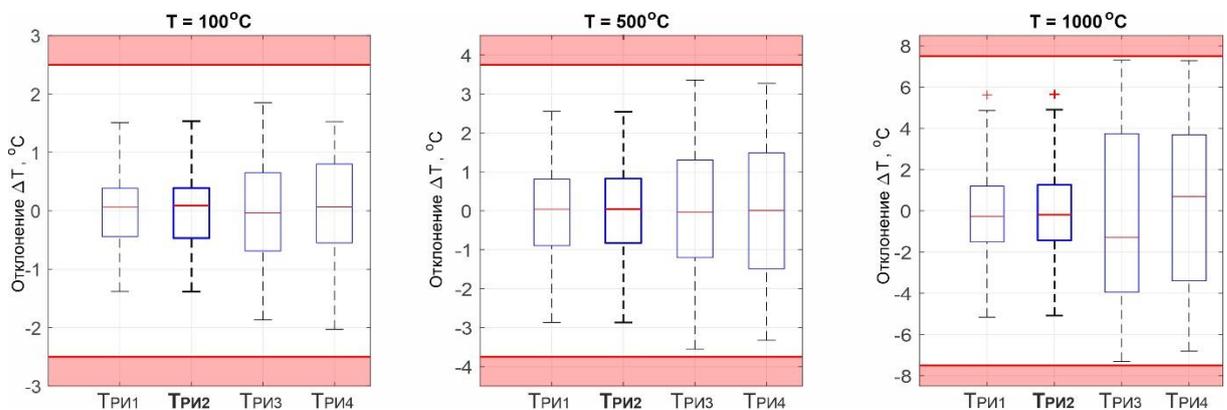


Рисунок 3.4 – Сопоставление различных способов определения результата измерения ТЭП  $T_{\text{РИ}}$ , ансамбль  $D = 0\%$ , ТЭП ХАНН

Таблица 3.3 – Сравнение способов расчета результата измерения для номинального ансамбля ТЭП ( $D = 0\%$ ), ТЭП ХАНН

	$T = 100^\circ\text{C}$	$T = 500^\circ\text{C}$	$T = 1000^\circ\text{C}$
	СКО, °C	СКО, °C	СКО, °C
$T_{\text{РИ1}}$	0,59	1,15	2,18
$T_{\text{РИ2}}$	0,59	1,14	1,17
$T_{\text{РИ3}}$	0,88	1,62	4,26
$T_{\text{РИ4}}$	0,84	1,76	3,96

На рисунке 3.5 и в таблице 3.4 показаны результаты моделирования ансамбля ТЭП ХАНН в процессе эксплуатации ( $D = 10\%$ ). Для рассмотренного ансамбля, результаты измерения  $T_{\text{ри1}}$  и  $T_{\text{ри2}}$  имеют практически одинаковое значение размаха, СКО  $T_{\text{ри2}}$  несколько меньше в температурной точке  $1000^\circ\text{C}$ . При этом расчет результата измерения для четырехэлектродного ТЭП по формуле  $T_{\text{ри2}}$  уменьшает долю результатов измерения за пределами допусаемых отклонений на 3 – 19% по сравнению с  $T_{\text{ри3}}$  и  $T_{\text{ри4}}$ .

Наконец, на рисунке 3.6 и в таблице 3.5 показаны результаты моделирования ансамбля предаварийных ТЭП ХАНН ( $D = 50\%$ ). Здесь расчет результата измерения по  $T_{\text{ри2}}$  имеет меньшее по сравнению с  $T_{\text{ри1}}$  значение доли  $V$  и СКО в температурной точке  $400^\circ\text{C}$ . Доля результата измерений за пределом допуска для  $T_{\text{ри2}}$  меньше в 1,4 – 1,9 раз по сравнению с долей для  $T_{\text{ри3}}$  и  $T_{\text{ри4}}$ .

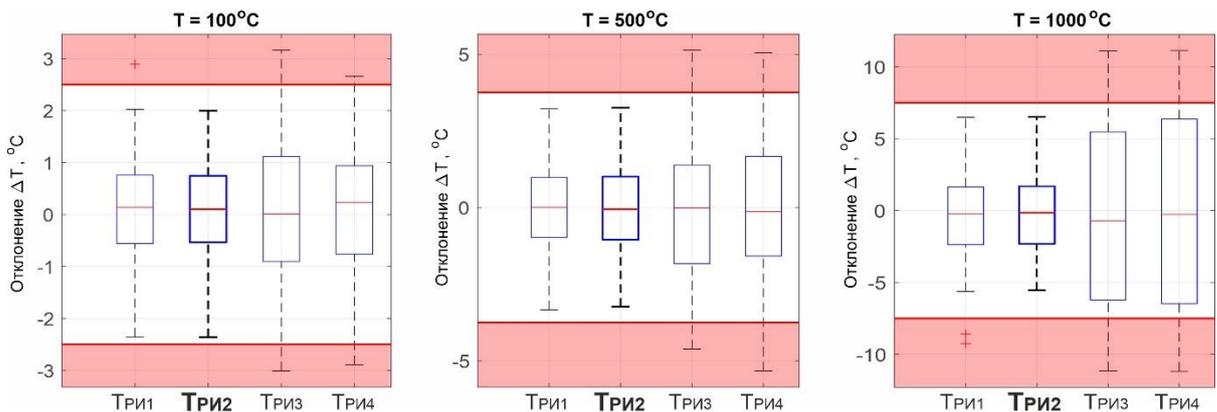


Рисунок 3.5 – Сопоставление различных способов определения результата измерения ТЭП  $T_{\text{ри}}$ , ансамбль  $D = 10\%$ , ТЭП ХАНН

Таблица 3.4 – Сравнение способов расчета результата измерения для ТЭП в процессе эксплуатации ( $D = 10\%$ ), ТЭП ХАНН

	$T = 100^\circ\text{C}$		$T = 500^\circ\text{C}$		$T = 1000^\circ\text{C}$	
	V, %	СКО, °C	V, %	СКО, °C	V, %	СКО, °C
$T_{\text{ри1}}$	1	0,94	0	1,34	2	3,11
$T_{\text{ри2}}$	0	0,92	0	1,33	1	3,04
$T_{\text{ри3}}$	8	1,50	5	2,26	19	6,79
$T_{\text{ри4}}$	3	1,33	6	2,23	20	6,81

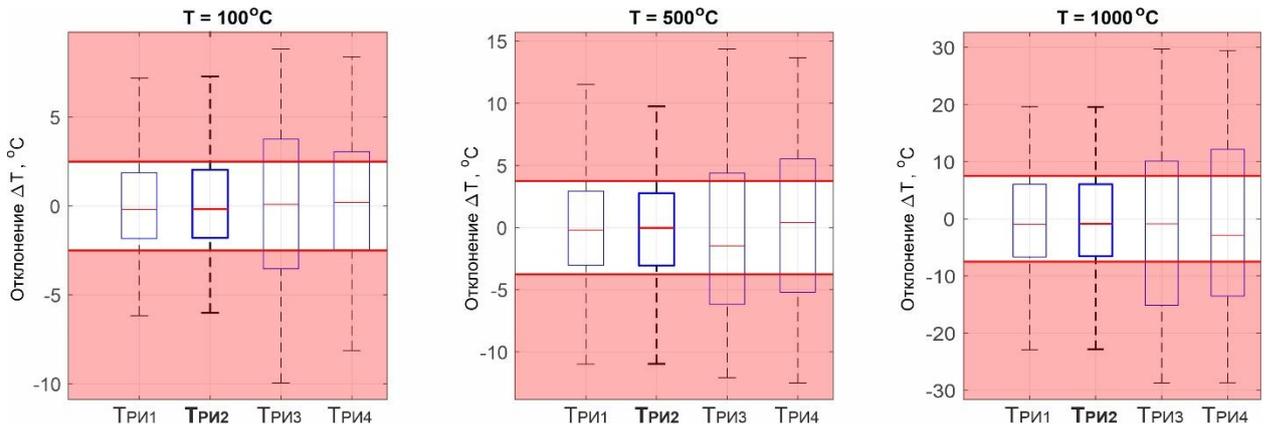


Рисунок 3.6 – Сопоставление различных способов определения результата измерения ТЭП  $T_{ри}$ , ансамбль  $D_t = 50\%$ , ТЭП ХАНН

Таблица 3.5 – Сравнение способов расчета результата измерения для предаварийного ТЭП ( $D = 50\%$ ), ТЭП ХАНН

	$T = 100^\circ\text{C}$		$T = 500^\circ\text{C}$		$T = 1000^\circ\text{C}$	
	V, %	СКО, °C	V, %	СКО, °C	V, %	СКО, °C
$T_{ри1}$	19	2,69	19	4,23	18	9,20
$T_{ри2}$	19	2,69	18	4,12	18	9,15
$T_{ри3}$	31	4,48	31	7,01	30	16,31
$T_{ри4}$	27	4,02	34	6,64	34	15,61

Итоговое сравнение методов расчета результата измерения для ТЭП ХАНН по всему ансамблю синтетических данных приведено на рисунке 3.7 для ансамблей  $D = 10\%$  и  $D = 50\%$ . Расчет результата измерения ТЭП  $T_{ри2}$  по формуле (3.19) обеспечивает на 6 – 13% большую долю измерений ТЭП с отклонением  $\Delta T_{ри2}$  в пределах допуска  $\Delta T_{доп}^{ХАНН}(T)$ . При этом на ансамбле предаварийных ТЭП ( $D = 50\%$ .) результат измерения  $T_{ри2}$  дает на 1,5% большую долю измерений в пределах допускаемых отклонений, чем  $T_{ри1}$ .

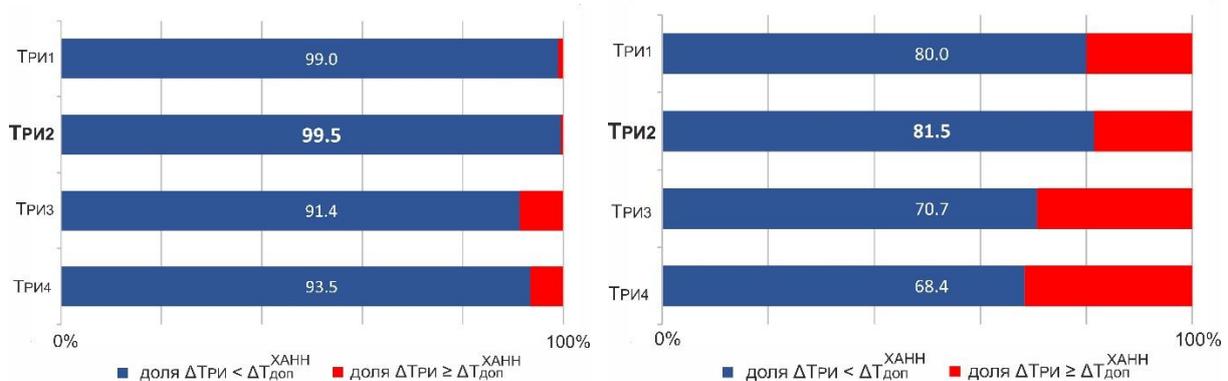


Рисунок 3.7 – Доля результата измерений ТЭП ХАНН в пределах допускаемых отклонений при  $D = 10\%$  (слева) и  $D = 50\%$  (справа)

В данном разделе рассмотрены подходы к определению результата измерения для предложенной измерительной схемы четырехэлектродного ТЭП. Проведенное исследование на основе синтетических данных с различной моделируемой степенью деградации ТЭП показало, что взвешенная сумма элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  по формуле (3.19) обеспечивает наилучший вариант расчета результата измерения ТЭП  $T_{\text{РИ2}}$  с точки зрения минимизации количества измерений, отклонение температуры в которых превышает предел допустимых отклонений. Для исследуемых ТЭП ХАХК, ХАНН и ХКЖК показано, что предложенный подход определения результата измерения ТЭП в среднем на 5 – 25% уменьшает количество измерений ТЭП за пределом допуска по сравнению со стандартными термоэлектрическими преобразователями в составе четырехэлектродного ТЭП.

### 3.4 Формирование вектора диагностических признаков

Элементы вектора диагностических признаков  $\vec{G}$  формируются на основе полученного вектора температур  $\vec{T}_{\text{выч}}$  и вектора ТЭДС  $\vec{E}_{\text{выч}}$ . Рассмотрим механизм формирования вектора диагностических признаков в каждой точке измерения температуры  $T$ .

Поскольку четырехэлектродный ТЭП используется для измерения температуры в одной температурной точке, в исправном случае все элементы вектора  $\vec{T}_{\text{выч}} = \{T_{\text{ХА}}, T_{\text{НихрНис}}, T_{\text{НихрА}}, T_{\text{НисХ}}\}$  будут близки друг к другу и к измеряемой температуре процесса  $T$ . При изменении характеристик одного или нескольких термоэлектродов часть измеряемых ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$  в соответствии с системой (3.1) изменится, а часть останется без изменений. Например, пусть фактическая статическая характеристика термоэлектрода «алюмель»  $e_A^*(T)$  отклонится на некоторую величину от своей номинальной характеристики  $e_A(T)$

$$e_A^*(T) = e_A(T) + de_A(T) \quad (3.22)$$

где  $de_A(T)$  – отклонение ФСХ термоэлектрода от НСХ. При этом в ТЭП согласно системе (3.1) изменятся ТЭДС  $E_{\text{ХА}}$  и  $E_{\text{НихрА}}$ , а следовательно и температуры

$T_{ХА}$  и  $T_{НихрА}$  в векторе. Температуры  $T_{НихрНис}$  и  $T_{НисХ}$  при этом не изменятся, следовательно, в векторе  $\vec{T}_{Выч}$  появится рассогласование между температурами.

Проиллюстрируем описанные изменения в векторе  $\vec{T}_{Выч}$  для ТЭП ХАНН, рассматривая по одному произвольному ТЭП из каждого ансамбля синтетических данных. Графики значений  $\vec{T}_{Выч}$  и диаграммы размаха вектора для каждого ТЭП представлены на рисунке 3.8 для  $T = 900^\circ\text{C}$ . Здесь, слева показаны элементы вектора  $\vec{T}_{Выч}$  и рассчитанный результат измерения  $T_{РИ}$  для следующих термоэлектрических преобразователей: синим цветом показан ТЭП №1 из ансамбля номинальных ТЭП ( $D = 0\%$ ), красным цветом показан ТЭП №2 из ансамбля ТЭП в процессе эксплуатации ( $D = 10\%$ ), зеленым цветом – ТЭП №3 из ансамбля предаварийных ТЭП ( $D = 50\%$ ).

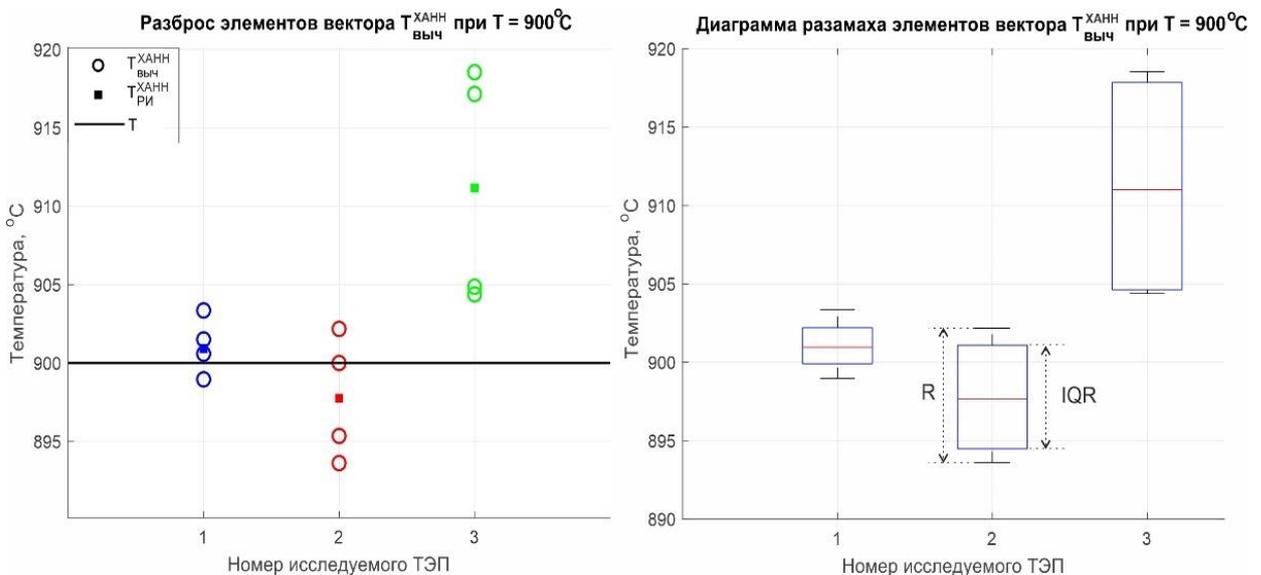


Рисунок 3.8 – Рост разброса элементов вектора  $\vec{T}_{Выч}$  при деградации ТЭП ХАНН (слева) и соответствующие диаграммы размаха (справа)

В качестве численных параметров разброса элементов вектора  $\vec{T}_{Выч}$  используем размах  $R$  и межквартильное расстояние  $IQR$ , которые показаны на диаграмме размахов (рисунок 3.8 справа). Расчет характеристик  $R$  и  $IQR$  для вектора  $\vec{T}_{Выч}$  осуществляется следующим образом

$$R = \max(\vec{T}_{\text{выч}}) - \min(\vec{T}_{\text{выч}}) \quad (3.23)$$

$$IQR = Q_1(\vec{T}_{\text{выч}}) - Q_3(\vec{T}_{\text{выч}}) \quad (3.24)$$

где  $Q_1$  и  $Q_3$  – значения 1 и 3 квартилей, рассчитанные на основе вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ . Межквартильное расстояние характеризует рассеяние элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ , исключая возможные экстремальные значения. При этом квартили  $Q_1$ ,  $Q_3$  и  $Q_2$  – это расчетные значения, которые делят набор данных на четыре равные части [93].

Полученные значения  $R$  и  $IQR$  для рассмотренных ТЭП ХАНН представлены в таблице 3.6 совместно с результатом измерения  $T_{\text{ри}}$ , отклонением результата измерения  $\Delta T_{\text{ри}}^{\text{ХАНН}}$  и величиной допускаемого отклонения  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}$ . По результатам расчета видно, что с ростом отклонения  $\Delta T_{\text{ри}}^{\text{ХАНН}}$  параметры  $R$  и  $IQR$  возрастают в 1,9 – 5,7 раз.

Таблица 3.6 – Результаты расчета  $R$  и  $IQR$  для исследуемых ТЭП ХАНН в температурной точке  $T = 900^\circ\text{C}$

Параметры ТЭП	Номер исследуемого ТЭП		
	1	2	3
$T_{\text{ри}}, ^\circ\text{C}$	901,03	897,75	911,17
$\Delta T_{\text{ри}}^{\text{ХАНН}}, ^\circ\text{C}$	1,03	-2,25	-11,17
$\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}, ^\circ\text{C}$	6,75	6,75	6,75
$R, ^\circ\text{C}$	4,39	8,56	14,17
$IQR, ^\circ\text{C}$	2,30	6,30	13,22

Отметим, что с ростом температуры увеличивается величина предельно допустимого отклонения  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)$  в соответствии с формулой (3.2). Соответственно, максимально значение диагностических признаков  $R$  и  $IQR$ , при которых результат измерения ТЭП находится в допуске, будет изменяться для различных температур. В связи с этим введем следующую нормировку

$$R_0 = \frac{R}{\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_{\text{ри}})} \quad (3.25)$$

$$IQR_0 = \frac{IQR}{\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_{\text{ри}})} \quad (3.26)$$

где для вычисления допускаемого отклонения  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}$  используется результат измерения ТЭП  $T_{\text{ри}}$  вместо фактической температуры процесса  $T$ .

Отметим, что значения  $R_0 \rightarrow 0$  и  $IQR_0 \rightarrow 0$  в случае, когда ФСХ всех термоэлектродов ТЭП соответствуют своим номинальным значениям. В случае же дрейфа ФСХ термоэлектродов ТЭП, использование  $T_{РИ}$  вместо фактической температуры процесса  $T$  вносит некоторую дополнительную погрешность в значения параметров  $R_0$  и  $IQR_0$ . Оценим величину этой погрешности для  $R_0$  и  $IQR_0$  соответственно

$$\delta_{R_0} = \left| \frac{(R_0 - R_{0\text{ ном}})}{R_{0\text{ ном}}} \right| * 100\% \quad (3.27)$$

где  $R_{0\text{ ном}} = \frac{R}{\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)}$  – номинальное значение нормированного размаха, вычисляемое с использованием фактической температуры процесса  $T$ ;

$$\delta_{IQR_0} = \left| \frac{(IQR_0 - IQR_{0\text{ ном}})}{IQR_{0\text{ ном}}} \right| * 100\% \quad (3.28)$$

где  $IQR_{0\text{ ном}} = \frac{IQR}{\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)}$  – номинальное значение нормированного межквартильного расстояния, вычисляемое с использованием фактической температуры процесса  $T$ . Рассчитанные нормированные значения  $R_0$  и  $IQR_0$  представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты расчета нормированных параметров  $R_0$  и  $IQR_0$  для исследуемых ТЭП ХАНН в температурной точке  $T = 900^\circ\text{C}$

Параметры ТЭП	Номер исследуемого ТЭП		
	1	2	3
$T_{РИ}, ^\circ\text{C}$	901,03	897,75	911,17
$\Delta T_{РИ}^{\text{ХАНН}}, ^\circ\text{C}$	1,03	-2,25	-11,17
$\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T), ^\circ\text{C}$	6,750	6,750	6,750
$\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_{РИ}), ^\circ\text{C}$	6,758	6,733	6,834
$R_{0\text{ ном}}$	0,650	1,268	2,099
$IQR_{0\text{ ном}}$	0,341	0,933	1,959
$R_0$	0,649	1,271	2,073
$IQR_0$	0,340	0,936	1,934
$\delta_{R_0}, \%$	0,12	0,25	1,23
$\delta_{IQR_0}, \%$	0,12	0,25	1,23

Анализ полученных результатов показывает, что погрешность расчета нормированных параметров  $\delta_{R_0}$  и  $\delta_{IQR_0}$  не превосходит 1,5%, при этом значения параметра  $R_0$  изменяется в 1,9 раз между ТЭП №2 и №1, в 3,2 раза между ТЭП №3 и №1. В свою очередь, значение параметра  $IQR_0$  изменяются в 2,7 раз между ТЭП №2 и №1, в 5,7 раз между ТЭП №3 и №1. Таким образом, нормированные параметры  $R_0$  и  $IQR_0$ , рассчитанные на основе вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ , имеют высокую чувствительность к дрейфу ФСХ ТЭП, при этом величиной погрешности  $\delta_{R_0}$  и  $\delta_{IQR_0}$  на фоне величины изменения самих параметров  $R_0$  и  $IQR_0$  можно пренебречь.

Помимо вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  каждое измерение температуры  $T$  в ТЭП ХАНН характеризуется вектором ТЭДС  $\vec{E}_{\text{выч}} = \{E_{\text{НихрХ}}, E_{\text{НисА}}\}$ , в который входят измеренные значения ТЭДС с низкой чувствительностью к температуре. При отклонении ФСХ одного или нескольких термоэлектродов от НСХ, значения ТЭДС в векторе  $\vec{E}_{\text{выч}}$  также изменятся. Например, в случае отклонения ФСХ термоэлектрода «алюмель» от НСХ в соответствии с (3.22), значение ТЭДС  $E_{\text{НисА}}^*$  в составе вектора  $\vec{E}_{\text{выч}}$  изменится следующим образом

$$E_{\text{НисА}}^* = e_{\text{Нис}}(T) - e_A^*(T) = E_{\text{НисА}} + dE_{\text{НисА}} \quad (3.29)$$

где  $E_{\text{НисА}}^*$  – измеряемое значение ТЭДС между парой термоэлектродов «нисил-алюмель» в температурной точке  $T$ , с учетом ФСХ термоэлектрода алюмель  $e_A^*(T)$ ;

$e_{\text{Нис}}(T)$  – индивидуальная ТЭДС термоэлектрода «нисил», возникающая при температуре  $T$  в соответствии с НСХ термоэлектрода;

$e_A^*(T)$  – индивидуальная ТЭДС термоэлектрода «алюмель», возникающая при температуре  $T$  в соответствии с ФСХ термоэлектрода, которая отличается от НСХ согласно (3.22) на величину  $de_A(T)$ ;

$E_{\text{НисА}}$  – номинальное значение пары термоэлектродов «нисил-алюмель» при номинальной статической характеристики термоэлектрода  $e_A(T)$ ;

$dE_{\text{НисА}} = -de_A(T)$  – вклад дрейфа характеристики термоэлектрода «алюмель» в отклонение значения ТЭДС  $E_{\text{НисА}}^*$  от своего номинального значения  $E_{\text{НисА}}$ .

Поскольку номинальное значение ТЭДС  $E_{\text{НисА}}$  в температурной точке  $T$  неизвестно, вычислим его оценку по полученному результату измерения термоэлектрического преобразователя  $T_{\text{РИ}}$

$$\hat{E}_{\text{НисА}}(T_{\text{РИ}}) = e_{\text{Нис}}(T_{\text{РИ}}^{\text{ХАНН}}) - e_{\text{А}}(T_{\text{РИ}}) \quad (3.30)$$

где  $e_{\text{Нис}}(T_{\text{РИ}})$  и  $e_{\text{А}}(T_{\text{РИ}})$  – рассчитанные по НСХ термоэлектродов значения индивидуальных ТЭДС «нисил» и «алюмель». Тогда, если оценка  $\hat{E}_{\text{НисА}}(T_{\text{РИ}}) \approx E_{\text{НисА}}$ , измеряемое ТЭДС  $E_{\text{НисА}}^*$  может быть сопоставлено с полученной оценкой.

Проиллюстрируем изменения ТЭДС в векторе  $\vec{E}_{\text{ВЫЧ}}$  и соответствующих им оценок, рассматривая такие же ТЭП из каждого ансамбля синтетических данных, которые рассматривались при анализе вектора  $\vec{T}_{\text{ВЫЧ}}$ . На рисунке 3.9 для температуры  $T = 900^\circ\text{C}$  представлены значения ТЭДС  $E_{\text{НихрХ}}^*$  и  $E_{\text{НисА}}^*$  в сравнении с их оценками  $\hat{E}_{\text{НихрХ}}(T_{\text{РИ}})$  и  $\hat{E}_{\text{НисА}}(T_{\text{РИ}})$  и номинальным значением  $E_{\text{НихрХ}}(T)$  и  $E_{\text{НисА}}(T)$ .

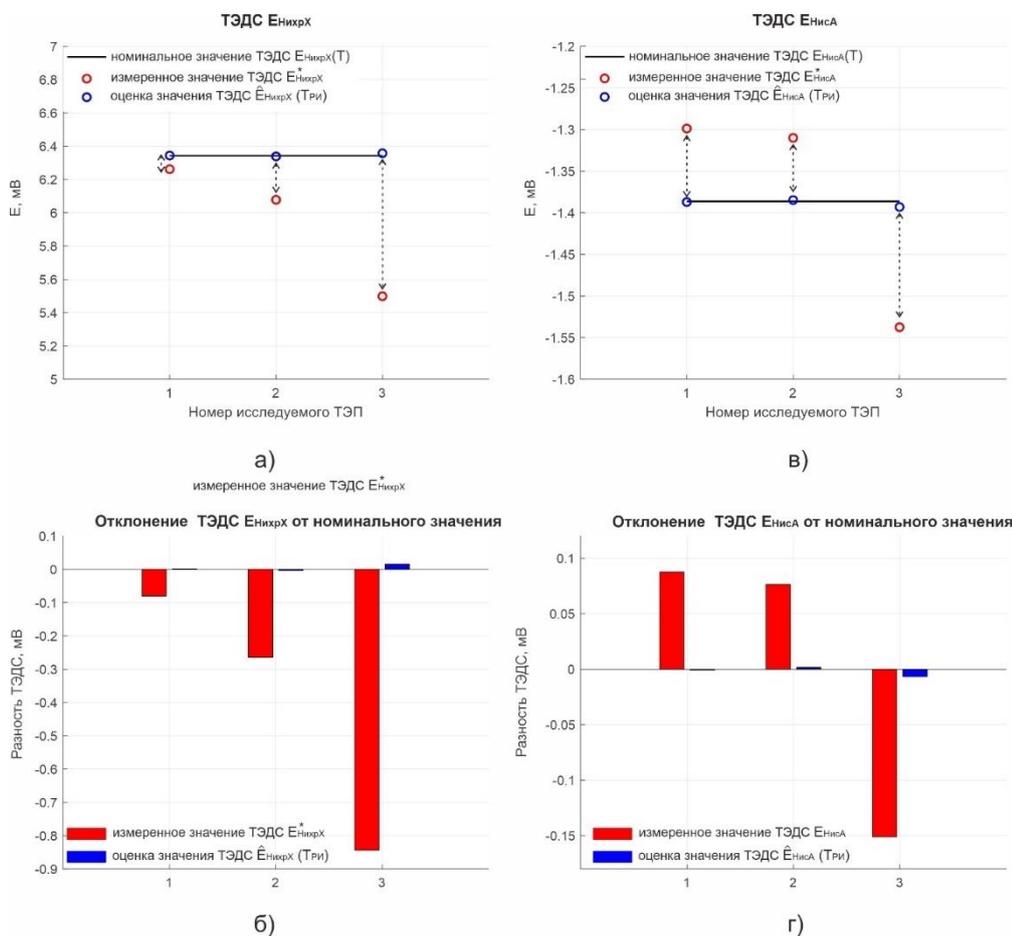


Рисунок 3.9 – Изменение ТЭДС  $\vec{E}_{\text{ВЫЧ}}$  при деградации ТЭП ХАНН

Как показано на рисунке 3.9 а), значения ТЭДС  $E_{\text{НихрХ}}^*$  (красный маркер) существенно отклоняется от номинального значения  $E_{\text{НихрХ}}(T)$  (черная линия) по сравнению с оценкой этого значения  $\hat{E}_{\text{НихрХ}}(T_{\text{РИ}})$  (синий маркер). На рисунке 3.9 б) красным цветом показано отклонение,  $E_{\text{НихрХ}}^*$  от номинального значения и синим цветом показано отклонение оценки  $\hat{E}_{\text{НихрХ}}(T_{\text{РИ}})$  от номинального значения. В случае ТЭДС  $E_{\text{НихрХ}}$ , отклонение измеренного значения  $E_{\text{НихрХ}}^*$  больше отклонения оценки  $\hat{E}_{\text{НихрХ}}(T_{\text{РИ}})$  в 56 раз и более.

Аналогично на рисунке 3.9 в) показаны значения ТЭДС  $E_{\text{НисА}}^*$  и соответствующая оценка  $\hat{E}_{\text{НисА}}(T_{\text{РИ}})$ , а на рисунке 3.9 г) – отклонения измеренного значения ТЭДС и его оценки от номинального значения  $E_{\text{НисА}}$ . В случае ТЭДС  $E_{\text{НисА}}$ , отклонение измеренного значения  $E_{\text{НисА}}^*$  больше отклонения оценки  $\hat{E}_{\text{НисА}}(T_{\text{РИ}})$  в 22 раз и более.

Тогда, в качестве диагностического признака используем невязку измеренного значения ТЭДС и его оценки, нормированную на допускаемое отклонение ТЭДС ТЭП

$$\varepsilon_{\text{НихрХ}} = \frac{|E_{\text{НихрХ}}^* - \hat{E}_{\text{НихрХ}}(T_{\text{РИ}})|}{\Delta E_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_{\text{РИ}})} \quad (3.31)$$

$$\varepsilon_{\text{НисА}} = \frac{|E_{\text{НисА}}^* - \hat{E}_{\text{НисА}}(T_{\text{РИ}})|}{\Delta E_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_{\text{РИ}})} \quad (3.32)$$

где  $\Delta E_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_{\text{РИ}})$  – приведенная к ТЭДС функция допускаемого отклонения для ТЭП ХАНН согласно (3.2). Введенное значение невязки  $\varepsilon_{\text{НихрХ}} \rightarrow 0$  и  $\varepsilon_{\text{НисА}} \rightarrow 0$  в случае, когда ФСХ всех термоэлектродов ТЭП соответствуют НСХ. В случае же дрейфа ФСХ термоэлектродов ТЭП, для одного или нескольких элементов вектора  $\vec{E}_{\text{выч}}$  значение невязки отлично от 0.

Использование  $T_{\text{РИ}}$  вместо  $T$  в формулах (3.31) – (3.32) вносит некоторую дополнительную погрешность в значение невязки. Оценим погрешность определения соответствующих невязок  $\delta_{\text{НихрХ}}$  и  $\delta_{\text{НисА}}$  следующим образом

$$\delta_{\text{НихрХ}} = \left| \frac{\varepsilon_{\text{НихрХ}} - (\varepsilon_{\text{НихрХ}})_{\text{ном}}}{(\varepsilon_{\text{НихрХ}})_{\text{ном}}} \right| * 100\% \quad (3.33)$$

где  $(\varepsilon_{\text{НихрХ}})_{\text{ном}} = \frac{E_{\text{НихрХ}}^* - E_{\text{НихрХ}}(T)}{\Delta E_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)}$  – номинальное значение невязки ТЭДС «нихросил-хромель»;

$$\delta_{\text{НисА}} = \left| \frac{\varepsilon_{\text{НисА}} - (\varepsilon_{\text{НисА}})_{\text{ном}}}{(\varepsilon_{\text{НисА}})_{\text{ном}}} \right| * 100\% \quad (3.34)$$

где  $(\varepsilon_{\text{НисА}})_{\text{ном}} = \frac{E_{\text{НисА}}^* - E_{\text{НисА}}(T)}{\Delta E_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)}$  – номинальное значение невязки ТЭДС «нисил-алюмель». Полученные значения невязок ТЭДС  $\varepsilon_{\text{НихрХ}}$  и  $\varepsilon_{\text{НисА}}$ , а также значений  $\delta_{\text{НихрХ}}$  и  $\delta_{\text{НисА}}$  представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты расчета  $\varepsilon_{\text{НихрХ}}$  и  $\varepsilon_{\text{НисА}}$  для исследуемых ТЭП ХАНН в температурной точке  $T = 900^\circ\text{C}$

Параметры ТЭП	Номер исследуемого ТЭП		
	1	2	3
$T_{\text{ри}}, ^\circ\text{C}$	901,03	897,75	911,17
$\Delta T_{\text{ри}}^{\text{ХАНН}}, ^\circ\text{C}$	1,03	-2,24	-11,17
$\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}, ^\circ\text{C}$	6,75	6,75	6,75
$\Delta E_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}, \text{мВ}$	0,034	0,034	0,034
$E_{\text{НихрХ}}, \text{мВ}$	6,342	6,342	6,342
$E_{\text{НисА}}, \text{мВ}$	-1,386	-1,386	-1,386
$E_{\text{НихрХ}}^*, \text{мВ}$	6,262	6,078	5,499
$E_{\text{НисА}}^*, \text{мВ}$	-1,299	-1,310	-1,537
$\hat{E}_{\text{НихрХ}}(T_{\text{ри}}), \text{мВ}$	6,344	6,338	6,358
$\hat{E}_{\text{НисА}}(T_{\text{ри}}), \text{мВ}$	-1,387	-1,385	-1,389
$\Delta E_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_{\text{ри}}), \text{мВ}$	0,035	0,035	0,035
$\varepsilon_{\text{НихрХ}}$	2,343	7,428	24,543
$\varepsilon_{\text{НисА}}$	2,514	2,143	4,229
$\delta_{\text{НихрХ}}, \%$	0,43	4,33	1,01
$\delta_{\text{НисА}}, \%$	1,74	4,14	4,79

Данные в таблице 3.8 показывают, что значение модуля невязки  $\varepsilon_1$  для термоэлектродной пары «нихросил-хромель» отличается более чем в 3 раза между ТЭП №2 и №1, и более чем в 10 раз между ТЭП №3 и №1. При этом погрешность

определения невязки  $\delta_1$  не превосходит 5%. В случае с модулем невязки  $\varepsilon_2$  для термоэлектродной пары «нисил-алюмель», ТЭП №2 имеет меньшее значение модуля невязки, чем ТЭП №1, при этом значение невязки между ТЭП №3 и ТЭП №1 отличается в 1,6 раза. Отметим, что погрешность определения невязки  $\delta_2$  в данном случае также не превосходит 5%. Таким образом, вектор ТЭДС  $\vec{E}_{\text{выч}}$  имеет существенные изменения при дрейфе отдельных термоэлектродов в четырехэлектродном ТЭП, при этом изменяться могут все компоненты вектора  $\vec{E}_{\text{выч}}$  или только некоторые из них, как в случае с ТЭП №2. Расчет невязки  $\varepsilon_{\text{НихрХ}}$  и  $\varepsilon_{\text{НисА}}$  для каждого компонента вектора  $\vec{E}_{\text{выч}}$  позволяет выявить изменения ТЭДС в векторе и, соответственно, обнаружить дрейф ФСХ термоэлектродов ТЭП.

В результате, в случае ТЭП ХАНН вектор диагностических признаков

$$\vec{G} = \{R_0, IQR_0, \varepsilon_{\text{НихрХ}}, \varepsilon_{\text{НисА}}\}, \quad (3.35)$$

при этом все элементы вектора являются безразмерными величинами, и для ТЭП с номинальными статическими характеристиками всех термоэлектродов компоненты вектора  $\vec{G} = \{0, 0, 0, 0\}$ . Для реальных ТЭП ХАНН, ФСХ которых отличаются от НСХ, разброс элементов вектора  $\vec{G}$  представлен на рисунках 3.10 – 3.13 для температурных точек 1000, 100°C.

На диаграммах по горизонтальной оси представлено максимальное значение отклонения температур в векторе  $\Delta\vec{T}_{\text{выч}}$  в соответствующей температурной точке, а по вертикальной оси – соответствующее значение элемента вектора  $\vec{G}$ . Зеленым цветом показаны значения для ансамбля номинальных ТЭП ( $D = 0\%$ ), красным – для ТЭП в процессе эксплуатации ( $D = 10\%$ ), синим – для предаварийных ТЭП ( $D = 50\%$ ). При этом маркер закрашен белым цветом, если максимальное значение отклонения в векторе  $\Delta\vec{T}_{\text{выч}}$  находится в пределах допуска, и закрашен цветом, если максимальное значение отклонения в векторе  $\Delta\vec{T}_{\text{выч}}$  превосходит допускаемое отклонение. Зеленая горизонтальная линия показывает максимальное значение элемента вектора  $\vec{G}$  для ансамбля номинальных ТЭП ( $D = 0\%$ ).

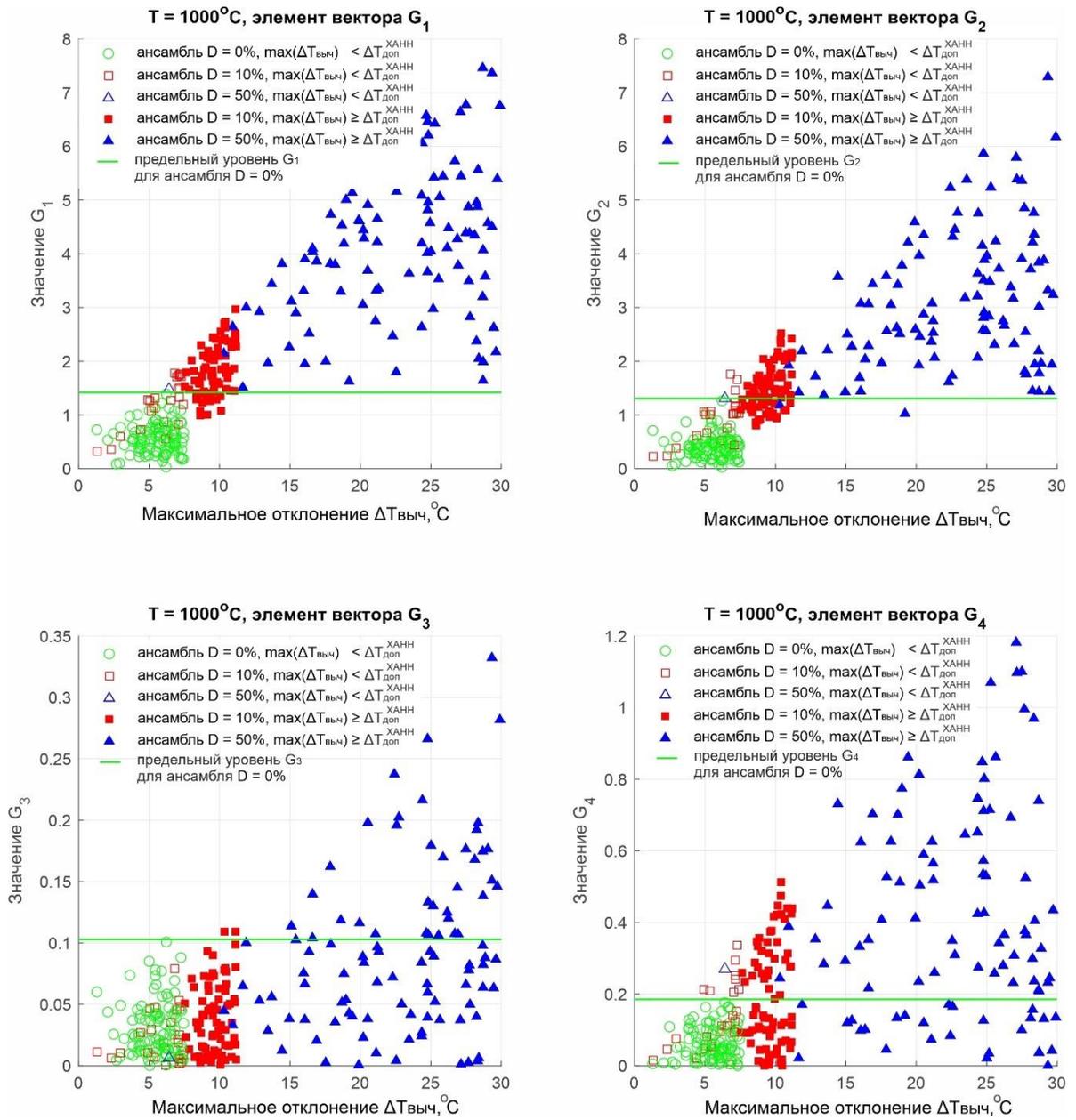


Рисунок 3.10 – Изменение элементов вектора  $\vec{G}$  при возрастании максимального значения отклонения в векторе  $\vec{\Delta T}_{\text{выч}}$  для ТЭП ХАНН при  $T = 1000^\circ\text{C}$

Анализ полученных диаграмм рассеяния элементов вектора  $\vec{G}$  для ТЭП ХАНН показывает, что элементы вектора диагностических признаков  $G_1$  и  $G_2$  существенно возрастают с увеличением отклонения элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ , демонстрируя при этом схожее поведение для всех ансамблей синтетических ТЭП. Большая часть измерений с максимальным значением вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  превышающим допустимое отклонение  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}$  находятся выше зеленой линии, отделяющей максимальное значение  $G_1$  и  $G_2$  для ансамбля  $D = 0\%$ . В свою очередь, элементы

вектора диагностических  $G_3$  и  $G_4$  имеют высокую чувствительность к росту отклонения элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  только для некоторых из точек измерения. При этом величина рассеяния для элементов  $G_3$  и  $G_4$  в различных ансамблях синтетических данных также различается.

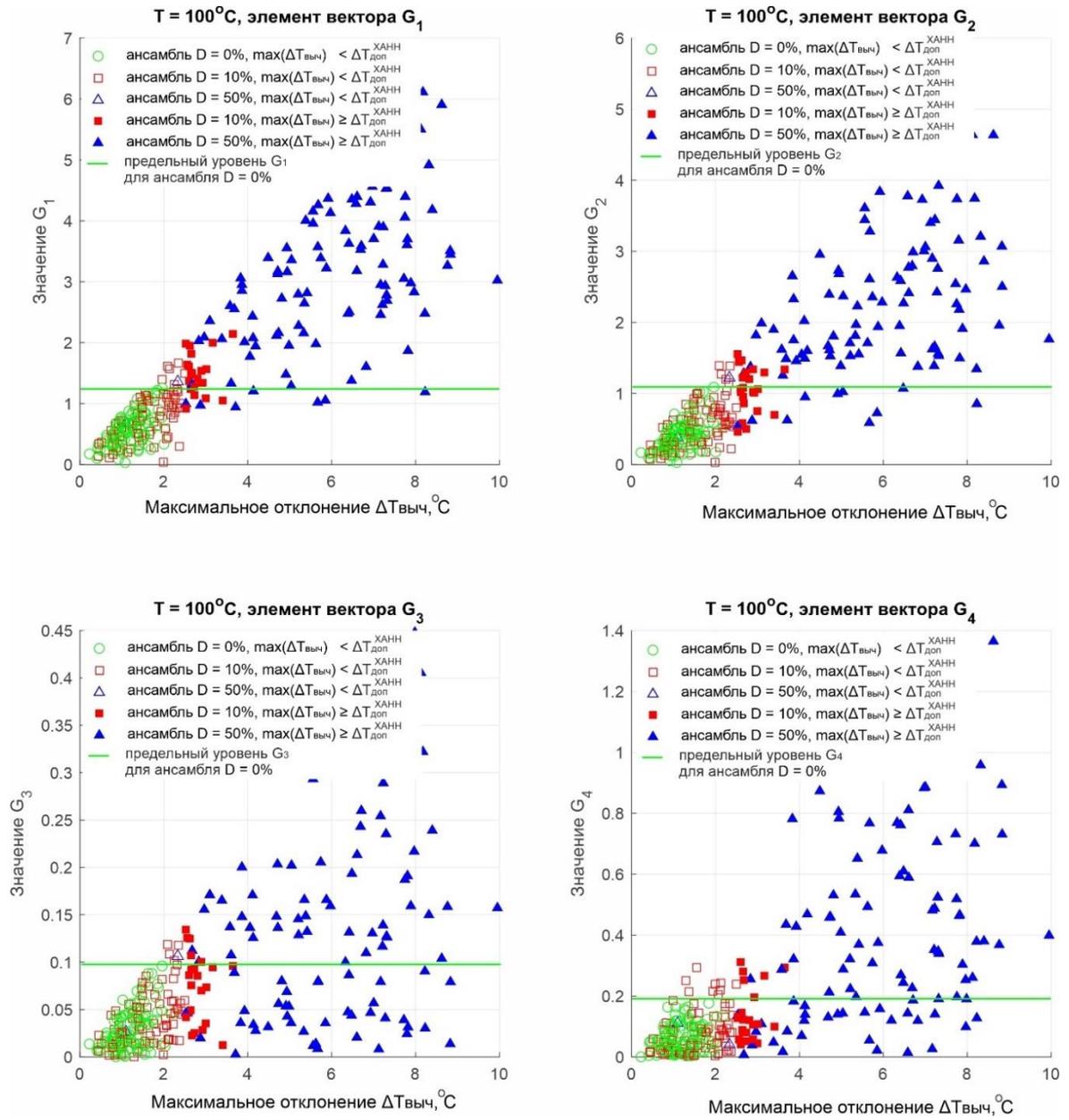


Рисунок 3.11 – Изменение элементов вектора  $\vec{G}$  при возрастании максимального значения отклонения в векторе  $\vec{\Delta T}_{\text{выч}}$  для ТЭП ХАНН при  $T = 100^\circ\text{C}$

Выполним оценку независимости рассмотренных элементов вектора  $\vec{G}^{\text{XANN}}$  с использованием линейного коэффициента корреляции Пирсона  $r_{\text{AB}}$  [94], определяемого как

$$r_{AB} = \frac{\sum_{n=1}^N (A_n - \bar{A})(B_n - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (A_n - \bar{A})^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N (B_n - \bar{B})^2}} \quad (3.36)$$

где  $A$  и  $B$  – элементы вектора диагностических признаков, между которыми рассчитывается коэффициент корреляции, в каждой выборке  $N$  значений;

$\bar{A}$  и  $\bar{B}$  – средние значения соответствующих элементов вектора диагностических признаков.

Построенные по рассчитанным коэффициентам корреляции матрицы на рисунке 3.12 показывают высокий коэффициент корреляции  $r_{G_1 G_2}$  между элементами  $G_1$  и  $G_2$  ( $r_{G_1 G_2} > 0,9$ ), следовательно, при оценке статуса результата измерения будет использоваться один из данных диагностических признаков. Отметим, что элементы  $G_3$  и  $G_4$  незначительно коррелированы между собой ( $r_{G_3 G_3} < 0,5$ ), а корреляция между элементами  $G_{1(2)}$  и  $G_{3(4)}$  практически отсутствует ( $r_{G_1 G_3} \approx r_{G_1 G_4} \approx r_{G_2 G_3} \approx r_{G_2 G_4} \approx 0$ ). Таким образом, элементы диагностические признаки  $G_3$  и  $G_4$  способны хорошо дополнить один из основных диагностических признаков  $G_1$  или  $G_2$  в алгоритме оценки статуса результата измерения.

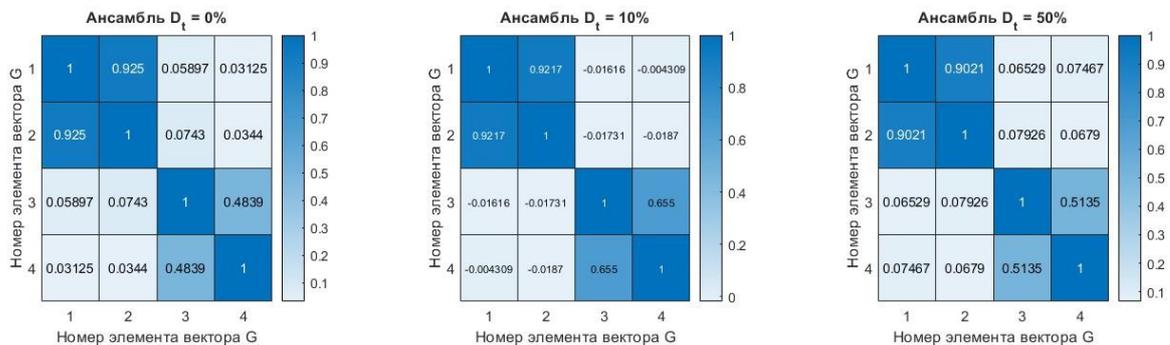


Рисунок 3.12 – Матрицы корреляции между элементами вектора  $\vec{G}$  для ансамблей синтетических данных ТЭП ХАНН

Рассмотренный на примере ТЭП ХАНН подход к формированию вектора диагностических признаков  $\vec{G}$  без потери общности рассуждений применим к ТЭП ХКЖК и ТЭП ХАХК

$$\vec{G} = \{R_0, IQR_0, \varepsilon_{ЖХ}, \varepsilon_{КонстК}\}, \quad (3.37)$$

где  $R_0$  и  $IQR_0$  – относительные значения размаха вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ ;

$\varepsilon_{ЖХ}, \varepsilon_{КонстК}$  – невязки ТЭДС «железо-хромель» и «константан-копель»,

$$\vec{G} = \{R_0, IQR_0, \varepsilon_{X_1 X_2}\}, \quad (3.38)$$

где  $R_0$  и  $IQR_0$  – относительные значения размаха вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ ;

$\varepsilon_{X_1 X_2}$  – невязка ТЭДС «хромель(1)-хромель(2)».

### 3.5 Метод обработки информации для оценки достоверности показаний ТЭП и критерий назначения статуса

В стандарте на интеллектуальные средства измерения [11], статус результата измерения представляет качественную оценку результата измерения и опасность его использования из-за возможной недостоверности. Результат измерения четырехэлектродного ТЭП  $T_{\text{РИ}}$  определяется по формуле (3.19) на основе вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ , соответственно, отклонение результата измерения  $\Delta T_{\text{РИ}}$  в каждой точке измерения температуры  $T$

$$\Delta T_{\text{РИ}} = |T_{\text{РИ}} - T| \quad (3.39)$$

зависит от отклонения элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$

$$\Delta T_{\text{выч } m} = |T_{\text{выч } m} - T| \quad (3.40)$$

где  $m$  – номер элемента в векторе  $\vec{T}_{\text{выч}}$ . В зависимости от соотношения с пределом допускаемых отклонений  $\Delta T_{\text{доп}}(T)$ , выделим три возможных метрологических состояния ТЭП.

**1. Исправный ТЭП.** Отклонения 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 находится в пределах допуска,  $\Delta T_{\text{РИ}} < \Delta T_{\text{доп}}(T)$ .

**2. Нормальный ТЭП.** Отклонение одного или несколько 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 допускаемых отклонений,  $\Delta T_{\text{РИ}} < \Delta T_{\text{доп}}(T)$ .

3. **Неисправный ТЭП.** Один, несколько или все элементы вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  вышли за допуск,  $\Delta T_{\text{выч } m} \geq \Delta T_{\text{доп}}(T)$ . В тоже время, отклонение результата измерения  $T_{\text{ри}}$  также вышло за допуск,  $\Delta T_{\text{ри}} \geq \Delta T_{\text{доп}}(T)$ .

Проиллюстрируем распределение результатов измерения, соответствующих различным метрологическим состояниям ТЭП, в произвольной выборке измерений. Рассмотрим выборку измерений в фиксированной температурной точке  $T$  для произвольного ТЭП в процессе эксплуатации, который под влиянием воздействующих факторов осуществляет последовательный переход от состояния «Исправный ТЭП» в состояние «Неисправный ТЭП». Вид распределения полученных результатов относительно отклонения результата измерения  $\Delta T_{\text{ри}}$  и максимального значения отклонения  $\max(\Delta \vec{T}_{\text{выч}})$  представлен на рисунке 3.13.

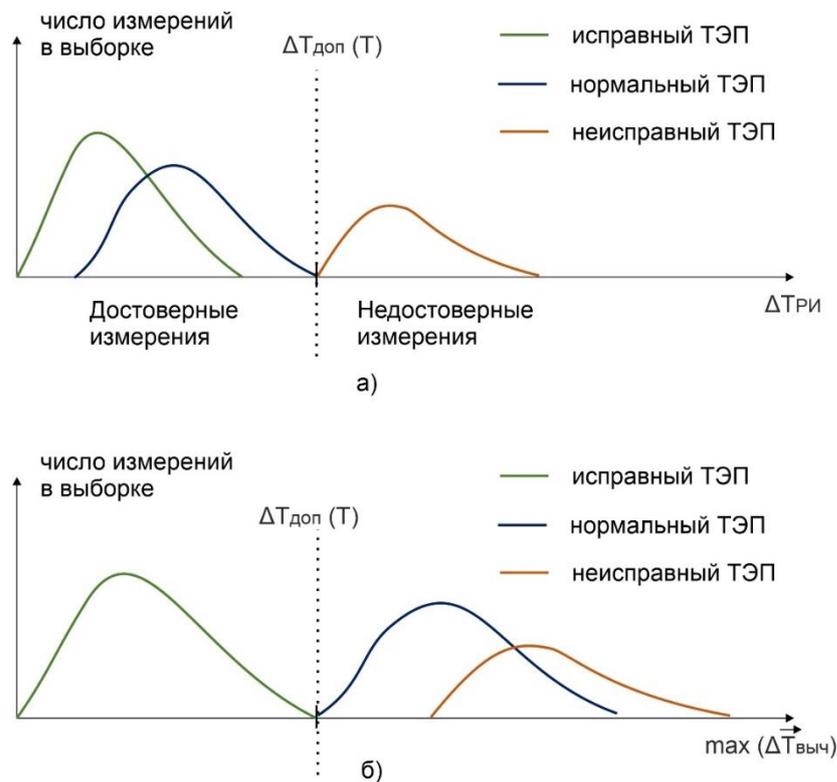


Рисунок 3.13 – Распределение результатов измерения ТЭП в процессе эксплуатации

Отметим, что распределение измерений для «нормального ТЭП» и «исправного ТЭП» трудно различимы между собой (рисунок 3.13 а), при этом результат измерения для этих метрологических состояний ТЭП – достоверный.

Состояние же «неисправный ТЭП» хорошо видно относительно  $\Delta T_{\text{ри}}$ . С другой стороны, относительно максимального значения отклонения  $\max(\Delta \vec{T}_{\text{выч}})$  (рисунок 3.13 б) состояния «нормальный ТЭП» и «неисправный ТЭП» трудно различимы между собой. Следовательно, даже при известной фактической температуре процесса  $T$  при наблюдении за отклонением результата измерения  $\Delta T_{\text{ри}}$  или максимальным отклонением  $\max(\Delta \vec{T}_{\text{выч}})$ , метрологические состояния ТЭП похожи между собой.

На практике при эксплуатации ТЭП фактическая температура процесса  $T$  неизвестна, поэтому алгоритм оценки статусов результата измерения опирается на вектор диагностических признаков  $\vec{G}$ . Как показано в разделе 3.4, для обеспечения максимальной чувствительности необходимо учитывать все элементы вектора диагностических признаков. Тогда, относительно обобщенного диагностического признака, вычисляемого на основе вектора  $\vec{G}$ , получаемое распределение измерений качественно имеет вид на рисунке 3.14. Пересечение состояний «исправный ТЭП» и «неисправный ТЭП» может возникать при таком сочетании влияющих факторов, которое вызывает однонаправленное изменение свойств термоэлектродов. В данном случае чувствительность вектора диагностических признаков  $\vec{G}$  снижается и гарантированное разделение метрологических состояний ТЭП между собой затруднительно.

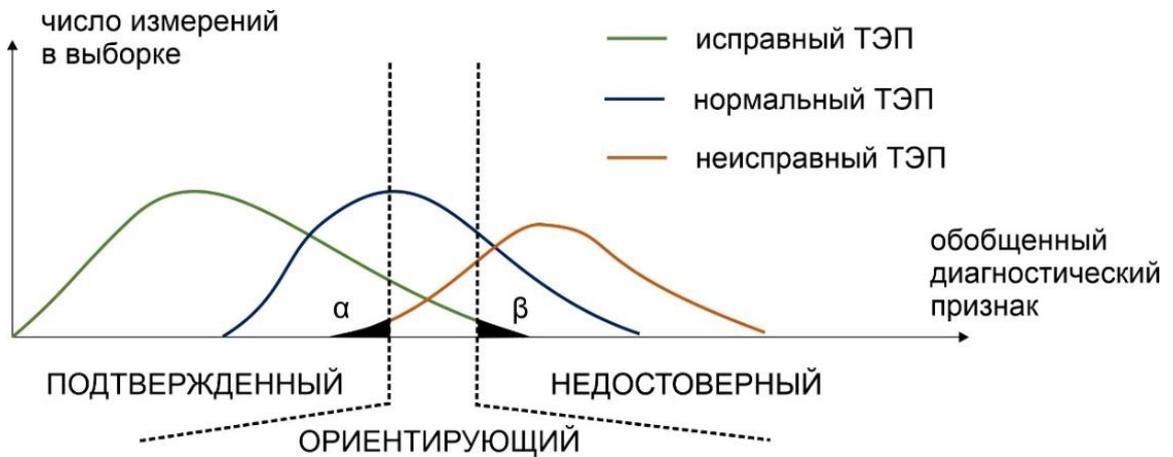


Рисунок 3.14 – Формирование статусов результата измерения ТЭП

Введение статусов результата измерения ТЭП (Рисунок 3.14) должно учитывать следующие соображения. С одной стороны, состояние «исправный ТЭП» является гарантией достоверности результата измерения  $T_{\text{РИ}}$ . Однако, разброс свойств термопарных материалов при изготовлении, а также первичные изменения характеристик термопарных материалов в начале эксплуатации повышают вероятность выхода одного из элементов вектора  $\vec{T}_{\text{ВЫЧ}}$  за пределы допустимых отклонений для большого количества относительно новых ТЭП, при этом  $T_{\text{РИ}}$  остается в пределах допуска. Тогда, метрологические состояния «исправный ТЭП» и «нормальный ТЭП» при относительно небольшом разбросе элементов вектора  $\vec{T}_{\text{ВЫЧ}}$  между собой обеспечивают отклонение результата измерения  $\Delta T_{\text{РИ}} < \Delta T_{\text{доп}}(T)$ . С другой стороны, рост разброса элементов вектора  $\vec{T}_{\text{ВЫЧ}}$  сигнализирует об ускорении деградации термопарных материалов, что может привести к быстрому росту отклонения результата измерения  $T_{\text{РИ}}$  и выходу его за пределы допустимых отклонений, то есть перехода ТЭП из состояния «нормальный ТЭП» в состояние «неисправный ТЭП». Следовательно, нужно как можно раньше обнаруживать ситуацию, когда отклонение элементов вектора  $\vec{T}_{\text{ВЫЧ}}$  существенно возрастает и выходит за пределы допустимых отклонений.

Тогда, введем статус результата измерения четырехпроводного ТЭП (ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ) совместно с оценкой вероятности ( $\alpha$  и  $\beta$ ), с которой мы можем доверять результату измерения с соответствующим статусом (Рисунок 3.14).

1. Статус ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ. Данный статус измерения гарантирует с заданной вероятностью  $\alpha$ , что отклонение результата измерения  $T_{\text{РИ}}$  находится в пределах допустимых отклонений:  $\Delta T_{\text{РИ}} < \Delta T_{\text{доп}}(T)$ . В соответствии с распределениями на рисунке 3.14, величину  $\alpha$  определим как

$$\alpha = \frac{N_3}{N_1 + N_2 + N_3} \quad (3.41)$$

где  $N_3$  – число измерений, соответствующих состоянию «неисправный ТЭП» и попавших в статус ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ;  $N_1$  и  $N_2$  – число измерений

«исправных ТЭП» и «нормальных ТЭП» в статусе ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ. В качестве предельно допустимого значения  $\alpha$  для статуса взято значение  $\alpha = 0,05$ .

Отметим, что статус ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ предъявляет достаточно жесткие требования к состоянию ТЭП. В связи с этим, результат измерения со статусом ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ предназначены для принятия ответственных решений по управлению технологическим процессом в соответствии с стандартом [11].

2. Статус НЕДОСТОВЕРНЫЙ. Данный статус измерения гарантирует с заданной вероятностью  $\beta$ , что отклонение одного или нескольких элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  вышли за допуск  $\Delta T_{\text{выч } m} \geq \Delta T_{\text{доп}}(T)$ , следовательно ТЭП не соответствует состоянию «Исправный ТЭП». В соответствии с распределениями на рисунке 3.14, величину  $\beta$  определим как

$$\beta = \frac{M_1}{M_1 + M_2 + M_3} \quad (3.42)$$

где  $M_1$  – число измерений, соответствующих состоянию «исправный ТЭП» и попавших в статус НЕДОСТОВЕРНЫЙ;  $M_2$  и  $M_3$  – число измерений для «нормальных ТЭП» и «неисправных ТЭП» в статусе НЕДОСТОВЕРНЫЙ. В качестве предельно допустимого значения  $\beta$  для статуса взято значение  $\beta = 0,05$ .

Статус НЕДОСТОВЕРНЫЙ предназначен для раннего информирования о вероятности появления недостоверных измерений ТЭП, поскольку связан с уменьшением количества измерений «исправных ТЭП» внутри статуса. Получение результата измерения со статусом НЕДОСТОВЕРНЫЙ свидетельствует о существенном изменении свойств термоэлектродов ТЭП. Следовательно, в соответствии со стандартом [11], необходимо выполнить остановку технологического процесса и провести обслуживание ТЭП.

3. Статус ОРИЕНТИРУЮЩИЙ. Данный статус измерения, показывает возрастание риска нахождения отклонения результата измерения  $\Delta T_{\text{ри}}$  за пределами допуска. Поскольку количественную оценку соотношения измерений для различного состояния ТЭП в данном статусе провести невозможно, применение результата измерения со статусом ОРИЕНТИРУЮЩИЙ возможен для

ориентировочной оценки состояния оборудования или управления технологическим процессом в безопасных режимах [11].

Отметим, что диаграмма на рисунке 3.14 иллюстрирует наихудший сценарий с точки зрения эффективности метода оценки статуса результата измерения, поскольку статус **ОРИЕНТИРУЮЩИЙ** включает измерения во всех метрологических состояниях ТЭП. Реальное распределение результатов измерения может отличаться в зависимости от фактического метрологического состояния ТЭП и метода оценки статусов.

Предлагаемый метод формирования статуса результата измерения использует элементы вектора диагностических признаков  $\vec{G}$  для формирования логических выводов, однозначно связанных с каждым из статусов. Рассмотрим правила формирования логических выводов и настройки пороговых значений с учетом  $\alpha$  и  $\beta$  на примере ТЭП ХАНН.

Введем для границы статуса **ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ** логическое условие  $s_\alpha$  следующим образом

$$s_\alpha = ((R_0 < [R_0]_\alpha) \text{ И } (IQR_0 < [IQR_0]_\alpha)) \text{ И} \\ \text{И} \left( (\varepsilon_{\text{НихрХ}} < [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha) \text{ ИЛИ } (\varepsilon_{\text{НисА}} < [\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha) \right) \quad (3.43)$$

где  $[R_0]_\alpha, [IQR_0]_\alpha, [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha, [\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha$  – пороговые значения для элементов вектора диагностических признаков  $\vec{G}$  для ТЭП ХАНН (соотношение (3.35)), связанные с вероятностью  $\alpha$ . Каждое неравенство в выражении (3.43) при проверке дает логический вывод (0 или 1), которые объединяются с помощью логических операторов И, ИЛИ.

Аналогично для границы статуса **НЕДОСТОВЕРНЫЙ** введем логическое условие  $s_\beta$  следующим образом

$$s_\beta = ((R_0 < [R_0]_\beta) \text{ ИЛИ } (IQR_0 < [IQR_0]_\beta)) \text{ И} \\ \text{И} \left( (\varepsilon_{\text{НихрХ}} < [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta) \text{ И } (\varepsilon_{\text{НисА}} < [\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta) \right) \quad (3.44)$$

где  $[R_0]_\beta, [IQR_0]_\beta, [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta, [\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta$  – пороговые значения для элементов вектор диагностических признаков  $\vec{G}$ , связанные с вероятностью  $\beta$ .

Наконец, свяжем переменные  $s_\alpha, s_\beta$  со статусами результата измерения следующим образом

$$\begin{aligned} \text{ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ: } s_\alpha &= 1 \text{ (при этом гарантированно } s_\beta = 1); \\ \text{ОРИЕНТИРУЮЩИЙ: } (s_\alpha &= 0) \text{ И } (s_\beta = 1); \\ \text{НЕДОСТОВЕРНЫЙ: } s_\beta &= 0 \text{ (при этом гарантированно } s_\alpha = 0). \end{aligned} \quad (3.45)$$

Равенства  $s_\beta = 1$  в статусе ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ и  $s_\alpha = 0$  в статусе НЕДОСТОВЕРНЫЙ объясняется фактом последовательного изменения статуса результата измерения ТЭП при постепенном переходе ТЭП от состояния «исправный ТЭП» к состоянию «нормальный ТЭП» и «неисправный ТЭП» (Рисунок 3.14).

Рассмотрим подробнее условия назначения статусов ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ на основе таблиц истинности 3.9 и 3.10. Условие  $s_\alpha = 1$  (Таблица 3.9) выполнено только при строгом выполнении неравенств для  $R_0$  и  $IQR_0$ , что существенно уменьшает вероятность выхода элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  за пределы допуска. При этом одна из невязок ТЭДС  $\varepsilon_{\text{НихрХ}}$  и  $\varepsilon_{\text{НисА}}$  может превышать допускаемое значение, чтобы уменьшить число срабатываний алгоритма при малом отклонение ТЭДС отдельного термоэлектрода от НСХ. Таким образом, статус ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ присваивается на основе строго отслеживания параметров  $R_0$  и  $IQR_0$  вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ .

Таблица 3.9 – Таблица истинности для условия  $s_\alpha = 1$

$R_0$	$IQR_0$	$\varepsilon_{\text{НихрХ}}$	$\varepsilon_{\text{НисА}}$
1	1	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

Условие  $s_\beta = 1$  (Таблица 3.10) выполнено только при строгом выполнении неравенств для  $\varepsilon_{\text{НихрХ}}$  и  $\varepsilon_{\text{НисА}}$ . Соответственно, превышение хотя бы одной невязкой заданного порогового значения или одновременное превышение

параметрами  $R_0$  и  $IQR_0$  пороговых значений приводит к  $s_\beta = 0$  и, соответственно, к статусу НЕДОСТОВЕРНЫЙ. Таким образом, статус НЕДОСТОВЕРНЫЙ присваивается на основе строго отслеживания параметров  $\varepsilon_{\text{НихрХ}}$  и  $\varepsilon_{\text{НисА}}$  вектора  $\vec{E}_{\text{выч}}$ .

Таблица 3.10 – Таблица истинности для условия  $s_\beta = 1$

$R_0$	$IQR_0$	$\varepsilon_{\text{НихрХ}}$	$\varepsilon_{\text{НисА}}$
1	0	1	1
0	1	1	1
1	1	1	1

Далее, необходимо определить пороговые значения для каждого элемента вектора диагностических признаков  $\vec{G}$  для условий  $s_\alpha$  и  $s_\beta$  соответственно. Расчет пороговых значений выполнен с использованием нескольких ансамблей синтетических данных ТЭП ХАНН в соответствии со следующей процедурой.

**Шаг 1.** Первичная настройка пороговых значений для  $s_\alpha$ . Граница статуса ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ должна отделить состояние «неисправный ТЭП» от состояния «исправный ТЭП» (Рисунок 3.14), следовательно, для настройки пороговых значений  $[R_0]_\alpha, [IQR_0]_\alpha, [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha, [\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha$  используем ансамбль с максимальным количеством измерений от «неисправных ТЭП». В данной работе для первичной настройки границ в условии  $s_\alpha$  использован ансамбль ТЭП с  $D = 50\%$ . Настройка пороговых значений выполнялась независимо для элементов  $[R_0]_\alpha$  и  $[IQR_0]_\alpha, [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha$  и  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha$  последовательным увеличением порогового значения до достижения  $\alpha = 0,05$ . Начальные значения всех пороговых значений равны 0.

**Шаг 2.** Первичная настройка пороговых значений для  $s_\beta$ . Граница статуса НЕДОСТОВЕРНЫЙ должна отделить состояние «исправный ТЭП» от состояния «неисправный ТЭП» (Рисунок 3.14), следовательно, для настройки пороговых значений  $[R_0]_\beta, [IQR_0]_\beta, [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta, [\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta$  используем ансамбль с максимальным количеством измерений от «исправных ТЭП». В данной работе для первичной настройки границ в условии  $s_\beta$  использован ансамбль ТЭП с  $D = 0\%$ . Настройка

пороговых значений выполнялась независимо для элементов  $[R_0]_\beta$  и  $[IQR_0]_\beta$ ,  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta$  и  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta$  последовательным увеличением порогового значения до достижения  $\beta = 0,05$ . Начальные значения всех пороговых значений равны пороговым значениям для условия  $s_\alpha$ , рассчитанным на шаге 1.

**Шаг 3.** Подстройка пороговых значения для полного условия  $s_\alpha$  и  $s_\beta$ . При подстройке, найденные на шагах 1 и 2 пороговые значения используются совместно в соответствии с соотношениями (3.43) и (3.44). Подстройка пороговых значений для  $s_\alpha$  осуществляется исходя из задачи максимизации числа измерений «исправных ТЭП» в статусе ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ при сохранении  $\alpha \leq 0,05$ . Подстройка пороговых значений для  $s_\beta$  осуществляется исходя из максимизации числа измерений «неисправных ТЭП» в статусе НЕДОСТОВЕРНЫЙ при сохранении  $\beta \leq 0,05$ . Для подстройки пороговых значений использован сбалансированный ансамбль синтетических данных, в котором число измерений «исправных ТЭП»  $\approx$  «нормальных ТЭП»  $\approx$  «неисправных ТЭП».

Подстройка выполнялась путем варьирования пороговых значений в условии  $s_\alpha$  (или  $s_\beta$ ) в соответствии со следующим алгоритмом:

- 1) варьирование каждого из пороговых значений в одинаковом относительном диапазоне изменения, например, до + 10%;
- 2) выбор порогового значения, обеспечивающего максимальное изменение целевого параметра (увеличение числа измерений «исправных ТЭП» в статусе ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ или увеличении числа измерений «неисправных ТЭП» в статусе НЕДОСТОВЕРНЫЙ) при сохранении  $\alpha \leq 0,05$  или  $\beta \leq 0,05$  соответственно;
- 3) установка нового порогового значения из полученного набора вариаций, обеспечивающего лучшее значение на предыдущем шаге;
- 4) повтор алгоритма подстройки до достижения минимального приращения целевого параметра, когда минимальная вариация порогового значения нарушает условие  $\alpha \leq 0,05$  или  $\beta \leq 0,05$ .

Проиллюстрируем выполнение описанных шагов настройки пороговых значений для ТЭП ХАНН. Определим приращение каждого из пороговых значений  $\Delta([R_0]), \Delta([IQR_0]), \Delta([\varepsilon_{\text{НихрХ}}]), \Delta([\varepsilon_{\text{НисА}}])$  как 1/100 от максимального значения соответствующего элемента вектора диагностических признаков в ансамбле  $D = 0\%$  при максимальной температуре процесса  $T = 1000^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned}\Delta([R_0]) &= 0,015, \Delta([IQR_0]) = 0,012, \\ \Delta([\varepsilon_{\text{НихрХ}}]) &= 0,001, \Delta([\varepsilon_{\text{НисА}}]) = 0,002.\end{aligned}$$

Выполнение шага 1 настройки пороговых значений проводилось для ансамбля синтетических данных объемом  $Q = 1000$  ТЭП при  $D_t = 50\%$ . Настройка выполнена следующим образом:

- увеличиваем пороговые значения  $[R_0]_\alpha$  и  $[IQR_0]_\alpha$  на заданную величину приращения;

- рассчитываем по соответствующей части условия (3.43) значение  $s_{\alpha 1}$  для каждого измерения

$$s_{\alpha 1} = (R_0 < [R_0]_\alpha) \text{ И } (IQR_0 < [IQR_0]_\alpha), \quad (3.46)$$

где значение  $s_{\alpha 1} = 1$  определяет статус ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ для данного измерения,  $s_{\alpha 1} = 0$  – статус, отличный от статуса ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ.

- для всех измерений, попавших в статус ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, рассчитываем значение  $\alpha$  по формуле (3.41), проверяем условие  $\alpha \leq 0,05$ .

Данную процедуру повторяем, увеличивая пороговые значения  $[R_0]_\alpha$  и  $[IQR_0]_\alpha$ , и рассчитывая новое значение  $\alpha$ . Изменение  $\alpha$  с ростом  $[R_0]_\alpha$  и  $[IQR_0]_\alpha$  показано на рисунке Рисунок 3.15 слева.

Аналогично рассчитывается условие статуса ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ  $s_{\alpha 2}$  при изменении пороговых значений  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha$  и  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha$

$$s_{\alpha 2} = \left( \varepsilon_{\text{НихрХ}} < [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha \right) \text{ ИЛИ } \left( \varepsilon_{\text{НисА}} < [\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha \right) \quad (3.47)$$

Изменение  $\alpha$  с ростом  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha$  и  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha$  показано на рисунке 3.15 справа, расчет  $\alpha$  также выполнялся по формуле (3.41).

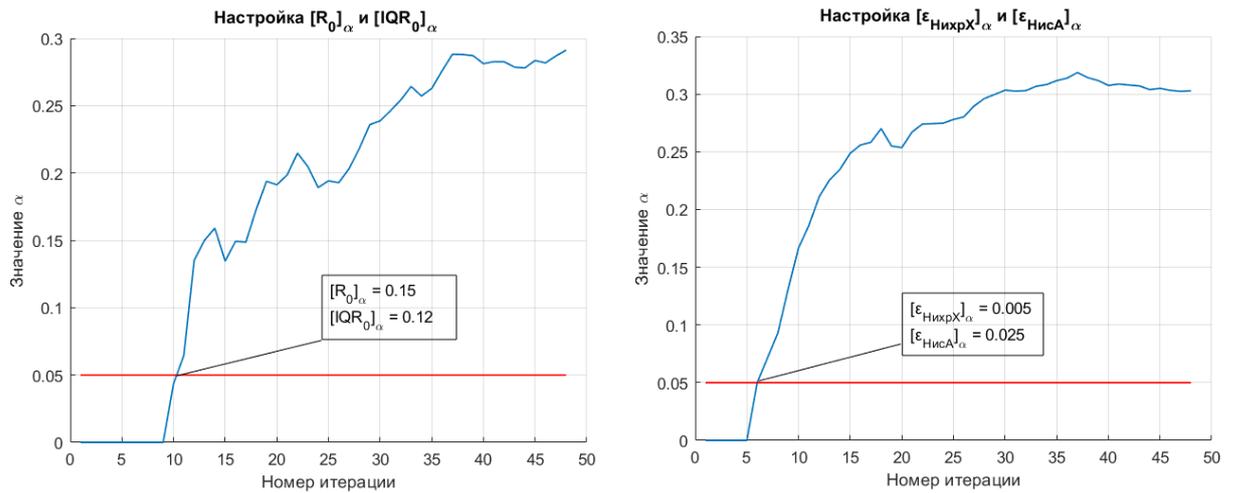


Рисунок 3.15 – Изменение параметра  $\alpha$  при первичной настройке пороговых значений  $[R_0]_\alpha$  и  $[IQR_0]_\alpha$  (слева),  $[\epsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha$  и  $[\epsilon_{\text{НисА}}]_\alpha$  (справа)

Полученные пороговые значения  $[R_0]_\alpha$ ,  $[IQR_0]_\alpha$ ,  $[\epsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha$ ,  $[\epsilon_{\text{НисА}}]_\alpha$  показаны на соответствующих графиках (Рисунок 3.15) при  $\alpha \leq 0,05$ . Отметим, что параметр  $\alpha$  при возрастании пороговых значений изменяется существенно нелинейно и немонотонно.

Выполнение шага 2 настройки пороговых значений проводилось для ансамбля синтетических данных объемом  $Q = 1000$  ТЭП при  $D_t = 0\%$ . Настройка выполнена аналогично шагу 1:

- увеличиваем пороговые значения  $[R_0]_\beta$  и  $[IQR_0]_\beta$  на заданную величину приращения;
- рассчитываем по соответствующей части условия (3.44) значение  $s_{\beta 1}$  для каждого измерения

$$s_{\beta 1} = (R_0 < [R_0]_\beta) \text{ или } (IQR_0 < [IQR_0]_\beta), \quad (3.48)$$

Значение  $s_{\beta 1} = 0$  определяет статус НЕДОСТОВЕРНЫЙ для данного измерения,  $s_{\beta 1} = 1$  – статус, отличный от статуса НЕДОСТОВЕРНЫЙ.

- для всех измерений, попавших в статус НЕДОСТОВЕРНЫЙ, рассчитываем значение  $\beta$  по формуле (3.42).

После этого повторяем шаг, увеличивая пороговые значения  $[R_0]_\beta$  и  $[IQR_0]_\beta$ , определяем измерения со статусом НЕДОСТОВЕРНЫЙ по (3.48) и рассчитываем

новое значение  $\beta$ . Изменение  $\beta$  с ростом  $[R_0]_\beta$  и  $[IQR_0]_\beta$  показано на рисунке 3.16 слева.

Аналогично рассчитывается условие статуса НЕДОСТОВЕРНЫЙ  $s_{\beta 2}$  при изменении пороговых значений  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta$  и  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta$

$$s_{\beta 2} = (\varepsilon_{\text{НихрХ}} < [\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta) \text{ И } (\varepsilon_{\text{НисА}} < [\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta) \quad (3.49)$$

Изменение  $\beta$  с ростом  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta$  и  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta$  показано на рисунке 3.16 справа, расчет  $\beta$  также выполнялся по формуле (3.42).

Полученные пороговые значения  $[R_0]_\beta$ ,  $[IQR_0]_\beta$ ,  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta$ ,  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta$  показаны на соответствующих графиках (Рисунок 3.16) при  $\beta \leq 0,05$ . Отметим, что параметр  $\beta$  при возрастании пороговых значений также изменяется нелинейно и немонотонно.

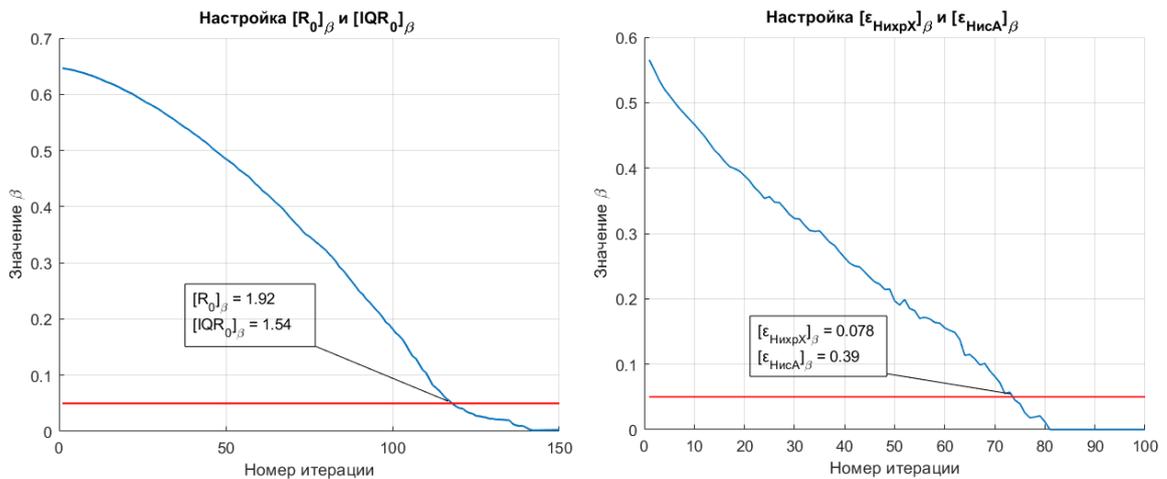


Рисунок 3.16 – Изменение параметра  $\beta$  при первичной настройке пороговых значений  $[R_0]_\beta$  и  $[IQR_0]_\beta$  (слева),  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta$  и  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta$  (справа)

Выполнение шага 3 настройки пороговых значений основано на сбалансированном «исправных ТЭП»  $\approx$  «нормальных ТЭП»  $\approx$  «неисправных ТЭП». Полученный ансамбль размером  $Q = 230$  ТЭП имеет долю элементов вектора за пределом допуска  $D = 38\%$ .

Как показано выше, изменение значения  $\alpha$  и  $\beta$  имеет существенно немонотонный характер, что затрудняет поиск наилучшего сочетания пороговых значений и алгоритмизацию данной процедуры. В связи с этим, реализация алгоритма подстройки выполнена в автоматизированном режиме с ручным выбором порогового значения, оказывающего максимальное изменение целевого параметра при вариации. Несколько шагов подстройки пороговых значений для условия  $s_\alpha$  представлены в таблице 3.11, где  $N_1$  – число измерений «исправных ТЭП» в статусе ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ (формула (3.41)). Аналогично для условия  $s_\beta$  результаты подстройки представлены в таблице 3.12, где  $M_3$  – число измерений «неисправных ТЭП» в статусе НЕДОСТОВЕРНЫЙ (формула (3.42)).

Таблица 3.11 – Подстройка пороговых значений условия  $s_\alpha$ , ТЭП ХАНН

Номер итерации	$[R_0]_\alpha$	$[IQR_0]_\alpha$	$[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha$	$[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha$	$N_1$	$\alpha$
0	0,15	0,12	0,005	0,025	0	0
1	0,425	0,395	0,0325	0,03	53	0,051
2	0,425	0,395	0,0325	0,034	67	0,046
3	0,425	0,395	0,03	0,034	72	0,0327
...	...	...	...	...	...	...
6	0,425	0,395	0,0325	0,033	255	0,05

Запуск подстройки пороговых значений для условия  $s_\alpha$  осуществляется с значений, полученных на шаге 1 настройки (значения на итерации 0 в таблице 3.11). Применение полученных пороговых значений в условии (3.43) для сбалансированного ансамбля  $D = 38\%$  показывает, что в статус ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ не попадает ни одно измерение ( $N_1 = 0, \alpha = 0$ ). Переход к итерации 1 осуществлен совместной вариацией всех пороговых значений, а дальше варьировалось значение, отмеченное зеленым цветом в каждой итерации (итерация 1 –  $[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\alpha$ , итерация 2 –  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\alpha$  и т. д.). В итоге, за 6 итераций алгоритма получены пороговые значения, обеспечивающие наилучший результат с точки зрения максимизации  $N_1$  при  $\alpha \leq 0,05$ .

Таблица 3.12 – Подстройка пороговых значений условия  $s_\beta$ , ТЭП ХАНН

Номер итерации	$[R_0]_\beta$	$[IQR_0]_\beta$	$[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta$	$[\varepsilon_{\text{НисА}}]_\beta$	$M_3$	$\beta$
0	1,92	1,54	0,078	0,039	406	0,15
1	1,92	1,54	0,1275	0,039	322	0,10
2	1,775	1,54	0,1275	0,039	343	0,09
3	1,775	1,54	0,1275	0,067	307	0,07
...	...	...	...	...	...	...
5	1,78	1,54	0,1275	0,067	314	0,05

Подстройка пороговых значений для условия  $s_\beta$  выполнена с значений, полученных на шаге 2 настройки (значения на итерации 0 в таблице 3.12). Применение полученных пороговых значений в условии (3.44) для сбалансированного ансамбля  $D = 38\%$  показывает, что в статус НЕДОСТОВЕРНЫЙ попадает большое количество измерений от «исправных ТЭП» ( $\beta = 0,15$ ). Расчет вариаций показал, что наибольшее изменение оказывает вариация порога  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta$ , соответственно итерация 1 получена из итерации 0 изменением  $[\varepsilon_{\text{НихрХ}}]_\beta$ . Отметим, что при этом уменьшается как значение  $\beta$ , так и значение  $M_3$ , что указывает на связь этих параметров в связи с ограниченной чувствительностью метода оценки статусов результата измерения. В результате, за 5 итераций алгоритма получены пороговые значения, обеспечивающие наилучший результат с точки зрения максимизации  $M_3$  при  $\beta \leq 0,05$ .

Итоговое распределение измерений сбалансированного ансамбля синтетических ТЭП ( $D = 38\%$ ) по статусам представлено на рисунке 3.17. Рассчитанные пороговые значения позволяют разделить полученные измерения от ТЭП с различным метрологическим состоянием по 3 статусам ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ. Заданные условия  $\alpha \leq 0,05$  (доля измерений от «неисправных ТЭП» в статусе ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ) и  $\beta \leq 0,05$  (доля измерений от «исправных ТЭП» в статусе НЕДОСТОВЕРНЫЙ) выполнены.

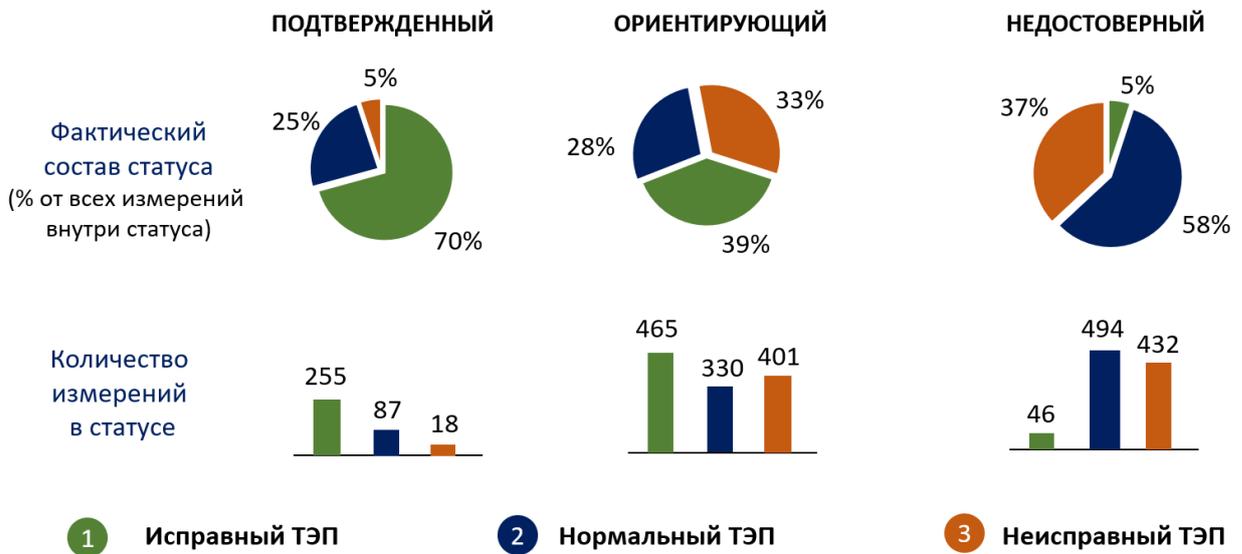


Рисунок 3.17 – Работа алгоритма оценки статуса на смешанном ансамбле синтетических данных после настройки для ТЭП ХАНН

### 3.6 Оценка эффективности алгоритма обработки информации четырехэлектродного ТЭП на синтетических данных

Рассмотренный подход к обработке информации в новой измерительной схеме четырехэлектродного ТЭП (Рисунок 3.1) позволяет получить результат измерения температуры и качественно оценить достоверность результата измерений на основе введенных статусов ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ. Обобщим приведенные выше рассуждения для рассматриваемых ТЭП ХАНН, ХКЖК, ХАХК в виде алгоритма, представленного на рисунке 3.18. Алгоритм включает четыре последовательных шага обработки вектора ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$ , получаемого в каждой температурной точке  $T$ .

**Шаг 1.** В зависимости от чувствительности измеренных ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$  формируется векторы  $\vec{T}_{\text{выч}}$  и  $\vec{E}_{\text{выч}}$ . Вектор  $\vec{T}_{\text{выч}}$  включает температуры, вычисленные по высокочувствительным ТЭДС из вектора  $\vec{E}_{ij}$  с использованием стандартных или индивидуальных обратных функций. Вектор  $\vec{E}_{\text{выч}}$  включает низкочувствительные ТЭДС из вектора  $\vec{E}_{ij}$ . Формирование векторов  $\vec{T}_{\text{выч}}$  и  $\vec{E}_{\text{выч}}$  подробно описано в разделе 3.2.

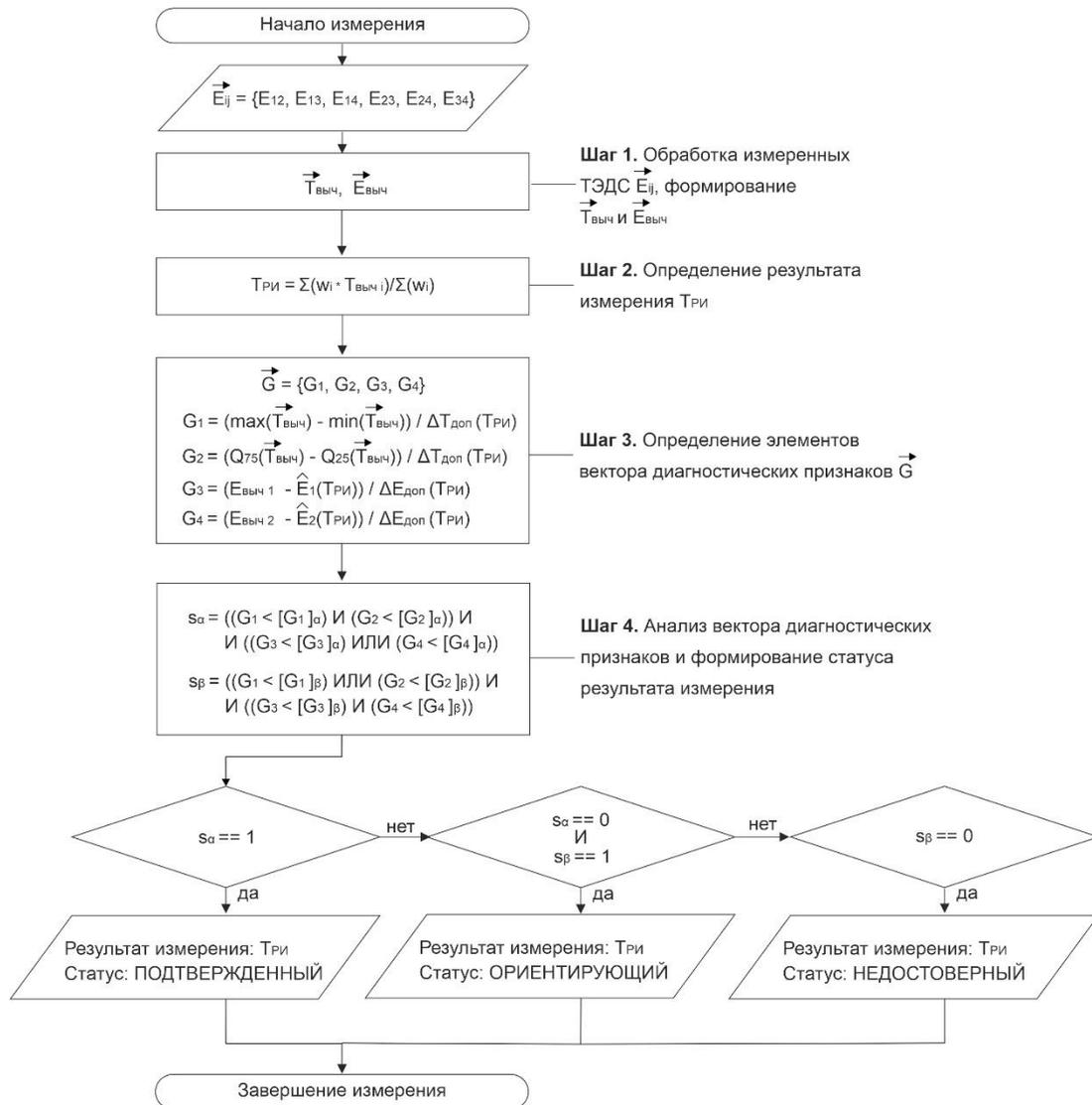


Рисунок 3.18 – Алгоритм обработки информации для оценки статуса результата измерения четырехэлектродного ТЭП

**Шаг 2.** Определение результата измерения  $T_{\text{ри}}$  на основе взвешенного среднего элементов вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  по формуле (3.19). При вычислении  $T_{\text{ри}}$  для стандартных термоэлектродных пар используются веса  $w_i = 1$ , а для дополнительных термоэлектродных пар –  $w_i = 0,5$ , как показано в разделе 3.3.

**Шаг 3.** Формирование вектора диагностических признаков  $\vec{G}$ . Элементы вектора диагностических признаков  $G_1$  и  $G_2$  определяются на основе вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$  и представляют собой нормированные размах ( $R_0$  в соответствии с формулой (3.25)) и межквартильное расстояние ( $IQR_0$  в соответствии с формулой (3.26)) вектора  $\vec{T}_{\text{выч}}$ . Элементы  $G_3$  и  $G_4$  определяются на основе вектора

$\vec{E}_{\text{выч}}$  и представляют собой относительную невязку между значением соответствующей низкочувствительной ТЭДС и оценкой этой ТЭДС на основе результата измерения  $T_{\text{РИ}}$ . В случае ТЭП ХАНН и ХКЖК вектор  $\vec{E}_{\text{выч}}$  включает два значения ТЭДС  $\vec{E}_{\text{выч}} = \{E_{\text{выч } 1}, E_{\text{выч } 2}\}$ , которые используются для вычисления невязки со своими оценками  $\hat{E}_1$  и  $\hat{E}_2$  (вычисляются аналогично соотношению (3.30)). В случае ТЭП ХАХК вектор  $\vec{E}_{\text{выч}}$  включает только одно значение ТЭДС, которое используется для вычисления элемента  $G_3$ , при этом  $G_4 = 0$ . Подробный анализ формирования элементов вектора  $\vec{G}$  рассмотрен в разделе 3.4.

**Шаг 4.** Анализ вектора диагностических признаков и формирование статуса результата измерения. Для формирования статуса результата измерения вычисляются две логические переменные  $s_\alpha$  и  $s_\beta$  согласно (3.43) и (3.44) на основе элементов вектора диагностических признаков  $G_1 \dots G_4$ . Пороговые значения  $[G_1]_\alpha \dots [G_4]_\alpha$  для  $s_\alpha$  и  $[G_1]_\beta \dots [G_4]_\beta$  для  $s_\beta$  вычисляются с использованием синтетических данных на этапе настройки метода определения статусов, который подробно описан в разделе 3.5.

В результате работы алгоритма, на основе значений  $s_\alpha$  и  $s_\beta$  (соотношение (3.45)) результату измерения присваивается статус ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ. Для проверки эффективности алгоритма оценки статусов используем следующие ансамбли синтетических данных:

1) ансамбль с измерениями только от «исправных ТЭП» ( $D_t = 0\%$ ), который формируется напрямую по имитационной модели ТЭП (раздел 2.4);

2) ансамбль с измерениями только от «неисправных ТЭП» ( $D_t = 100\%$ ), который получен из ансамбля  $D_t = 50\%$  принудительным отбором из ансамбля «неисправных ТЭП» ( $\Delta T_{\text{РИ}} \geq \Delta T_{\text{доп}}$ );

3) ансамбль, характеризующий постепенную деградацию ТЭП, получаемый как смесь ансамблей с количеством измерений за пределом допуска  $D_t = 0\%, 10\%, \dots, 50\%$ .

Проверка алгоритма оценки статусов на ансамблях  $D_t = 0\%$  и  $D_t = 100\%$  позволит оценить точность алгоритма в крайних возможных состояниях ТЭП. Объем каждого ансамбля при исследовании составил  $Q = 500$  ТЭП. Результаты работы алгоритма для ТЭП ХАНН, ХКЖК и ХАХК представлены в таблицах 3.13 – **Ошибка! Источник ссылки не найден.** соответственно.

Для ТЭП ХАНН моделирование проводилось в рабочем диапазоне температур  $0 \dots 1000^\circ\text{C}$  с шагом  $100^\circ\text{C}$ , соответственно для каждого ТЭП в ансамбле представлено 11 измерений. Всего ансамбли  $D_t = 0\%$  и  $D_t = 100\%$  включают 5500 измерений каждый. Результаты в таблице 3.13 показывают, что алгоритм оценки статусов обеспечивает попадание измерений от «исправных ТЭП» только в статусы ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ и ОРИЕНТИРУЮЩИЙ, а измерений от «неисправных ТЭП» – в статус ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ.

Таблица 3.13 – Результаты работы алгоритма для ТЭП ХАНН

	ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ	ОРИЕНТИРУЮЩИЙ	НЕДОСТОВЕРНЫЙ
$D_t = 0\%$	4230	1270	0
$D_t = 100\%$	0	426	5074

Проверка работы алгоритма оценки статусов результата измерения на смешанном ансамбле синтетических данных ( $D_t = 0\% \dots 50\%$ ) позволит оценить работоспособность алгоритма при непрерывной эксплуатации ТЭП от номинального до предаварийного состояния. Оценим, как распределяться результаты измерений в ансамбле таких ТЭП, объем каждого ансамбля в смеси 100 ТЭП, всего  $Q = 600$  ТЭП в смешанном ансамбле синтетических данных.

Результаты проверки алгоритма оценки статусов на смешанном ансамбле для ТЭП ХАНН представлены на рисунке 3.19 и показывают, что доля измерений от неисправных ТЭП статусе подтвержденный  $\alpha < 1\%$ , а доля измерений от исправных ТЭП в статусе недостоверны  $\beta < 5\%$ . Таким образом, полученный состав статусов результата измерений для смешанного ансамбля ТЭП соответствует требованиям по  $\alpha$  (формула (3.41)) и  $\beta$  (формула (3.42)), введенным

при формировании статусов ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ.



Рисунок 3.19 – Результаты алгоритма оценки статуса результата измерения на смешанном ансамбле синтетических данных для ТЭП ХАНН

Таким образом, разработанный метод оценки статуса результата измерения на основе двух логических условий  $S_\alpha$  и  $S_\beta$ , а также процедура настройки пороговых значений в этих условиях, позволяют определить достоверность результата измерения ТЭП. Предложенный метод оценки статусов обеспечивает заданную вероятность  $\alpha$  недостоверных измерений для статуса ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ и заданную вероятность  $\beta$  ложных срабатываний для статуса НЕДОСТОВЕРНЫЙ. Проверка на различных ансамблях синтетических данных подтвердила работоспособность алгоритма оценки статуса результата измерения для рассматриваемого ТЭП ХАНН.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Предложена последовательность шагов по обработке информации, получаемой от четырехэлектродного ТЭП, в каждой температурной точке  $T$ , включая предварительную обработку, формирование результата измерений ТЭП, извлечение вектора диагностических признаков и оценку статуса результата измерения.

2. Разработана процедура предварительной обработки информации на основе анализа свойств материалов в составе конкретного ТЭП, которая позволяет по измеренному вектору ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$  выделить высокочувствительные и низкочувствительные к температуре ТЭДС. На основе высокочувствительных ТЭДС рассчитывается вектор температур  $\vec{T}_{\text{выч}}$ , низкочувствительные ТЭДС объединяются в вектор  $\vec{E}_{\text{выч}}$ .

3. Предложен метод вычисления результата измерения ТЭП  $T_{\text{РИ}}$  на основе взвешенной суммы элементов вектора температур  $\vec{T}_{\text{выч}}$ . На трех синтетических ансамблях ТЭП с различной степенью деградации термоэлектрического преобразователя ( $D = 0\%, D = 10\%, D = 50\%$ ) показано, что предложенный способ определения результата измерения ТЭП в среднем на 5 – 25% уменьшает количество измерений ТЭП за пределом допуска по сравнению со стандартными термоэлектрическими преобразователями в составе четырехэлектродного ТЭП.

4. Разработан метод формирования вектора диагностических признаков  $\vec{G}$  на основе анализа свойств предложенной измерительной схемы четырехэлектродного ТЭП. Выделены две группы диагностических признаков ТЭП: статистические параметры разброса вектора температур  $\vec{T}_{\text{выч}}$  (размах и межквартильное расстояние) и невязка ТЭДС вектора  $\vec{E}_{\text{выч}}$ . Продемонстрировано изменение выявленных диагностических признаков в среднем в 1,5 – 5 раз при отклонении фактических статических характеристик термоэлектродов ТЭП от номинальных характеристик.

5. Предложена методика оценки статуса результата измерения ТЭП и критерий назначения статусов ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и

НЕДОСТОВЕРНЫЙ для каждого измерения температуры четырехэлектродным ТЭП. В процессе эксплуатации ТЭП происходит изменение метрологических свойств термоэлектродов, которые описываются в виде состояний «исправный ТЭП», «нормальный ТЭП» и «неисправный ТЭП». На основе получаемого вектора диагностических признаков введены правила назначения статусов с использованием логических условий  $s_\alpha$  и  $s_\beta$ . Настройка пороговых значений в каждом логическом условии выполнена на основе ансамблей синтетических данных  $D = 0\%$  и  $D = 50\%$ , подстройка выполнена на ансамбле синтетических данных, в котором число измерений «исправных ТЭП»  $\approx$  «нормальных ТЭП»  $\approx$  «неисправных ТЭП».

Проверка разработанного алгоритма обработки информации выполнялась на ансамблях синтетических данных  $D = 0\%$  (измерения только от «исправных ТЭП»),  $D = 100\%$  (измерения только от «неисправных ТЭП»), и ансамбле синтетических данных с произвольным состоянием ТЭП, включающем смесь ансамблей с  $D = 0, 10, 20, 30, 40, 50\%$ . Результаты проверки алгоритма для каждого из исследуемых ТЭП ХАНН, ХКЖК и ХАХК подтверждают эффективность оценки статусов результата измерения как для крайних метрологических состояний ТЭП, так и для произвольного состояния ТЭП в процессе эксплуатации.

## 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МОДЕЛИ И МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНОГО ТЭП

### 4.1 Планирование эксперимента

Данное исследование рассматривает новую измерительную схему ТЭП из четырех термоэлектродов с общим спаем. Применение термоэлектродов из разных термопарных материалов обеспечивает различную чувствительность термоэлектродов к влияющим факторам, вызывающим деградацию термоэлектрических свойств материалов. Различное отклонение фактических статических характеристик (ФСХ) отдельных термоэлектродов ТЭП от своих номинальных статических характеристик (НСХ) заложено в имитационную модель четырехэлектродного ТЭП (глава 2) и в алгоритмы обработки информации (глава 3). Натурный эксперимент с четырехэлектродными ТЭП позволит проверить это базовое предположение, и выполнить оценку адекватности предложенной имитационной модели и эффективности разработанных алгоритмов обработки информации.

Согласно теории планирования эксперимента [95,96], сформированы следующие гипотезы для проверки на основе экспериментальных данных.

**Гипотеза 1.** Экспериментальные значения индивидуальных ТЭДС отдельных термоэлектродов изменяются в различной степени под воздействием влияющих факторов и могут быть представлены при помощи имитационной модели для описания ФСХ каждого термоэлектрода.

**Гипотеза 2.** Результат измерения температуры четырехэлектродного ТЭП  $T_{\text{ри}}$  имеет меньшее отклонение от фактической температуры  $T$  процесса по сравнению с результатами измерения стандартных термоэлектродных пар в составе ТЭП.

**Гипотеза 3.** Алгоритм оценки статусов результата измерений четырехэлектродного ТЭП обеспечивает корректное распределение различных метрологических состояний ТЭП («исправный ТЭП», «нормальный ТЭП»,

«неисправный ТЭП») по соответствующим статусам (ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ, НЕДОСТОВЕРНЫЙ).

Далее для каждой из гипотез в соответствии с методикой планирования эксперимента [95,96] рассмотрим объект исследования, порядок проведения эксперимента и методы обработки экспериментальных данных.

#### 4.2 Оценка адекватности имитационной модели ТЭП

Исследуемый объект – четырехэлектродный ТЭП для эксплуатации в среднетемпературном диапазоне. Для проверки адекватности имитационной модели исследовался термоэлектрический преобразователь хромель-алюмель-нихросил-нисил (ХАНН) в 5 температурных точках внутри рабочего диапазона:  $T_k = 300, 400, 600, 800, 1000^\circ\text{C}$ .

Согласно теории термоэлектричества [50], ТЭДС отдельных термоэлектродов может быть измерена относительно термоэлектрода сравнения, ТЭДС которого принимается равной нулю:  $e_{\text{эт}}(T) = 0$ . Схема подключения ТЭП для проверки гипотезы об адекватности имитационной модели представлена на рисунке 4.1, где к исследуемому четырехэлектродному ТЭП подключается платиновый термоэлектрод сравнения. Данный подход описан в справочниках [74,75], исследовательских работах [97], и широко распространен для исследования свойств отдельных термопарных материалов.

Задание температуры  $T$  в зоне горячего спая ТЭП осуществлялось с использованием трубчатой печи МТП-1200-4, которая позволяет задать температуру в диапазоне  $T = 100 \dots 1200^\circ\text{C}$  с шагом  $1^\circ\text{C}$  и имеет выходной интерфейс RS-232 для подключения к ПК. Для создания температуры  $T_{\text{хол}}$  в зоне холодного спая ТЭП и поддержания  $T_{\text{хол}} \approx 0$  использован нулевой термостат ТН-2М с смесью льда и воды.



Проверка гипотезы о возможности представления экспериментальных значений индивидуальных ТЭДС ТЭП с помощью имитационной модели требует получения значений вектора ТЭДС  $\{\vec{e}_{\text{эксп}}\}_k$ ,  $k = 1 \dots 5$  в соответствующих температурных точках  $T_k$  для ТЭП в различной степени деградации. Отклонение ФСХ отдельных термоэлектродов от НСХ возникает под влиянием различных воздействующих факторов технологического процесса. В работах [53,57,97] выделено три ключевых фактора для воспроизведения ускоренной деградации ТЭП в лабораторных условиях: воздействие повышенных температур, циклический нагрев и термоудары. Реализация любого из способов ускоренной деградации исследуемого ТЭП должна быть выполнена при следующих условиях:

- одинаковое положение исследуемого ТЭП в температурном градиенте печи при исследовании;
- исключение влияние воздействующего фактора на эталонное средство измерения температуры.

Схема размещения исследуемого ТЭП и эталонной термопары в печи представлена на рисунке 4.2. Исследуемый ТЭП и эталонная термопара расположены в индивидуальных керамических чехлах, которые фиксируются между собой жаропрочной проволокой. Таким образом обеспечивается возможность извлечения эталонного средства измерения при формировании воздействия на исследуемый ТЭП.

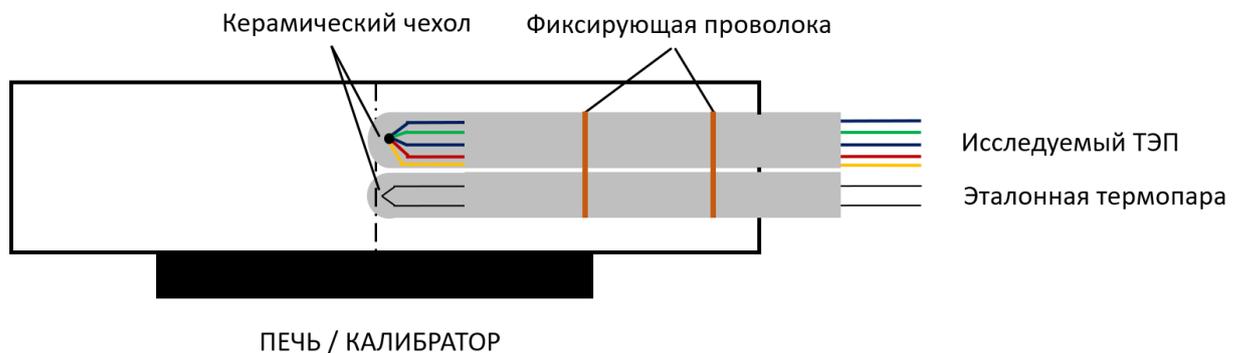


Рисунок 4.2 – Схема размещения эталонного и исследуемого ТЭП при испытаниях

В качестве основной воздействующей величины на ТЭП ХАНН выбран перегрев до 1100°C с выдержкой не менее 4 часов при этой температуре. Также, между каждым циклом старения проведен цикл нагрева и охлаждения ТЭП. В таблице 4.1 представлены параметры проведенных экспериментов и результаты визуальной оценки состояния термоэлектродов вблизи горячего спая.

Таблица 4.1 – Эксперименты по ускоренной деградации ТЭП ХАНН

Номер эксперимента	Число циклов старения	Визуальная оценка состояния термоэлектродов после испытаний
1	0 (новый ТЭП)	термоэлектроды без изменений
2	3	появление черного налета на всех термоэлектродах
3	5	1) появление зеленого и черного налета на термоэлектродах «нихросил» и «хромель»
4	8	2) появление черного налета и истончение термоэлектрода «алюмель» 3) термоэлектрод «нисил» ближе всего к исходному состоянию
5	10	частичное разрушение спая, потеря контакта термоэлектрода «нисил»

Оценка изменения полученных индивидуальных ТЭДС относительно НСХ выполнена следующим образом в каждой температурной точке

$$de_j(T_3) = \frac{e_{\text{эксп } j} - e_j(T_3)}{e_j(T_3)} * 100\% \quad (4.1)$$

где  $j = 1 \dots 4$  – номер индивидуальной ТЭДС;

$e_{\text{эксп } j}$  – экспериментальное значение  $j$ -ой индивидуальной ТЭДС в  $k$ -ой температурной точке;

$e_j(T_3)$  – номинальное значение  $j$ -ой индивидуальной ТЭДС, рассчитанное по эталонному значению температуры  $T_3$  с использованием НСХ термоэлектрода;

$de_j(T_3)$  – рассчитанное относительное отклонение измеренного значения от номинального значения для  $j$ -ой индивидуальной ТЭДС.

Результаты сравнения трех экспериментов, представленные на рисунке 4.3, показывают существенное изменение индивидуальных ТЭДС отдельных термоэлектродов под влиянием перегрева и термоциклирования ТЭП. Отметим,

что величина отклонения характеристик термоэлектродов зависит от температуры процесса и материала термоэлектрода. Например, при низкой температуре ( $T_k = 300^\circ\text{C}$ ) отклонение ТЭДС  $e_1$  возрастает на 4%, а термоэлектрода  $e_2$  – убывает на 2%, для ТЭП после 10 циклов деградации (эксперимент 5) относительно нового ТЭП (эксперимент 1). При высоких температурах ( $T_k = 1000^\circ\text{C}$ ), максимальное изменение демонстрирует ТЭДС  $e_4$ , которая возрастает на 2,5% для ТЭП после 10 циклов деградации (эксперимент 5) относительно НСХ.

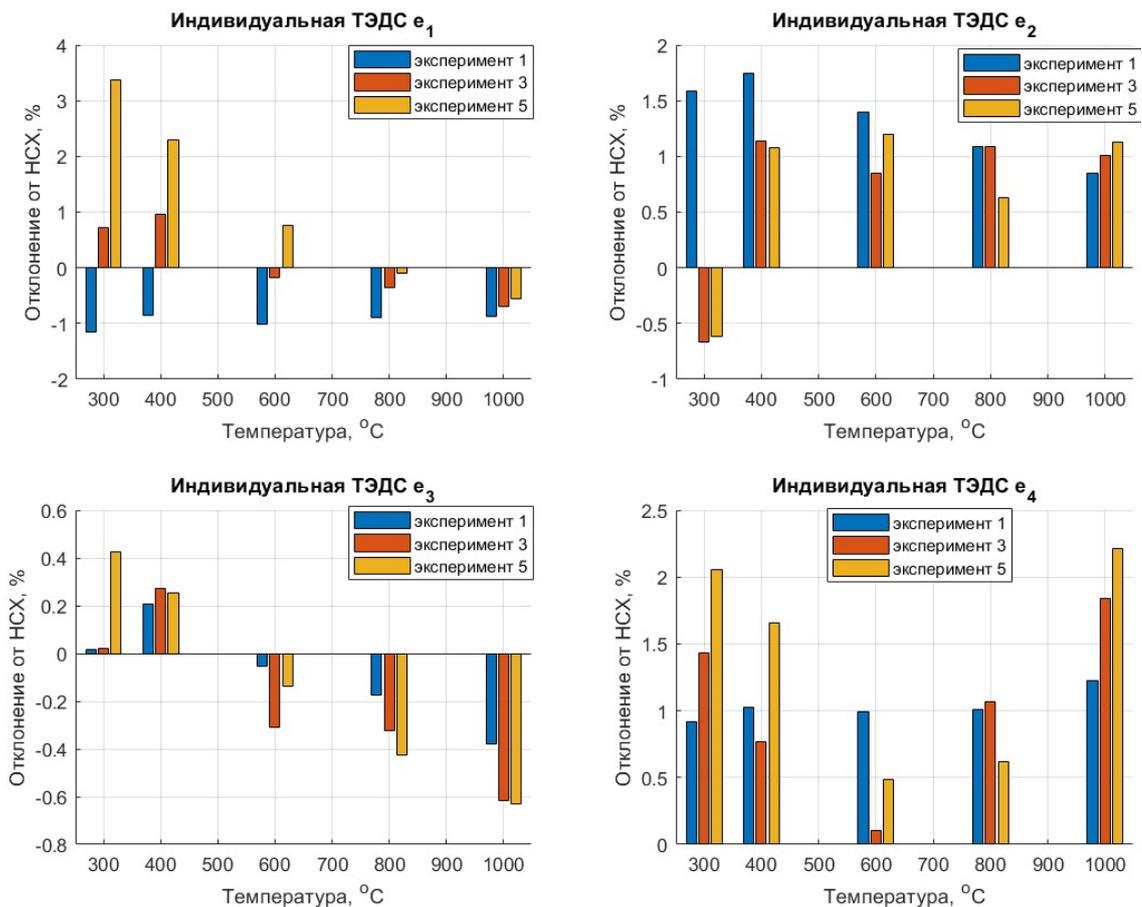


Рисунок 4.3 – Отклонение индивидуальных ТЭДС отдельных термоэлектродов ТЭП от номинальных значений, материалы термоэлектродов: 1 – нихросил, 2 – нисил, 3 – хромель, 4 – алюмель

В разделе 2.3 было доказано, что имитационная модель двухэлектродного ТЭП описывает такие варианты дрейфа ФСХ ТЭП, которые могут возникать в реальных экспериментальных данных. Модель позволяет рассчитать ТЭДС  $E_{\text{мод}}(T)$  на выходе синтетического двухэлектродного ТЭП согласно уравнению

(2.9). В свою очередь, валидация модели заключалась в сопоставлении экспериментальных ТЭДС двухэлектродного ТЭП  $E_{\text{эксп } k}$  в температурных точках  $T_k$  с синтетическими ТЭДС  $E_{\text{мод}}(T_k)$  посредством расчета параметра  $\xi$  по формуле (2.40) в каждой  $k$ -ой температурной точке.

Покажем, что аналогичным образом может быть проведена валидация для имитационной модели четырехэлектродного ТЭП. Измерительная схема четырехэлектродного ТЭП позволяет измерить вектор ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$  на выходе ТЭП, компоненты которого связаны между собой согласно системе (2.7) через индивидуальные ТЭДС отдельных термоэлектродов. Предложенная в разделе 2.4 имитационная модель четырехэлектродного ТЭП построена на моделировании ТЭДС отдельных термоэлектродов  $e_{\text{мод}}(T)$  четырехэлектродного ТЭП с использованием уравнения (2.54)

$$e_{\text{мод}}(T) = b_0^* + \dots + b_m^* T^m + \dots + b_M^* T^M + \sum_{i=M+1}^N b_i T^i + C(T), \quad (4.2)$$

где  $e_{\text{мод}}(T)$  – моделируемое значение индивидуальной ТЭДС в соответствующей температурной точке  $T$ ;

$b_0^* \dots b_M^*$  – коэффициенты при младших степенях полинома, моделирующие отклонения ФСХ термоэлектрода от НСХ,  $M$  – максимальное значение степени моделируемого коэффициента;

$b_{M+1} \dots b_N$  – коэффициенты при старших степенях полинома НСХ,  $N$  – максимальное значение степени НСХ термоэлектрода;

$C(T)$  – неполиномиальное слагаемое, соответствующие НСХ термоэлектрода.

Тогда, на выходе синтетического четырехэлектродного ТЭП формируется вектор ТЭДС  $\vec{E}_{ij \text{ мод}}$  компоненты которого определяются в соответствии с (2.55) на основе ТЭДС отдельных термоэлектродов  $e_{\text{мод}}(T)$

$$E_{ij \text{ мод}}(T) = e_{\text{мод } i}(T) - e_{\text{мод } j}(T), \quad (4.3)$$

где  $(i, j = \overline{1 \dots 4}, i \neq j)$  – номер термоэлектрода в составе четырехэлектродного ТЭП.

Проверка адекватности имитационной модели четырехэлектродного ТЭП построена на сравнении вектора ТЭДС на выходе исследуемого ТЭП  $\{\vec{E}_{ij \text{эксп}}\}$  и вектора ТЭДС для синтетического ТЭП  $\{\vec{E}_{ij \text{мод}}\}$ . Данный подход представляет собой обобщение алгоритма для двухэлектродного ТЭП, где сравнивались ТЭДС на выходе ТЭП. Алгоритм оценки адекватности модели состоит из 8 последовательных шагов, выполняемых для каждого эксперимента с ТЭП в соответствующих температурных точках  $T_k = 300, 400, 600, 800, 1000^\circ\text{C}$ .

**Шаг 1.** Получить набор измерений вектора индивидуальных ТЭДС  $\{\vec{e}_{\text{эксп}}\}$  для соответствующих температурных точек  $T_k$ ;

**Шаг 2.** Вычислить вектор ТЭДС  $\{\vec{E}_{ij \text{эксп}}\}$  в соответствии с системой (2.7) на основе измеренных индивидуальных ТЭДС  $\{\vec{e}_{\text{эксп}}\}$ . Для каждого значения вектора  $\vec{E}_{ij \text{эксп}}$  рассчитать вектор температур  $\vec{T}_{\text{эксп}}$  согласно выражению (3.7) с использованием соответствующих обратных функций.

**Шаг 3.** Определить отклонение каждой компоненты полученного вектора  $\vec{T}_{\text{эксп}}$  от эталонной температуры следующим образом в соответствующей  $k$ -ой температурной точке

$$\Delta T_{\text{эксп } j} = T_{\text{эксп } j} - T_э \quad (4.4)$$

где  $j = 1 \dots 4$  – номер элемента в векторе  $\vec{T}_{\text{эксп}}$ ;

$T_э$  – эталонное значение температуры. В результате формируется вектор отклонения экспериментальных значений  $\Delta \vec{T}_{\text{эксп}}$ .

**Шаг 4.** Вычислить коэффициенты синтетической ФСХ для каждого термоэлектрода с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта аналогично расчету, описанному в разделе 2.3 для ТЭДС двухэлектродного ТЭП. Для каждого термоэлектрода определяется свой набор коэффициентов  $b_0^* \dots b_3^*$ , характеризующих индивидуальную ФСХ термоэлектрода. Далее, по полученной ФСХ для каждого термоэлектрода необходимо вычислить индивидуальную ТЭДС в соответствии с формулой (4.2) и сформировать набор векторов синтетических индивидуальных ТЭДС  $\{\vec{e}_{\text{мод}}\}$  для соответствующих температурных точек  $T_k$ .

**Шаг 5.** Вычислить вектор ТЭДС  $\{\vec{E}_{ij \text{ мод}}\}$  в соответствии с формулой (4.3). Для каждого значения  $\vec{E}_{ij \text{ мод}}$  рассчитать вектор температур  $\vec{T}_{\text{мод}}$  согласно выражению (3.7) с использованием соответствующих обратных функций.

**Шаг 6.** Определить отклонение каждой компоненты полученного вектора  $\vec{T}_{\text{мод}}$  от эталонной температуры в соответствующей  $k$ -ой температурной точке

$$\Delta T_{\text{мод } j} = T_{\text{мод } j} - T_{\text{э}} \quad (4.5)$$

где  $j = 1 \dots 4$  – номер элемента в векторе  $\vec{T}_{\text{мод}}$ ;

$T_{\text{э}}$  – эталонное значение температуры. В результате формируется вектор отклонения синтетических значений  $\Delta \vec{T}_{\text{мод}}$ .

**Шаг 7.** Найти рассогласование  $\vec{\xi}$  между соответствующими компонентами векторов  $\Delta \vec{T}_{\text{эксп}}$  и  $\Delta \vec{T}_{\text{мод}}$  в каждой температурной точке

$$\xi_j = |\Delta T_{\text{эксп } j} - \Delta T_{\text{мод } j}|, j = 1 \dots 4 \quad (4.6)$$

**Шаг 8.** Проверить выполнение неравенства

$$\max(\vec{\xi}) < \xi_{\text{доп}}(T_{\text{э}}) \quad (4.7)$$

где  $\xi_{\text{доп}}(T_{\text{э}})$  – максимально допустимое рассогласование между соответствующими компонентами векторов  $\Delta \vec{T}_{\text{эксп}}$  и  $\Delta \vec{T}_{\text{мод}}$  в  $k$ -ой температурной точке. Для четырехэлектродного ТЭП принято аналогичное значение параметра  $\xi_{\text{доп}}(T)$ , как и для двухэлектродного ТЭП в выражении (2.42)

$$\xi_{\text{доп}}(T) = 0,5 \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T) \quad (4.8)$$

где  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)$  – функция допустимого отклонения для исследуемого четырехэлектродного ТЭП ХАНН.

Сопоставим полученные отклонения вектора измеряемых температур от фактической температуры процесса в экспериментальных и синтетических данных  $\Delta \vec{T}_{\text{эксп}}$  и  $\Delta \vec{T}_{\text{мод}}$  соответственно. Результаты расчета на рисунке 4.4 демонстрируют изменение максимального значения отклонения вектора  $\Delta \vec{T}_{\text{эксп}}$  с увеличением количеством циклов старения (эксперимент 1 – 5). В том числе, при температурах 300°C, 400°C и 600°C максимальное значение отклонения существенно возрастает

и выходит за пределы допуска  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)$  после 10 циклов деградации (эксперимент 3 и 5). При этом имитационная модель позволяет экспериментальные данные как в пределах допустимых отклонений, так и за пределами допуска – различие между модельными (линия) и экспериментальными (маркер) значениями на рисунке 4.4 незначительны.

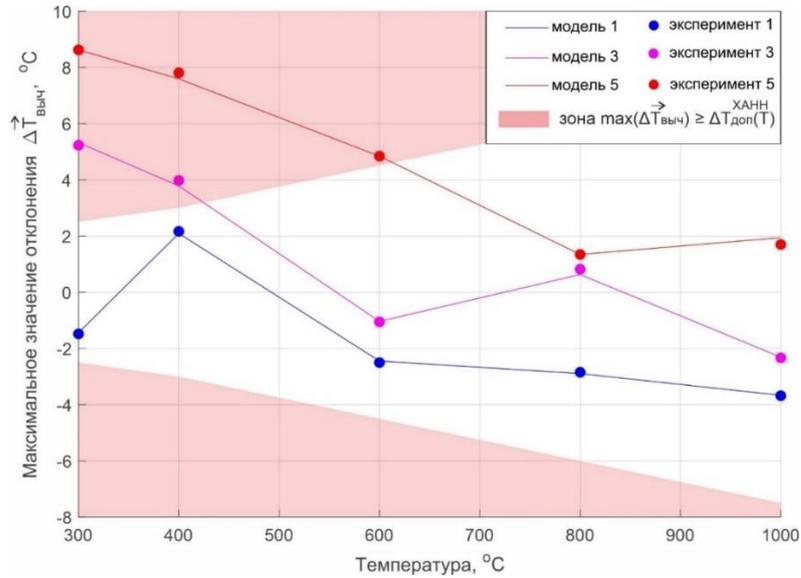


Рисунок 4.4 – Отклонение индивидуальных ТЭДС отдельных термоэлектродов

Также оценим рассогласование между экспериментальными и синтетическими данными на основе параметра  $\vec{\xi}$  согласно (4.6). Рассогласование  $\vec{\xi}$  вычислено для каждой точки измерения в полученном экспериментальном наборе данных, всего получено 25 измерений. На рисунке 4.5 по оси X представлено распределение максимального значения вектора  $\vec{\xi}$  в каждой точке относительно соответствующего значения допуска ( $\max(\vec{\xi}) / \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_3)$ ) по интервалам  $[0 \dots 0.05] \dots [0.25 \dots 0.3]$ . По оси Y слева фиксируется количество измерений в полученном ансамбле экспериментальных данных, попавших в соответствующий интервал. По оси Y справа фиксируется доля измерений в ансамбле, для которых относительное значение  $\max(\vec{\xi}) / \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_3)$  меньше правой границы соответствующего интервала. Например, для отмеченного маркера, доля измерений с относительным значением  $\max(\vec{\xi}) / \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_3) \leq 0.15$  составляет 0.96 от всех измерений.

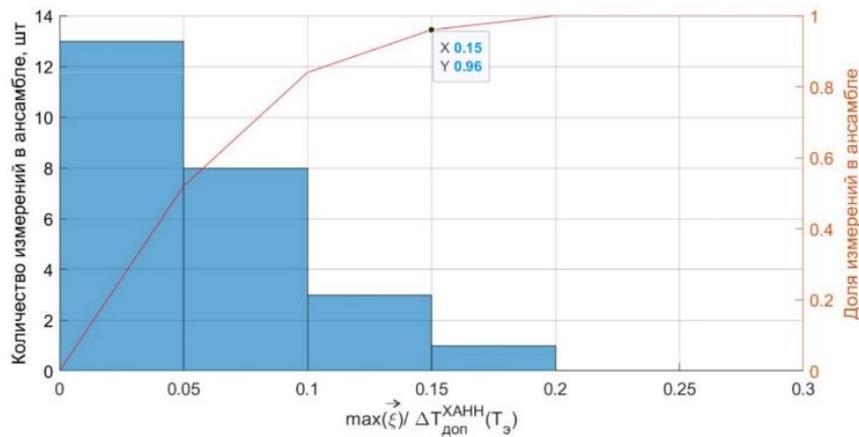


Рисунок 4.5 – Распределение максимального рассогласования между экспериментальными и синтетическими ТЭП для ансамбля ТЭП ХАНН

Результаты оценки адекватности имитационной модели демонстрируют, что максимальное рассогласование между синтетическими и экспериментальными данными составляет не более  $\max(\vec{\xi}) \leq 0,2\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_3)$ . Таким образом, предложенная имитационная модель четырехэлектродного ТЭП способна представлять экспериментальные значения индивидуальных ТЭДС для ТЭП с различной степенью деградации. Отметим также, что наихудшее значение  $\max(\vec{\xi})$  для имитационной модели четырехэлектродного ТЭП примерно в 2.5 раза меньше по сравнению с наихудшим значением  $\xi$  при валидации имитационной модели для двухэлектродного ТЭП. Следовательно, переход к имитационному моделированию отдельных термоэлектродов ТЭП улучшает способность модели по представлению экспериментальных данных.

### 4.3 Оценка эффективности алгоритмов обработки информации ТЭП

Исследуемый объект – четырехэлектродный ТЭП ХАНН, испытываемый в 5 температурных точках:  $T_k = 300, 400, 600, 800, 1000^\circ\text{C}$ . Схема подключения ТЭП для проверки гипотез об эффективности алгоритмов определения результата измерения и статуса результата измерения четырехэлектродного ТЭП представлена на рисунке 4.6. Здесь, исследуемый ТЭП в зоне холодного спая ( $T_{\text{хол}} \approx 0$ ) подключается медными проводами к многоканальной системе сбора данных ТЕРКОН, используемой для измерения вектора ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$  согласно (2.7).

Контроль температур  $T$  и  $T_{\text{хол}}$  осуществлялся с использованием эталонных средств измерения температуры, описанных в пункте 4.2. В результате последовательных циклов сличения ТЭП с эталоном и циклов ускоренной деградации, получено 11 наборов измерений вектора ТЭДС  $\{\vec{E}_{ij}\}$  на выходе четырехэлектродного ТЭП в соответствующих температурных точках  $T_k$ , всего 55 измерений вектора  $\vec{E}_{ij}$ .

Обработка ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$  в данном случае осуществляется в соответствии со схемой обработки информации на рисунке 3.2. Соответственно, расчет результата измерения температуры для четырехэлектродного ТЭП  $T_{\text{РИ}}$  выполняется на основе вектора  $\vec{T}_{\text{ВЫЧ}}$  согласно выражению (3.19), которое для ТЭП ХАНН имеет вид

$$T_{\text{РИ}} = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i T_{\text{ВЫЧ } i}}{\sum_{i=1}^4 w_i} \quad (4.9)$$

где  $w_i$  – веса каждой компоненты  $T_{\text{ВЫЧ } i}$  в векторе  $\vec{T}_{\text{ВЫЧ}}$ . При этом, для стандартных термоэлектродных пар «хромель-алюмель» и «нихросил-нисил» значения весов приняты  $w = 1$ , а для дополнительных термоэлектродных пар «хромель-нисил» и «нихросил-алюмель» принято  $w = 0,5$  в соответствии с соображениями, представленными в разделах 3.2 и 3.3.

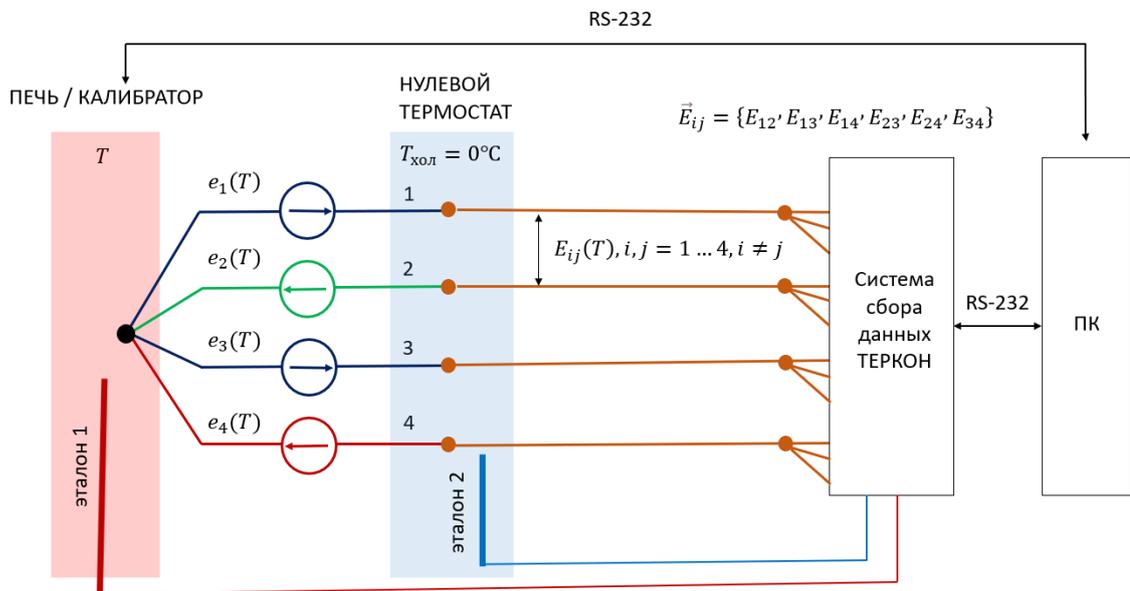


Рисунок 4.6 – Схема подключения ТЭП в экспериментальной установке для получения результата и статуса результата измерения ТЭП

Результат измерения  $T_{\text{РИ}}$  сравним с температурами, рассчитываемыми для стандартных термоэлектродных пар «нихросил-нисил» ( $T_{\text{НН}}$ ) и «хромель-алюмель» ( $T_{\text{ХА}}$ ). Полученные результаты измерения температуры  $T_{\text{РИ}}$ ,  $T_{\text{НН}}$  и  $T_{\text{ХА}}$  представлены на рисунке 4.7 для температур 300°C, 600°C и 1000°C. При температуре 300°C результат измерения пары «нихросил-нисил»  $T_{\text{НН}}$  имеет максимальное отклонение от фактической температуры процесса, и большая часть полученных измерений температуры выходят за допуск. В свою очередь, для пары «хромель-алюмель», результат измерения  $T_{\text{ХА}}$  имеет небольшой разброс, но значительное смещение относительно фактической температуры процесса. Расчет же результата измерения для четырехэлектродного ТЭП  $T_{\text{РИ}}$  позволяет уменьшить отклонение от фактической температуры процесса для большинства измерений ТЭП. Также, в температурных точках 600°C и 1000°C результат измерения  $T_{\text{РИ}}$  имеет меньший разброс относительно фактической температуры по сравнению с  $T_{\text{НН}}$  и  $T_{\text{ХА}}$ .

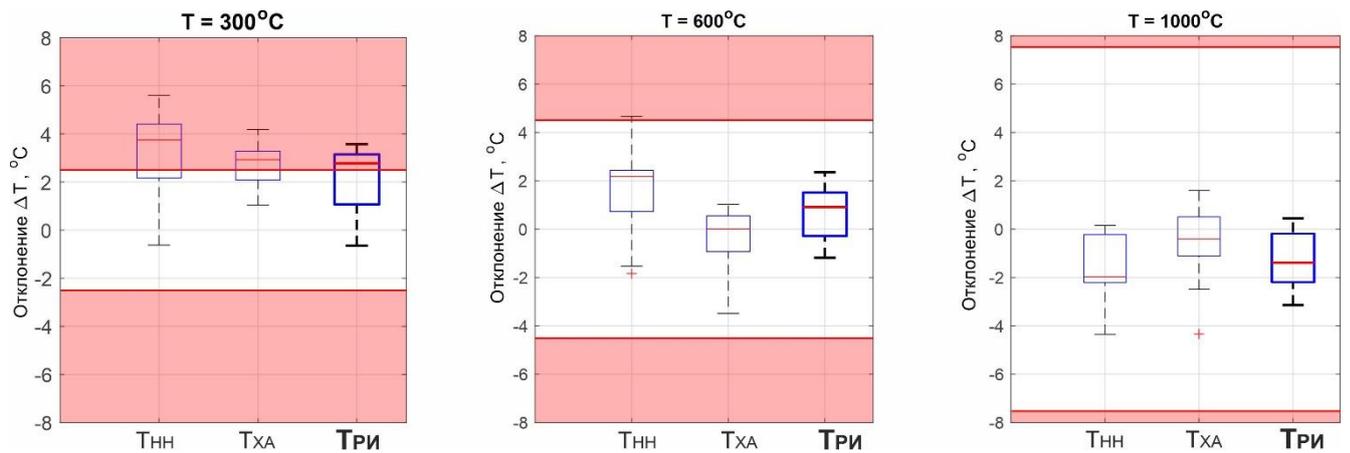


Рисунок 4.7 – Сравнение отклонения результата измерения четырехэлектродного ТЭП по сравнению со стандартными термоэлектродными парами в составе ТЭП

Определим долю температурных точек по всему диапазону измерения, отклонение результата измерения в которых находится за пределами допуска. Сравнение на рисунке 4.8 показывает, что для данного набора экспериментальных данных доля измерений четырехэлектродного ТЭП  $T_{\text{РИ}}$  за пределами допуска на 9,2% меньше по сравнению с долей за пределами допуска для  $T_{\text{НН}}$  и сопоставима с долей за пределами допуска для  $T_{\text{ХА}}$ . Отметим, что полученные отклонения для каждого результата измерения температуры рассчитаны относительно эталонного

средства измерения в лабораторных условиях, при которых деградация материалов ТЭП вызывалась перегревом и термоциклированием ТЭП. В реальных условиях эксплуатации процессы деградации могут отличаться от полученных в эксперименте, а также отсутствует эталонное средство измерений для определения фактической температуры процесса. Тогда, результат измерения четырехэлектродного ТЭП обеспечивает минимальную долю измерений температуры за пределом допуска по сравнению с отдельными ТЭП.

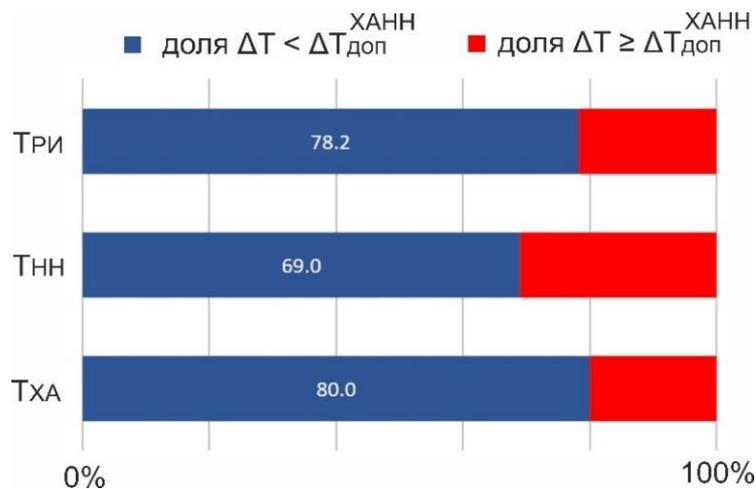


Рисунок 4.8 – Доля результата измерений ТЭП ХАНН в пределах допустимых отклонений по сравнению со стандартными термоэлектродными парами в ТЭП

Проверка алгоритма оценки статусов результата измерения выполнялась для того же набора ТЭДС на выходе четырехэлектродного ТЭП  $\{\vec{E}_{ij}\}$ . Исследовалось 11 наборов ТЭДС для ТЭП ХАНН в разной степени деградации для соответствующих температурных точек  $T_k = 300, 400, 600, 800, 1000^\circ\text{C}$ , всего 55 измерений вектора ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$ .

Расчет статуса результата измерения выполнялся в соответствии с алгоритмом, представленном на рисунке 3.18. Согласно алгоритму, для исследуемого ТЭП в каждой точки измерения температуры формируется вектор диагностических признаков  $\vec{G}$ . Далее, для формирования статуса результата измерения вычисляются две логические переменные  $s_\alpha$  и  $s_\beta$  согласно (3.43) и (3.44) на основе элементов вектора диагностических признаков. Пороговые значения для

$S_\alpha$  и  $S_\beta$  определены с использованием синтетических данных для каждого типа ТЭП и используются для исследуемого ТЭП ХАНН. В результате работы алгоритма, на основе значений  $S_\alpha$  и  $S_\beta$  согласно соотношению (3.45) каждому результату измерения исследуемого ТЭП присваивается статус ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ.

Пример расчета статуса результата измерения показан на рисунке 4.9, где слева представлены результаты для ТЭП ХАНН после изготовления и до предварительного отжига, справа – для ТЭП после 10 циклов деградации. На графиках показано отклонение результата измерения ТЭП  $\Delta T_{ри}$  от фактической температуры процесса и назначенный статус результата измерения «ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ», «ОРИЕНТИРУЮЩИЙ» или «НЕДОСТОВЕРНЫЙ». Также на графиках представлено максимальное значение отклонения в векторе температур  $\max(\Delta \vec{T}_{выч})$ . Графики на рисунке 4.9 показывают изменение статуса с «ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ» на «ОРИЕНТИРУЮЩИЙ», а затем на «НЕДОСТОВЕРНЫЙ» с ростом величины отклонения  $\max(\Delta \vec{T}_{выч})$  и выходом за пределы допуска, что соответствует описанной в разделе 3.5 концепции формирования статусов результата измерения.

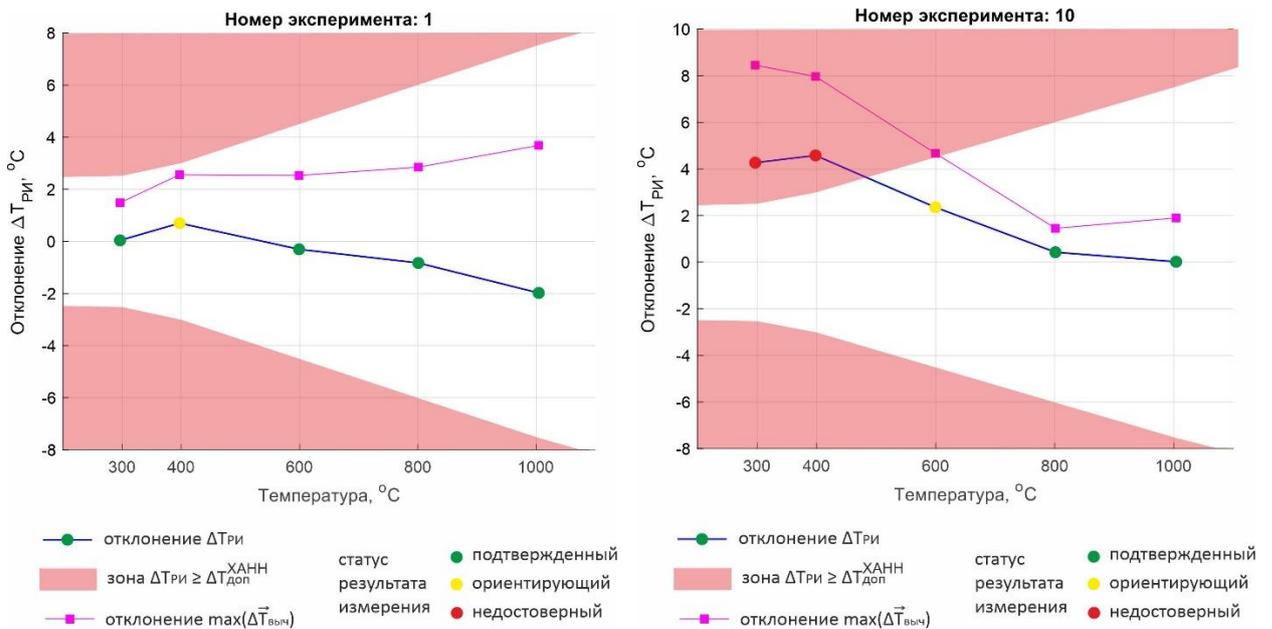


Рисунок 4.9 – Примеры оценки статуса результата измерения для ТЭП ХАНН в различной степени деградации

Итоговый результат оценки статусов представлен на рисунке 4.10, где представлено распределение 55 измерений ТЭП с различным метрологическим состоянием по соответствующим статусам.

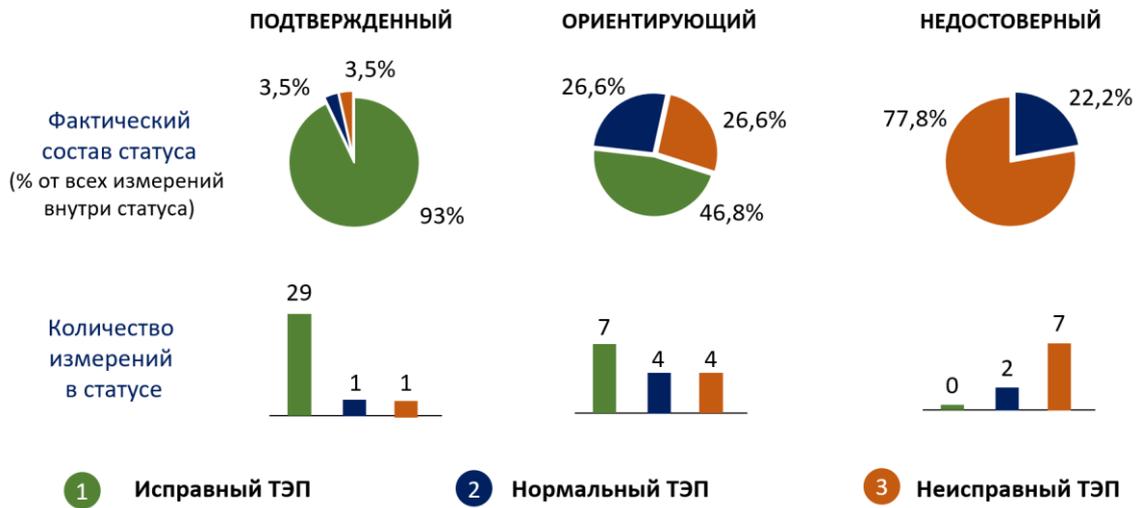


Рисунок 4.10 – Результаты алгоритма оценки статуса результата измерения на экспериментальных данных для ТЭП ХАНН

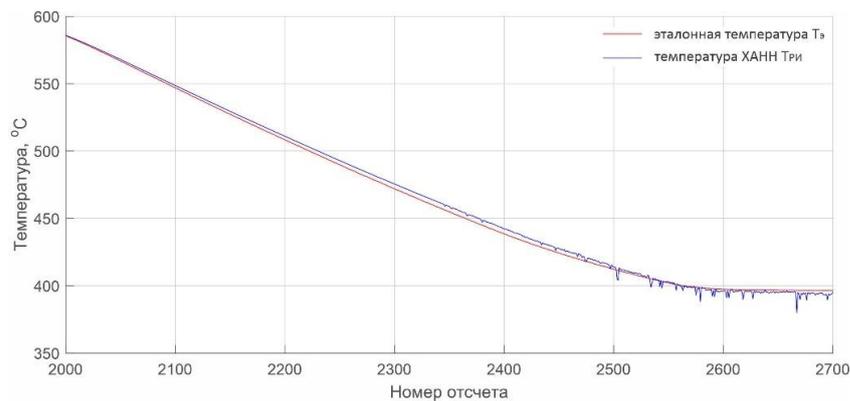
Метрологическому состоянию «исправный ТЭП» ( $\Delta \vec{T}_{\text{выч}} < \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)$ ,  $\Delta T_{\text{ри}} < \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)$ ) в полученном наборе данных соответствует 36 измерений, которые распределились алгоритмом по статусам «ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ» и «ОРИЕНТИРУЮЩИЙ», при этом ни одно из измерений не попадает в статус «НЕДОСТОВЕРНЫЙ». Соответственно, параметр  $\beta$ , рассчитываемый по формуле (3.42), в данном случае  $\beta = 0$ .

Метрологическому состоянию «нормальный ТЭП» ( $\Delta T_{\text{выч}} m \geq \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)$  как минимум для одного  $m$ ,  $\Delta T_{\text{ри}} < \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)$ ) в полученном наборе данных соответствует 7 измерений, которые распределились по всем трем статусам, причем большая часть измерений попало в статус «ОРИЕНТИРУЮЩИЙ».

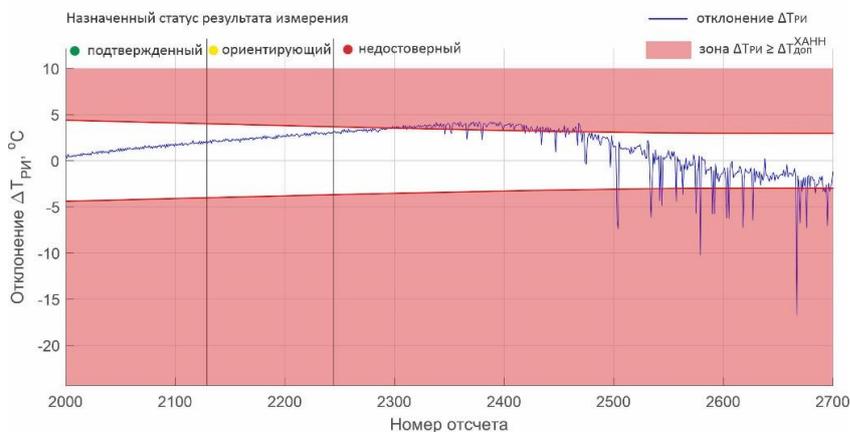
Наконец, метрологическому состоянию «неисправный ТЭП» ( $\Delta T_{\text{ри}} \geq \Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T)$ ) в полученном наборе данных соответствует 12 измерений, которые распределились по статусам «ОРИЕНТИРУЮЩИЙ» и «НЕДОСТОВЕРНЫЙ». При этом 1 измерение, полученное от «неисправного ТЭП», попало в статус «ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ». Соответственно, параметр  $\alpha$ , рассчитываемый согласно

формуле (3.41), в данном случае  $\alpha = 0,035$ . Отметим, что полученное значение  $\alpha$  не превосходит пороговый уровень 0,05 определенный в разделе 3.5 для параметров  $\alpha$  и  $\beta$ .

После 10 экспериментов с ТЭП ХАНН, в следующем цикле испытаний произошло разрушение рабочего спая при охлаждении ТЭП. На рисунке 4.11 а) показаны значения температуры четырехэлектродного ТЭП  $T_{\text{ри}}$  и эталонного значения  $T_{\text{э}}$  в момент начала разрушения рабочего спая четырехэлектродного ТЭП. На рисунке 4.11 б) показано значение отклонения  $\Delta T_{\text{ри}}$  результата измерения относительно эталонного значения и соответствующая зона за границей допусаемых отклонений  $\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}(T_{\text{э}})$ . Поскольку разработанный алгоритм оценки статуса результата измерения позволяет получать статус для каждого измерения температуры, на рисунке 4.11 б) вертикальными линиями отмечены зоны с соответствующим статусом результата измерения.



а)



б)

Рисунок 4.11 – Изменение статуса результата измерения ТЭП ХАНН при разрушение рабочего спая ТЭП

В соответствии с полученными результатами, разрушение рабочего спая происходило не мгновенно и проявлялось в возрастающем отклонении измеряемых ТЭДС  $\vec{E}_{ij}$  от номинальных значений при температуре  $T_3$ . При этом на рисунке 4.11б) видно, что предложенный алгоритм оценки статуса результата измерений позволяет корректно обнаружить деградацию термоэлектродов ТЭП и связанный с ней рост отклонения  $\Delta T_{\text{РИ}}$  в процессе охлаждения ТЭП. Также, некоторые измерения четырехэлектродного ТЭП в процессе разрушения спая попадают в зону допустимых отклонений, что связано с эффективностью предложенного метода расчета результата измерения. Однако статус результата измерения при этом остается НЕДОСТОВЕРНЫМ, сигнализируя пользователю о существенном изменении свойств термоэлектродов ТЭП и необходимости проведения технического обслуживания ТЭП.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. В соответствии с теорией планирования эксперимента разработана методика проведения эксперимента для оценки работоспособности предложенной измерительной схемы четырехэлектродного ТЭП, проверки адекватности разработанной имитационной модели четырехэлектродного ТЭП и оценки эффективности предложенных алгоритмов обработки информации.

2. Проверка адекватности имитационной модели четырехэлектродного ТЭП типа хромель-алюмель-нихросил-нисил (ХАНН) подтвердила применимость модели для описания ФСХ каждого термоэлектрода. Модель корректно воспроизводит ФСХ термоэлектродов как для нового ТЭП, так и для ТЭП после серии циклов старения. Разработанный алгоритм оценки адекватности модели четырехэлектродного ТЭП на полученном наборе экспериментальных данных показал максимальную величину рассогласования между моделью и экспериментом не более  $0,2\Delta T_{\text{доп}}^{\text{ХАНН}}$ .

3. Разработанный метод формирования результата измерения четырехэлектродного ТЭП  $T_{\text{ри}}$  обеспечивает меньшее отклонение измеренной температуры ТЭП от фактической температуры процесса  $T$  по сравнению с отдельными термопарами. На полученном наборе экспериментальных данных для ТЭП ХАНН доля результатов измерения ТЭП за пределом допуска на 9,2% меньше по сравнению с термопарой «нихросил-нисил» и сопоставима с термопарой «хромель-копель».

4. Тестирование разработанного алгоритма оценки статусов результата измерения на полученном наборе экспериментальных данных для ТЭП ХАНН подтвердило способность назначения алгоритмом трех статусов ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ. Каждый статус соответствует отдельному результату измерения температуры в диапазоне работы ТЭП при любом фактическом метрологическом состоянии ТЭП («исправный ТЭП», «нормальный ТЭП», «неисправный ТЭП»). Экспериментальное значение вероятности  $\alpha$  попадания измерений «неисправного ТЭП» в статус ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ и вероятности  $\beta$  попадания измерений

«исправного ТЭП» в статус НЕДОСТОВЕРНЫЙ не превосходит заданный пороговый уровень 0,05.

5. Разработанный алгоритм оценки статусов результата измерения также продемонстрировал корректную работу при нестационарном режиме работы ТЭП. В процессе эксперимента, при охлаждении ТЭП ХАНН алгоритм обеспечил достоверное назначение статусов ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ, ОРИЕНТИРУЮЩИЙ и НЕДОСТОВЕРНЫЙ непосредственно перед разрушением рабочего спая ТЭП в связи с деградацией материалов термоэлектродов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложены алгоритмы получения и обработки информации для оценки достоверности измерения температуры с использованием термоэлектрических преобразователей (ТЭП) в АСУ ТП. По итогам диссертационной работы получены следующие основные результаты и выводы:

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 допуска 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.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications / M. Javaid, A. Haleem, R.P. Singh, S. Rab, R. Suman // *Sensors International*. – 2021. – Vol 2. – pp 1-12.
2. Advances in Sensor Technologies in the Era of Smart Factory and Industry 4.0 / T. Kalsoom, N. Ramzan, S. Ahmed, M.Ur-Rehman // *Sensor*. – 2020. – № 23.
3. Sensors 4.0 - Smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0 / A.Schütze, N.Helwig, T.Schneider // *Journal of Sensors and Sensor Systems*. – 2018. – № 1(7). – pp. 359–371.
4. Actual measuring technologies of Industry 4.0 and analysis of their realization experience / R. Taymanov, A. Pronin, K. Sapozhnikova, Lu Baksheyeva, I.Danilova // *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. – № 1(1379). – pp. 1-8.
5. Чистяков, А. Сравнение характеристик РТД и термопар / А. Чистяков // *Компоненты и технологии*. – 2003. № 5 (31). – С. 24–25.
6. Федеральный закон от 18.06.2008 №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» // *Собрание законодательства РФ*. – 26.06.2008. – ст. 3021.
7. Problems of developing a new generation of intelligent sensors / R. Taymanov, K. Sapozhnikova // *10th IMEKO TC7 Symposium on Advances of Measurement Science 2004*. – 2004. – №1. – pp. 442–447.
8. Intelligent measuring instruments. Maximum reliability of measurement information, minimum metrological maintenance / R. Taymanov, K. Sapozhnikova // *XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, 2003*.
9. The self-validating sensor: rationale, definitions and examples / M. P. Henry, D.W. Clarke // *Control Engineering Practice*. – 1993. – № 4. – pp 585-610.
10. Clarke, D.W. A self-validating thermocouple / D.W. Clarke, J.C.-Y. Yang // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 1997. – Vol. 5. – №2. – pp. 239-253.
11. ГОСТ Р 8.673-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и измерительные системы

интеллектуальные. Основные термины и определения. – М. Стандартинформ, 2019. – 12 с.

12. ГОСТ Р 8.734-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и измерительные системы интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. – М. Стандартинформ, 2019. – 23 с.

13. Economic efficiency of intelligent sensors and measuring systems / R. Taymanov, K. Sapozhnikova // 11 the session of the International scientific school “Fundamental and applied problems of reliability and diagnostics of machines and mechanisms”, St.Petersburg, 2013.

14. Metrology challenges of Industry 4.0 / R. Taymanov, K. Sapozhnikova // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – № 7(1065). – pp. 1-4.

15. Термопары «Теплоприбор» [Электронный ресурс]. URL: [ТХА/ТНН-1к-П, -2к-П \(tpchel.ru\)](http://txa/thh-1k-pi-2k-pi.tpchel.ru) (дата обращения 02.10.2024).

16. Датчики температуры с преобразователями термоэлектрическими [Электронный ресурс]. URL: [https://www.tesey.com/katalog/datchik-temp/datchik-temp\\_104.html?product=1](https://www.tesey.com/katalog/datchik-temp/datchik-temp_104.html?product=1) (дата обращения 02.10.2024).

17. HiTeMS: A project to solve high temperature measurement problems in industry / G. Machin, K. Anhalt, F. Edler, J.V. Pearce, M. Sadli // AIP Conference Proceedings. – 2013. – pp. 958–963.

18. Multi-Mini-Eutectic Fixed-Point Cell for Type C Thermocouple Self-Calibration / O.Ongraim J.V. Pearce, G.Machin, U.Norranim // International Journal of Thermophysics. – 2015. – Vol. 36. – pp. 423–432.

19. Establishment of the Co-C Eutectic Fixed-Point Cell for Thermocouple Calibrations at NIMT / O., Elliott C. J Ongrai. // International Journal of Thermophysics. – 2017. – Vol. 38. – pp. 1–9.

20. Hashemian, H.M. Measurement of Dynamic Temperatures and Pressures in Nuclear Power Plant: Doctor of Philosophy. – 2011 – 214 p.

21. Hashemian, H. M. Maintenance of process instrumentation in nuclear power plants / H. M. Hashemian. – Springer, 2013. – 309 p.

22. Патент №6239351 Соединенные штаты, МПК H01L 35/28. Multi-wire self-diagnostics thermocouple: № 09/356,850 заявл. 19.07.1999: опубл. 29.05.2001 / Hall B. F., Arbor A.: заявитель Hoskins Manufacturing Company.

23. Патент №2129708 Российская Федерация, МПК G01K 15/0, 7/02. Способ проверки соответствия сигналов термоэлектрических преобразователей действительным значениям температуры: №97111121/28: заявл. 30.06.1997: опубл. 27.04.1999 / В.Е. Смелов, С.К. Коротаев, С.Г. Калякин, В.М. Шевченко.: заявитель В.Е. Смелов, С.К. Коротаев, С.Г. Калякин, В.М. Шевченко.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023683816 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования погрешности термопар: №2023682187: заявл. 26.10.2023: опубл. 10.11.2023 / И.И. Федосов: заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU).

25. Патент №227175 Российская Федерация, МПК G01K 7/02. Термоэлектрический преобразователь: №2024112185: заявл. 04.05.2024: опубл.: 09.07.2024 / И.И. Федосов, В.В. Синицин: заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU).

26. Патент №2789611 Российская Федерация, МПК G01K 15/00, G01K 7/02. Способ определения достоверности результатов измерения термоэлектрического преобразователя: № 2022117696: заявл. 30.06.2022: опубл. 06.02.2034 /Федосов И.И., Шестаков А.Л.: заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664023 Российская Федерация. Программа для оценки статуса результата измерения четырехэлектродного термоэлектрического преобразователя:

№ 2024662391: заявл. 03.06.2024: опубл. 17.06.2024 / И.И. Федосов: заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU).

28. Алгоритм генерирования синтетических данных термопар на основе имитационной модели / И. И. Федосов, А. Л. Шестаков // ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ. УПРАВЛЕНИЕ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА. – 2024. – № 3. – С. 22–32.

29. Федосов, И. И. 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.

30. Федосов И. И. Метод оценки статуса результата измерения для четырехэлектродной измерительной схемы термоэлектрического преобразователя / И.И. Федосов // Автоматизация в промышленности. – №9. – 2024. – С. 25-29.

31. 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 (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2023. – pp. 1-5.

32. Temperature Sensor Market worth \$8.0 billion by 2028 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/temperature-sensor-market-worth-8-0-billion-by-2028---exclusive-report-by-marketsandmarkets-301383738.html> (дата обращения 02.10.2024).

33. ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 15 с.

34. ГОСТ Р 8.585 – 2001. ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М. Стандартинформ, 2010. – 81 с.

35. Liptak, B. G. Instrument Engineers' Handbook, Volume One / B. G. Liptak // CRC Press, 2003. – 1920 p.

36. Primetals. Mold expert [Электронный ресурс]. URL: <https://www.primetals.com/portfolio/technology-packages/technology-packages-detail/mold-expert> (дата обращения 02.10.2024).

37. Машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [Электронный ресурс]. URL: <https://magmatex.ru/continuouscastingmachines> (дата обращения 02.10.2024).

38. BPS-K600 Mold Breakout Prediction System [Электронный ресурс]. URL: <https://whzfy18.com/productinfo/861020.html> (дата обращения 02.10.2024).

39. Development and application of mould breakout prediction system with online thermal map for steel continuous casting / F. He, D.F. He, Z.-H. Deng, An-J. Xu, N.-Y. Tian // Ironmaking and Steelmaking. – 2015. – № 3. – pp 194–208.

40. РД153-34.1-35.104-200.Методические указания по объему измерений, сигнализации, автоматического регулирования на тепловых электростанциях с ПГУ, оснащенных АСУ ТП. – М. СПО ОРГРЭС, 2002. – С. 63.

41. Комплексная АСУ ТП пылеугольного энергоблока 300 МВт ТЭЦ “Углевик” [Электронный ресурс]. URL: <https://tornado.nsk.ru/projects/tes/uglevik/>. (дата обращения 02.10.2024).

42. Steam power plant configuration, design, and control /X. Wu, J.Shen, Y.Li, K.Y. Lee // Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment. – 2015. № 6(4). – pp. 537–563.

43. Атрошенко, Ю. К. Повышение надежности и рабочего ресурса основных агрегатов и систем тепловых электрических станций за счет более точных оценок рабочих температур: дисс. канд. тех. наук: спец. 05.14.14: спец. 01.04.14 / Атрошенко Юлиана Константиновна. – Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Томск, 2016. – 190 с.

44. Swapan, B. Power plant instrumentation and control handbook. A guide to thermal power plants / B. Swapan, K.D. Ajay. – Academic Press, 2019. – 1152 p.

45. Ахметов, С. А., Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа / С. А. Ахметов, М.И. Баязитов, И.Р. Кузеев, Т.П. Сериков. – Санкт-Петербург: Недра, 2006. – 868 с.

46. Технологии глубокой переработки нефти: Каталитический крекинг и гидрокрекинг / А. Г. Мальцева, А. В. Гарифулина. [Электронный ресурс]. URL: <https://s.econf.rae.ru/pdf/2014/12/3971.pdf> (дата обращения 02.10.2024).

47. Автоматизированная система управления каткрекинга FCC [Электронный ресурс]. URL: <https://proofoil.ru/Oilrefining/Oilrefining362.html> (дата обращения 02.10.2024).

48. Эксплуатационные параметры процесса каткрекинга FCC [Электронный ресурс]. URL: <https://proofoil.ru/Oilrefining/Oilrefining360.html>. (дата обращения 02.10.2024).

49. Run times exceeding 5 month before steam air decokes. Case study: Chemical plant in South Louisiana [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thermosensors.com/pdfs/chemical-plant-louisiana.pdf> (дата обращения 02.10.2024).

50. Рогельберг, И. Л. Сплавы для термопар / И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. – М: Металлургия, 1983. – 360 с.

51. Long Duration Testing of Type C Thermocouples at 1500°C / J. L. Rempe, J. E. Daw, S. C. Wilkins // Idaho National Laboratory. Report number: INL/EXT-07-13531. – 2008. – 28 p.

52. A Comprehensive Survey of Reported Thermocouple Drift Rates Since 1972 / J. Machin, D. Tucker, J. Pearce // Springer US. – 2021. – Vol. 42. – pp. 1–32.

53. Каржавин, В. А. Влияние термоэлектрической неоднородности на точность измерения температуры термопарами: дисс. канд. тех. наук: спец. 05.11.01 / Каржавин Владимир Андреевич. – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, Обнинск, 2010. –147 с.

54. A comprehensive survey of thermoelectric homogeneity of commonly used thermocouple types / J. Machin, D. Tucker, J. V. Pearce // Measurement Science and Technology – 2018. – № 6(29). – 6 p.

55. Webster, E. S. Drift in Type K Bare-Wire Thermocouples from Different Manufacturers / E. S. Webster // International Journal of Thermophysics. – 2017. – № 5(38). – pp. 1-14.

56. Webster, E. S. The Type N Thermocouple: The Good, the Bad and the Ugly / E. S. Webster // Metrology Society of Australasia, Brisbane, 2017.

57. Webster, E. S. Base-metal thermocouple tolerances and their utility in real-world measurements / E. S. Webster // Measurement Science and Technology. – 2021. – № 8(32). – 12 p.

58. Первичный преобразователь температуры Метран-2000 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.metran.ru/catalog/datchiki\\_temperature/metran-2000/](https://www.metran.ru/catalog/datchiki_temperature/metran-2000/). (дата обращения 02.10.2024).

59. Термоэлектрический преобразователь ТП [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elemer.ru/catalog/datchiki-temperature/termometry-soprotivleniya/tp/> (дата обращения 02.10.2024).

60. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения – М: Стандартинформ, 2014. – 60 с.

61. РМГ 74-2004 Государственная система обеспечения единства измерений. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений – М: Стандартинформ, 2006. – 24 с.

62. Королев, П. Г. Обеспечение метрологической исправности информационно-измерительных систем: дисс. докт. тех. наук: спец. 05.11.16 / Королев Павел Геннадьевич. – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, 2019. – 259 с.

63. Грубо, Е. О. Алгоритмическое обеспечение повышения метрологической надежности средств измерений: дисс. канд. тех. наук: спец. 05.11.16 / Грубо Елена Олеговна. – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, 2011. – 135 с.

64. Структуры и алгоритмы коррекции основной погрешности измерительного канала с использованием измеряемой величины / В. В. Алексеев, Е. О. Грубо, П. Г. Королев // Вестник ТОГУ. – 2010. – № 19(4). – С. 23–32.

65. The need for standards in self-diagnosing and self-validating instrumentation / R. Taymanov, K. Sapozhnikova, M. Henry // Joint International IMEKO TC1+ TC7 Symposium, Ilmenau, 2006.

66. ГОСТ Р ЕН 614-1-2003. Безопасность оборудования. Эргономические принципы конструирования. – М: Госстандарт России, 2005. – 16 с.

67. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие / А. Белевцев, В. Богатов, А. Каржавин, Д. Петров, А. Улановский // СТА. – 2004. – №2. – 9 с.

68. Патент №2325622 Российская Федерация, МПК G01K 15/00, G01K 7/02, G01K 13/12. Способ контроля достоверности преобразований термоэлектрического преобразователя в процессе его эксплуатации: №2007110408/28: заявл. 22.03.2007: опубл. 27.05.2008 / Каржавин А.В., Каржавин В.А, Богатов В.В., Белевцев А.В.: заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Производственная компания «ТЕСЕЙ».

69. Self-calibration of a W/Re thermocouple using a miniature Ru-C (1954°C) eutectic cell / O. Ongray, J. Pearce, G. Machin, S. Sweeney // AIP Conference Proceedings. – 2013. – pp. 504–509.

70. MacHin, G. The European project on high temperature measurement solutions in industry (HiTeMS) - A summary of achievements // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. – 2016. – №9. – pp. 168–179.

71. Hashemian, H.M. New Technology for Remote Testing of Response Time of Installed Thermocouples. Volume 1. Background and General Details. – 1992. – Vol. I – 232 p.

72. Hashemian, H.M. New Technology for Remote Testing of Response Time of Installed Thermocouples Volume 2. – 1992. – Vol. II – 283 p.

73. Патент №2727564 Российская Федерация, МПК G01K 7/02, G01K 15/002, G01K 15/005. Самокалибрующийся датчик температуры: №2019145197: заявл. 25.12.2019: опубл. 22.07.2020 / Ходунков В.П.: заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева».

74. Thermocouple reference tables based on the IPTS-68 / R. Powell, W. Hall, C. Hyink, L. Sparks, G. Burns, M. Scroger, H. Plumb // National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. – 1974. – 401 p.

75. Burley, N. The nicrosil versus nisol thermocouple: properties and thermoelectric reference data //National Bureau of Standards Monograph. –1978. – 167 p.

76. Syntho. What is synthetic data? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.syntho.ai/ru/what-is-synthetic-data/> (дата обращения 02.10.2024).

77. V7. What is Synthetic Data in Machine Learning and How to Generate It. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.v7labs.com/blog/synthetic-data-guide>. (дата обращения 02.10.2024).

78. Law, A. M. Simulation modeling and analysis / A. M. Law, 5-e ed., Arizona, USA: Law & Associates, Inc., 2014. – 800 p.

79. ГОСТ 8.779 – 2012. ГСИ. Преобразователи термоэлектрические платиnorodий-платиnorodиевые эталонные 1, 2 и 3-го разрядов. Методика поверки. – М: Стандартинформ, 2014. – 32 с.

80. EURAMET calibration Guide №8 «Guidelines on the Calibration of Thermocouples». – 2020. – 21 p.

81. Sargent, R. G. Verification and validation of simulation models. An advanced tutorial. / R. G. Sargent // Proceedings of the Winter Simulation Conference. – 2020. – 14 p.

82. Дрейпер Н., Прикладной регрессионный анализ. 3-е изд. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М: И.Д. Вильямс, 2016. – 912 с.

83. Каханер, Д., Численные методы и программное обеспечение. 2-е изд. / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш. – М: Мир, 2001. – 576 с.

84. Пензин, К. В. Вариант алгоритма Левенберга-Марквардта решения нелинейной задачи наименьших квадратов / К. В. Пензин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1991. – Т. 31. – №10. – С. 14–19.

85. Демиденко, Е. З. Оптимизация и регрессия / Е. З. Демиденко. – М: Наука, 1989. – 296 с

86. Press, W.H. Numerical recipes. 3-rd ed. / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. – Cambridge University Press, 2017. – 1262 p.

87. Concepts of Model Verification and Validation / B.H. Thacker, S.W. Doebbling, F.M. Hemez, M. Anderson, J.E. Pepin, E.A. Rodriguez. Los Alamos National Laboratory, 2004. – 41 p.

88. Лемешко, Б. Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению / Б.Ю. Лемешко. – НИЦ ИНФРА-М, 2021. – 248 с.

89. Орлов А. И. О проверке однородности двух независимых выборок / А.И. Орлов // Заводская лаборатория. – 2003. – № 1(69). – С. 55–60.

90. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М: Наука, 1965. – 464 с.

91. О сходимости распределений статистик и мощности критериев однородности Смирнова и Лемана-Розенблатта / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко // Измерительная техника. – 2005. – № 12. – С. 9-14.

92. Least-Squares (Model Fitting) Algorithms [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/least-squares-model-fitting-algorithms.html>. (дата обращения 02.10.2024).

93. Variations of box plots / McGill R., Tukey J. W., Larsen W. A. // American Statistician. – 1978. – № 1 – pp. 12–16.

94. Прикладная статистика. Исследование зависимостей: справочное издание / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М:1985. – 487 с.

95. Хикс, Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Ч. Хикс. – М: Мир, 1967. – 406 с.

96. Сидняев, Н. И. Введение в теорию планирования эксперимента / Н. И. Сидняев, Н. Т. Вилисова. – М: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.

97. The contributions to drift of positive and negative thermoelements in type K bare-wire thermocouples / M. Scervini, C. Rae // AIP Conference Proceedings. – 2013. – С. 564–569.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Акт внедрения

ЛУЧ  
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «НАУКА И ИННОВАЦИИ»

**Акционерное общество**  
**«Научно-исследовательский институт**  
**Научно-производственное объединение**  
**«ЛУЧ»**  
**(АО «НИИ НПО «ЛУЧ»)**

ул. Железнодорожная, д. 24,  
 г. Подольск, Г.о. Подольск, Моск. обл., 142103  
 Тел. (495) 502-79-51, факс (495) 543-33-63,  
 E-mail: pro@sialuch.ru  
 ОКПО 56968802, ОГРН 1215000075971,  
 ИНН 5074070474, КПП 507401001

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский  
 государственный университет  
 (национальный исследовательский  
 университет)»  
 Профессору кафедры информационно-  
 измерительной техники  
 А. Л. Шестакову

24.07.2024 № 221-101-13/6499

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Акт о внедрении

## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
 Федосова Ивана Игоревича  
 «Алгоритмы обработки информации для самодиагностики  
 термоэлектрических преобразователей в АСУ ТП»

Настоящим удостоверяется, что результаты диссертационной работы Федосова Ивана Игоревича, в частности алгоритм самодиагностики термоэлектрического преобразователя и оценки статуса результата измерений применены в задачах контроля температуры объектов использования атомной энергии.

Эффект от внедрения результатов работы заключается в повышении достоверности измерения температуры и возможности контроля состояния термоэлектрических преобразователей в реальном времени, что позволит повысить безопасность и эффективность работы оборудования.

Заместитель генерального директора  
 по науке

Мокрушин А.А.

Бобин Антон Николаевич  
 (909) 0740467