

На правах рукописи



Шлаев Виктор Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ
НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОКАНАЛЬНОЙ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2025 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научный **Бильчук Мария Викторовна**

руководитель: кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой информационных систем, ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва.

Официальные **Лютков Алексей Германович**

оппоненты: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматических систем ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет», г. Москва.

Сергеев Александр Иванович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматизации производства» ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург.

Ведущая Федеральное государственное автономное образовательное
организация: учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «9» апреля 2026 г. в 15:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.332.02 при ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127005, г. Москва, Вадковский пер., д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», www.stankin.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.332.02,

к.т.н., доцент

Тюрбеева Татьяна Борисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В современных реалиях одним из основных направлений развития электронной промышленности является приборостроение, что отражено в Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года (распоряжение Правительства РФ от 17.01.2020 г. №20-р). Согласно документу – электронная промышленность относит к себе, приборы оптоэлектроники и фотоники, приборы квантовой электроники и пьезотехники, радиоэлектронные устройства и системы на кристалле. Одним из проблемных вопросов производственно-технологического характера в отрасли является дефицит современного российского контрольно-измерительного и испытательного оборудования, что оказывает существенное влияние на освоение производства конкурентоспособной высокотехнологичной электронной продукции. Практика концентрации ресурсов на закупке оборудования, в основном иностранного производства, не обеспечивает требуемый уровень развития производства. Применение автоматизированных систем управления и контроля технологических процессов носит фрагментарный характер.

При разработке изделий приборостроения ключевыми элементами являются различные преобразователи и датчики, которые позволяют превращать физическую энергию в электрическую и наоборот. Устройства, с системами подобных преобразователей, находят широкое применение в различных сферах жизни, включая телекоммуникации, энергетику, медицину, промышленность и др. Очевидно, что надежность и точность преобразователей, критически необходима, при разработке подобных систем. Контроль качества изделий приборостроения, представляющих собой многоканальные системы преобразователей, выполняется, преимущественно, с использованием иностранного оборудования или без использования средств автоматизации. Действующие санкции и запреты на доступ к зарубежным технологиям, оборудованию и материалам, усложняют реализацию бизнес-процессов в отрасли, производство современной конкурентоспособной электронной продукции. В свою очередь, отсутствие средств автоматизации в процессе контроля качества, существенно снижает производительность и качество выпускаемой продукции. В рамках проведения контроля качества изделий приборостроения, согласно стандартам ГОСТ Р МЭК 62127-3-2010, ГОСТ Р

ГОСТ Р 53188.1-2008 (МЭК 61672-1:2002) 53566-2009, ГОСТ Р 53576-2009 (МЭК 60268-4:2004), ГОСТ 32783-2014 и другим, является обработка и регистрация сигналов для каждого преобразователя системы. Таким образом актуальной является задача повышения эффективности контроля качества изделий приборостроения на основе автоматизации поканальной обработки сигналов многоканальных систем преобразователей. В настоящее время разработка технических требований к преобразователям физической энергии в электрическую, таких как гидрофоны и вибродатчики, зачастую осуществляется методом множественных экспериментов, что приводит к увеличению времени контроля качества изделий, а также к увеличению временных затрат на использование специализированных лабораторий, в которых проводятся исследования производимой продукции. В условиях отсутствия инструментов предварительного прогнозирования параметров преобразователей на стадии формирования технических требований возрастает риск неоптимальных решений на ранних этапах проектирования. Таким образом, возникает необходимость в разработке методов и моделей, обеспечивающих автоматизацию процесса подготовки на стадии разработки технических требований к преобразователям, позволяющих получать оценочные характеристики изделий без проведения длительных экспериментальных процедур.

Степень разработанности проблемы. Вопросами повышения эффективности контроля качества изделий приборостроения, обработкой сигналов и методами коммутации занимались Овчарук В.Н., Пестриков П.П., Пестрикова Т.В., Николаева Д.В., Зубарев П.В., Миронова Е.Ю., Тубольцев Ю.В., Еремин И.В., Устинов Д.А., Пурисев Ю.А., Казначеев П.А., Непейна К.С., Козлов С.В., Сергеев И.Ю. и другие. Однако вопрос автоматизации поканальной обработки сигналов многоканальных систем преобразователей недостаточно изучен. Наиболее распространенным оборудованием для проведения контроля качества являются устройства американской компании National Instruments. Проблемы с использованием иностранного оборудования описаны выше. Кроме того, оборудование в рассмотренных решениях позволяет проводить измерения с количеством преобразователей в системе, не превышающих число измерительных каналов оборудования. Имеется возможность расширения числа измерительных каналов, путем добавления дополнительных модулей, что

приводит к увеличению габаритов и способна вызвать ряд проблем при проведении измерений.

Проблема разработки технических требований к преобразователям путем множественных экспериментальных исследований заключается в трудоемкости и трудозатратности. Другой подход разработки технических требований к преобразователям основан преимущественно на конечно-элементных и спектральных методах, требующих детальной физико-математической модели, знания свойств материалов и условий эксплуатации. Рассмотренные методы обладают высокой точностью, но являются трудоёмкими и плохо подходят для быстрого прогноза характеристик по результатам массовых измерений.

Целью работы является повышение эффективности контроля качества изделий приборостроения на основе автоматизации процесса поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей и автоматизации процесса подготовки производства на стадии разработки технических требований к преобразователям.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить информационно-аналитический обзор существующих методов и средств автоматизации процесса обработки данных многоканальных систем преобразователей, а также методов и средства автоматизации процесса подготовки производства на стадии разработки технических требований к преобразователям по заданными амплитудно-частотными характеристиками.

2. Разработать структурно-параметрическую модель автоматизированного процесса поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей.

3. Выявить взаимосвязи и установить зависимости автоматизированного процесса разработки технических требований к преобразователям.

4. Разработать математические модели и алгоритмы автоматизированного процесса поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей и автоматизации процесса подготовки производства на стадии разработки технических требований.

5. Разработать программно-аппаратный комплекс поддержки автоматизированного процесса контроля качества многоканальных систем преобразователей и автоматизации процесса подготовки производства на стадии разработки технических требований к преобразователям.

6. Провести апробацию и внедрение разработанного программно-аппаратного комплекса в реальное производство, провести оценку эффективности его работы.

Объект исследования – процессы автоматизации обработки данных многоканальных систем преобразователей и автоматизации подготовки производства на стадии разработки технических требований.

Предмет исследования – контроль качества многоканальных систем преобразователей и подготовка производства на стадии разработки технических требований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Выявлены взаимосвязи и установлены зависимости автоматизированного процесса разработки технических требований к преобразователям.

Разработана структурно-параметрическая модель автоматизированного процесса поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей.

Разработаны математические модели и алгоритмы автоматизированного процесса поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей и автоматизированного процесса разработки технических требований к преобразователям.

Теоретическая значимость исследования заключается в совершенствовании теоретических основ проведения контроля качества изделий приборостроения и разработки технических требований к преобразователям, обеспечивающих сокращение времени выполнения измерительных и проектных работ. Полученные результаты могут использоваться при проведении контрольных испытаний, а также при разработке технических требований к преобразователям.

Практическая значимость исследования состоит в разработанном программно-аппаратном комплексе поддержки автоматизированного процесса поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей и модуле автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям по заданным амплитудно-частотным характеристикам. Применение разработанных программно-аппаратных средств позволяет сократить время выполнения конструкторско-технологических и контрольно-измерительных работ.

Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается корректностью применяемого математического аппарата, результатами проводимых измерительных операций.

Методы исследования. В работе использовались методы математического анализа, структурное моделирование, математическое моделирование, численные методы, методы обработки сигналов, методы корреляции.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурно-параметрическая модель системы автоматизации процесса контроля качества многоканальных систем преобразователей.
2. Математическая модель автоматизации процесса контроля качества многоканальных систем преобразователей;
3. Алгоритм функционирования модели автоматизации процесса контроля качества многоканальных систем преобразователей;
4. Математическая модель и алгоритм автоматизации процесса подготовки производства на стадии разработки технических требований к преобразователям.

Степень достоверности и апробация выполненных исследований. Результаты, полученные в диссертационной работе, подтверждаются соответствием экспериментальных и теоретических исследований, разработкой оригинальной модели системы автоматизации контроля качества многоканальных систем преобразователей, разработкой программно-аппаратного комплекса систем автоматизации поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей. Произведена государственная регистрации разработанной программы для ЭВМ. Получен акт об использовании результатов работы по автоматизации процесса контроля качества многоканальных систем преобразователей на АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева» (г. Москва).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект No FSFS-2024-0012).

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, региональных и межвузовских научно-технических конференциях: International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021 г.; международная научная конференция «Самарские чтения», 2022 г.; XIV всероссийская конференция с международным участием МАШИНОСТРОЕНИЕ: традиции и

инновации, 2021г.; студенческие научно-практические конференции «Автоматизация и информационные технологии» (АИТ-2021, АИТ-2023), 2021 г., 2023 г.

Публикации по теме работы. По теме диссертации опубликовано 9 научных публикаций : 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 научная работа – в издании, входящем в базу данных Scopus, 4 публикации – в материалах конференций, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие паспорту специальности. Научная работа соответствует формуле научной специальности 2.3.3 — «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» в пунктах 2 – «Автоматизация контроля и испытаний» и 3 – «Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.».

Структура и объем. Диссертация изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 2 таблицы, состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 53 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, направленная на повышение эффективности контроля качества многоканальных систем преобразователей на основе поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей и автоматизации процесса подготовки производства на стадии разработки технических требований к преобразователям. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор источников по теме проводимого научного исследования, а также анализ существующих моделей и методов автоматизации процесса регистрации и обработки сигналов применимых к многоканальным системам преобразователей. Проводится анализ источников информации на предмет поиска существующих моделей прогнозирования амплитудно-частотных характеристик преобразователей. А также методов и средств

автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям.

В процессе анализа было выявлено, что существующие на сегодняшний день методы и алгоритмы обработки данных в многоканальных системах для поканальной обработки данных не являются достаточно эффективными для проведения контроля качества системы преобразователей.

Для преодоления указанных проблем целесообразно ориентироваться на создание компактных измерительных систем, способных эффективно обрабатывать данные из нескольких десятков преобразователей.

При анализе решений аналогичных задач в рассмотренных источниках, методы обработки данных ориентированы на непрерывный поиск и обработку полезного сигнала. При проведении нескольких тысяч измерений данный подход существенно замедляет скорость работы. В рассматриваемых системах регистрируются непосредственные результаты вычислений. В случае необходимости анализа характеристик отдельных каналов по конкретным параметрам, требуется проведение повторных измерений, а также сборка, настройка и отладка оборудования.

Таким образом обосновывается актуальность и необходимость разработки модели автоматизации процесса обработки сигналов с последующей их регистрацией и получением АФЧХ для возможности проведения анализа данных в лабораторных условиях.

В ходе анализа методов автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям установлено, что стандартный подход основан преимущественно на конечно-элементных и спектральных методах, требующих детальной физико-математической модели, знания свойств материалов и условий эксплуатации. Рассмотренные методы обладают высокой точностью, но являются трудоёмкими и плохо подходят для быстрой разработки технических требований по результатам массовых измерений.

В качестве альтернативного направления предложено использование методов машинного обучения, в частности градиентного бустинга, что позволяет строить автоматизированные модели разработки технических требований к преобразователям по экспериментальным данным контроля качества.

Вторая глава посвящена разработке структурно-параметрической модели автоматизированного процесса поканальной обработки многоканальных систем

преобразователей для повышения эффективности контроля качества многоканальных систем преобразователей.

При проведении контроля качества многоканальных систем преобразователей, согласно требованиям нормативной документации, необходимо провести измерения для обработки характеристик преобразователей по «приему» и «излучению». Проведение измерений без использования средств автоматизации представимы в виде соответствующих структурных схем (Рис.1., Рис.2.).

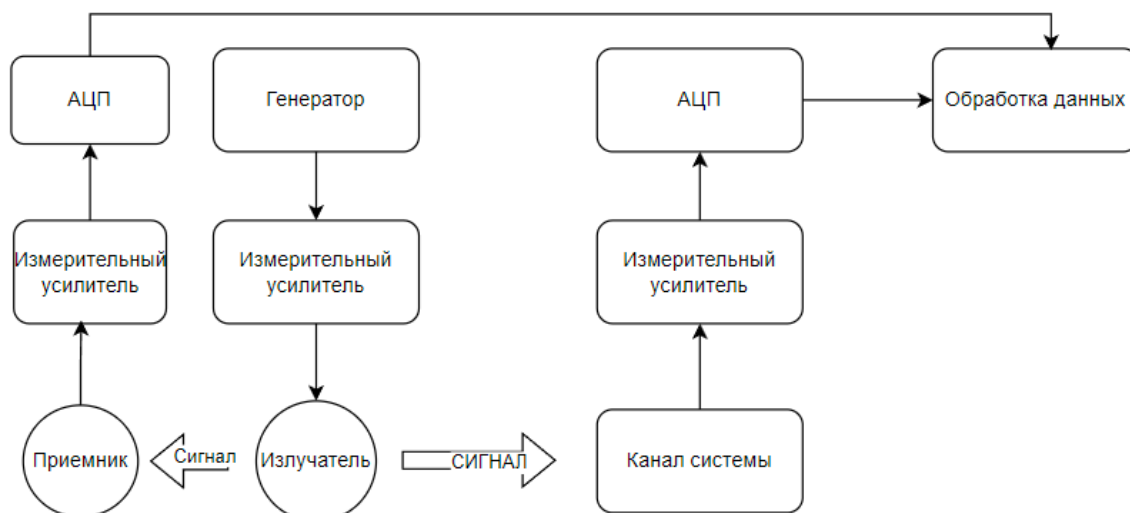


Рис.1. Структурная схема проведения измерений характеристик преобразователей без использования средств автоматизации по «приему»

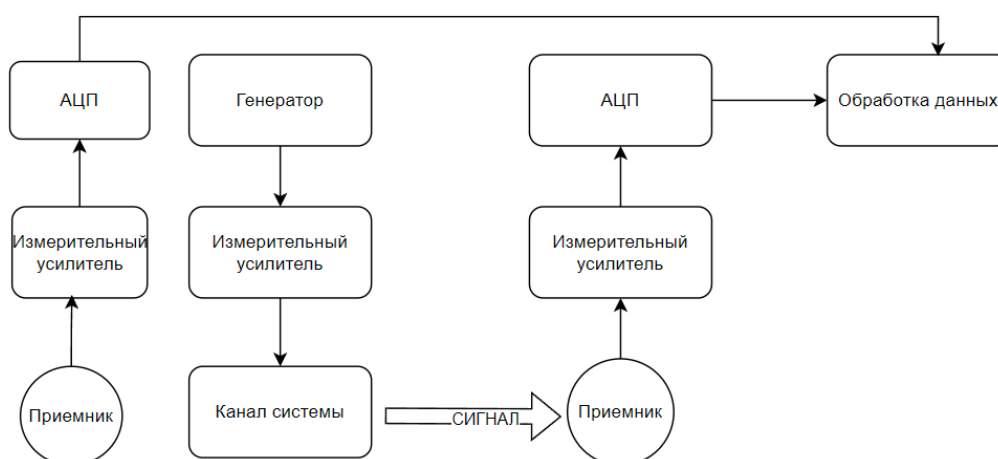


Рис.2. Структурная схема проведения измерений характеристик преобразователей без использования средств автоматизации по «излучению»

Разработка структурной схемы автоматизированной системы контроля качества многоканальных систем основывается на комбинации моделей проведения измерений без использования средств автоматизации (Рис.3).



Рис 3. Структурная модель автоматизированного процесса контроля качества

Предлагаемая модель позволяет производить вычисления АФЧХ сигнала в процессе проведения измерений. Предусмотрена возможность регистрации сигналов измерений для последующей обработки в лабораторных условиях, проведения различных измерительных операций без привязки к рабочему месту проведения измерений. Для решения задачи поканальной обработки сигналов многоканальных систем преобразователей, предлагается структурная модель системы коммутации сигнала, основанная комбинацией каскадной модели с логической моделью управляемого демультиплексора (Рис.4).

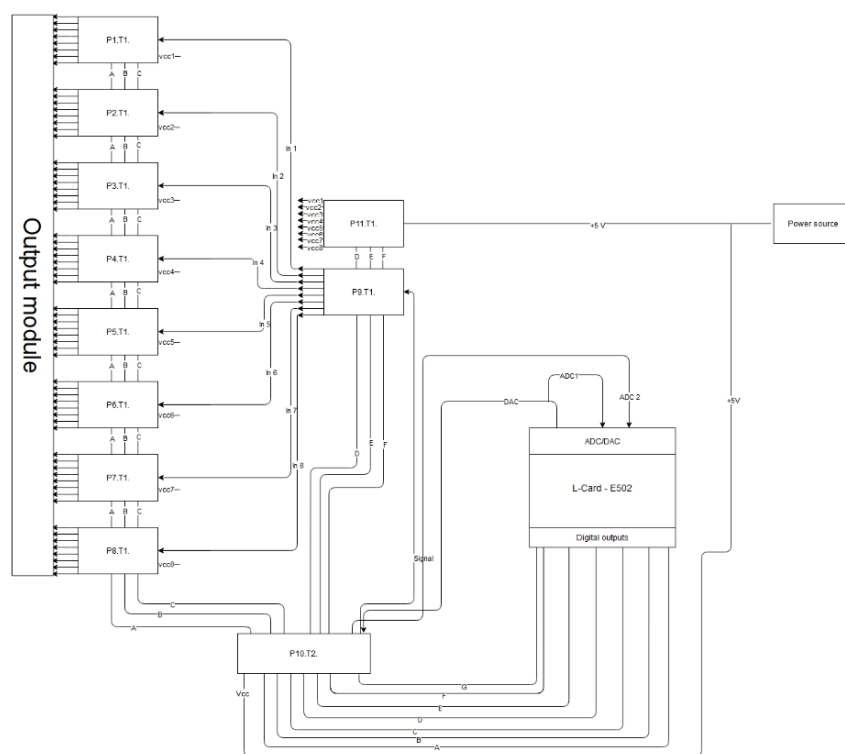


Рис.4. Структурная модель системы коммутации

Третья глава посвящена выявлению взаимосвязей автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям, а также разработке математических моделей и алгоритмов для систем автоматизации процесса поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей и автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям.

Частотная характеристика преобразователя определяется его резонансными свойствами и общей реакцией на входные колебания. Основными конструктивными и материальными параметрами изделия, влияющими на частотную характеристику преобразователя, являются:

Материалы – механические свойства материалов корпуса и мембраны, такие как плотность, упругость, акустическая проводимость.

Размеры – линейные размеры чувствительного элемента и корпуса преобразователя.

Масса – общая масса устройства, которая влияет на его резонансные частоты.

Геометрия – форма и конструкция корпуса, которые определяют направление и диапазон чувствительности.

Способ установки – тип крепления влияет на граничные условия: жёсткое крепление увеличивает частоту, гибкое – снижает

Для автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям разрабатывается соответствующая математическая модель:

$$f_c = F(M, L, W, G, S) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eff}(M, L, G, S)}{m_{eff}(M, W, G, S)}} \quad (1)$$

где: f_c — целевая полоса пропускания или частотная характеристика преобразователя, M — параметры материалов (например, плотность, акустическая проводимость), L — размеры устройства, W — масса преобразователя, G — геометрия корпуса, S — способ установки, k_{eff} и m_{eff} – эффективные жесткость и масса, зависящие от указанных параметров.

Математическая модель системы автоматизации поканальной обработки данных преобразователей (6) основывается на поиске АФЧХ исследуемых сигналов преобразователей с одновременным поиском участков полезных импульсов методом кросс-корреляции, для сигналов, полученных из системы коммутации, к которым применяется быстрое преобразование Фурье.

Представление сигнала $u(t)$, который подается на выход канала демультиплексора с тремя управляющими входами по управляющему воздействию $\overline{u_{\text{ВХ}}} = \overline{A_0 A_1 A_2}$ описывается как:

$$\phi(A_0, A_1, A_2,) = \begin{cases} u(t), & \overline{u_i} \cap \overline{u_{\text{ВХ}}} = 1 \\ 0, & \overline{u_i} \cap \overline{u_{\text{ВХ}}} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где $u(t)$ – входной сигнала, который передается на канал преобразователя $\overline{u_i}$ -комбинация логического воздействия i -го управляющего выхода. Уравнение для каскада уровней по управляющим воздействиям $\overline{u_{\text{ВХ},0}}, \overline{u_{\text{ВХ},1}}, \dots, \overline{u_{\text{ВХ},n-1}}$ выглядит как:

$$\Phi_c(A_i) = \prod_{i=0}^n \begin{cases} u(t), & \overline{u_{i,j}} \cap \overline{u_{\text{ВХ},i}} = 1 \\ 0, & \overline{u_{i,j}} \cap \overline{u_{\text{ВХ},i}} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где n – уровень каскада, а Φ_c - ненулевой только если все уровни каскада активируют свой единственный канал.

Для поиска позиции полезного импульса используется метод кросс-корреляции. Зная длительность и частоту сигнала $x(t)$, а также частоту дискретизации, создается сигнал $y(t)$ аналогичной формы, с длительностью, например, в двое меньше генерируемого и той же частоты.

Вычисляя значения кросс-корреляции для различных t , максимальное значение будет указывать на позицию по времени начала полезного сигнала. Математическая модель системы автоматизации поканальной обработки многоканальных систем преобразователей описывается как:

$$H[k] = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \left(\prod_{i=0}^{n-1} \phi_i(A_i, EN_i, u_{\text{output}}(n)) \right) e^{-j2\pi kn/N}}{\sum_{n=0}^{N-1} \left(\prod_{i=0}^{n-1} \phi_i(A_i, EN_i, u_{\text{input}}(n)) \right) e^{-j2\pi kn/N}} \quad (4)$$

На основе математической модели разрабатывается алгоритм программного обеспечения системы автоматизации процесса контроля качества многоканальных систем (Рис.5).

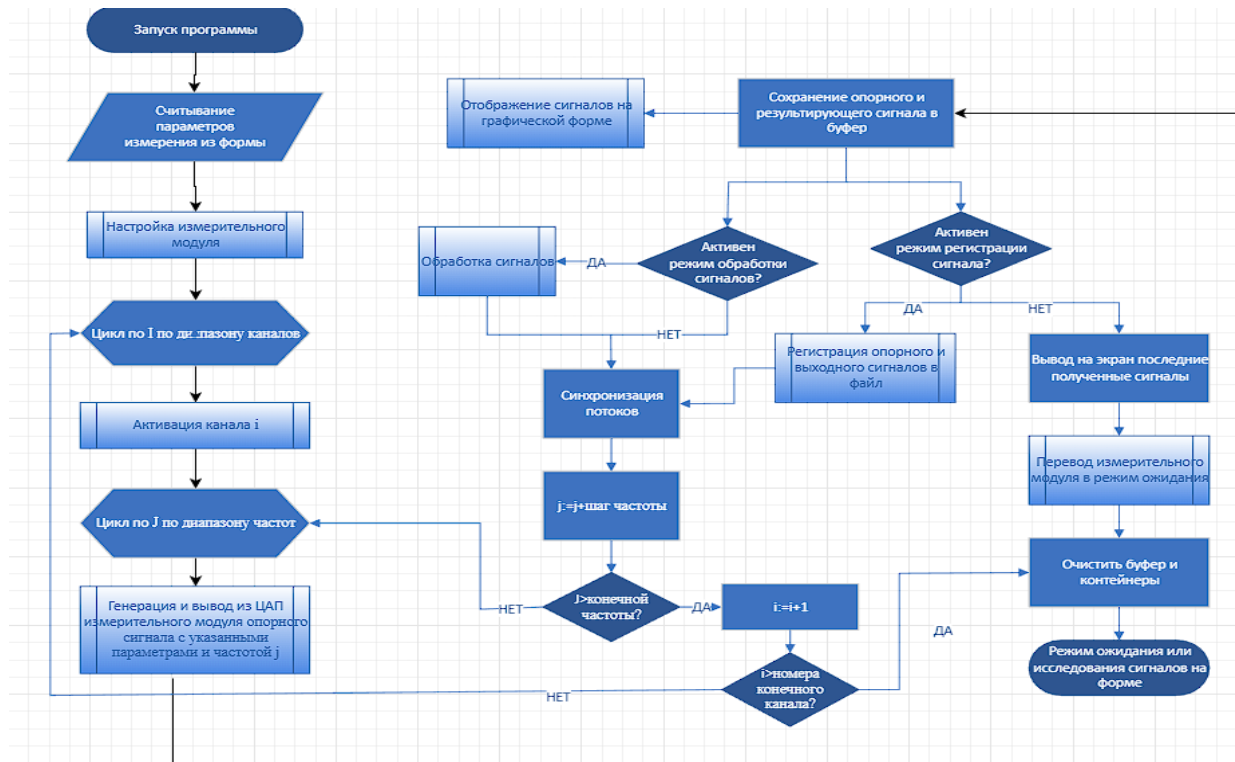


Рис. 5. Алгоритм автоматизированного процесса контроля качества многоканальных систем

Четвертая глава посвящена созданию программно-аппаратного комплекса на основе разработанных структурно-параметрической и математической моделей, алгоритмов системы автоматизации процесса контроля качества многоканальных систем, а также модуля автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям.

Апробация результатов исследования проводится на многоканальной системе гидрофонов, т.к. данная система в полной мере отображает основные свойства многоканальных систем преобразователей.

Для разработки аппаратной части системы автоматизации моделируется подключение оснастки к измерительному модулю, соединение портов синхронизации, цифровых выходов системы коммутации, делителей, усилителей и преобразователей напряжения (Рис.6). Данная схема позволяет автоматизировать процесс контроля качества многоканальных систем преобразователей. Использование портов синхронизации модулей позволяют реализовать возможность однократного поиска полезного сигнала, уменьшая время измерений. Использование измерительного модуля внутри оснастки

рядом с преобразователями, позволяет управлять системой коммутации и регистрировать сигнал без существенных искажений.

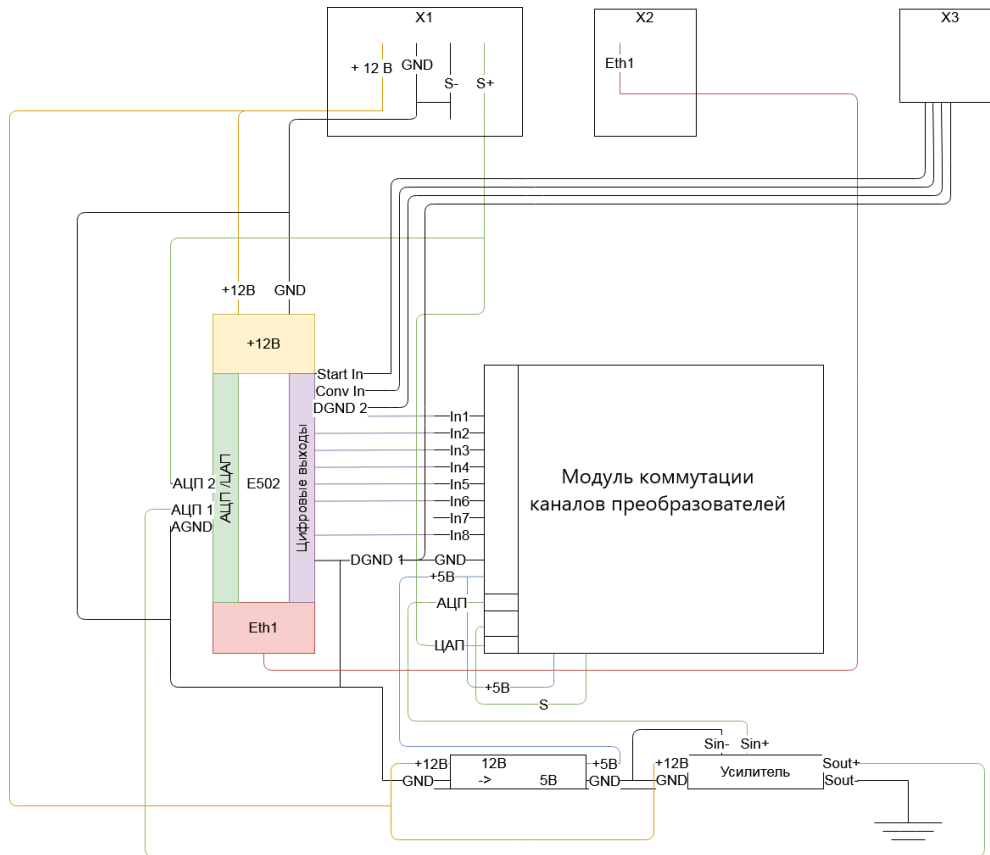


Рис. 6. Схема подключения портов аппаратной части системы автоматизации

На основе структурной схемы автоматизации и подключения портов с использованием САПР выполняется 3D моделирование аппаратной части системы (Рис. 7).

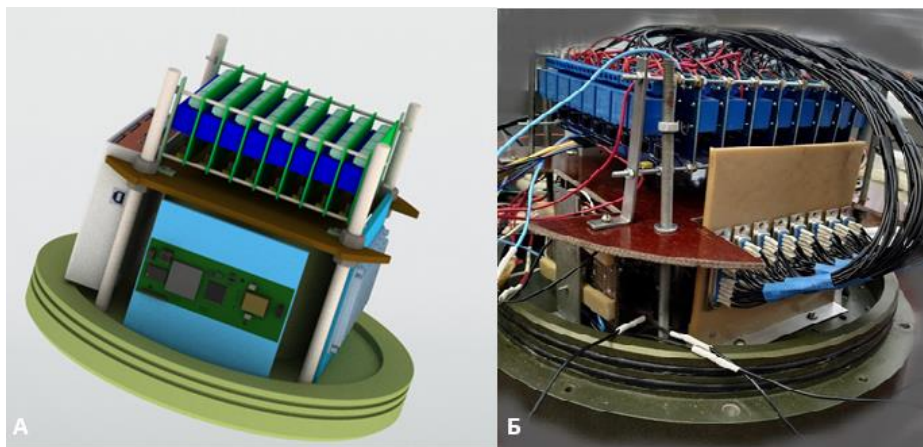


Рис. 7. А – 3D модель аппаратной части системы автоматизации. Б – Макет физической реализации аппаратной части системы автоматизации

Разработанное программное обеспечение является частью программно-аппаратного комплекса. Перед запуском измерений, с использованием программного продукта (Рис.8), производится настройка параметров измерений и вносится информация о характеристиках гидрофонов.

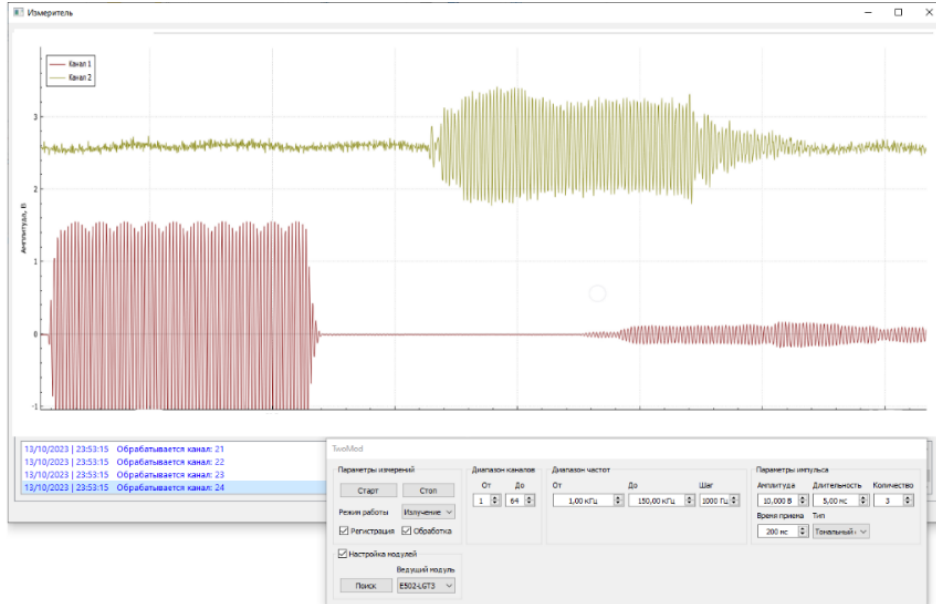


Рис. 8. Использование программно-аппаратного комплекса при проведении измерений

Использование модуля обработки данных (Рис.9) позволяет получить результаты измерений как в процессе измерений, так и в лабораторных условиях.

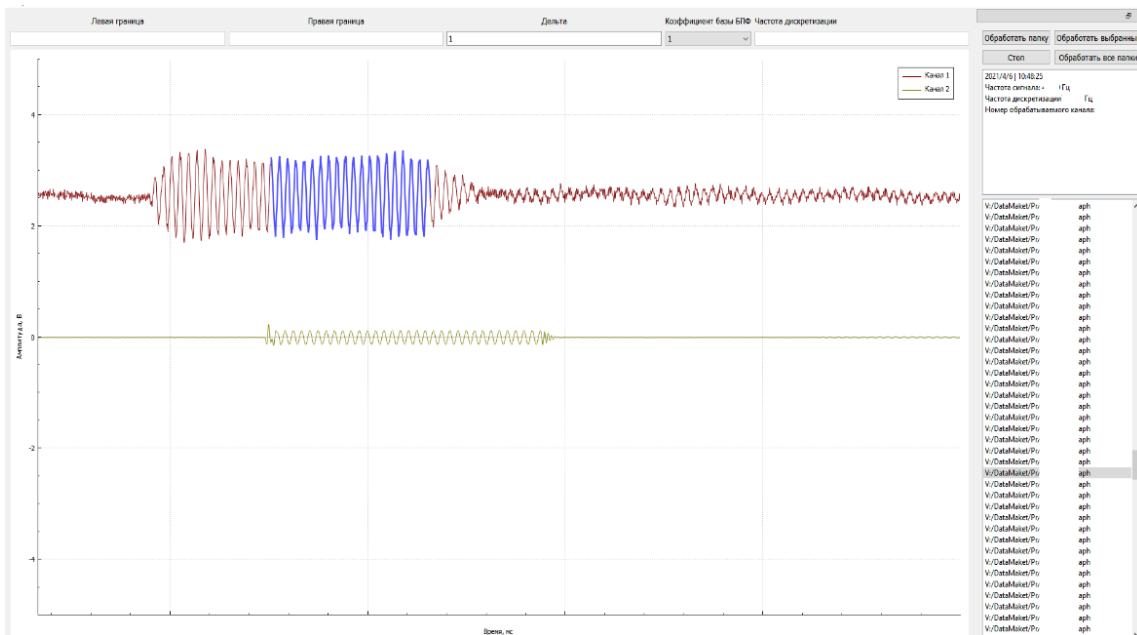


Рис.9. Использование модуля обработки результатов измерений

Зарегистрированные экспериментальные данные и физические параметры преобразователей используются для автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям. С использованием модуля автоматизации происходит обучение соответствующей модели. Созданный файл модели машинного обучения используется для вычисления прогнозируемых характеристик преобразователей. Результаты измерений используются для автоматизации процесса технических требований к преобразователям (Рис.10).

Материал	Геометрия	Способ установки	Масса (г)	Размер X (см)	Размер Y (см)	Размер Z (см)	Частота резонанса	Полоса пропускания	Чувствительность	Точность прогнозирования
Алюминий	Цилиндрическая	Сварное	58.23	4.55	3.87	2.9	12235.1	1323.5	-10.44	94.2...
Сталь	Цилиндрическая	Сварное	34.51	8.12	4.3	7.51	11234.2	1123.4	-12.68	93.5
Сталь	Кубическая	Склеенное	44.87	5.63	6.98	9.1	12132.5	1213.3	-13.68	93.2
Алюминий	Кубическая	Склеенное	72.44	3.42	5.99	8.42	10845.6	1084.6	-13.11	92.1
Полимер	Кубическая	Склеенное	41.73	7.34	2.97	4.24	10425.7	1070.2	-9.53	91.2
Титан	Сферическая	Болтовое	52.97	5.2	4.45	8.03	13640.5	1364.1	-15.02	90.4
Полимер	Цилиндрическая	Спаянное	63.17	6.57	4.88	3.21	12623.8	1262.4	-14.32	89.3
Сталь	Сферическая	Болтовое	48.83	7.17	6.59	2.73	11472.5	1147.3	-7.82	88.6
Сталь	Конусоидальная	Спаянное	38.51	8.02	7.6	5.17	11556.7	1155.7	-14.56	87.8...
Алюминий	Конусная	Склеенное	69.42	4.78	5.24	4.92	11472.5	1147.3	-7.82	87.2

Рис. 10. Использование системы автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям

Пятая глава посвящена оценке эффективности использования систем автоматизации процесса контроля качества многоканальных систем преобразователей и модуля автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям.

Отклонение результатов автоматизированного комплекса от результатов, полученных в ручном режиме, в среднем составило 3%. Был проведен статистический анализ по проведению аналогичных измерений многоканальных систем в ручном режиме. Нижняя граница прироста производительности, исходя из собранной статистики, оценивается как $30 * t$, где t – время, затрачиваемое на проведение одного измерения. При внедрении результатов исследования на АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева» (г. Москва), по

предварительной оценке, сокращение времени при проведении контроля качества многоканальных систем гидрофонов составит 170 часов в год.

Оценка эффективности использования модели автоматизации процесса разработки технических требований и моделированием путем проведения экспериментов выражается через время, необходимое для достижения определенной точности и определяется как

$$\frac{T_{total}^{model}}{T_{total}^{exp}} = \frac{T_{train} + M * T_{pred}}{N * T_{exp}}, \quad (7)$$

где T_{total}^{exp} – общее время эксперимента, T_{total}^{model} – общее время использования модели, MAE_{exp} – ошибка эксперимента, MAE_{model} – ошибка модели, N – количество комбинаций, M – количество запросов, T_{exp} – время одного эксперимента, T_{train} – время обучения модели, T_{pred} – время одного предсказания.

Если $M \ll N$ и $T_{pred} \ll T_{exp}$, то $T_{total}^{model} \ll T_{total}^{exp}$, что делает использование модели значительно быстрее. Для экспериментов точность напрямую зависит от количества протестированных комбинаций параметров. Т.е. с увеличением объема данных модель становится точнее, а общее время использования остается значительно меньше.

Таблица 1. Сравнение моделей

<i>Метод</i>	<i>Время обучения, ч</i>	<i>MAE, Гц</i>	<i>MSE, (Гц)^2</i>	<i>R^2</i>
Эксперименты	1000	0.10	0.015	0.92
CatBoost (ML)	10	0.55	0.50	0.65
CatBoost (ML)		0.15	0.03	0.90

График ошибок представлен на рисунке 11.

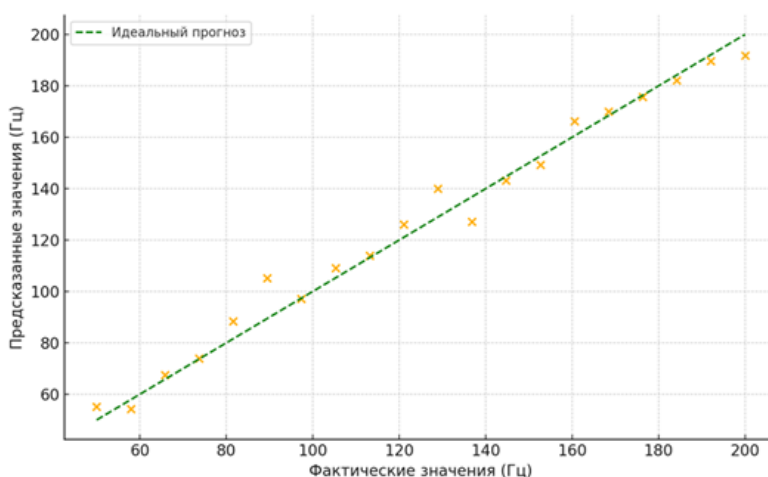


Рис. 11. График ошибок при использовании программного модуля

Разработанная математическая модель и программный модуль на основе машинного обучения позволяют сократить затраты времени и ресурсов при проектировании электромеханических преобразователей (таблица 1). Анализ временных затрат показывает, что использование машинного обучения ускоряет процесс разработки в десятки раз, сохраняя при этом высокий уровень точности прогнозирования параметров.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Выполненные исследования и практическая работа позволили получить следующие выводы и результаты:

1. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи в области развития приборостроения – повышение эффективности контроля качества изделий приборостроения за счет применения автоматизированной системы поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей и автоматизации процесса подготовки производства на стадии разработки технических требований к преобразователям.

2. Проведенный информационно-аналитический обзор позволил выявить взаимосвязи и установить зависимости для автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям.

3. Разработана структурно-параметрическая модель системы автоматизации—процесса поканальной обработки данных многоканальных систем преобразователей для повышения эффективности процесса контроля качества.

4. Разработана математическая модель контроля качества многоканальных систем преобразователей, отображающая поиск АЧХ системы по полезным импульсам входного и измеряемого сигналов, полученных в результате коммутации.

5. Разработана математическая модель системы автоматизации процесса подготовки производства на стадии разработки технических требований к преобразователям для повышения эффективности проектирования изделий приборостроения.

6. Разработан алгоритм автоматизации процесса контроля качества многоканальных систем преобразователей, отображающий решение задач коммутации сигнала, поиска полезного импульса, а также расчета АЧХ системы.

7. Разработан алгоритм автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям, отображающий решение задачи прогнозирования физических параметров преобразователей по требуемым амплитудно-частотным характеристикам с использованием модели машинного обучения и данных результатов измерений.

8. Использование разработанного на основе соответствующих алгоритмов автоматизированного комплекса контроля качества многоканальных систем преобразователей, позволяет ускорить процесс проведения измерений без потери качества примерно в 30 раз. Использование разработанного программного модуля автоматизации процесса разработки технических требований к преобразователям, позволят ускорить разработку технических требований вдвое. Производительность увеличивается при увеличении количества результатов измерений, необходимых для обучения модели.

9. Разработанная методика и программный модуль автоматизации процесса контроля качества многоканальных систем преобразователей внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при подготовке бакалавров и магистров по направлению 27.03.04 «Управление в технических системах» в рамках учебной дисциплины «Теория управления».

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научно-рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами:

1. Шлаев, В. И., Бильчук, М. В., Тясто, С. А. Сравнительный анализ инструментов и разработка схемы коммутации для автоматизации процесса регистрации электрических сигналов многоканальных систем / В. И. Шлаев, М. В. Бильчук, С. А. Тясто // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2021. – №1 (56). С. 13-18.

2. Шлаев, В. И., Бильчук, М. В. Обобщенная модель автоматизации процесса контроля качества изделий приборостроения. / В. И. Шлаев, М. В. Бильчук // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2025. № 4 (32). – С 43-53.

3. Шлаев, В. И. Модуль прогнозирования параметров преобразователей по заданным амплитудно-частотным характеристикам. / В. И. Шлаев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 5 (247). – С. 93-104.

Статьи в международных научных журналах (SCOPUS/WoS):

1. Shlaev, V.I., Bilchuk, M.V., Tyasto, S.A. Development of a Switching Circuit for the Operation of a Multichannel System in Reception and Emission Modes / V. I. Shlaev, M. V. Bilchuk, S. A. Tyasto // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2021. – Pages: 461-465.

Свидетельства о регистрации авторского права:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024616183 Российская Федерация. Программное обеспечение для автоматизации обработки и регистрации сигналов многоканальных систем преобразователей : № 2024616183 : заявл. 12.03.2024; опубл. 18.03.2024 / В.И. Шлаев, М. В. Бильчук.

Статьи в сборниках научных трудов:

1. Шлаев, В. И., Бильчук, М. В., Тясто, С. А. Программный комплекс для автоматизации процесса регистрации данных многоканальной системы электрических сигналов / В. И. Шлаев, М. В. Бильчук, С. А. Тясто // Самарские чтения. Материалы международной конференции. – Москва: Янус-К, 2022. – С. 246-247.

2. Шлаев, В. И., Бильчук, М. В., Тясто, С. А. Применение автоматизированного комплекса регистрации данных для многоканальной системы электрических сигналов / В. И.

Шлаев, М. В. Бильчук, С. А. Тясто // Материалы XIV всероссийской конференции с международным участием МАШИНОСТРОЕНИЕ: традиции и инновации. – Москва, 2021. – С. 372-377.

3. Шлаев, В. И. Программный комплекс для автоматизации процесса регистрации данных многоканальной системы электрических сигналов / В.И. Шлаев // МАТЕРИАЛЫ студенческой научно-практической конференции Автоматизация и информационные технологии. – Москва. – 2021. – № 2. – С. 90.

4. Шлаев, В. И., Бильчук, М. В. Модель автоматизации процесса регистрации и обработки данных многоканальной системы электрических преобразователей / В. И. Шлаев, М. В. Бильчук // МАТЕРИАЛЫ студенческой научно-практической конференции Автоматизация и информационные технологии. – Москва. – 2023. – № 2. – С. 53.