

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
(Н И У « Б е л Г У »)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК
КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Поддержка принятия решений при исследовании и создании нового
источника рентгеновского излучения**

Магистерская диссертация
обучающегося по направлению подготовки
09.04.02 Информационные системы и технологии
очной формы обучения
группы 07001635
Иващука Олега Орестовича

Научный руководитель:
д.т.н., профессор
О.Р. Кузичкин
Научный консультант:
д.ф.-м.н., профессор
А.С. Кубанкин
Рецензент:
д.т.н., профессор
А.А. Черноморец

БЕЛГОРОД 2018

РЕФЕРАТ

Поддержка принятия решений при исследовании и создании нового источника рентгеновского излучения. – Иващук Олег Орестович, магистерская диссертация, Белгород, Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ»), количество страниц 65, включая приложение 67, количество рисунков 33, количество таблиц 2, количество использованных источников 26.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Объектом исследования является процесс исследования и создания источника рентгеновского излучения нового типа, основанного на пьезоэлектрическом эффекте.

Предметом исследования являются модели, метод и их программная реализация, обеспечивающие возможность проведения автоматизированных экспериментальных исследований с одновременным контролем параметров и оптимизации характеристик создаваемого нового прибора – генератора рентгеновского излучения, основанного на эффекте пьезоэлектрического сжатия.

Цель работы – повышение эффективности и качества исследований по изучению свойств и созданию новых пьезоэлектрических источников рентгеновского излучения за счет разработки метода поддержки принятия решений по оптимизации их характеристик и автоматизации научных экспериментов.

При достижении данной цели необходимо решение следующих задач:

- анализ предметной области и существующих подходов в сфере поддержки принятия решений при исследовании и создании источников рентгеновского излучения;
- проведение предварительных экспериментальных исследований по обнаружению рентгеновского излучения при сжатии пьезокерамики в вакууме, анализ полученных результатов;
- системное описание существующего процесса генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрика в вакууме, моделирование модернизированного процесса исследования и создания нового источника рентгеновского излучения, обеспечивающего возможность решения выявленных проблем;
- разработка метода поддержки принятия решений по созданию и оптимизации характеристик нового прибора – генератора рентгеновского излучения, основанного на эффекте пьезоэлектрического сжатия;

- разработка программной реализации с помощью среды LabView, актуализирующей модернизированный автоматизированный процесс экспериментальных исследований и применение разработанного метода, проведение сравнительного эксперимента.

Полученные результаты: в работе предложен модернизированный автоматизированный процесс проведения экспериментальных исследований по изучению свойств пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения и созданию новых источников рентгеновского излучения, обеспечивающий одновременный контроль измеряемых параметров, проведение достаточного числа экспериментов с выбранным шагом изменения параметров, а также предложен метод поддержки принятия решений по созданию новых приборов, основанных на исследуемом явлении (пьезоэлектрических генераторов рентгеновского излучения), обеспечивающий оптимизацию основных характеристик прибора в соответствии с техническим заданием.

Ожидаемые эффекты:

- сокращение цикла исследований за счет ускорения подготовки и проведения экспериментов, оперативного использования результатов в масштабе реального времени, сокращения времени обработки и систематизации данных;

- увеличение точности и достоверности результатов экспериментов;

- повышение качества и информативности эксперимента за счет увеличения числа одновременно контролируемых параметров и более тщательной обработки данных;

- усиление контроля над ходом эксперимента и возможность оптимизации его параметров и характеристик создаваемого источника рентгеновского излучения;

- повышение производительности исследователя.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Анализ предметной области и существующих подходов в сфере поддержки принятия решений при исследовании и создании источников рентгеновского излучения	10
1.1 Существующие источники рентгеновского излучения и проблемы поддержки принятия решений по их перспективному развитию	10
1.2 Анализ процесса создания и исследования новых миниатюрных источников рентгеновского излучения, основанных на пьезоэлектрическом эффекте.....	13
1.2.1 Введение в предметную область	13
1.2.2 Описание экспериментальной установки, используемой для изучения нового эффекта.....	14
1.2.3 Результаты измерения спектров рентгеновского излучения, генерируемого при сжатии пьезоэлектрической керамики в вакууме.....	19
1.2.4 Результаты исследования зависимости граничной энергии и общего числа счетов от давления в вакуумной камере и величины нагрузки для каждой из полярностей.....	21
1.3 Основные проблемы проведения экспериментальных исследований по генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрической керамики в вакууме и оптимизации характеристик излучения при создании нового источника. Постановка задачи исследования.....	25
2 Моделирование процесса проведения автоматизированных экспериментальных исследований и разработка метода поддержки принятия решений по созданию и оптимизации характеристик нового генератора рентгеновского излучения.....	28
2.1 Разработка функциональной модели существующего процесса проведения экспериментальных исследований	28
2.2 Модернизация процесса исследования и создания нового источника рентгеновского излучения за счет средств автоматизации и поддержки принятия решений.....	38
2.3 Разработка метода поддержки принятия решений по созданию и оптимизации характеристик нового прибора – пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения.....	45
2.4. Выводы.....	49

3 Разработка программной реализации, актуализирующей модернизированный процесс исследования и создания нового источника рентгеновского излучения	50
3.1 Обоснование выбора средства автоматизации научных исследований.....	50
3.2. Разработка программной реализации и рекомендаций по применению .	53
3.3 Обоснование экономической эффективности.....	59
3.4 Выводы.....	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	63
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	66

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня высокий уровень научно-технического и социально-экономического развития современного общества требует серьезной модернизации существующего и создания принципиально нового оборудования и приборного обеспечения в разных сферах экономики. Этот процесс связан с выполнением комплекса как теоретических, так и экспериментальных научных исследований различных явлений и процессов, получением новых знаний о закономерностях, и зачастую требует разработки оригинальных лабораторных установок, проведения большого числа опытов (в том числе дорогостоящих), глубокого анализа их результатов.

Для обработки данных, поступающих от лабораторных установок, и упрощения обнаружения на данной базе новых эффектов и закономерностей в настоящее время актуально использование современных средств автоматизации и методов моделирования, обеспечивающих: сбор измерительной информации в режиме реального времени с требуемым шагом, ее накопление, предварительную обработку и хранение, обмен управляющей информацией, а на этой основе – выработку научно обоснованных решений о полезности каждого события в исследуемом входном потоке.

В результате исследователь не только сможет получить качественно новые результаты, увеличить их точность и достоверность, повысить информативность эксперимента, но сократить цикл исследований, сроки их проведения и трудоемкость.

В настоящее время в Международной научно-образовательной лаборатории (МНОЛ) радиационной физики НИУ «БелГУ» проводятся инновационные исследования: разработка и исследование прототипа пьезоэлектрического ускорителя и генератора рентгеновского излучения как основы для создания в будущем рентгеновских анализаторов эффективного обнаружения примесей в различных материалах, а также имеющих другие применения, в частности, в миниатюрных радиационных технологиях.

В 2016 году нами впервые экспериментально обнаружено, что пьезоэлектрический эффект в вакууме можно использовать для ускорения электронов и генерации рентгеновского излучения. Причем данный результат наблюдается в различных случаях: на основе трибоэлектрического эффекта [1], пироэлектрического эффекта [2], при работе пьезоэлектрического трансформатора в вакууме [3] так и при сжатии пьезоэлементов в вакууме [4].

Предложена и развивается научная идея создания миниатюрного ускорителя электронов и генератора рентгеновского излучения нового типа, основанного на пьезоэлектрическом эффекте (при сжатии пьезоэлектрика в вакууме). Подобный ускоритель сегодня является единственным в мире аналогом перспективного пироэлектрического генератора, при этом ряд его возможных практических применений шире, а его мощность приблизительно в 2 раза выше. Создание прототипа пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения нового типа позволяет решить ряд следующих важных проблем, которые характерны для существующих источников:

- сокращение циркуляции радиоактивных веществ в природе (разрабатываемый генератор не требует при работе использование радиоактивных материалов, что делает его экологически чистым);

- обеспечение безопасной эксплуатация прибора (разрабатываемый пьезоэлектрический источник не требует при работе внешних источников высокого напряжения);

- обеспечение возможности применения генератора рентгеновского излучения в полевых условиях (для работы предлагаемого прототипа генератора излучения достаточно приложения только механической нагрузки).

Для проведения научных исследований в МНОЛ радиационной физики создана оригинальная экспериментальная установка – пьезоэлектрический ускоритель, позволяющая наблюдать генерацию характеристического и тормозного рентгеновского излучения с граничной энергией до 60 кэВ при приложенной механической силе F равной $1\div 4$ кН и регистрировать соответствующие спектры рентгеновского излучения [2-4].

Однако, следует отметить, что для определения оптимальных характеристик рентгеновского излучения, генерируемого разрабатываемым пьезоэлектрическим источником нового типа, необходимо проведение значительного количества лабораторных опытов, в которых необходимо варьирование входными параметрами с очень маленьким шагом (по отношению к диапазону изменения параметра). Кроме того, необходимо обеспечение высокоточного контроля изменяемых физических параметров в процессе проведения эксперимента, при этом обеспечение проведения совместных измерений, а именно, одновременных измерений одной или нескольких неоднородных величин, определяющих результат эксперимента и характеристики создаваемого нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения.

Решение данных проблем, как указано выше, связано с применением современных средств автоматизации и разработкой методов поддержки принятия решений при создании и оптимизации характеристик новых источников рентгеновского излучения.

Научная новизна работы заключается в получении следующих новых научных результатов:

- Разработана модель модернизированного процесса исследования и создание нового источника рентгеновского излучения, обеспечивающего проведение автоматизированных экспериментов с одновременным контролем измеряемых параметров и требуемым (достаточно малым в диапазоне изменения параметра) шагом их изменения, что позволит повысить точность, достоверность и информативность экспериментальных исследований;

- Предложен метод поддержки принятия решений, обеспечивающий автоматизацию параметров эксперимента и характеристик создаваемого нового прибора – пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения.

Экспериментальные исследования по изучению свойств пьезоэлектрических источников РИ выполнены при финансовой поддержке

проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (грант № 3.1631.2017/4.6).

Продолжение и развитие представленных исследований поддержано грантом договор №12861ГУ/2018 (вн. номер 0039907) от 27.04.2018 г. «Разработка нового типа источника рентгеновского излучения на основе пьезоэлектрического эффекта для создания рентгеновских портативных анализаторов наличия примесей в продукции нефтегазодобывающих станций» в рамках конкурса «УМНИК (декабрь 2017 г.)»

Выражаю особую благодарность за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований и научные идеи по изучению новых источников рентгеновского излучения зав. МНОЛ радиационной физики д.ф.-м.н. А.С. Кубанкину и с.н.с А.В. Щагину.

1 Анализ предметной области и существующих подходов в сфере поддержки принятия решений при исследовании и создании источников рентгеновского излучения

1.1 Существующие источники рентгеновского излучения и проблемы поддержки принятия решений по их перспективному развитию

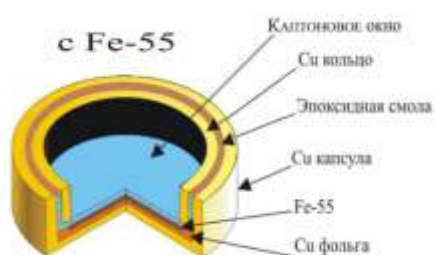
Существующие источники рентгеновского излучения, используемые в современной науке и практике, можно разделить на четыре основных типа, которые представлены на рисунке 1.



1 – синхротронное излучение



2 – рентгеновская трубка



3 – радиоактивные источники



4 – пирозлектрические источники

Рисунок 1 – Основные типы источников рентгеновского излучения

Во второй половине прошлого столетия в городе Троицке, (Россия) был построен ускорительный комплекс «Пахра» для решения следующих задач: создание детекторов излучения, развитие ядерной энергетики, подробное изучение структуры веществ и т.д. Сегодня основными недостатками подобных источников синхротронного излучения являются: сложная конструкция; огромные масштабы, например, радиус накопительного кольца источника синхротронного излучения «Пахра» составляет около 10 метров, высокое энергопотребление 2,5 МВт [5].

Рентгеновская трубка как традиционный источник стабильного рентгеновского излучения, генерируемого в течение длительного времени при минимальных энергетических потерях, так же имеет ряд существенных недостатков по сравнению с разрабатываемым нами в настоящее время пьезоэлектрическим источником нового типа: необходимость использования при его функционировании внешнего источника высокого напряжения, работа с которым требует специально обученного персонала и является опасной для здоровья и жизни человека [6].

Радиоактивные источники рентгеновского излучения уже несколько десятков лет используются в научных целях для калибровки полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения и других типов приборов рентгеновской спектроскопии. Радиоактивные источники являются универсальным средством калибровки, однако, вследствие непрерывного радиоактивного распада, они оказывают разрушающее воздействие на окружающую среду. Использование пьезоэлектрических источников рентгеновского излучения вместо радиоактивных изотопов позволяет решить проблему снижения и предотвращения экологического загрязнения окружающей среды (пьезоэлектрический источник в выключенном состоянии не генерирует рентгеновское излучение) [7].

Пирозлектрический источник рентгеновского излучения является наиболее близкими по физическим свойствам, геометрическим параметрам и перспективным областям практического применения к разрабатываемому

прототипу пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения. Следует отметить, что на базе теоретических расчетов и их экспериментальных подтверждений фирма Amptek в США уже выпустила первый пьезоэлектрический источник рентгеновского излучения, подобных аналогов которого в отечественном производстве на сегодняшний день нет [7,8]. Основное преимущество разрабатываемого пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения по сравнению с пьезоэлектрическим является более высокая мощность рентгеновского излучения, что открывает дополнительную возможность, например, в идентификации элементов, входящих в химический состав исследуемого материала, а также делает прорыв к созданию рентгеновских мобильных портативных анализаторов для применения в медицине, для своевременного локального обнаружения дефектов внутренних участков костной ткани и др.

Анализ существующих подходов к поддержке принятия решений при проведении исследований на основе источников рентгеновского излучения показал [9], что в данной сфере использование информационных технологий сводится к сбору и первичной обработке данных, если с соответствующим оборудованием поставляется программное обеспечение (ПО); формированию соответствующих баз данных; построению необходимых зависимостей.

На сегодняшний день отсутствуют автоматизированные системы, обеспечивающие поддержку управления и функционирования существующих источников: синхротронного излучения, рентгеновской трубки, а также радиоактивного и пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения, которые позволяли снизить риски незапланированных чрезвычайных ситуаций, обеспечить более точные научные результаты в наименее короткий промежуток времени.

Внедрение средств автоматизации научных исследований и разработка метода поддержки принятия решений, обеспечивающие оптимизацию параметров эксперимента и характеристик разрабатываемого пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения нового типа,

позволит осуществлять синхронный контроль в режиме реального времени изменения таких параметров, как давление остаточного газа в вакуумной камере, индуцированный заряд на поверхности пьезокерамических образцов, общее количество зарегистрированных событий в спектре генерируемого рентгеновского излучения, а также позволит уменьшить до требуемых значений шаг изменения данных параметров. В результате это позволит обеспечить создание отечественного – первого в мире – прототипа пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения, который необходим во многих перспективных областях: медицина, промышленное производство, геологические разведочные экспедиции по поиску новых материалов и опознаванию древних реликвий, анализатор наличия примесей в сырье нефтегазодобывающих станций и т.д.

1.2 Анализ процесса создания и исследования новых миниатюрных источников рентгеновского излучения, основанных на пьезоэлектрическом эффекте

1.2.1 Введение в предметную область

В 1992 году впервые в мире в США было экспериментально подтверждено, что такие кристаллы, как ниобат или танталат лития (LiNbO_3), которые обладают пьезоэлектрическими свойствами, при нагреве или охлаждении их в вакууме с помощью, например, элемента Пельтье или кремниевых диодов, являются источниками электронов, которые ускоряются в образующем пьезоэлектрическими кристаллами электрическом поле напряженностью 60-80 кВ/см², что дает возможность генерировать рентгеновское излучение, граничная энергия которого составляет не менее 60-80 кэВ, при эффекте торможения ускоренных частиц в кулоновском поле на атомах элементов, входящих в состав материала, испытывающего эффект торможения электронов [1].

В настоящее время уже проведено множество экспериментальных исследований, которые подтверждают возможность применения пьезоэлектрических кристаллов во многих фундаментальных физических исследованиях: для генерации потока быстрых нейтронов [2], калибровки детекторов нейтрино и темной материи [6].

Впервые экспериментальное подтверждение возможности применения керамических образцов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, для генерации рентгеновского излучения с граничной энергией 60 кэВ в вакууме, было осуществлено в 2016 году группой ученых в Харьковском физико-техническом институте [7].

В 2016 году в МНОЛ радиационной физики НИУ «БелГУ» был впервые обнаружен эффект генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрических образцов в вакууме [конференции]. Получен патент на полезную модель [8].

В последующих пунктах представлены: описание экспериментальной установки, изготовленной в МНОЛ радиационной физики; приведены результаты экспериментальных исследований, каждый из которых являются неотъемлемой частью в создании нового источника рентгеновского излучения.

1.2.2 Описание экспериментальной установки, используемой для изучения нового эффекта

На рисунке 2 представлена предложенная схема генерации рентгеновского излучения с помощью сжатия сборки пьезокерамических образцов в вакууме. На рисунке показаны: два пьезокерамических образца – 1; расположенный между ними высоковольтный медный электрод – 2; расположенные на задних поверхностях пьезокерамических образцов заземленные пластины – 3; выполненные из оцинкованного железа бойки деформационной машины, которая является источником механической нагрузки – 4; полупроводниковый детектор рентгеновского излучения – 5.

На рисунке 3 представлена фотография экспериментальной установки для изучения нового эффекта.

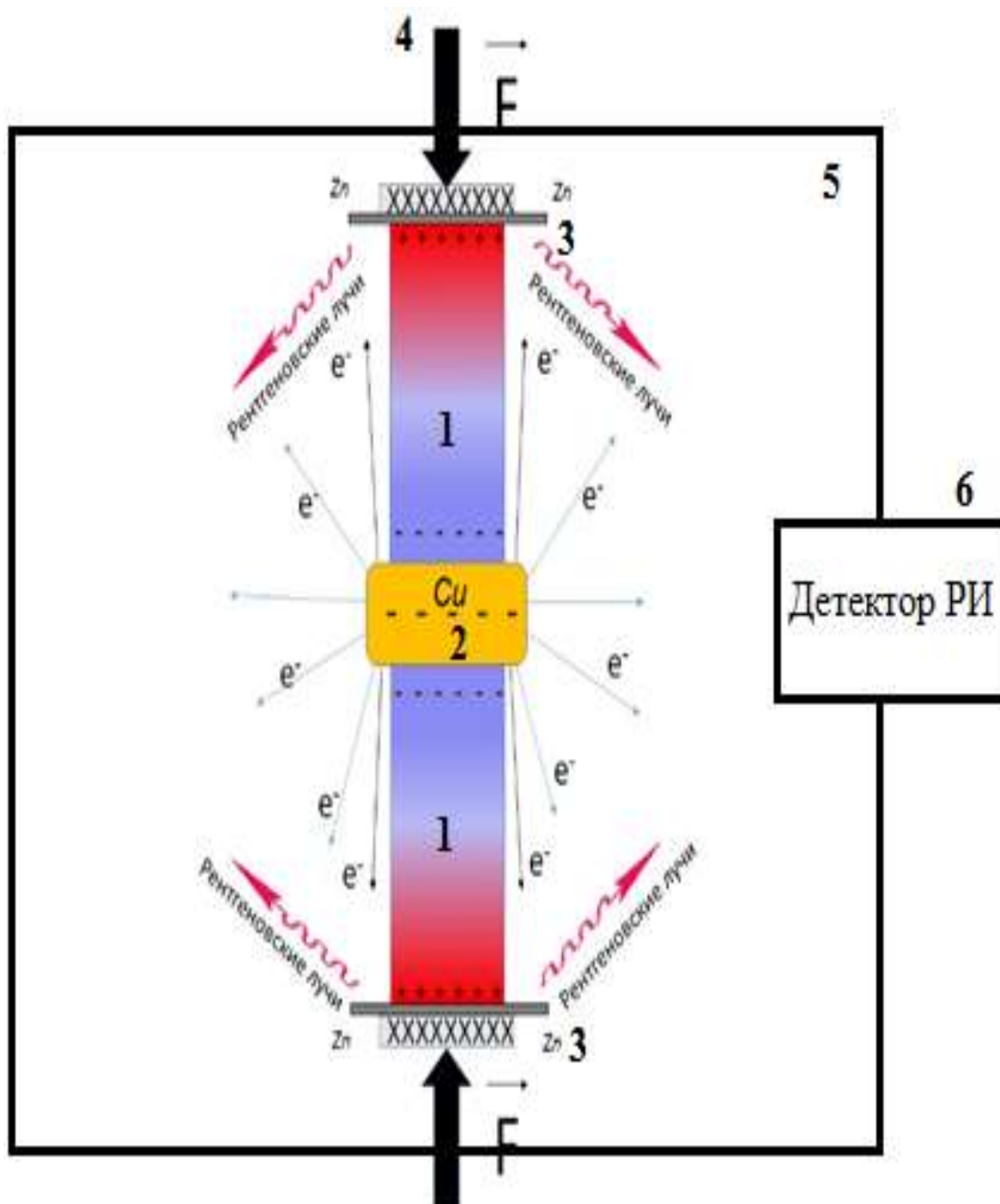


Рисунок 2 – Схема генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезокерамических образцов в вакууме

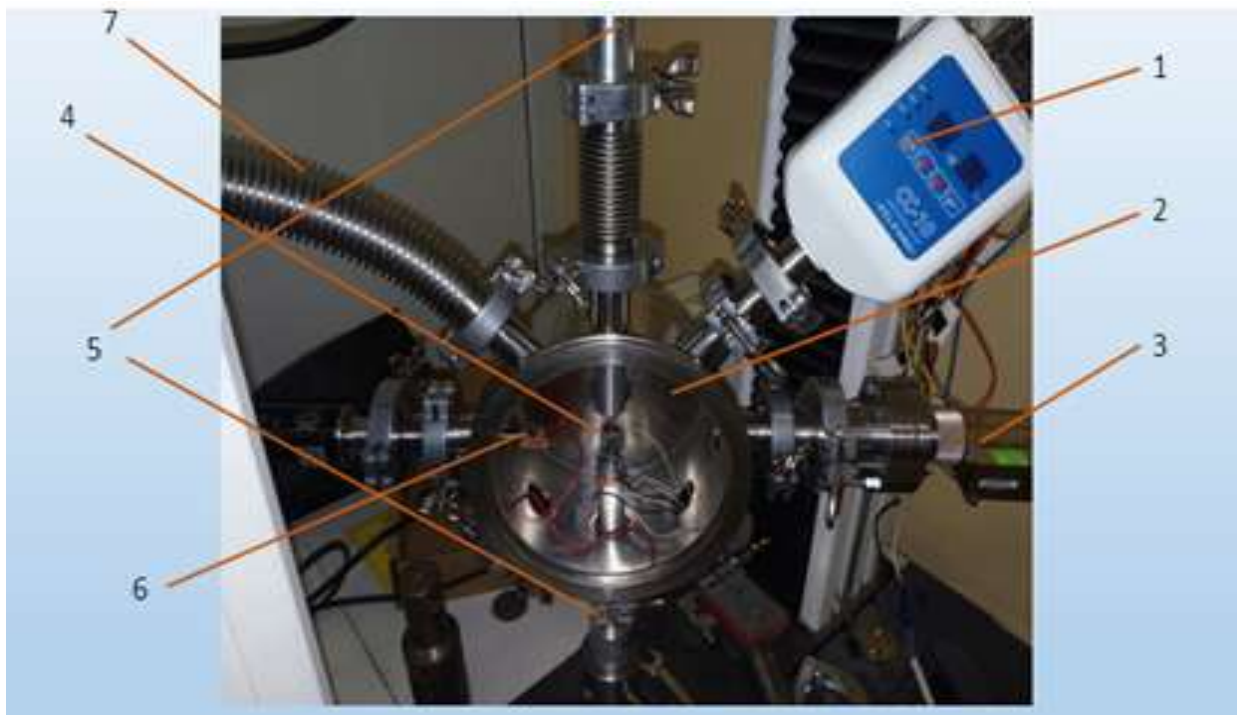


Рисунок 3 – Фотография опытно-экспериментальной установки для изучения нового эффекта (1 – вакуумметр TELEVAC CC-10, 2 – вакуумная камера, 3 – полупроводниковый детектор рентгеновского излучения фирмы Amptek CdTe - 100SDD, 4 – сборка пьезоэлектрических керамик, 5 – бойки деформационной машины, 6 – вакуумный разрядник, 7 – система вакуумной откачки)

При сжатии сборки, состоящей из двух пьезокерамических образцов, выполненных из материала ЦТБС-3М, на центральном медном высоковольтном электроде возникает потенциал: отрицательный, в случае, когда вектор спонтанной поляризации каждой керамики направлен к центральному медному электроду; положительный, когда вектор спонтанной поляризации направлен от центрального медного высоковольтного электрода к заземленным цинковым пластинам.

В случае возникновения отрицательного потенциала на центральном медном высоковольтном электроде, электроны, образованные при полевой эмиссии с поверхности центрального высоковольтного электрода, ускоряются в направлении к заземленным цинковым пластинам, далее тормозясь на

атомах цинка с испусканием тормозного и характеристического рентгеновского излучения.

В случае возникновения положительного потенциала на центральном медном высоковольтном электроде, свободные электроны ионизированных атомов остаточного газа в вакуумной камере ускоряются в направлении к центральному высоковольтному электроду, генерируя тормозное и характеристическое излучение на атомах меди.

Пьезокерамические образцы, выполненные из материала ЦТБС-3М, изготовлены в цилиндрической форме. Они представлены на рисунке 4. Диаметр данных образцов составляет $d = 6,3$ мм., высота $h = 15$ мм. Диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрического материала $\epsilon = 600 \div 1200$; пьезоэлектрический модуль $d = 1,7 \cdot 10^{-10}$ Кл/м.



Рисунок 4 – Фотография пьезоэлектрических образцов, выполненных из материала ЦТБС-3М, используемых при исследовании нового эффекта

Красная отметка, нанесенная на боковой поверхности, указывает на направление вектора спонтанной поляризации при сжатии. На торцевые поверхности пьезоэлектрической керамики нанесен тонкий проводящий слой из серебра.

Давление остаточного газа в вакуумной камере, оборудованной системой откачки, состоящей из форвакуумного и турбомолекулярного насосов, достигает порядка 10^{-4} Торр.

На рисунке 5 показан прибор, используемый для вакуумной откачки. Давление в вакуумной камере контролируется с помощью вакуумметра TELEVAC CC-10. Рентгеновское излучение регистрируется с помощью полупроводникового детектора XR – 100 SDD фирмы Amptek и аналого-цифрового анализатора PX5.



Рисунок 5 – Вакуумная система

На рисунке 6 представлена фотография полупроводникового детектора рентгеновского излучения. Спектры рентгеновского излучения отображаются на экране компьютера.



Рисунок 6 – Детектор рентгеновского излучения Amptek XR – 100 SDD

Следует отметить, что ПО, прилагаемое к измерительному прибору, осуществляющему детектирование рентгеновского излучения, позволяет производить измерения только в ограниченном временном диапазоне.

1.2.3 Результаты измерения спектров рентгеновского излучения, генерируемого при сжатии пьезоэлектрической керамики в вакууме

Проведены измерения спектров рентгеновского излучения, полученного при сжатии пьезоэлектрической керамики в вакууме. Измерения проводились при значении механической нагрузки равной 4 кН. Давление в вакуумной камере остаточного газа составляло 10^{-4} Торр. Были измерены спектры рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрической керамики в вакууме для разных полярностей высоковольтного центрального медного электрода.

На рисунке 7 (а, с) представлены полученные спектры рентгеновского излучения от пьезоэлектрической керамики в логарифмическом и линейном масштабе, зарегистрированные в случае возникновения отрицательного потенциала на центральном медном электроде. На рисунке 7 (b, d) представлены спектры рентгеновского излучения от пьезоэлектрической керамики в логарифмическом и линейном масштабе в случае возникновения положительного потенциала на центральном высоковольтном медном электроде [10].

На рисунке 7 (а) четко прослеживаются пики характеристического рентгеновского излучения, соответствующие атомам цинка $K_{\alpha} - 8,6$ кэВ, $K_{\beta} - 9,6$ кэВ, а также пики характеристического рентгеновского излучения атомов элементов, входящих в состав камеры, основным из которых является железо, с энергией излучения $K_{\alpha} - 6,4$ кэВ. Такое энергетическое распределение пиков характеристического рентгеновского излучения подтверждает возникновение отрицательного потенциала на высоковольтном медном центральном электроде, от которого под действием электрического поля и ускоряются свободные электроны.

На рисунке 7 (с) видны пики характеристического рентгеновского излучения атомов меди $K_{\alpha} - 8,04$ кэВ, $K_{\beta} - 8,9$ кэВ, входящей в состав центрального электрода, а также пик характеристического рентгеновского излучения атома титана, который входит в состав пьезоэлектрической керамики, $K_{\alpha} - 4,5$ кэВ. Данное энергетическое распределение пиков характеристического рентгеновского излучения подтверждает возникновение положительного потенциала на высоковольтном медном центральном электроде, к которому под действием электрического поля и ускоряются свободные электроны.

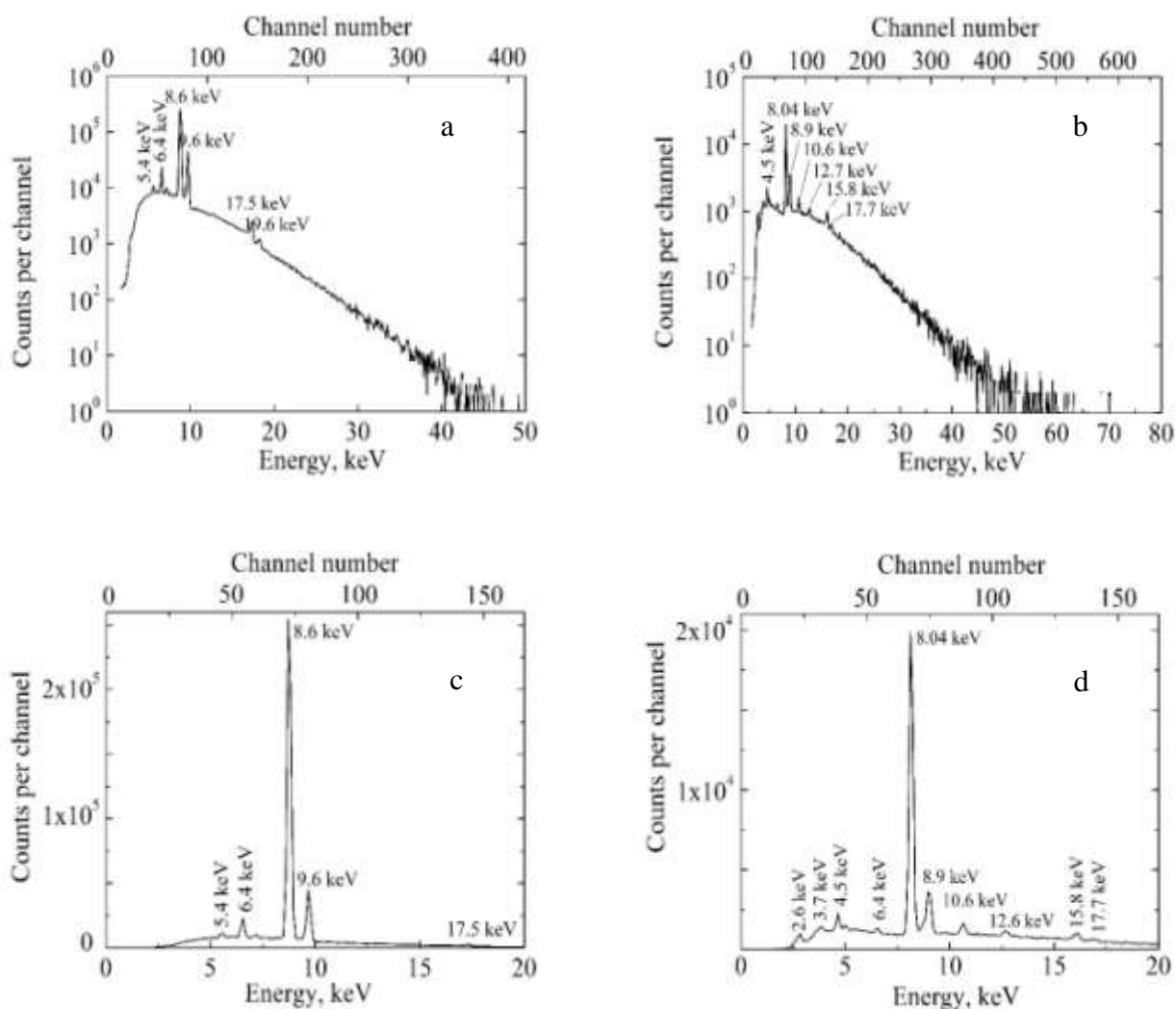


Рисунок 7 – Спектры рентгеновского излучения от пьезоэлектрической керамики в логарифмическом и линейном масштабе для отрицательной (а, с) и положительной (b, d) полярности высоковольтного центрального электрода

1.2.4 Результаты исследования зависимости граничной энергии и общего числа счетов от давления в вакуумной камере и величины нагрузки для каждой из полярностей

Были получены результаты для определения зависимости величины граничной энергии и общего числа счетов зарегистрированного рентгеновского излучения от давления остаточного газа в вакуумной камере. Спектр рентгеновского излучения набирался в течение 180 секунд; после

достижения механической нагрузки на пьезокерамические образцы в вакууме значения $F = 4$ кН. Давление остаточного газа в вакуумной камере варьировалась в диапазоне от 0,01 до 2 мТорр. Зависимости величины граничной энергии и общего числа счетов от давления остаточного газа в вакуумной камере, в случае, когда на высоковольтном центральном медном электроде возникал отрицательный потенциал, изображены на рисунке 8. На рисунке 9 представлены зависимости величины граничной энергии и общего числа счетов от давления остаточного газа в вакуумной камере, в случае, когда центральный электрод имел положительный потенциал [11,12].

Полученные зависимости представленных на рисунках 8, 9 сложно описать стандартными линейными или степенными функциями в аппроксимированном виде. Однако, следует отметить, что при достижении величины давления остаточного газа в вакуумной камере равной 1 мТорр полупроводниковый детектор рентгеновского излучения событий не регистрировал.

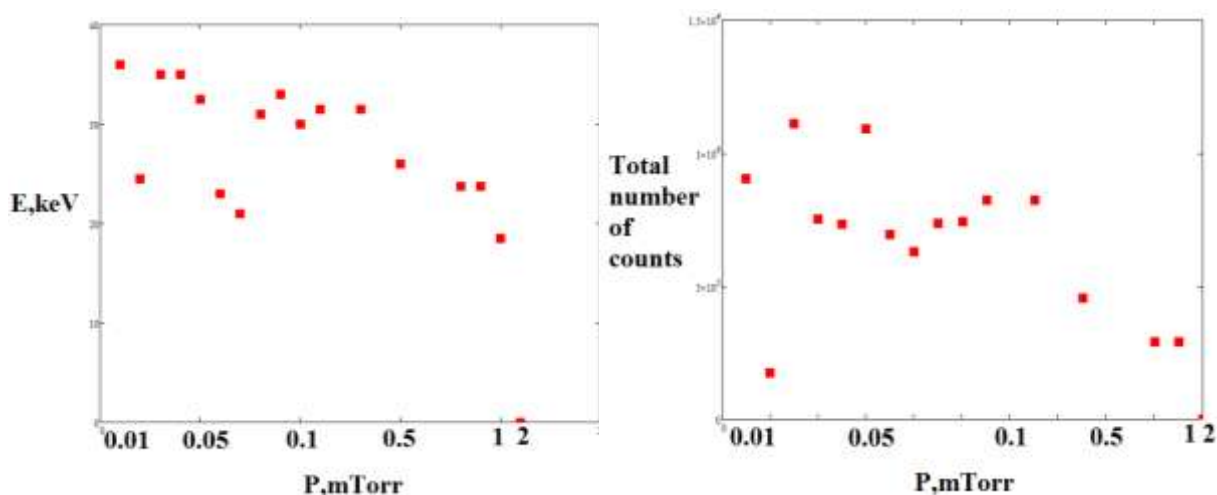


Рисунок 8 – Графики зависимости величины граничной энергии и общего числа счетов рентгеновского излучения от давления остаточного газа в вакуумной камере при отрицательной полярности центрального электрода

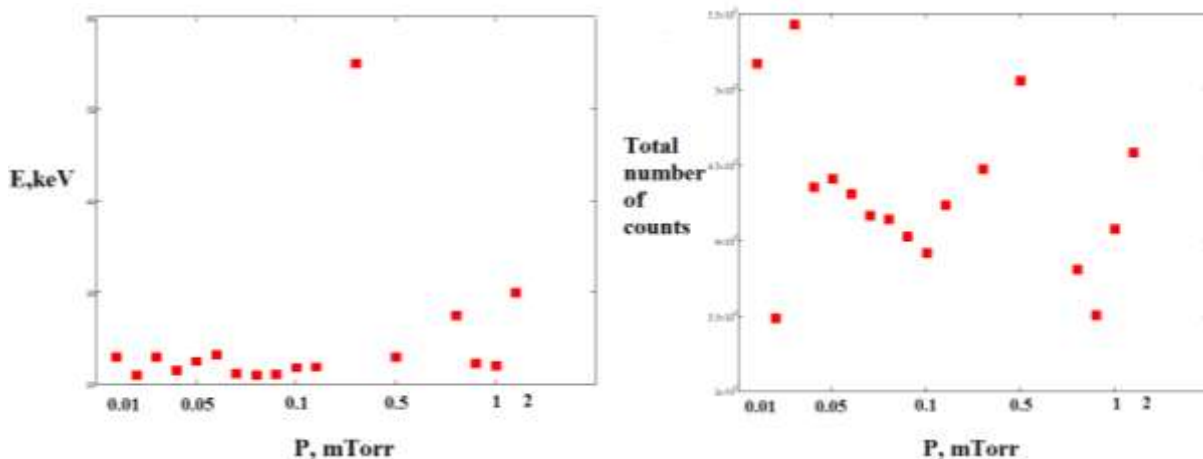


Рисунок 9 – Графики зависимости величины граничной энергии и общего числа счетов рентгеновского излучения от давления остаточного газа в вакуумной камере при положительной полярности центрального электрода

Можно сделать вывод, что при достижении указанного значения давления остаточного газа в вакуумной камере генерация рентгеновского излучения прекращается, и это является нижней пороговой ступенью рабочего диапазона.

Также получены результаты для определения зависимости величины граничной энергии и общего числа счетов от величины прилагаемой нагрузки. Измерения проводились при постоянном давлении остаточного газа в вакуумной камере равном 0,1 мТорр. Спектр рентгеновского излучения измерялся в течении 180 секунд.

Результаты, продемонстрированные на рисунке 10 показывают, что при идеальных условиях проведения экспериментальных исследований, без поверхностных пробоев, при отсутствии гажения пьезоэлектрической керамики, сопровождающегося ухудшением вакуума в камере, зависимость является для обеих полярностей возрастающей. То есть, с ростом нагрузки растет и энергия, и общее число счетов [13].

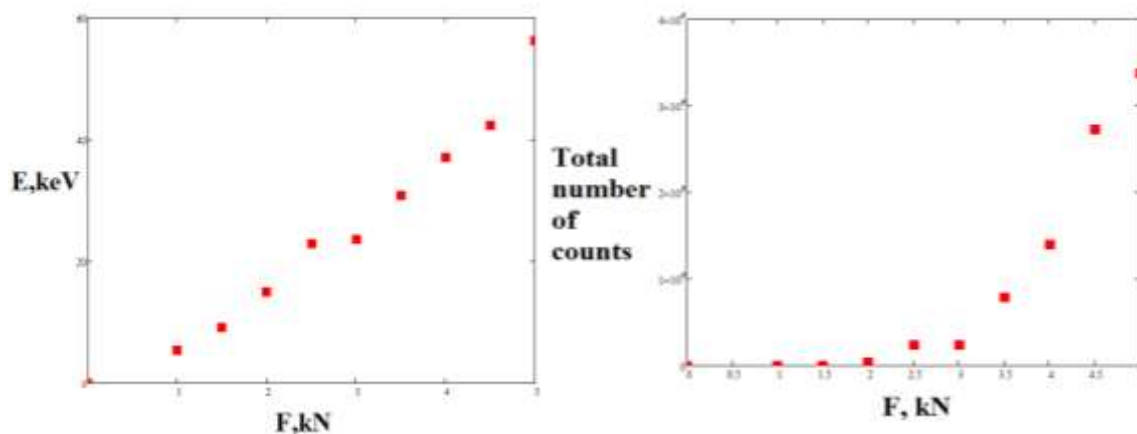


Рисунок 10 – Графики зависимости величины граничной энергии и общего числа счетов рентгеновского излучения от величины нагрузки при отрицательной полярности центрального электрода

Также были получены результаты для определения зависимости общего числа счетов и граничной энергии генерируемого рентгеновского излучения для случая, когда на поверхности медного центрального высоковольтного электрода образовывался положительный потенциал, рисунок 11.

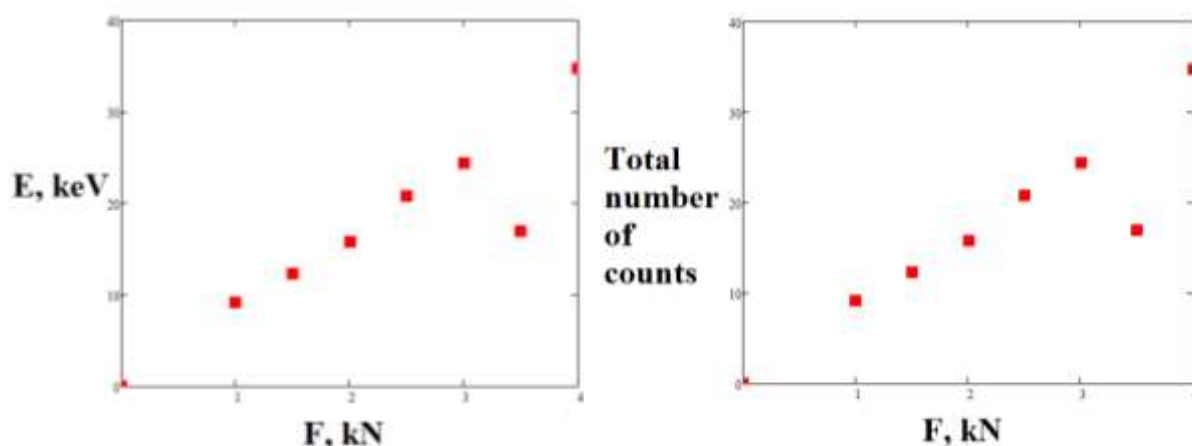


Рисунок 11 – Графики зависимости величины граничной энергии и общего числа счетов рентгеновского излучения от величины нагрузки при положительной полярности центрального электрода

1.3 Основные проблемы проведения экспериментальных исследований по генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрической керамики в вакууме и оптимизации характеристик излучения при создании нового источника. Постановка задачи исследования

Представленные на графиках рисунков 8-11 результаты являются основой для определения оптимальных характеристик рентгеновского излучения, генерируемого пьезоэлектрическим источником нового типа: величины граничной энергии и интенсивности рентгеновского излучения.

При этом следует отметить, что в зависимости от поставленной задачи, т.е. для каких именно целей будет разрабатываться миниатюрный генератор пьезоэлектрического излучения (что должно быть отражено в техническом задании заказчика), данные оптимальные характеристики могут быть разными.

Повышение точности определяемых оптимальных характеристик и, соответственно, качества разрабатываемого генератора, связано с условиями проведения экспериментов (как на этапе исследования, так и на этапе разработки конкретного источника с заданными свойствами).

Анализ предметной области и подходов к поддержке принятия решений при исследовании существующих и создании новых источников рентгеновского излучения показал, что в настоящее время возникла острая необходимость модернизации соответствующих процессов экспериментальных исследований для решения следующих проблем:

- получение достаточного количества измерений следующих величин: давления, температуры, силы сжатия, тока и спектра рентгеновского излучения, проведенных с любым заданным сколь угодно малым шагом, в том числе временным (это, в частности, позволит увеличить число экспериментальных точек на графиках, подобных рисункам 8-11, и не пропустить важную точку, соответствующую сочетанию параметров эксперимента по пьезоэлектрическому сжатию, определяющих оптимальные значения энергии рентгеновского излучения создаваемого генератора);

- обеспечение совместных измерений и синхронного контроля измеряемых величин, что позволит уменьшить величину математической погрешности измеряемых величин, обеспечит возможность сбора данных в широком диапазоне шага записи по времени, а также построить зависимости других изменяемых параметров от величины температуры, тока и давления остаточного газа в вакуумной камере, синхронизированных по времени.

Модернизация процессов при проведении экспериментальных исследований по генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрической керамики в вакууме, как указано выше, требует применения перспективных информационных технологий, средств автоматизации и методов компьютерного моделирования.

Цель работы – повышение эффективности и качества исследований по изучению свойств и созданию новых пьезоэлектрических источников рентгеновского излучения за счет разработки метода поддержки принятия решений по оптимизации их характеристик и автоматизации научных экспериментов.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- анализ предметной области и существующих подходов в сфере поддержки принятия решений при исследовании и создании источников рентгеновского излучения;

- проведение предварительных экспериментальных исследований по обнаружению рентгеновского излучения при сжатии пьезокерамики в вакууме, анализ полученных результатов;

- системное описание существующего процесса генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрика в вакууме, моделирование модернизированного процесса исследования и создания нового источника рентгеновского излучения, обеспечивающего возможность решения выявленных проблем;

- разработка метода поддержки принятия решений по созданию и оптимизации характеристик нового прибора – генератора рентгеновского излучения, основанного на эффекте пьезоэлектрического сжатия;

- разработка программной реализации с помощью среды LabView, актуализирующей модернизированный автоматизированный процесс экспериментальных исследований и применение разработанного метода, проведение сравнительного эксперимента.

2 Моделирование процесса проведения автоматизированных экспериментальных исследований и разработка метода поддержки принятия решений по созданию и оптимизации характеристик нового генератора рентгеновского излучения

2.1 Разработка функциональной модели существующего процесса проведения экспериментальных исследований

Проведено системное описание существующего процесса исследования и создания нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения и построена его функциональная модель «Как есть» с использованием графической нотации IDEF0, продемонстрированная на рисунке 12.

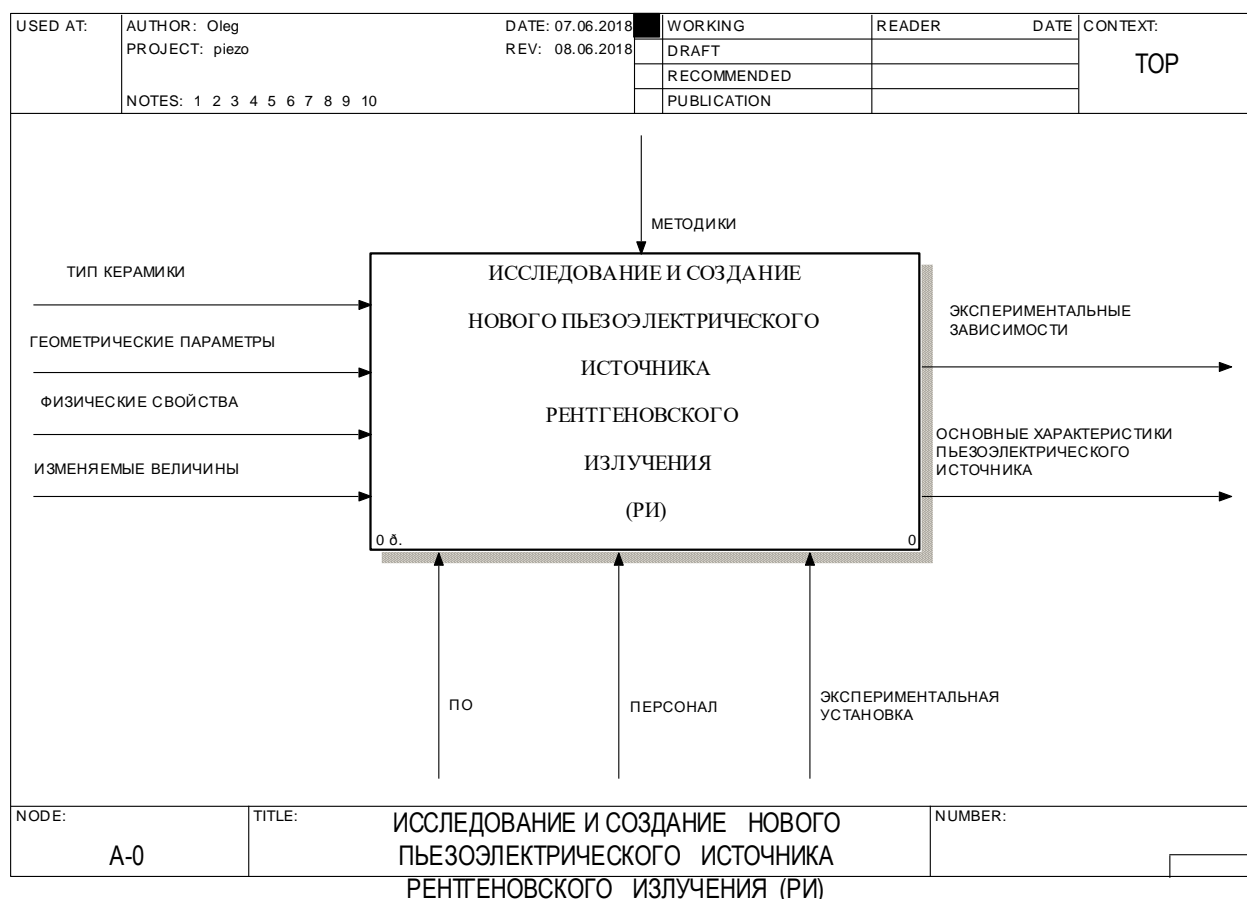


Рисунок 12 – Функциональная модель исследования и создания нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения, «Как есть»

Входами для исследуемого процесса являются:

- тип керамики: титонат – цирконат – борат свинца (ЦТБС-3М), титонат-цирконат свинца (ЦТС-19), титонам – цирконат – борат свинца (ЦТБС-3);
- геометрические параметры: диаметр D и высота h цилиндрического пьезоэлектрического образца, расстояние от центрального высокольтного медного электрода до полупроводникового детектора рентгеновского излучения, размеры центрального высокольтного электрода;
- физические свойства: диэлектрическая проницаемость ϵ , пьезоэлектрический модуль d , проводимость поверхностного слоя и емкость пьезоэлектрической керамики C ;
- изменяемые величины в ходе эксперимента: величина механической силы нагружения F , давление в вакуумной камере p и температура пьезоэлектрических образцов T .

Выходами в представленной диаграмме являются:

- основные характеристики пьезоэлектрического источника: граничная энергия E и общее число счетов на спектре рентгеновского излучения Total Counts;
- экспериментальные зависимости: общего числа счетов и граничной энергии зарегистрированного рентгеновского излучения от давления в вакуумной камере, температуры пьезокерамических образцов и величины механической нагрузки, временные зависимости зарегистрированного рентгеновского излучения и тока I на проводящей поверхности пьезоэлектрической керамики.

Необходимыми механизмами для осуществления данного процесса научных исследований являются:

- созданная экспериментальная установка (рисунок 3, п.1.2.2);
- персонал – люди, задействованные в реализации эксперимента;
- ПО, используемое для первичной обработки результатов измерений.

Управляющий поток в представленной модели – методики экспериментальных исследований, регулирующие все подэтапы процесса [14-15].

На рисунке 13 отражена детализация существующего процесса исследования и создания нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения, выполненная в нотации IDEF0. Представленная модель демонстрирует последовательность реализации двух основных этапов: «Процесс подготовки к экспериментальным исследованиям» и «Проведение экспериментальных исследований», их взаимосвязь, входные, выходные и управляющие потоки для каждого из представленных этапов.

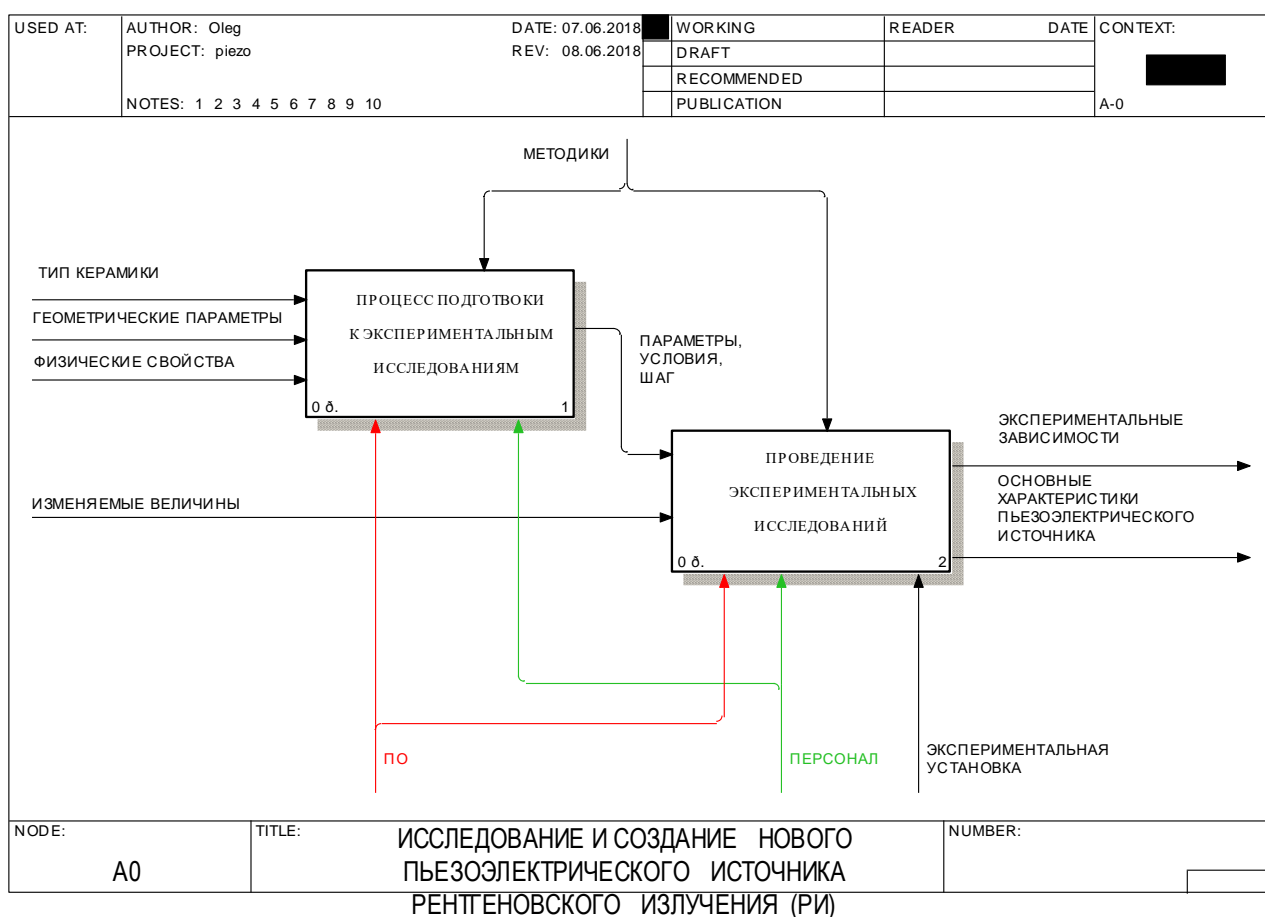


Рисунок 13 – Декомпозиция функциональной модели процесса исследования и создания нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения, «Как есть»

Процесс подготовки к экспериментальным исследованиям определяет необходимые параметры, условия и шаг проведения экспериментальных исследований по генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрических образцов в вакууме (выход блока 1).

На рисунке 14 представлена детализация существующего процесса подготовки к экспериментальным исследованиям, выполненная в нотации IDEF0. Представленная модель демонстрирует последовательность реализации двух основных подэтапов: «Подготовка экспериментальной установки» и «Настройка и проверка оборудования», их взаимосвязь, входные, выходные и управляющие потоки для каждого из представленных подэтапов.

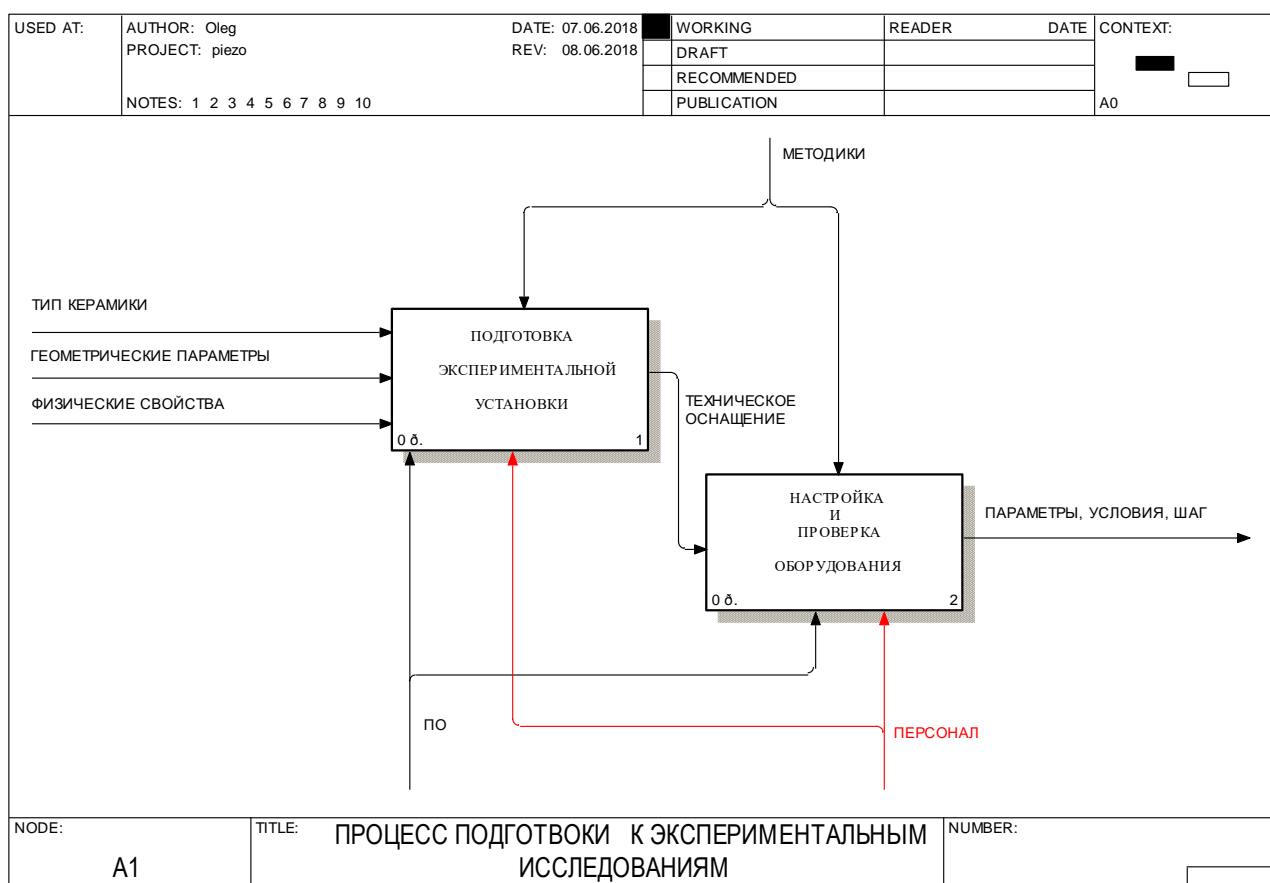


Рисунок 14 – Декомпозиция функциональной модели процесса подготовки к экспериментальным исследованиям, «Как есть»

На выходе процесса подготовки экспериментальной установки создается техническое оснащение, необходимое для использования в ходе проведения

конкретных экспериментальных исследований. На подэтапе, заключающемся в настройке и проверке оборудования, определяются и настраиваются требуемые для данной задачи технические параметры установки, условия проведения эксперимента, а также задаются пределы и определенный шаг измерений, в том числе временной.

На рисунке 15 представлена детализация существующего этапа «Проведение экспериментальных исследований», выполненная в нотации IDEF0. Представленная модель демонстрирует последовательную реализацию следующих основных подэтапов: «Получение экспериментальных данных», «Обработка результатов», их взаимосвязь, входные, выходные и управляющие потоки для каждого из представленных этапов.

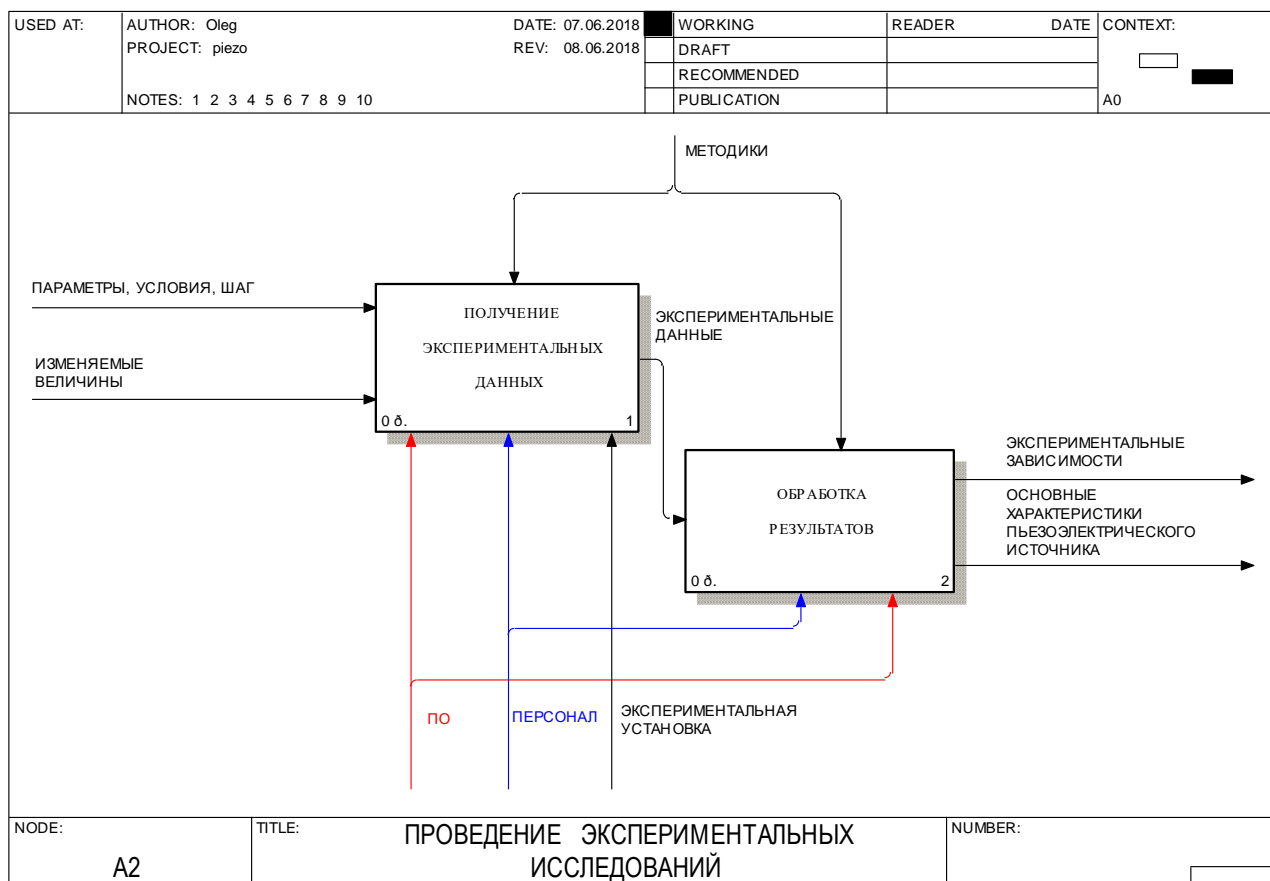


Рисунок 15 – Декомпозиция функциональной модели процесса проведения экспериментальных исследований, «Как есть»

Выходом процесса получения экспериментальных данных как этапа проведения экспериментальных исследований по генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрических образцов в вакууме являются полученные экспериментальные результаты. Далее, на этапе обработки представленных экспериментальных данных, осуществляется построение экспериментальных зависимостей:

- общего числа счетов и граничной энергии зарегистрированного рентгеновского излучения от давления в вакуумной камере;

- температуры пьезокерамических образцов и величины механической нагрузки, временные зависимости зарегистрированного рентгеновского излучения и тока на проводящей поверхности пьезоэлектрической керамики.

Следует отметить, что представленная на рисунках 12-15 детализация основного процесса исследования и создания нового источника рентгеновского излучения является неполной, требующей дальнейшей декомпозиции.

Рассмотрим декомпозицию четырех основных этапов: «Подготовка экспериментальной установки»; «Настройка и проверка оборудования»; «Получение экспериментальных данных»; «Обработка результатов», которые в свою очередь, представляют дальнейшую детализацию основного процесса исследования и создания нового источника рентгеновского излучения.

На рисунке 16 представлена декомпозиция процесса подготовки экспериментальной установки, выполненная в нотации IDEF0. Представленная модель демонстрирует последовательную реализацию следующих основных подэтапов: «Подготовка вакуумной арматуры», «Установка пьезокерамических образцов», «Подключение элементов спектрометрии», «Установка предварительной нагрузки на керамику», их взаимосвязь, входные, выходные и управляющие потоки.

Выходным потоком процесса подготовки вакуумной арматуры является вакуумная камера, являющаяся одним из основных элементов пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения. После проведения

процесса установки пьезокерамических образцов в вакуумную камеру получаем полную конструкцию пьезоэлектрического источника. Для дальнейшей регистрации и анализа рентгеновского излучения подключаются элементы спектрометрии и создается предварительная нагрузка на пьезокерамические образцы, что является полным техническим оснащением для возможности проведения эксперимента.

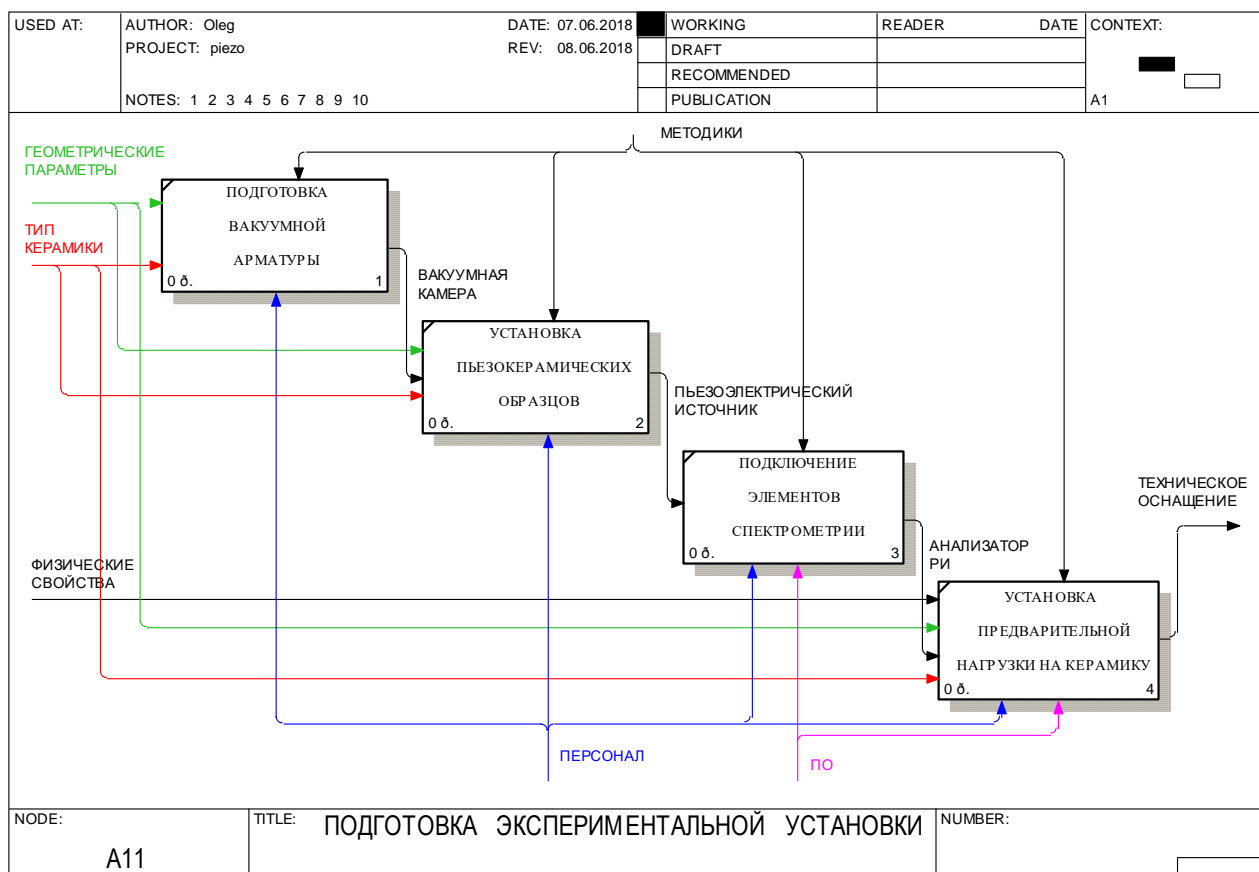


Рисунок 16 – Декомпозиция функциональной модели процесса подготовки экспериментальной установки, «Как есть»

На рисунке 17 представлена декомпозиция процесса настройки и проверки оборудования, выполненная в нотации IDEF0. Представленная модель демонстрирует последовательную реализацию следующих основных подэтапов: «Проверка системы откачки», «Проверка системы спектрометрии», «Проверка механической системы», «Проверка системы контроля», их взаимосвязь, входные, выходные и управляющие потоки.

Основные параметры, изменение которых регистрируется в ходе проведения научных исследований:

- изменение температуры T , $^{\circ}\text{C}$ каждого из пьезокерамических образцов, вызванное трением атомных плоскостей, при их смещении в процессе создания механической нагрузки на них;

- изменение величины давления p , мТорр остаточного газа в вакуумной камере, объясняемое процессом гажения пьезокерамического материала, которое увеличивает концентрацию молекул в вакуумном пространстве;

- регистрация спектра генерируемого рентгеновского излучения;

- изменение величины индуцированного заряда Q , Кл. на поверхности пьезоэлектрической керамики с изменением величины приложенной механической нагрузки F , Н.

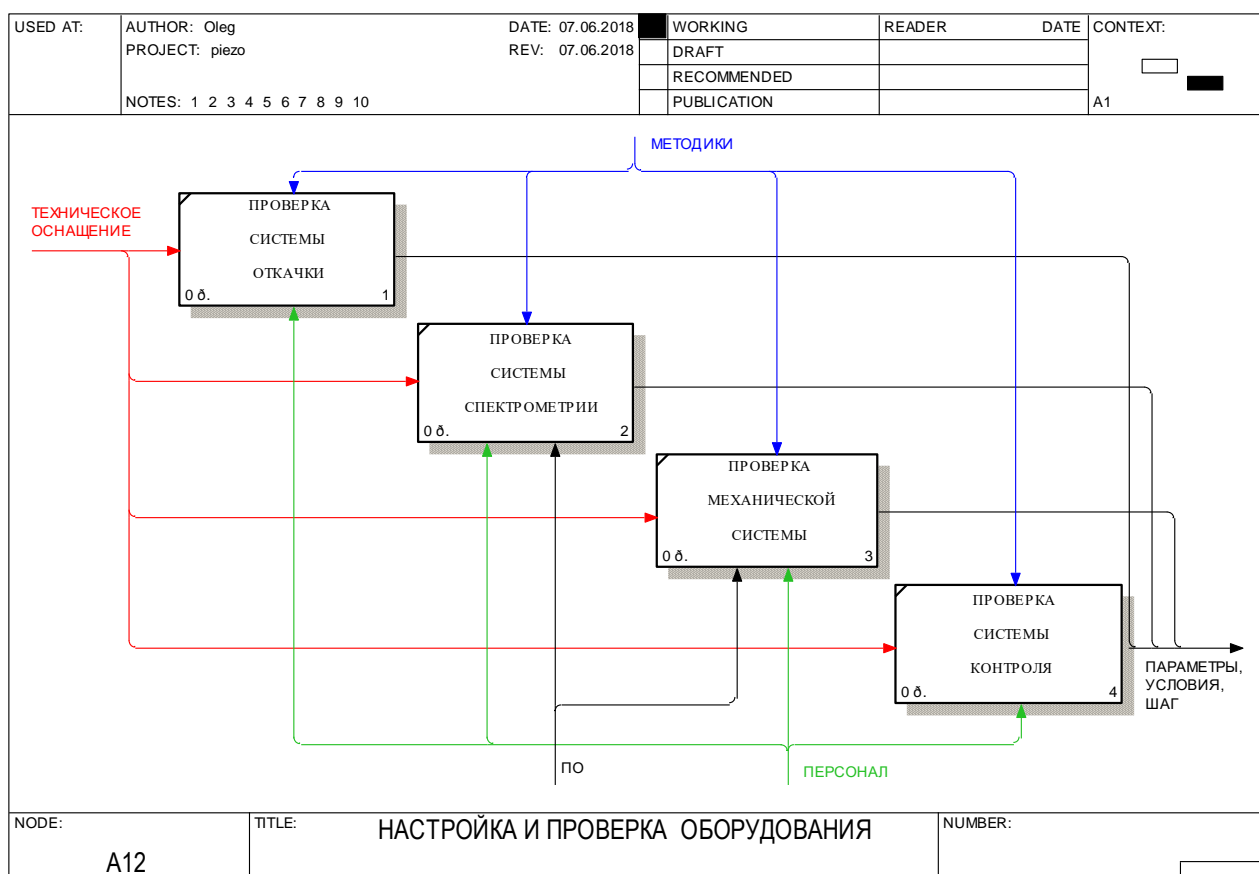


Рисунок 17 - Декомпозиция функциональной модели процесса настройки и проверки оборудования, «Как есть»

На рисунке 18 представлена декомпозиция процесса получения экспериментальных данных, выполненная в нотации IDEF0. Представленная модель демонстрирует последовательную реализацию следующих основных этапов: «Измерение температуры», «Измерение тока», «Измерение давления», «Измерение силы», «Измерение спектра рентгеновского излучения», их взаимосвязь, входные, выходные и управляющие потоки для каждого из представленных этапов.

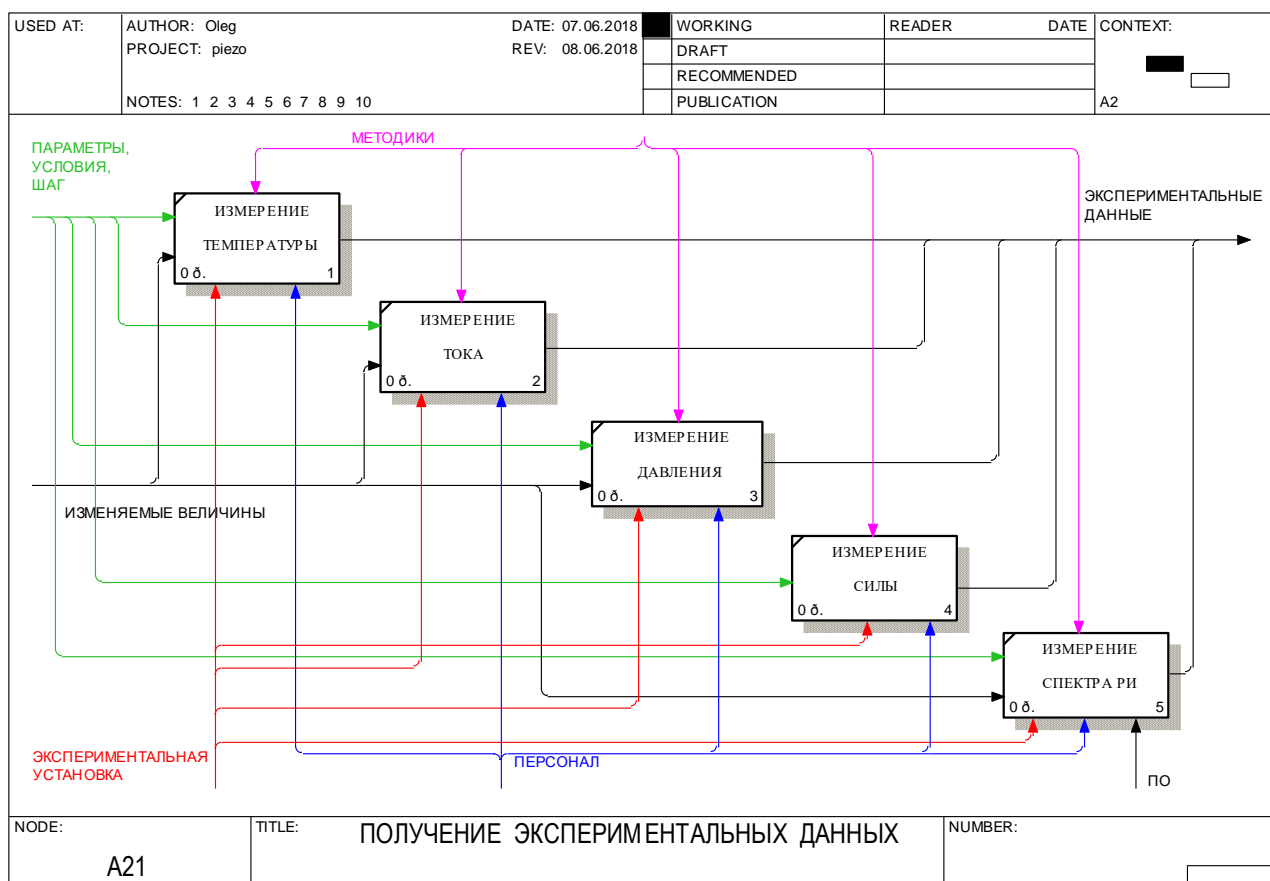


Рисунок 18 - Декомпозиция функциональной модели процесса получения экспериментальных данных, «Как есть»

После осуществления измерения параметров, перечисленных выше, осуществляется сбор экспериментальных данных и их последующая обработка. Декомпозиция данного процесса, выполненная в нотации IDEF0, представлена на рисунке 19. Предложенная модель демонстрирует

последовательную реализацию следующих основных этапов: «Получение зависимости характеристик рентгеновского излучения от давления», «Получение зависимости характеристик рентгеновского излучения от тока», «Получение зависимости характеристик рентгеновского излучения от температуры», «Получение зависимость характеристик рентгеновского излучения от силы», их взаимосвязь, входные, выходные и управляющие.

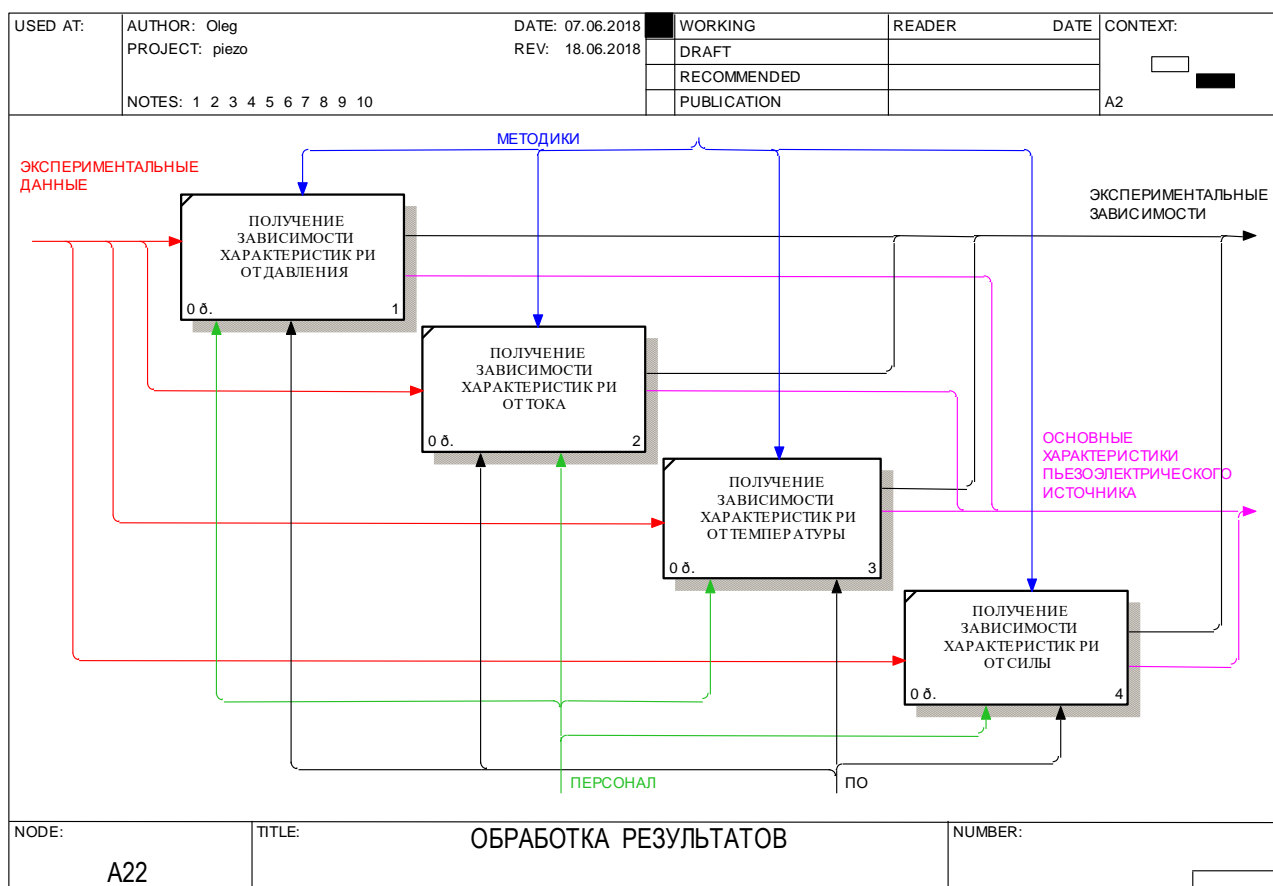


Рисунок 19 - Декомпозиция функциональной модели процесса обработки результатов, «Как есть»

Следует отметить, что измерение основных изменяемых параметров в процессе проведения экспериментальных исследований по генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрических образцов в вакууме осуществляется последовательно – не синхронизировано по времени. Это является основной проблемой, с которой исследователь сталкивается на этапе обработки полученных результатов. В результате снижается интенсивность

полученных данных, возможны пропуски важных точек на зависимостях, аналогичных рисункам 8-11. Кроме того, исследователь имеет узкие возможности проведения измерений со сколь угодно малым шагом, как по времени, так и в пределах изменения измеряемых величин. Таким образом, существующая система контроля изменения параметров требует внедрения средств автоматизации. Также требуется автоматизированная обработка полученных экспериментальных данных и построения экспериментальных зависимостей, на основе которых наблюдатель и получает оптимальные значения параметров и характеристик генерируемого рентгеновского излучения.

2.2 Модернизация процесса исследования и создания нового источника рентгеновского излучения за счет средств автоматизации и поддержки принятия решений

Следует отметить, что оптимизация параметров на каждом этапе существующего процесса исследования и создания нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения – это длительный, трудоемкий и затратный процесс, требующий постановки и повторения значительного числа лабораторных экспериментов. При этом происходят значительные затраты временных и людских ресурсов (на подготовку образцов для опытов, калибровку измерительной аппаратуры и т.п.). Ситуация по анализу результатов экспериментов и выявлению оптимальных параметров усложняется необходимостью работы с большим объемом разнородной, иногда слабоструктурированной информации.

Предложена модернизация существующего процесса исследования и создания нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения, функциональная модель которого представлена на рисунке 20 (контекстная диаграмма «Как будет»), выполненная с помощью нотации IDEF0. Модернизация осуществляется за счет:

- внедрения в процесс дополнительного управляющего потока «Метод поддержки принятия решений при исследовании и создании нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения»;

- добавления механизма «Средства автоматизации научных исследований».

На рисунке 21 представлена декомпозиция модернизированного процесса исследования и создания нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения, выполненная в нотации IDEF0. Представленная модель демонстрирует последовательную реализацию следующих основных этапов: «Процесс подготовки к экспериментальным исследованиям», «Проведение экспериментальных исследований» их взаимосвязь, входные, выходные и управляющие потоки, механизмы реализации с дополнительными потоками.

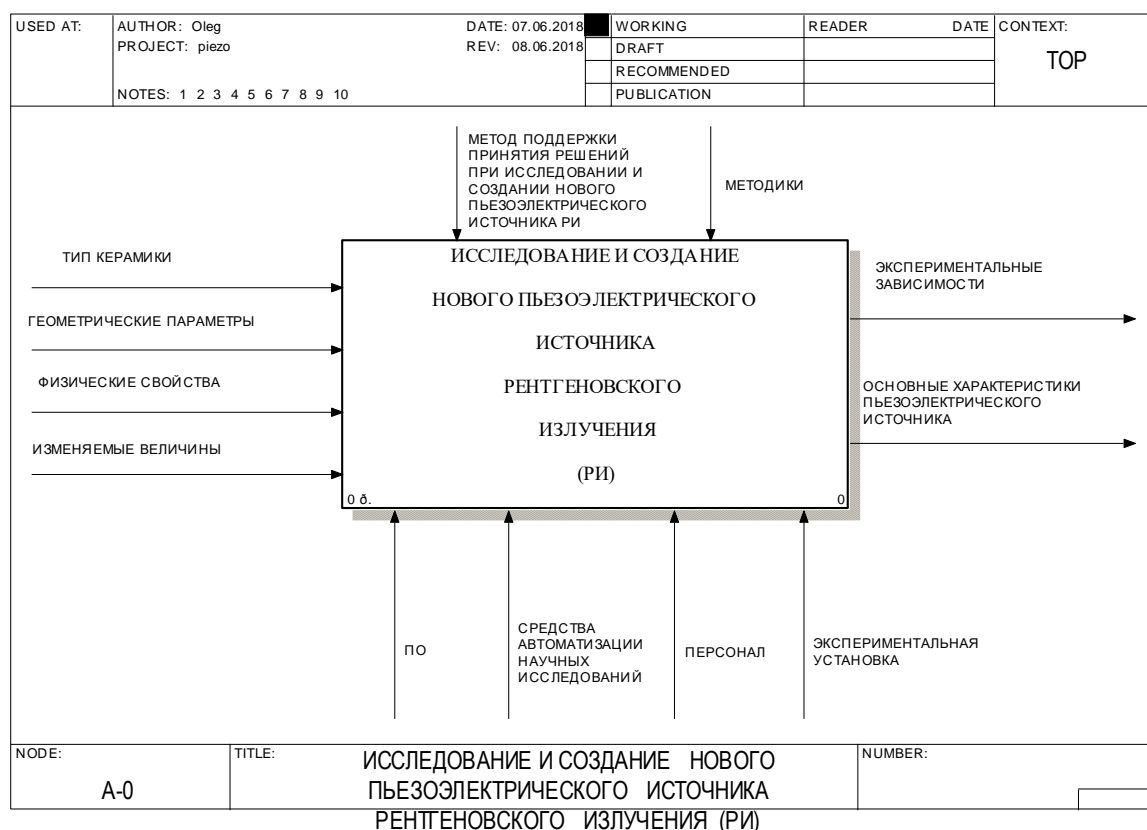


Рисунок 20 – Функциональная модель модернизированного процесса исследования и создания нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения, «Как будет»

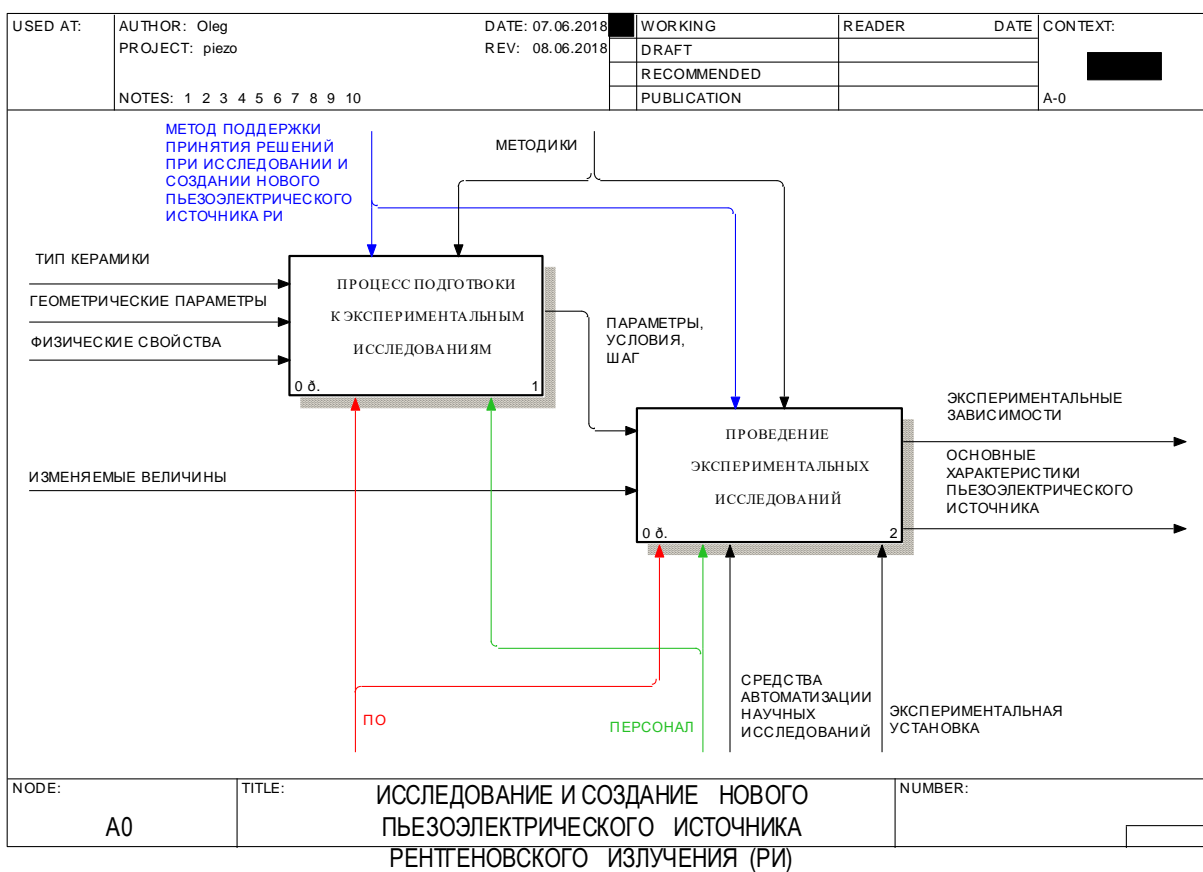


Рисунок 21 – Декомпозиция функциональной модели модернизированного процесса исследования и создания нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения, «Как будет»

Далее рассмотрим декомпозицию следующих подэтапов модернизированного процесса, где также внедрены дополнительные потоки: «Процесс подготовки к экспериментальным исследованиям» и «Процесс проведения экспериментальных исследований».

На рисунке 22 представлена декомпозиция модернизированного этапа «Процесса подготовки к экспериментальным исследованиям», выполненная в нотации IDEF0, «Как будет».

Дополнительным управляющим потоком на диаграмме, представленной на рисунке 22, в двух основных этапах является «Метод поддержки принятия

решений при исследовании и создании нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения».

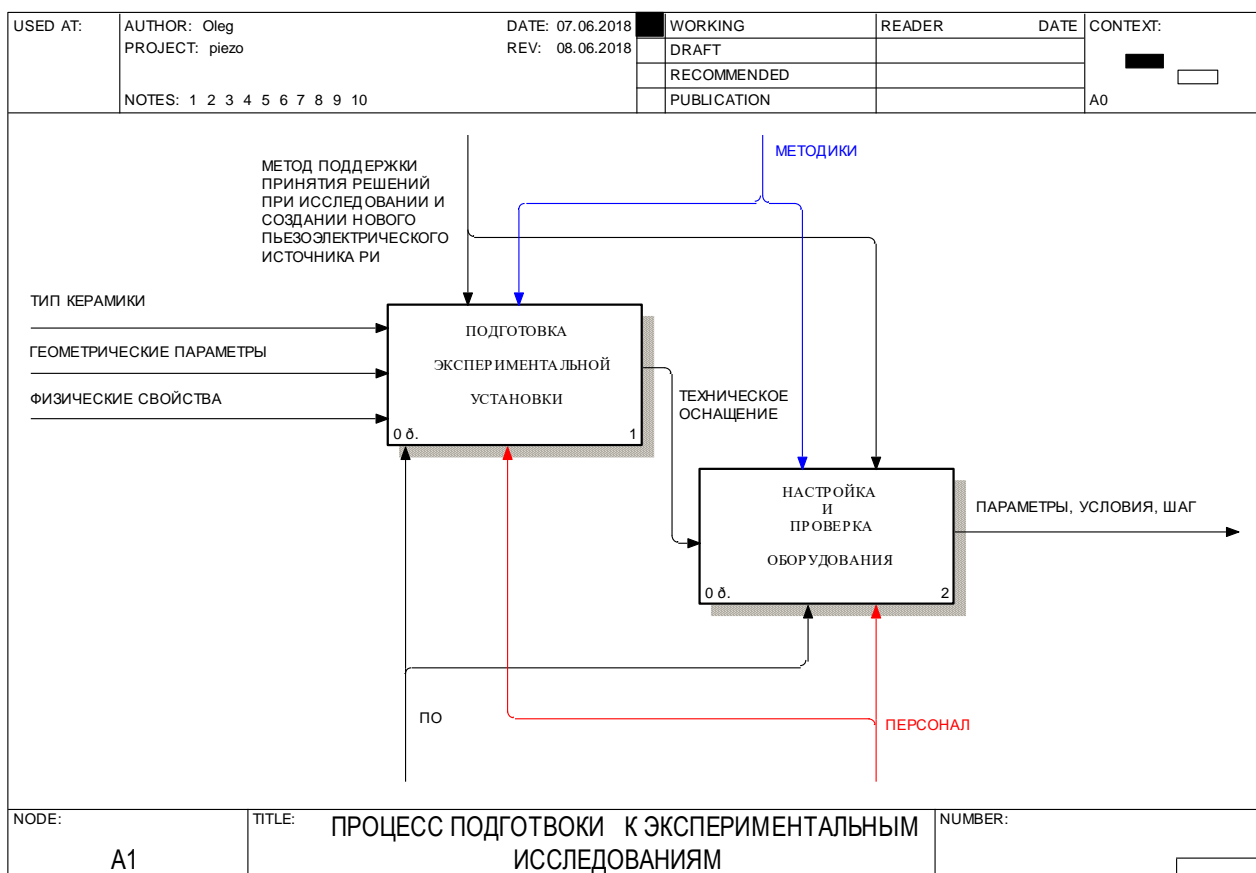


Рисунок 22 – Декомпозиция функциональной модели модернизированного процесса подготовки к экспериментальным исследованиям, «Как будет»

Основным блоком, требующим детальное рассмотрение в модернизированном процессе, является «Проведение экспериментальных исследований», так как именно на данном этапе требуется решение выше поставленных проблем, связанных с необходимостью одновременного контроля измеряемых параметров с требуемым шагом их изменения.

На рисунке 23 представлена декомпозиция модернизированного этапа «Проведение экспериментальных исследований», выполненная в нотации IDEF0, «Как будет».

Основными подэтапами, являющимися результатом декомпозиции модернизированного этапа «Проведение экспериментальных исследований» являются: «Автоматизированное получение экспериментальных данных с одновременным контролем измеряемых параметров» и «Автоматизированная обработка результатов экспериментов».

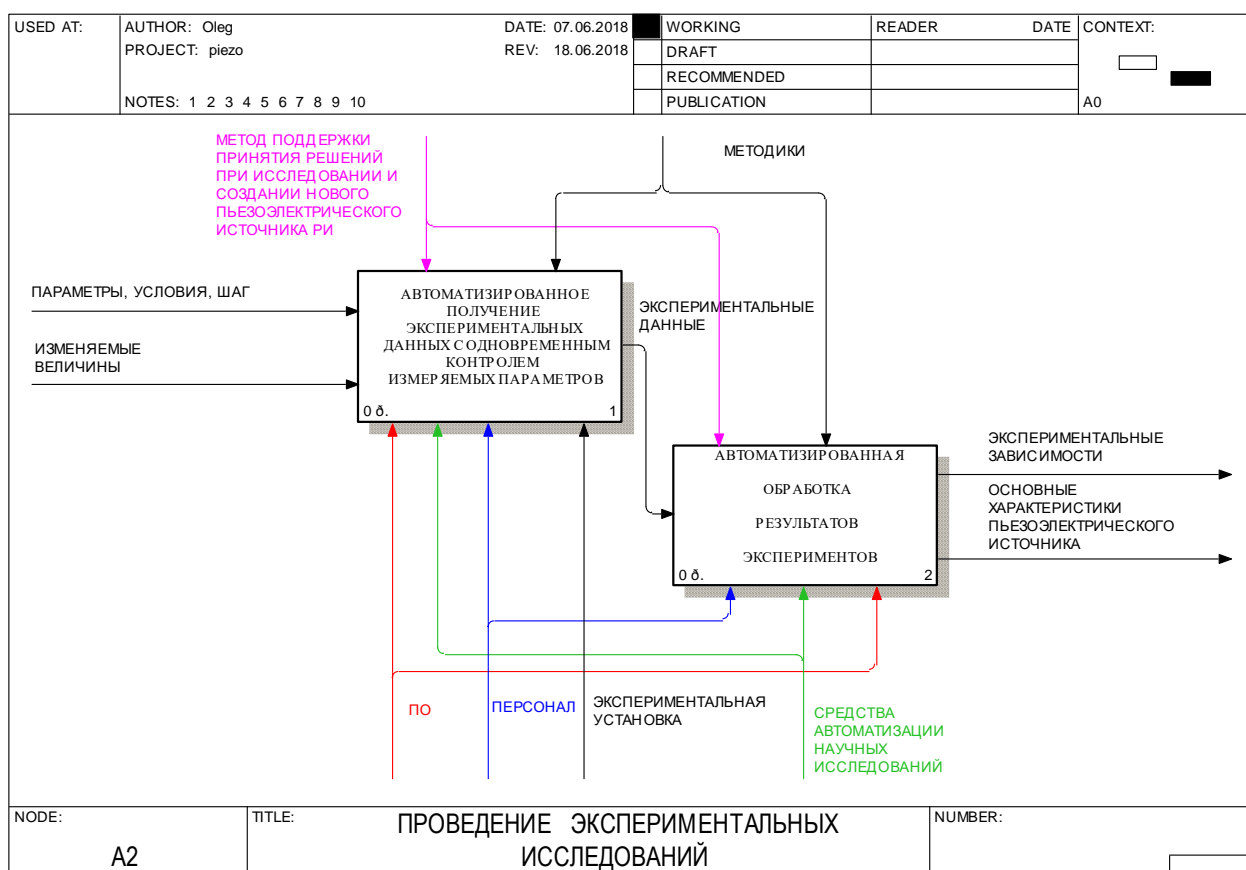


Рисунок 23 – Декомпозиция функциональной модели модернизированного этапа «Проведение экспериментальных исследований», «Как будет»

При декомпозиции также введены дополнительные потоки. Во-первых, это поток: «Средства автоматизации научных исследований». Во-вторых, механизм реализации модернизированного процесса «Метод поддержки принятия решений при исследовании и создании нового пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения».

Дальнейшая декомпозиция основных этапов модернизированного процесса, представленных на рисунке 23 осуществляется с помощью нотации IDEF3, которая позволяет описывать требуемых для модернизированного процесса одновременный контроль измеряемых параметров.

На рисунке 24 представлена декомпозиция процесса «Автоматизированное получение экспериментальных данных с одновременным контролем измеряемых параметров». На данной диаграмме отражено обеспечение синхронности процесса измерения изменяемых величин при проведении экспериментальных исследований. Такими измеряемыми величинами являются: температура T , $^{\circ}\text{C}$ и ток I , Кл на заряженной поверхности пьезокерамических образцов, давление P , мТорр остаточного газа в вакуумной камере, величина нагрузки F , кН, действующая в продольном направлении на пьезокерамику и спектр рентгеновского излучения.

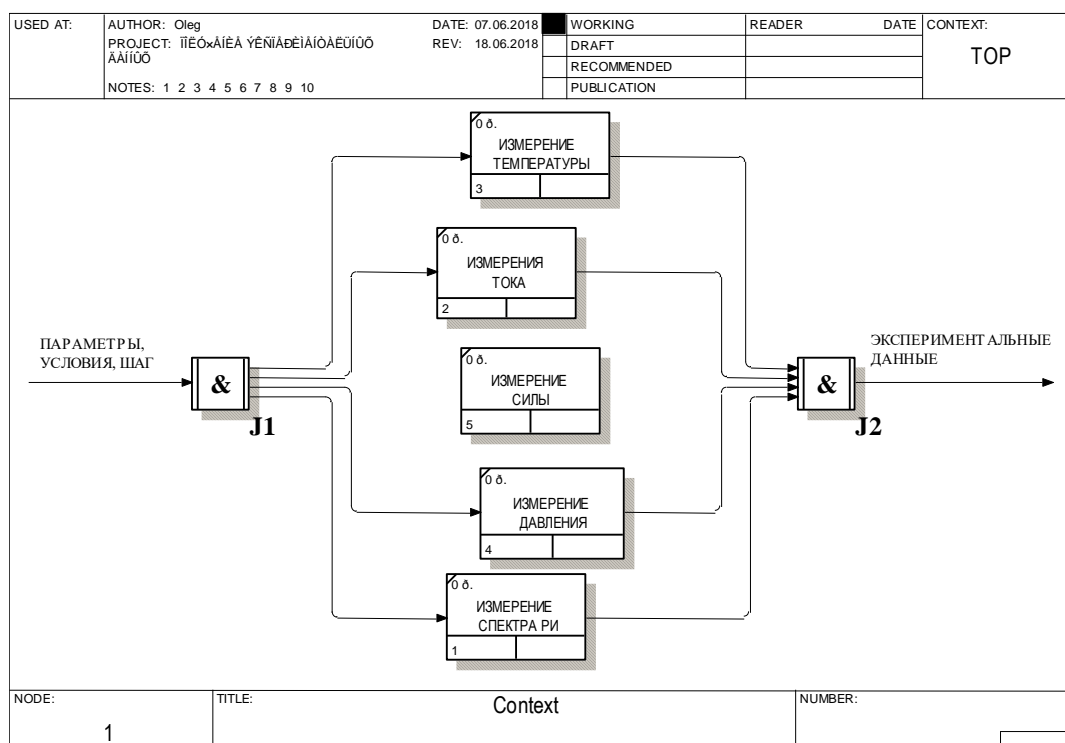


Рисунок 24 – Диаграмма (IDEF3) декомпозированного процесса автоматизированного получения экспериментальных данных с одновременным контролем измеряемых параметров, «Как будет»

Данные, полученные одновременно с требуемым интервалом шага записи измерения вышеперечисленных изменяемых параметров в процессе проведения эксперимента по генерации рентгеновского излучения с помощью сжатия пьезоэлектрических образцов в вакуумной камере, требуют дальнейшей автоматизированной и одновременной обработки, что так же осуществляется с помощью специально разработанной программной реализации. На рисунке 25 отражена декомпозиция этапа «Автоматизированная обработка результатов», выполненная с помощью нотации IDEF3, «Как будет».

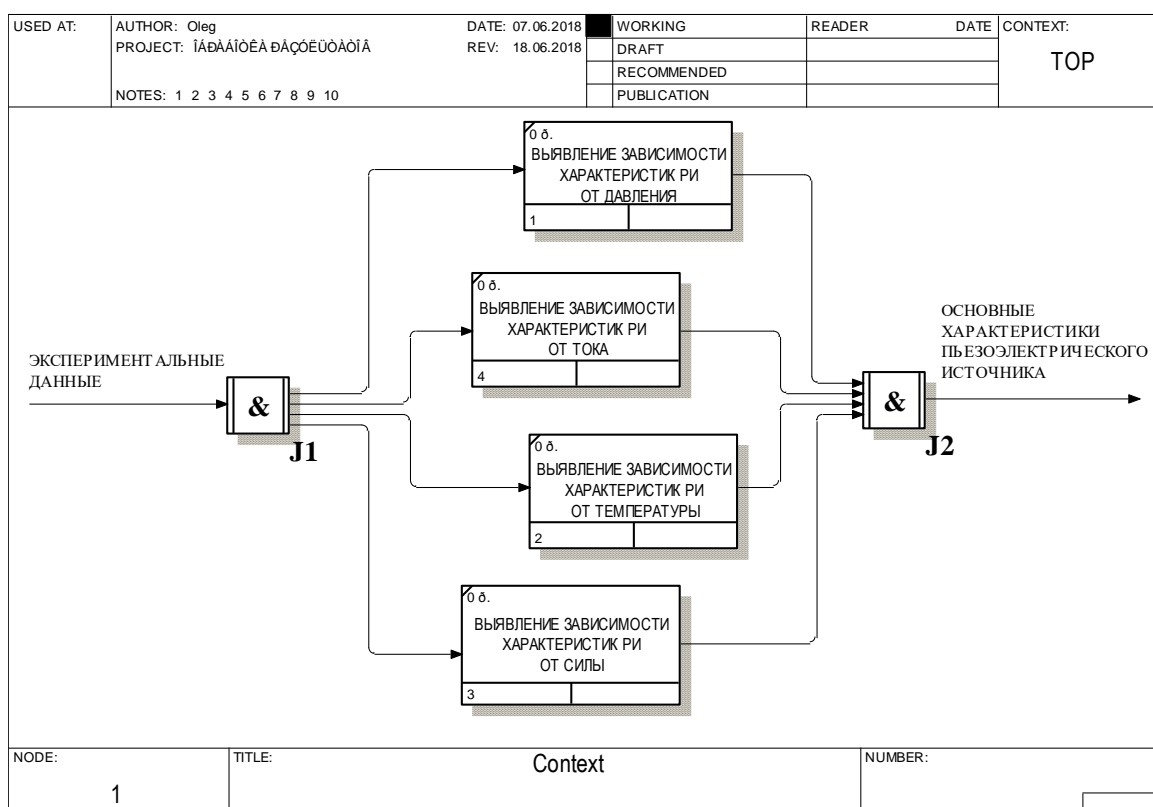


Рисунок 25 - Диаграмма (IDEF3) декомпозированного процесса автоматизированной обработки результатов, «Как будет»

На данной диаграмме отражена одновременная обработка полученных экспериментальных данных, представленных в виде зависимостей характеристик рентгеновского излучения от таких величин, как: ток, температура, сила, давление.

2.3 Разработка метода поддержки принятия решений по созданию и оптимизации характеристик нового прибора – пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения

Модернизированный процесс исследования и создания нового пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения требует разработки метода поддержки принятия решений по созданию и оптимизации характеристик нового прибора как нового управляющего потока – для основного этапа и всех подэтапов, выделенных на представленных функциональных моделях (рисунок 20-25). Основная суть разработки данного метода – реализация одновременных измерений всех необходимых входных и выходных параметров эксперимента: давление, ток, сила, температура и спектр рентгеновского излучения (их синхронный контроль) при варьировании с любым выбранным шагом изменения данных величин; автоматизированная обработка полученных результатов с определением необходимого набора входных параметров, обеспечивающего требуемые для решаемой задачи оптимальные характеристик создаваемого генератора - максимально возможные значения граничной энергии и интенсивности.

Разработанный метод включает необходимость автоматизации научных исследований.

Метод поддержки принятия решений по созданию и оптимизации параметров нового прибора – пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения представлен на рисунке 26 в виде алгоритма, который указывает, как осуществить данную конкретную деятельность в ходе проведения исследования, какие воздействия, в каком порядке и к каким объектам применить, как реализовать механизм автоматизации.

На начальном этапе исследователю предоставляется техническое задание на создание нового прибора как исходный материал, в котором должны быть отражены:

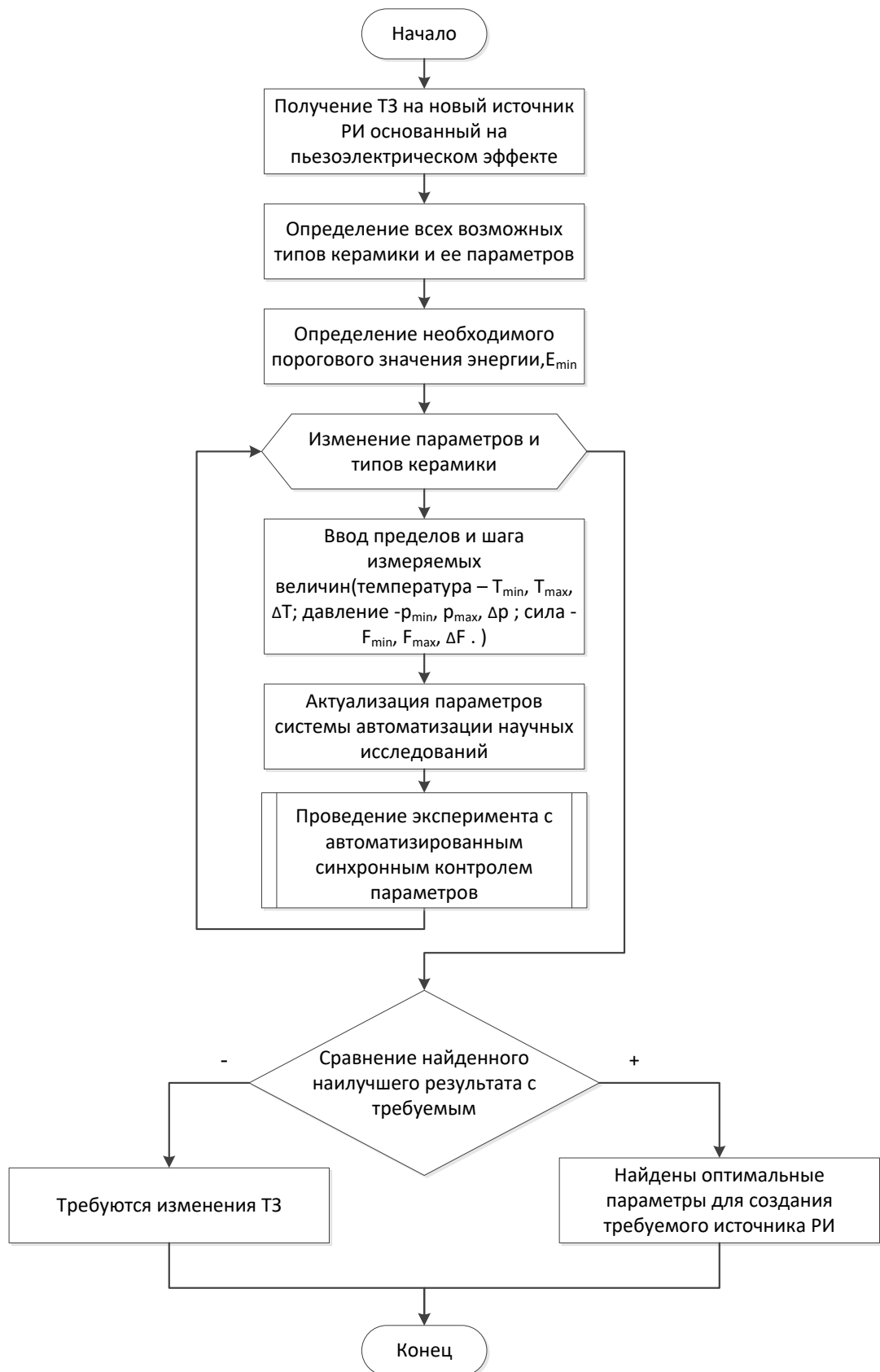


Рисунок 26 – Алгоритм, реализующий метод поддержки принятия решений по созданию и оптимизации параметров нового прибора – пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения

- цели и задачи разрабатываемого прибора (описание предметной области);
- технические требования и технико-экономические показатели, позволяющие осуществить оценку полученных результатов;
- уровень стандартизации и унификации;
- патентно-правовые показатели;
- специальные требования и др.

Исходя из анализа технического задания, исследователь определяет на следующем этапе: какие типы керамики будут использованы для проведения экспериментальных исследований, например, ЦТБС-3М, ЦТБС-3, ЦТС-24 и другие; какие параметры керамики будут соответствовать предъявляемым требованиям геометрические размеры и физические свойства с осуществлением в дальнейшем сравнительного анализа оптимальных характеристик соответствующих генераторов.

Далее, определяется пороговое значение энергии E_{\min} , кэВ генерируемого рентгеновского излучения, которое позволит решать заявленные в техническом задании задачи.

Далее включается основной цикл – определение типа и параметров керамики, которая позволит выдавать при работе пьезоэлектрического генератора рентгеновское излучение с энергией $E \geq E_{\min}$.

Для каждого керамического образца проводится цикл автоматизированных экспериментальных исследований, позволяющий определить наилучший результат E .

Необходимо определить пределы и шаг изменения входных параметров: температуры – $[T_{\min}, T_{\max}; \Delta T]$, давления – $[p_{\min}, p_{\max}; \Delta p]$, силы – $[F_{\min}, F_{\max}; \Delta F]$.

Далее актуализируется введенный в модернизированную систему исследования и создания нового источника рентгеновского излучения

механизм автоматизации научных исследований, который позволяет реализовать следующий этап – проведение эксперимента с автоматизированным синхронным контролем параметров (в заданных пределах, с требуемым шагом).

На рисунке 27 отдельно представлен алгоритм реализации основного цикла алгоритма рисунка 26. Он включает несколько вложенных циклов и реализует в результате проведения эксперимента с одновременным контролем входных и выходных параметров.

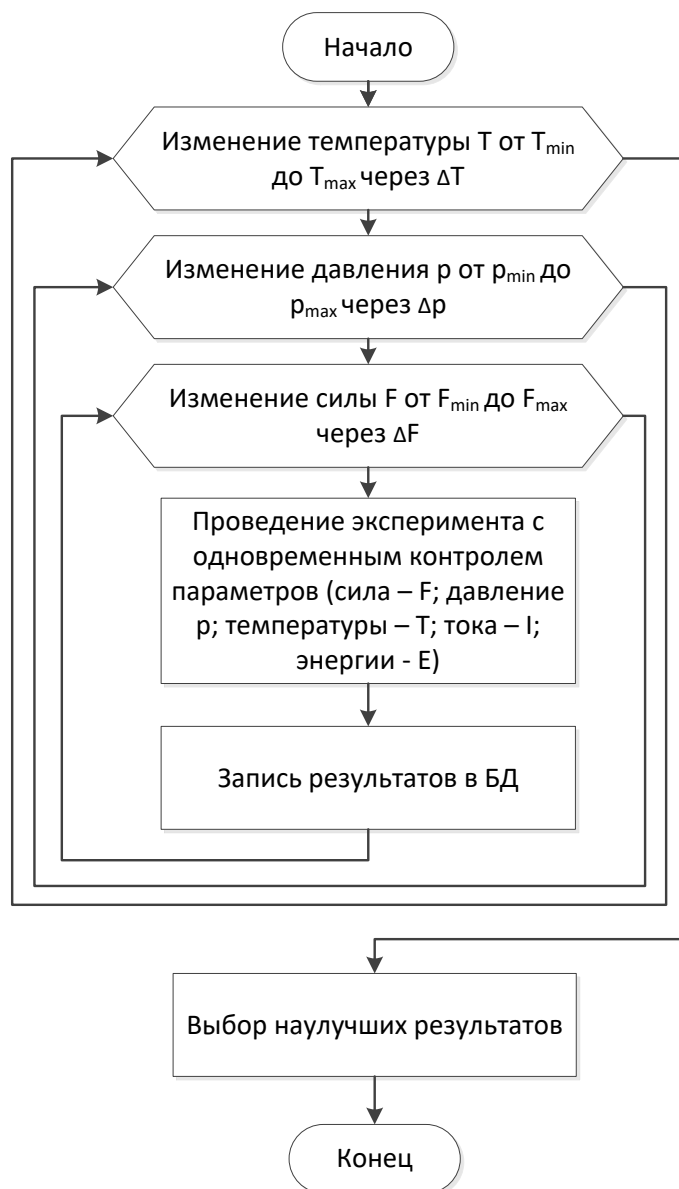


Рисунок 27 – Алгоритм проведения автоматизированного экспериментального исследования с одновременным контролем параметров

Как продемонстрировано на рисунках 26 и 27, в предложенном методе осуществляется автоматизированная обработка и сравнение полученных результатов, на основании которого можно осуществить выбор необходимого типа и параметров керамики – вещества пьезоэлектрика, оптимальных условий проведения экспериментов и отладки нового прибора, способного генерировать рентгеновское излучение с найденным максимально возможным значением энергии.

Далее, происходит сравнение наилучших полученных результатов с установленными на основании анализа, представленного заказчиком технического задания.

Если оптимальные параметры будут не найдены, то требуется пересмотр требований технического задания.

2.4. Выводы

Проведено системное описание существующего процесса генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрика в вакууме, построена соответствующая функциональная модель «Как есть», с использованием нотации IDEF0, проведена детализация функциональной модели, демонстрирующая все подэтапы процесса и их взаимосвязи.

Осуществлено моделирование модернизированного процесса «Как будет», с использованием нотации IDEF0 и IDEF3, обеспечивающего возможность автоматизированного одновременного контроля всех выходных и входных параметров с заданным шагом. В модернизированный процесс введен дополнительный управляющий поток и механизм реализации.

Разработан метод поддержки принятия решений по созданию и оптимизации нового прибора генератора рентгеновского излучения, который является управляющим потоком для модернизированного процесса. Разработаны алгоритмы, реализующие предложенный метод и модели.

3 Разработка программной реализации, актуализирующей модернизированный процесс исследования и создания нового источника рентгеновского излучения

3.1 Обоснование выбора средства автоматизации научных исследований

Сегодня имеется достаточно широкий выбор инструментов для возможности автоматизации проведения научных исследований с созданием соответствующей программной реализации как на стандартных языках программирования, например, C/C++, так и с помощью специальных пакетов для прикладного программирования. Последние с точки зрения их применения для автоматизации экспериментальных исследований можно разделить на две основные группы, как это продемонстрировано в таблице 1.

Нами для реализации процесса автоматизации экспериментальных исследований при исследовании и создании пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения нового типа был выбран пакет LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, разработчик – американская компания National Instruments [16]), на основании комплекса его следующих преимуществ перед остальными представленными пакетами:

- возможность разработки программной реализации для организации эффективного взаимодействия с измерительной аппаратурой, а также сбора, обработки и отображения информации и результатов;
- обеспечение адекватного решения проблемы проведения синхронного контроля измеряемых величин, варьирования в требуемом диапазоне шага изменения параметров;
- автоматизация построения и анализа полученных экспериментальных зависимостей, позволяющая определить оптимальные характеристики создаваемого источника;

Таблица 1 – Назначение систем прикладного программирования при решении задач автоматизации экспериментальных исследований

№ п/п	Название инструмента прикладного программирования	Основные направления использования	Способ программирования
1	LabVIEW Agilent VEE	Автоматизация лабораторного эксперимента, также создание специальных приложений, связанных с взаимодействием лабораторным оборудованием	Графические функционально-ориентированные, использующие функционально-логический принцип конструирования
	Measurement Studio LabWindows/CVI		Текстовые или текстово-графические, использующие элементы визуального текстового программирования для создания пользовательского интерфейса
2	SCADA -Supervisory Control And Data Acquisition		
	LabVIEW/DSC	Создание прикладного программного обеспечения в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП) промышленной автоматике	Графические функционально-ориентированные, использующие функционально-логический принцип конструирования
	InTouch Трейс Моуд		Графические объектно-ориентированные, основанные на применении графических образов объектов АСУТП в качестве элементов программирования

- данная графическая система позволяет создавать программы, практически не уступающие по эффективности программам, написанным в текстовых пакетах;

- графическая программная реализация, написанная с использованием функционально-логического принципа конструирования, более наглядна, легче модифицируются и отлаживаются, быстрее разрабатываются;

- разработчиком графического приложения может быть непосредственно исследователь – инженер, технолог;

- является открытой системой программирования и имеет встроенную поддержку всех применяемых в настоящее время программных интерфейсов, таких как Win32 DLL, COM, .NET, DDE, сетевых протоколов на базе IP, DataSocket и др.;

- в состав LabVIEW входят библиотеки управления различными аппаратными средствами и интерфейсами, такими как PCI, CompactPCI/PXI, VME, VXI, GPIB (КОП), PLC, VISA;

- программные продукты, созданные с использованием LabVIEW, могут быть дополнены фрагментами, разработанными на традиционных языках программирования, например, C/C++, а также можно использовать модули, разработанные в LabVIEW в проектах, создаваемых в других системах программирования.

В среде LabVIEW используется специализированный язык графического программирования G. Соответствующая программа, написанная в данной среде на языке G называется виртуальным прибором (VI - virtual instrument). Внешнее графическое представление и функции виртуального прибора имитируют работу реальных физических приборов [17]. LabVIEW содержит полный набор приборов для сбора, анализа, представления и хранения данных. Источником кода виртуального инструмента служит блок-схема программируемой задачи [18].

Выбор данной среды для разработки программной реализации также связан с тем, что большинство оборудования в МНОЛ радиационной физики НИУ «БелГУ» надежно управляется с помощью платы фирмы National Instruments, с которой и совместима среда LabView.

3.2. Разработка программной реализации и рекомендаций по применению

Для модернизации процесса исследования и создания нового источника рентгеновского излучения за счет введения нового механизма – «Средства автоматизации научных исследований» и применения метода поддержки принятия решений по оптимизации характеристик создаваемого пьезоэлектрического генератора, была разработана программная реализация в среде LabView [19,20].

Данная программная реализация позволяет одновременно контролировать несколько, в том числе все, параметры эксперимента и осуществлять автоматизированную обработку результатов исследований.

На рисунке 28 изображена схема, описывающая механизм автоматизированного контроля параметров, измеряемых в ходе проведения эксперимента, с помощью разработанной программной реализации.

Как уже упоминалось выше, при проведении автоматизированных экспериментальных исследований по генерации рентгеновского излучения с помощью сжатия пьезоэлектрической керамики в вакууме осуществляется одновременный контроль сразу нескольких изменяемых параметров: температура, ток, давление, сила нагружения и спектр рентгеновского излучения.

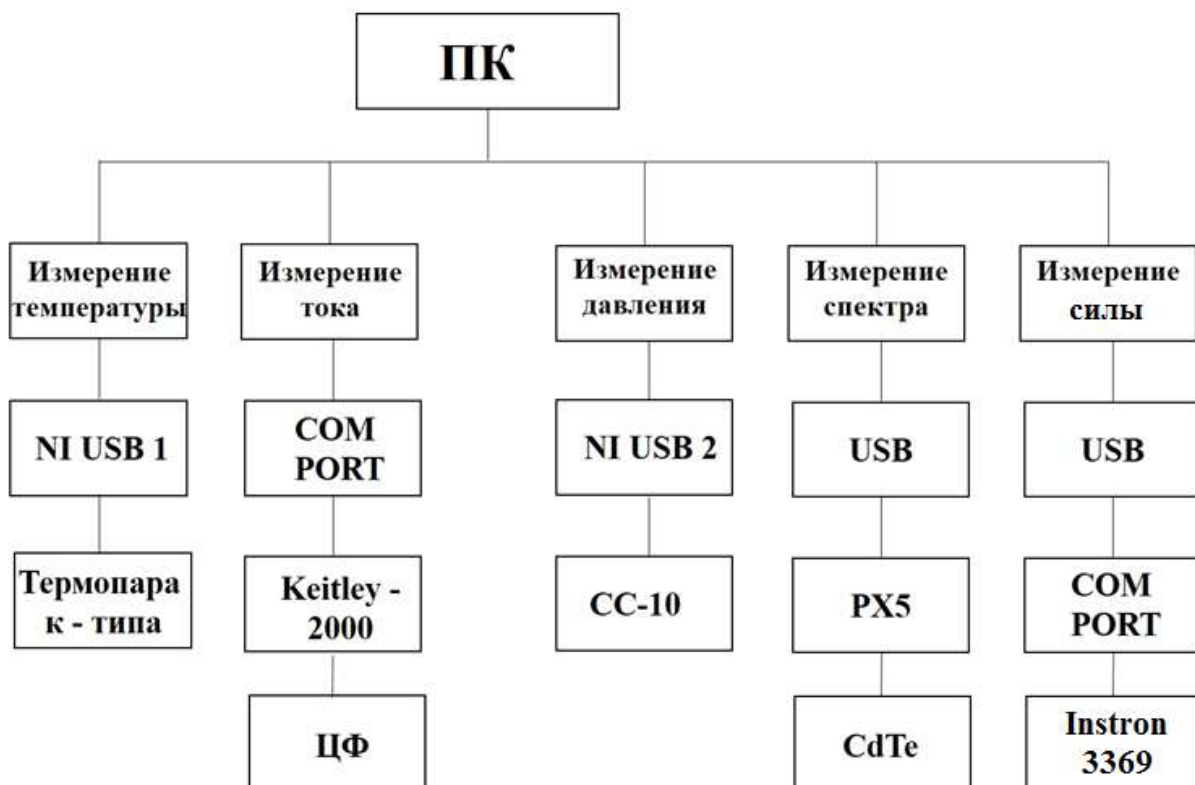


Рисунок 28 – Схема контроля параметров в процессе проведения автоматизированного эксперимента

Измерение температуры происходит с помощью термопары к – типа, представляющей собой сплав двух металлов, далее сигнал поступает на аналоговый вход платы National Instruments [21-26]. Далее, на экране компьютера с помощью разработанной программной реализации в среде Labview выводится график изменения температуры с течением времени. На рисунке 29 изображен данный блок структуры программной реализации – графической диаграммы.

Контроль изменения давления остаточного газа в вакуумной камере осуществляется с помощью вакуумметра фирмы Televac CC-10.

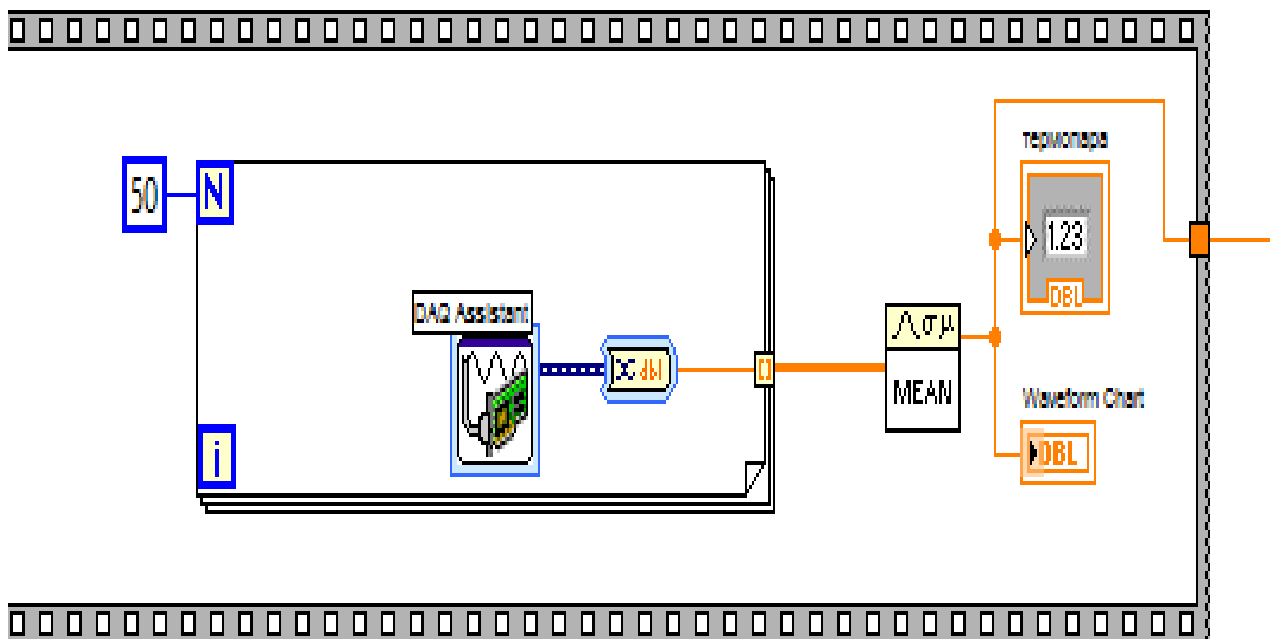


Рисунок 29 – Блок структуры программной реализации, отвечающий за контроль изменения температуры

Данный вакуумметр оборудован возможностью сбора данных и хранения их на персональном компьютере, что осуществляется также с помощью платы, National Instruments, оборудованной сразу несколькими аналоговыми входами, что позволяет производить одновременное подключение сразу нескольких измерительных приборов. На рисунке 30 представлена графическая блок-диаграмма разработанной программной реализации, отвечающая за измерение давления остаточного газа в вакуумной камере с течением времени.

Измерение тока с поверхности пьезокерамических образцов происходит путем передачи индуцированного на их поверхности заряда через щуп, выполненный из проводящего материала, на измерительный прибор высокой точности Keitley – 2000, предназначенный для измерения токов, порядка пА.

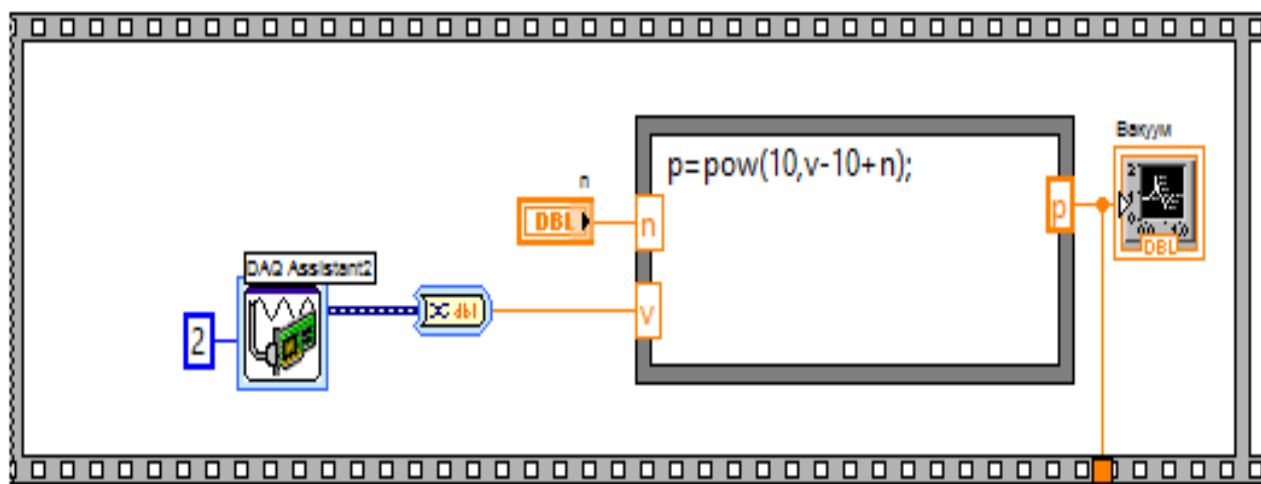


Рисунок 30 – Блок структуры программной реализации, отвечающий за контролирование изменения давления остаточного газа в вакуумной камере

Далее, измерительный прибор подключается через COMPORT к персональному компьютеру, где в разработанной на платформе LabView программной реализации, выводятся значения изменения тока по времени. На рисунке 31 изображен графический блок структуры программной реализации, отвечающий за измерение тока с поверхности пьезоэлектрических образцов в вакууме.

Измерение величины нагрузки, приложенной на пьезоэлектрические образцы производится с помощью датчиков механического давления, внедренных в устройство деформационной машины Instron-3369. Значения приложенной нагрузки выводится на экране персонального компьютера, что обеспечивается с помощью поставленного вместе с деформационной машиной программного обеспечения, позволяющего также контролировать скорость изменения величины нагрузки. Также данной программное обеспечение позволяет строить деформационные кривые, по которым можно судить, например, о пределе прочности пьезокерамического образца. Величина механической прочности пьезокерамических образцов является определяющим физическим параметром, так как с увеличением предела прочности растет и граничная энергия рентгеновского излучения, генерируемого пьезоэлектрическим источником.

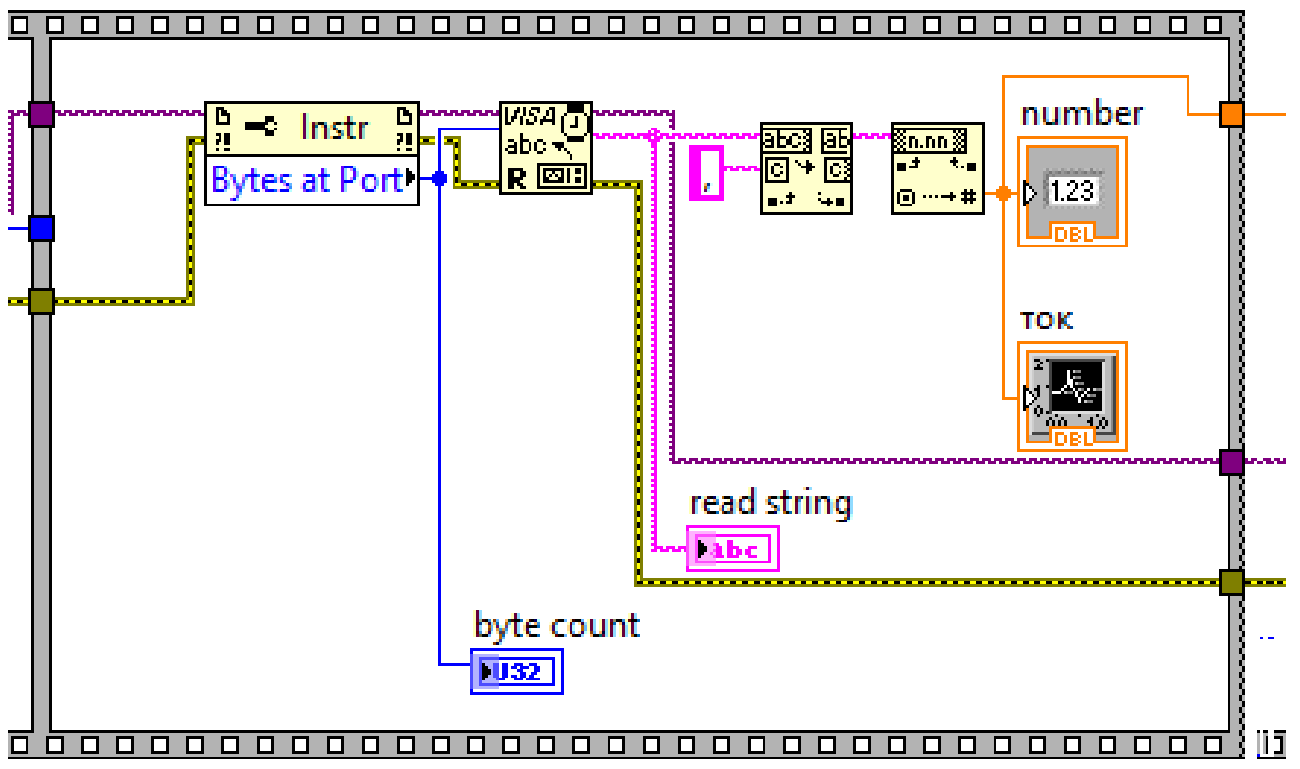


Рисунок 31 – Блок структуры программной реализации, отвечающий за измерение тока с поверхности пьезоэлектрических образцов в вакууме

На рисунках 32-33 представлен интерфейс программной реализации, обеспечивающий для исследователя возможность одновременного измерения следующих параметров: давления остаточного газа в вакуумной камере, температуры, тока и спектра рентгеновского излучения. Интерфейс данной программной реализации выполнен следующим образом:

- на странице 1 (рисунок 32) представлены три блока программной реализации, отвечающие за измерения трех параметров: давления, тока и температуры;
- на странице 2 (рисунок 33) представлен блок программной реализации, отвечающий за измерение спектра рентгеновского излучения.

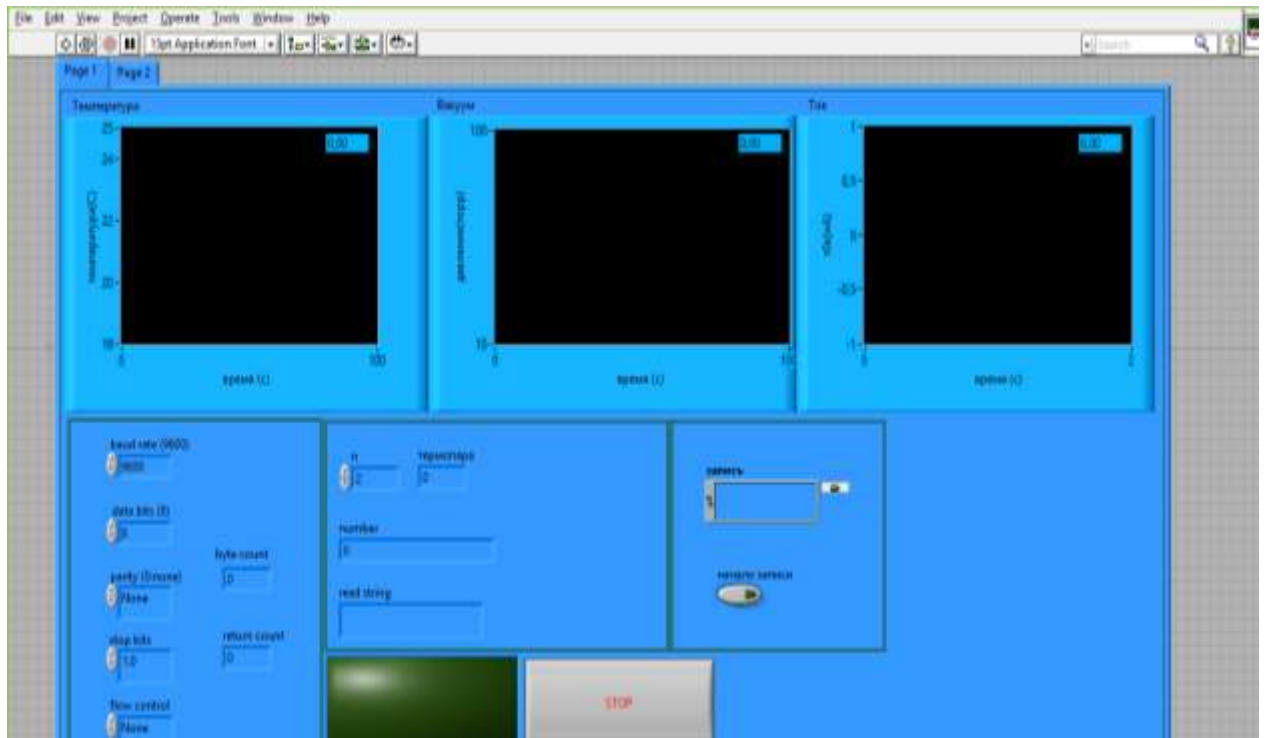


Рисунок 32 – Интерфейс программной реализации (страница 1)

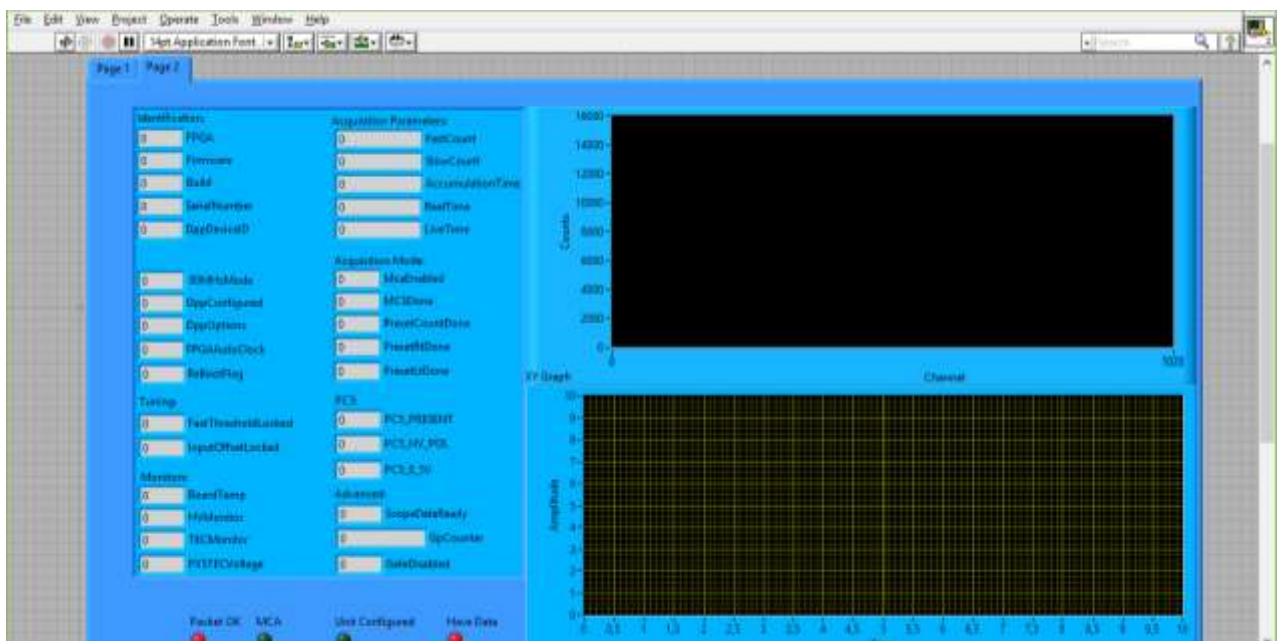


Рисунок 33 – Интерфейс программной реализации (страница 2)

3.3 Обоснование экономической эффективности

В таблице 2 представлены расчеты для оценки себестоимости нового источника рентгеновского излучения, создаваемого с применением модернизированного автоматизированного процесса экспериментальных исследований. Представлено сравнение с рентгеновским источником, создаваемом на пироэлектрическом эффекте.

Таблица 2 – Сравнения себестоимости основных элементов в конструкции пироэлектрического и пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения

Тип источника рентгеновского излучения	Основные составляющие	Стоимость, руб	Итоговая цена, руб
Пироэлектрический источник рентгеновского излучения	Кристалл-пироэлектрик	3000	31000
	Элемент Пельтье	3000	
	Форвакуумная камера	15000	
	Остальные элементы	5000	
	Источник высокого напряжения	5000	
Пьезоэлектрический источник рентгеновского излучения	Пьезоэлектрическая керамика	1000	24000
	Деформационный механизм	5000	
	Форвакуумная камера	13000	
	Остальные элементы	5000	

Экономическая эффективность себестоимости пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения составляет не менее 20 %.

3.4 Выводы

Проведено обоснование выбора средств автоматизации, которые будут использоваться в качестве нового дополнительного механизма в модернизированном процессе исследования и создания нового источника рентгеновского излучения. Для разработки программной реализации выбран инструмент прикладного программирования LabView, применяемый для автоматизации лабораторных экспериментов, использующий функциональный-логический принцип конструирования. Использовался графический язык программирования G.

Разработана программная реализация, актуализирующая модернизированный автоматизированный процесс экспериментальных исследований и применение разработанного метода поддержки принятия решений по созданию и оптимизации характеристик нового прибора – пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ предметной области и подходов к поддержке принятия решений при исследовании существующих и создании новых источников рентгеновского излучения показал, что в настоящее время возникла острая необходимость модернизации соответствующих процессов экспериментальных исследований для решения следующих проблем:

- получение достаточного количества измерений, проведенных с любым заданным сколь угодно малым шагом, в том числе временным;

- обеспечение совместных измерений и синхронного контроля измеряемых величин, что позволит уменьшить величину математической погрешности измеряемых величин, обеспечит возможность сбора данных в широком диапазоне шага записи по времени, а также построить зависимости других изменяемых параметров.

Проведено системное описание существующего процесса генерации рентгеновского излучения при сжатии пьезоэлектрика в вакууме, построена соответствующая функциональная модель «Как есть», с использованием нотации IDEF0, проведена детализация функциональной модели, демонстрирующая все подэтапы процесса и их взаимосвязи.

Разработана модель модернизированного процесса исследования и создание нового источника рентгеновского излучения «Как будет», обеспечивающего проведение автоматизированных экспериментов с одновременным контролем измеряемых параметров и требуемым (достаточно малым в диапазоне изменения параметра) шагом их изменения, что позволит повысить точность, достоверность и информативность экспериментальных исследований;

Предложен метод поддержки принятия решений, обеспечивающий автоматизацию параметров эксперимента и характеристик создаваемого нового прибора – пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения.

Разработана программная реализация, актуализирующая модернизированный автоматизированный процесс экспериментальных исследований и применение разработанного метода поддержки принятия решений по созданию и оптимизации характеристик нового прибора – пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения.

Ожидаемые эффекты:

- сокращение цикла исследований за счет ускорения подготовки и проведения экспериментов, оперативного использования результатов в масштабе реального времени, сокращения времени обработки и систематизации данных;

- увеличение точности и достоверности результатов экспериментов;

- повышение качества и информативности эксперимента за счет увеличения числа одновременно контролируемых параметров и более тщательной обработки данных;

- усиление контроля над ходом эксперимента и возможность оптимизации его параметров и характеристик создаваемого источника рентгеновского излучения;

- повышение производительности исследователя.

Экономическая эффективность себестоимости пьезоэлектрического источника рентгеновского излучения составляет не менее 20 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Brownridge, J. D. Pyroelectric X-ray generator / J. D. Brownridge. – Nature. – 1992. – V. 358. P. 287 – 288.
2. Brownridge, J. D. / J. D. Brownridge, S. Raboy. // J. Appl. Phys. 86. – 640. – s1999d.
3. Danon, Yaron. Electron and positive ion acceleration with pyroelectric crystals. / Jeffrey Geuther, Yaron Danon. // J. Appl. Phys. 97. – 074109. – s2005d.
4. Danon, Yaron. Nuclear Reactions Induced by a Pyroelectric Accelerator. / Jeffrey Geuther, Yaron Danon, Frank Saglime. // Nuclear Reactions Induced by a Pyroelectric Accelerator PRL. – 96. – 054803. – 2006.
5. Oleinik, A.N. Pyroelectric deflector of charged particle beam. / A.N. Oleinik, A.S. Kubankin, R.M. Nazhmudinov, K.A. Vokhmyanina, A.V. Shchagin and P.V. Karataevd. // J. Inst. – 2016. – 11. – P08007.
6. Субботин, Г.Г. Квази накопительный режим работы синхротрона «Пахра». / Г.Г. Субботин, А.В. Серов. // Препринт ФИАН. – 2007. – №19. – 19. – С. 87.
7. Алексеев, В. И. Система диагностики выведенного электронного пучка на ускорителе «Пахра». / В. И. Алексеев, В. А. Карпов, А. А. Ким, ... [и др.] // Препринт ФИАН. – 2000. – № 13. – С. 12
8. The DarkSide project 2016 JINST 11 C02051
9. Shchagin, A.V. Ferroelectric ceramics in a pyroelectric accelerator. / A.V. Shchagin, V.S. Miroshnik, V.I. Volkov, A.N. Oleinik, // Appl. Phys. Lett. – 107. – 233505. – 2015.
10. Вохмянина, К. А. Возможность применения пьезокерамики ЦТС-19 в пироэлектрических источниках рентгеновского излучения. / К. А. Вохмянина, Иващук О. О, Иониди В. Ю, ... [и др.] // Стекло и керамика. – 2016. – № 11. – С. 27 – 31.

11. Щагин, А. В. Исследование выхода рентгеновского излучения от пьезоэлектрических источников с конусообразными мишенями. / А. В. Щагин, О. О. Иващук, А. С. Кубанкин, А. Н. Олейник, // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – № 8. – С. 70–75.

12. Oleinik, A. N. Optimal speed of temperature change of a crystal in a pyroelectric X-ray radiation source. / A. N. Oleinik, A. S. Kubankin, A. S. Cherpurnov, O. O. Ivashchuk, V. Yu. Ionidi, I. A. Kishin, A. A. Klenin, , and A. V. Shchagin, // AIP ADVANCES 8. – 035207. – 2018.

13. Щагин, А. В. Генерация рентгеновского излучения с помощью пьезоэлектрического трансформатора. / А. В. Щагин, В. С. Мирошник, В. И. Волков, А. С. Кубанкин, О. О. Иващук, // Стекло и керамика 11. – 2017. – С. 24-26.

14. Иващук, О.О. Исследование возможности генерации рентгеновского излучения с помощью пьезоэлектрической керамики. / О.О. Иващук, // Сборник тезисов на научной конференции : тез. конф., 14-ая Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа / Курчатовский институт. – Москва. – 2016.

15. Генератор рентгеновского излучения при деформации пьезоэлектрика в вакууме : пат. 176453 Рос. Федерация : О.О. Иващук, О.А. Олейник, А.С. Кубанкин, А.В. Щагин, А.А. Каплий; заявитель и патентообладатель федеральное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» («НИУ БелГУ»). – № 2017121178; заявл. 16.06.2017; опубл. 19.01.2018.

16. Дмитриев, В.М. Модельно-измерительный комплекс на основе среды моделирования МАРС и пакета LabView. / В.М. Дмитриев, А.А. Бусыгин, // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – №8. – С.54-56.

17. Екимов, К.А. Использование программной среды LabView в спектроскопическом эксперименте. / К.А. Екимов, Л.А. Луизова, Р.В.

Приходченко, А.Д. Хахаев, // Известие высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – № 6. – С. 51-55.

18. Овчаренко, Е.С. Моделирование физических процессов с помощью программного комплекса LabView. / Е.С.Овчаренко, Н.А. Шевченко, // Естественные и технические науки. – 2012. – № 6. – С. 441-442.

19. Мокин, Д.Г. Применение среды LabView при моделирование объектов и процессов подъемно-транспортного машиностроения / Д.Г. Мокин. – Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 7-1. – С.195-198.

20. Сиротский, А.А. Программное обеспечение четырехканального информационно-измерительного комплекса в среде LabView / А.А. Сиротский. – Ученые записки Российского государственного социального университета. – 2013. – № 5. – С. 82-91.

21. Попов, Д.А. Работа со сложными структурами данных РСУБД в среде LabView / Д.А. Попов, – Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. С. 216.

22. Карабашев, Г. П. Применение программы LabView в учебном процессе курса теоретические основы электротехники. / Г.П. Карабашев, Е.Г. Карабашева, // Заметки ученого. – 2015. – № 1-1. – С. 170-176.

23. Есюнин, В.В. Возможности модернизации контрольно-проверочной аппаратуры при построении ее с использованием среды разработки LabView / В.В. Есюнин, – Решетневские чтения. – 2011. – № 15. – С. 172.

24. Журавлев, И.А. Особенности разработки в среде LabView / И.А. Журавлев, – Вестник ИМСИТ. – 2016. – № 2(66). – С. 35-36.

25. Путилин, И.А. Особенности программирования в среде LabView / И.А. Путилин, – Вестник ИМСИТ. – 2016. – № 2(66). – С. 37-38.

26. Ильина, И.Л. Разработка модели измерительного канала температуры в среде LabView. / И.Л. Ильина, А.А. Савоськина, // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2017. – № 14. – С. 89-93.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



Диплом

в номинации
«Лучший стендовый доклад»
награждается

Иващук Олег Орестович

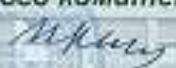
НИУ «БелГУ», Белгород

за доклад

**Обнаружение рентгеновского излучения
при сжатии пьезоэлектрика в вакууме**

представленный на VI Международной молодежной
научной школе-конференции
«Современные проблемы физики и технологий»

Сопредседатель Программного комитета,
академик РАН

 О.Н. Крохин

17-22 апреля 2017г.
НИЯУ МИФИ, Москва