

УДК 550.82

Карвялис И.Г., [ivankvl7@gmail.com](mailto:ivankvl7@gmail.com)

Верзунов С.Н., [verzunov@hotmail.com](mailto:verzunov@hotmail.com)

Институт машиноведения, автоматизации и геомеханики НАН КР

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

В статье представлена разработка программной системы мониторинга комплексного электрофизического отклика материалов, предназначенной для сравнительной оценки их диэлектрических и проводящих свойств. Рассмотрены основные компоненты системы, включая модуль взаимодействия с измерительным оборудованием, алгоритмы обработки сигналов, подсистему хранения данных и графический интерфейс. Система обеспечивает автоматизированный сбор, обработку, сохранение и визуализацию результатов измерений. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного решения для регистрации, накопления и визуального анализа информативных параметров комплексного отклика материалов в исследовательских и прикладных задачах.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, электрофизические свойства материалов, программная система мониторинга, цифровая обработка сигналов, база данных, визуализация измерений

### Введение

В современных условиях обеспечение безопасности и надежности инженерно-технических сооружений требует применения средств непрерывного мониторинга, позволяющих своевременно выявлять изменения состояния материалов, оснований и конструктивных элементов объектов. Особенно актуальна данная задача для мостов, тоннелей, шахт, промышленных и гражданских сооружений, функционирующих в условиях повышенных природных и техногенных нагрузок. В таких системах мониторинга особое значение приобретают программные средства, объединяющие сбор данных с датчиков, обработку измерительной информации, хранение результатов и их визуализацию для оперативного анализа.

В более широком прикладном смысле данная задача относится к области геотехнического и инфраструктурного мониторинга, основной целью которого является выявление и предотвращение необратимых процессов в грунтовых основаниях, конструкциях и материалах, а также предупреждение аварийных ситуаций на этапах строительства и эксплуатации объектов [1]. При этом одним из ключевых направлений развития подобных решений является создание интеллектуальных систем мониторинга, включающих датчики, каналы передачи данных, серверную инфраструктуру, программное обеспечение анализа и пользовательские интерфейсы [2].

Особую значимость такие системы приобретают в сейсмоопасных регионах. Для Кыргызской Республики задача повышения устойчивости и безопасности сооружений имеет практическую важность в связи с регулярной сейсмической активностью (рис. 1), влияющей на состояние строительных объектов и грунтовых оснований [3]. Карта сейсмической активности, приведенная на рисунке 1, иллюстрирует прикладную значимость разработки систем мониторинга для объектов, эксплуатируемых в условиях повышенного природного риска.

В составе интеллектуальных систем мониторинга особую роль играет контроль свойств материалов, поскольку именно изменение их параметров часто отражает начальные стадии неблагоприятных процессов в конструкции или среде. В этом смысле мониторинг комплексного электрофизического отклика материалов может рассматриваться как специализированное направление, ориентированное на получение объективной информации о состоянии исследуемой среды на основе ее электрофизических характеристик. Такой подход дополняет более общие средства геотехнического и инженерного мониторинга, предоставляя количественные данные для анализа состояния материалов [4].



### Постановка задачи

В условиях эксплуатации инженерно-технических сооружений важной задачей является своевременное выявление изменений состояния материалов и конструктивных элементов объекта. Такая необходимость особенно актуальна для объектов, работающих в условиях повышенных нагрузок и природных рисков, включая сейсмически активные районы. В этих условиях мониторинг должен обеспечивать не только фиксацию текущих параметров, но и получение данных, пригодных для последующего анализа и принятия решений.

В структуре интеллектуальных систем мониторинга контроль свойств материалов может рассматриваться как специализированная подсистема, предназначенная для получения объективной информации о состоянии исследуемой среды. Одними из информативных параметров в такой задаче являются диэлектрическая проницаемость и электропроводность материалов, поскольку они чувствительны к изменению внутренней структуры, состава и состояния материала [6]. Следовательно, возникает необходимость разработки программной системы, которая обеспечивала бы автоматизированный сбор, обработку, хранение и визуализацию соответствующих измерительных данных.

Объектом исследования являются материалы, различающиеся по характеру электрофизического отклика. Предметом исследования выступают программные средства и алгоритмы, реализующие регистрацию, обработку, хранение и визуализацию параметров комплексного отклика, получаемых с измерительного оборудования.

Целью работы является разработка программной системы мониторинга комплексного электрофизического отклика материалов, обеспечивающей автоматизированное выполнение полного цикла работы с измерительными данными: получение сигнала, расчет информативных параметров, сохранение результатов и их визуализацию.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- ✓ разработать структуру программной системы мониторинга;
- ✓ реализовать модуль взаимодействия с измерительным устройством;
- ✓ реализовать алгоритмы цифровой обработки измерительного сигнала;
- ✓ организовать сохранение результатов измерений в базе данных;
- ✓ разработать пользовательский интерфейс визуализации и оперативного анализа данных;
- ✓ обеспечить возможность использования системы как самостоятельного программного комплекса и как специализированного модуля в составе более широких систем мониторинга.

Функциональная структура разрабатываемой системы представлена в таблице 1.

Практическая реализация данной структуры выполнена в виде программного комплекса, включающего модуль работы с измерительным устройством, модуль обработки сигнала, подсистему записи результатов в базу данных и графический интерфейс визуализации. В системе предусмотрены получение измерительных данных, вычисление комплексной спектральной компоненты на заданной частоте, калибровочное преобразование, расчет параметров Real, Imag, Mag, Angle и их статистических характеристик, а также отображение результатов в режиме, близком к реальному времени. Это соответствует структуре и логике разработанного программного проекта.

Таблица 1 – Основные компоненты и функции программной системы мониторинга

Компонент системы	Назначение	Входные данные	Выходные данные
Модуль взаимодействия с измерительным устройством	Получение выборок сигнала и управление процессом измерения	Данные с измерительного устройства, параметры настройки	Массив измерительных данных

Модуль цифровой обработки	Вычисление информативных параметров электрического отклика материала	Выборки сигнала	Параметры Real, Imag, Mag, Angle, статистические характеристики
Подсистема хранения данных	Сохранение результатов измерений и обеспечение доступа к ним	Вычисленные параметры и временные метки	Записи в базе данных
Пользовательский интерфейс	Визуализация результатов и оперативный анализ	Данные из базы	Графики и представление текущих измерений
Интерфейс обмена данными	Обеспечение связи между подсистемами	Запросы модулей системы	Передача данных между компонентами

Таким образом, постановка задачи в данной работе сводится к созданию программной системы, интегрирующей измерительное оборудование, алгоритмы обработки, подсистему хранения и средства визуализации в рамках единого решения, предназначенного для сравнительного анализа комплексного электрофизического отклика материалов.

### Аппаратная основа системы

Аппаратная часть разрабатываемой системы предназначена для съема, усиления, фильтрации и передачи измерительного сигнала в цифровую подсистему обработки. Ее структура построена таким образом, чтобы обеспечить регистрацию отклика исследуемого объекта, снижение влияния внешних помех и подготовку сигнала к последующему аналого-цифровому преобразованию [7].

Известны различные подходы к измерению диэлектрических характеристик материалов, включая волноводные и коаксиальные методы, применяемые для исследования параметров диэлектриков и горных пород [8, 9]. В отличие от таких решений, в настоящей работе основное внимание уделяется не разработке новой измерительной ячейки, а созданию программной системы, обеспечивающей автоматизированный сбор, обработку, хранение и визуализацию параметров комплексного отклика материала.

Общая структурная схема аппаратной части системы представлена на рисунке 2. Как показано на рисунке 2, формирование измерительной информации осуществляется последовательно, начиная с объекта контроля, находящегося под воздействием факторов внешней среды, и заканчивая цифровой обработкой сигнала в вычислительном модуле. Исследуемый объект или материал взаимодействует с датчиковым узлом, который преобразует изменение физического состояния среды в электрический сигнал. Далее сигнал поступает в тракт аналоговой обработки, включающий предусилитель, режекторный фильтр подавления сетевой помехи 50 Гц, универсальный фильтр и постусилитель. Назначение данного тракта состоит в повышении уровня полезного сигнала, ослаблении паразитных составляющих и согласовании сигнала с входом аналого-цифрового преобразователя.

После предварительной аналоговой обработки сигнал поступает на АЦП, где преобразуется в цифровую форму и передается в микрокомпьютер для дальнейшей обработки, анализа и хранения. В состав структурной схемы также входит цифро-аналоговый преобразователь, который используется для формирования тестового или опорного воздействия в измерительном тракте. Таким образом, рисунок 2 отражает общую логику функционирования аппаратной части системы и показывает взаимосвязь между измерительным каналом, блоком аналоговой обработки и цифровой подсистемой.

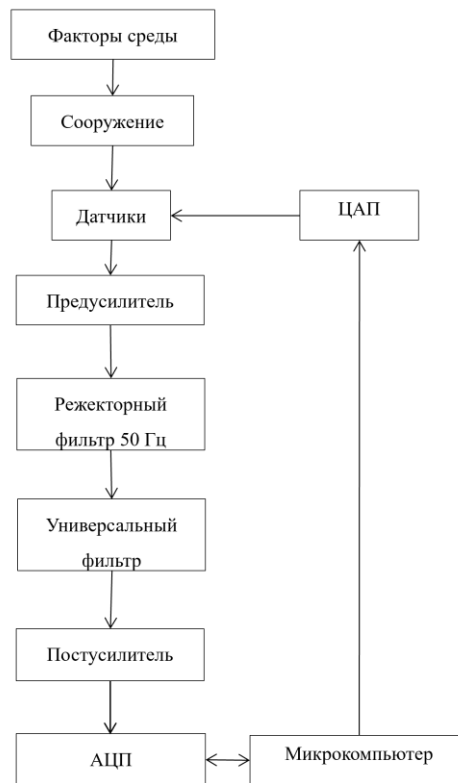


Рисунок 2 – Общая структурная схема аппаратной части системы мониторинга

Экспериментальный прототип аппаратной части системы представлен на рисунке 3. На фотографии показан лабораторный стенд, включающий измерительный модуль LCard E502, электронные узлы сопряжения и усиления, соединительные линии, вычислительный модуль, а также исследуемый образец, размещенный в измерительном узле. Представленный стенд использовался для проведения экспериментальных измерений и апробации работы программно-аппаратного комплекса в целом.

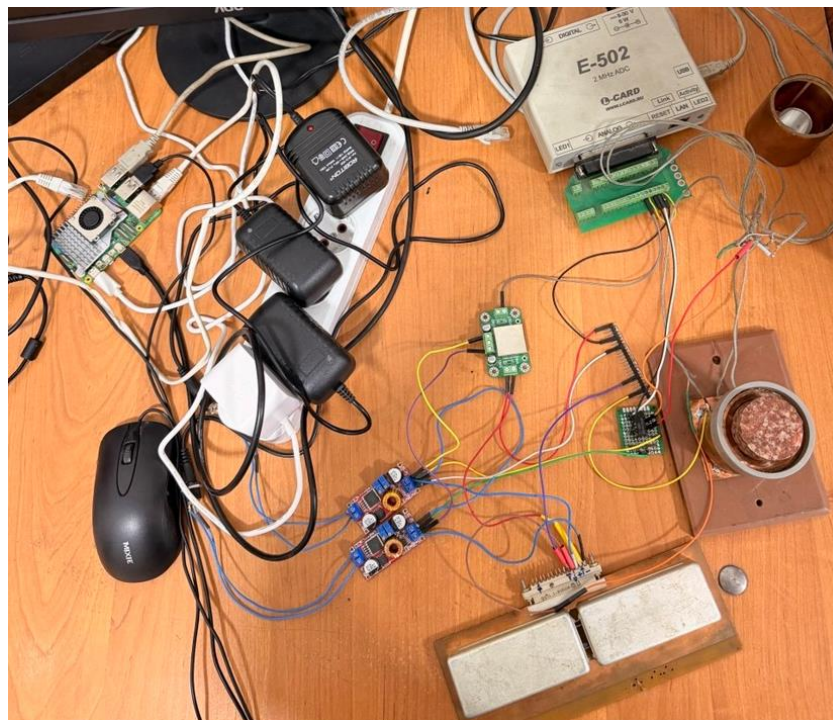


Рисунок 3 – Экспериментальный прототип системы мониторинга

Фотография прототипа подтверждает практическую реализуемость предложенного решения и демонстрирует, что аппаратная часть системы собрана в виде действующего измерительного стенда, а не существует только на уровне схемных и архитектурных описаний. Важным аспектом является то, что стенд обеспечивает полный цикл измерения: формирование воздействия, регистрацию отклика, аналоговую подготовку сигнала, его оцифровку и передачу в программную подсистему для последующей обработки и визуализации. Тем самым рисунок 3 выполняет роль иллюстрации реальной экспериментальной базы, на которой проверялась работоспособность разрабатываемой системы.

Таким образом, аппаратная основа системы включает структурно организованный измерительный тракт, принципиально реализованный в виде аналогового блока обработки сигнала и апробированный в составе экспериментального стенда. Представленные на рисунках 2–3 материалы показывают, что разработка охватывает не только программную, но и аппаратную составляющую системы мониторинга. Это обеспечивает целостный подход к решению задачи регистрации и сравнительного анализа комплексного электрофизического отклика материалов и создает основу для последующей цифровой обработки, хранения и визуализации измерительных данных.

### **Архитектура программной системы**

Разрабатываемая программная система мониторинга комплексного электрофизического отклика материалов построена по модульному принципу. Такой подход позволяет разделить процессы получения измерительных данных, их обработки, хранения и визуализации, а также обеспечить расширяемость системы при дальнейшем развитии. В более широком контексте подобная архитектура соответствует логике интеллектуальных систем мониторинга, в которых измерительная подсистема, вычислительная обработка, база данных и пользовательский интерфейс образуют единый информационный контур [10].

С точки зрения функционального назначения система ориентирована на взаимодействие оператора с программным комплексом в режиме наблюдения за измеряемыми параметрами, загрузки накопленных данных и их графического представления. Основные сценарии работы пользователя отражены на диаграмме вариантов использования, представленной на рисунке 4. Оператор получает список доступных идентификаторов датчиков, запускает мониторинг в реальном времени, загружает последние результаты измерений, останавливает процесс наблюдения, сохраняет результаты и отображает графики. Таким образом, диаграмма вариантов использования показывает основные функции, доступные пользователю при эксплуатации системы, и позволяет формализовать требования к ее поведению.

Архитектурно программная система состоит из нескольких взаимосвязанных компонентов, каждый из которых выполняет строго определенную функцию. Общая структура системы представлена на диаграмме компонентов, приведенной на рисунке 5. В состав архитектуры входят компонент сбора и обработки сигнала, компонент интеграции с измерительным оборудованием E502, компонент доступа к базе данных, модуль конфигурации, пользовательский интерфейс визуализации, а также аппаратный измерительный модуль и база данных PostgreSQL.

Центральным компонентом системы является модуль сбора и обработки сигнала. Он отвечает за инициализацию измерительного процесса, формирование тестовых сигналов, прием данных с измерительного устройства и их первичную обработку. Компонент интеграции с оборудованием E502 обеспечивает непосредственное взаимодействие программной системы с измерительной платой, включая подключение, настройку режимов работы, запуск потоков обмена и получение выборок сигнала.

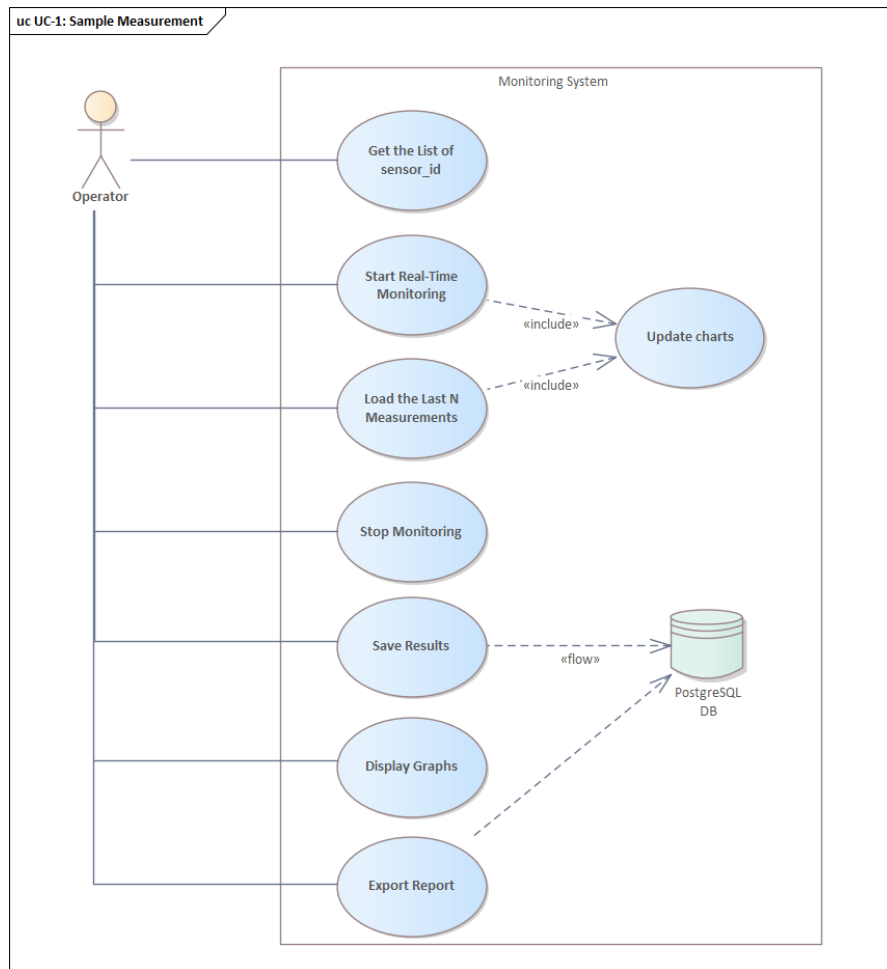


Рисунок 4 – Диаграмма вариантов использования

Доступ к данным и их долговременное хранение обеспечиваются компонентом работы с базой данных, связанным с PostgreSQL. Компонент конфигурации содержит параметры настройки системы, используемые как в процессе измерения, так и при работе с хранилищем данных и пользовательским интерфейсом. Пользовательский интерфейс предназначен для отображения результатов мониторинга и взаимодействия оператора с системой.

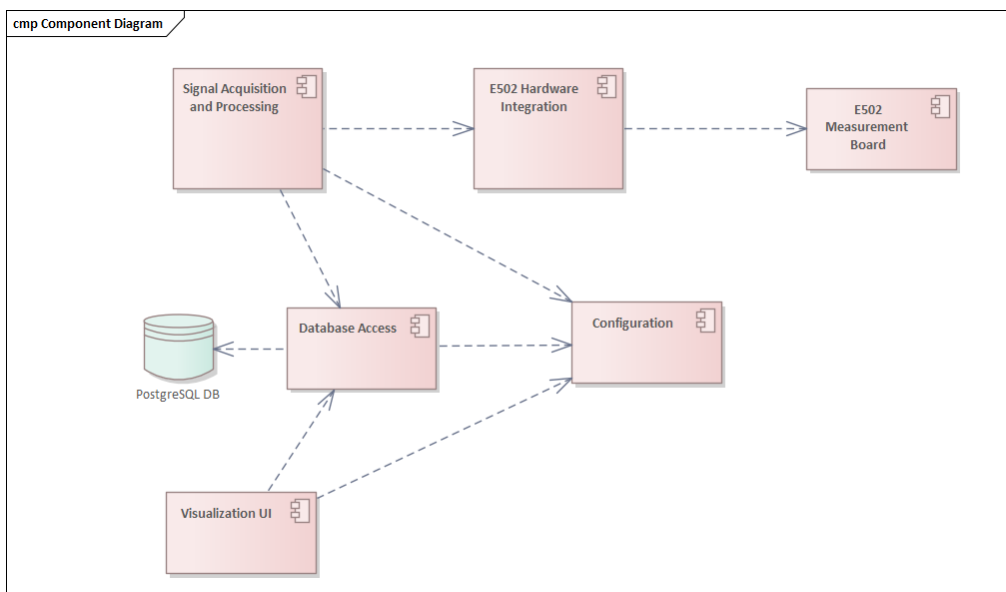


Рисунок 5 – Диаграмма компонентов

Внутренняя программная структура системы представлена в виде набора классов, отражающих основные сущности и связи между ними. Диаграмма классов, изображенная на рисунке 6, показывает, что ядро системы образуют классы E502Pipeline, E502, SQLAlchemyDB, Measurement, Sensor, MainWindow и SignalCanvas. Такая структура соответствует фактической реализации программного проекта.

Класс E502Pipeline реализует основную измерительно-вычислительную логику системы. В нем сосредоточены функции инициализации измерительного устройства, формирования выходных сигналов, считывания данных, вычисления комплексной спектральной компоненты, выполнения калибровочного преобразования и формирования итоговых параметров измерения. Класс E502 инкапсулирует низкоуровневую работу с платой LCard E502, включая конфигурирование каналов, управление потоками ввода-вывода и получение данных с устройства. Классы Measurement и Sensor описывают основные сущности предметной области, связанные с представлением результатов измерений и идентификацией источника данных. Класс SQLAlchemyDB реализует взаимодействие с базой данных и обеспечивает операции сохранения, чтения и выборки результатов. Класс MainWindow представляет основное окно пользовательского интерфейса, а SignalCanvas отвечает за графическое отображение параметров real, imag, mag и angle.

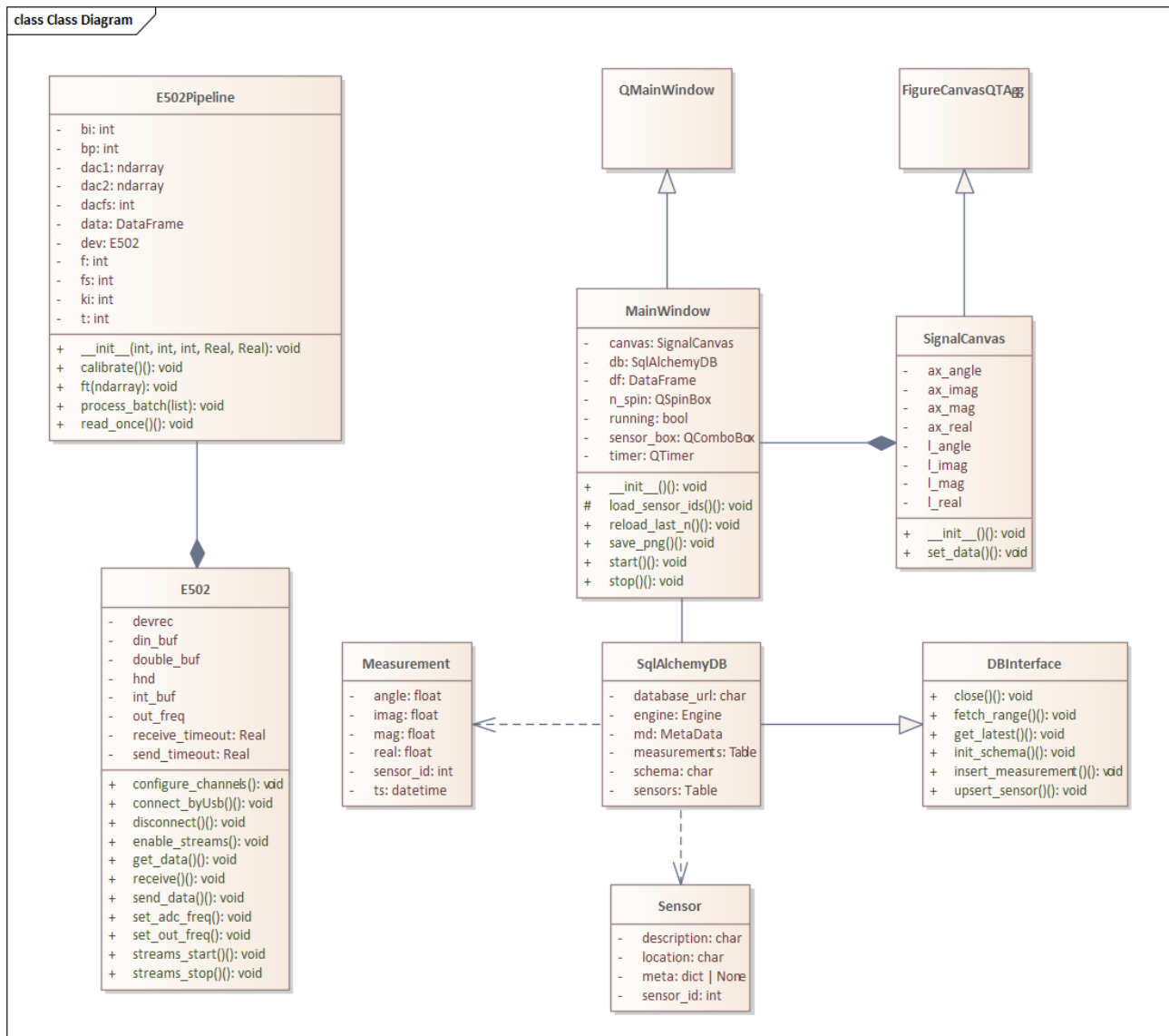


Рисунок 6 – Диаграмма классов

Для описания динамики работы программной системы используется диаграмма последовательности, приведенная на рисунке 7. Она отражает порядок взаимодействия оператора, backend-компонента, модуля E502, базы данных и пользовательского интерфейса. Сначала происходит запуск приложения и инициализация измерительного оборудования: создается объект устройства, выполняется подключение по USB, конфигурируются каналы, устанавливаются частоты и активируются необходимые потоки обмена. После этого в цикле выполняются отправка выходных сигналов, запуск измерения, получение выборки, обработка данных, формирование объекта измерения и сохранение результата в базе данных. Далее запускается графический интерфейс, который получает список доступных датчиков, загружает измерения из базы и отображает их на графиках.

Таким образом, диаграмма последовательности показывает, что программная система реализует полный цикл работы с измерительной информацией: от взаимодействия с аппаратным модулем до представления результатов пользователю. Это подтверждает, что разработка охватывает не только отдельный вычислительный алгоритм, но и всю программную инфраструктуру мониторинга.

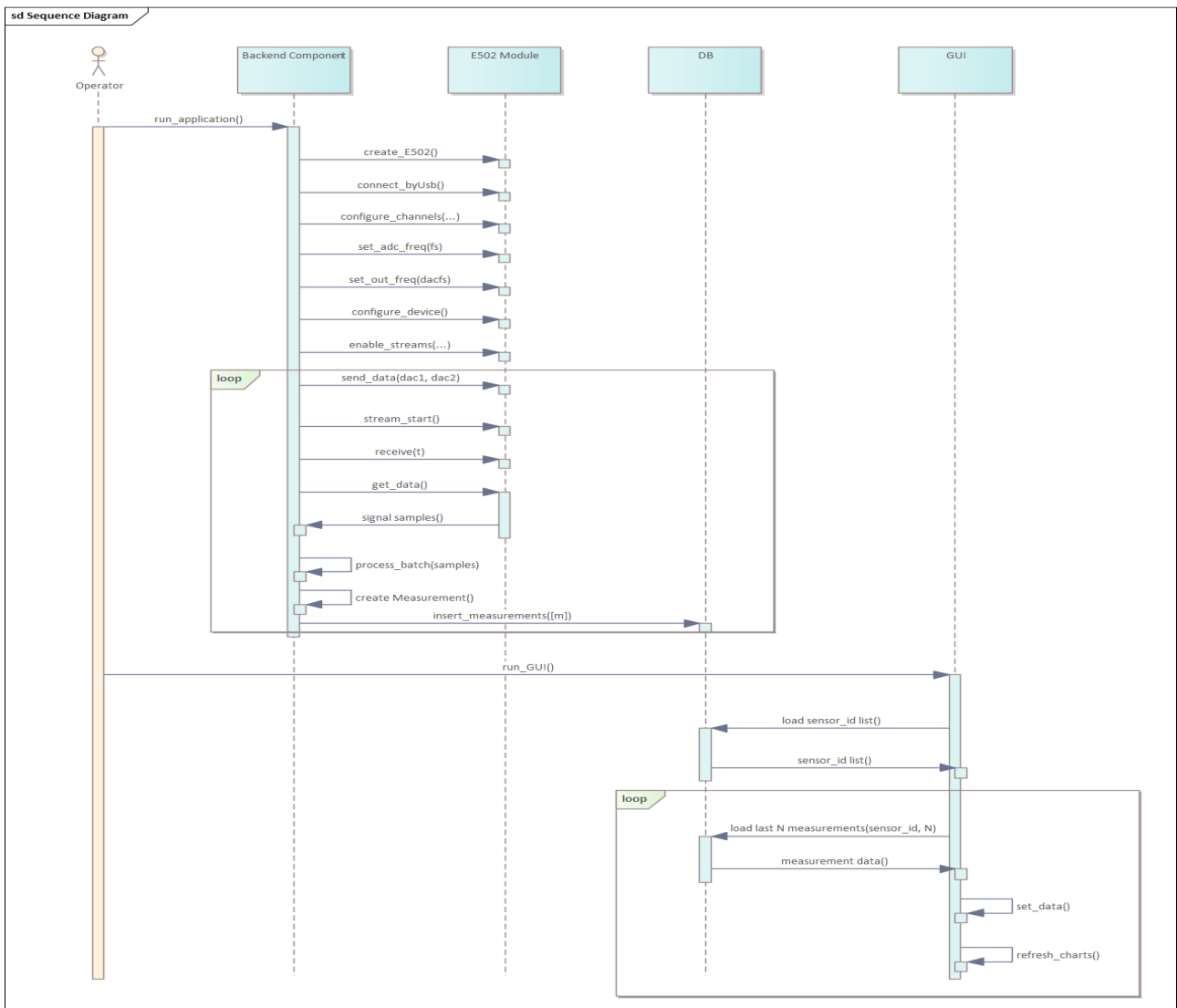


Рисунок 7– Диаграмма последовательности работы программного компонента

### Алгоритм функционирования и обработки измерительных данных

Функционирование разработанной программной системы основано на последовательном выполнении операций инициализации измерительного оборудования,

формирования тестового сигнала, приема измерительных данных, их цифровой обработки, сохранения результатов и последующей визуализации. Общая логика работы системы соответствует диаграмме последовательности, где показано взаимодействие backend-компонента, модуля E502, базы данных и графического интерфейса пользователя. В процессе работы после запуска приложения выполняются подключение к измерительному устройству, настройка каналов, установка частот, запуск потоков обмена, получение выборки, вычисление параметров, запись результата в базу данных и обновление графиков в пользовательском интерфейсе.

На этапе подготовки измерения в системе формируются два гармонических сигнала, подаваемых на выход измерительного устройства [6]. Первый сигнал описывается выражением 1:

$$x_1(t) = A \cos(\omega t), \quad (1)$$

второй сигнал формируется со сдвигом фазы на  $\pi$ :

$$x_2(t) = A \cos(\omega t + \pi), \quad (2)$$

где  $A$ — амплитуда сигнала,  $\omega = 2\pi f$ — круговая частота,  $f$ — рабочая частота измерения. Такая схема соответствует программной реализации, в которой массивы `dac1` и `dac2` формируются на основе косинусоидальных зависимостей с заданной частотой и фазовым сдвигом.

После формирования сигналов выполняется запуск потокового обмена с устройством, прием выборки за заданный временной интервал и получение массива отсчетов сигнала. С математической точки зрения принятая выборка представляет собой дискретную последовательность, представленную в выражении 3:

$$x[n], n = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (3)$$

где  $N$ — число отсчетов в анализируемом окне. Для выделения информативной составляющей на рабочей частоте в системе используется вычисление комплексной спектральной компоненты. Ключевым этапом цифровой обработки является дискретное преобразование Фурье для одной гармоники, которое можно записать в виде выражения 4 [6]:

$$X_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad (4)$$

где  $X_k$ — комплексная спектральная компонента на анализируемой частоте,  $k$ — номер спектрального отсчета, соответствующий рабочей частоте сигнала. Именно это преобразование лежит в основе программной функции вычисления спектральной компоненты и позволяет перейти от временной формы сигнала к его комплексному представлению на заданной частоте.

После вычисления спектральной компоненты в системе выполняется калибровочное преобразование, необходимое для компенсации фазовых и амплитудных отклонений измерительного тракта [6]. В программной реализации используется модификация комплексного значения с учетом калибровочного фазового коэффициента и поправок для мнимой составляющей. Если исходная спектральная компонента представлена как:

$$X_k = A_k e^{j\varphi_k}, \quad (5)$$

то после фазовой коррекции она преобразуется к виду:

$$\tilde{X}_k = A_k e^{j(\varphi_k + \beta_p)}, \quad (6)$$

где  $\beta_p$ — калибровочная фазовая поправка. Далее действительная и мнимая части корректируются с учетом дополнительных коэффициентов, что позволяет получить итоговое комплексное значение, используемое для расчета информативных параметров. Такая процедура соответствует реализованной в системе функции `calibrate()`.

На основе откалиброванной комплексной спектральной компоненты рассчитываются основные параметры мониторинга [5]. Действительная составляющая определяется как:

$$Real = \Re(\tilde{X}_k), \quad (7)$$

мнимая составляющая — как:

$$Imag = \Im(\tilde{X}_k), \quad (8)$$

модуль комплексной компоненты вычисляется по формуле:

$$Mag = |\tilde{X}_k| = \sqrt{Real^2 + Imag^2}, \quad (9)$$

вспомогательный фазовый параметр, используемый в системе для характеристики соотношения квадратурных составляющих комплексного отклика, определяется выражением:

$$P_\varphi = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \arg(\tilde{X}_k)\right), \quad (10)$$

где  $P_\varphi$  — расчетный фазовый параметр, сохраняемый в программной системе в поле `angle`.

Дополнительно в системе вычисляются статистические характеристики измерений — стандартные отклонения действительной части, мнимой части, модуля и расчетного фазового параметра. Это позволяет оценивать разброс результатов и устойчивость измерительного процесса. Перечисленные операции реализуются в модуле пакетной обработки данных, который формирует итоговую запись измерения для последующего сохранения.

Результаты обработки представляются в виде структурированной записи, включающей идентификатор датчика, временную метку, значения параметров `Real`, `Imag`, `Mag`, `Angle`, а также их стандартные отклонения. После этого данные передаются в подсистему хранения и сохраняются в базе данных PostgreSQL. Такое решение обеспечивает накопление архива измерений и возможность последующего доступа к ним как для оперативного контроля, так и для ретроспективного анализа. Структура сохраняемых данных соответствует описанию сущности `Measurement` и операциям записи, реализованным в программном модуле работы с базой данных.

После записи данных в хранилище результаты становятся доступны пользовательскому интерфейсу. Графический интерфейс загружает последние значения по выбранному идентификатору датчика, отображает временные зависимости параметров `real`, `imag`, `mag` и `angle`, а также обеспечивает обновление графиков в режиме, близком к реальному времени. Благодаря этому оператор получает возможность наблюдать динамику измеряемых электрофизических характеристик материала непосредственно в процессе работы системы.

Таким образом, алгоритм функционирования системы представляет собой законченный цикл обработки измерительной информации: от генерации тестового сигнала и приема выборки до вычисления спектральных параметров на основе преобразования Фурье, калибровки результата, формирования итоговых характеристик, их сохранения в базе данных и визуализации. Такая организация обеспечивает программной системе свойства, необходимые для применения в задачах регистрации, хранения и сравнительного анализа комплексного электрофизического отклика материалов [5, 10].

### Реализация программной системы

Реализация программной системы выполнена с учетом необходимости разделения измерительного, вычислительного, интерфейсного и сервисного уровней. Такое построение позволяет изолировать работу с измерительным оборудованием от алгоритмов обработки данных, подсистемы хранения и графического интерфейса, что упрощает сопровождение и дальнейшее развитие программного комплекса.

Реализация программной системы мониторинга комплексного электрофизического отклика материалов выполнена на языке Python и охватывает полный цикл работы с измерительной информацией: получение данных от измерительного устройства, цифровую обработку сигнала, сохранение результатов в базе данных и их визуализацию в графическом интерфейсе. Программная реализация построена по модульному принципу, что позволяет разделить вычислительные, драйверные, интерфейсные и сервисные функции между отдельными компонентами системы. Такое построение обеспечивает удобство сопровождения, расширения и адаптации системы к новым режимам измерения.

С практической точки зрения программная система включает четыре основных программных блока:

- модуль измерительного цикла;
- модуль взаимодействия с устройством LCard E502;
- модуль работы с базой данных;
- модуль графического интерфейса.

Состав программных модулей и их назначение приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные программные модули системы

Модуль	Назначение	Основные элементы
main.py	Организация измерительного цикла, запуск обработки, запись результатов	E502Pipeline, main()
e502.py	Взаимодействие с платой LCard E502, настройка каналов и потоков	класс E502
db_utils.py	Описание структуры БД и операции доступа к данным	Measurement, Sensor, SQLAlchemyDB
GUI-модуль	Загрузка данных, обновление графиков, действия пользователя	MainWindow, SignalCanvas

Основной backend-контур реализован в модуле main.py. Центральную роль в нем играет класс E502Pipeline, в котором задаются рабочая частота, частота дискретизации, длительность измерительного окна, амплитуда сигнала, а также калибровочные коэффициенты. В ходе инициализации создается объект измерительного устройства, выполняются подключение по USB, настройка каналов, установка частот аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования и активация потоков обмена. После этого формируются два выходных сигнала dac1 и dac2, используемые при проведении измерения.

На уровне измерительного цикла система выполняет чтение одной выборки, формирует набор вычисленных параметров и создает объект измерения для последующего сохранения. Соответствующий фрагмент реализации приведен на рисунке 8.

```

m = Measurement(
    sensor_id='1',
    ts=dt.datetime.now(dt.timezone.utc),
    real=row["Real"],
    imag=row["Imag"],
    mag=row["Mag"],
    angle=row["Angle"],
    real_std=row["Real std"],
    imag_std=row["Imag std"],
    mag_std=row["Mag std"],
    angle_std=row["Angle std"],
    extra=None,
)

db.insert_measurements([m])
    
```

Рисунок 8 – Формирование и сохранение записи измерения

Приведенный листинг показывает, что результат обработки представляется в виде структурированной сущности Measurement, которая содержит идентификатор источника данных, временную метку, вычисленные информативные параметры и их статистические характеристики. После формирования запись передается в подсистему хранения.

Низкоуровневое взаимодействие с аппаратурой реализовано в модуле e502.py, который представляет собой программную обертку над библиотекой x502api. В данном модуле сосредоточены функции подключения к устройству, настройки каналов, установки частот, запуска и остановки потоков, передачи выходных данных и приема входного сигнала. Выделение отдельного драйверного слоя позволяет изолировать работу с аппаратурой от логики верхнего уровня, что делает систему более модульной и упрощает ее дальнейшую доработку.

Для хранения результатов используется PostgreSQL, а операции доступа к данным реализованы через SQLAlchemy в модуле db\_utils.py. В системе определены две основные сущности: Sensor, описывающая источник данных, и Measurement, описывающая отдельное измерение. Класс SQLAlchemyDB реализует создание схемы хранения, сохранение результатов, выборку последних измерений и получение данных за заданный временной интервал. Такая организация позволяет использовать базу данных не только как архив, но и как промежуточный слой обмена между backend-частью и пользовательским интерфейсом.

Структура таблицы measurements, используемой для хранения результатов, приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Основные поля таблицы measurements

Поле	Назначение
sensor_id	Идентификатор источника измерения
ts	Временная метка
real	Действительная составляющая комплексного отклика
imag	Мнимая составляющая комплексного отклика
mag	Модуль комплексного отклика
angle	Расчетный фазовый параметр
real_std	Стандартное отклонение действительной составляющей
imag_std	Стандартное отклонение мнимой составляющей
mag_std	Стандартное отклонение модуля
angle_std	Стандартное отклонение расчетного фазового параметра
extra	Дополнительные служебные данные

Структура хранения подтверждает, что система ориентирована на работу с временными рядами измерений и обеспечивает накопление как основных характеристик сигнала, так и показателей стабильности измерительного процесса.

Пользовательский уровень системы реализован на базе PyQt6 и Matplotlib. Основное окно приложения построено вокруг класса MainWindow, который объединяет элементы управления и графическую область отображения данных. Пользователь может выбрать sensor\_id, указать число отображаемых измерений, загрузить последние результаты из базы данных, включить или остановить режим обновления, а также сохранить построенные графики в файл. Отображение временных зависимостей параметров real, imag, mag и angle реализуется с помощью класса SignalCanvas. Обновление графиков выполняется периодически по таймеру, что обеспечивает представление данных в режиме, близком к реальному времени.

На рисунке 9 представлено главное окно приложения с четырьмя графиками параметров real, imag, mag и angle, а также элементами управления загрузкой и обновлением данных. Такой рисунок подтверждает практическую реализованность системы и демонстрирует, что результаты измерений доступны пользователю не только в виде записей в базе данных, но и в удобной визуальной форме.

С точки зрения используемого технологического стека реализация программной системы опирается на набор средств, приведенный в таблице 4.

Таблица 4 – Программно-технические средства реализации

Средство	Назначение
Python	Основной язык программной реализации
NumPy	Численные расчеты и работа с массивами данных
Pandas	Обработка табличных данных и подготовка результатов
SQLAlchemy	Объектно-реляционный доступ к базе данных
PostgreSQL	Долговременное хранение результатов измерений
PyQt6	Реализация графического интерфейса
Matplotlib	Построение графиков и визуализация
x502api	Низкоуровневое взаимодействие с модулем E502

Программная реализация включает два взаимосвязанных контура. Первый контур представляет собой измерительно-вычислительную часть, где выполняются получение сигнала, обработка и запись результата в базу данных. Второй контур представляет собой пользовательский уровень, в котором осуществляется чтение данных из БД, построение графиков и взаимодействие оператора с системой. Такое разделение функций позволяет независимо развивать вычислительный и интерфейсный уровни, а также использовать накопленные данные как для текущего мониторинга, так и для последующего анализа.

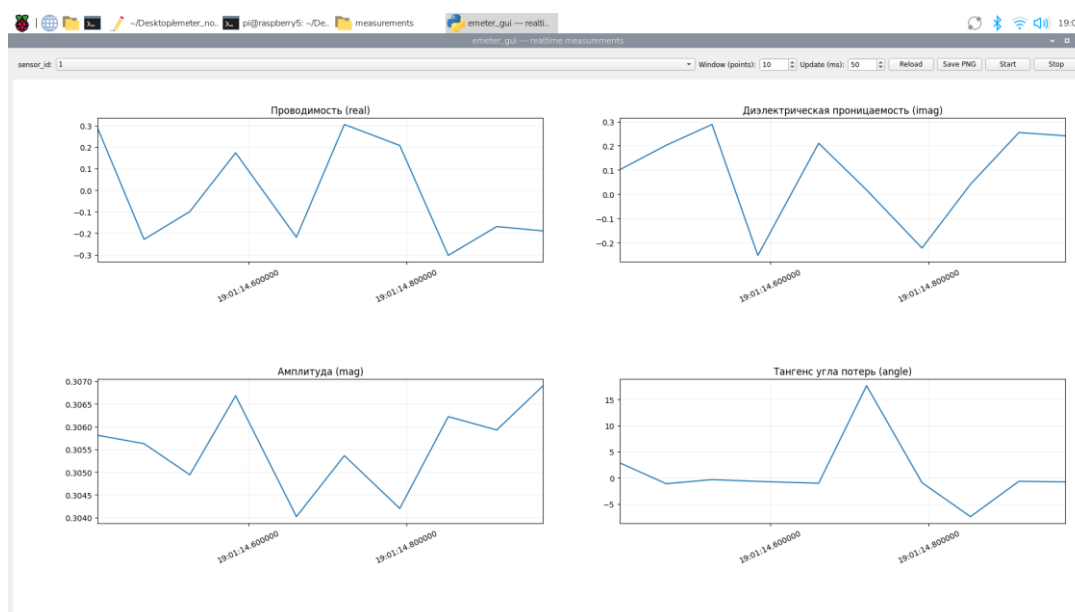


Рисунок 9 – Интерфейс программной системы мониторинга

Таким образом, реализация программной системы представляет собой не набор отдельных программных модулей, а целостное решение, объединяющее измерительное оборудование, алгоритмы цифровой обработки, хранилище данных и средства визуального представления результатов. Это позволяет использовать разработанную систему как специализированный инструмент мониторинга электрофизических характеристик материалов в лабораторных и прикладных условиях.

### Экспериментальная часть

Экспериментальная проверка разработанной программной системы выполнялась с целью оценки ее работоспособности при мониторинге электрофизических характеристик различных сред и материалов. В ходе эксперимента проверялась возможность получения измерительных данных с аппаратной части системы, вычисления параметров *real*, *imag*, *mag* и *angle*, сохранения результатов в базе данных и их отображения в графическом интерфейсе в режиме, близком к реальному времени.

Исследование проводилось для трех объектов: воздуха, гранита и парафина. Выбор именно этих сред обусловлен тем, что они обладают различным характером электрического отклика, что позволяет оценить чувствительность разработанной системы к изменению

свойств исследуемого материала. В рамках эксперимента основное внимание уделялось параметру *real*, который в реализованной системе соответствует действительной составляющей комплексного отклика и рассматривается как один из информативных признаков, чувствительных к изменению электрофизических свойств исследуемой среды.

Параметры экспериментального режима соответствовали программной конфигурации измерительного контура. В системе использовались рабочая частота сигнала 25000 Гц, частота дискретизации 1000000 Гц, длительность окна измерения 0,2 с и амплитуда тестового сигнала 5,0 В. Обработка данных выполнялась автоматически после получения каждой выборки, а результаты отображались в графическом интерфейсе в виде временных зависимостей параметров *real*, *imag*, *mag* и *angle*.

Основные параметры эксперимента приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Основные параметры эксперимента

Параметр	Значение
Рабочая частота сигнала	25000 Гц
Частота дискретизации	1000000 Гц
Длительность окна измерения	0,2 с
Амплитуда тестового сигнала	5,0 В
Исследуемые объекты	воздух, гранит, парафин
Основные анализируемые параметры	<i>real</i> , <i>imag</i> , <i>mag</i> , <i>angle</i>

Результаты измерения для воздуха приведены на рисунке 10. Для данной среды характерны малые значения параметра *real*, находящиеся на уровне около 0,03. Это соответствует ожидаемо слабому отклику среды и может рассматриваться как опорный случай с малым уровнем действительной составляющей комплексного отклика.

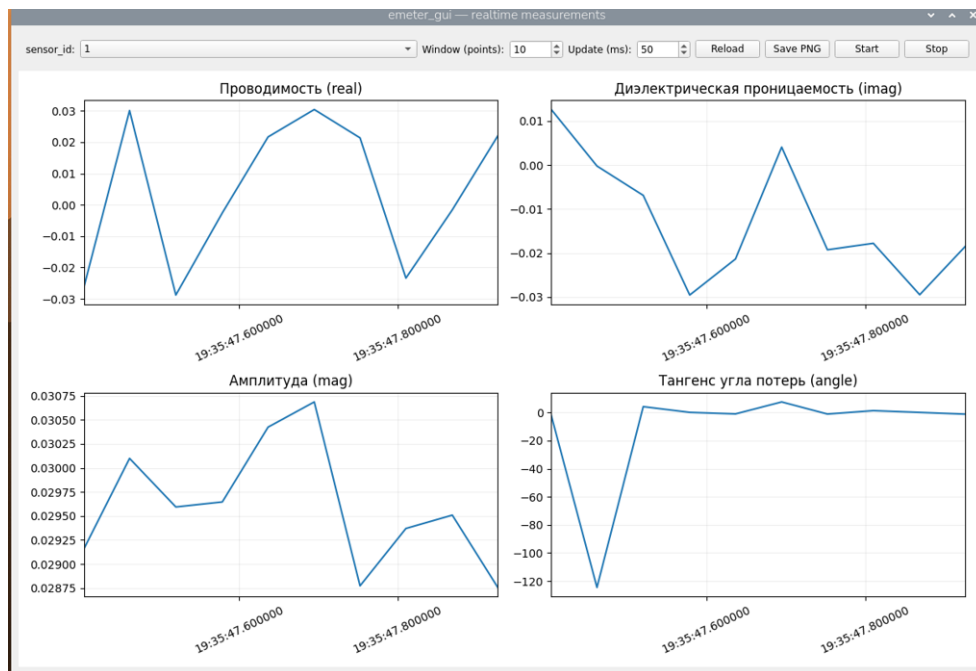


Рисунок 10 – Временные зависимости параметров *real*, *imag*, *mag* и *angle*, полученные для воздуха

Результаты измерения для гранита приведены на рисунке 11. В данном случае наблюдается значительно более высокий уровень параметра *real*, достигающий порядка 0,6. По сравнению с воздухом это свидетельствует о существенно более выраженном отклике исследуемого материала в измерительном канале. Кроме того, на графиках видно, что при измерении гранита характер изменения параметров отличается не только по амплитуде, но и по форме временных зависимостей.

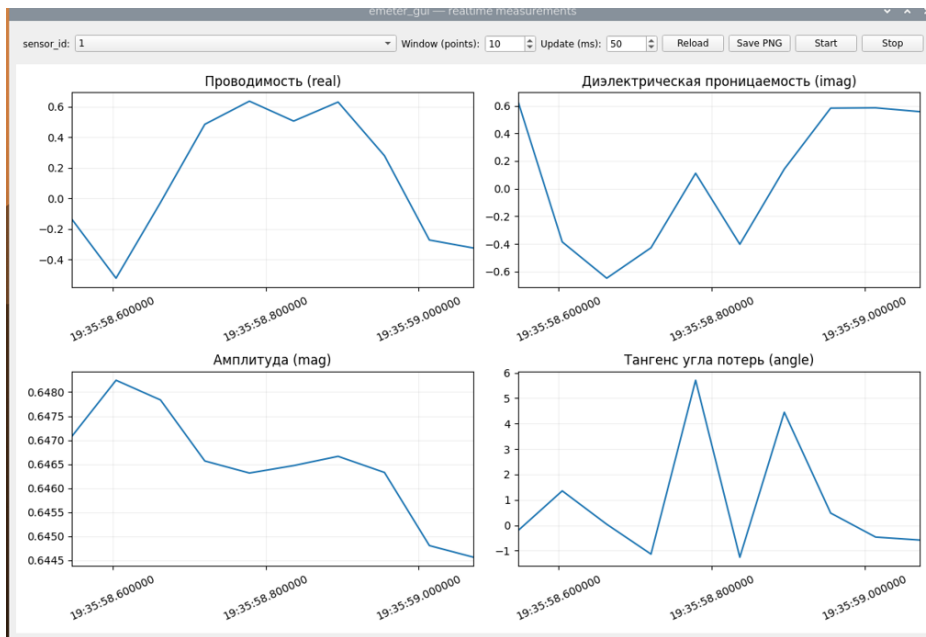


Рисунок 11 – Временные зависимости параметров real, imag, mag и angle, полученные для гранита

Результаты измерения для парафина приведены на рисунке 12. Для данного материала значения параметра real находятся на уровне около 0,02, то есть ниже, чем для гранита, и близки к значениям, наблюдаемым для воздуха. При этом временные зависимости параметров imag, mag и angle также демонстрируют собственный характер поведения, отличающийся от гранита.

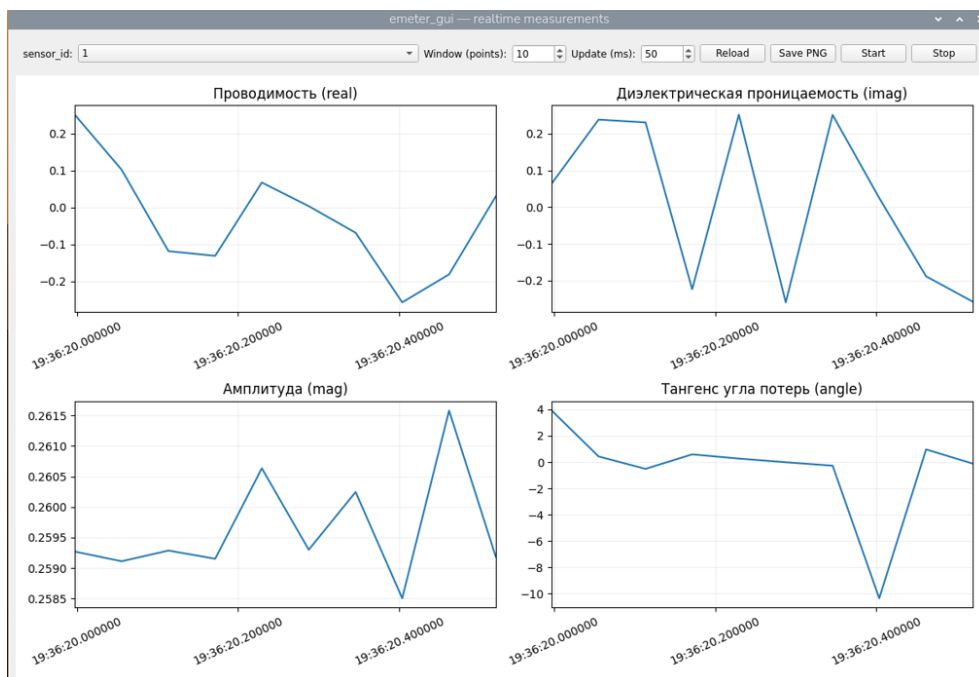


Рисунок 12 – Временные зависимости параметров real, imag, mag и angle, полученные для парафина

Для наглядного сопоставления результатов измерений для различных сред и материалов в таблице 6 приведены характерные значения параметров real и imag, полученные в ходе эксперимента.

Таблица 6 – Сравнительные результаты измерений для различных сред и материалов

Исследуемая среда / материал	Расчетный параметр <i>real</i>	Расчетный параметр <i>imag</i>	Справочное значение $\epsilon_r$	Справочная оценка $\sigma$	Комментарий
Воздух	~0,03	~0,23	~1,0	~0 мС/м	Опорный случай с малым уровнем комплексного отклика
Гранит	~0,60	~0,52	~4–6	~0,01–1 мС/м	Более выраженный отклик; свойства зависят от состава и влажности
Парафин	~0,02	~0,72	~2,25	очень малая	Низкопотерный диэлектрик с заметной реактивной составляющей отклика

Данные таблицы 6 показывают, что расчетные параметры *real* и *imag* изменяются при замене исследуемой среды и позволяют различать материалы по характеру комплексного отклика. Для гранита наблюдается наиболее выраженное значение параметра *real*, что указывает на существенное отличие его отклика от воздуха и парафина в условиях проведенного эксперимента. При этом значения *real* и *imag* на данном этапе следует рассматривать как внутренние информативные параметры измерительной системы, сопоставимые со справочными электрофизическими характеристиками только на качественном уровне [11].

Дополнительно в ходе эксперимента была подтверждена работоспособность пользовательского интерфейса системы. Графическое приложение обеспечивало выбор идентификатора датчика, загрузку последних измерений и отображение параметров *real*, *imag*, *mag* и *angle* в виде графиков. Это позволило выполнять оперативное наблюдение за поведением измеряемых характеристик непосредственно в процессе работы системы.

Для обобщения результатов экспериментальной проверки в таблице 7 приведены основные выводы по работоспособности системы.

Таблица 7 – Основные результаты экспериментальной проверки

Проверяемый аспект	Результат
Получение измерительных данных	Подтверждено
Вычисление параметров <i>real</i> , <i>imag</i> , <i>mag</i> , <i>angle</i>	Подтверждено
Отображение результатов в графическом интерфейсе	Подтверждено
Возможность предварительного различения воздуха, гранита и парафина по параметру <i>real</i>	Показана на качественном уровне
Хранение результатов измерений	Подтверждено

Таким образом, экспериментальная проверка показала, что разработанная программная система обеспечивает выполнение полного цикла работы с измерительной информацией и позволяет фиксировать различия в отклике исследуемых сред и материалов. Наиболее заметные различия в проведенной серии измерений были установлены для параметра *real*, что позволяет рассматривать его как один из основных информативных признаков при качественном сравнительном анализе материалов в рамках реализованного программно-аппаратного комплекса.

### Заключение

Результаты экспериментальной проверки показывают, что разработанная программная система обеспечивает выполнение полного цикла обработки измерительной информации: получение сигнала, вычисление информативных параметров комплексного отклика, сохранение результатов в базе данных и их визуализацию в графическом интерфейсе. Это позволяет рассматривать систему не только как программную реализацию отдельного

вычислительного алгоритма, но и как целостный программно-аппаратный комплекс, пригодный для решения задач мониторинга электрофизических характеристик материалов.

Наиболее важным результатом эксперимента является предварительно показанная различимость исследуемых сред и материалов по расчетному параметру *real*. Для гранита наблюдались существенно более высокие значения данного параметра по сравнению с воздухом и парафином. В свою очередь, для воздуха и парафина значения *real* оказались близкими по уровню, однако общая картина отклика по совокупности параметров *imag*, *mag* и *angle* сохраняла различия. Это позволяет рассматривать параметр *real* как один из информативных признаков при сравнительном анализе материалов в условиях проведенного эксперимента.

Полученные результаты свидетельствуют о чувствительности разработанной системы к изменению свойств исследуемой среды. Практически это означает, что программная система способна фиксировать различия в характере комплексного отклика материалов, что особенно важно при использовании подобных решений в задачах лабораторного анализа и мониторинга состояния объектов. При этом значения вычисляемых параметров на данном этапе следует рассматривать как внутренние информативные характеристики комплексного отклика, формируемые в рамках реализованного измерительного и вычислительного тракта. Их использование для получения абсолютных значений диэлектрической проницаемости и электропроводности требует дополнительной метрологической калибровки, задания геометрии измерительной ячейки и проверки на эталонных образцах.

Существенным достоинством разработанной системы является объединение в одном решении нескольких функциональных возможностей: работы с измерительным модулем, цифровой обработки сигнала, накопления архива измерений и отображения результатов в режиме, близком к реальному времени. Такое объединение повышает практическую ценность системы, поскольку позволяет использовать ее как основу для последующего расширения и адаптации к более сложным сценариям мониторинга.

Вместе с тем проведенное исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, экспериментальная проверка была выполнена на ограниченном наборе исследуемых объектов, что не позволяет пока делать широкие обобщения о поведении параметров для большого класса материалов. Во-вторых, для более строгой физической интерпретации результатов необходима дополнительная метрологическая привязка и калибровка системы с использованием эталонных образцов. В-третьих, дальнейшего развития требует расширение серии экспериментов, включая многократные повторные измерения, анализ стабильности результатов во времени и исследование чувствительности системы к изменению условий измерения.

Таким образом, обсуждение результатов показывает, что разработанная программная система успешно решает задачу автоматизированного мониторинга электрофизических характеристик материалов на качественном и сравнительном уровне. При этом дальнейшее развитие системы должно быть связано с расширением экспериментальной базы, совершенствованием процедуры калибровки и повышением точности интерпретации вычисляемых параметров.

### ***Литература***

1. Верещагин А. Ю. Программа геотехнического мониторинга объектов, входящих в зону влияния строительства / А. Ю. Верещагин, С. Д. Николенко, С. А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. — 2020. — № 4. — С. 4–9. — DOI: 10.12737/2219-0767-2020-12-4-4-9.
2. Щербинина М. Ю. Концепция «Интернета вещей» / М. Ю. Щербинина, Н. А. Стефанова // Креативная экономика. — 2016. — Т. 10, № 11. — С. 1323–1336.
3. Абдрахманов Р. С. Оценка сейсмической опасности территории Кыргызстана / Р. С. Абдрахманов, М. Омуралиев, А. М. Муралиев // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. — 2015. — № 5. — С. 27–31.

4. Кулешов Г. Е. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность композиционных материалов на основе углеродных наноструктур / Г. Е. Кулешов, В. И. Суляев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2014. — № 1(31). — С. 84–87.
5. ISO/IEC 30141:2024. Internet of Things (IoT) — Reference architecture. — Geneva : ISO/IEC, 2024. — 88 p.
6. Импедансная спектроскопия: теория и применение: учебное пособие / Ю. В. Емельянова, М. В. Морозова, З. А. Михайловская, Е. С. Буянова. — Екатеринбург : УрФУ, 2017. — 156 с.
7. Иноземцев М. А. Обзор методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород / М. А. Иноземцев // Электронные средства и системы управления : материалы докладов Международной научно-практической конференции. — 2020. — № 1-1. — С. 279–281.
8. Григорьев А. Д. Новый волноводный метод измерения параметров диэлектриков / А. Д. Григорьев // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2018. — № 5. — С. 33–38. — DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-33-38.
9. Молостов И. П. Коаксиальная измерительная ячейка для широкополосных измерений диэлектрической проницаемости / И. П. Молостов, В. В. Щербинин // Известия Алтайского государственного университета. — 2015. — № 1-2(85). — С. 56–60. — DOI: 10.14258/izvasu(2015)1.2-09.
10. Hidalgo-Fort E. Low-Cost, Low-Power Edge Computing System for Structural Health Monitoring in an IoT Framework / E. Hidalgo-Fort, P. Blanco-Carmona, F. Muñoz-Chavero, A. Torralba, R. Castro-Triguero // Sensors. — 2024. — Vol. 24, № 15. — P. 5078. — DOI: 10.3390/s24155078.
11. Typical Values for Rocks and Other Materials [Электронный ресурс] // EM GeoSci. — URL: [https://em.geosci.xyz/content/physical\\_properties/dielectric\\_permittivity/dielectric\\_permittivity\\_values.html](https://em.geosci.xyz/content/physical_properties/dielectric_permittivity/dielectric_permittivity_values.html) (дата обращения: 19.04.2026).