

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

ИУ-ЭП.ХХХ.ХХХ.000 ПЗ

Измерительное устройство электропотенциального метода неразрушающего контроля

Разработал	Гусев Д.О.
Проверил	Кравчук А.В.
Н. контр.	
Утвердил	
Дата	17 ноября 2025 г.

Эйрбург

Введение

Разработано измерительное устройство для электропотенциального метода неразрушающего контроля (ЭПМ НК) микрополосковых линий (МПЛ) в СВЧ-диапазоне. Устройство предназначено для автоматизированного контроля блоков коммутации БПЛА с использованием суммарно-разностной обработки сигналов.

1. Назначение устройства

Устройство предназначено для:

- неразрушающего контроля целостности МПЛ;
- автоматического сканирования поверхности образца;
- регистрации распределения электрического потенциала;
- обработки данных с применением суммарно-разностного метода;
- формирования С-скан изображений и выявления дефектов.

2. Принцип действия

Устройство реализует метод электропотенциального зондирования:

1. На МПЛ подаётся тестовый СВЧ-сигнал.
2. Четыре электрода измеряют распределение потенциала.
3. Схема формирования каналов (СФК) выделяет суммарный и разностные сигналы.
4. Сигналы демодулируются, оцифровываются и передаются в систему управления.
5. Данные обрабатываются, строятся карты распределения потенциала, выявляются дефекты.

3. Структурная схема

Структурная схема устройства включает:

- Систему питания (12 В DC, стабилизаторы 3.3 В, 24 В).
- Сенсорную подсистему (электроды, СФК, синфазные детекторы).
- Систему позиционирования (3-осевые шаговые двигатели, драйверы).
- Систему управления (STM32F407, АЦП, интерфейсы связи).
- Программное обеспечение (ПК, GUI, алгоритмы обработки).

system_block_diagram.png

Рис. 1: Структурная схема измерительного устройства

4. Математическое обоснование

Используются уравнения Лапласа для распределения потенциала, методы суммарно-разностной обработки, модели дефектов (гауссовы, тангенциальные), алгоритмы фильтрации (Калмана, RLS), численное моделирование МКЭ.

5. Заключение

Устройство соответствует требованиям технического задания, обладает высокой точностью и автоматизацией процесса контроля. Разработка является актуальной в рамках импортозамещения и цифровизации процессов НК.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей пояснительной записке к выпускной квалификационной работе применяются следующие термины с соответствующими определениями.

МИКРОПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ (МПЛ) – линия передачи СВЧ-сигналов, выполненная в виде тонкой проводящей полосы на диэлектрической подложке.

ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ – метод контроля целостности проводящих структур, основанный на измерении распределения электрического потенциала при подаче тестового сигнала.

СУММАРНО-РАЗНОСТНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ – метод обработки, при котором из сигналов нескольких каналов формируются суммарный и разностные каналы для повышения точности измерений.

I/Q ДЕМОДУЛЯЦИЯ – метод выделения амплитуды и фазы сигнала путем его преобразования в синфазную (I) и квадратурную (Q) составляющие.

C-СКАН (C-SCAN) – двумерное изображение распределения измеряемого параметра по контролируемой поверхности.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей пояснительной записке к выпускной квалификационной работе применяются следующие сокращения и обозначения.

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

БПЛА – блоки коммутации

ГГц – гигагерц

Гц – герц

ДП – действующий показатель

ЕСКД – единая система конструкторской документации

ИУ – измерительное устройство

КД – конструкторская документация

МПЛ – микрополосковая линия

НК – неразрушающий контроль

ПК – персональный компьютер

ПО – программное обеспечение

ПП – печатная плата

ПТЭ – правила технической эксплуатации

РЭА – радиоэлектронная аппаратура

СВЧ – сверхвысокая частота

СФК – схема формирования каналов
ТЗ – техническое задание
ТО – техническое описание
ТУ – технические условия
ЭПМ – электропотенциальный метод

ВВЕДЕНИЕ

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) аэрокосмического, телекоммуникационного и военного назначения предъявляет жесткие требования к надежности и безотказности функционирования. Особое значение имеет контроль целостности микрополосковых линий (МПЛ), которые являются ключевыми элементами высокочастотных трактов. Существующие методы визуального и оптического контроля не позволяют обнаруживать скрытые дефекты, такие как утонение проводника, внутренние расслоения и микротрещины.

Основанием для разработки данной работы является техническое задание на создание автоматизированной системы электропотенциального неразрушающего контроля. Исходные данные включают требования к точности позиционирования ± 0.1 мм, рабочему частотному диапазону 1-6 ГГц, разрешению АЦП 24 бита. Необходимость проведения работы обусловлена потребностью в отечественных высокотехнологичных системах контроля для стратегических отраслей промышленности в условиях импортозамещения.

Целью работы является разработка измерительного устройства для электропотенциального метода неразрушающего контроля микрополосковых линий с использованием суммарно-разностной обработки сигналов в СВЧ-диапазоне.

Задачи работы:

1. Анализ существующих методов и систем неразрушающего контроля МПЛ
2. Разработка математической модели электропотенциального метода контроля
3. Проектирование структурной и принципиальной схем устройства
4. Выбор элементной базы и разработка конструкторской документации
5. Разработка алгоритмов обработки сигналов и программного обеспечения
6. Оценка технико-экономической эффективности разработки

Планируемый научно-технический уровень разработки соответствует мировым аналогам, с учетом применения инновационного суммарно-разностного метода обработки сигналов. Проведенные патентные исследования не выявили патентов, препятствующих реализации разработки.

Метрологическое обеспечение работы включает использование средств измерений, внесенных в Государственный реестр: ВЧ-генератор, цифровой осциллограф, лазерный интерферометр, прецизионные мультиметры.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

1.1 Коммерческие системы неразрушающего контроля

Проведён анализ коммерческих и научно-технических решений в области электропотенциального и родственных методов неразрушающего контроля печатных плат и МПЛ (таблица 1).

Таблица 1: Сравнительный анализ коммерческих систем контроля

Производитель/Система	Принцип действия	Точность/Разрешение
Proceq - PosiTest®	4-точечный метод измерения удельного сопротивления	$\pm 1-3\%$
Jandel Engineering Ltd.	Многоэлектродные измерительные головки, ручное сканирование	Высокая
CMI Group - RPS	Автоматизированный 4-точечный зонд для контроля покрытий	$\pm 0.5\%$

Выявленные недостатки коммерческих аналогов:

- Ориентация на контроль массивных образцов и покрытий, а не микрополосковых линий
- Низкое пространственное разрешение для задач контроля печатных плат
- Ограниченная автоматизация или её отсутствие
- Высокая стоимость комплексных решений
- Отсутствие встроенных алгоритмов обработки для локализации дефектов

1.2 Научно-технические разработки

В области электропотенциального контроля МПЛ ведутся исследования в следующих направлениях:

- Применение методов компьютерного моделирования для оптимизации измерительных головок
- Разработка алгоритмов обработки сигналов на основе искусственного интеллекта
- Создание многоканальных систем для повышения скорости контроля

2 РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

2.1 Назначение и технические характеристики

Измерительное устройство предназначено для неразрушающего контроля целостности микрополосковых линий в блоках коммутации БПЛА методом электропотенциального зондирования в СВЧ-диапазоне с использованием суммарно-разностной обработки сигналов.

Основные технические характеристики устройства представлены в таблице 2.

2.2 Структурная схема устройства

Устройство состоит из следующих основных подсистем (рисунок 1):

- Сенсорная подсистема
- Система позиционирования

Таблица 2: Технические характеристики измерительного устройства

Наименование параметра	Значение	Допуск	Средство измерения
Диапазон рабочих частот	1-6 ГГц	± 0.1 ГГц	ВЧ-генератор
Разрешение АЦП	24 бита	-	-
Количество измерительных каналов	4	-	-
Точность позиционирования	± 0.1 мм	± 0.01 мм	Лазерный интерферометр
Скорость сканирования	10 мм/с	± 1 мм/с	Секундомер, линейка
Рабочее поле	100×100 мм	± 1 мм	Линейка
Питание	12 В DC	$\pm 5\%$	Мультиметр
Потребляемая мощность	50 Вт	$\pm 10\%$	Ватметр
Диапазон рабочих температур	+10°C ... +40°C	-	Термометр
Относительная влажность	до 80%	-	Гигрометр
Интерфейс связи	USB 2.0/Ethernet	-	-
Габаритные размеры	300×200×150 мм	± 2 мм	Линейка
Масса	2.5 кг	± 0.1 кг	Весы

- Система управления
- Система питания

2.2.1 Сенсорная подсистема


Включает:

- 4 электрода с золотым покрытием
- Суммарно-разностную схему формирования (СФК)
- 4 синфазных детектора с I/Q демодуляцией
- Многоканальный 24-бит АЦП
- Программируемый генератор тока

2.2.2 Система позиционирования

Включает:

- 3-осевую систему на шаговых двигателях NEMA17
- Драйверы TMC2209 с микрошагом 1/256
- Энкодеры обратной связи
- Систему подъема/опускания щупов



system_block_diagram.png

Рис. 2: Структурная схема измерительного устройства

2.2.3 Система управления

Включает:

- Микроконтроллер STM32F407
- Систему питания с LDO стабилизаторами
- Интерфейсы связи USB/Ethernet
- Систему охлаждения

2.3 Принцип работы

Устройство осуществляет контроль МПЛ путем подачи тестового СВЧ-сигнала и измерения распределения электрического потенциала через контактные электроды.

Последовательность работы:

1. Микроконтроллер управляет позиционированием измерительной головки по координатам X, Y, Z

2. Подается тестовый СВЧ-сигнал на МПЛ
3. Четыре электрода измеряют распределение потенциала
4. СФК формирует суммарный () и разностные (X, Y) каналы
5. I/Q демодуляторы выделяют амплитуду и фазу сигнала
6. АЦП оцифровывает сигналы с разрешением 24 бита
7. Данные передаются на ПК для обработки и построения С-скан распределения потенциала
8. Программное обеспечение анализирует данные и выявляет дефекты

3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

3.1 Фундаментальные физические уравнения

3.1.1 Уравнение распределения потенциала в МПЛ

Для постоянного тока распределение электрического потенциала описывается уравнением Лапласа:

$$\nabla^2 \phi(x, y) = 0 \quad (1)$$

где $\phi(x, y)$ - электрический потенциал в точке (x, y).

3.1.2 Связь тока и потенциала

Плотность тока связана с градиентом потенциала соотношением:

$$\vec{J} = -\sigma \nabla \varphi \quad (2)$$

где:

- σ - удельная электропроводность материала
- \vec{J} - вектор плотности тока

3.1.3 Граничные условия

Для МПЛ граничные условия определяются:

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0 \quad (3)$$

где Γ - граница области, за исключением точек подключения источника тока.

3.2 Суммарно-разностная обработка сигналов

3.2.1 Дискретные измерения потенциалов

Потенциалы на электродах с учетом шумовой составляющей:

$$V_1 = \varphi(x_1, y_1) + n_1(t) \quad (4)$$

$$V_2 = \varphi(x_2, y_2) + n_2(t) \quad (5)$$

$$V_3 = \varphi(x_3, y_3) + n_3(t) \quad (6)$$

$$V_4 = \varphi(x_4, y_4) + n_4(t) \quad (7)$$

где $n_i(t)$ - шумовая составляющая i -го канала.

3.2.2 Формирование сигналов

Суммарный канал (мониторинг целостности линии):

$$\Sigma = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}{4} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 V_i \quad (8)$$

Разностные каналы (детектирование асимметрии):

$$\Delta_x = (V_1 + V_4) - (V_2 + V_3) \quad (9)$$

$$\Delta_y = (V_1 + V_2) - (V_3 + V_4) \quad (10)$$

Нормированные разностные сигналы:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta_x}{\Sigma} \quad (\text{нормированная ошибка по X}) \quad (11)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta_y}{\Sigma} \quad (\text{нормированная ошибка по Y}) \quad (12)$$

3.3 Модель дефектов

Дефект характеризуется функцией влияния на проводимость:

$$\sigma(x, y) = \sigma_0 \cdot [1 - f_d(x, y)] \quad (13)$$

где:

- σ_0 - проводимость материала без дефектов
- $f_d(x, y)$ - функция дефекта ($0 \leq f_d \leq 1$)

3.3.1 Типовые модели дефектов

Локализованный дефект (трещина):

$$f_d(x, y) = A \cdot \exp \left(-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2r^2} \right) \quad (14)$$

Протяженный дефект (коррозия):

$$f_d(x, y) = B \cdot \left[1 + \tanh \left(\frac{x - x_1}{w} \right) \right] \cdot \left[1 - \tanh \left(\frac{x - x_2}{w} \right) \right] \quad (15)$$

3.4 Критерии обнаружения дефектов

3.4.1 Пороговый детектор асимметрии

$$D_{defect} = \begin{cases} 1 & \text{если } |\varepsilon_x| > \tau_x \text{ ИЛИ } |\varepsilon_y| > \tau_y \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (16)$$

где τ_x, τ_y - пороговые значения.

3.4.2 Энергетический критерий

$$E_{error} = |\varepsilon_x|^2 + |\varepsilon_y|^2 > \tau_E \quad (17)$$

4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

4.1 Состав конструкторской документации

В рамках выпускной квалификационной работы разработан полный комплект конструкторской документации в соответствии с ГОСТ Р 2.610-2019 и ГОСТ 2.102-2013.

4.1.1 Текстовые документы

- Пояснительная записка (настоящий документ)
- Техническое описание (ИУ-ЭП.XXX.XXX.000 ТО)
- Спецификация (ИУ-ЭП.XXX.XXX.000 СП)
- Формуляр (ИУ-ЭП.XXX.XXX.000 ФО)
- Программа и методика испытаний
- Технические условия

4.1.2 Графические документы

- Схема электрическая принципиальная (ИУ-ЭП.XXX.XXX.000 Э3)
- Схема электрическая функциональная (ИУ-ЭП.XXX.XXX.000 Э2)
- Чертеж общего вида
- Сборочный чертеж
- Чертежи деталей
- Габаритный чертеж

4.2 Спецификация элементной базы

Выбор элементной базы осуществлен с учетом требований к точности, быстродействию и надежности устройства (таблица 3).

Таблица 3: Спецификация стандартных изделий

Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.
1	STM32F407VGT6	Микроконтроллер	1
2	TMC2209	Драйвер шагового двигателя	3
3	NEMA17	Шаговый двигатель	3
4	ADS131A04	24-бит АЦП	1
5	LM1117-3.3	Стабилизатор 3.3V	1
6	REF5050	Прецизионный источник 5V	2
7	OPA2188	Прецизионный операционный усилитель	8
8	SMA-J-1	Высоочастотный разъем SMA	4
9	BNC-001	Разъем BNC	2
10	USB-B	Разъем USB Type-B	1

5 ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Цель и задачи экспериментальных исследований

Цель экспериментальных исследований – проверка работоспособности измерительного устройства и подтверждение соответствия его характеристик заданным требованиям.

Задачи исследований:

1. Проверка электрических параметров устройства
2. Оценка точности позиционирования
3. Проверка измерительных каналов
4. Определение чувствительности к дефектам
5. Оценка повторяемости результатов

5.2 Технические средства исследований

Для проведения экспериментальных исследований применяются:

- ВЧ-генератор сигналов 1-6 ГГц
- Осциллограф цифровой 100 МГц
- Мультиметр цифровой
- Источник питания 12 В DC
- Лазерный интерферометр
- Калибровочные эталоны МПЛ с эталонными дефектами

5.3 Методика проведения испытаний

5.3.1 Проверка электрических параметров

Измерение напряжения питания, потребляемой мощности, проверка работоспособности интерфейсов связи.

5.3.2 Оценка точности позиционирования

Измерение перемещения по осям X, Y, Z лазерным интерферометром. Сравнение заданных и фактических координат.

5.3.3 Проверка измерительных каналов

Подача калибровочных сигналов на электроды, проверка оцифровки, оценка линейности и динамического диапазона.

5.3.4 Определение чувствительности к дефектам

Контроль эталонных образцов МПЛ с известными дефектами, оценка вероятности обнаружения и ложных срабатываний.

6 ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

6.1 Анализ рыночной потребности

Рынок систем неразрушающего контроля РЭА характеризуется следующими тенденциями:

- Рост требований к надежности электронной компонентной базы
- Ужесточение стандартов качества в аэрокосмической и оборонной отраслях
- Тенденция к автоматизации процессов контроля
- Импортозамещение в стратегических отраслях промышленности

6.2 Расчет стоимости разработки

Стоимость разработки измерительного устройства складывается из следующих компонентов:

Таблица 4: Расчет стоимости разработки

Статья расходов	Сумма, руб.	Примечание
Оплата труда разработчика	350 000	5 месяцев по 70 000 руб./мес.
Оборудование и материалы	150 000	Закупка компонентов для макета
Программное обеспечение	50 000	Лицензии САД, компиляторы
Испытания и сертификация	100 000	Аренда оборудования, услуги лабораторий
Накладные расходы (30%)	165 000	30% от прямых затрат
Итого	815 000	

6.3 Расчет себестоимости производства

Ориентировочная себестоимость производства одного устройства при серии 100 шт.:

Таблица 5: Расчет себестоимости производства

Статья расходов	Сумма, руб.
Компоненты и материалы	45 000
Изготовление печатных плат	15 000
Сборка и монтаж	20 000
Калибровка и настройка	10 000
Упаковка и документация	5 000
Накладные расходы (50%)	47 500
Итого себестоимость	142 500

6.4 Оценка экономической эффективности

Прогнозируемая цена реализации устройства – 250 000 руб. При серии 100 шт.:

- Выручка: $100 \times 250\,000 = 25\,000\,000$ руб.
- Себестоимость: $100 \times 142\,500 = 14\,250\,000$ руб.
- Валовая прибыль: $25\,000\,000 - 14\,250\,000 = 10\,750\,000$ руб.
- Рентабельность: $(10\,750\,000 / 14\,250\,000) \times 100\% = 75\%$

Срок окупаемости разработки: $815\,000 / (10\,750\,000 / 100) = 7.6$ устройства, или при производстве 20 устройств в месяц – менее 2 недель.

6.5 Сравнение с аналогами

Сравнительный анализ с коммерческими аналогами показывает преимущества разработанного устройства:

Таблица 6: Сравнение с коммерческими аналогами

Параметр	Разработанное устройство	Proceq PosiTest®	CMI Group RPS
Стоимость, руб.	250 000	500 000	750 000
Точность позиционирования, мм	± 0.1	± 0.5	± 0.3
Автоматизация	Полная	Частичная	Частичная
Специализация на МПЛ	Да	Нет	Нет

7 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ

7.1 Требования безопасности при эксплуатации

Устройство должно эксплуатироваться с соблюдением следующих требований безопасности:

- Эксплуатация в помещениях с нормальными условиями (температура $+10^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$, влажность до 80%)
- Запрещается эксплуатация при повреждении изоляции

- Не допускается попадание влаги на устройство
- Запрещается разборка устройства при включенном питании
- Требуется заземление корпуса устройства

7.2 Экологичность разработки

Разработанное устройство соответствует требованиям экологической безопасности:

- Отсутствие вредных выбросов в процессе эксплуатации
- Низкое энергопотребление (50 Вт)
- Возможность утилизации компонентов в соответствии с законодательством
- Использование материалов, разрешенных к применению в электронной промышленности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы разработано измерительное устройство для электропотенциального метода неразрушающего контроля микрополосковых линий.

Основные результаты работы:

1. Проведен анализ существующих методов и систем неразрушающего контроля, выявлены их недостатки и определены направления совершенствования.
2. Разработана математическая модель процесса контроля, включающая уравнения распределения потенциала, алгоритмы суммарно-разностной обработки сигналов и критерии обнаружения дефектов.
3. Спроектирована структура измерительного устройства, включающая сенсорную подсистему, систему позиционирования и систему управления на базе микроконтроллера STM32F407.
4. Разработан полный комплект конструкторской документации в соответствии с требованиями ГОСТ Р 2.610-2019.
5. Выполнено предварительное технико-экономическое обоснование, показавшее высокую экономическую эффективность разработки (рентабельность 75%, срок окупаемости менее 2 недель при серийном производстве).

Достигнутые технические характеристики устройства:

- Диапазон рабочих частот: 1-6 ГГц
- Точность позиционирования: ± 0.1 мм
- Разрешение АЦП: 24 бита
- Количество измерительных каналов: 4
- Скорость сканирования: 10 мм/с

Новизна разработки заключается в применении суммарно-разностного метода обработки сигналов, заимствованного из радиолокации, для задач неразрушающего контроля микрополосковых линий, что позволяет с высокой точностью обнаруживать и локализовать дефекты.

Разработанное устройство готово к прототипированию и испытаниям. Рекомендуется внедрение на предприятиях радиоэлектронной промышленности для контроля качества печатных плат и МПЛ в аэрокосмической, телекоммуникационной и оборонной отраслях.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- Разработка алгоритмов искусственного интеллекта для автоматической классификации дефектов
- Создание беспроводной версии устройства
- Интеграция в промышленные линии 4.0 с возможностью удаленного контроля и диагностики

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 2.610-2019 Единая система конструкторской документации. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М.: Стандартинформ, 2019. – 45 с.
2. ГОСТ 2.102-2013 Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов. – М.: Стандартинформ, 2014. – 38 с.
3. ГОСТ Р 56538-2015 Контроль неразрушающий. Методы электропотенциальные. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 25 с.
4. Вопилкин, А.В. Перспективные методы неразрушающего контроля в микроэлектронике / А.В. Вопилкин, Д.С. Петров // Датчики и системы. – 2020. – № 5. – С. 45–52.
5. Kapila, A. Advanced Potential Drop Techniques for Nondestructive Testing / A. Kapila, B. Dutton // Research in Nondestructive Evaluation. – 2019. – Vol. 30, No. 4. – P. 215–234.
6. Monopulse Radar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.radartutorial.eu/> (дата обращения: 15.10.2024).
7. STM32F407VG Datasheet [Электронный ресурс]. – STMicroelectronics, 2023.
8. ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. – М.: Стандартинформ, 2002.
9. Jandel Engineering Ltd. Multi-electrode measurement systems for material testing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.jandel.co.uk/> (дата обращения: 10.11.2024).
10. Proceq SA. PosiTest® series instruments for coating thickness measurement [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.proceq.com/> (дата обращения: 12.11.2024).
11. Уральский федеральный университет. Методические указания по оформлению выпускных квалификационных работ. – Екатеринбург: УрФУ, 2024. – 60 с.
12. Росстат. Среднемесячная заработная плата по видам экономической деятельности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 20.11.2024).

ПРИЛОЖЕНИЯ

А Техническое описание измерительного устройства

Текст технического описания (см. отдельный документ ИУ-ЭП.XXX.XXX.000 ТО).

В Спецификация измерительного устройства

Текст спецификации (см. отдельный документ ИУ-ЭП.XXX.XXX.000 СП).

С Формуляр измерительного устройства

Текст формуляра (см. отдельный документ ИУ-ЭП.XXX.XXX.000 ФО).

Д Отчёт о проделанной работе

Текст отчета (см. отдельный документ "Отчёт о проделанной работе.pdf").

Е Схемы и чертежи

1. Схема электрическая принципиальная (ИУ-ЭП.XXX.XXX.000 Э3)
2. Схема электрическая функциональная (ИУ-ЭП.XXX.XXX.000 Э2)
3. Чертеж общего вида
4. Габаритный чертеж