

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени И.С.ТУРГЕНЕВА»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

по направлению подготовки 11.04.03 Конструирование и технология электронных
средств
направленность (профиль) Информационные технологии проектирования радио-
электронных средств и изделий микроэлектроники

Студента Остапова Владислава Руслановича шифр 245116

Институт приборостроения, автоматизации и информационных технологий

Кафедра электроники, радиотехники и систем связи

Тема выпускной квалификационной работы

Устройство определения параметров периодических сигналов в
условиях помех

Студент	_____ Остапов В.Р.
Научный руководитель	_____ Донцов В.М.
Нормоконтроль	_____ Лобанова В.А.
Зав. кафедрой	_____ Мишин В.В.

Орел, 2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени И.С. ТУРГЕНЕВА»

Институт приборостроения, автоматизации и информационных технологий
Кафедра электроники, радиотехники и систем связи
Направление подготовки 11.04.03 Конструирование и технология электронных средств
Направленность (профиль) Информационные технологии проектирования радио-электронных средств и изделий микроэлектроники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

_____ В.В. Мишин

« ____ » _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студента Остапова Владислава Руслановича шифр 245116

1. Тема ВКР Устройство определения параметров периодических сигналов в условиях помех

Утверждена приказом по университету от «02 » октября 2025 года № 8-169

2. Срок сдачи студентом законченной работы «03 » июня 2026 года

3. Исходные данные к работе:

объект исследования – периодические электрические сигналы в условиях помех;

предмет исследования – программно-аппаратная реализация измерения параметров периодических сигналов;

цель исследования – создание устройства измерения параметров периодических сигналов обеспечивающего заданную точность измерения в условиях помех

4. Содержание ВКР (перечень подлежащих разработке вопросов)

4.1 Аналитический раздел;

4.2 Исследовательский раздел;

4.3 Практический раздел.

5. Перечень демонстрационного материала: презентация, отражающая основные этапы и результаты выполнения ВКР

Дата выдачи задания «02» октября 2025 г.

Научный руководитель _____ Донцов В.М.

Задание принял к исполнению _____ Остапов В.Р.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов ВКР	Срок выполнения этапов работы	Примечание
Подбор литературы, ее изучение и обработка. Составление библиографии по основным источникам.	до « <u>08</u> » <u>апреля</u> 20 <u>26</u>	
Разработка и представление на проверку первого раздела.	до « <u>22</u> » <u>апреля</u> 20 <u>26</u>	
Накопление, систематизация, анализ практических материалов.	до « <u>04</u> » <u>мая</u> 20 <u>26</u>	
Разработка и представление на проверку остальных разделов	до « <u>22</u> » <u>мая</u> 20 <u>26</u>	
Согласование с руководителем выводов и приложений.	до « <u>28</u> » <u>мая</u> 20 <u>25</u>	
Переработка (доработка) ВКР в соответствии с замечаниями и представление ее на кафедру.	до « <u>03</u> » <u>июня</u> 20 <u>26</u>	
Разработка презентации доклада для защиты.	до « <u>4</u> » <u>июня</u> 20 <u>26</u>	
Завершение подготовки к защите с учетом отзыва руководителя	до « <u>4</u> » <u>июня</u> 20 <u>26</u>	

Студент _____ Остапов В.Р.

Научный руководитель ВКР _____ Донцов В.М.

АННОТАЦИЯ

Тема выпускной квалификационной работы: Устройство определения параметров периодических сигналов в условиях помех.

Год защиты: 2026

ВКР выполнил студент: Остапов В.Р.

Научный руководитель ВКР: Донцов В.М.

ВКР выполнена на 85 страницах, включает 4 рисунка, 2 таблицы, 1 приложение, 22 используемых источника. Работа включает 3 раздела.

Аналитический раздел содержит определение сигналов и помех, критерии и подходы к измерению сигналов, анализу существующих методов измерения сигналов и патентный поиск по существующим решениям.

Исследовательский раздел включает постановку задачи на разработку устройства, обоснование выбранного метода реализации устройства.

Практический раздел состоит из разработки структурной схемы устройства, подбора элементной базы, расчета потребляемой мощности устройства и экспериментальной проверки устройства, с последующим анализом полученных результатов.

Ключевые слова: периодические сигналы, измерения, помехоустойчивость, цифровая обработка сигналов.

					ВКР.11.04.03.245115.2026.01 ПЗ		
		Ф.И.О.	Подпись				
Разраб.	Остапов В.Р.			Устройство определения параметров периодических сигналов в условиях помех Расчетно-пояснительная записка	Лит.	Лист	Листов
Рук.	Донцов В.М.					4	85
Н. конт.	Лобанова В.А.				ОГУ им. И.С. Тургенева, ИПАИТ, 41КЭ-м, 2026		
Зав. каф.	Мишин В.В.						

ANNOTATION

The topic of the final qualifying work is: Device for determining the parameters of periodic signals in the presence of interference.

Year of defense: 2026

The final qualifying work was completed by the student: Ostapov V.R.

The scientific supervisor of the final qualifying work is: Dontsov V.M.

The final qualifying work consists of 85 pages, including 4 figures, 2 tables, 1 appendix, and 22 references. The work includes 3 sections.

The analytical section contains the definition of signals and interference, criteria and approaches to measuring signals, analysis of existing methods for measuring signals, and a patent search for existing solutions.

The research section includes the formulation of the task for developing a device, justification of the chosen method for implementing the device.

The practical section consists of developing a block diagram of the device, selecting the component base, calculating the power consumption of the device, and experimentally testing the device, followed by analysis of the results obtained.

Keywords: periodic signals, measurements, noise immunity, digital signal processing.

СОДЕРЖАНИЕ

ВЕДЕНИЕ	7
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ	9
1.1 Периодические сигналы: определение и значение	9
1.2 Области применения и практическая значимость	11
1.3 Виды помех и их влияние на измерения.....	12
1.4 Критерии и метрики сравнения методов	15
1.5 Существующие подходы к измерению параметров сигналов.....	18
1.6 Сравнительный анализ существующих методов определения параметров периодических сигналов.....	23
1.7 Патентный поиск и обзор аналогичных решений	26
2 ПРЕДЛАГАЕМЫЕ СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ.....	30
2.1 Постановка задачи разработки устройства.....	30
2.2 Реализация устройства на основе аналоговой предварительной обработки сигнала.....	33
2.3 Реализация устройства на основе полной оцифровки сигнала	36
2.4 Выбор метода обработки оцифрованного сигнала	40
2.4 Выбор алгоритмов цифровой обработки сигнала.....	43
2.5 Выбор структуры измерительного тракта	46
3 ПРОВЕРКА И ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	51
3.1 Разработка структурной схемы устройства.....	51
3.2 Выбор элементной базы	54
3.3 Разработка электрической принципиальной схемы устройства	59
3.4 Расчет потребляемой мощности устройства	62
3.5. Экспериментальная проверка устройства	65
3.6 Анализ экспериментальных данных	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	74
Приложение	78

ВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью измерения параметров периодических электрических сигналов в составе современных радиоэлектронных устройств и испытательных комплексов. При проведении исследований и испытаний электронных компонентов часто требуется автоматизированное определение характеристик сигналов без участия оператора и без использования дорогостоящего лабораторного оборудования. При этом измерения должны выполняться с достаточной точностью в условиях воздействия различных помех и шумов.

Особую актуальность данная задача приобретает при разработке специализированных испытательных стендов, предназначенных для контроля параметров электронных устройств на этапах разработки и испытаний. В таких системах требуется не только получение значений амплитуды и частоты сигнала, но и возможность оперативного изменения алгоритмов обработки в случае изменения требований к измеряемым параметрам.

Объектом исследования являются периодические электрические сигналы в условиях воздействия помех.

Предмет исследования — программно-аппаратные методы измерения параметров периодических сигналов.

Целью работы является создание устройства измерения параметров периодических сигналов, обеспечивающего заданную точность определения амплитуды и частоты в условиях воздействия помех.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ периодических сигналов, их основных параметров и факторов, влияющих на точность измерений;
- выполнен обзор существующих методов измерения параметров периодических сигналов, а также анализ их достоинств и недостатков;
- проведен патентный поиск и анализ существующих технических решений;

- сформированы требования к разрабатываемому устройству;
- выполнен выбор метода измерения параметров сигнала и алгоритмов обработки данных;
- разработаны структурная и электрическая принципиальная схемы устройства;
- выполнен выбор элементной базы и проведена оценка энергетических характеристик устройства;
- разработано программное обеспечение для сбора и обработки данных;
- изготовлен и исследован макетный образец устройства;
- проведена экспериментальная проверка работоспособности разработанного решения и выполнен анализ полученных результатов.

Для решения поставленных задач применялись методы цифровой обработки сигналов, методы статистической обработки результатов измерений, методы схемотехнического проектирования аналоговых и цифровых устройств, а также экспериментальные методы исследования электронных средств.

Под помехами в рамках данной работы понимаются аддитивный белый шум и промышленные электромагнитные помехи промышленной частоты 50 Гц и ее гармоник.

Научная новизна работы заключается в применении комплексного подхода к измерению параметров периодических сигналов, основанного на совместном использовании аппаратной фильтрации, цифровой фильтрации и последующей статистической обработки результатов измерений.

Практическая ценность работы состоит в разработке устройства, позволяющего выполнять автоматизированное измерение амплитуды и частоты периодических сигналов в составе испытательных комплексов и специализированных измерительных систем без применения дорогостоящего лабораторного оборудования.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Глава посвящена обзору теории и практики измерения параметров периодических сигналов в условиях помех. Рассматриваются основные определения и свойства периодических сигналов [6], их роль в различных прикладных областях (связи, радиолокации, медицине, промышленной автоматизации и пр.) и основные виды помех (тепловые шумы, импульсные помехи, ЭМИ, фазовый шум, джиттер и др.) с их влиянием на оценку амплитуды и частоты.

Далее анализируются методы измерения: от простых аналоговых (компараторы, частотомеры, ФАПЧ и др.) до цифровых (АЦП + МК, БПФ, корреляция, измерение по нулевым пересечениям, гистограммный анализ и др.).

Для каждого метода описаны принципы работы, достоинства и недостатки, сложность реализации, стоимость компонентов, помехоустойчивость и гибкость алгоритмов.

Проведен краткий патентный поиск: показано, что есть отдельные патенты на методы измерения частоты и спектральный анализ (например, RU2183839C1, RU2229139C1), но нет явно серийных узкоспециальных приборов за исключением осциллографов [7].

Сформулированы критерии сравнения методов (сложность разработки, стоимость, гибкость, точность) и приведены таблицы сравнения. Рекомендуются направления экспериментальной проверки, включая тесты с различными сигналами и помехами.

1.1 Периодические сигналы: определение и значение

Определение: Сигнал называется периодическим, если его форма повторяется с постоянным периодом T , то есть:

$$x(t) = x(t + T), \quad (1.1)$$

при любом t [8]. Простейшая форма – гармоническое (синусоидальное) колебание с амплитудой A и частотой $f=1/T$. Сумма гармоник различной кратности основной частоты порождает сложные периодические волны (например, меандр, треугольник). *Фурье-преобразование* позволяет разложить любой периодический сигнал в ряд синусоид с частотами n/T [9]. Это ключевое свойство периодических сигналов: дискретный (линейчатый) спектр с отдельными гармониками, амплитуды которых описывают форму сигнала.

Значимость: Периодические сигналы являются фундаментальной основой практически всех электротехнических систем. Они служат несущими для передачи информации, опорными сигналами синхронизации, тестовыми сигналами для калибровки приборов и т.д. Например, в радиосвязи и телекоммуникациях распространены синусоидальные несущие (для модуляции данных) и прямоугольные тактовые сигналы; в радиолокации – периодические импульсы или ЧМ/ФМ-модулированные посылки; в медицине – периодические биологические сигналы (ЭКГ, ЭЭГ) несут информацию о состоянии органов; в промышленной электронике – опорные частоты тактовых генераторов, ШИМ-сигналы управления двигателями и источниками питания; в приборах контроля – эталонные формы сигналов (синусоидальные, пила, комплексы гармоник) для калибровки и тестирования датчиков и схем. Таким образом, возможности надежного измерения амплитуды, частоты и формы периодических сигналов критически важны для систем связи, радиолокации, измерительной техники, медицинской аппаратуры и промышленного оборудования. Например, в системах 5G/6G требуются сверхчистые (низко шумовые) несущие сигналы с высокой стабильностью и точностью [10], а в измерительной технике (осциллографах, анализаторах спектра) – эталонные сигнализаторы для проверки аппаратуры. Эффективное определение параметров периодических сигналов позволяет диагностировать неисправности (анализ гармоник, фазового шума и импульсных искажений указывает на проблемы аппаратуры), оптимизировать работу систем связи (устойчивость к помехам определяется характеристиками

несущих) и обеспечить точность управления (правильный такт синхронных схем).

1.2 Области применения и практическая значимость

В телекоммуникации, при передаче цифровых и аналоговых данных основную роль играют периодические колебания – синусоидальные несущие (РЧ и оптические) с точной частотой и амплитудой. Меандр (тактовые или синхросигналы) – прямоугольные волны – «сердце» цифровых каналов [10]. Измерители параметров таких сигналов применяются в радио и оптике (проверка качества несущей, уровня модуляции, помехоустойчивости каналов).

В области радиолокации и радионавигации зондирующие сигналы РЛС обычно представляют собой короткие импульсы или ЧМ/ФМ-посылки с точно заданной повторяющейся структурой. Измерение их амплитуды и периода важно для оценки дальности и скорости целей. В системах доплеровской обработки изменение частоты несущей даёт информацию о движении объекта [11]. Надежная оценка частоты/фазы сигналов обеспечивает высокую точность позиционирования в навигации.

В медицине измерение параметров сигналов необходимо при различных исследованиях: электрокардиограмма (ЭКГ), электроэнцефалограмма (ЭЭГ) и другие. Биоэлектрические сигналы имеют периодический характер или содержат периодические компоненты (например, сердечные сокращения). Устройства для сбора и анализа таких сигналов используют измерители частоты и амплитуды (анализ пиков QRS, синхронизация на кардиоток) для диагностики. Пульсоксиметры, аппараты УЗИ и др. также генерируют и анализируют колебания.

В промышленности измерительные устройства нужны в системах управления двигателями и электропитанием. Широко применяются ШИМ и другие периодические сигналы для регулирования мощности. Измерители

параметров сигналов помогают калибровать датчики тока/напряжения и контролировать качество сетей. Промышленные тестовые стенды (например, испытательные стенды микросхем) анализируют сигналы от испытуемых микросхем.

В контрольно-измерительном оборудовании, таком как: осциллографы, анализаторы спектра, частотомеры сами выступают в роли измерителей параметров сигналов. Они оперируют реальными периодическими сигналами и помехами и проверяют их параметры. Отсутствие специализированных приборов (кроме универсальных осциллографов, например, Tektronix TDS7404B [12]) делает актуальной разработку компактных цифровых измерителей параметров сигнала.

1.3 Виды помех и их влияние на измерения

При проведении измерений параметры исследуемого сигнала практически никогда не наблюдаются в чистом виде. На результат измерения оказывают влияние как внутренние шумы измерительной аппаратуры, так и внешние воздействия, возникающие в окружающей среде. Даже в случае использования качественной элементной базы полностью избавиться от шумов невозможно, поэтому при разработке измерительных устройств большое внимание уделяется оценке помехоустойчивости применяемых методов обработки.

Наиболее распространенным источником случайных искажений является тепловой шум, также известный как шум Джонсона. Его возникновение связано с хаотическим движением носителей заряда в проводниках и полупроводниковых структурах. Особенность данного вида шума заключается в том, что он присутствует в любой электрической цепи независимо от режима ее работы. Фактически тепловой шум является фундаментальным физическим ограничением, определяющим предельную чувствительность электронных устройств.

Спектр теплового шума в широком диапазоне частот можно считать равномерным, поэтому его часто относят к категории белого шума. При наложении на полезный сигнал он увеличивает разброс измеряемых значений и снижает отношение сигнал/шум. На практике это приводит к появлению случайной погрешности при измерении амплитуды сигнала и увеличению разброса результатов при определении периода и частоты. Особенно заметным влияние теплового шума становится при работе с сигналами малой амплитуды, когда уровень полезного сигнала оказывается сравним с уровнем шумовой составляющей.

Помимо изменений амплитуды существенное влияние на результаты измерений оказывают временные нестабильности сигнала. Такие явления обычно объединяют термином «фазовый шум». В отличие от теплового шума, проявляющегося главным образом как случайное изменение мгновенного значения сигнала, фазовый шум приводит к небольшим случайным отклонениям момента появления фронтов и изменению фазы колебаний [13].

Источниками фазового шума могут быть генераторы тактовой частоты, усилительные каскады, системы фазовой автоподстройки частоты и даже процессы квантования в аналого-цифровых преобразователях [13]. На спектре сигнала наличие фазового шума проявляется в виде расширения спектральной линии вокруг основной частоты. Во временной области этот эффект наблюдается как джиттер — случайный разброс положения фронтов сигнала относительно их идеального положения. Для систем измерения частоты подобные отклонения имеют особое значение, поскольку непосредственно влияют на точность определения периода. Даже при высокой стабильности средней частоты наличие джиттера приводит к появлению дополнительной погрешности измерений.

Отдельную группу составляют импульсные помехи, возникающие вследствие коммутационных процессов, работы силового оборудования, электростатических разрядов или атмосферных явлений [14]. В отличие от теплового и фазового шума, которые обычно имеют сравнительно небольшую

амплитуду и проявляются непрерывно, импульсные помехи характеризуются кратковременным, но значительным по величине воздействием.

Подобные выбросы способны на короткое время полностью исказить измеряемый сигнал. В зависимости от используемого алгоритма обработки результатом может стать ложное определение периода, появление дополнительных фронтов либо ошибочная оценка амплитуды. Особенно чувствительными к импульсным помехам оказываются методы, основанные на анализе пороговых пересечений. Даже одиночный выброс может привести к формированию ложного события и последующей ошибке измерения. По этой причине во многих измерительных системах применяются специальные методы подавления импульсных помех, включая ограничение амплитуды, цифровую фильтрацию и статистическую обработку результатов.

Помимо случайных шумов на результаты измерений часто влияют регулярные электромагнитные помехи, создаваемые расположенным поблизости оборудованием. Источниками таких помех могут быть силовые сети электропитания, импульсные источники питания, электродвигатели, радиопередающие устройства и различные цифровые системы. В отличие от случайного шума электромагнитные помехи часто обладают выраженной спектральной структурой и могут проявляться в виде отдельных гармонических составляющих.

Наличие таких воздействий приводит к наложению на полезный сигнал дополнительных колебаний. В результате изменяется форма сигнала, появляются паразитные гармоники, а на спектре возникают дополнительные пики. Наиболее известным примером является промышленная помеха частотой 50 Гц, которая способна существенно влиять на измерение низкочастотных сигналов. При работе с высокочастотными устройствами аналогичную проблему создают сигналы радиопередатчиков и цифровых систем связи.

Существуют и другие разновидности шумов, например дробовой шум, возникающий вследствие дискретной природы электрического заряда, а также

фликкер-шум, часто называемый шумом типа $1/f$. В большинстве практических задач их влияние оказывается менее заметным по сравнению с тепловым шумом или электромагнитными помехами. Однако при работе с малыми уровнями сигналов либо в области низких частот данные виды шумов могут становиться существенным источником погрешностей измерения.

Следует отметить, что воздействие различных видов помех редко проявляется по отдельности. В реальных условиях измерительная система одновременно подвергается воздействию нескольких источников шумов, каждый из которых вносит свой вклад в итоговую погрешность. В результате снижается точность определения амплитуды, увеличивается разброс оценок периода и ухудшается воспроизводимость результатов измерений.

Для количественной оценки влияния шумов обычно используют отношение сигнал/шум (SNR), а также статистические характеристики ошибок измерения. Чем ниже уровень шумов относительно полезного сигнала, тем выше достоверность получаемых результатов. Поэтому при проектировании современных измерительных систем важную роль играет не только выбор элементной базы, но и применение алгоритмов обработки, способных сохранять устойчивость измерений даже при значительном уровне помех.

1.4 Критерии и метрики сравнения методов

Для выбора наиболее рационального способа построения устройства определения параметров периодических сигналов необходимо выполнить сравнительный анализ существующих подходов. Проведение такого анализа позволяет не только определить технические возможности каждого решения, но и оценить затраты на его реализацию, перспективы дальнейшей модернизации и пригодность для работы в условиях воздействия помех.

Следует отметить, что при разработке измерительных устройств недостаточно рассматривать только метрологические характеристики.

Высокая точность измерений может сопровождаться значительным усложнением аппаратной части, высокой стоимостью компонентов или невозможностью адаптации алгоритмов обработки под новые условия эксплуатации. Аналогично, дешевые и простые решения могут обладать недостаточной точностью либо ограниченным набором измеряемых параметров. Поэтому сравнение различных методов должно выполняться по совокупности критериев, отражающих как технические, так и экономические аспекты разработки.

При выборе критериев оценки учитывались особенности рассматриваемой задачи, а именно необходимость определения параметров периодических сигналов в условиях воздействия шумов и помех, возможность последующей модернизации программного обеспечения, а также перспективы практического применения устройства в составе измерительных комплексов. Для объективной оценки методов введены следующие критерии.

Сложность разработки. Данный критерий характеризует объем трудозатрат, необходимых для создания устройства, включая проектирование аппаратной части, разработку программного обеспечения и проведение испытаний. Оценка выполняется по предполагаемому количеству человеко-часов, а также по уровню требуемой квалификации разработчиков. Особое внимание уделяется необходимости применения специализированных знаний в области цифровой обработки сигналов, схемотехники высокоскоростных аналоговых трактов и программирования встраиваемых систем. Критерий имеет высокую значимость, поскольку напрямую влияет на сроки выполнения проекта и стоимость разработки.

Стоимость компонентов. Критерий отражает ориентировочную стоимость элементной базы устройства. В расчет включаются микроконтроллеры, сигнальные процессоры, программируемые логические интегральные схемы, аналого-цифровые преобразователи и иные функционально значимые компоненты. Пассивные элементы, печатные платы и прочие детали с незначительной стоимостью в расчет не принимаются.

Оценка производится по рыночным ценам компонентов, доступных для приобретения на момент разработки. Значимость критерия определяется необходимостью создания решения, пригодного для практического внедрения без чрезмерных экономических затрат.

Возможности обработки сигналов. Критерий характеризует функциональные возможности системы и гибкость применяемых алгоритмов. В рамках оценки рассматривается перечень измеряемых параметров сигнала (амплитуда, частота, период, фазовый сдвиг, коэффициент гармонических искажений, спектральный состав и другие характеристики), а также возможность последующей модификации алгоритмов без изменения аппаратной части устройства. Данный критерий является одним из наиболее значимых, поскольку определяет потенциальную область применения разрабатываемой системы и перспективы ее дальнейшего развития.

Точность и разрешающая способность в условиях шума. Критерий показывает способность метода сохранять достоверность результатов измерений при наличии внешних и внутренних помех. Оценка производится по величине погрешности определения параметров сигнала при различных отношениях сигнал/шум (SNR), а также по минимальным изменениям параметров, которые устройство способно надежно зарегистрировать. Высокая значимость данного критерия обусловлена тем, что именно устойчивость к шумам является одной из основных задач рассматриваемой работы.

Время реакции системы. Критерий характеризует скорость получения результатов измерений и задержку между поступлением сигнала и формированием оценки его параметров. При анализе учитывается как время накопления данных, так и длительность их последующей обработки. Особую важность данный показатель приобретает при работе с быстро изменяющимися процессами и в системах автоматического управления, где своевременность получения информации оказывает непосредственное влияние на эффективность работы всей системы.

Таким образом, выбранные критерии позволяют выполнить комплексное сравнение различных подходов к определению параметров периодических сигналов и обеспечить обоснованный выбор технического решения для дальнейшей реализации устройства.

1.5 Существующие подходы к измерению параметров сигналов

Задача определения параметров периодических сигналов не является новой. За длительный период развития измерительной техники было предложено большое количество методов измерения частоты, амплитуды, фазы и других характеристик сигналов. Различные методы отличаются как принципом работы, так и сложностью реализации, точностью измерений и устойчивостью к воздействию помех.

Условно все существующие методы можно разделить на две большие группы: аналоговые и цифровые. Аналоговые методы появились значительно раньше и до сих пор широко применяются в устройствах, где требуется минимальная стоимость и высокая скорость обработки сигналов. Цифровые методы получили распространение благодаря развитию микроконтроллеров, цифровых сигнальных процессоров и быстродействующих аналого-цифровых преобразователей. Они обеспечивают значительно большую гибкость и позволяют реализовывать сложные алгоритмы обработки без изменения аппаратной части устройства.

Наиболее простым способом определения параметров сигнала является использование специализированных аналоговых схем. Такие устройства, как правило, решают одну конкретную задачу и обладают ограниченными возможностями модернизации. Изменение алгоритма обработки обычно требует изменения электрической схемы или замены отдельных узлов устройства.

Одним из наиболее распространенных аналоговых методов является использование компараторов и пороговых детекторов. Принцип работы

подобных устройств заключается в сравнении входного сигнала с заданным пороговым уровнем. При превышении порога на выходе компаратора формируется цифровой сигнал, содержащий информацию о моментах пересечения входным сигналом установленного уровня. На основе полученных импульсов могут выполняться измерения периода и частоты сигнала. [15]

Основным преимуществом данного подхода является простота реализации. Для построения устройства зачастую достаточно одного компаратора и нескольких вспомогательных элементов. Такие схемы способны работать в режиме реального времени и не требуют применения аналого-цифровых преобразователей или вычислительных устройств. Вместе с тем точность измерений существенно зависит от уровня шумов и стабильности порогового напряжения. При наличии помех возникают ложные срабатывания, приводящие к дополнительным фронтам и ошибкам определения периода сигнала. По этой причине подобные схемы чаще всего используются в простых частотомерах и устройствах контроля наличия сигнала.

Развитием идеи порогового детектирования являются цифровые частотомеры прямого счета. Принцип их работы заключается в подсчете количества периодов исследуемого сигнала за фиксированный интервал времени. Если за время измерения зарегистрировано N периодов сигнала, то частота определяется по выражению

$$f = \frac{N}{T_{сч}}, \quad (1.2)$$

где $T_{сч}$ — интервал измерения. [15]

Метод прямого счета отличается высокой точностью при использовании длительных интервалов измерения и качественного опорного генератора. Благодаря относительной простоте реализации данный подход получил широкое распространение в лабораторных измерительных приборах и промышленных системах контроля. Однако такой метод позволяет определить

только частоту сигнала и практически не предоставляет информации о его форме или спектральном составе. Кроме того, наличие помех может приводить к появлению лишних или пропущенных импульсов, что непосредственно влияет на результат измерения.

Для измерения частоты также широко применяются системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В основе работы таких устройств лежит сравнение фазы входного сигнала с фазой сигнала внутреннего генератора. В результате работы системы формируется управляющее воздействие, обеспечивающее синхронизацию генератора с исследуемым сигналом.

Использование ФАПЧ позволяет эффективно подавлять высокочастотные помехи и получать устойчивую оценку частоты даже при значительном уровне шума. Именно поэтому подобные схемы получили широкое распространение в радиоприемной аппаратуре, системах связи и синтезаторах частоты. Недостатком метода является сравнительно сложная аппаратная реализация и ограниченность измеряемых параметров. В большинстве случаев система ФАПЧ позволяет получить только информацию о частоте и фазе сигнала, тогда как определение амплитуды и формы сигнала требует дополнительных измерительных трактов.

Несмотря на широкое распространение аналоговых методов, в последние годы наблюдается устойчивый переход к цифровым способам обработки сигналов. Причиной этого является значительный рост производительности микроконтроллеров и снижение стоимости быстродействующих аналого-цифровых преобразователей. В цифровых системах исследуемый сигнал сначала преобразуется в последовательность отсчетов, после чего необходимые параметры определяются программными методами.

Наиболее универсальным вариантом является использование высокоскоростного АЦП совместно с микроконтроллером или микропроцессором. После оцифровки сигнала становятся доступны различные алгоритмы цифровой обработки, выбор которых зависит от

поставленной задачи. [8]

Одним из наиболее известных методов является спектральный анализ на основе быстрого преобразования Фурье. Метод позволяет представить сигнал в виде совокупности гармонических составляющих и определить частоты, присутствующие в исследуемом спектре. Данный подход широко применяется в измерительной технике благодаря возможности обнаружения нескольких гармоник одновременно и оценки уровня спектральных составляющих. [9]

Вместе с тем использование быстрого преобразования Фурье требует значительного объема вычислений и достаточного количества отсчетов сигнала. Кроме того, точность спектрального анализа зависит от выбора оконных функций и параметров дискретизации. При неправильном выборе параметров могут возникать эффекты спектральной утечки и снижение точности определения частоты.

Другим распространенным способом является определение периода по моментам пересечения сигналом нулевого уровня или заданного порога. В цифровой реализации данный метод основан на поиске отсчетов, соответствующих изменению знака сигнала, и последующем вычислении среднего периода между соседними пересечениями.

Преимуществом метода является высокая скорость вычислений и простота реализации. Однако при наличии шумов положение точек пересечения уровня может значительно изменяться, что приводит к увеличению погрешности измерений. Поэтому на практике подобные алгоритмы часто используются совместно с цифровой фильтрацией сигнала.

Для работы в условиях повышенного уровня шума применяются методы корреляционного анализа. В этом случае исследуемый сигнал сравнивается с собственной копией, сдвинутой во времени, либо с заранее известным эталонным сигналом. Максимум корреляционной функции позволяет определить период, фазовый сдвиг и ряд других параметров.

Корреляционные методы отличаются высокой устойчивостью к помехам и способны работать даже при низком отношении сигнал/шум.

Однако повышение устойчивости достигается ценой значительного увеличения вычислительной нагрузки и требований к объему памяти устройства.

Особый интерес для рассматриваемой работы представляет гистограммный анализ сигнала. В отличие от большинства методов, основанных на анализе временной структуры сигнала, данный подход использует статистическое распределение значений отсчетов. При накоплении большого количества измерений формируется гистограмма амплитуд, отражающая вероятность появления тех или иных уровней сигнала.

Для периодических сигналов с ограниченным количеством характерных уровней на гистограмме возникают выраженные максимумы. Положение этих максимумов позволяет оценить амплитудные параметры сигнала, а дополнительный анализ последовательности отсчетов дает возможность определить период и частоту. Важным преимуществом метода является его высокая устойчивость к случайным шумам. Воздействие помех приводит к некоторому расширению распределения значений, однако положение основных максимумов сохраняется даже при относительно низком отношении сигнал/шум. [15]

Для обработки высокоскоростных потоков данных также используются цифровые сигнальные процессоры и программируемые логические интегральные схемы. Подобные решения позволяют выполнять сложные вычисления непосредственно в процессе поступления данных и обеспечивают высокую производительность системы. На базе DSP и FPGA реализуются современные цифровые осциллографы, анализаторы спектра, программно-определяемые радиосистемы и другие устройства обработки сигналов.

Недостатком данного подхода является высокая стоимость разработки и необходимость привлечения специалистов высокой квалификации. Кроме того, для многих задач производительность таких систем оказывается избыточной, что делает их применение экономически нецелесообразным.

Помимо универсальных измерительных систем существуют

специализированные цифровые анализаторы, предназначенные для решения отдельных задач. К ним относятся анализаторы фазового шума, джиттера, временных интервалов и других параметров высокочастотных сигналов. Такие приборы обеспечивают высокую точность измерений, однако имеют значительную стоимость и ориентированы на узкий круг прикладных задач.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что аналоговые методы отличаются простотой и низкой стоимостью, однако обладают ограниченными возможностями обработки сигналов. Современные цифровые методы обеспечивают значительно большую гибкость и позволяют реализовывать сложные алгоритмы анализа, включая спектральную, корреляционную и статистическую обработку. Наиболее перспективным направлением для решения поставленной задачи является использование быстродействующего аналого-цифрового преобразователя совместно с цифровыми алгоритмами обработки, что позволяет сочетать высокую точность измерений, устойчивость к помехам и возможность дальнейшего совершенствования программного обеспечения без изменения аппаратной части устройства.

1.6 Сравнительный анализ существующих методов определения параметров периодических сигналов

Рассмотренные методы обладают различными достоинствами и недостатками, что затрудняет выбор оптимального подхода для построения устройства определения параметров периодических сигналов в условиях воздействия шумов и помех. На практике эффективность метода определяется не только точностью измерений, но и сложностью реализации, стоимостью оборудования, возможностью модернизации программного обеспечения и устойчивостью к изменению условий эксплуатации.

Особенностью поставленной задачи является необходимость одновременного определения нескольких параметров сигнала при наличии

помех. Кроме того, разрабатываемое устройство должно обеспечивать возможность дальнейшего совершенствования алгоритмов обработки без существенного изменения аппаратной части, а так же использования в составе измерительно-испытательного оборудования.

Для удобства анализа основные характеристики рассмотренных методов сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 — Сравнительные характеристики методов.

Метод	Сложность разработки	Стоимость компонентов	Возможности обработки	Устойчивость к шуму	Гибкость алгоритмов
Компараторы и пороговые детекторы	Низкая	Низкая	Частота, наличие сигнала	Низкая	Отсутствует
Частотомер прямого счета	Низкая	Низкая	Частота	Средняя	Отсутствует
ФАПЧ	Средняя	Средняя	Частота, фаза	Высокая	Низкая
FFT на MCU	Средняя	Средняя	Частота, спектр, гармоники	Средняя	Высокая
Метод нулевых пересечений	Низкая	Средняя	Частота	Низкая	Высокая
Корреляционный анализ	Высокая	Средняя	Частота, период, фаза	Высокая	Высокая
Гистограммный анализ	Средняя	Средняя	Амплитуда, частота, статистические параметры	Высокая	Высокая
DSP / FPGA	Очень высокая	Высокая	Практически не ограничены	Высокая	Очень высокая

Из приведенных данных видно, что наиболее простыми в реализации являются схемы на компараторах и классические цифровые частотомеры. Для их построения требуется минимальное количество компонентов, а алгоритмы обработки могут быть реализованы даже на простых микроконтроллерах. Однако такие методы обладают существенным недостатком: они позволяют определить лишь ограниченный набор параметров сигнала и обладают сравнительно низкой устойчивостью к воздействию шумов.

Использование систем фазовой автоподстройки частоты позволяет повысить устойчивость измерений и получить более стабильную оценку частоты сигнала. Вместе с тем применение ФАПЧ приводит к усложнению аппаратной части устройства и практически не предоставляет информации о

форме сигнала и его амплитудных характеристиках.

Методы цифровой обработки на основе быстрого преобразования Фурье значительно расширяют функциональные возможности измерительной системы. Помимо определения основной частоты сигнала появляется возможность анализа гармонического состава и оценки спектральных характеристик. Недостатком метода является сравнительно высокая вычислительная сложность, особенно при необходимости анализа больших объемов данных в реальном времени.

Корреляционные методы демонстрируют высокую устойчивость к помехам и позволяют выполнять измерения даже при низких значениях отношения сигнал/шум. Однако вычислительные затраты при реализации корреляционного анализа существенно возрастают по мере увеличения объема выборки, что ограничивает применение метода на микроконтроллерах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Особого внимания заслуживает гистограммный подход к анализу сигналов. В отличие от большинства рассмотренных методов, он позволяет использовать статистические свойства сигнала для определения его параметров. Наличие шумов оказывает значительно меньшее влияние на положение основных максимумов распределения, чем на моменты пересечения порогов или результаты прямого подсчета периодов. Благодаря этому появляется возможность получения устойчивых оценок параметров сигнала даже при значительном уровне помех.

Отдельную категорию составляют решения на базе цифровых сигнальных процессоров и программируемых логических интегральных схем. Подобные системы обладают практически неограниченными возможностями обработки сигналов и способны выполнять сложные вычисления в режиме реального времени. Однако высокая стоимость разработки, значительные трудозатраты и повышенные требования к квалификации разработчиков делают применение таких решений не всегда оправданным.

Следует также отметить, что серийно выпускаемые приборы,

предназначенные для измерения параметров периодических сигналов, в большинстве случаев представлены цифровыми осциллографами и специализированными анализаторами спектра. Такие устройства обеспечивают высокую точность измерений и широкий набор функций, однако обладают существенной стоимостью и зачастую являются избыточными для решения узкоспециализированных задач. Кроме того, большинство коммерческих приборов не предоставляет возможности модификации алгоритмов обработки сигналов пользователем.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о целесообразности применения цифрового подхода, основанного на использовании быстродействующего аналого-цифрового преобразователя и последующей программной обработке полученных данных. Такой подход обеспечивает приемлемую стоимость аппаратной части, высокую устойчивость к воздействию шумов и возможность изменения алгоритмов обработки без внесения изменений в конструкцию устройства. Дополнительным преимуществом является возможность передачи массива оцифрованных данных на персональный компьютер для выполнения более сложного анализа, что позволяет расширить функциональные возможности системы без увеличения сложности встроенного программного обеспечения.

1.7 Патентный поиск и обзор аналогичных решений

При разработке нового измерительного устройства необходимо провести анализ существующих технических решений и определить степень проработанности рассматриваемой проблемы. Патентный поиск позволяет выявить наиболее распространенные подходы к измерению параметров периодических сигналов, определить направления развития измерительной техники, а также оценить степень новизны предлагаемых решений.

Поиск выполнялся по ключевым словам «измерение частоты сигнала», «измерение параметров периодических сигналов», «анализ сигналов»,

«обработка сигналов в условиях помех», «измерение фазы сигнала», «спектральный анализ сигналов» и другим близким запросам. Анализ проводился по материалам Федерального института промышленной собственности (ФИПС), патентным базам Российской Федерации и открытым публикациям, посвященным измерительной технике [11][16].

В результате поиска было установлено, что значительная часть найденных патентов посвящена решению отдельных задач обработки сигналов, таких как определение частоты, измерение фазовых характеристик, спектральный анализ или генерация тестовых сигналов. При этом комплексные решения, предназначенные для определения нескольких параметров периодического сигнала в условиях воздействия шумов, встречаются значительно реже.

Одним из наиболее близких по тематике является патент RU2183839C1 «Способ измерения частоты синусоидальных сигналов» [11]. В данном решении предлагается определять частоту входного сигнала на основе рекуррентной обработки фазовой информации. Устройство использует умножители, фильтры нижних частот и вычислительные блоки, обеспечивающие непрерывное определение частоты сигнала в режиме реального времени. Основным преимуществом данного подхода является высокая скорость получения результата и возможность непрерывного отслеживания изменений частоты. Вместе с тем рассматриваемое решение ориентировано преимущественно на измерение частоты синусоидальных сигналов и не предназначено для определения амплитудных характеристик или анализа формы сигнала.

Другим интересным решением является патент RU2229139C1, посвященный спектральному анализу сложных периодических сигналов [16]. Предложенный метод основан на перемножении исследуемого сигнала с бинарным опорным сигналом и последующем накоплении результатов за период анализа. За счет этого достигается сокращение вычислительных затрат по сравнению с классическими методами спектрального анализа. Такой

подход позволяет определять частоты отдельных гармоник и оценивать их амплитуды. Однако устройство ориентировано на решение задач спектрального анализа и требует заранее определенной структуры исследуемого сигнала.

В ходе поиска был также обнаружен патент СССР SU1709262 «Калибратор периодических сигналов». Несмотря на то, что данное устройство не относится непосредственно к средствам измерения, оно представляет интерес как пример специализированной аппаратуры для формирования периодических и шумоподобных сигналов. Подобные устройства часто используются при испытаниях измерительных трактов и проверке устойчивости алгоритмов обработки к воздействию помех.

В ряде публикаций и патентных материалов рассматриваются способы определения средней частоты периодических сигналов, в частности решение RU2365924. Основное внимание в подобных работах уделяется повышению точности измерения частоты и снижению влияния нестабильности временной базы. При этом вопросы определения амплитудных характеристик и анализа формы сигнала обычно остаются за рамками рассматриваемых решений.

Отдельное направление исследований связано с повышением точности фазовых измерений в условиях воздействия шумов. Примером может служить патент RU2740790, посвященный оценке фазовых характеристик многочастотных сигналов. В описании подчеркивается, что наличие шумов и помех является одним из основных факторов, ограничивающих точность измерительных систем. Данный факт дополнительно подтверждает актуальность темы настоящей работы, поскольку именно устойчивость измерений к воздействию шумов является одной из основных целей разработки.

Следует отметить, что значительная часть современных технических решений реализуется не в виде специализированных измерителей отдельных параметров, а в виде универсальных цифровых осциллографов и анализаторов сигналов. Такие приборы позволяют наблюдать форму сигнала, выполнять

спектральный анализ, измерять временные интервалы и вычислять широкий набор характеристик. Однако подобные устройства ориентированы прежде всего на использование человеком-оператором и содержат развитый человеко-машинный интерфейс, средства визуализации и настройки параметров измерений.

В отличие от осциллографов, разрабатываемое в рамках данной работы устройство предназначено для интеграции в состав других технических систем. В этом случае необходимость в графическом интерфейсе отсутствует, а основное значение приобретают компактность, низкая стоимость, возможность автоматической обработки результатов измерений и простота интеграции в существующее оборудование.

Проведенный патентный поиск показывает, что большинство найденных решений ориентировано на измерение одного конкретного параметра сигнала либо на применение специализированных методов обработки [11][16]. Универсальные приборы, такие как цифровые осциллографы и анализаторы спектра, обеспечивают значительно более широкий набор функций, однако характеризуются высокой стоимостью и избыточностью для многих прикладных задач.

Таким образом, можно сделать вывод, что существует потребность в относительно простых и недорогих устройствах, способных выполнять определение основных параметров периодических сигналов в условиях воздействия шумов и помех. Особенно востребованными являются решения, допускающие модификацию алгоритмов обработки без изменения аппаратной части и обеспечивающие возможность передачи исходных данных для последующего анализа на персональном компьютере.

2 ПРЕДЛАГАЕМЫЕ СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

2.1 Постановка задачи разработки устройства

Результаты анализа, выполненного в первой главе, показывают, что задача измерения параметров периодических сигналов в условиях помех остается актуальной для широкого круга технических систем. Несмотря на наличие большого количества измерительных приборов общего назначения, таких как цифровые осциллографы, анализаторы спектра и частотомеры, их применение не всегда является целесообразным. Во многих случаях требуется не универсальный измерительный комплекс, а компактное устройство, способное автоматически определять основные параметры сигнала и передавать результаты в состав вышестоящей системы управления.

Особенно актуальна подобная задача для автоматизированных испытательных стендов, встроенных диагностических систем, технологического оборудования и специализированных измерительных комплексов. В таких системах отсутствует необходимость визуального наблюдения формы сигнала оператором, однако требуется получение достоверной информации о его параметрах с минимальным участием человека.

В рамках настоящей работы рассматривается задача определения параметров периодических сигналов в диапазоне частот от 30 до 300 кГц. Указанный диапазон характерен для различных электронных устройств, преобразователей энергии, генераторов, систем управления и контрольно-измерительной аппаратуры. При этом предполагается, что измеряемый сигнал может содержать помехи различной природы, возникающие как в исследуемом объекте, так и в самом измерительном тракте.

Основными параметрами, подлежащими определению, являются частота сигнала и его амплитуда. Данные параметры позволяют оценивать работоспособность исследуемых устройств и контролировать соблюдение

заданных режимов работы. Определение постоянной составляющей сигнала не является обязательным требованием, поскольку в рассматриваемых задачах она не несет полезной диагностической информации и может быть исключена еще на этапе аналоговой обработки входного сигнала.

Одним из важнейших требований к разрабатываемому устройству является устойчивость к воздействию помех. Как было показано в первой главе, реальные сигналы редко наблюдаются в идеальных условиях. На результаты измерений оказывают влияние тепловые шумы электронных компонентов, электромагнитные наводки, нестабильность генераторов, а также импульсные помехи различного происхождения. В связи с этим выбранный метод измерения должен обеспечивать возможность получения достоверных результатов даже при значительном уровне шумов.

Следующим важным требованием является возможность модификации алгоритмов обработки сигнала. На этапе эксплуатации устройства могут возникать новые требования к обработке измерительной информации, появляться новые типы сигналов или изменяться критерии оценки результатов. Использование жестко специализированных аналоговых схем в таких условиях приводит к необходимости переработки аппаратной части устройства. Поэтому предпочтительным является подход, при котором основная логика измерений реализуется программными средствами и может быть изменена без внесения изменений в электрическую схему.

При выборе метода реализации необходимо также учитывать стоимость устройства. В рассматриваемой задаче не требуется достижение метрологических характеристик лабораторного оборудования. Гораздо более важным является получение приемлемой точности измерений при разумной стоимости компонентов и минимальной сложности конструкции. Это особенно важно при использовании устройства в составе испытательных стендов или серийно выпускаемого оборудования.

Дополнительным требованием является возможность интеграции устройства в автоматизированные измерительные системы. Результаты

измерений должны быть доступны для последующей обработки, регистрации или передачи во внешние программные комплексы. При необходимости должна сохраняться возможность передачи не только вычисленных параметров, но и исходных данных измерений для выполнения более сложного анализа на стороне персонального компьютера.

Отдельного внимания заслуживают требования к входному измерительному тракту. Поскольку постоянная составляющая сигнала не представляет интереса для решаемой задачи, желательно исключить ее влияние на результаты измерений еще до этапа аналого-цифрового преобразования. Кроме того, входной тракт должен обеспечивать ослабление низкочастотных помех, в первую очередь наводок промышленной сети частотой 50 Гц и ее гармоник. Это позволяет более эффективно использовать динамический диапазон преобразователя и уменьшить влияние посторонних воздействий на результаты измерений.

Таким образом, к разрабатываемому устройству предъявляются следующие основные требования:

- определение амплитуды периодического сигнала;
- определение частоты сигнала в диапазоне от 30 до 300 кГц;
- работа в условиях воздействия шумов и помех;
- возможность изменения алгоритмов обработки без изменения аппаратной части;
- умеренная стоимость компонентов;
- возможность интеграции в автоматизированные системы;
- возможность передачи результатов измерений и исходных данных во внешние программные средства;
- подавление постоянной составляющей и низкочастотных наводок на входе устройства.

На основании сформулированных требований в дальнейшем будет выполнен анализ возможных способов реализации устройства и произведен выбор метода обработки сигнала, наиболее полно удовлетворяющего

поставленной задаче.

2.2 Реализация устройства на основе аналоговой предварительной обработки сигнала

Одним из возможных способов решения поставленной задачи является использование специализированной аналоговой схемы предварительной обработки сигнала. В отличие от методов, основанных на полной оцифровке измеряемого сигнала, данный подход предполагает выделение интересующих параметров непосредственно аппаратными средствами с последующей передачей результатов в микроконтроллер.

Основная идея такого решения заключается в разделении задачи измерения амплитуды и частоты на несколько независимых аппаратных узлов. При этом микроконтроллер выполняет преимущественно функции сбора результатов измерений и их передачи во внешнюю систему, а основная обработка осуществляется аналоговыми схемами.

Для измерения частоты сигнала может использоваться компаратор с гистерезисом. [15] Исследуемый сигнал поступает на вход компаратора, где преобразуется в последовательность прямоугольных импульсов. Наличие гистерезиса позволяет уменьшить влияние шумов вблизи порога переключения и предотвратить многократные ложные срабатывания при прохождении сигнала через уровень сравнения. [18]

После преобразования сигнала в цифровую форму измерение частоты может выполняться аппаратными средствами микроконтроллера. Для этого один из таймеров переводится в режим счетчика внешних импульсов. Количество зарегистрированных импульсов за известный интервал времени позволяет определить частоту входного сигнала с минимальными вычислительными затратами.

Измерение амплитуды может быть реализовано отдельными аналоговыми каналами. Один из вариантов предполагает использование двух

независимых схем выделения экстремальных значений сигнала. Первый канал предназначен для определения максимального значения напряжения, второй — для определения минимального.

Каждый из каналов может содержать компаратор и интегрирующий элемент, обеспечивающий накопление информации о достигнутых уровнях сигнала. Полученные значения поступают на входы аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера, после чего программное обеспечение вычисляет амплитуду как разность между верхним и нижним уровнями сигнала.

Подобный подход позволяет существенно снизить объем вычислений, выполняемых микроконтроллером. Фактически программная часть сводится к запуску таймера, периодическому чтению нескольких каналов аналого-цифрового преобразователя и выполнению простых арифметических операций. По сравнению с методами, основанными на анализе большого массива отсчетов, требования к производительности вычислительной системы оказываются значительно ниже.

В процессе обсуждения возможных вариантов реализации также рассматривалась схема с использованием встроенных цифро-аналоговых преобразователей микроконтроллера. В этом случае уровни срабатывания компараторов могли формироваться программно и динамически изменяться в процессе работы устройства. Такой подход позволяет выполнять автоматическую подстройку порогов измерения и уменьшить влияние разброса параметров аналоговых компонентов.

Дополнительным преимуществом использования программно управляемых порогов является возможность реализации алгоритмов автоматической калибровки устройства. При изменении характеристик компонентов вследствие старения или температуры система может корректировать уровни сравнения без вмешательства пользователя.

Несмотря на относительную простоту программной части, разработка аналогового измерительного тракта представляет собой достаточно сложную

инженерную задачу. Для обеспечения требуемой точности необходимо учитывать реальные параметры компонентов, температурную стабильность, входные токи компараторов, утечки конденсаторов интеграторов, влияние паразитных емкостей печатной платы и другие факторы.

Кроме того, аналоговые схемы требуют тщательной настройки как на этапе разработки, так и при изготовлении устройства. Даже незначительное изменение номиналов резисторов или характеристик активных компонентов может привести к смещению порогов срабатывания и появлению дополнительной систематической погрешности.

Следует отметить и фундаментальное ограничение данного подхода. Поскольку измерительная система фактически оперирует уже обработанными аналоговыми величинами, информация о форме сигнала и характере помех оказывается потеряна. Для устройства становится невозможным определить, является ли изменение измеренной амплитуды следствием реального изменения параметров сигнала либо результатом воздействия внешней помехи.

Например, кратковременный высокоамплитудный выброс может быть воспринят схемой выделения максимального значения как часть полезного сигнала. Аналогично низкочастотные наводки способны изменить измеряемый уровень амплитуды без возможности их дальнейшего отделения от полезной составляющей. В результате система получает только итоговое значение параметра, но не располагает информацией, достаточной для оценки достоверности результата измерения.

Таким образом, использование аналоговой предварительной обработки позволяет построить относительно простое устройство с минимальными требованиями к вычислительным ресурсам. Такой подход обеспечивает высокую скорость получения результатов и практически не создает нагрузки на микроконтроллер. Вместе с тем сложность разработки аналоговой части, необходимость настройки схемы и ограниченные возможности анализа помех существенно снижают гибкость данного решения. Любое изменение

алгоритма обработки требует модификации аппаратной части устройства, что усложняет дальнейшее развитие измерительной системы.

2.3 Реализация устройства на основе полной оцифровки сигнала

Рассмотренный в предыдущем разделе подход обладает рядом достоинств, однако имеет существенное ограничение, связанное с жесткой привязкой алгоритмов измерения к аппаратной реализации устройства. Любое изменение требований к измерениям приводит к необходимости модификации аналоговой схемы, что усложняет сопровождение и дальнейшее развитие системы.

На этапе предварительного проектирования рассматривалась возможность создания более универсального измерительного тракта, основанного на полной оцифровке входного сигнала с последующей программной обработкой. В отличие от аналоговых методов, данный подход предполагает сохранение исходной информации о сигнале и перенос основной части вычислений в программное обеспечение.

Такое решение позволяет изменять методы обработки без внесения изменений в электрическую схему устройства. Фактически аппаратная часть в этом случае отвечает только за получение цифровых отсчетов сигнала, а все алгоритмы анализа реализуются программно и могут быть изменены в процессе эксплуатации.

Необходимость обеспечения высокой гибкости алгоритмов была обусловлена особенностями исходной задачи, для решения которой разрабатывалось устройство. На начальных этапах проекта предполагалось создание измерительного комплекса для контроля параметров специализированных интегральных микросхем. При этом перечень контролируемых параметров неоднократно изменялся в процессе выполнения работ.

Дополнительной особенностью проекта являлось то, что разработка

испытательного оборудования велась параллельно с разработкой самой микросхемы. На момент начала работ отсутствовали опытные образцы изделия, а часть требований существовала только в виде предварительных технических условий. По мере развития проекта уточнялись состав функциональных блоков микросхемы, методы проведения испытаний, а также перечень измеряемых параметров.

Следует отметить, что в крупных проектах подобная ситуация встречается относительно редко. Как правило, разработка испытательного оборудования начинается после завершения основных этапов проектирования изделия и появления стабильной версии технической документации. В рассматриваемом случае значительная часть требований продолжала изменяться уже в процессе разработки измерительной системы, что создавало дополнительные риски и требовало высокой адаптивности применяемых технических решений.

Ситуация дополнительно осложнялась отсутствием модели цифровой части микросхемы, пригодной для автономного тестирования. В результате часть предполагаемых сценариев испытаний могла быть проверена только после получения опытных образцов изделия. Это приводило к необходимости закладывать возможность изменения алгоритмов измерения еще на этапе проектирования аппаратной части устройства.

Анализ условий эксплуатации показал, что использование специализированных аналоговых схем для каждого измеряемого параметра в подобных условиях является нежелательным. Любое изменение методики испытаний могло потребовать переработки печатной платы, изменения схемотехнических решений и повторного изготовления аппаратуры. Такой подход увеличивал сроки выполнения работ и повышал стоимость разработки.

По этой причине было принято решение рассматривать архитектуру, основанную на сохранении максимально полного объема информации об исследуемом сигнале. Наличие массива цифровых отсчетов позволяет реализовывать различные алгоритмы обработки исключительно

программными средствами. При необходимости могут быть изменены методы определения амплитуды, частоты, фазы, формы сигнала или введены дополнительные вычисляемые параметры без внесения изменений в аппаратную часть устройства.

Дополнительным преимуществом полной оцифровки сигнала является возможность сохранения измеренных данных и их последующего анализа на персональном компьютере. В отличие от аналоговых методов, где доступны только конечные результаты измерений, цифровой подход позволяет исследовать исходные данные повторно и применять к ним новые алгоритмы обработки без проведения повторного эксперимента.

Вместе с тем реализация такого подхода предъявляет значительно более высокие требования к подсистеме сбора данных. Для корректного определения параметров сигнала необходимо обеспечить частоту дискретизации, существенно превышающую максимальную частоту исследуемого процесса.

На ранних этапах проекта предполагалось, что диапазон измеряемых частот может достигать нескольких мегагерц. Согласно предварительным требованиям, верхняя граница измерений находилась в диапазоне от 2 до 3 МГц. При таких частотах использование встроенных аналого-цифровых преобразователей большинства микроконтроллеров становится затруднительным. Планируемый микроконтроллер серии STM32F40x может обеспечить 2.7 мега выборки в секунду в режиме оцифровки одним аналогово-цифровым преобразователем, чего критически недостаточно. В режиме «triple-ADC» максимальная скорость оцифровки — 7.2 мега выборки, чего тоже недостаточно для анализа сигнала частотой в 2 мегагерца и выше. [17]. К тому же, из-за этого не останется свободных блоков аналогово-цифровых преобразователей и дальнейшее расширение функциональных возможностей устройства будет затруднено.

Даже если формально выполняется условие теоремы Котельникова, согласно которой частота дискретизации должна как минимум в два раза

превышать максимальную частоту сигнала, для практического измерения параметров этого недостаточно. При малом количестве отсчетов на период резко снижается точность определения амплитуды и становится невозможным выполнение статистической обработки сигнала.

Например, при частоте сигнала 3 МГц и частоте дискретизации 6 МГц на один период приходится всего два отсчета. Такая ситуация теоретически позволяет восстановить сигнал, однако практически не оставляет возможностей для измерения его параметров и анализа помех. Для получения достоверных результатов желательно иметь десятки отсчетов на период сигнала.

По этой причине использование встроенного аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера было признано недостаточным. Для реализации концепции полной оцифровки потребовалось рассматривать применение внешнего быстродействующего аналого-цифрового преобразователя, способного обеспечить частоту дискретизации, значительно превышающую верхнюю границу диапазона измеряемых частот, например старый аналогово цифровой преобразователь «из телевизора» от Analog Devices. [19]

Первичный анализ возможностей микроконтроллеров серии STM32F40x показал, что микроконтроллер способен принимать довольно плотный поток данных используя DMA (и возможно, DCMІ контроллер, изначально предназначенный для подключения цифровых камер), а для ускорения вычислений вычислительное ядро содержит блок FPU (как и любой другой микроконтроллер на базе ядра Cortex-M4) [20].

Таким образом, переход к архитектуре полной оцифровки сигнала позволял решить сразу несколько задач. С одной стороны, обеспечивалась возможность изменения алгоритмов обработки без модификации аппаратной части устройства. С другой стороны, сохранялась вся информация об исследуемом сигнале, что открывало возможности для последующего анализа и адаптации измерительной системы к изменяющимся требованиям проекта.

Недостатком такого подхода являлось увеличение требований к вычислительным ресурсам и необходимость использования высокоскоростного аналого-цифрового преобразователя, однако получаемая гибкость системы компенсировала указанные сложности.

2.4 Выбор метода обработки оцифрованного сигнала

После выбора архитектуры устройства, основанной на полной оцифровке входного сигнала, возникает задача определения алгоритмов обработки полученных данных. Наличие массива отсчетов открывает возможность использования различных методов цифровой обработки сигналов, отличающихся вычислительной сложностью, требованиями к памяти и точностью получаемых результатов.

На этапе проектирования рассматривалось несколько подходов к определению параметров периодического сигнала. Основными критериями выбора являлись точность измерений, устойчивость к шумам, объем требуемых вычислительных ресурсов и возможность реализации на выбранной аппаратной платформе.

Одним из наиболее известных методов анализа периодических сигналов является спектральный анализ на основе быстрого преобразования Фурье. Данный метод позволяет определить частотный состав сигнала, выделить отдельные гармонические составляющие и оценить их амплитуды. Благодаря универсальности БПФ широко применяется в современных цифровых осциллографах, анализаторах спектра и системах цифровой обработки сигналов.

Несмотря на очевидные преимущества, применение преобразования Фурье в рассматриваемой задаче имеет ряд недостатков. Для получения достаточного частотного разрешения требуется накопление значительного объема данных. Кроме того, выполнение БПФ требует существенных вычислительных ресурсов, особенно при необходимости обработки сигналов

в реальном времени. Следует учитывать, что основная задача разрабатываемого устройства заключается не в анализе спектра сигнала, а в определении его основных параметров — амплитуды и частоты. Использование преобразования Фурье для решения такой задачи является избыточным и приводит к неоправданному усложнению программного обеспечения.

Другим распространенным подходом является применение корреляционных методов. Автокорреляционная функция позволяет определять период сигнала даже при значительном уровне шумов. Данный метод обладает высокой помехоустойчивостью и способен работать с сигналами сложной формы.

Однако использование корреляционного анализа требует хранения большого массива отсчетов и выполнения значительного количества операций умножения и суммирования. При увеличении длины анализируемой выборки объем вычислений возрастает пропорционально квадрату числа отсчетов. Для высокоскоростных потоков данных такой подход становится ресурсоемким и предъявляет повышенные требования как к производительности микроконтроллера, так и к объему оперативной памяти.

Более простым способом определения частоты является анализ моментов пересечения сигналом заданного уровня. В простейшем случае используется пересечение нулевого уровня, по которому определяется длительность периода сигнала. Данный метод требует минимального объема вычислений и может быть реализован непосредственно во время обработки массива отсчетов.

Недостатком метода является его чувствительность к шумам. При наличии помех вблизи уровня переключения могут возникать ложные срабатывания, приводящие к ошибочному определению периода. Для повышения устойчивости обычно применяется гистерезис, при котором переход сигнала считается состоявшимся только после прохождения двух различных пороговых уровней.

Для определения амплитуды сигнала рассматривались различные способы анализа массива отсчетов. Наиболее очевидным решением является поиск минимального и максимального значений в выборке с последующим вычислением разности между ними. Однако такой подход оказывается крайне чувствительным к случайным выбросам и импульсным помехам. Даже единичный шумовой отсчет способен существенно исказить результат измерения.

Альтернативным вариантом является использование гистограммного анализа. Суть метода заключается в накоплении статистического распределения отсчетов по уровням амплитуды. Для периодических сигналов характерно неравномерное распределение значений, в результате чего наиболее вероятные уровни формируют выраженные максимумы гистограммы. [15]

Особый интерес представляет поведение гистограммы при наличии шумов. Если амплитуда помех существенно меньше амплитуды полезного сигнала, шум приводит лишь к расширению основных максимумов распределения. При этом положение максимумов остается практически неизменным, что позволяет определять амплитуду сигнала значительно надежнее по сравнению с непосредственным поиском экстремальных значений выборки.

Дополнительным преимуществом метода является его простота. Построение гистограммы требует только подсчета количества попаданий отсчетов в заданные диапазоны значений и не использует сложных математических операций. Это делает алгоритм хорошо пригодным для реализации на микроконтроллерах общего назначения.

Анализ требований к разрабатываемому устройству показал, что использование сложных методов цифровой обработки не является необходимым. Согласно техническим условиям, допускаемая погрешность измерений составляет 5%, что существенно снижает требования к точности алгоритмов обработки и позволяет сосредоточиться на повышении их

надежности и простоты реализации.

По результатам сравнения рассмотренных методов было принято решение использовать комбинированный алгоритм обработки. Определение амплитуды сигнала выполняется на основе гистограммного анализа массива отсчетов. Амплитуда вычисляется по положению максимумов распределения, соответствующих верхнему и нижнему уровням исследуемого сигнала.

Для определения частоты используется анализ переходов сигнала через центральный уровень с применением гистерезиса. Величина гистерезиса выбирается равной половине измеренной амплитуды сигнала. Такой подход позволяет значительно снизить вероятность ложных переключений под воздействием шумов и одновременно сохранить простоту алгоритма.

В отличие от корреляционных методов и спектрального анализа, выбранный алгоритм не требует выполнения большого количества вычислений и может работать непосредственно на микроконтроллере без применения специализированных цифровых сигнальных процессоров. При этом обеспечивается достаточная точность измерений для решения поставленной задачи.

Таким образом, проведенный анализ показал, что комбинация гистограммного определения амплитуды и измерения периода по пересечениям уровня с гистерезисом обеспечивает наиболее рациональное соотношение между точностью, вычислительной сложностью и устойчивостью к помехам. Именно данный подход был выбран в качестве основы дальнейшей разработки измерительного устройства.

2.4 Выбор алгоритмов цифровой обработки сигнала

После выбора концепции полной оцифровки сигнала возникает вопрос о способе обработки полученных данных. Сам факт наличия последовательности цифровых отсчетов не решает задачу измерения параметров сигнала. Необходимо определить алгоритмы, позволяющие

извлекать из потока данных значения амплитуды и частоты в условиях воздействия помех.

При выборе алгоритмов обработки необходимо учитывать специфику решаемой задачи. В рамках проекта требовалось измерять параметры периодических сигналов в диапазоне частот от нескольких десятков килогерц до единиц мегагерц. При этом форма сигнала могла изменяться в зависимости от режима работы исследуемого устройства. Дополнительным фактором являлось наличие шумов измерительного тракта и помех, возникающих как внутри исследуемой аппаратуры, так и во внешней среде.

Наиболее очевидным способом определения частоты после оцифровки сигнала является спектральный анализ. В этом случае измеряемый сигнал представляется в виде суммы гармонических составляющих, после чего определяется частота максимальной спектральной компоненты.

Спектральный анализ обладает рядом существенных преимуществ. Он позволяет одновременно определять частоту сигнала, оценивать спектральный состав, обнаруживать паразитные гармоники и контролировать наличие посторонних сигналов. Кроме того, спектральные методы хорошо подходят для исследования сложных периодических процессов.

Однако применение спектрального анализа в рассматриваемой задаче имеет ряд недостатков. Для получения приемлемой частотной разрешающей способности требуется накопление значительного количества отсчетов. Обработка таких массивов данных требует вычисления быстрого преобразования Фурье, что предъявляет повышенные требования к производительности вычислительной системы. Планируемый для использования микроконтроллер STM32F40x имеет DSP-процессор со встроенной поддержкой вычисления быстрого преобразования Фурье [20]. Однако, при измерении одной частоты использование полного спектрального анализа является избыточным.

Другим распространенным подходом является использование методов корреляционной обработки. Частота сигнала определяется путем вычисления

автокорреляционной функции и поиска максимума корреляции для различных временных сдвигов.

Корреляционные методы обладают высокой помехоустойчивостью и позволяют обнаруживать периодичность даже в условиях низкого отношения сигнал-шум. Однако объем вычислений при использовании корреляционного анализа существенно выше по сравнению с более простыми алгоритмами. Для компактного измерительного устройства подобный подход оказывается неоправданно сложным. [21]

В качестве альтернативы могут использоваться методы определения периода по моментам пересечения сигнала с некоторым пороговым уровнем. После оцифровки сигнала фиксируются точки перехода через заданный уровень, а затем определяется средний период между последовательными пересечениями.

Такой подход отличается высокой скоростью работы и минимальными вычислительными затратами. Однако в простейшем варианте он обладает существенным недостатком: при наличии шумов положение точки пересечения порога может изменяться, что приводит к дополнительной погрешности измерения.

Для повышения устойчивости к шумам возможно использование гистерезиса. В этом случае переход фиксируется не по одному уровню, а по двум различным порогам. Подобный подход позволяет существенно снизить влияние случайных флуктуаций сигнала на результат измерения.

Для определения амплитуды сигнала также существует несколько возможных методов. Наиболее очевидным является поиск минимального и максимального отсчета внутри выборки. Такой способ прост в реализации, однако чувствителен к импульсным помехам и одиночным выбросам.

Другим вариантом является усреднение нескольких экстремальных значений. Данный подход уменьшает влияние случайных выбросов, но при этом требует дополнительных вычислений и не всегда позволяет корректно работать при изменении формы сигнала.

Наиболее перспективным методом для рассматриваемой задачи является гистограммный анализ распределения отсчетов. В этом случае для накопленной выборки строится гистограмма распределения уровней сигнала. Максимумы распределения соответствуют наиболее вероятным уровням сигнала и значительно слабее подвержены влиянию случайных шумов.

Особенно эффективно данный метод работает при анализе сигналов с ограниченным набором характерных уровней. Даже при значительном уровне шумов распределение отсчетов сохраняет выраженные максимумы, позволяющие определить амплитуду с требуемой точностью.

Проведенный анализ показывает, что для поставленной задачи отсутствует необходимость применения сложных спектральных или корреляционных методов. Требуемая погрешность измерений составляет порядка 2%, что позволяет использовать более простые алгоритмы обработки данных. С учетом требований по быстродействию и возможности последующей модификации программного обеспечения в качестве основных методов обработки целесообразно использовать гистограммный анализ для определения амплитуды сигнала и анализ переходов через адаптивный порог с гистерезисом для определения частоты.

После выбора алгоритмов обработки становится возможным сформулировать требования к тракту оцифровки и выполнить выбор аппаратных средств, обеспечивающих получение необходимого массива исходных данных.

2.5 Выбор структуры измерительного тракта

После анализа существующих методов измерения параметров периодических сигналов и рассмотрения различных вариантов реализации измерительного устройства была выбрана архитектура, основанная на полной оцифровке исследуемого сигнала с последующей цифровой обработкой полученного массива данных.

Выбор данного подхода обусловлен несколькими причинами. Прежде всего, в процессе выполнения проекта неоднократно изменялись требования к измеряемым параметрам исследуемых устройств. В подобных условиях применение специализированных аналоговых схем обработки становится нежелательным, поскольку любое изменение алгоритма измерения требует переработки принципиальной схемы, изготовления новой печатной платы и проведения повторной настройки устройства.

Использование цифровой обработки позволяет значительно упростить внесение изменений в алгоритмы измерения. В большинстве случаев для этого достаточно модификации программного обеспечения без изменения аппаратной части устройства. Такой подход существенно сокращает сроки адаптации измерительного комплекса к новым требованиям и позволяет проводить эксперименты с различными методами обработки сигнала.

Дополнительным преимуществом полной оцифровки является возможность сохранения исходного массива измерений. В отличие от аналоговых измерителей, которые выдают только конечный результат измерения, цифровая система позволяет сохранить всю последовательность отсчетов и выполнить повторный анализ данных с использованием других алгоритмов. Это особенно важно на этапах разработки и отладки исследуемых устройств, когда требования к методике испытаний могут уточняться в процессе работы.

В ходе анализа требований было установлено, что измеряемые сигналы располагаются в диапазоне частот от десятков килогерц до нескольких мегагерц. Для корректного измерения параметров таких сигналов частота дискретизации должна значительно превышать верхнюю границу исследуемого диапазона.

Теоретически минимально допустимая частота дискретизации определяется теоремой Котельникова и должна как минимум в два раза превышать максимальную частоту сигнала. Однако при практическом измерении параметров периодических сигналов такой запас оказывается

недостаточным. Для обеспечения устойчивой работы алгоритмов определения частоты и амплитуды необходимо получать несколько отсчетов на протяжении каждого полупериода сигнала.

Кроме того, применяемые методы анализа основаны на статистической обработке массива измерений. Чем большее количество отсчетов приходится на один период сигнала, тем выше точность определения его параметров и тем эффективнее подавляется влияние случайных шумов.

По этой причине использование встроенных аналого-цифровых преобразователей микроконтроллеров общего назначения не обеспечивает необходимого быстродействия. Несмотря на наличие встроенного АЦП, его производительности недостаточно для уверенного анализа сигналов верхней части исследуемого диапазона при сохранении требуемой точности измерений.

Для решения данной задачи был выбран внешний высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь AD9057BRSZ-40 производства Analog Devices. Данный преобразователь обеспечивает частоту дискретизации до 40 миллионов выборок в секунду и формирует параллельный восьмиразрядный цифровой код.

Выбор именно восьмиразрядного преобразователя обусловлен особенностями поставленной задачи. Целью устройства является определение амплитуды и частоты периодического сигнала с погрешностью порядка двух процентов. Для решения такой задачи не требуется высокая точность восстановления мгновенного значения напряжения. Значительно более важным является получение большого количества отсчетов за короткий промежуток времени.

При диапазоне преобразования в 256 уровней квантования даже относительно грубое представление сигнала позволяет уверенно выполнять статистический анализ и определять положение характерных уровней сигнала. Таким образом, увеличение разрядности АЦП не приводит к существенному росту точности конечного результата, но значительно усложняет аппаратную

реализацию устройства.

Необходимо отметить, что выбранный преобразователь работает в ограниченном диапазоне входных напряжений и требует формирования постоянного смещения относительно нулевого уровня измеряемого сигнала. Поэтому перед АЦП предусматривается специальный аналоговый тракт, выполняющий фильтрацию и согласование сигнала.

Одной из задач входного тракта является подавление постоянной составляющей сигнала. В большинстве рассматриваемых режимов работы абсолютное значение постоянного смещения не представляет интереса для измерений. Основными контролируемыми параметрами являются амплитуда и частота периодической составляющей. Поэтому наличие постоянного напряжения на входе может приводить лишь к неэффективному использованию динамического диапазона аналого-цифрового преобразователя.

Дополнительно входной тракт должен обеспечивать ослабление низкочастотных помех, возникающих вследствие электромагнитных наводок промышленной сети. Наиболее распространенной является помеха частотой 50 Гц, которая может присутствовать практически в любой измерительной системе. Несмотря на значительное отличие ее частоты от диапазона исследуемых сигналов, наличие такой составляющей способно влиять на результаты статистической обработки и приводить к появлению дополнительной погрешности.

Высокочастотные помехи предполагается подавлять преимущественно цифровыми методами обработки после завершения оцифровки сигнала. Такой подход позволяет сохранить гибкость системы и при необходимости изменять параметры фильтрации программными средствами без внесения изменений в аппаратную часть устройства.

С учетом проведенного анализа была сформирована общая структура измерительного тракта, представленная на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 — Структура измерительного тракта

Предложенная структура обеспечивает необходимую гибкость программной обработки, позволяет изменять алгоритмы измерения без модификации аппаратной части устройства и обеспечивает получение достаточного объема данных для устойчивого определения параметров периодических сигналов в условиях воздействия помех.

3 ПРОВЕРКА И ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Разработка структурной схемы устройства

В результате анализа методов измерения параметров периодических сигналов, проведенного во второй главе, был выбран подход, основанный на полной оцифровке исследуемого сигнала с последующей цифровой обработкой массива полученных отсчетов. Данный подход обеспечивает высокую гибкость алгоритмов измерения и позволяет изменять методы обработки без модификации аппаратной части устройства.

Основным преимуществом выбранного решения является возможность сохранения полной информации о форме сигнала. В отличие от аналоговых измерителей, формирующих только конечный результат измерения, цифровая система предоставляет доступ ко всем отсчетам аналого-цифрового преобразователя. Это позволяет применять различные методы обработки данных, изменять алгоритмы измерений и выполнять дополнительный анализ ранее записанных сигналов.

В качестве основы измерительного тракта был выбран внешний высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь AD9057BRSZ-40 производства компании Analog Devices. Несмотря на сравнительно невысокую разрядность (8 бит), данный преобразователь обеспечивает частоту дискретизации до 40 миллионов выборок в секунду при относительно невысокой стоимости и простом интерфейсе подключения. Для поставленной задачи измерения амплитуды и частоты сигналов такая разрядность является достаточной, поскольку используемые алгоритмы обработки основаны на статистическом анализе большого количества отсчетов и не требуют высокой точности восстановления мгновенного значения напряжения.

Особенностью выбранного преобразователя является использование внутреннего опорного напряжения, относительно которого производится

преобразование входного сигнала. По этой причине измерительный тракт должен обеспечивать не только фильтрацию сигнала, но и его согласование с диапазоном входных напряжений АЦП. Это накладывает дополнительные требования на аналоговую часть устройства и определяет необходимость применения специальных цепей согласования уровня.

На основании сформулированных требований была разработана структурная схема устройства, представленная на рисунке 3.1.

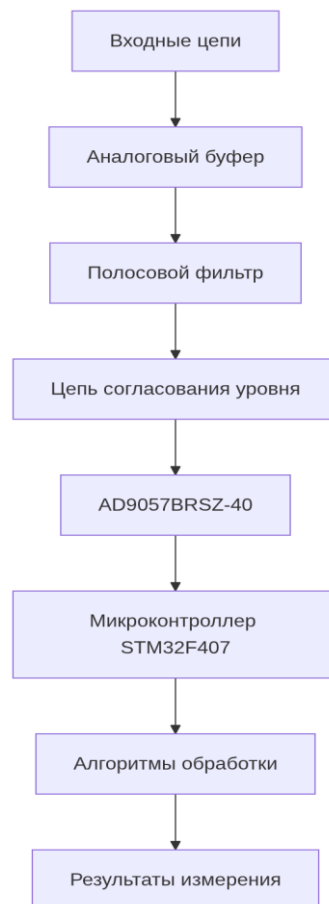


Рисунок 3.1 - структурная схема устройства

Входные цепи предназначены для подключения исследуемого сигнала и защиты измерительного тракта от возможных перегрузок.

После входных цепей сигнал поступает на аналоговый буфер. Основной задачей буферного каскада является исключение влияния последующих узлов схемы на источник сигнала. Использование буферного усилителя позволяет обеспечить высокое входное сопротивление устройства и сохранить форму измеряемого сигнала при подключении различных источников.

Следующим элементом структурной схемы является полосовой фильтр. Его применение обусловлено необходимостью предварительного подавления низкочастотных и высокочастотных помех до выполнения аналого-цифрового преобразования. Нижняя граница полосы пропускания выбрана таким образом, чтобы исключить влияние постоянной составляющей и промышленных помех промышленной сети. Верхняя граница полосы определяется диапазоном измеряемых сигналов и характеристиками используемого аналого-цифрового преобразователя.

После фильтрации сигнал поступает в цепь согласования уровня. Данный узел обеспечивает приведение амплитуды и постоянной составляющей сигнала к диапазону входных напряжений аналого-цифрового преобразователя. Необходимость применения данного каскада обусловлена особенностями работы выбранного АЦП, который требует формирования определенного уровня смещения относительно внутреннего опорного напряжения.

Оцифровка сигнала выполняется аналого-цифровым преобразователем AD9057BRSZ-40. Полученные цифровые отсчеты передаются в микроконтроллер STM32F407RGT6, который осуществляет накопление массива данных и выполнение алгоритмов цифровой обработки.

В микроконтроллере реализуются алгоритмы определения амплитуды и частоты сигнала. Для оценки амплитуды используется статистическая обработка массива отсчетов, основанная на анализе распределения значений сигнала. Частота определяется путем анализа периодичности изменения сигнала во времени. Использование программной обработки позволяет изменять алгоритмы измерения без внесения изменений в аппаратную часть устройства. В целях исследования, есть так же возможность передать записанный массив результатов оцифровки на компьютер без обработки. Это необходимо для оценки точности измерений и отладки алгоритма обработки без необходимости иметь физический стенд.

Результатом работы системы являются значения измеренных

параметров сигнала, которые могут использоваться как непосредственно в составе испытательного оборудования, так и передаваться во внешние информационные системы для дальнейшего анализа.

Таким образом, разработанная структурная схема обеспечивает разделение функций между аналоговой и цифровой частями устройства. Аналоговая часть отвечает за подготовку сигнала к преобразованию, а цифровая часть выполняет обработку полученных данных и формирование результатов измерения. Подобное построение измерительного тракта обеспечивает требуемую гибкость системы и позволяет адаптировать алгоритмы измерения к изменяющимся требованиям без модификации аппаратной части устройства.

3.2 Выбор элементной базы

После разработки структурной схемы устройства необходимо выполнить выбор элементной базы, обеспечивающей реализацию всех функциональных узлов измерительного тракта. При выборе компонентов учитывались не только технические характеристики отдельных элементов, но и возможность их совместного использования в составе единой аппаратно-программной системы.

Следует отметить, что структура устройства, рассмотренная в предыдущем разделе, формировалась с учетом особенностей доступной элементной базы. В частности, требования к аналоговому тракту определялись характеристиками выбранного аналого-цифрового преобразователя, а возможности цифровой обработки — архитектурой используемого микроконтроллера. Таким образом, выбор компонентов и разработка структуры устройства выполнялись параллельно и оказывали взаимное влияние друг на друга.

3.2.1 Выбор аналого-цифрового преобразователя

Одним из ключевых элементов разрабатываемого устройства является

аналого-цифровой преобразователь. Именно этот узел определяет максимально достижимую частоту дискретизации и, как следствие, верхнюю границу измеряемого диапазона частот.

На этапе разработки рассматривалось несколько вариантов реализации измерительного тракта. Наиболее очевидным решением являлось использование встроенного аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера STM32F407. Однако анализ технических характеристик показал, что производительности встроенного АЦП недостаточно для решения поставленной задачи.

Первоначально техническое задание предусматривало возможность измерения сигналов с частотой до нескольких мегагерц. При таких частотах количество отсчетов на период сигнала, получаемое встроенным АЦП микроконтроллера, оказывается недостаточным для устойчивой работы алгоритмов определения частоты и амплитуды. Кроме того, наличие запаса по частоте дискретизации повышает устойчивость измерений в условиях воздействия шумов и позволяет использовать более сложные алгоритмы цифровой обработки.

В ходе рабочих совещаний было принято решение использовать внешний высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь AD9057BRSZ-40 производства компании Analog Devices.

Выбор данного преобразователя был обусловлен несколькими факторами.

Во-первых, AD9057BRSZ-40 обеспечивает частоту дискретизации до 40 миллионов выборок в секунду, что существенно превышает требования проекта и создает необходимый запас производительности для дальнейшего развития алгоритмов обработки. Стоит отметить, что максимальная производительность этого АЦП избыточна (микроконтроллер не сможет принять больше 21 мега выборки из-за аппаратных ограничений), однако это не мешает ему работать и на более низких частотах.

Во-вторых, преобразователь обладает относительно простой схемой

включения. Для его работы требуется только источник тактовой частоты, цепи формирования опорного напряжения и согласования входного сигнала. Отсутствие сложных высокоскоростных последовательных интерфейсов значительно упрощает проектирование печатной платы и программного обеспечения.

В-третьих, важным фактором стала стоимость компонента. На момент разработки стоимость AD9057BRSZ-40 составляла порядка 700 рублей, что значительно ниже стоимости современных высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей сопоставимого класса.

Отдельного внимания заслуживает способ подключения преобразователя к микроконтроллеру. В отличие от программируемых логических интегральных схем, микроконтроллер обладает ограниченным набором аппаратных интерфейсов для подключения внешних высокоскоростных устройств.

В составе STM32F407 имеются специализированные интерфейсы QSPI (SDIO), FSMC и DCM1, предназначенные соответственно для работы с внешней памятью, статическими запоминающими устройствами и цифровыми видеокамерами. Однако электрические характеристики и протоколы работы указанных интерфейсов не позволяют напрямую использовать их для подключения выбранного аналого-цифрового преобразователя.

По этой причине было принято решение использовать прямое подключение восьмиразрядной шины данных АЦП к выводам общего назначения микроконтроллера. Считывание данных осуществляется средствами контроллера прямого доступа к памяти (DMA), синхронизированного с аппаратным таймером.

Анализ архитектуры микроконтроллера показал, что используемая шина периферии обеспечивает достаточную пропускную способность для реализации подобного подхода. В результате была выбрана рабочая частота дискретизации 18,6 МГц, обеспечивающая надежное получение данных без перегрузки внутренних шин микроконтроллера и без нарушения работы

остальных периферийных устройств.

Таким образом, использование AD9057BRSZ-40 позволило получить высокую частоту дискретизации при минимальной сложности аппаратной реализации и приемлемой стоимости устройства.

Необходимо отметить еще одну особенность выбранного преобразователя. В отличие от большинства современных АЦП, работающих относительно общего провода схемы, AD9057BRSZ-40 использует внутреннее опорное напряжение и требует смещения входного сигнала относительно определенного уровня постоянного напряжения. Вследствие этого в состав измерительного тракта были включены дополнительные узлы согласования аналогового уровня сигнала, рассмотренные далее при описании электрической схемы устройства.

3.2.2 Выбор операционных усилителей

Для реализации аналоговой части измерительного тракта были выбраны двоянные операционные усилители AD823ARZ.

Необходимость применения высокоскоростных операционных усилителей обусловлена диапазоном частот исследуемых сигналов. Входной буфер, полосовой фильтр и каскад согласования уровня должны обеспечивать передачу сигнала без существенного изменения его амплитуды и формы во всем рабочем диапазоне частот.

Операционный усилитель AD823ARZ обладает полосой единичного усиления 16 МГц, что позволяет использовать его в составе активных фильтров и буферных каскадов при работе с сигналами частотой до нескольких мегагерц. Дополнительным преимуществом является использование полевых транзисторов на входе усилителя, обеспечивающих высокое входное сопротивление и минимальную нагрузку на предыдущие каскады схемы.

Важной особенностью выбранного усилителя является поддержка режима Rail-to-Rail. Данная функция позволяет формировать выходное

напряжение в широком диапазоне значений, близком к напряжениям питания, что упрощает построение схем согласования уровня и позволяет эффективнее использовать динамический диапазон аналого-цифрового преобразователя.

Для обеспечения необходимых параметров аналоговой части устройства операционные усилители питаются от двухполярного источника напряжения. Использование симметричного питания позволяет исключить дополнительные ограничения по амплитуде сигнала и упрощает построение активных фильтров.

3.2.3 Выбор пассивных компонентов

Параметры аналогового тракта в значительной степени определяются точностью используемых резисторов и конденсаторов. Поскольку схема содержит активные фильтры и каскады согласования уровня, отклонение номиналов компонентов непосредственно влияет на характеристики устройства.

В проекте использовались резисторы с допуском не хуже 1 % от номинального значения. Такой выбор обеспечивает достаточную повторяемость характеристик фильтров и исключает необходимость индивидуальной настройки каждого экземпляра устройства после сборки.

При проектировании схемы также учитывались особенности работы высокоомных цепей. Практика разработки аналоговых устройств показывает, что использование резисторов большого номинала повышает чувствительность схемы к паразитным токам утечки, электромагнитным наводкам и технологическому разбросу параметров компонентов.

По этой причине при выборе номиналов предпочтение отдавалось резисторам сопротивлением менее 100 кОм. Такой подход позволил повысить стабильность характеристик аналогового тракта и снизить влияние внешних факторов на результаты измерений.

3.3 Разработка электрической принципиальной схемы устройства

На основании структурной схемы, разработанной в предыдущем разделе, была выполнена разработка электрической принципиальной схемы устройства, показанная на рисунке 3.2. Схема формирования питаний приведена на рисунке 3.3. Основной задачей являлось обеспечение корректного преобразования входного сигнала в форму, пригодную для последующей оцифровки высокоскоростным аналого-цифровым преобразователем. При этом необходимо было обеспечить подавление постоянной составляющей сигнала, ограничение полосы пропускания измерительного тракта и согласование уровней напряжения с требованиями используемого АЦП.

Измеряемый сигнал поступает на входной буферный каскад, выполненный на операционном усилителе DA2.1. Использование буферного усилителя позволяет исключить влияние последующих каскадов на источник сигнала и обеспечить высокое входное сопротивление устройства. Дополнительно выход данного каскада подключен к отдельному разъему, предназначенному для подключения внешнего осциллографа. Такое решение позволяет проводить отладку и контроль прохождения сигнала через измерительный тракт без внесения изменений в схему устройства.

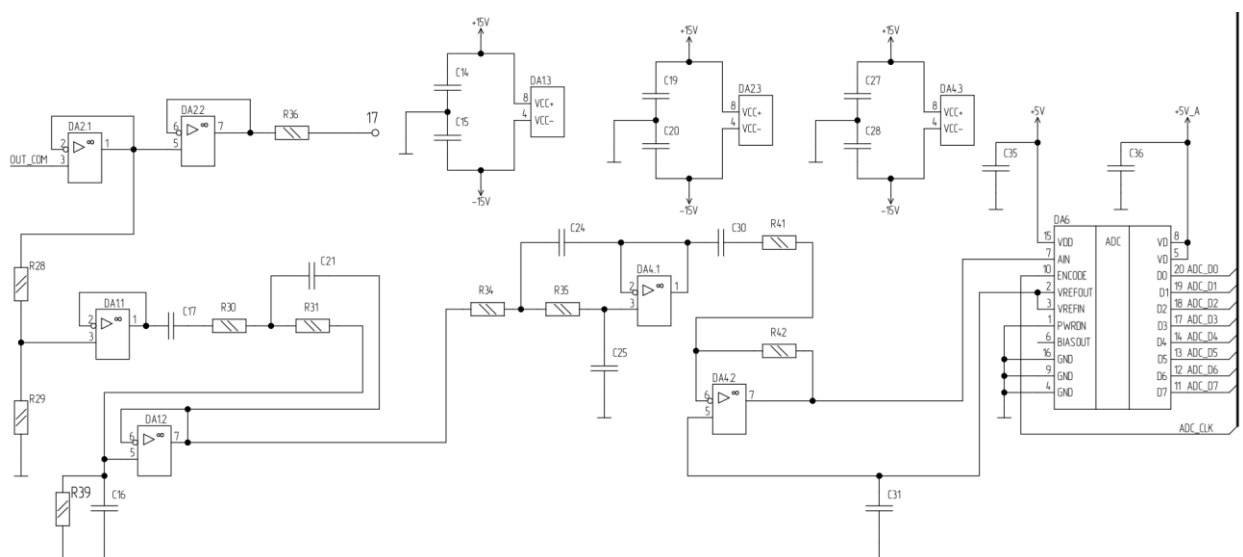


Рисунок 3.2 - схема электрическая принципиальная измерительного тракта

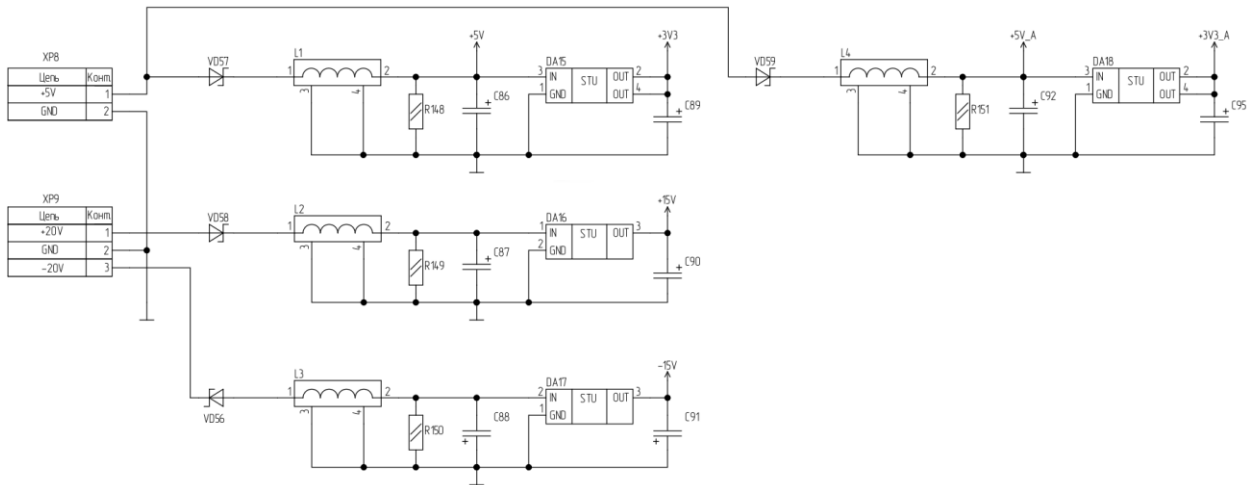


Рисунок 3.3 — схема электрическая принципиальная цепей питания устройства

После входного буфера сигнал поступает на делитель напряжения, который обеспечивает приведение амплитуды сигнала к диапазону, допустимому для дальнейшей обработки. Необходимость применения делителя обусловлена как ограничениями последующих каскадов, так и требованиями к максимальному входному напряжению аналого-цифрового преобразователя.

Следующим функциональным узлом является предварительный буферный каскад на операционном усилителе DA1.1. Его назначение заключается в развязке входного делителя и активного полосового фильтра. Благодаря этому параметры фильтра определяются только номиналами его собственных элементов и практически не зависят от характеристик предыдущих каскадов.

Основную обработку сигнала выполняет активный полосовой фильтр, реализованный на операционных усилителях DA1.2 и DA4.1. При разработке устройства было принято решение ограничить рабочую полосу частот диапазоном от 10 кГц до 1 МГц. Нижняя граница полосы обеспечивает эффективное подавление постоянной составляющей и низкочастотных промышленных помех, в том числе наводок от сети электропитания частотой 50 Гц и ее гармоник. Верхняя граница полосы выбрана исходя из требований к измеряемым сигналам и одновременно позволяет снизить влияние

высокочастотных помех, находящихся за пределами рабочего диапазона.

Следует отметить, что на этапе проектирования предполагалось использование устройства для исследования сигналов с частотой до нескольких мегагерц. По этой причине при выборе операционных усилителей особое внимание уделялось их полосе пропускания и скорости нарастания выходного напряжения. Применение активного фильтра позволило реализовать требуемые характеристики без использования индуктивных элементов, что существенно упростило изготовление устройства и повысило повторяемость параметров между экземплярами.

После прохождения полосового фильтра сигнал поступает в узел согласования уровней, выполненный на операционном усилителе DA4.2. Необходимость данного узла определяется особенностями используемого аналого-цифрового преобразователя AD9057BRSZ-40. В отличие от большинства современных АЦП, работающих в диапазоне от нуля до напряжения питания, данный преобразователь использует внутреннее опорное напряжение и измеряет отклонение сигнала относительно заданного уровня. Для корректной работы преобразователя входной сигнал должен располагаться внутри ограниченного диапазона напряжений и иметь определенное смещение относительно опорного уровня.

По этой причине в схеме реализован каскад смещения постоянной составляющей, который переносит центр входного сигнала в рабочую область преобразователя. В результате даже при отсутствии входного сигнала на входе АЦП присутствует постоянный уровень, соответствующий середине диапазона преобразования. Положительные и отрицательные отклонения измеряемого сигнала преобразуются в увеличение или уменьшение цифрового кода относительно этого центрального значения.

С выхода каскада согласования сигнал поступает непосредственно на вход аналого-цифрового преобразователя AD9057BRSZ-40. Полученные цифровые данные передаются в микроконтроллер STM32F407 по восьмиразрядной параллельной шине. Для формирования тактовых сигналов

преобразователя используется встроенный таймер микроконтроллера, а перенос результатов преобразования в оперативную память выполняется средствами прямого доступа к памяти (DMA). Такой подход позволяет организовать непрерывный поток выборок в реальном времени и исключает неравномерность периодов чтения оцифрованных данных. В целом, на таких высоких скоростях и в реальном времени не представляется возможным применить чтение оцифрованных данных без DMA контроллера.

Таким образом, разработанная электрическая схема реализует полный тракт преобразования измеряемого сигнала: от входного буферирования и аналоговой фильтрации до оцифровки и передачи данных в микроконтроллер. Примененная структура позволяет совместить аппаратное подавление основных помех с возможностью дальнейшей программной обработки, что соответствует требованиям, сформулированным в предыдущих главах работы.

3.4 Расчет потребляемой мощности устройства

При разработке электронных устройств важным параметром является потребляемая мощность. От данного параметра зависит выбор источника питания, температурный режим работы устройства и необходимость применения дополнительных средств охлаждения.

Точное определение потребляемой мощности возможно только экспериментальным путем после изготовления устройства и проведения измерений в различных режимах работы. На этапе проектирования выполняется оценочный расчет по максимальным значениям токов потребления, приведенным в технической документации на используемые компоненты. Такой подход позволяет получить верхнюю границу энергопотребления и оценить тепловой режим устройства с некоторым запасом.

Основными потребителями энергии в разработанном устройстве являются микроконтроллер STM32F407VET6, аналого-цифровой

преобразователь AD9057BRSZ-40, операционные усилители AD823ARZ, а также линейные стабилизаторы напряжения.

3.4.1. Расчет мощности микроконтроллера

Питание микроконтроллера осуществляется напряжением 3,3 В от линейного стабилизатора, подключенного к шине +5 В. Согласно технической документации, максимальный потребляемый ток составляет 150 мА.

Мощность, потребляемая от источника +5 В с учетом потерь на линейном стабилизаторе, определяется выражением:

$$P_{MCU} = U_{IN} * I_{MCU}, \quad (3.1)$$

где:

- P_{MCU} - потребляемая мощность, Вт;
- U_{IN} - входное напряжение стабилизатора, В;
- I_{MCU} - ток потребления микроконтроллера, А.

Подставляя значения: $P_{MCU} = 5 * 0.15 = 0.75$ Вт.

Таким образом, максимальная мощность, потребляемая узлом микроконтроллера, составляет 0.75 Вт.

3.4.2. Расчет мощности аналого-цифрового преобразователя

АЦП AD9057 использует две линии питания: аналоговую и цифровую. Максимальный ток аналоговой части составляет 48 мА, цифровой части — 6,5 мА. Суммарный ток определяется выражением:

$$I_{ADC} = I_{AVD} + I_{AVDD}, \quad (3.2)$$

где:

- I_{ADC} - суммарный ток потребления АЦП;
- I_{AVD} - ток аналоговой части;
- I_{AVDD} - ток цифровой части.

Подставляя значения: $I_{ADC} = 48 + 6.5 = 54.5$ мА

Мощность АЦП:

$$P_{ADC} = U_{ADC} * I_{ADC}, \quad (3.3)$$

где:

- P_{ADC} - потребляемая мощность АЦП;
- U_{ADC} - напряжение питания АЦП;
- I_{ADC} - суммарный ток потребления.

Подставляя значения: $P_{ADC} = 5 * 0.0545 = 0.273$ Вт.

Следовательно, максимальная потребляемая мощность аналого-цифрового преобразователя составляет 0.273 Вт.

3.4.3. Расчет мощности операционных усилителей

В устройстве используются три микросхемы AD823ARZ, каждая из которых содержит два операционных усилителя.

Согласно технической документации, максимальный ток потребления одной микросхемы составляет 8 мА.

Суммарный ток всех усилителей:

$$I_{AMP} = N * I_{AD823}, \quad (3.4)$$

где:

- I_{AMP} - суммарный ток усилителей;
- N - количество микросхем;
- I_{AD823} - ток одной микросхемы.

Подставляя значения: $I_{AMP} = 3 * 8 = 24$ мА

Поскольку усилители питаются от двухполярного источника ± 20 В, которые преобразуются в ± 15 В линейными стабилизаторами, общая разность потенциалов составляет 40В.

Мощность усилительного тракта:

$$P_{AMP} = U_{AMP} * I_{AMP}, \quad (3.5)$$

где:

- P_{AMP} - мощность усилительного тракта;
- U_{AMP} - суммарное напряжение питания;
- I_{AMP} - суммарный ток усилителей.

Подставляя значения: $P_{AMP} = 40 * 0.024 = 0.96$ Вт

Следовательно, максимальная мощность, потребляемая операционными усилителями, составляет 0.96 Вт.

3.4.4. Суммарная потребляемая мощность

Суммарная мощность устройства определяется как сумма мощностей отдельных функциональных узлов:

$$P = P_{MCU} + P_{ADC} + P_{AMP}, \quad (3.6)$$

где:

- P - суммарная мощность устройства;
- P_{MCU} - мощность микроконтроллера;
- P_{ADC} - мощность аналого-цифрового преобразователя;
- P_{AMP} - мощность аналогового тракта (операционные усилители).

Подставляя рассчитанные значения:

$$P = 0.75 + 0.273 + 0.96 = 1.983 \text{ Вт}$$

Таким образом, даже при использовании максимальных паспортных значений токов потребления суммарная мощность устройства не превышает 2 Вт.

Полученное значение позволяет сделать вывод о том, что устройство не требует применения активного охлаждения. Отвод тепла может осуществляться естественным образом через печатную плату и окружающий воздух. При этом следует учитывать, что в реальных условиях эксплуатации потребляемая мощность будет ниже расчетной, поскольку использованные в расчете значения соответствуют максимально допустимым режимам работы компонентов и содержат определенный запас по энергопотреблению.

3.5. Экспериментальная проверка устройства

После завершения разработки аппаратной части устройства и программного обеспечения была проведена экспериментальная проверка работоспособности измерительного тракта и алгоритмов обработки сигналов. Основной целью испытаний являлась оценка точности определения

амплитуды и частоты периодических сигналов, а также проверка соответствия разработанного устройства требованиям, сформулированным на этапе проектирования.

Для проведения испытаний был изготовлен макетный образец устройства, включающий аналоговый тракт обработки сигнала, аналого-цифровой преобразователь AD9057BRSZ-40 и микроконтроллер STM32F407VET6. Проверка проводилась в лабораторных условиях с использованием генератора сигналов и цифрового осциллографа.

В качестве тестового воздействия использовался синусоидальный сигнал. Такой выбор обусловлен тем, что синусоидальный сигнал является базовым видом периодического сигнала и широко применяется при испытаниях измерительной аппаратуры. Кроме того, для синусоидального сигнала легко определить эталонные значения амплитуды и частоты с помощью стандартных измерительных приборов.

В ходе испытаний исследовалось влияние амплитуды и частоты сигнала на результаты измерений. Для этого были выбраны два значения амплитуды входного сигнала: 200 мВ и 800 мВ. Частота сигнала изменялась в диапазоне рабочих частот устройства и принимала значения 10 кГц, 300 кГц, 400 кГц и 500 кГц.

Сигнал от генератора подавался на вход разработанного устройства. Одновременно контрольный канал осциллографа подключался к выходу выходу генератора сигналов. Такое подключение позволяло контролировать параметры сигнала непосредственно перед его дальнейшей обработкой аналоговым трактом устройства и использовать показания осциллографа в качестве эталонных значений при последующем сравнении результатов.

Испытания так же проводились в двух вариантах: с нагрузочным резистором и без него. Нагрузочный резистор имитирует внутреннее сопротивление источника сигнала. К тому же, при каждом испытании источник сигнала подключался через провода МГТФ в железной оплетке. Длина провода - 3 метра. Такие испытания помогают проанализировать

влияние выходного сопротивления источника сигнала и влияние этого сопротивления на результаты измерения.

Во время проведения измерений микроконтроллер выполнял программу сбора данных. После включения питания или аппаратного сброса производилась инициализация периферийных устройств, необходимых для работы измерительного тракта. Затем запускался процесс непрерывной оцифровки сигнала посредством внешнего аналого-цифрового преобразователя. Соответственно, сначала подавалось питание и настраивалось оборудование, а дальше для записи запускался скрипт на компьютере и нажималась кнопка RESET на плате с микроконтроллером.

Полученные выборки записывались в буфер оперативной памяти микроконтроллера средствами прямого доступа к памяти (DMA). Размер буфера составлял 0x8000 байт, что соответствует максимально допустимому объему передачи для используемого контроллера DMA во всей серии микроконтроллеров STM32. После завершения заполнения буфера его содержимое передавалось по последовательному интерфейсу UART на персональный компьютер.

На стороне персонального компьютера использовалась специализированная программа, осуществляющая прием данных. Программа ожидала поступления полного буфера размером 0x8000 байт, после чего сохраняла полученный массив отсчетов в бинарный файл без дополнительной обработки. Такой подход позволял исключить влияние промежуточных алгоритмов обработки данных и обеспечить сохранение исходных результатов оцифровки для последующего анализа.

Полученные файлы использовались для проверки разработанных алгоритмов измерения параметров сигнала. Для каждого набора экспериментальных данных выполнялось определение амплитуды и частоты исследуемого сигнала. Результаты работы алгоритмов сравнивались с показаниями осциллографа и параметрами, установленными на генераторе сигналов.

Таким образом, разработанная методика испытаний позволила получить набор экспериментальных данных, содержащих реальные отсчеты сигнала после прохождения через аналоговый тракт устройства. Использование одинаковых условий измерений для различных значений амплитуды и частоты обеспечило возможность объективной оценки точности разработанного измерительного комплекса и эффективности выбранных алгоритмов цифровой обработки.

3.6 Анализ экспериментальных данных

В ходе экспериментальной проверки устройства был получен набор оцифрованных сигналов для различных комбинаций амплитуды и частоты входного воздействия. Полученные данные использовались для оценки точности разработанного алгоритма измерения параметров периодических сигналов.

Для каждого эксперимента были известны эталонные значения частоты и амплитуды сигнала, определенные с помощью генератора сигналов и контролируемые поверенным цифровым осциллографом. После получения массива отсчетов выполнялась их обработка разработанным алгоритмом, в результате чего определялись измеренные значения амплитуды и частоты.

Оценка точности проводилась путем сравнения результатов работы алгоритма с эталонными значениями. Для количественной оценки использовались абсолютная и относительная погрешности измерения.

Абсолютная погрешность измерения частоты определялась по формуле:

$$\Delta_f = |f_{ref} - f_{meas}|, \quad (3.7)$$

где:

- Δ_f - абсолютная погрешность измерения частоты, кГц;
- f_{ref} - эталонное значение частоты, кГц;
- f_{meas} - значение частоты, полученное алгоритмом, кГц.

Относительная погрешность измерения частоты определялась по

формуле:

$$\Delta_{fe} = (\Delta_f / f_{ref}) * 100, \quad (3.9)$$

где:

- Δ_{fe} - относительная погрешность измерения частоты, %;
- Δ_f - абсолютная погрешность измерения частоты, кГц;
- f_{ref} - эталонное значение частоты, кГц;

Аналогично рассчитывались погрешности измерения амплитуды сигнала.

Абсолютная погрешность измерения амплитуды:

$$\Delta_A = |A_{ref} - A_{meas}|, \quad (3.10)$$

где:

- Δ_A - абсолютная погрешность измерения амплитуды, мВ;
- A_{ref} - эталонная амплитуда сигнала, мВ;
- A_{meas} - амплитуда, определенная алгоритмом, мВ.

Относительная погрешность измерения амплитуды:

$$\Delta_{Ae} = (\Delta_A / A_{ref}) * 100, \quad (3.11)$$

где:

- Δ_{Ae} - относительная погрешность измерения амплитуды, %;
- Δ_A - абсолютная погрешность измерения амплитуды, мВ;
- A_{ref} - эталонная амплитуда сигнала, мВ;

Результаты измерений сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 — результаты измерений

Имитация внутреннего сопротивления	f_{ref} , КГц	A_{ref} , мВ	f_{meas} , КГц	A_{meas} , мВ	Δf , КГц	Δf_e , %	ΔA , мВ	ΔA_e , %
да	10	809	13,75	816,41	3,75	37,5	7,41	0,92
да	300	201	298,83	183,59	1,17	0,39	17,41	8,66
да	300	802	299,43	746,09	0,57	0,19	55,91	6,97
да	400	201	398,83	175,78	1,17	0,29	25,22	12,55
да	400	802	398,84	703,12	1,16	0,29	98,88	12,33
да	500	201	498,84	164,06	1,16	0,23	36,94	18,38
да	500	802	498,84	652,34	1,16	0,23	149,66	18,66
нет	10	809	11,76	832,03	1,76	17,63	23,03	2,85
нет	300	201	298,84	207,03	1,16	0,39	6,03	3
нет	300	802	299,42	816,41	0,58	0,19	14,41	1,8
нет	400	201	399,97	207,03	0,03	0,01	6,03	3
нет	400	802	399,46	816,41	0,54	0,13	14,41	1,8
нет	500	201	498,82	203,12	1,18	0,24	2,12	1,06
нет	500	802	498,84	800,78	1,16	0,23	1,22	0,15

Из результатов в таблице 3.1 можно сделать ряд выводов. Во-первых, частотная ошибка практически во всех тестах укладывается в 0.5%, что является отличным показателем качества работы алгоритма определения частоты. Однако, частотная ошибка в тесте сигнала на 10КГц существенная, поскольку алгоритм не накопил статистику и не смог корректно вычислить частоту сигнала. Этот недостаток можно устранить, если доработать алгоритм (вместо подсчета количества переходов и деления на время оцифровки, нужно сместить «начало» измерения частоты на момент перехода сигнала через центральную точку, и «конец» измерения поставить на последнем таком переходе; таким образом, будет повышена точность алгоритма на низких частотах, а на высоких частотах это не окажет значительного влияния).

Измерение амплитуды работает не на столько точно, как измерение частоты. Видно, что во всех результатах без имитации внутреннего сопротивления источника сигнала, погрешность составляет не более 3%, что

является допустимым результатом. На точность измерения отрицательным образом влияет низкое разрешение АЦП, в технической документации указано 7.2 бита эффективности в режиме работы, аналогичному в используемой схеме. Поэтому результат отчасти зависит от того, в какую сторону «округлит» значение АЦП при оцифровке сигнала. Именно это произошло с сигналом 500КГц с амплитудой 802мВ. При этом, без имитации внутреннего сопротивления источника сигнала, измерение амплитуды работает одинаково на всем диапазоне исследуемых частот.

А вот испытания с нагрузочным резистором показывают, что с ростом частоты увеличивается ошибка измерения амплитуды. Происходит это из-за влияния паразитной емкости проводов между источником сигнала и измерительной цепью. По этой причине рекомендуется устанавливать аналоговый буфер в точке приема сигнала, чтобы существенно снизить влияние паразитных емкостей на результат измерений.

Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенного подхода и показывают, что разработанное устройство обеспечивает требуемую точность измерения параметров периодических сигналов в исследуемом диапазоне частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была решена задача разработки устройства измерения параметров периодических сигналов, предназначенного для работы в условиях воздействия помех.

В первой главе были рассмотрены основные параметры периодических сигналов, проанализированы виды помех, оказывающих влияние на результаты измерений, выполнен обзор существующих методов определения параметров сигналов и проведен анализ известных технических решений. На основании проведенного анализа были сформулированы требования к разрабатываемому устройству и определены критерии оценки возможных методов решения поставленной задачи.

Во второй главе были рассмотрены различные подходы к измерению параметров периодических сигналов. Проведенное сравнение показало, что наиболее перспективным является подход, основанный на полной оцифровке сигнала с последующей цифровой обработкой данных. Такой подход обеспечивает необходимую гибкость алгоритмов и позволяет изменять методы обработки без внесения изменений в аппаратную часть устройства. Также были выбраны основные алгоритмы обработки данных и разработана структурная схема измерительного устройства.

В третьей главе выполнена разработка электрической принципиальной схемы устройства, произведен выбор элементной базы и выполнена оценка потребляемой мощности. Для реализации устройства использован высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь AD9057BRSZ-40 и микроконтроллер STM32F407VET6. Разработанное устройство обеспечивает оцифровку исследуемого сигнала с последующей передачей данных в программный модуль обработки.

Для проверки работоспособности разработанного решения был изготовлен макетный образец устройства и проведены экспериментальные исследования. Испытания выполнялись на синусоидальных сигналах

различной частоты и амплитуды. Полученные результаты показали, что разработанный алгоритм обеспечивает высокую точность определения частоты сигнала. Погрешность измерения амплитуды оказалась несколько выше, что связано с ограниченным разрешением примененного аналого-цифрового преобразователя и влиянием аналогового тракта измерения. Тем не менее полученные результаты подтвердили соответствие разработанного устройства предъявляемым требованиям по точности измерений.

В ходе испытаний также было установлено влияние паразитных параметров соединительных цепей на результаты измерения амплитуды при повышении частоты сигнала. Полученные данные позволяют сформулировать рекомендации по дальнейшему совершенствованию устройства, включая оптимизацию алгоритмов обработки данных и улучшение входного аналогового тракта.

Таким образом, цель работы — создание устройства измерения параметров периодических сигналов, обеспечивающего заданную точность измерения в условиях помех — достигнута. Разработанное устройство может быть использовано в составе испытательных стендов, автоматизированных измерительных комплексов и специализированного оборудования для исследования параметров электронных устройств.

Полученные результаты подтверждают возможность эффективного применения комплексного подхода, сочетающего аппаратную фильтрацию, цифровую фильтрацию и последующую статистическую обработку данных для повышения точности измерения параметров периодических сигналов в условиях воздействия помех.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новиков, Ю. Н. Подготовка и защита магистерских диссертаций и бакалаврских работ : учебно-методическое пособие / Ю. Н. Новиков. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 32 с. — ISBN 978-5-8114-1449-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/212054> (дата обращения: 13.05.2026). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Выполнение и оформление выпускных квалификационных работ, научно-исследовательских работ, курсовых работ магистров и отчетов по практикам : методические указания / М. Б. Быкова, Ж. А. Гореева, Н. С. Козлова, Д. А. Подгорный. — Москва : Издательский Дом МИСиС, 2017. — 76 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/72577.html> (дата обращения: 13.05.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

3. Положение о практике обучающихся, осваивающих образовательные программы высшего образования – программы бакалавриата, специалитета и магистратуры — Режим доступа: <http://oreluniver.ru/support/education>

4. Положение о выпускной квалификационной работе — Режим доступа: <http://oreluniver.ru/support/education> (дата обращения: 13.05.2026).

5. Лобанова В. А. Выполнение и защита выпускной квалификационной работы : методические указания по выполнению выпускной квалификационной работы : направление 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» / В. А. Лобанова, С. Л. Косчинский, О. А. Воронина. — Орел : ОГУ имени И. С. Тургенева, 2025. — 36 с. — URL: <https://elib.oreluniver.ru/m/19d3f6fa-9253-4b83-9a09-daa98a7532dd> (дата обращения: 13.05.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

6. Астайкин, А. И. Теоретические основы радиотехники. Часть первая. Основы теории цепей / А. И. Астайкин, А. П. Помазков ; под редакцией А. И. Астайкин. — Саров : Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ,

2003. — 553 с. — ISBN 5-85165-641-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/60867.html> (дата обращения: 30.05.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

7. Контрольно-индикационный прибор Пикор-Лед. Измерение характеристик изделий (дата обращения: 30.05.2026). Режим доступа - <https://uwbs.ru/development/example-measurements>

8. Сигналы. Виды сигналов и их параметры. Введение в специальность (дата обращения: 30.05.2026). Режим доступа - <https://siblec.ru/telekommunikatsii/vvedenie-v-spetsialnost/3-signaly-vidy-signalov-i-ikh-parametry>

9. Астайкин, А. И. Теоретические основы радиотехники. Часть вторая. Основы теории сигналов / А. И. Астайкин, А. П. Помазков ; под редакцией А. И. Астайкин. — Саров : Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2004. — 335 с. — ISBN 5-9515-0018-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/60868.html> (дата обращения: 30.05.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

10. Генератор периодических сигналов - Электроника, электротехника, радиотехника – Кампус (дата обращения: 30.05.2026). Режим доступа - <https://kampus.ai/referat/generator-periodiceskix-signalov-130297>

11. RU2183839C1 - Способ измерения частоты синусоидальных сигналов и устройство для его реализации - Google Patents (дата обращения: 30.05.2026). Режим доступа - <https://patents.google.com/patent/RU2183839C1/ru>

12. Измерение характеристик изделия — Ледомер. Георадар. Контрольно-индикационный прибор Пикор-Лед. Официальный сайт ООО "ФПК "ЭСТРА" производителя георадара Пикор. (дата обращения: 30.05.2026). Режим доступа - <https://uwbs.ru/development/example-measurements>

13. Экспериментальное исследование кратковременной неустойчивости

частоты опорных генераторов для применения в радионавигационных приемниках. (дата обращения: 30.05.2026). Режим доступа - https://srns.ru/images/c/ce/20140623_Сергеев_Н.И.бакалаврская_работа.pdf

14. Грибанов, А. С. Помехозащищенность систем связи : учебное пособие / А. С. Грибанов. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. — 364 с. — ISBN 978-5-9729-1243-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/133065.html> (дата обращения: 30.05.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

15. Патюков, В. Г. Основы частотно-временных измерений : монография / В. Г. Патюков. — Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2014. — 166 с. — ISBN 978-5-7638-3136-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/84284.html> (дата обращения: 30.05.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

16. RU2229139C1 - Способ спектрального анализа сложных несинусоидальных периодических сигналов представленных цифровыми отсчетами - Google Patents (дата обращения: 30.05.2026). Режим доступа - <https://patents.google.com/patent/RU2229139C1/ru>

17. микроконтроллер STM32 Режим доступа <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf> (дата обращения: 30.05.2026)

18. Schmitt trigger - Wikipedia. Режим доступа - https://en.wikipedia.org/wiki/Schmitt_trigger (дата обращения: 30.05.2026)

19. High Speed ADCs | Analog Devices. Режим доступа - <https://www.analog.com/en/product-category/high-speed-adcs.html> (дата обращения: 30.05.2026)

20. Digital signal processing for STM32 microcontrollers using CMSIS. Режим доступа - https://www.st.com/resource/en/application_note/an4841-digital-signal-processing-for-stm32-microcontrollers-using-cmsis-stmicroelectronics.pdf

(дата обращения: 30.05.2026).

21. Автокорреляционная функция — Википедия. Режим доступа - https://ru.wikipedia.org/wiki/Автокорреляционная_функция (дата обращения: 30.05.2026)

22. RU2229140C1 - Способ спектрального анализа многочастотных периодических сигналов, представленных цифровыми отсчетами - Google Patents. Режим доступа - <https://patents.google.com/patent/RU2229140C1/ru> (дата обращения: 30.05.2026)

Исходные коды программного обеспечения

```

/**
 * Модуль измерений аналоговых сигналов (OUT_ADC, V_SENS, I_SENS, TH_ADC, Vrefint).
 * ADC1 + DMA2s4 (+ прерывание DMA) + TIM5oc1 (ADC1 trigger) = 1000hz ADC для измерения постоянных напряжений
 * ADC3 + DMA2s0 (+ прерывание DMA) + TIM4oc4 (ADC3 trigger) = 10khz ADC для измерения линии Усс и OUT_ADC на
 время тестирования времени включения
 * EXTADC: TIM8, DMA
 */

#include "main.h"

#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif

// размер буфера усреднения
#define ADC1_MAX_BUFFER_SIZE 100

// количество каналов ADC1
#define ADC1_CHANNELS 6

// размер буфера температурного датчика
#define TS_BUFFER_SIZE 500

// у ADC3 2 канала: VSENS, OUT_ADC
#define ADC3_CHANNELS 2
// максимальное время измерения Top (время включения) - 50ms. плюс время включения питания - 5ms
#define ADC3_MAX_MEASURE_TIME_MS (50 + 5)
// размер буфера под ADC тут вычисляется как 50мс * 10семплов_в_секунду
#define ADC3_BUFFER_SIZE (ADC3_MAX_MEASURE_TIME_MS * 10)

/**
 * Инициализация модуля
 */
void AnalogInitialize();

/***** EXT ADC API *****/

// 64k = 0x10000, words 16k = 0x4000
// 32k = 0x8000, words 16k = 0x2000

/**
 * Размер буфера внешнего ADC
 */
#define EXT_ADC_BUFFER_SIZE 0x8000

/**
 * Буфер, куда попадают данные внешнего ADC.
 */
extern uint8_t ExtAdcBuffer[EXT_ADC_BUFFER_SIZE];

/**
 * Запустить внешний ADC
 */
void AnalogExtAdcStart();

/**

```

```

* Ожидать окончания работы внешнего ADC
*/
void AnalogExtAdcWaitBlocking();

/**
* Запустить вычисление параметров сигнала с высокоскоростного АЦП
* @return 1, если удалось определить параметры: частота сигнала, амплитуда, постоянная составляющая
*/
char AnalogExtComputeValues();

/**
* Получение частоту измеренного сигнала, нужно вызывать только после AnalogExtComputeValues!
* @return частота в герцах
*/
uint32_t AnalogExtGetFreq();

/**
* Получить амплитуду измеренного сигнала, нужно вызывать только после AnalogExtComputeValues!
* @return напряжение амплитуды в вольтах
*/
double AnalogExtGetAmplitude();

/**
* Получить постоянную составляющую измеренного сигнала, нужно вызывать только после AnalogExtComputeValues!
* @return напряжение постоянной составляющей в вольтах
*/
double AnalogExtGetDc();

#include <cstring>
#include <cmath>
#include "analog.h"
#include "computing.h"

#define ANALOG_ENTER_CRITICAL() NVIC_DisableIRQ(DMA2_Stream0_IRQn)
#define ANALOG_EXIT_CRITICAL() NVIC_EnableIRQ(DMA2_Stream0_IRQn)

uint8_t ExtAdcBuffer[EXT_ADC_BUFFER_SIZE];

// буфер для записи значений используя DMA
static volatile uint16_t dmaAdcValues[ADC1_CHANNELS];

// переменные для работы буферизированных измерений

void AnalogInitialize() {
    // сбрасываем данные температуры
    memset((void*)tsBuffer, 0, sizeof(tsBuffer));

    // устанавливаем размер буфера по умолчанию (20)
    adcBufferSize = 20;

    // запускаем DMA
    HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, (uint32_t*)dmaAdcValues, ADC1_CHANNELS);

    // HAL ставит свои флаги прерываний, чуть ли не всех...
    // так что отключим все, кроме transfer complete (эти биты можно трогать когда EN=1)
    hdma_adc1.Instance->CR &= ~(DMA_SxCR_DMEIE | DMA_SxCR_TEIE | DMA_SxCR_HTIE);

    // ну и запустим таймер
    HAL_TIM_OC_Start(&htim5, TIM_CHANNEL_1);

    // и за одно запустим таймер 8, который для внешнего ADC
    HAL_TIM_Base_Start(&htim8);

```

```

HAL_TIM_PWM_Start(&htim8, TIM_CHANNEL_1);
htim8.State = HAL_TIM_STATE_READY;

// таймер для измерения времени включения
HAL_TIM_OC_Start(&htim4, TIM_CHANNEL_4);
}

void AnalogBufferingSet(char enable) {
    ANALOG_ENTER_CRITICAL();
    adcBufferEnable = enable;
    adcBufferIsFull = false;
    adcBufferIndex = 0;
    ANALOG_EXIT_CRITICAL();
}

void AnalogBufferingSetBufferSize(int size) {
    ANALOG_ENTER_CRITICAL();

    // для начала сбросим данные буфера, потому что хер его знает как оно было
    adcBufferIsFull = false;
    adcBufferIndex = 0;

    // теперь установим новый размер буфера
    adcBufferSize = size;
    if (adcBufferSize > ADC1_MAX_BUFFER_SIZE) {
        adcBufferSize = ADC1_MAX_BUFFER_SIZE;
    } else if (adcBufferSize < 2) {
        adcBufferSize = 2;
    }

    ANALOG_EXIT_CRITICAL();
}

void AnalogBufferingReset() {
    if (adcBufferEnable) {
        ANALOG_ENTER_CRITICAL();
        adcBufferIsFull = false;
        adcBufferIndex = 0;
        ANALOG_EXIT_CRITICAL();
    }
}

char AnalogBufferingIsFull() {
    return adcBufferIsFull;
}

/**
 * Посчитать среднее значение накопленных измерений в буфере
 * @param vref параметр, куда записывать среднее опорное напряжение
 * @param valueIndex индекс канала, который требуется усреднить
 * @param value параметр, куда записывать усредненное значение канала valueIndex
 * @return true, если данные извлечены успешно, false если накопленных данных нет
 */
static bool bufferGetAverage(uint16_t& vref, int valueIndex, uint16_t& value) {
    uint32_t sum_vref = 0, sum_value = 0;

    if (valueIndex == ADC1_CH_TS) {
        ANALOG_ENTER_CRITICAL();

        // просто считаем все значения
        for (auto i : tsBuffer) {
            sum_value += i;
        }
    }
}

```



```

// усреднять vref не будем, его уже усреднил ADC
sum_vref = dmaAdcValues[ADC1_CH_VREF];

ANALOG_EXIT_CRITICAL();

sum_value /= TS_BUFFER_SIZE;
} else {
    ANALOG_ENTER_CRITICAL();
    // проверяем что у нас есть что копировать
    if (!adcBufferIsFull && adcBufferIndex == 0) {
        ANALOG_EXIT_CRITICAL();
        return false;
    }

    const auto real_len = adcBufferIsFull ? adcBufferSize : adcBufferIndex;

    // просто считаем все значения
    for (int i = 0; i < real_len; i++) {
        sum_vref += adcBuffer[i][ADC1_CH_VREF];
        sum_value += adcBuffer[i][valueIndex];
    }

    ANALOG_EXIT_CRITICAL();

    sum_vref /= real_len;
    sum_value /= real_len;
}

vref = (uint16_t) sum_vref;
value = (uint16_t) sum_value;
return true;
}

void AnalogExtAdcStart() {
    // HAL_TIM_Base_Start_DMA();

    if (htim8.hdma[TIM_DMA_ID_UPDATE]->State != HAL_DMA_STATE_READY) {
        return;
    }

    // Set the DMA Period elapsed callbacks
    htim8.hdma[TIM_DMA_ID_UPDATE]->XferCpltCallback = nullptr;
    htim8.hdma[TIM_DMA_ID_UPDATE]->XferHalfCpltCallback = nullptr;

    // Set the DMA error callback
    htim8.hdma[TIM_DMA_ID_UPDATE]->XferErrorCallback = nullptr;

    // Enable the DMA stream
    if (HAL_DMA_Start(htim8.hdma[TIM_DMA_ID_UPDATE],
        (uint32_t)(void*)&GPIOID->IDR,
        (uint32_t)&ExtAdcBuffer,
        EXT_ADC_BUFFER_SIZE) == HAL_OK) {
        // dma interrupts and set
        // DMA2s1
        __HAL_UNLOCK(htim8.hdma[TIM_DMA_ID_UPDATE]);
        DMA2_Stream1->CR |= DMA_SxCR_TEIE | DMA_SxCR_TCIE;

        // Enable the TIM Update DMA request
        __HAL_TIM_ENABLE_DMA(&htim8, TIM_DMA_UPDATE);
        __HAL_TIM_ENABLE(&htim8);
    }
}

```

```

    // вариант 2
    // HAL_TIM_Base_Start(htim);
    // HAL_TIM_OC_Start(htim, TIM_CHANNEL_1);
    // TIM2->DIER |= (1 << 8); // set UDE bit (update dma request enable)
    // htim->Instance->DIER |= (1 << 8);
}

void AnalogExtAdcWaitBlocking() {
    while (htim8.hdma[TIM_DMA_ID_UPDATE]->State != HAL_DMA_STATE_READY) {
        FirmwareWaitForInterrupt();
    }
}

static uint32_t extAdcFreq;
static double extAdcAmp;
static double extAdcDc;

char AnalogExtComputeValues() {
    return computeAdcResults(extAdcFreq, extAdcAmp, extAdcDc);
}

uint32_t AnalogExtGetFreq() {
    return extAdcFreq;
}

double AnalogExtGetAmplitude() {
    return extAdcAmp;
}

double AnalogExtGetDc() {
    return extAdcDc;
}

void AnalogUSet(uint16_t mv) {
    float tmp = mv;
    tmp *= 0.2693097197043648f;
    tmp += 4.068897224933655f;
    // y=0.2693097197043648x+4.068897224933655
    int dac_val = (int)tmp;
    if (dac_val < 0) {
        dac_val = 0;
    } else if (dac_val > 4095) {
        dac_val = 4095;
    }
}

HAL_DAC_SetValue(&hdac, DAC_CHANNEL_2, DAC_ALIGN_12B_R, dac_val);
}

void DMA2_Stream4_IRQHandler() {
    bool transferComplete = DMA2->HISR & DMA_HISR_TCIF4;
    DMA2->HIFCR = DMA_HIFCR_CHTIF4 | DMA_HIFCR_CTCIF4 | DMA_HIFCR_CTEIF4 | DMA_HIFCR_CFEIF4 |
DMA_HIFCR_CDMEIF4;

    if (transferComplete) {
        // переместить содержимое dmaAdcValues в "почтовый ящик"
        if (!haveNewValues) {
            memcpy((void *) measureAdcValues, (const void *)dmaAdcValues, sizeof(dmaAdcValues));
        }
    }
}

```

```

        haveNewValues = true;
    }

    // протолкнуть данные в буфер, если включена буферизация
    if (adcBufferEnable) {
        memcpy((void *) adcBuffer[adcBufferIndex++], (const void*)dmaAdcValues, sizeof(dmaAdcValues));
        if (adcBufferIndex >= adcBufferSize) {
            adcBufferIndex = 0;
            adcBufferIsFull = true;
        }
    }

    // и записать температурный датчик
    if (tsBufferIndex >= TS_BUFFER_SIZE) {
        tsBufferIndex = 0;
    }
    tsBuffer[tsBufferIndex++] = dmaAdcValues[ADC1_CH_TS];
}

void DMA2_Stream0_IRQHandler() {
    HAL_DMA_IRQHandler(&hdma_adc3);
}

void DMA2_Stream1_IRQHandler() {
    uint32_t is_transfer = DMA2->LISR & DMA_LISR_TCIF1;
    bool transferError = DMA2->LISR & DMA_LISR_TEIF0;
    DMA2->LIFCR = DMA_LIFCR_CHTIF1 | DMA_LIFCR_CTCIF1 | DMA_LIFCR_CTEIF1 | DMA_LIFCR_CFEIF1 |
    DMA_LIFCR_CDMEIF1;

    // HAL_DMA_IRQHandler(&hdma_tim8_up);

    if (is_transfer || transferError) {
        // transfer complete
        htim8.State = HAL_TIM_STATE_READY;
        htim8.hdma[TIM_DMA_ID_UPDATE]->State = HAL_DMA_STATE_READY;
        // HAL_UART_Transmit_DMA(&huart1, adcBuffer, 0x8000);
        // computingHandler();
    }
}

#include <cstring>
#include "computing.h"

uint8_t ExtAdcBuffer[EXT_ADC_BUFFER_SIZE];

bool computeAdcResults(uint32_t &freq, double &amplitude, double &dc) {
    // Краевые значения не обрабатываем
    #define edge1 32

    // Частота АЦП
    const double Fd = (168.0f / 9.0f) * 1e6f; // Частота дискретизации в герцах

    // uint8_t ExtAdcBuffer[EXT_ADC_BUFFER_SIZE];

    // Применим медианный фильтр
    // MedianFilter3();

    // Применим фильтр скользящего среднего
    // MovAvgFilter5();

```

```

// *****
// Оценка размаха. Построим гистограмму
// знаем, что разрядность АЦП 8 бит - 256 значений

// Обнуляем вспомогательный массив
int gg[256];
memset(gg, 0, sizeof(gg));

// Формируем гистограмму
for (uint16_t i = edge1; i < EXT_ADC_BUFFER_SIZE - edge1; i++)
    gg[ExtAdcBuffer[i]]++;

// Оцениваем пики гистограммы

int xm = 0;
uint8_t km1 = 0;
uint8_t km2 = 0;
for (uint16_t i = 0; i < 120; i++) {
    if (xm < gg[i]) {
        xm = gg[i];
        km1 = i;
    }
}

xm = 0;
for (uint16_t i = 134; i <= 0xFF; i++) {
    if (xm < gg[i]) {
        xm = gg[i];
        km2 = i;
    }
}

// Определяем оценку напряжения в милливольтках, применительно к размаху АЦП
amplitude = (double) (km2 - km1) / 256.0;
amplitude *= 2.6048450117218023; // NOTE: магический коэффициент для схемы

// расчет постоянной составляющей
dc = (((double) km1 + (double) km2) / 2.0f) / 256.0f * 1000.0f + 2000.0f;
// y = 2 + x

// *****
// Оцениваем частоту
// Считаем, что 128й уровень находится ровно посередине

const uint16_t z = 8; // Защитный интервал
uint32_t xk1 = 0;
uint32_t xk2 = 0;
uint32_t xsum = 0;
uint32_t xnum = 0;

uint32_t i = edge1;
// ищем переходы через 128
while ((i < EXT_ADC_BUFFER_SIZE - edge1) && (ExtAdcBuffer[i] > 128))
    i++;
i = i + z;
while ((i < EXT_ADC_BUFFER_SIZE - edge1) && (ExtAdcBuffer[i] < 128))
    i++;
xk1 = i;
while ((i < EXT_ADC_BUFFER_SIZE - edge1) && (ExtAdcBuffer[i] > 128))
    i++;
i = i + z;
while ((i < EXT_ADC_BUFFER_SIZE - edge1) && (ExtAdcBuffer[i] < 128))

```

```

    i++;
    xk2 = i;
    i = i + i;
    xsum = xk2 - xk1;
    xnum = 1;

    // Находим много периодов
    while (i < EXT_ADC_BUFFER_SIZE - edge1) {
        while ((i < EXT_ADC_BUFFER_SIZE - edge1) && (ExtAdcBuffer[i] > 128))
            i++;
        i = i + z;
        while ((i < EXT_ADC_BUFFER_SIZE - edge1) && (ExtAdcBuffer[i] < 128))
            i++;
        if (i < EXT_ADC_BUFFER_SIZE - edge1) {
            xsum = xsum + (i - xk2);
            xnum++;
            xk2 = i;
        }
        i = i + z;
    }
    // Оценка частоты в герцах
    freq = (uint32_t) (Fd / (double) xsum * (double) xnum);

    // Посмотрим, если есть переполнение АЦП в одну или в другую сторону, то
    // выдадим ошибку
    if ((km1 == 0) | (km2 == 255))
        return (false);
    else
        return (true);
}

```