

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ИГУ»)
Физический факультет

Кафедра радиофизики и радиоэлектроники
Допускается к защите
И.О. зав. кафедрой,
Доцент, к.ф.м.н. _____ Колесник С.Н.
« ____ » _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА
по направлению 03.04.03 Радиофизика
направленность (профиль)
«Информационные процессы и системы»

**РАЗРАБОТКА ЭЭГ-РЕГИСТРАТОРА НА ОСНОВЕ НОВЫХ ПОДХОДОВ
К АНАЛИЗУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МОЗГА**

Нормоконтролёр: доцент, к.т.н.

(подпись) Петрушин И.С.
Консультант: ведущий инженер

(подпись) Машанов А.В.

Студент 2 курса очного отделения,
Группа 01221- ДМ
Якимов Якимов Николай Петрович
(подпись)
Руководитель: к.ф.м.н., доцент

(подпись) Колесник С.Н.
Рецензент: д.б.н., зав. отделом

(подпись) Лепёхова С.А.
Рецензент: д.т.н., профессор

(подпись) Ерохин В.В.

Работа защищена:
« ____ » _____ 2020 г.
С оценкой _____
Протокол № _____

Иркутск 2020

ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Задание по подготовке выпускной квалификационной работы магистра

Студент группы 01221-ДМ Якимов Николай Петрович

1. Тема работы: Разработка ЭЭГ-регистратора на основе новых подходов к анализу электрической активности мозга
утверждена приказом по университету № 7071/3 от 20.12.2019 г.
2. Срок подачи работы: 12.06.2020 г.
3. Исходные данные к работе: Разработать и изготовить устройство для измерения биопотенциалов головного мозга.
4. Краткое содержание дипломной работы (по разделам):
 1. Электроэнцефалография
 2. Техническое задание на устройство
 3. Структурная схема устройства
 4. Подбор элементной базы
 5. Реализация
 6. Программное обеспечение
 7. Проверка работоспособности
5. Консультанты по работе: Машанов А.В., ведущий инженер, Восточно-Сибирский филиал ФГУП "ВНИИФТРИ"
6. Дата выдачи задания: 26.12.2019 г.

Кафедра радиофизики и радиоэлектроники

И.О. зав. кафедрой, доцент, кандидат физ. – мат. наук _____ Колесник С.Н.

Руководитель работы:

доцент, кандидат физ. – мат. наук _____ Колесник С.Н.
(подпись руководителя) (ФИО руководителя)

Задание принял к исполнению: 26.12.2019 г.
(дата)

_____ Якимов Н.П.
(подпись студента) (ФИО студента)

Текущий контроль за выполнением работы: в соответствии с календарным планом подготовки выпускной квалификационной работы.

Содержание

Введение.....	4
1. Электроэнцефалография	5
1.1 OpenEEG	5
1.2 Омегаэнцефалография.....	6
2. Техническое задание на устройство	7
3. Структурная схема устройства.....	9
4. Подбор элементной базы	11
4.1 Аналого-цифровой преобразователь.....	11
4.2 Микроконтроллер	14
4.3 Гальваническая развязка	15
4.4 USB-мост.....	17
4.5 Питание устройства	17
5. Реализация	19
6. Программное обеспечение.....	22
6.1 Разработка программного обеспечения микроконтроллера.....	22
6.2 Разработка программного обеспечения компьютера	24
7. Проверка работоспособности	27
7.1 Измерение постоянного напряжения.....	27
7.2 Электрокардиограмма	29
7.3 Омегаэлектроэнцефалограмма	30
Заключение	35
Список использованных источников	36
Приложение 1. Принципиальная схема	38
Приложение 2. Перечень компонентов.....	41

Введение

Электроэнцефалография (ЭЭГ) – метод исследования головного мозга, основанный на регистрации биопотенциалов. ЭЭГ используется в диагностические при исследовании различных заболеваний [1].

Электроэнцефалограф – электроизмерительный прибор для проведения электроэнцефалографии, используемый в медицине. Электроэнцефалографы регистрируют электрические колебания с частотой 0,5 – 100 Гц.

В классической энцефалографии существует проблема того, что в диагностике различных состояний головного мозга, поскольку и в норме, и при патологиях часто регистрируется сходная картина [2].

Одним из путей повышения диагностических возможностей электроэнцефалографии может быть расширение диапазона регистрируемых частот за счет регистрации уровня постоянного потенциала (УПП) головного мозга и его колебаний (менее 0,5 Гц). Эта информация обычно удалялась из ЭЭГ.

Проведённые в Иркутском госуниверситете на кафедре физиологии и психофизиологии лабораторные исследования [3, 4, 5, 6, 7] показывают высокую эффективность комплексной регистрации УПП и ЭЭГ в диагностике функционального и метаболического состояния (ФимС) клеток головного мозга, недоступную другим методам. Новый метод был назван омегаэлектроэнцефалографией [4].

Данная работа направлена на разработку устройства для регистрации биоэлектрической активности мозга в диапазоне частот 0-100Гц.

1. Электроэнцефалография

1. 1 OpenEEG

Постоянная составляющая в современных ЭЭГ обычно не регистрируется.

Существуют открытые проекты разработки ЭЭГ. Их принцип действия и схематика доступны для изучения. Самый известный среди них openEEG [8]. Проект создавался как доступный инструмент для регистрации ритмов при медитациях. Этот ЭЭГ использует биполярные входы (каждый канал имеет два отдельных измерительных электрода). Частота дискретизации составляет 256 Гц. На входе перед АЦП имеются измерительный усилитель и фильтры.

Здесь используется 10 битный АЦП последовательного приближения (находится в составе микроконтроллера AT90S4433P).

Измерительные фильтры применяются в таких приборах из-за своих характеристик, таких как: малое входное смещение, малый собственный шум и большое входное сопротивление.

В openEEG стоят фильтры: верхних частот ($f_{cp} = 0.16$ Гц) и фильтр нижних частот ($f_{cp} = 59$ Гц). Фильтр верхних частот убирает постоянную составляющую, которая не используется в классической энцефалографии. Такая фильтрация значительно уменьшает диапазон измеряемого АЦП напряжения и этим позволяет добиться в этой схеме от АЦП с достаточно низкой разрядностью (10 бит) разрешающей способности в 0.5 мкВ, при диапазоне измеряемого напряжения в 512 мкВ.

Этот ЭЭГ при доступности компонентов и относительной простоте исполнения хорошо справляется со своей задачей.

1. 2 Омегаэнцефалография

Многие исследования [9] показывают, что одним из биоэлектрических явлений мозга является УПП, который также называется омега-потенциалом [10].

Проведённые эксперименты [7] показывают высокие диагностические возможности метода омегаэлектроэнцефалографии. Отдельно ни ЭЭГ, ни УПП не могут выявить полный характер процессов, связанных с электрогенными свойствами мозга. В качестве примера можно привести данные, полученные автором в исследованиях электрической активности головного мозга при гипо- и гипервентиляции легких на человеке:

«Анализ омегаэлектроэнцефалограммы (омегаЭЭГ) показал, что в обоих случаях имело место сходное увеличение амплитуды ритмов классической ЭЭГ, а вот УПП менялся противоположным образом, говоря о качественно разных массовых поляризационных изменениях в клетках нервной ткани: реполяризационных и гиперполяризационных процессах при гиповентиляции и деполяризационных при гипервентиляции».

2. Техническое задание на устройство

Диапазон напряжений, которые требуется измерять составляет десятки милливольт, а вместе с электродными поляризационными явлениями и сотни милливольт (до ± 500 мВ) для УПП. В тоже время ритмы имеют амплитуду лишь в десятки и редко сотни микровольт.

Для того, чтобы эффективно регистрировать такие сигналы необходимо различать напряжения порядка 1 мкВ. Это значит, что при диапазоне измерения напряжения 1 В разрядность АЦП должна быть по крайней мере 20 бит ($2^{20} = 1048576$ уровней). Такой разрядностью обладают 24 битные АЦП.

Использовать необходимо равномерное квантование. Значительную поляризацию могут вносить измерительные электроды, у разных экземпляров она достаточно существенно может отличаться. Абсолютные значения измеряемого сигнала варьируются в достаточно широких пределах от единиц микровольт до сотен милливольт. И одинаковая точность нужна на всём этом диапазоне. При использовании неравномерного квантования, пришлось бы выбирать диапазон, где уровней квантования должно быть больше, в зависимости от конкретных экземпляров электродов.

Максимальная частота в спектре сигналов, которые требуется регистрировать, составляет до 100 Гц. По теореме Котельникова, чтобы восстановить без искажения из дискретных отсчётов, частота дискретизации ($f_d \geq 2f_{\max}$) должна быть более 200 Гц.

В настоящее время для регистрации ЭЭГ используют 8 и более каналов.

При 24 битах (3 байтах) информации с каждого из 8 каналов и частоте дискретизации 500 Гц нужна скорость передачи как минимум 96 кбит/с. И это считая без учёта служебной информации, которая при организации передачи данных непременно должна быть. С учётом перекодировки и служебной информации для 8 каналов интерфейс передачи данных между устройством и ПК должен обеспечивать скорость как минимум 252 кбит/с.

Самым актуальным интерфейсом для подключения периферии к ПК является USB. Этот интерфейс есть в каждом современном компьютере, для использования прибора будет разумным применить именно этот интерфейс.

Во время проведения измерений важно контролировать наличие и качество контакта электродов с поверхностью тела человека. Это влияет на качество снимаемого сигнала. Для контроля качества контакта необходимо предусмотреть измерение сопротивления на электродах.

На основе вышесказанного была поставлена задача спроектировать и создать устройство, которое бы могло с достаточной эффективностью фиксировать переменную и постоянную составляющие потенциалов мозга человека.

Перечень требуемых параметров устройства представлен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень требуемых параметров устройства

№	Параметр	Значение/Требование
1	Точность измерения	Не менее 1 мкВ
1	Разрядность АЦП	24 бита
2	Диапазон измерения напряжения	Не менее $\pm 0,5\text{В}$
3	Частота дискретизации	Более 200 Гц
4	Электробезопасность	Для обеспечения защиты испытуемого от поражения электричеством необходимо предусмотреть гальваническую развязку
5	Количество каналов измерения	Не менее 8
6	Интерфейс сопряжения устройства с ПК	USB 2.0
7	Дополнительные функции	Измерение сопротивления контактов электродов

3. Структурная схема устройства

На основании технического задания в разрабатываемое устройство должны быть включены следующие составляющие:

- АЦП;
- Устройство для измерения сопротивления электродов;
- Микроконтроллер;
- Гальваническая развязка;
- USB-мост.

Функциональная схема разрабатываемого устройства изображена на рис. 2.

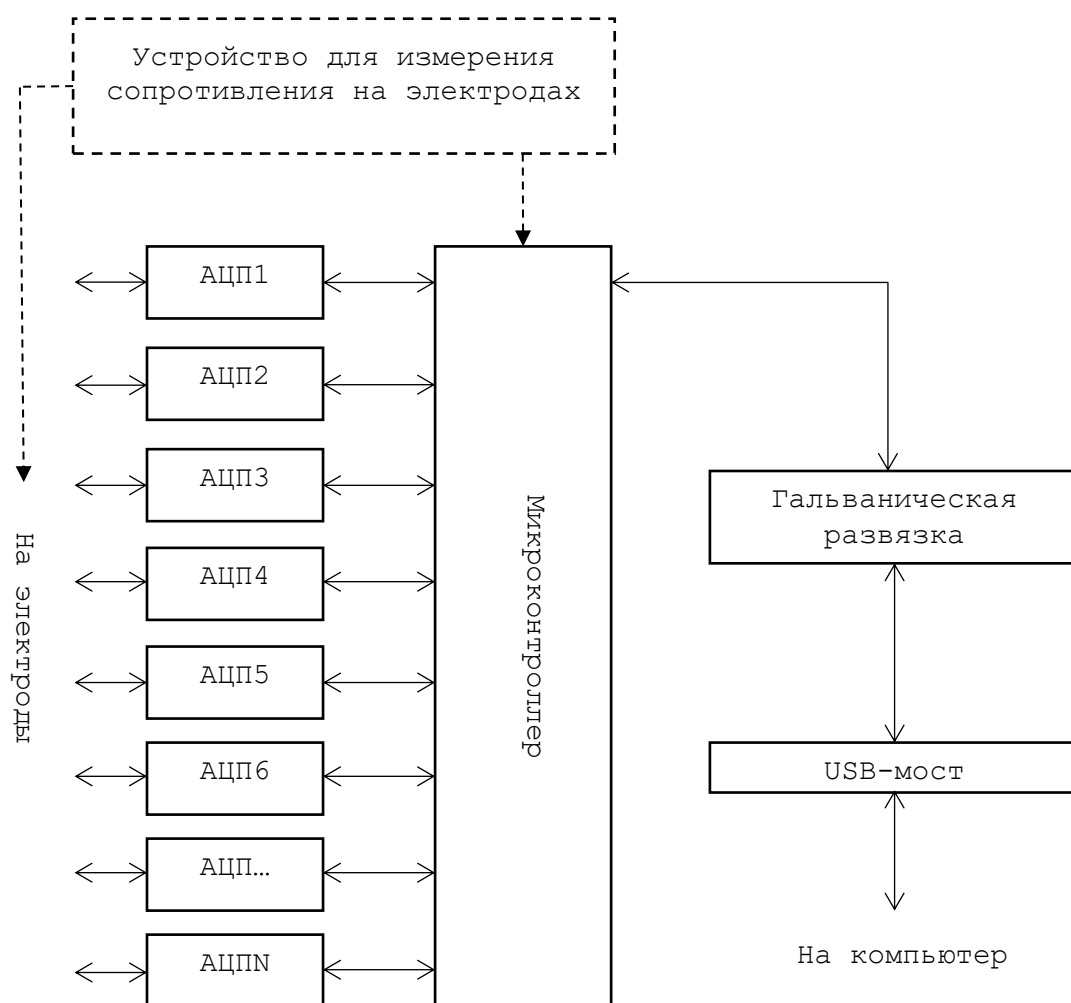


Рис. 2 Функциональная схема разрабатываемого устройства

Микроконтроллер связывается с ПК посредством USB-моста, между микроконтроллером и USB-мостом установлена гальваническая развязка.

Для начала измерения с ПК на микроконтроллер должна быть подана команда и необходимые настройки. Микроконтроллер подаёт команды на АЦП для их конфигурирования и передачи данных.

Перед началом основных измерений производится измерение сопротивления на электродах с помощью соответствующего блока (это может быть реализовано как отдельное устройство, или с помощью функционала АЦП или контроллера).

При подаче соответствующей команды АЦП принимает с электродов сигнал и преобразует его в числовой код. Микроконтроллер перекодирует в требуемую форму полученную информацию и выдаёт её компьютеру через USB-мост

4. Подбор элементной базы

4.1 Аналого-цифровой преобразователь

АЦП – важнейший элемент электроэнцефалографа.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) – устройства, которые принимают входные аналоговые сигналы и генерируют соответствующие им цифровые сигналы, которые могут обрабатываться цифровыми устройствами.

Существует три основных типа АЦП [11]: параллельные, последовательного приближения и сигма-дельта АЦП.

Недостатком параллельных АЦП и последовательного приближения является низкая помехоустойчивость результатов преобразования.

Указанного выше недостатка лишены сигма-дельта АЦП. Своим названием эти преобразователи обязаны наличием в них двух блоков: сумматора (обозначение операции - Σ) и интегратора (обозначение операции - Δ). Один из принципов, заложенных в такого рода преобразователях, позволяющий уменьшить погрешность, вносимую шумами, и, следовательно, увеличить разрешающую способность - это усреднение результатов измерения на большом интервале времени. Структурная схема такого изображена на рис. 4.

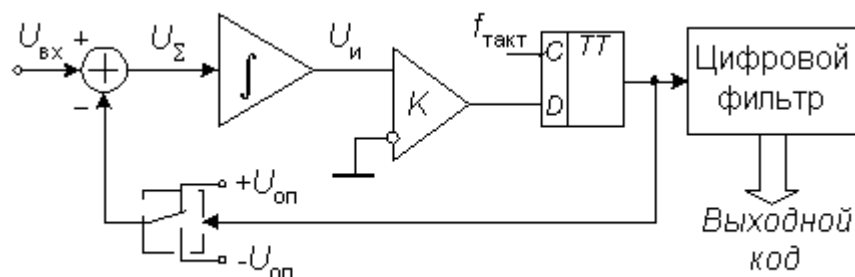


Рис. 4. Структурная схема сигма-дельта АЦП

Принцип действия данного АЦП несколько более сложен, чем у других типов АЦП. Его суть в том, что входное напряжение сравнивается со значением напряжения, накопленным интегратором. На вход интегратора подаются импульсы положительной или отрицательной полярности, в зависимости от результата сравнения. Таким образом, данный АЦП представляет собой простую следящую систему: напряжение на выходе интегратора «отслеживает» входное напряжение.

Основные узлы АЦП - это сигма-дельта модулятор и цифровой фильтр. Работа этой схемы основана на вычитании из входного сигнала $U_{вх}(t)$ величины сигнала на выходе ЦАП, полученной на предыдущем такте работы схемы. Полученная разность интегрируется, а затем преобразуется в код параллельным АЦП невысокой разрядности. Последовательность кодов поступает на цифровой фильтр нижних частот.

Основным достоинством сигма-дельта АЦП является высокая точность, обусловленная крайне низким уровнем собственного шума. Однако для достижения высокой точности нужно, чтобы частота среза цифрового фильтра была как можно ниже, во много раз меньше частоты работы сигма-дельта модулятора. Поэтому сигма-дельта АЦП имеют низкую скорость преобразования.

Для разрабатываемого устройства особо важен низкий уровень собственного шума. Также несомненным преимуществом является то, что эти АЦП имеют в своём составе цифровые фильтры.

Под поставленную задачу по техническим параметрам подходят АЦП марки AD 7793[12].

AD7793 – это энергоэффективный малошумящий полнофункциональный АЦП для прецизионных измерительных схем.

Чип содержит малошумящий 24-битный сигма-дельта АЦП с тремя дифференциальными аналоговыми входами. Кроме того, на чипе размещены программируемые источники тока возбуждения, диагностические источники тока и генератор напряжения смещения. Устройствами можно управлять с

помощью внутреннего источника или внешнего тактового сигнала. Обмен данными между АЦП и микроконтроллером осуществляется по SPI. Технические характеристики представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики АЦП AD7793

№	Характеристика	Значение
1	Частота обновления выходных данных	от 4,17 до 470 Гц (от внутреннего источника)
2	Разрядность	24 бита
3	Количество каналов	3
4	Среднеквадратичное значение выходного шума	0,49 мкВ (при частоте обновления 470Гц, с максимальным усилением)
5	Входное сопротивление	~ 500 МОм
6	Опорное напряжение	$AV_{DD}/2$ (половина от поданного напряжения на пин AV_{DD})

AD7793 обладает характеристиками, подходящими для выполнения поставленной задачи.

Подразумевается использование нескольких таких АЦП (8-16). Вариант с использованием нескольких АЦП вместо одного АЦП с мультиплексором обусловлен тем, что этот чип доступен и так же содержит в себе необходимые компоненты для реализации дополнительных функций.

В составе чипа с АЦП присутствуют измерительный дифференциальный усилитель на входе АЦП и источники тока возбуждения. Наличие измерительного усилителя в составе чипа позволяет проектировать устройство без использования дополнительных усилительных схем на входе.

Измерительный усилитель — это разновидность дифференциального усилителя. Измерительные усилители применяются в высокоточных схемах,

потому что они при измерении обеспечивают: высокую точность коэффициента усиления, широкий диапазон регулирования коэффициента усиления, большое входное сопротивление, малый собственный шум.

Источники тока возбуждения (100 нА) помогут решить задачу измерения сопротивления электродов без дополнительных устройств. Сопротивление вычисляется как отношение разности измеренных напряжений при включенном и выключенном источнике за определённое время к величине тока.

4. 2 Микроконтроллер

В настоящее время существуют несколько семейств микроконтроллеров. Например, ARM, AVR, STM, PIC и другие. В этих семействах есть чипы под различные задачи с различным набором характеристик, на любой вкус и практически на любые потребности. Главными критериями в выборе были: необходимое количество портов для подключения аналого-цифровых преобразователей, тактовая частота и достаточный размер памяти программ и данных. Объём памяти данных должен быть не менее 1 кбайт. Быстродействие должно быть не менее 1 MIPS (1 млн. инструкций в секунду)

В общем случае, в любом из перечисленных семейств найдётся подходящее решение. Для данного устройства был выбран микроконтроллер семейства PIC. Предпочтение этому семейству было отдано по следующим причинам: опыт работы с этим семейством и доступность.

Из перечня микроконтроллеров PIC был выбран PIC18F252 [13]. Его технические характеристики приведены в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики микроконтроллера PIC18F252

№	Параметр	Значение
1	Тактовая частота (макс.)	40 МГц
2	Память программ	32 Кбайт (16384 команд)
3	Память данных	1536 байт
4	Быстродействие	До 10 MIPS
5	Команд микроконтроллера	75 команд
6	Порты ввода/вывода	PORT A, B, C (22 контакта)
7	Корпус	28DIP/SOIC

К достоинствам, PIC-контроллеров так же можно отнести фиксированный размер команд, что будет важно при программировании микроконтроллера.

4. 3 Гальваническая развязка

Гальваническая развязка – это передача сигнала между электрическими цепями без электрического контакта. Гальваническая развязка в этом устройстве должна решить две задачи.

Во-первых, это защита от высоких напряжений. Выше была обозначена проблема защиты испытуемого от поражения электричеством. Наличие гальванической развязки – это требование, которое предъявляется техникой безопасности к большинству электроприборов.

Во-вторых, гальваническая развязка необходима для обеспечения лучшей помехоустойчивости. Прибор должен соединяться с ПК по интерфейсу USB, здесь неизбежны импульсные помехи по питанию, а АЦП очень чувствителен. Наличие помех от ПК повлияет на измерения.

Есть три основных типа гальванической развязки: трансформаторная, оптическая (оптоэлектронная), конденсаторная. У каждого типа есть свои преимущества и недостатки. В приборе через гальваническую развязку будут передаваться информационные сигналы между микроконтроллером и USB-мостом.

Наиболее подходящим является трансформаторный тип. Для применения в разработке удобно использовать готовую цифровую двухканальную развязку. Поэтому был выбран чип ADUM 1201 [14].

Цифровой изолятор ADUM1201 организует два независимых изолированных канала с различными конфигурациями и скоростями передачи сигнала. Функциональная схема изолятора ADUM1201 приведена на рис.6.

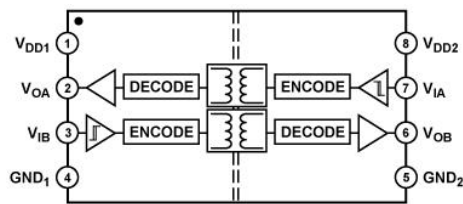


Рис. 6 Функциональная схема ADUM 1201

Характеристики устройства указаны в табл. 4.

Таблица 4

Технические характеристики ADUM 1201

№	Параметр	Значение
1	Количество каналов	2
2	Скорость передачи данных	До 25 Мбит/с
3	Номинальное напряжение диэлектрической изоляции	2,5 кВ действующего напряжения (в течение 1 минуты)
4	Напряжение питания	От 2,7 до 5,5 В
5	Корпус	SOIC-8

4. 4 USB-мост

При выборе USB-моста одним из основных требований была универсальность подключения к компьютерам на разных операционных системах. Основные требования к чипу: поддержка USB 2.0, обеспечение минимальной требуемой скорости обмена 292 кбит/с и наличие драйверов для актуальных операционных систем.

Чипы для USB-мостов производят несколько компаний, такие как FTDI (FT232R), Prolific (PL2303), Silicon Labs (CP2102). У всех этих производителей есть подходящие решения. Решающим фактором была цена и доступность. Был выбран USB-мост на чипе CP2102 [15] (табл. 5).

Таблица 5

Технические характеристики CP2102

№	Параметр	Значение
1	Скорость обмена данными по UART	300 бит/с — 1 Мбит/с
2	Версия USB	Поддержка USB 2.0 12Мбит/сек
3	Напряжение питания	3,3В

Этот USB-мост обеспечивает требуемую скорость передачи данных. Обмен данными между микроконтроллером и компьютером будет осуществляться с использованием виртуального COM-порта. Этим обеспечивается универсальность.

4. 5 Питание устройства

АЦП очень требовательны к питанию. Необходимо минимизировать помехи со стороны питания. Источник питания не должен вносить значимых помех.

Трансформаторные источники питания имеют большие габариты. Основным недостатком импульсных источников – это наличие импульсных высокочастотных помех как на входе, так и на выходе. Для устранения этого недостатка необходимо применение фильтров. Это приведёт к усложнению схемы устройства.

С учётом низкого энергопотребления разрабатываемого устройства (до 2,5 Вт), оптимальным решением будет использовать элементы питания, например, литий-ионные 3,7В элементы форм-фактора 18650. Выбранные АЦП требуют отдельного питания для аналоговой и цифровой частей.

Два последовательно соединённых элемента 18650 дают напряжение в районе 7,4В. Это напряжение стабилизируется до 5В двумя стабилизаторами напряжения L7805CV. С одного стабилизатора напряжение идёт на цифровую часть АЦП, микроконтроллер и ADUM, со второго на аналоговую часть АЦП. Минусы аналоговой и цифровой частей питания соединяются только в одной точке. Принципиальная схема блока показана на рис. 7.

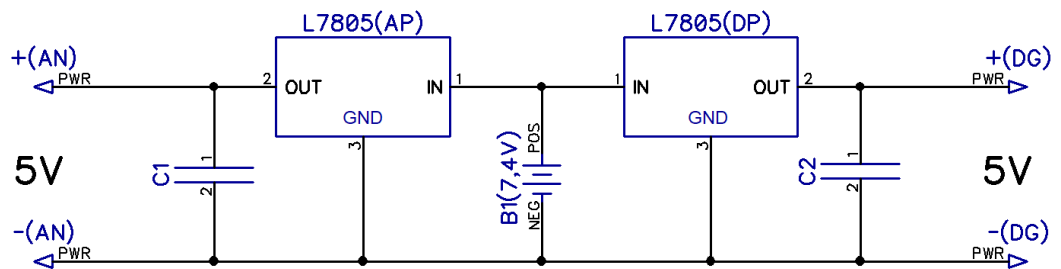


Рис. 7 Принципиальная схема блока

На рис.7 два конденсатора имеют номинал $C1 = C2 = 22 \text{ мкФ}$.

Схема проста в реализации и обеспечивает уровень шума по напряжению на выходе не более 2 мкВ.

5. Реализация

Электрическая схема и перечень элементов представлены в прил. 1 и прил. 2 соответственно.

Для реализации схемы была изготовлена монтажная плата из листа металлизированного стеклотекстолита (рис. 8).

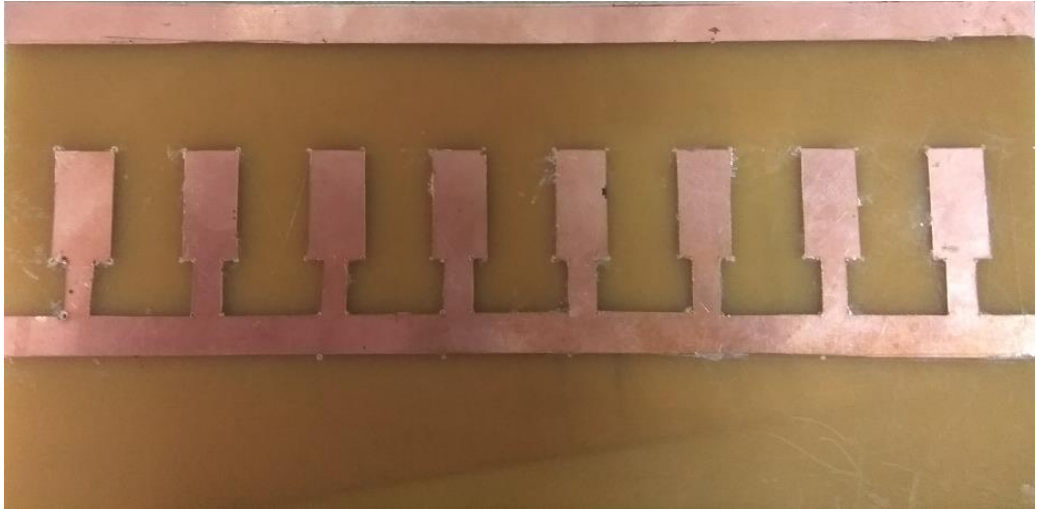


Рис. 8 Монтажная плата

В плате просверливались отверстия для установки компонентов.

АЦП устанавливался в модуле-переходнике TSSOP-DIP с распаянными конденсаторами. Для предотвращения перегрева стабилизаторов напряжения установлен радиатор. Монтаж соединений производился с использованием провода ПЭТВ-2 0,25 мм (рис 9).

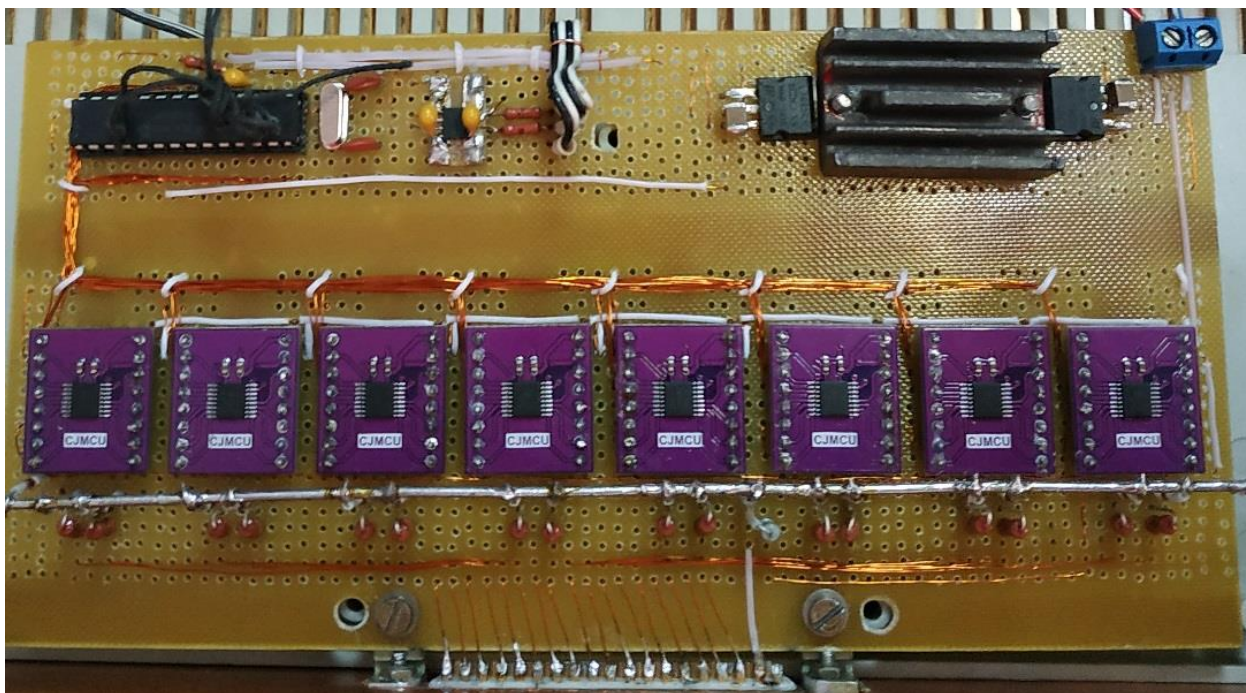


Рис. 9 Собранная плата

Выбор такого варианта монтажа обусловлен несколькими причинами.

Во-первых, перед изготовлением полноценной печатной платы необходимо проверить правильность выбора электронных компонентов для поставленных целей. Монтаж и сборка должны быть достаточно простыми.

Во-вторых, в то же время соединения необходимо сделать достаточно надёжными для проведения полноценных испытаний.

Плата проверена, организована передача данных между АЦП и микроконтроллером. Готова основа для дальнейшей разработки [16].

На рис. 10 и рис. 11 показан общий вид устройства в корпусе. На задней панели устройства расположены следующие элементы: кнопка включения с индикатором питания, гнездо предохранителя 1 А, отсек для двух аккумуляторов типа 18650 3.7 В, разъём DB-15М для подключения кабеля с USB-мостом. На передней панели расположен разъём DB-37М для подключения электродов.



Рис 10 Вид устройства сзади



Рис. 11 Вид устройства спереди

6. Программное обеспечение

6.1 Разработка программного обеспечения микроконтроллера

Программа для микроконтроллера написана на ассемблере. Для компиляции кода использовался компилятор MPASM. Логика работы микроконтроллера представлена в виде алгоритма на рис. 12.

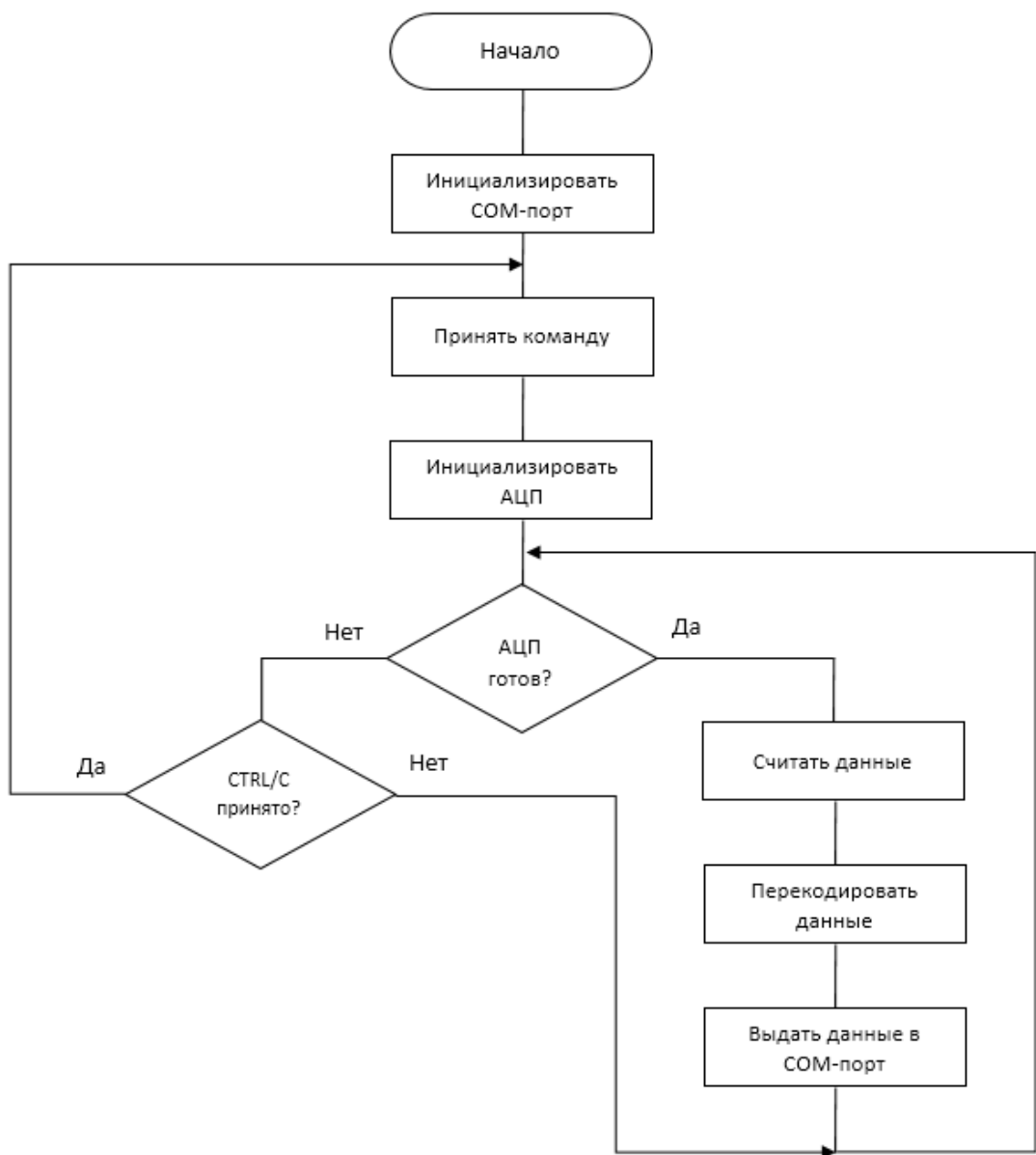


Рис. 12 Блок-схема алгоритма работы микроконтроллера

После включения и инициализации микроконтроллера начинается основная программа. Первым действием происходит конфигурирование порта передачи (задаётся скорость передачи и т.д.). После того как порт передачи инициализирован, микроконтроллер ожидает команду (список команд представлен на рис. 13) с компьютера. Как только по порту приходит одна из известных команд, микроконтроллер в соответствии с этой командой инициализирует АЦП. Затем микроконтроллер проверяет готовность АЦП и ввода команды «прервать выполнение команды». Как только АЦП готов, микроконтроллер принимает данные с него, выполняет перекодирование этих данных и отправляет их в порт передачи данных. Если АЦП не готов и в порт пришла команда «прерывать выполнение команды», то микроконтроллер возвращается к этапу ожидания команды.

```

          LUDENS HELP
?      HELP
A      CONTINUOUS AVERAGING
Bn     BURNOUT (0-1)
Gn     GAIN (0-7)
C      CONTINUOUS EVERY 256-TH MSMT
I      IDENTIFY
P      NORMAL (SERIAL) MEASUREMENTS (MUCH DATA!)
H      NORMAL (SERIAL) MEASUREMENTS (HEX)
S      SINGLE MSMT
Q      QUERY STATUS
Z      SINGLE CLOCKED MSMT

CTRL/C - EMERGENCY EXIT

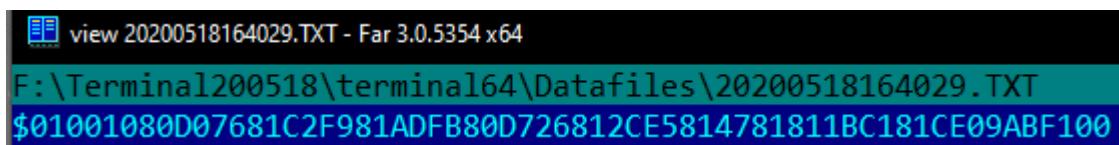
```

Рис. 13 Список команд

Основные команды: Bn (B1 и B0) – включение и отключение источников тока, Gn (G0 – G7) – выбор усиления, H – потоковая передача данных в шестнадцатеричном виде и CTRL/C – прерывание выполнения команд.

Данные передаются последовательно через UART на скорости 500 кбит/с. Каждый байт передаётся в режиме 8-N-1 (8 бит данных, 1 бит стоповый).

Информация передаётся блоками байт (кодировка символов ASCII). Пример переданных данных представлен на рис. 14.

The image shows a terminal window with a black background and green text. The title bar reads "view 20200518164029.TXT - Far 3.0.5354 x64". The main content shows a file path "F:\Terminal200518\terminal64\Datafiles\20200518164029.TXT" followed by a hexadecimal data block starting with "\$01001080D07681C2F981ADFB80D726812CE5814781811BC181CE09ABF100".

```
view 20200518164029.TXT - Far 3.0.5354 x64
F:\Terminal200518\terminal64\Datafiles\20200518164029.TXT
$01001080D07681C2F981ADFB80D726812CE5814781811BC181CE09ABF100
```

Рис. 14 Пример переданных данных

Блок данных начинается с символа «\$», который означает начало передачи данных в шестнадцатеричном виде, заканчивается блок символом «LF» (перевод строки). Также блок содержит информацию: порядковый номер измерения (2 байта), информацию о статусе работы источников тока и усилении (4 байта), данные измерений с 8 каналов (6 байт для каждого канала) и контрольные суммы (6 байт).

Информация о статусе работы источников тока и усилении нужна для преобразования отсчётов данных измерений в микровольты.

6. 2 Разработка программного обеспечения компьютера

Программа для записи информации с устройства написана на C++ (среда Qt). За основу взят пример программы «terminal» из библиотеки примеров Qt. Окно приложения представлено на рис. 15.

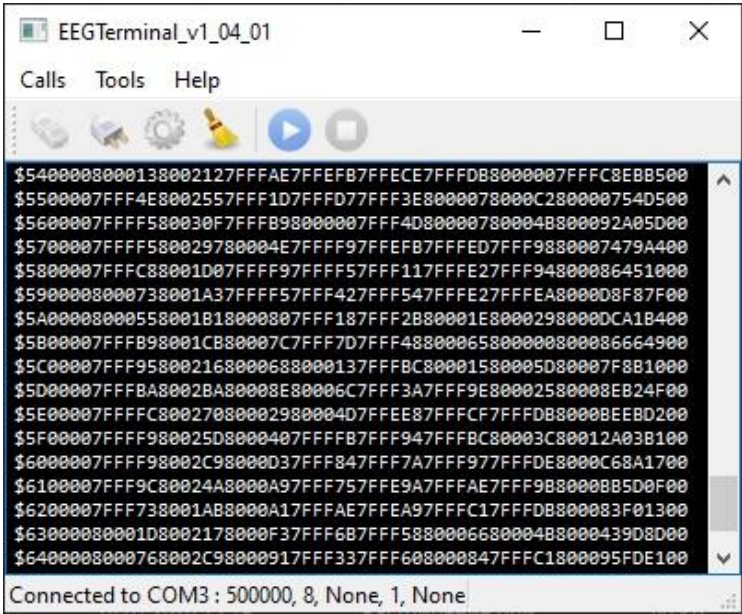


Рис. 15 Окно приложения

Здесь присутствует необходимый функционал: настройка соединения, подключение/отключение от устройства, начало и остановка записи. В настройках есть возможность выбрать порт подключения (при подключенном устройстве определяется автоматически), скорость подключения, указать усиление.

Программа пишет выдачу с устройства в файл лога с расширением «.txt» (рис. 13) имя файла включает в себя дату и время на момент начала записи.

После завершения записи программа обрабатывает лог-файл и записывает обработанные измерения в файл с требуемым форматом. Ниже представлен листинг файла:

```
CH_0 CH_1 CH_2 CH_3 CH_4 CH_5 CH_6 CH_7
240351.2 1911.7 2151.5 1996.7 2021.1 1874.2 1795.0 1962.3 #
1013.285 83.824 0.558 -10.461 -24.408 -13.111 -2.092 23.432
911.887 93.727 3.626 -25.105 -32.777 -20.921 -8.368 26.082
743.541 83.824 -4.184 -23.153 -32.219 -16.737 0.558 38.495
535.723 83.824 -1.534 -28.313 -17.713 -33.056 -2.650 45.329
481.188 91.635 2.092 -35.008 -21.898 -7.950 0.558 28.592
```

В строке отдельная информация записывается через пробел. В начале файла первая строка содержит в себе название каналов. Данные о сопротивлении записываются дважды (в начале и конце измерений), они помечены знаком «#». Основные измерения напряжения записываются в микровольтах в строку через пробел.

Преобразование отсчётов в вольты происходит по формуле:

$$V_{in} = V_{ref} \frac{(C-2^{N-1})}{2^{N-1} * 2g}, \quad (1)$$

где: $V_{ref} = 1,17$ В (опорное напряжение), C – числовой код с выхода АЦП, $N = 24$ (разрядность АЦП), g – коэффициент усиления (параметр GAIN).

7. Проверка работоспособности

7.1 Измерение постоянного напряжения

Прежде чем проводить испытания на человеке необходимо оценить то, насколько точно прибор измеряет абсолютные значения постоянного напряжения. Использование устройства подразумевает измерение сигналов с амплитудами порядка десятков микровольт (ритмы) и единиц милливольт (постоянный потенциал), для проверки нужен источник с такими напряжениями.

Получить такие малые значения напряжения возможно с помощью делителя напряжения на резисторах (рис. 16).

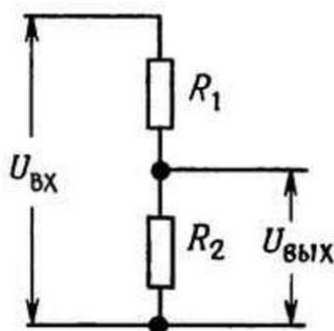


Рис. 16 Делитель напряжения

Схема проста, состоит всего из двух резисторов, соотношение напряжений здесь будет выглядеть так:

$$U_{вых} = U_{вх} \frac{R_2}{R_2 + R_1}. \quad (2)$$

С помощью такой схемы были получены напряжения (табл. 6).

Таблица 6

Расчёт напряжений

	U _{вх} , В	R1, кОм	R2, кОм	U _{вых} , мкВ
I	1,872	1490,0	0,1	126
II		151,5		1235
III		15,0		12389

Результаты измерений представлены в табл. 7.

Таблица 7

Результат измерений постоянного напряжения

Короткое замыкание								
	CH_0, мкВ	CH_1, мкВ	CH_2, мкВ	CH_3, мкВ	CH_4, мкВ	CH_5, мкВ	CH_6, мкВ	CH_7, мкВ
U _{ср}	5,9	52,8	7,4	-16,9	-33,1	-12,8	-12,6	14,0
СКО ошибки измерения	1,5	1,4	1,3	1,4	1,3	1,5	1,5	1,4
U= 126 мкВ								
U _{ср}	126,8	174,0	128,3	104,1	88,4	110,4	110,7	138,6
СКО ошибки измерения	2,0	1,7	1,6	1,5	1,8	2,0	2,4	2,3
ΔU	120,9	121,2	120,9	120,9	121,5	123,2	123,3	124,6
U= 1235 мкВ								
U _{ср}	1244,0	1291,4	1245,5	1220,1	1205,2	1227,4	1231,0	1258,1
СКО ошибки измерения	1,8	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0	2,3	2,3
ΔU	1238,0	1238,6	1238,1	1236,9	1238,3	1240,1	1243,6	1244,1
U= 12389 мкВ								
U _{ср}	12376,8	12428,1	12387,0	12347,9	12336,6	12358,2	12375,8	12399,8
СКО ошибки измерения	1,9	1,9	1,7	1,6	1,8	2,0	2,3	2,3
ΔU	12370,9	12375,3	12379,6	12364,7	12369,7	12370,9	12388,4	12385,8

В табл. 6 указаны: U_{ср} – среднее напряжение, СКО – среднеквадратическое отклонение ошибки измерения, ΔU – разница между средним для измеряемого напряжения и значением напряжения при

закороченных входах («положение ноля»). Измерения в каждом случае длились 1 секунду (всего 470 измерений).

СКО рассчитывалось по формуле:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3)$$

где: x_i – i -й элемент выборки, n – число измерений, \bar{x} – среднее арифметическое выборки.

Из представленных выше данных видно, что каналы имеют смещения нулевого значения напряжения на разные величины от минус 33 до 53 мкВ. При этом, если учитывать эти отклонения, измерения напряжений соответствуют расчётным данным с точностью до единиц микровольт, в процентном соотношении максимальное отклонение составляет 4% (при измерении $U_{вх} = 126$ мкВ). Для поставленных задач этого достаточно.

7.2 Электрокардиограмма

Помимо мозга в человеческом теле электрические импульсы генерируют и другие органы, в частности сердце. На начальном этапе для проверки работоспособности разработанного устройства была зарегистрирована электрокардиограмма (рис 17).

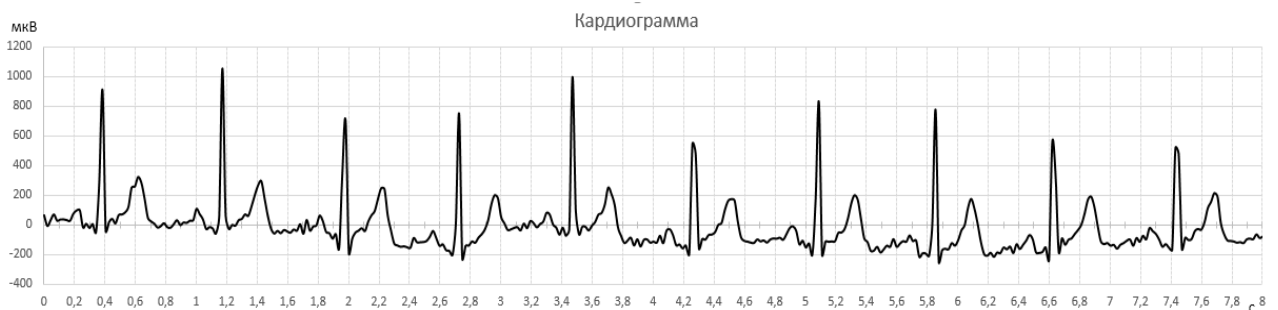


Рис. 17 Электрокардиограмма

Полученная электрокардиограмма соответствует теоретическим описаниям, устройство способно регистрировать электрические импульсы с тела человека.

Регистрировать кардиограмму значительно проще в отличие от ЭЭГ. У ЭЭГ выше требования к электродам и к их контакту с телом человека. Так же в виду особенностей задачи необходимо прибегать к достаточно сложной цифровой фильтрации.

7.3 Омегаэлектроэнцефалограмма

При проведении испытаний использовались точечные и чашечковые хлорсеребряные электроды. Первые испытания проводились в помещении без заземления. Для примера были взяты измерения напряжения в отведении Cz [7] при гипервентиляции лёгких (рис. 18).

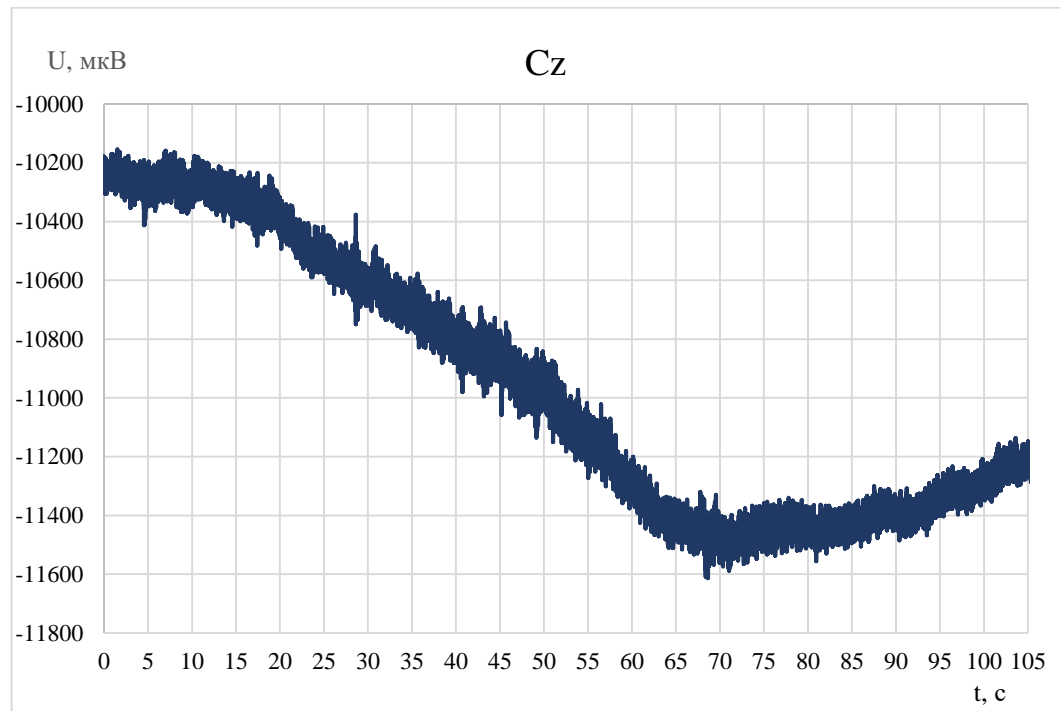


Рис. 18 ОмегаЭЭГ. Измерение напряжения в отведении Cz при гипервентиляции

Гипервентиляция на рис. 18 началась через 10 секунд, после старта измерений. С 20-й секунды наблюдается устойчивое снижение потенциала (на 1300 мкВ). После окончания гипервентиляции (длительность 60 секунд) потенциал начал медленно нарастать. Эта картина по постоянному потенциалу соответствует исследованиям [7, 17].

Однако, так же можно заметить, что на всём протяжении измерений наблюдается равномерный фон величиной примерно 100 – 150 мкВ, что для ритмов (альфа, бета и т.д.) не типично (рис. 19, 20, 21).

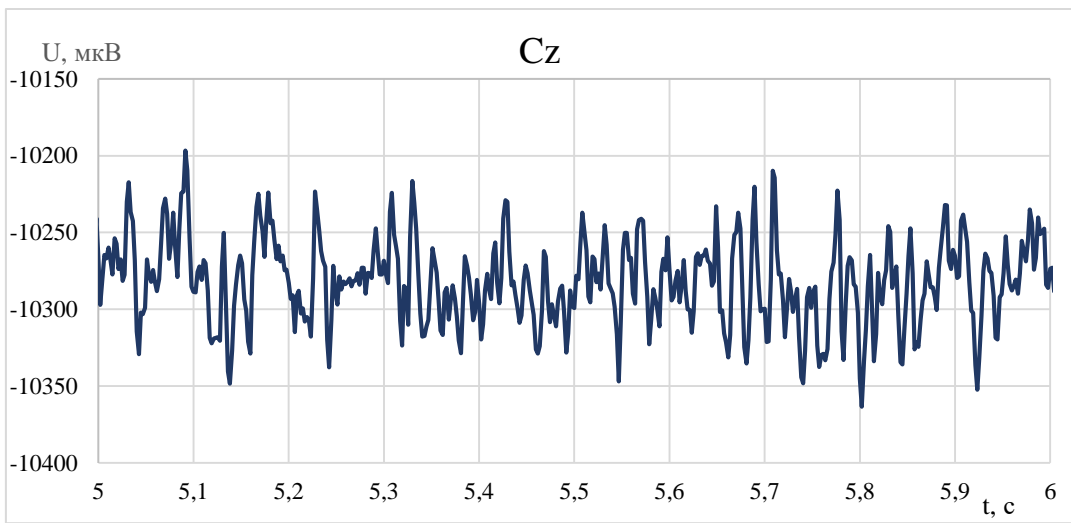


Рис. 19 Измерение напряжения в отведении Cz. Начало измерений

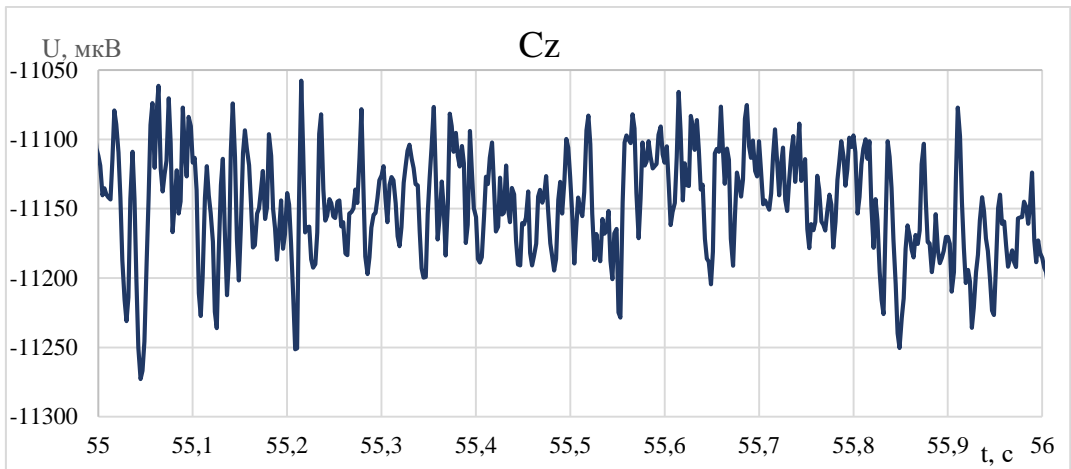


Рис. 20 Измерение напряжения в отведении Cz. Середина измерений

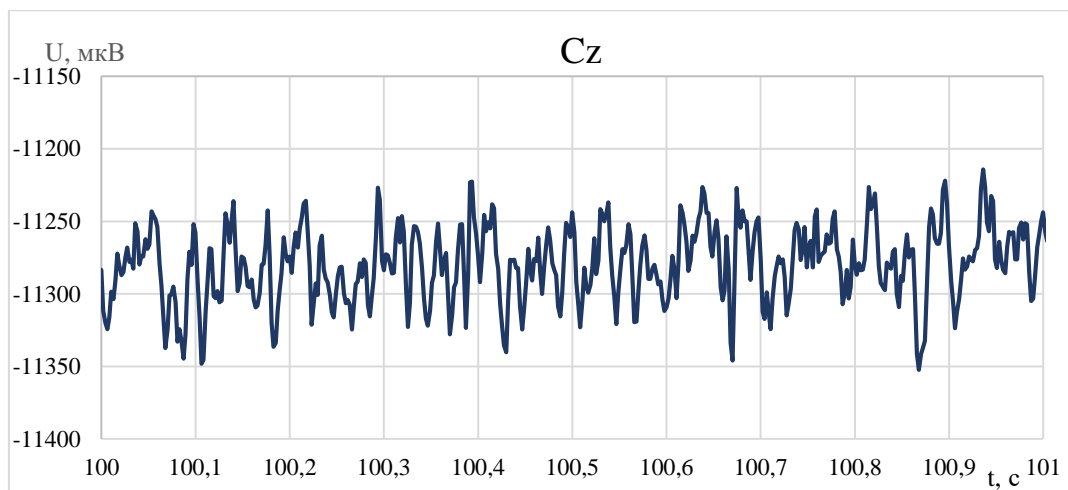


Рис. 21 Измерение напряжения в отведении Cz. Конец измерений

В измерениях явно присутствуют помехи амплитудой около 100 мкВ. Можно предположить, что это внешние наводки. Для поставленных задач это недопустимо, выделить переменные составляющие проблематично.

Необходимо устранить наводки. Для устранения наводок при проведении измерений можно использовать заземление и клетку Фарадея.

Клетка фарадея – это устройство для экранирования аппаратуры от внешних электромагнитных полей, изготавливается из проводящего материала.

Была проведена вторая серия измерений (рис. 22).

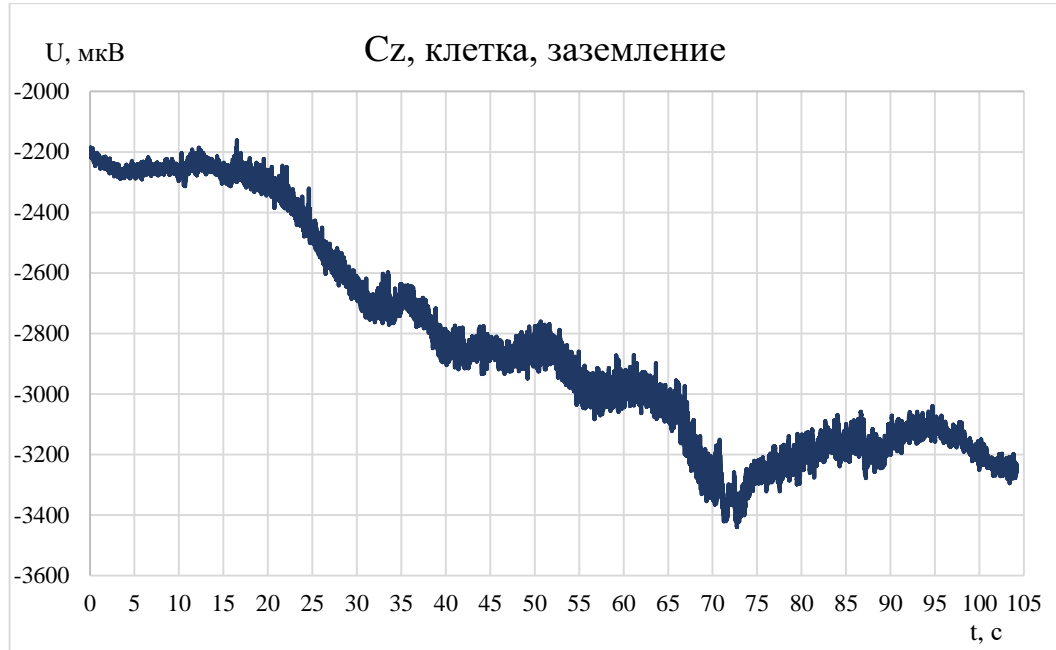


Рис. 22 ОмегаЭЭГ. Измерение напряжения в отведении Cz при гипервентиляции

Здесь так же прослеживается негативизация постоянного потенциала в процессе гипервентиляции. Поведение переменной составляющей прослеживается достаточно явно (рис. 23, 24, 25).

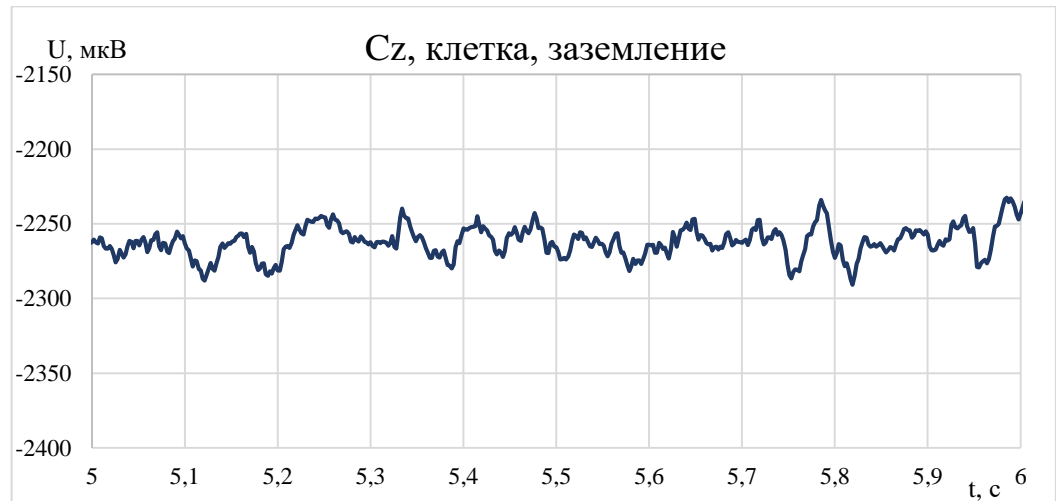


Рис. 23 Измерение напряжения в отведении Cz. Начало измерений

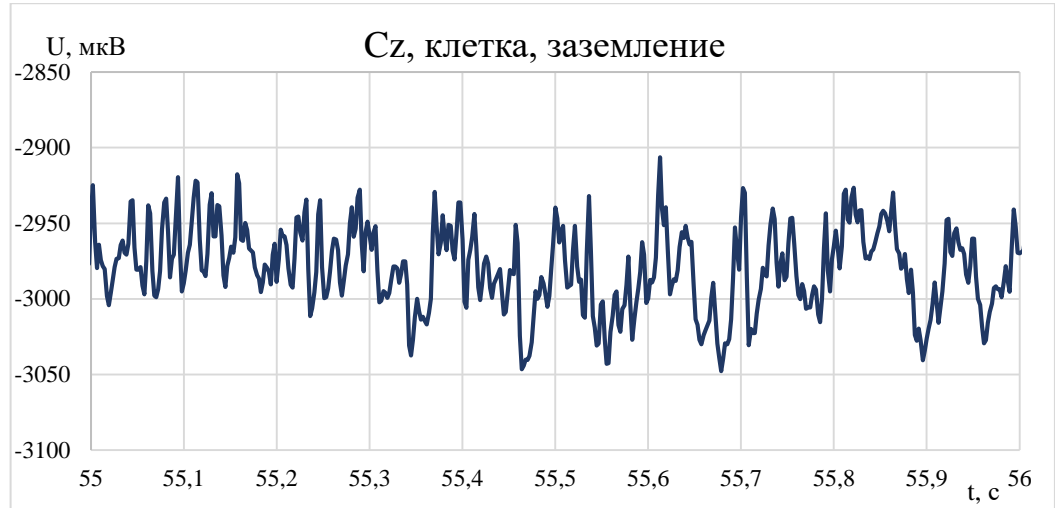


Рис. 24 Измерение напряжения в отведении Cz. Середина измерений



Рис. 25 Измерение напряжения в отведении Cz. Конец измерений

Уровень помех стал заметно ниже, ритмы прослеживаются на всём периоде измерений. Клетка Фарадея с заземлением помогает устранить наводки.

Из представленного выше, можно сделать вывод, что созданное устройство способно регистрировать омегаЭЭГ при соблюдении условий измерений.

Заключение

Электрическая активность мозга – сложный процесс, требующий изучения. Классическая ЭЭГ не может в полной мере отразить и охарактеризовать этот процесс. Необходим комплексный подход.

Для реализации и развития новых подходов изучения электрической активности мозга важно разрабатывать новые аппаратные средства.

В данной работе отражены этапы разработки такого аппаратного средства: составлено техническое задание, разработаны функциональная и электрическая схемы прибора, рассмотрен и обоснован подбор элементной базы.

Поставленные задачи достигнуты, созданное устройство способно регистрировать омегаЭЭГ. Проведены испытания, зарегистрированные данные, согласуются с исследованиями. прослеживается закономерность изменения уровня постоянного потенциала. При измерениях в неподготовленном помещении уровень помех достаточно высок (около 100 мкВ). Это осложняет выделение и анализ ритмов. Использование заземления и клетки Фарадея помогает устранить помехи от внешних наводок.

Список использованных источников

1. Гусельников В.И. Электрофизиология головного мозга. - М: Высшая школа, 1976. – 422 с.
2. Ганцгорн Е.В. Морфологический анализ нейропротекторной активности ноотропов и их комбинаций с мелаксеном при экспериментальной ишемии головного мозга: научное издание / Е. В. Ганцгорн, Ю. С. Макляков, Д. П. Хлопонин // Биомедицина. - 2014. - N 3. - С. 152-153.
3. Экспериментальные данные об электрофизиологических коррелятах ишемии мозга разной тяжести / С.Э. Мурик [и др.] // Бюллетень Восточно-Сибирского Научного центра СО РАМН, 2003, №1, с.148-154.
4. Мурик С.Э. Омегаэлектроэнцефалография – новый метод оценки функционального и метаболического состояния нервной ткани // Бюллетень Восточно-Сибирского Научного центра СО РАМН, 2004, №1, т.3, с.189-154.
5. Murik S.E. Simultaneous recording of the EEG and direct current (DC) potential makes it possible to assess the functional and metabolic state of the nervous tissue / Murik S.E., Shapkin A.G. // Intern J. Neuroscience. – 2004. – 114. – p.921-934.
6. Murik S.E. The use of DCEEG to estimate functional and metabolic state of nervous tissue of the brain at hyper- and hypoventilation //World Journal of Neuroscience. – 2012, 2. – p. 172-182.
7. Мурик С.Э. Омегаэлектроэнцефалография: становление нового метода, диагностические возможности // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. – 2018. – Т. 26. – С. 69–85
8. OpenEEG [Электронный ресурс] // OpenEEG. EEG for the rest of us! : сайт – URL: <http://openeeg.sourceforge.net/doc/modeeg/modeeg.html> (дата обращения: 20. 05. 2019).
9. Аладжалова Н.А. Медленные электрические процессы в головном мозге. – М.: Изд-во АН СССР. – 1962. 240 с.

10. Илюхина В.А. Нейрофизиология функциональных состояний человека. – Л.: Наука. – 1986. – 171 с.
11. Елизаров А.С. Электрорадиоизмерения. – Минск: Выш. шк. – 1986. – 320 с.
12. 3-Channel, Low Noise, Low Power, 16-/24-Bit Σ - Δ ADC with On-Chip In-Amp and Reference [Электронный ресурс] // Mixed-signal and digital signal processing ICs. Analog devices: сайт – URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7792_7793.pdf. (дата обращения: 18. 04. 2019).
13. PIC18FXX2 Datasheet [Электронный ресурс] //Microchip Technology: сайт – URL: <https://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39564c.pdf>. (дата обращения: 18. 04. 2019).
14. CP2102 Datasheet [Электронный ресурс] // Silicon Labs: сайт – URL: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/CP2102-9.pdf> (дата обращения: 18. 04. 2019).
15. Dual-Channel Digital Isolators [Электронный ресурс] // Mixed-signal and digital signal processing ICs. Analog devices: сайт – URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM1200_1201.pdf (дата обращения: 18. 04. 2019).
16. Разработка ЭЭГ-регистратора на основе новых подходов к анализу электрической активности мозга / Якимов Н.П. [и др.] // Вестник Иркутского университета / ФГБОУ «ИГУ». – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2019. – Вып. 22. – с 215.
17. Мурик С.Э. О возможности омегаэлектроэнцефалографии в оценке функционального и метаболического состояния нервной ткани головного мозга при гипервентиляции// Бюллетень сибирской медицины. – 2019. –Вып. 18 (2). – С. 127-145.

Приложение 1

Принципиальная схема

Принципиальная схема устройства представлена на трёх листах (рис. 1, рис. 2, рис. 3). Переходы на другие листы обозначены указателями с подписями: обозначение компонента, обозначение вывода компонента, номер листа в скобках.

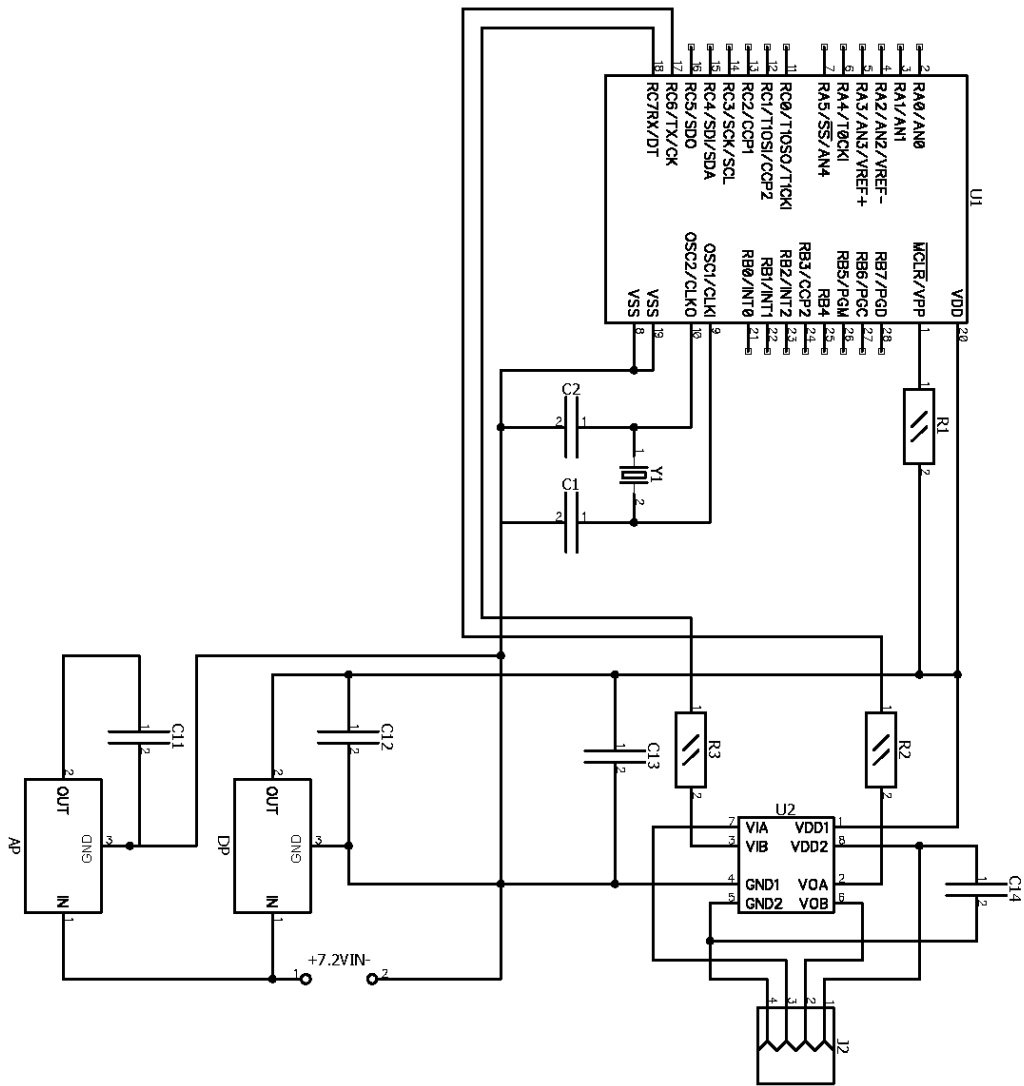


Рис. 1 Электрическая схема. Лист 1

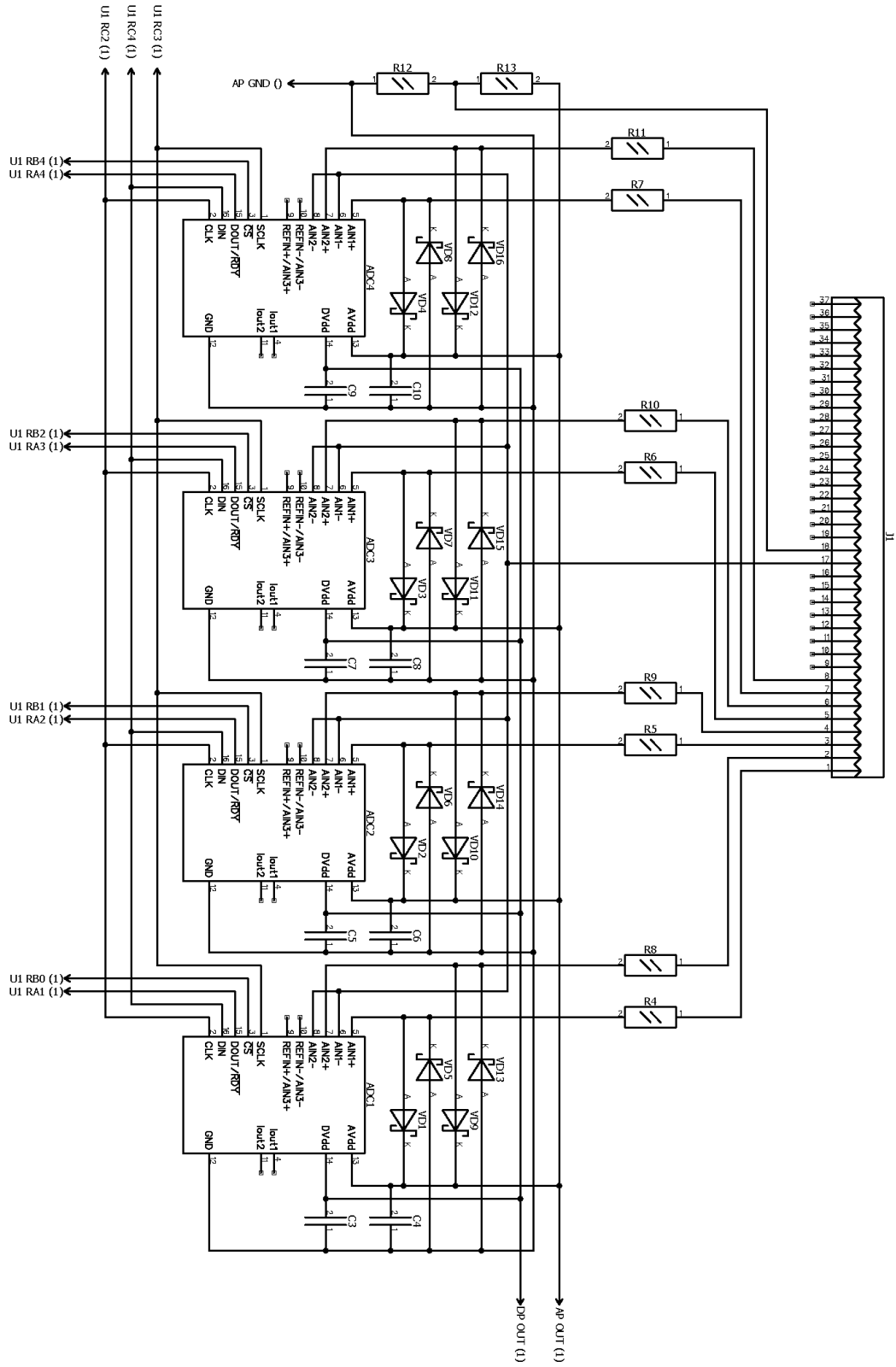


Рис. 2 Электрическая схема. Лист 2

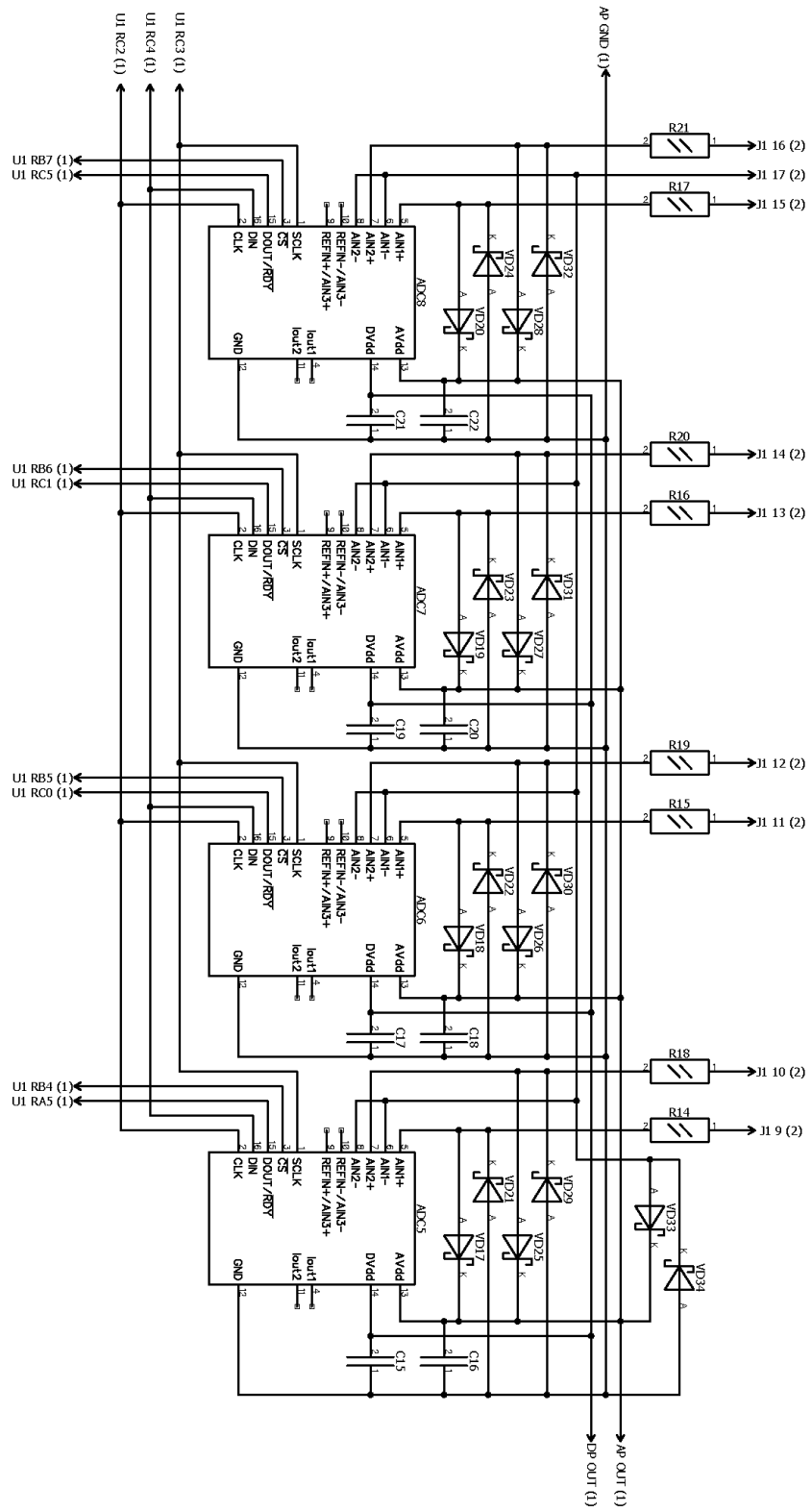


Рис. 3 Электрическая схема. Лист 3

Приложение 2

Перечень компонентов

В табл. 1 указан перечень компонентов и информация о них.

Таблица 1

Перечень компонентов

№	Метка	Наименование/номинал/мощность	Корпус/тип
1	ADC1-ADC8	Аналого-цифровой преобразователь, AD7793	TSSOP-16
2	AP	Стабилизатор напряжения +5В, L7805CV	TO-220
3	C1-C2	Конденсатор, 33 пФ	КД-2
4	C3-C10	Конденсатор, 0,1 мкФ	EIA 0805
5	C11-C12	Конденсатор, 22 мкФ	EIA 1812
6	C13-C14	Конденсатор, 0,1 мкФ	K10-17Б
7	C15-C22	Конденсатор, 0,1 мкФ	EIA 0805
8	DP	Стабилизатор напряжения +5В, L7805CV	TO-220
9	J1	Коннектор 37pin, DB37M	DB37M
10	J2	Коннектор 4pin, 51022-040	51022-040
11	R1-R11	Резистор, 1 кОм, 0.25 Вт	c2-23
12	R12-R13	Резистор, 100 кОм 0.25 Вт	c2-23
13	R14-R21	Резистор, 1 кОм, 0.25 Вт	c2-23
14	U1	Микроконтроллер, PIC18F252	DIP-28
15	U2	Изолятор цифровых сигналов, ADUM1201	SOIC-8
16	VD1 - VD34	Диод Шоттки, BAT85	DO-35
17	Y1	Кварцевый резонатор, 8 МГц	HC-49U