

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НПИ) им. М.И. ПЛАТОВА**

ФАКУЛЬТЕТ «ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ и УПРАВЛЕНИЯ»

КАФЕДРА «ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И
ТЕХНОЛОГИИ»

НАПРАВЛЕНИЕ 12.03.01 «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

По дисциплине: «Цифровые измерительные устройства»

На тему: «Интеллектуальная система контроля и мониторинга
аккумулятора (BMS)»

Проектировал студент 4 курса, группы 120301ИИТа-018 Давиденко С.А.
Ф.И.О.

Руководитель проекта доц. каф. ИИСТ к.т.н. доц. Наракидзе Н.Д.
Должность, звание Ф.И.О.

К защите

Защита принята с оценкой

« » _____ 2021 г.

« » _____ 2021 г.

Подпись

Подпись

Новочеркасск 2021 г.

АННОТАЦИЯ

В курсовом проекте выполнена разработка интеллектуальной системы контроля и мониторинга аккумулятора (BMS).

В первой главе приведен обзор и анализ устройств аналогичного назначения, то есть описание назначения, принцип действия, сфера его применения, физические принципы работы устройства. Выполнен анализ патентных исследований и разработана структурная схема устройства на основе патентных источников и научно-технической литературы.

Во второй главе разработана и описана функциональная схема разрабатываемого устройства на основе структурной схемы. Рассчитана принципиальная схема устройства, которая поделена на рассмотрение каждого из узлов устройств по отдельности, а именно, произведены основные расчеты узлов регистрации параметров с датчиков: напряжения каждого элемента, напряжения АКБ, токов р-сборок, входного и выходного токов устройства, температуры. Подобрана оптимальная топология основного блока коммутации, активного фильтра дифференциального сигнала измерения напряжения на элементе, необходимых АЦП для преобразования нормированного отфильтрованного аналогового сигнала в цифровой код. Произведен расчет микроконтроллера и подобрана оптимальная конфигурация его работы и подключения к устройствам периферии. Рассчитаны метрологические погрешности для основных блоков измерения и АЦП.

В третьей главе приведено описание системы моделирования работы электрических схем, описаны ее преимущества и основные команды для получения необходимого результата. Проведены симуляции работы наиболее важных узлов схемы. Сделан вывод о полученных результатах исходя из сопоставления теоретических расчетов и экспериментальных данных. Приведен алгоритм измерения, мониторинга и контроля элемента АКБ устройством.

[illegible]

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОБЗОР И АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ АНАЛОГИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	8
1.1 Описание назначения устройства, принципа действия и сферы его применения	8
1.2 Патентные исследования и научно-техническая документация.....	10
1.2.1 Регламент поиска	10
1.2.2 Патентная документация.....	11
1.2.3 Научно-техническая документация	27
1.2.4 Статистический анализ патентов	28
1.2.5 Выводы по патентному поиску и научно-техническим публикациям	29
1.3 Физические принципы работы устройства	30
1.3.1 Виды балансировок.....	31
1.4 Обзор существующих решений.....	36
1.5 Разработка структурной схемы устройства	40
2. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ И ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА	43
2.1 Разработка функциональной схемы устройства.....	43
2.2 Описание принципов работы устройства в различных режимах его функционирования.....	45
2.3 Разработка принципиальной схемы устройства	47
2.3.1 Описание принципа построения и соединения АКБ.....	47
2.3.2 Расчёт блока измерения температуры	51
2.3.3 Выбор АЦП для датчиков температуры.....	57
2.3.4 Расчет общего блока коммутации	58
2.3.5 Расчёт блока измерения напряжения на элементах АКБ.....	66
2.3.6 АЦП измерения напряжения	68
2.3.7 Расчет узла переключения р-сборок АКБ	70
2.3.8 Расчёт блока измерения тока на р-сборках АКБ	73
2.3.9 Расчёт АЦП для блока измерения тока на р-сборках АКБ.....	74
2.3.10 Расчет блока переключения балансировки	75
2.3.11 Расчет пассивной балансировки.....	77
2.3.12 Расчет активной балансировки.....	79

2.3.13	Блок коммутатора нагрузки	81
2.3.14	Расчет блока контроля входных и выходных параметров.....	83
2.3.15	Расчет системы индикации устройства	85
2.3.16	Расчет системы интерфейса устройства.....	86
2.3.17	Подбор микроконтроллера и расчет необходимых к нему систем обвязки. 87	
2.3.18	Подбор и расчет расширителей портов	89
2.3.19	Системы питания +5В, +-5В, 3,3В	94
2.4	Расчет метрологических погрешностей устройства	96
2.4.1	Измерение напряжения на элементах АКБ.....	100
2.4.2	АЦП напряжения банки	101
2.4.3	Измерение тока.....	102
2.4.4	АЦП измерения тока на р-сборках АКБ.....	103
2.4.5	Выходные параметры	103
3.	ОПИСАНИЕ МАШИННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ УСТРОЙСТВА.....	105
3.1	Описание программ	105
3.2	Этапы проведения модельного эксперимента	106
3.2.1	Моделирование работы узла переключения Р-сборок.....	106
3.2.2	Моделирование работы блока измерения напряжения.....	112
3.2.3	Моделирование работы блока измерения тока на р-сборках.....	115
3.3	Алгоритм измерения, мониторинга и контроля системы BMS	117
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	121
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. 12.03.01.K21.063.01.00.Э1	126
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. 12.03.01.K21.063.01.00.Э2	127
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. 12.03.01.K21.063.01.00.Э3.....	128
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г. 12.03.01.K21.063.01.00.ПЭ	129

ВВЕДЕНИЕ

В наш современный век всеобщей популяризации электроники и соответственно тех устройств, в которых и к которым она применяется для обеспечения различного функционала, будь то поддержание заданного режима электрического тока, коммутация, оцифровка сигнала с датчиков или даже системный сбор данных и дальнейший анализ, необходимо представлять общие принципы работы таких устройств. Эти знания в дальнейшем позволят пользователям видеть те технические ограничения, которые стоят перед разработчиками электронных модулей устройств, а также иметь целостное представление о функционирующих модулях устройства, их безопасности и условиях эксплуатации, что позволит не только снизить факторы риска, но и вообще отказаться о мысли их существования.

Те цепи, основной функционал которых заключается в распределении большого количества энергии, соответственно, являются наиболее опасными. Этот факт подтверждается наличием повышенных требований к безопасности таких модулей. Цепи, которые перераспределяют энергию на потребителей или наоборот на накопители также являются мощными источниками энергии, при разработке которых необходимо выдвигать определенные требования. Однако, понятие накопителя энергии предполагает процесс аккумуляирования энергии, что воздвигает эти устройства на порядок выше по опасности их содержания и взаимодействия с ними относительно всего вышеперечисленного.

А тот факт, что технический прогресс не стоит на месте и сегодняшние решения в области накопления энергии имеют огромные показатели плотности энергии на единицу массы аккумуляторной батареи (АКБ), требует особого подхода к контролю тех процессов, которые происходят внутри накопителя [1].

Для этой цели были разработаны специальные контроллеры BMS (Battery Management System), основная задача которых в широком плане это обеспечение корректной работы аккумуляторов в устройстве в качестве их каскадных сборок, а

в узком-мониторинг, контроль и поддержание предпочтительных режимов заряда и разряда накопителей энергии, решение задачи балансировки многосоставных каскадов аккумуляторов, обеспечение защит по электрическим показателем, а также прогнозирование времени работы на оставшемся заряде и количества оставшихся циклов заряда разряда до выхода батареи из строя.

1. ОБЗОР И АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ АНАЛОГИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В представленной главе описано назначение устройства, его принципов действия, рассмотрены сферы его применения и физические принципы работы, приведено описание основных параметров проектируемого изделия с последующим разбором аналогов разрабатываемого устройства. В ходе рассмотрения устройств аналогичного назначения будет проведен патентный поиск актуальных исследований, связанных с областью разработки устройства, приведена актуальная научно-техническая литература с похожей или полностью совпадающей тематикой, а также разобраны существующие решения на рынке BMS. По итогу рассмотренной информации была разработана структурная схема устройства.

1.1 Описание назначения устройства, принципа действия и сферы его применения

Система управления батареей (BMS) - устройство, предназначенное для контроля и мониторинга работы аккумулятора, посредством сбора данных следующих величин: поступающего на батарею тока, напряжения на аккумуляторе, его температуры и тока разряда. Имея такой массив данных, производится оценка оптимального режима работы батареи, определяется степень ее изношенности и предсказывается как приблизительно время работы какого-либо устройства от АКБ, так и оставшийся срок службы самой батареи [2].

Различают следующие задачи, которые выполняет BMS:

1. Контроль и обеспечение процесса заряда и разряда с параллельным мониторингом количества их циклов;
2. Контроль условий работы АКБ при их функционировании;
3. Защита каждой из ячеек АКБ от состояния перенапряжения и глубокого разряда;
4. Балансировка аккумуляторных элементов между собой для

достижения одинаковых значений напряжения в ходе эксплуатации на каждом из элементов АКБ;

5. Защита от малого сопротивления нагрузки;
6. Определение оставшегося срока службы батареи;
7. Предсказание оставшегося времени работы устройства при статической и динамически меняющейся нагрузке [3].

Область применения таких контроллеров довольно широка: в первую очередь, данная система BMS используется в составе исключительно с большими аккумуляторными сборками, имеющих как последовательное, так и параллельное соединение элементов между собой и соответственно, к тем устройствам, которым необходимы такие мобильные системы аккумулирования и поддержания энергии. В основном, такие автономные системы аккумуляторных батарей (АСАКБ) используют в мобильных транспортных средствах: электровелосипедах, мобильных роботах, электросамокатах, гироскутерах. Кроме того, использование таких блоков возможно и в электроинструментах с высоким потреблением энергии: шлифмашины, пилы, перфораторы, гайковерты и др.

В более широком плане, АСАКБ на литий-ионной (ЛИ) основе начали занимать рынок промышленного аккумулирования энергии. Так, дата-центры отдают предпочтения именно решению на литий-ионе по причине ряда численно превосходящих характеристик по сравнению с свинцово-кислотными аккумуляторами.

Такая известная компания на рынке производства ИБП как *APC* имеет целых 3 модельных ряда как с полностью литий-ионными АКБ в качестве органа аккумулирования, так и с гибридными системами с возможностью замены ЛИ АКБ на свинцово-кислотные решения [4].

Компаниям оказалось намного выгоднее финансировать в новые, хоть и дорогие технологии, ради обеспечения надежности, длительного периода эксплуатации, широкого диапазона температур и еще ряда превосходящих другие

решения характеристик.

1.1.1 Физические принципы работы BMS

Основной принцип работы устройства заключен в управлении и контроле энергией, которая хранится в аккумуляторной батарее и поступает на нагрузку. В случае обнаружения неисправности, исходя из значений, полученных с ряда датчиков, BMS должна за малый промежуток времени разомкнуть контакт между нагрузкой и аккумуляторной батареей для предотвращения возгорания или выхода из строя одного или нескольких электрических или АКБ элементов.

Принято подразделять BMS на следующие составные части:

- Устройство управления, в роли которого может выступать микросхема в случае универсального решения, выпускаемого под определенные нужды в промышленном эквиваленте, и микроконтроллер, в случае экспериментальной или усложненной разработки схемотехники платы контроля АКБ
- Устройства измерения параметров. В качестве измеряемых параметров обычно выступают напряжение, ток и температура.
- Силовые переключатели, которые выполняют процесс коммутирования АКБ с нагрузкой.

1.2 Патентные исследования и научно-техническая документация

В представленных подразделах выполнены патентные исследования по теме «Система управления батареями (BMS)» [5].

1.2.1 Регламент поиска

Регламент поиска по предмету исследования «Система управления батареями (BMS)» отражен в таблице 1:

Таблица 1 - Регламент поиска

Предмет поиска	МПК	Страны поиска	Источники информации	Наименование информационной базы
1	2	3	4	5
Системы контроля аккумуляторной батареи	Поиск производился по ключевым словам: BMS, Battery management system, система контроля АКБ	Россия, Япония, США, Израиль, Южная Корея	Базы патентов РФ, Патентные ведомства и международные организации	Базы данных: www.patents.google.com ; http://translation.portal.epo.org ; https://yandex.ru/patents ;

1.2.2 Патентная документация

Патентная документация, найденная в ходе произведения патентного поиска и анализа, приведена в таблице 2:

Таблица 2 - Патентная документация (с указанием географии патентования при наличии патентов – аналогов)

Страна патентования, номер патента, дата приоритета	Страна-заявитель, фирма-заявитель (или ФИО заявителя)	Название изобретения	Техническая сущность МПК изобретения	Возможность использования изобретения
1	2	3	4	5
Патент России, RU 2156533C1, 20.09.2000	Россия, Никифоров В.Е., Якушин В.К.	Устройство нивелирования разбаланса напряжений на соединенных между собой ячейках аккумуляторной батареи или батареях (варианты)	Техническим результатом является повышение энергетической эффективности и надежности устройства за счет расширения рабочего диапазона по напряжению, повышения скорости выравнивания напряжений между отдельными элементами батареи.	В изобретении довольно емко описаны принципы схмотехнического решения балансировки последовательно соединенных элементов батареи

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p>Патент России, RU 2134477C1, 26.12.1996</p>	<p>Баранов А.М., Калиновский А.Н.</p>	<p>Автоматизированная система заряда аккумуляторных батарей</p>	<p>Техническим результатом является расширение функциональных возможностей зарядного устройства: обеспечивает автоматический контроль за состоянием аккумуляторных батарей в процессах заряда и формирования и автоматическое управление этими процессами на основе данных о состоянии аккумуляторных батарей, организацию автоматического параллельного табельного учета персонала, что, в свою очередь, обеспечивает полный заряд аккумуляторных батарей и исключает их перезаряд, обеспечивает выявление неисправных батарей, что существенно увеличивает срок службы батарей и повышает уровень охраны труда.</p>	<p>В изобретении изложен систематический подход к решению проблемы разбалансировки аккумуляторных батарей, обеспечивая контроль за их состоянием и выявление неисправных элементов</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p>Патент России, RU 2627240C1, 25.07.2014</p>	<p>ТАКАДА Масаюки (JP), МАЧИДА Акихиро (JP), ШИНОТСУКА Норихиро (JP), МОРИКАВА Хироши (JP), МАЕШИМА Тошиказу (JP), КИЙОТА Шигеюки (JP), ТАНАКА Йошиюки (JP), ИГУЧИ Тойоки (JP), САИТОУ Хироаки (JP), ХАШИМОТО Хироаки (JP)</p>	<p>Система управления аккумуляторной батареей и система управления транспортным средством</p>	<p>Технический результат – обеспечение достоверности решения о приведении в действие взрывозащитного механизма в батарейной установке</p>	<p>В изобретении представлена система контроля аккумуляторной батарей в автомобильном транспорте. Сделан большой акцент на сохранении безопасности системы</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p>Патент России, RU 130455U1, 12.09.2013</p>	<p>Жданов Василий Валерьевич (RU), Рыкованов Алексей Сергеевич (RU)</p>	<p>Устройство контроля и управления литий - ионной аккумуляторной батареи</p>	<p>Полезная модель относится к области электротехники, в частности к устройствам для измерения параметров литий-ионных аккумуляторных батарей (АБ) и выравнивания заряда литий-ионных аккумуляторов в аккумуляторной батарее, предназначенной, в частности, для электромобилей и гибридных автомобилей.</p>	<p>Задачей настоящей полезной модели являлась разработка такого устройства контроля и управления литий-ионной аккумуляторной батареи, которое бы позволяло ограничить мощность рассеивания при балансировании внутри батареи за счет регулирования тока заряда каждого аккумуляторного модуля.</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p>Патент России, RU 57970U1, 29.05.2006</p>	<p>Быстров Юрий Александрович (RU), Кудрявцев Николай Анатольевич (RU), Краснобрыжий Андрей Васильевич (RU), Янченков Олег Павлович (RU), Рыкованов Алексей Сергеевич (RU)</p>	<p>Устройство для обслуживания и поддержания в рабочем состоянии литий-ионных аккумуляторов</p>	<p>Полезная модель относится к электротехнике, более конкретно к устройствам для контроля изменения тока аккумуляторов и батарей на их основе, температуры внутри корпуса и напряжения на отдельных аккумуляторах аккумуляторной батареи.</p>	<p>Новизна полезной модели заключается в схемотехнике конструктивного решении средства контроля электрических параметров.</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p>Патент России, RU 2747530C1, 14.10.2020</p>	<p>Петржик Генрих Генрихович (RU) Юдин Павел Геннадьевич (RU) Фирсов Иван Иванович (RU)</p>	<p>Способ управления системой балансировки литий-ионной аккумуляторной батареи</p>	<p>Данное изобретение относится к зарядке или подзарядке аккумуляторных батарей, а более конкретно к способам управления системой балансировки литий-ионной аккумуляторной батареи, состоящей из последовательно соединенных ячеек, при котором контролируют уровень зарядки различных ячеек и осуществляют, в зависимости от предварительной оценки указанных уровней зарядки, балансировку указанных ячеек путем дифференцированной подачи на них тока в зависимости от их текущих уровней зарядки.</p>	<p>обеспечить повышение эффективности балансировки аккумуляторной батареи малыми токами, что и является решаемой задачей предлагаемого изобретения.</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p>Патент России, RU 142215U1, 02.09.2013</p>	<p>Сотников Владимир Игорович (RU), Алашкин Виталий Михайлович (RU)</p>	<p>Устройство управления зарядом и разрядом литий-ионной аккумуляторной батареи</p>	<p>Полезная модель относится к области электротехники, в частности к устройствам управления зарядом и разрядом (УУЗР) аккумуляторных батарей, в частности на основе литий-ионных аккумуляторов (ЛИА)</p>	<p>Техническим результатом полезной модели является обеспечения надежности и безопасности эксплуатации за счет минимизации тепловыделения при обеспечении плотной компоновки.</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Патент США, EP2858210A2, 08.04.2015	LEE HYUN-CHUL, HEO JIN-SEOK	DEVICE FOR ACTIVATING MULTI- BMS	Описание соподчиненной системы из главной и локальной BMS контроллеров	Данное изобретение раскрывает сущность устройства, которое одновременно следит за каждым из контроллером BMS, представленных в системе контроля, а также подавать определенные сигналы на смену режимов работы каждой из них

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Патент Южной Кореи, EP3840102A1, 17.12.2019	HWANG JI-WON [KR], SUNG CHANG-HYUN [KR]	BMS RECOGNITION SYSTEM AND METHOD	Данный патент рассматривает систему из ведущей и соподчиненный BMS, взаимосвязь которых образует систему распознавания характеристик элементов аккумуляторной батареи	Новизна патента вызвана использованием светоизлучающих блоков на BMS в качестве передающих каналов

Продолжение 2

1	2	3	4	5
<p>Патент Южной Кореи, WO2018084437A1 , 11.05.2018</p>	<p>JEON JIN HONG, KIM JIN WOOK, CHO CHANG HEE</p>	<p>BMS EVALUATION SYSTEM AND APPARATUS FOR LARGE-CAPACITY BATTERY SYSTEM</p>	<p>Настоящее изобретение рассматривает систему оценки BMS устройств для аккумуляторной системы большой емкости</p>	<p>BMS для иерархически сконфигурированной аккумуляторной системы большой емкости может быть эффективно оценена без аппаратных ограничений, а производительность BMS может быть точно оценена путем отражения положения или характеристики каждой батареи</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p>Патент Китая, US 20190148951 A1, 14.01.2019</p>	<p>Wang; Wentao (Shenzhen, CN), Zheng; Dayang (Shenzhen, CN), Wang; Lei (Shenzhen, CN)</p>	<p>Systems and methods for battery management</p>	<p>Данный патент содержит в себе описание метода управления аккумуляторной батареей и ее зарядным устройством, учитывая параллельное и последовательное соединение ее элементов</p>	<p>Новизна данной разработки заключается в оптимальном методе и анализе как последовательно соединенных ячеек, так и параллельно, а также предопределенность данной системы к мобильным платформам</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Патент Израиля, WO2021IL50315, 30.09.2021	PRICE PAUL [IL], BEN YAAKOV SHMUEL	BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS) AND APPLICATION	Данный патент представляет собой схемотехническое решение проверки напряжения каждого из элементов последовательно соединенной сборки аккумуляторов в батарее и последующим контролем открытием выходного канала на нагрузку	Новизна решения заключается в использовании исключительно аналогового подхода к решению задачи

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p>Австралия AU20210104927 23.09.2021</p>	<p>YAN GUOGANG [CN]; XIONG JINFENG [CN]; ZHANG JIANLI [CN]; CHEN TAO [CN]</p>	<p>A battery management system assembly</p>	<p>Данный патент описывает систему обеспечения благоприятных климатических условий на аккумуляторную батарею вне зависимости от внешних факторов</p>	<p>Новизна работы заключается в показателях, которых удалось достичь авторам</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p>США WO/2019/00620 4 03.01.2019</p>	<p>MARTIN, Nathaniel MITROS, Ania MELLONE, Charles DIMEN, Ian</p>	<p>MULTI-CHANNEL AND BI- DIRECTIONAL BATTERY MANAGEMENT SYSTEM</p>	<p>Данный патент описывает систему управления аккумуляторами, состоящую из главных и добавочных элементов.</p>	<p>Новизна работы заключается в системе передачи по каналу связи между master и slave. За счет избыточности канала связи и физического разделения линий связи достигаются высокие показатели надежности</p>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
<p>Россия RU2 699 051C1 24.09.2018</p>	<p>Козлов Роман Викторович (RU) Тетерин Антон Сергеевич (RU) Журавлев Александр Викторович (RU) Анкудинов Александр Владимирович (RU)</p>	<p>Способ эксплуатации литий-ионной аккумуляторной батареи в автономной системе электропитания</p>	<p>Известны литий-ионные аккумуляторные батареи и способ их эксплуатации, закрывающийся в проведении заряд-разрядных циклов и контроле напряжения аккумуляторов и описанные в книге А.А. Таганова, Ю.И. Бубнова, С.Б. Орлова «Герметичные химические источники тока. Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации», Санкт- Петербург, Химиздат, 2005 г., глава 5, 7.</p>	<p>Известный способ предполагает периодический контроль напряжения аккумуляторов, анализ разности поэлементных напряжений наиболее заряженного и наименее заряженного аккумуляторов и проведение балансировки, но не определяет периодичность и способ контроля, а так же средства для запуска процесса балансировки.</p>

1.2.3 Научно-техническая документация

Информация о найденной научно-технической документации представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Научно-техническая документация

Наименование источника информации	Автор (организация) с указанием страны	Год, место, орган издания
1	2	3
Battery Management System (BMS) for Lithium-Ion Batteries	Португалия, магистерская диссертация, José Miguel Branco Marques	2014г., г. Coimbra, URL: https://clck.ru/YrvKf
Battery Management System for large Lithium-Ion Battery Pack	Великобритания, Davide Andrea	2010г., г. Лондон, ISBN-13 978-1-60807-104-3
Battery Management Systems Volume I Battery Modeling	Великобритания, Gregory L. Plett	2015г., г. Лондон, ISBN-13: 978-1-63081-023-8

Продолжение таблицы 3

Система управления зарядом-разрядом батарей литий-ионных аккумуляторов	Санкт- Петербургский государственны й электротехниче ский университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), А. А. Леута, А. Н. Лукичев, Т. П. Руднева	2017г., г. Санкт-Петербург УДК 621.355.9 Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 2/2017
--	---	--

1.2.4 Статистический анализ патентов

По результатам проведенного поиска по патентной документации и научно-технической документации был произведен статистический анализ патентов, который представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Статистический анализ патентов (по странам – заявителям):

Страна	Количество национальных патентов	Количество патентов выданных иностранным заявителям (с указанием этих стран)	Количество патентов, полученных в других странах (с указанием этих стран патентования)	Количество публикаций в научно-технической информации по странам патентования
1	2	3	4	5
Россия	8	-	-	1
Южная Корея	2	-	-	-
США	3	-	-	-
Китай	1	-	-	-
Австралия	1	-	-	-
Португалия	-	-	-	1
Великобритания	-	-	-	2

1.2.5 Выводы по патентному поиску и научно-техническим публикациям

Патентный поиск по теме «Интеллектуальная система контроля и мониторинга аккумулятора (BMS)» по документации стран был проведен за последние 30 лет.

Анализ сложившейся патентной ситуации в отношении «системы BMS» позволяет сделать вывод:

1. Ведущей страной в данной области является Россия, Южная Корея и США;
2. Исследования по схожей тематике ведутся учеными Китая и Австралии;

3. Ведущей страной, в которой происходят активные исследования в области систем управления и мониторинга АКБ являются Великобритания. Также, активно ведется разработка новых решений в России и Португалии.

4. Наиболее емкие и актуальные ответы на вопросы в области разработки устройства были получены из двухтомного издания «Battery Management System» Григория Плета, а также остальной технической документацией, представленной в разделе 1.2.3.

1.3 Физические принципы работы устройства

Принцип работы устройства основан на сборе данных с датчиков тока, напряжения и температуры с АКБ для их дальнейшей обработки и оценки в микроконтроллере, который посредством вычислений управляет ключами коммутации между соединениями элементов АКБ и всего устройства с внешним источником энергии или же нагрузкой. За счет такого контроля возможно реагировать на недопустимое изменение параметров и за счет этой реакции предотвращать выход из строя элементов АКБ и самой BMS платы.

Рассмотрим принцип работы основных защит, которые предъявляются к системе управления и мониторинга АКБ:

- Защита по току (от короткого замыкания) – защита, предотвращающая работу устройства на сопротивление нагрузки близкое к пороговому значению или выходящее за максимальные предельные параметры, в следствие чего по цепи протекают сверхвысокие токи.

Ее работа основана на мониторинге значения тока как на узлах сборок элементов, так и на входной/выходной цепи распределения энергии. Это позволяет в кратчайшие сроки заметить изменение $\frac{dI}{dt}$, и заранее разомкнуть силовые цепи.

- Защита по напряжению (перезаряд/переразряд элементов АКБ) –

заключается в перераспределении лишней энергии или дополнении недостающей путем процесса балансировки.

В свою очередь процесс балансировки основан на перетекании дозированной энергии от нормально заряженных АКБ к переразряженному элементу АКБ

Задачу перезаряда решают путем локального разряда перезаряженного элемента или, как и в случае с переразрядом- распределение лишней энергии между остальными ячейками.

- Защита по температуре - заключается в контроле нагрева элементов АКБ в ходе процесса зарядки/разрядки, а также контроля внешних климатических параметров для поддержания АКБ в необходимом диапазоне рабочих температур [6].

1.3.1 Виды балансировок

Рассмотрим виды балансировок в зависимости от их принципа действия (рисунок 1.1):



Рисунок 1.1- Классификация балансировок по принципу действия

1. Пассивная резисторная балансировка

Наиболее простой и легкорезализуемой является пассивная резисторная балансировка (рисунок 1.2):

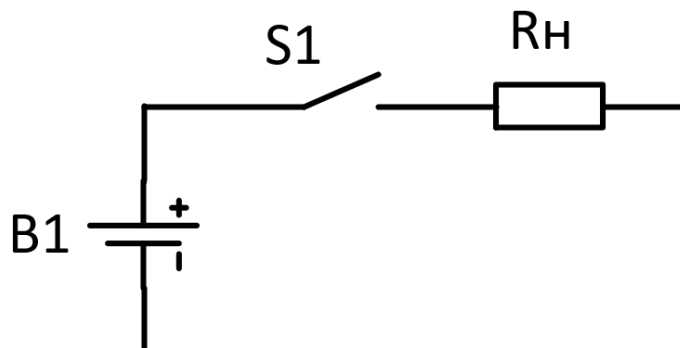


Рисунок 1.2- Условная схема пассивной балансировки резисторного типа

Элемент АКБ (B1), который необходимо сбалансировать только в меньшую сторону изменения напряжения, коммутируется S1 на резистор нагрузки (R_n), при протекании через который тока выделяется определенная мощность, подчиняющаяся уравнению Джоуля-Ленца:

$$P = I^2 (R_n + R_{o.k.}) \cdot t, \text{ где}$$

I - ток, протекающий по участку цепи

R_p – сопротивление резистора нагрузки

$R_{o.k.}$ – сопротивление открытого канала коммутирующего устройства S1

t – время протекания тока

Очевидно, что рассеиваемая мощность квадратично зависит от протекающего через контур ток. Поэтому, временная эффективность балансировки будет зависеть не только от максимального тока балансировки, основывающегося на токе безопасного разряда АКБ, но и от мощности, которую может рассеять резистор, что прямо указывает на экспонентенциальный рост его габаритов.

В реализованных устройствах обычно ограничиваются резисторами, сопротивление которых не опускается ниже 30 Ом, что в случае переразряда на 0,1 Вт от номинального значения произведет тепловой рассеиваемой мощности на резисторе нагрузки не более:

$$P = \frac{4,3^2}{30} \cdot 1 = 0,62 \text{ Вт}$$

Данный вид балансировки является не энергоэффективным по принципу своего действия: энергия перезаряда перетекает в энергию тепла. Но этот недостаток покрывается простой схмотехникой и экономической стороной ее реализации.

2. Емкостная балансировка с одной буферной емкостью

Данная балансировка основана на передаче энергии перезаряженного элемента АКБ к переразряженному путем запасаания этой энергии в конденсаторе (рисунок 1.3):

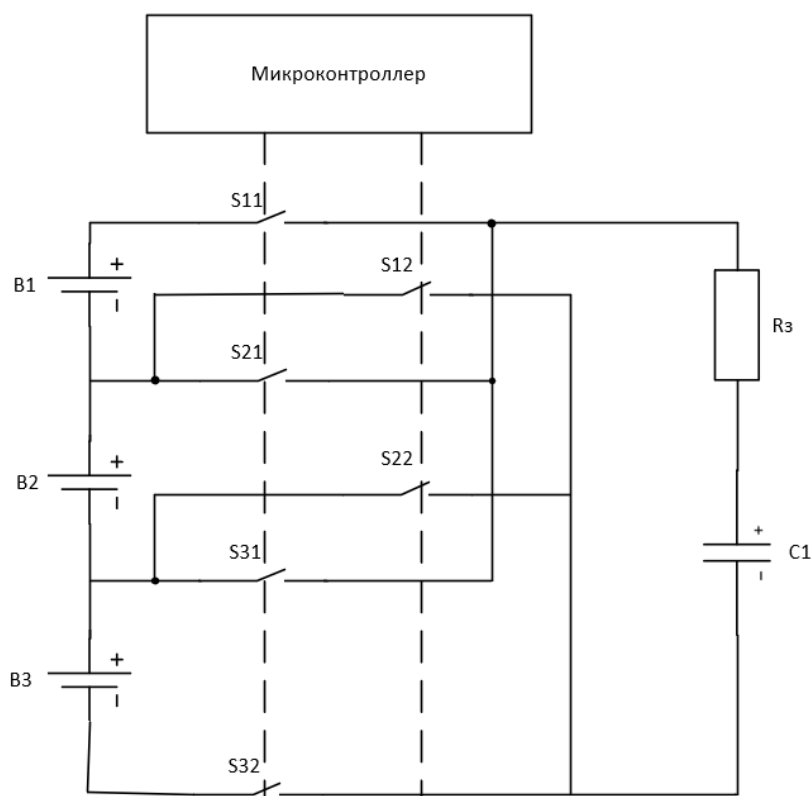


Рисунок 1.3 – Условная схема емкостной балансировки с одной буферной емкостью

3. Емкостная балансировка с переключаемыми емкостями

По сравнению с предыдущей балансировкой обладает повышенным быстродействием, меньшими требованиями к вычислительным возможностям контроллерам. Главным недостатком является длительный процесс переноса энергии ячеек из одного крайнего положения в другое (рисунок 1.4)

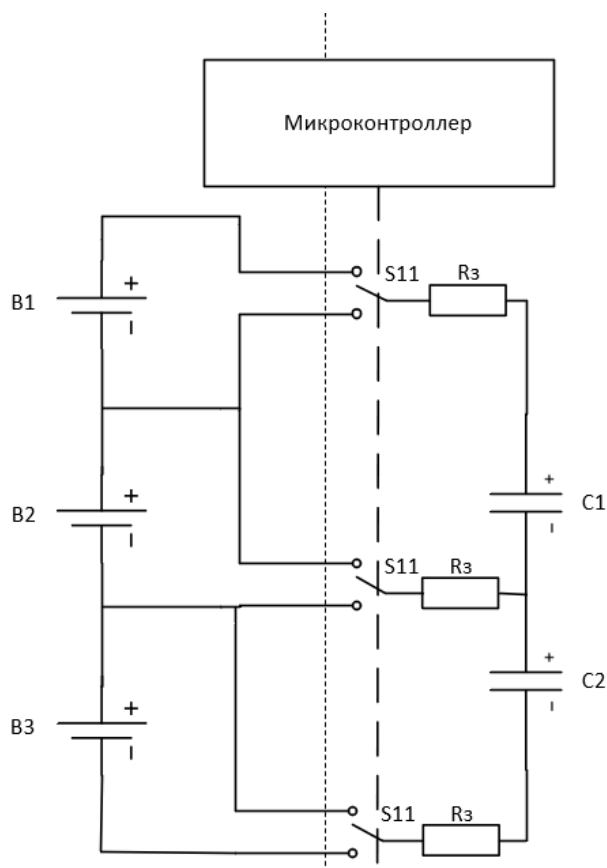


Рисунок 1.4 – Условная схема емкостной балансировки с переключаемыми емкостями

4. Дроссельная балансировка

В этом виде балансировок элементом переноса энергии является индуктивный элемент. В его роли может выступать как катушка индуктивности, так и трансформатор. Топология таких систем аналогична по коммутации емкостным. Однако, такие системы балансировки лишены главного недостатка емкостных систем- высоких пиковых токов при коммутационных процессах. Однако, во время коммутации происходит скачок напряжения, который может повредить коммутационные элементы (рисунок 1.5):

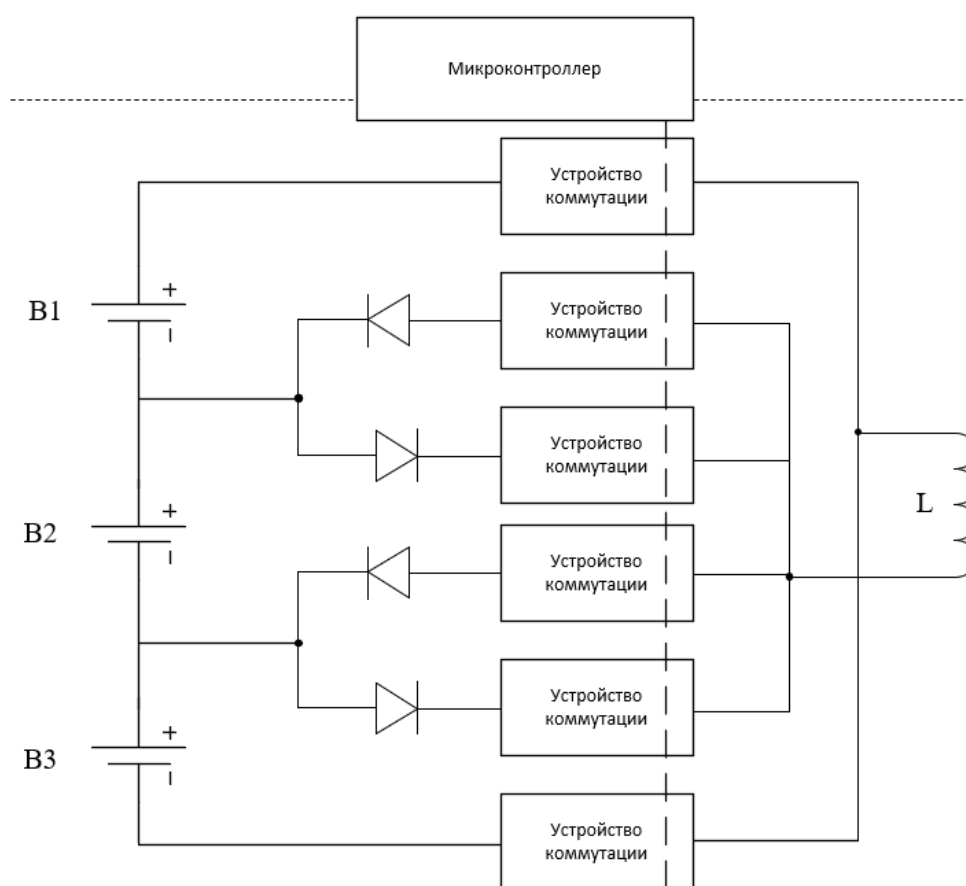


Рисунок 1.5 – Условная схема дроссельной балансировки с переключающимся дросселем

5. Балансировка на преобразователях

Наиболее эффективными и современными считаются системы активных балансировок, построенных на использовании преобразователей. Их принцип основан на гальваническом разделении контура последовательно соединенных ячеек и силовой входной и выходной части. Это позволяет производить перенаправление энергии из одной аккумуляторной ячейки во всю остальную группу ячеек (рисунок 1.6):

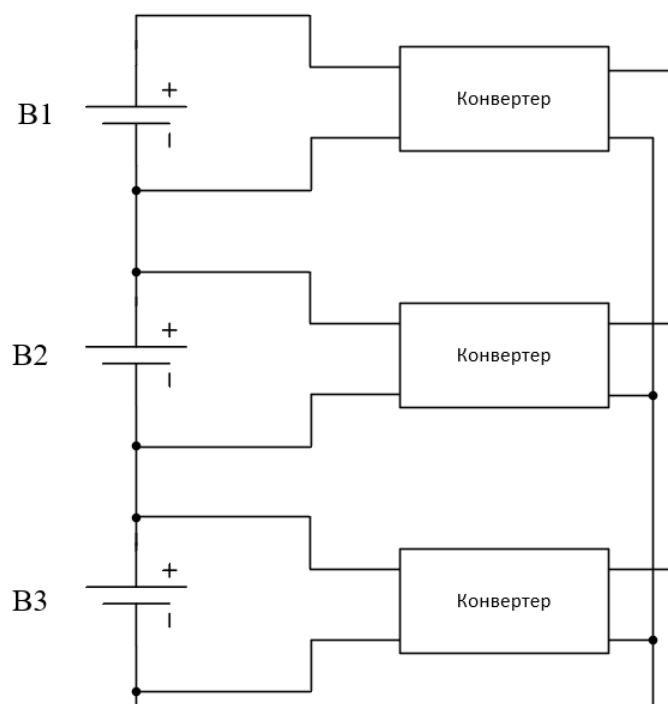


Рисунок 1.6 – Условная схема активной балансировки, реализованная на повышающих преобразователях

Однако, такой подход требует количества конвертеров эквивалентное количеству ячеек в АКБ, что в совокупности с высокой ценой одного конвертера делает реализацию такой системы балансировки дорогостоящей и узкоспециализированной.

1.4 Обзор существующих решений

На сегодняшний день на рынке систем BMS существует множество различных решений с большим разбросом параметров.

Существует 4 основных сегмента рынка:

- Низкий ценовой сегмент, представленный китайским производителем, посредственно относящегося к качеству пайки и электронных компонентов, представленных на плате. Направлен на сегмент покупателей, которые занимаются самоделками.

Топология схемы заключена в использовании микросхемы пассивного балансира на каждое последовательное соединение ячейки АКБ. На выходе

схемы установлен каскад полевых МОП транзисторов, обеспечивающих коммутацию АКБ с нагрузкой/зарядным устройством.

Токовая защита представлена предохранителем.

Защита от перезаряда/переразряда достигается за счет микросхемы управления ячейкой АКБ, которая по некоторым источникам имеет высокие показатели температурного дрейфа параметров и брака, за счет чего некоторая часть элементов АКБ в режиме простоя предрасположена к перезаряду.

Защита от перегрева отсутствует.

Продукт представлен на рисунке 1.7:

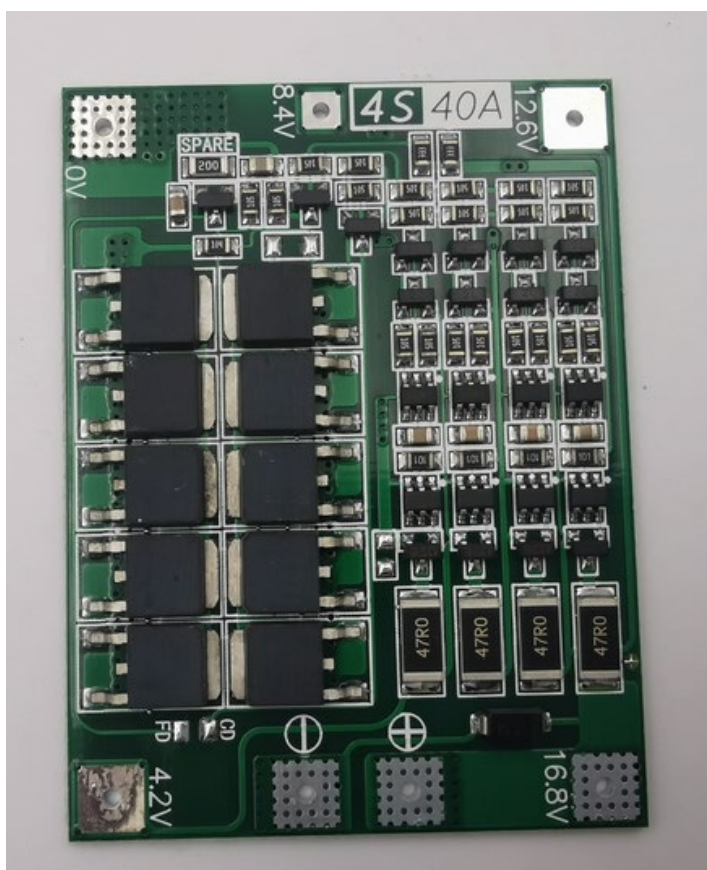


Рисунок 1.7 - Плата защиты *BMS 4S 16,8V 40A*

- Средний и высокий ценовой сегмент, представленный компаниями среднесерийного масштаба выпуска продукции с использованием станочного парка с чпу управлением.

Присутствует защита от короткого замыкания, реализованная через

контроль входного и выходного тока за счет измерения тока с помощью шунта и последующей обработкой показаний в специализированном BMS контроллере.

Защита от переразряда/перезаряда реализована через измерение напряжений каждого из элементов АКБ с последующей оцифровкой и обработкой показаний в BMS контроллере.

Присутствует температурная защита, а также печатная плата обладает радиатором для отвода избыточного тепла от полевых МОП транзисторов

Продукт представлен на рисунке 1.8:



Рисунок 1.8 - Плата *BMS\PCM 4S LiFePO4 JBD-HP08S001*

- Промышленный сегмент, направленный на крупносерийный выпуск продукции с высокоточным оборудованием и рассчитанных надежных узлов электросхемы.

Представляет собой наиболее технологичный и надежный сегмент продуктов. Топология выполнена с использованием современной электронной базы компонентов, а архитектура работы сводится к использованию высокопроизводительного контроллера, для которого специально разрабатывается наиболее оптимизированная программа на языках низкого

уровня.

Пример продукта представлен на рисунке 1.9:



Рисунок 1.10 - ИБП *APC Smart-UPS On-Line*

- Побочный сегмент рынка. Продукт представлен в виде необходимости как часть сложного технического устройства. Соответственно, не предполагается продажа платы BMS отдельно: только в составе целого устройства. Ярким примером такой интеграции являются аккумуляторные электроинструменты, смартфоны и электротранспорт.

Качество исполнения представляет собой золотую середину между показателями цены, качества и надежности. Топология схемы как правило специфична ввиду ограниченных габаритов и режимов эксплуатации.

Большинство защит присутствуют в полной мере и разнятся в зависимости от ценового сегмента самого устройства

Пример продукта представлен на рисунке 1.11:



Рисунок 1.11 - *Metabo* - Аккумулятор 18 В 4.0 Ач *Li-Power Extreme*

1.5 Разработка структурной схемы устройства

Разработка структурной схемы устройства производилась на основании схемы прототипа, найденного в ходе анализа литературы [7]. Структурная схема устройства контроля и мониторинга аккумуляторной батареи приведена на рисунке 1.12:

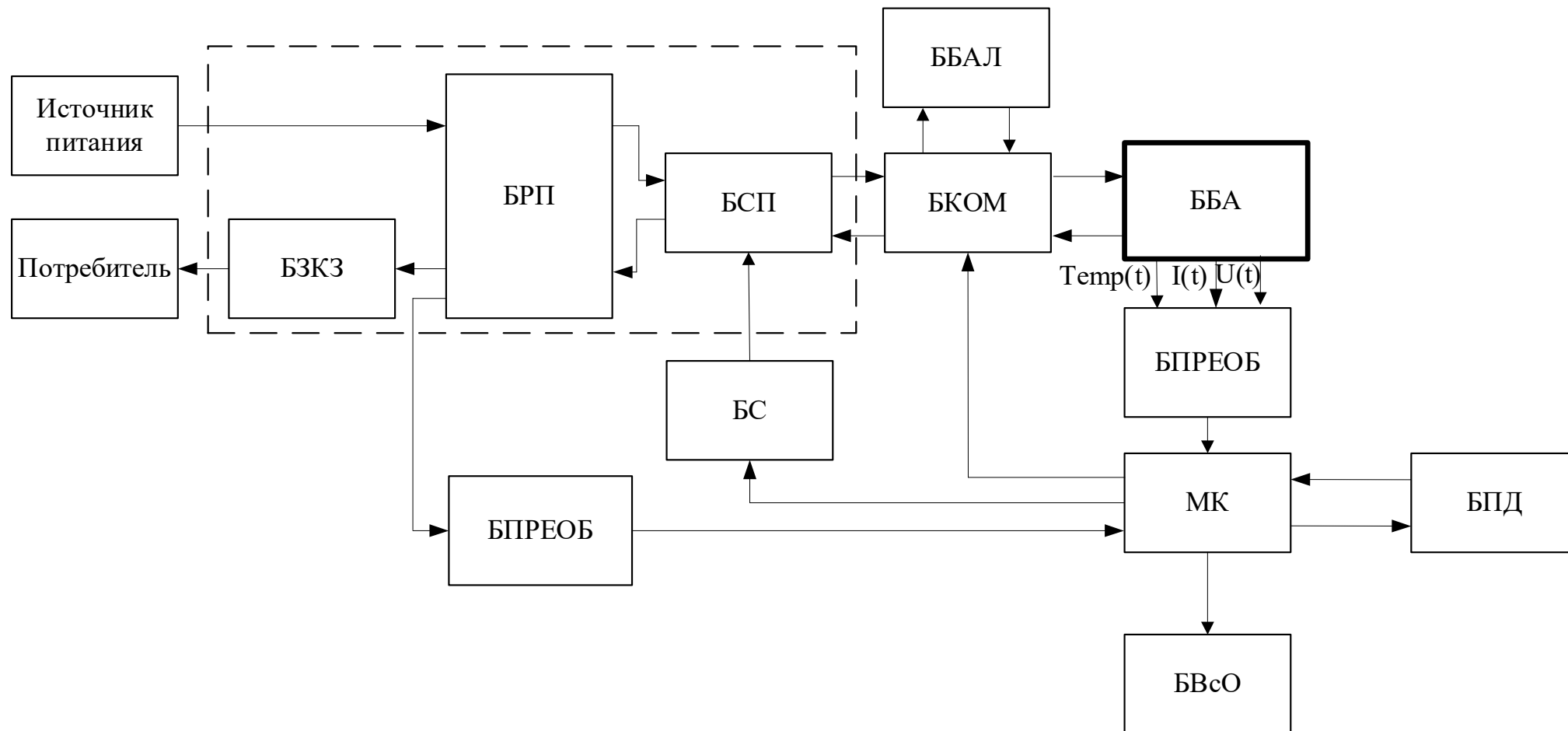


Рисунок 1.12 – Структурная схема устройства контроля и мониторинга аккумуляторной батареи

На структурной схеме обозначены: Блок зарядки и разрядки (БЗИР), в который входят: блок регистрации параметров (БРП), устройство защиты от короткого замыкания (БЗКЗ), блок силовых переключателей (БСП).

Структурная схема помимо вышеперечисленного содержит: блок батареи аккумуляторов (ББА), Блок преобразования электрических параметров и (или) температуры (БПРЕОБ), микроконтроллер (МК), блок индикации (БИнд), блок интерфейса (БИнтер), Блок передачи данных (БПД), блок согласования (БС).

Рассмотрим протекание процесса разряда ББА для понимания взаимодействия структур устройства:

С ББА снимается массив данных напряжений, токов и температур, который далее нормализуется в БПРЕОБ, в конечном итоге поступая в МК. На основании полученных данных, МК выдает разрешающий логический сигнал на БКОМ, на котором в нормальном режиме происходит коммутация ББА к БЗИР. БСП является основным силовым блоком переключения нагрузки, открытие которого происходит только после получения сигнала с МК, который претерпевает процесс согласования до воспринимаемого БСП уровня в блоке БС. После открытия ключей в блоке БСП, энергия с ББА беспрепятственно поступает к потребителю. Важной деталью процесса потребления является дополнительный контроль выходных величин тока и напряжения, которые также претерпевают нормализацию по уровню сигнала в БПРЕОБ и поступают в таком виде в МК.

БВсО (блок взаимодействия с оператором) необходим для обеспечения интерфейса взаимодействия человек-устройство: установки параметров, их конфигурирования, а также обеспечения ручного отключения устройства от нагрузки в экстренных случаях.

2. РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ И ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА

В представленной главе описаны этапы разработки функциональной схемы интеллектуальной системы контроля и мониторинга аккумулятора и принципиальной схемы на её основе. Описаны основные составные блоки, технические решения применения различных функциональных блоков устройства. Разработка принципиальной схемы производилась с учётом современной элементной базы электронных компонентов с уклоном на снятие точных характеристик каждого из элементов аккумулятора для обеспечения максимальной безопасности аккумуляторной батареи в целом.

2.1 Разработка функциональной схемы устройства

Разработка функциональной схемы производилась на базе структурной схемы, приведённой на рисунке 2.1:

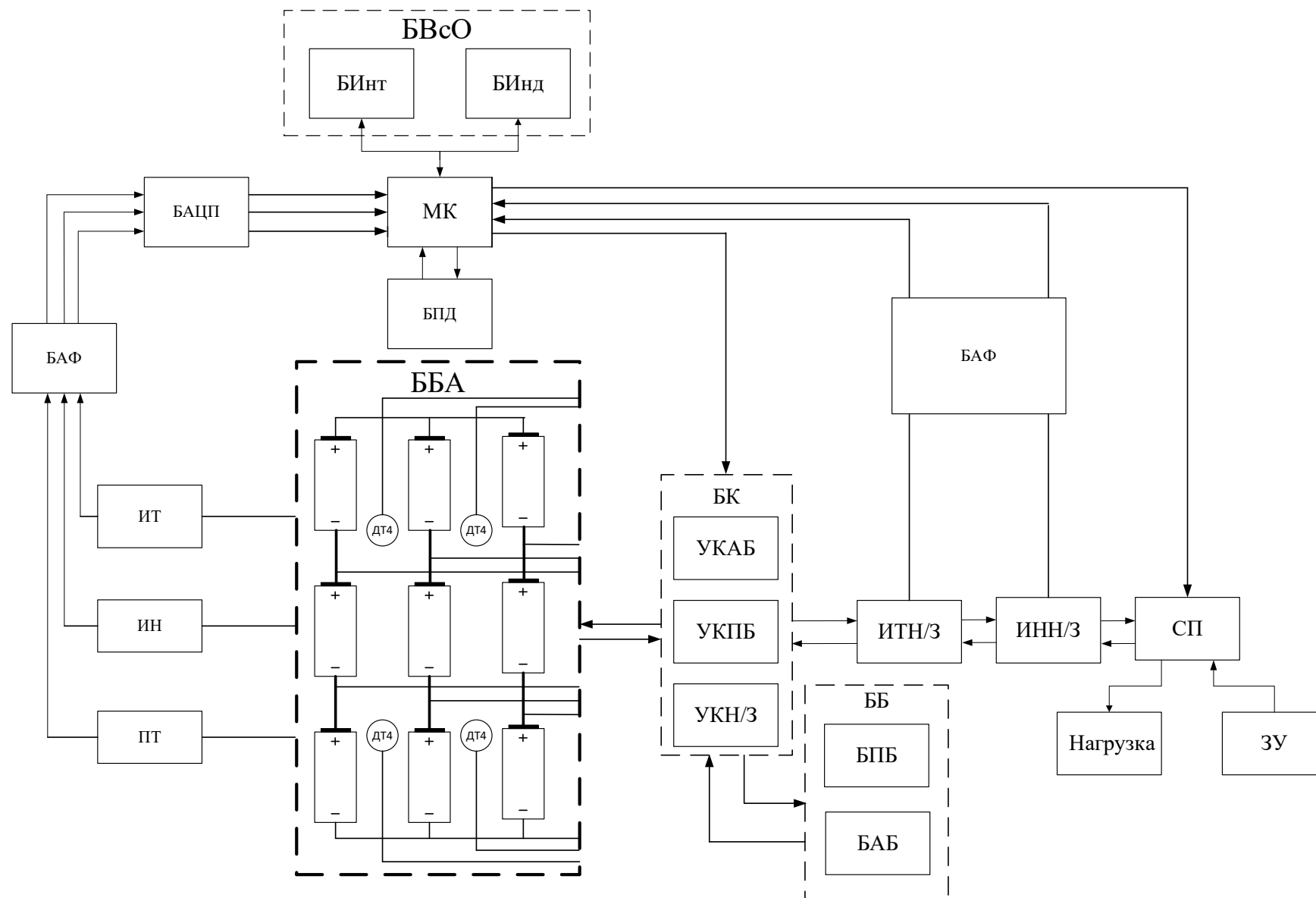


Рисунок 2.1 – Функциональная схема разрабатываемого устройства

На функциональной схеме представлены следующие блоки:

- Блок батареи аккумуляторов (ББА);
- Измерители:
 - Тока (ИТ);
 - Напряжения (ИН);
 - Температуры (ПТ);
- Блок активных фильтров (БАФ);
- Блок АЦП (БАЦП);
- Микроконтроллер (МК);
- Блок взаимодействия с оператором (БВсО), состоящий из:
 - Блока интерфейса (БИнт);
 - Блока индикации (БИнд);
- Блок коммутации (БК), состоящий из:
 - Устройства коммутации активной балансировки (УКАБ);
 - Устройства коммутации пассивной балансировки (УКПБ);
- Устройства коммутации активной нагрузки/зарядки (УКАН/З);
- Блок балансировки (ББ), который состоит из:
 - Блока пассивной балансировки (БПБ);
 - Блока активной балансировки (БАБ);
- Входной/выходной измеритель тока (ИТН/З);
- Входной/выходной измеритель напряжения (ИНН/З);
- Силовой переключатель (СП);
- Зарядное устройство (ЗУ);
- Нагрузка.

2.2 Описание принципов работы устройства в различных режимах его функционирования

Рассмотрим несколько процессов, происходящих в схеме при различных режимах работы.

1- Зарядка БА

Зарядка устройства происходит с помощью энергии, которая поступает с блока ЗУ. Электрический ток, проходя через ИТН/З и ИНН/З преобразуется в эквивалентные значения соответствующих величин, поступая в БАФ, где входной сигнал выделяется, отсеивая все нежелательные помехи и наводки, и нормируется по уровню напряжения, откуда поступает на логические входы МК. МК, получая данные о поступающем напряжении на устройство, коммутирует или не коммутирует СП с устройством в целом, в зависимости от численного значения, которое поступило на его цифровой вход.

Случай, когда СП не скоммутировал можно рассматривать как несоответствующее по уровню напряжение, поступающее с ЗУ. В случае коммутации СП электрический ток поступает на БК, на котором происходит переключение ключей и коммутация поступающего на БК на ББА.

В ходе всего процесса зарядки ББА происходит мониторинг параметров напряжения на каждом из элементов ББА, тока, проходящего на каждое параллельное соединение из серии последовательно соединенных ячеек, температуры всей ББА в целом, общего входного тока и напряжения ЗУ.

Каждый из этих параметров, имеет собственные численные рамки, заданные программно в памяти МК. Если численное значение одного из параметров выходит за пределы установленного диапазона, то происходит частичное или полное размыкание электрической цепи с УЗ.

В случае, если измеряемые параметры входят в диапазон значений, который допустим для процесса балансировки, то происходит процесс балансировки, который будет описан подробнее далее.

2- Разрядка АКБ на нагрузку.

Энергия, которая содержится в АКБ через замкнутый на СП коммутатор в БК поступает на СП. Измеряется выходное напряжение АКБ. В случае, если численные значения измеренного напряжения попадают в разрешенный для функционирования устройства диапазон, то происходит коммутация СП.

Далее, энергия с ББА беспрепятственно попадает на нагрузку. Во время разряда, аналогично, как и во время заряда, происходит контроль всех параметров: как показателя мощности, который расходуется на нагрузку, так и падение напряжения на каждой из ячеек, температуры АКБ и тока каждого из р-каскадов аккумуляторов.

3- Балансировка элементов АКБ

Балансировка происходит при условии, что один из элементов вышел за безопасное допустимое напряжение его функционирования или отличается на определенное численное значение от остальных элементов с заданной точностью.

При перенапряжении целесообразно использование пассивной балансировки элемента, чтобы рассеять лишнюю энергию в виде выделяемого на резисторе балансировки тепла.

Однако, если возникает задача балансировки десятых или даже сотых долей вольта на батарее, при этом балансировать нужно соседние элементы между собой, то используется активная балансировка. Во всех остальных случаях происходит также пассивная балансировка.

Сам процесс балансировки происходит следующим образом:

МК коммутирует необходимый элемент элементы ББА с ББ и в последующем с БПБ посредством БК. В случае активной балансировки коммутируются сразу 2 элемента: один из них выступает в роли донора энергии, другой же - в роли акцептора.

2.3 Разработка принципиальной схемы устройства

В данном подразделе по блокам будет описан расчет принципиальной схемы устройства.

2.3.1 Описание принципа построения и соединения АКБ

Необходимо получить АКБ емкостью 48 Ач с выходным напряжением

24В. Для этого используем литий-ионные аккумуляторные элементы 18650 с емкостью 2600 мАч производства *Samsung (ICR18650-26FM)* (рисунок 2.2). Данные элементы зарекомендовали себя на рынке за счет своей цены, долговечности и надежности [8].



Рисунок 2.2- Внешний вид АКБ, состоящей из элементов *ICR18650-26FM* в конфигурации $5S3P$

Устройство проектируется исходя из обеспечения максимально возможных показателей безопасности, что в свою очередь, несет рассмотрение и разработку узлов специфичной топологии схемотехники для подобных изделий.

Для обеспечения вышеуказанных характеристик с таким типом аккумуляторной ячейки необходимо составить сборку $6S18P$, где S - количество последовательно соединенных элементов, а P - параллельно соединенных соответственно.

АКБ с таким большим количеством параллельно соединенных элементов требуют особого подхода к их функционированию и контролю.

Таблица 2.1 – Основные параметры литий-ионного аккумулятора *ICR18650-26FM*

Основные параметры	
Название	Значение
Номинальная емкость	2600 мАч (разряд током 0,2С до 2,75 В)
Минимальная емкость	2550 мАч (разряд током 0,2С до 2,75 В)
Макс. напряжение заряда	4,325 ± 0.025 В
Номинальное напряжение	3,7 В
Метод заряда	CC - CV
Ток заряда	Стандартный заряд: 1300 мА Быстрый заряд: 2600 мА
Время заряда	Стандартный заряд: 3 ч Быстрый заряд: 2.5 ч
Макс. ток заряда	2800 мА (при T = 25°C)
Макс. ток разряда	5 А (при T = 25°C)
Напряжение отключения	2,5 ± 0.05 В
Вес	48 гр.
Размеры	Длина: 68.2 мм Диаметр: 18.4 мм
Температура эксплуатации	Заряд: от 0 до 45°C Разряд: от -20 до 60°C
Температура хранения	1 год: от -20 до 25°C 80%
	3 месяца: от -25 до 45°C 80%
	1 месяц: от -20 до 60°C 80%
Примечание: Начальное напряжение 3,7 В, степень заряженности 50%.	

В (АКБ) приведены следующие варианты обеспечения контроля таких АКБ:

- При использовании монтажного решения в виде магистрального подключения АКБ, соединение к шинам выполняют в виде предохранителей, с заранее рассчитанными токами их предохранения, т.е. такими токами, протекание которых при известной нагрузке является неблагоприятным режимом работы, которые приводят к уменьшению срока эксплуатации элементов АКБ.
- Р соединения S сборок разделяют коммутирующими устройствами, таким образом получая несколько отдельным АКБ. Как правило разделяют на сборки $k \cdot (nSmP)$, где

$$k = \frac{P_{\text{перв.}}}{n} \text{ - количество получившихся частей АКБ;}$$

$n = 1 \div 3$ – количество параллельно соединенных элементов ;

m – количество последовательно соединенных элементов.

Основная проблема, не позволяющая разработчику установить неограниченное количество параллельных соединений элементов АКБ заключается в явлении саморазряда, протекающего между параллельно соединенными элементами. Всему виной - различие характеристик между элементами АКБ, которые заложены еще на этапе производства, в том числе, если элементы из одной выпускаемой партии. Это различие будет увеличиваться в ходе их эксплуатации [9].

Таким образом, в процессе зарядки элементов одинаковыми током и напряжением эти элементы будут запасать различную энергию эквивалентную значению их реальной емкости. Такие сборки при детальном рассмотрении будут частично недозаряжены и недоразряжены за счет разницы характеристик. Однако, при окончании процесса зарядки элементы с более высоким потенциалом будут дозаряжать элементы с низким потенциалом через их внутреннее сопротивление.

Кроме того, из источника 10 известно, что в ходе эксплуатации элемента АКБ, максимальное напряжение, до которого требуется заряжать аккумуляторную батарею, уменьшается при потере максимального значения аккумулирования емкости.

В итоге, такой вид соединения является опасным: с каждым циклом заряда/разряда разница в характеристиках элементов АКБ увеличивается за счет перезаряда отдельных элементов АКБ, следовательно увеличивается и ток саморазряда одного элемента АКБ на другой, что влечет за собой работу АКБ в экстремальных режимах эксплуатации, что недопустимо для устройства, которое предназначено для стабильного и безопасного функционирования.

Исходя из всего вышесказанного, выбираем топологию соединения при $n=1$. Получаем 18 изолированных друг от друга ключами 6S1P элементов АКБ. Это позволит выполнять контроль и балансировку каждого из элементов, не допуская ухудшения характеристик элементов за счет отсутствия влияния между ними (рисунок 2.3)

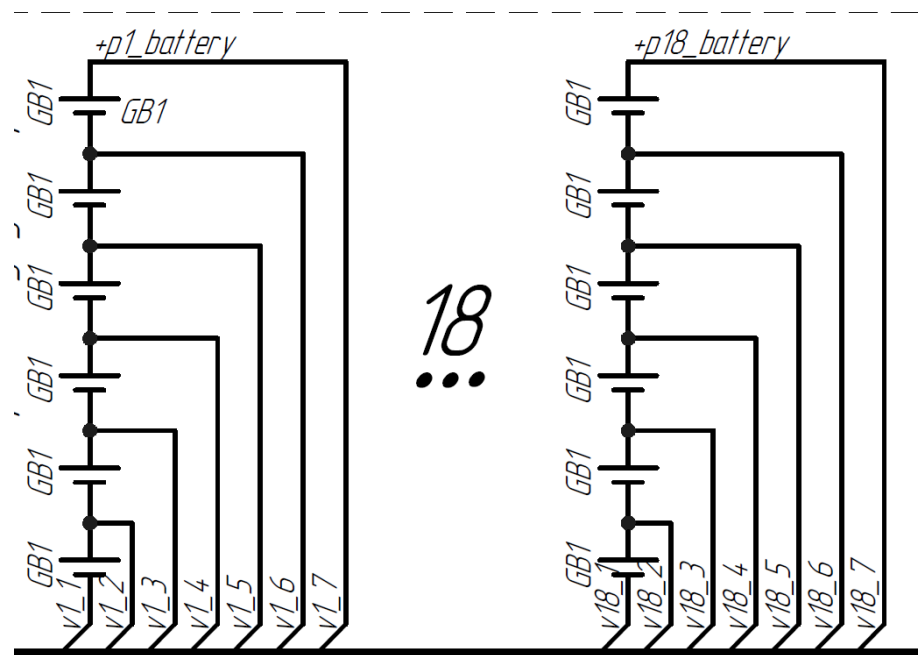


Рисунок 2.3 – Схематичное представление соединения элементов АКБ

2.3.2 Расчёт блока измерения температуры

К блоку измерения температуры (БИТ) предъявляются следующие требования:

- БИТ должен выдавать актуальные значения температуры в выходном диапазоне от 0 до 5В
- БИТ должен отражать температуру всей АКБ в целом с частотой обновления 100 мс и погрешностью не более 1 °С .

Наиболее простым решением является использование NTC терморезисторов, т.е. обладающих отрицательным ТКС.

Существует следующая схема, позволяющая на выводах получить

сигнал, отражающий значение температуры в эквиваленте напряжения (источник 11) (рисунок 2.4):

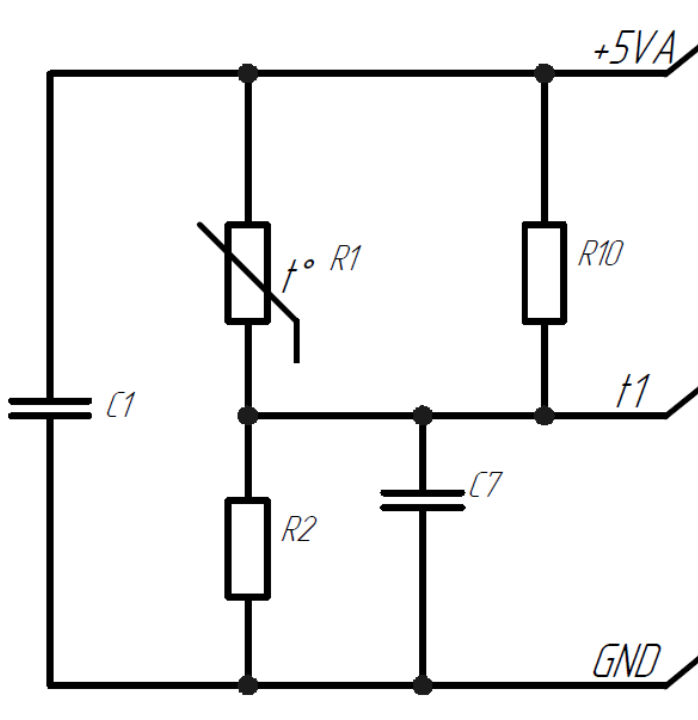


Рисунок 2.4- Принципиальная схема преобразователя температуры в напряжение

Положение термистора является вынужденной мерой и применяется в случае, если основной температурный диапазон является низким относительно всего возможного диапазона измерения датчика. Исходя из источника 12 видим, что температурный диапазон измерения находится в пределах от -55 до $155\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выберем максимальную температуру измерения в 90°C . Данное значение выбрано с большим запасом, но, тем не менее, исключает выход из строя термистора в случае непредвиденного нагрева АКБ до такой температуры.

Зная максимальную температуру измерения, по таблице 3 сопоставим его с сопротивлением элемента для дальнейшего вычисления рассеиваемой на термисторе мощности, чтобы убедиться, что вычисленное значение не

превышает максимального, которое заявлено производителем:

Таблица 2.2– Точечная зависимость температуры от сопротивления термистора

南京时恒阻温特性表

R25=100K Ω 精度:±1% B25/50=3950K B25/85=4035K 精度:±1%(P209-15A)

温度(℃)	电阻(K Ω)			电阻精度(%)		温度精度(℃)	
	最小值	中心值	最大值	ΔR	$-\Delta R$	ΔT	$-\Delta T$
63	21.445	21.992	22.551	2.541	-2.488	0.718	-0.703
64	20.680	21.215	21.762	2.578	-2.523	0.733	-0.717
65	19.945	20.469	21.004	2.614	-2.557	0.747	-0.731
66	19.240	19.752	20.276	2.651	-2.592	0.762	-0.745
67	18.563	19.064	19.577	2.687	-2.627	0.777	-0.759
68	17.914	18.404	18.905	2.724	-2.661	0.791	-0.773
69	17.290	17.769	18.259	2.760	-2.695	0.806	-0.787
70	16.690	17.159	17.638	2.796	-2.729	0.821	-0.802
71	16.114	16.572	17.042	2.831	-2.763	0.836	-0.816
72	15.561	16.009	16.468	2.867	-2.797	0.851	-0.830
73	15.029	15.467	15.916	2.902	-2.830	0.866	-0.845
74	14.518	14.946	15.385	2.938	-2.863	0.881	-0.859
75	14.026	14.445	14.874	2.973	-2.897	0.897	-0.874
76	13.554	13.963	14.383	3.008	-2.929	0.912	-0.888
77	13.099	13.499	13.910	3.042	-2.962	0.927	-0.903
78	12.662	13.053	13.455	3.077	-2.995	0.943	-0.918
79	12.241	12.623	13.016	3.112	-3.027	0.959	-0.933
80	11.836	12.210	12.594	3.146	-3.060	0.974	-0.948
81	11.447	11.812	12.188	3.180	-3.092	0.990	-0.962
82	11.072	11.429	11.796	3.214	-3.124	1.006	-0.977
83	10.711	11.060	11.419	3.248	-3.155	1.022	-0.993
84	10.363	10.704	11.055	3.282	-3.187	1.038	-1.008
85	10.028	10.362	10.705	3.315	-3.219	1.054	-1.023
86	9.705	10.031	10.367	3.349	-3.250	1.070	-1.038
87	9.395	9.713	10.042	3.382	-3.281	1.086	-1.054
88	9.095	9.407	9.728	3.415	-3.312	1.102	-1.069
89	8.806	9.111	9.425	3.448	-3.343	1.119	-1.084
90	8.528	8.826	9.133	3.481	-3.374	1.135	-1.100
91	8.260	8.551	8.852	3.514	-3.404	1.152	-1.116
92	8.001	8.286	8.580	3.547	-3.435	1.168	-1.131
93	7.752	8.030	8.318	3.579	-3.465	1.185	-1.147
94	7.512	7.784	8.065	3.611	-3.495	1.202	-1.163
95	7.280	7.546	7.821	3.643	-3.525	1.218	-1.179
96	7.056	7.316	7.585	3.676	-3.555	1.235	-1.195
97	6.840	7.094	7.357	3.707	-3.585	1.252	-1.211
98	6.631	6.880	7.137	3.739	-3.614	1.269	-1.227
99	6.430	6.673	6.925	3.771	-3.643	1.286	-1.243
100	6.236	6.474	6.720	3.802	-3.673	1.304	-1.259
101	6.048	6.281	6.522	3.834	-3.702	1.321	-1.275
102	5.867	6.094	6.330	3.865	-3.731	1.338	-1.292

Исходя из таблицы 2.2 получаем значение $R_1 = 8,826$ кОм;

Рассмотрим назначение каждого из элементов.

$R1$ является самым терморезистором. Возьмем *MF52A104F3950 (A1)* с основными характеристиками, необходимыми для последующего расчета в

таблице 2.3 [12]:

Таблица 2.3– Основные характеристики выбранного термистора

Параметр	Значение
Название	<i>MF52A104F3950 (A1)</i>
Сопротивление	100 кОм
Погрешность измерения	1%
Мощность рассеивания	60 мВт

$R2$ принимают равным сопротивлению $R1 \parallel R10$:

$$R2 = \frac{R1 \cdot R10}{R1 + R10};$$
$$R2 = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 1600 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3 + 1600 \cdot 10^3} = 188,235 \text{ кОм};$$

Выберем $R2=189$ кОм. Основные характеристики резистора представлены в источнике 13.

$R1$, $C7$ образует RC фильтр низких частот. Необходимо отсекай высокочастотные колебания температуры, которые являются помехами. Частоты среза в 100 Гц будет достаточно. Рассчитаем номиналы $R5$, $C3$ исходя из выражения:

$$f_{cp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R10 \cdot C7};$$

Примем $C7=1$ нФ [14], тогда

$$R1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{cp} \cdot C7};$$
$$R1 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 1593,6 \text{ кОм};$$

Выберем $R2 = 1600$ кОм [15].

Мощность рассеивания на термисторе найдем как

$$P = I^2 R_{NTC}, \text{ где}$$

$$I = \frac{U_{ex}}{R_{ветви}}, \text{ где}$$

R_{NTC} – минимальное сопротивление термистора в диапазоне рабочих температур (оно же R_1);

$$R_{ветви} = \frac{(R_{NTC} + R_{10})}{R_{NTC} + R_{10}} + R_2$$

$$R_{ветви} = \frac{100 \text{ кОм} \cdot 1600 \text{ кОм}}{100 \text{ кОм} + 1600 \text{ кОм}} + 94,6 \text{ кОм} = 188,24 \text{ кОм}$$

$$I = \frac{5}{188,24 \cdot 10^3} = 26,56 \text{ мкА}$$

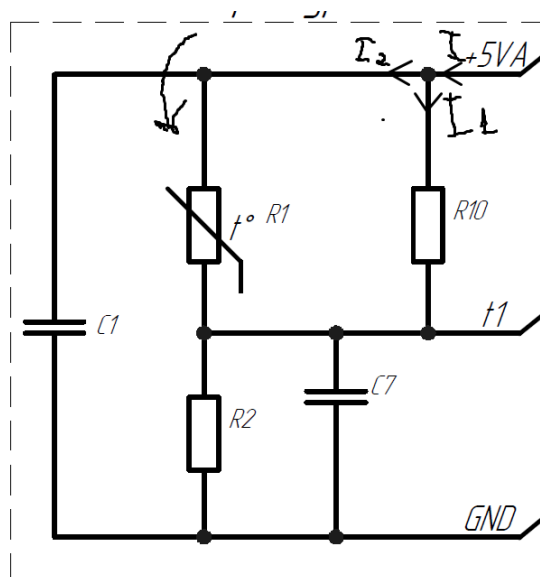


Рисунок 2.5- Принципиальная схема преобразователя температуры в напряжение с рассмотрением токов, входящих и выходящих в узел

Конденсаторы считаем обрывом при постоянном напряжении источника питания

Для расчета рассеиваемой мощности на R1, необходимо рассчитать ток

1. Составим уравнение по 1 и 2 закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} I = i_1 + i_2 \\ E = i_1 R_1 + i_2 R_{10} + I R_2 \end{cases};$$

$$\begin{cases} i_2 = I - i_1 \\ E = i_1 R_1 + i_2 R_{10} + I R_2 \end{cases};$$

$$E = i_1 R_1 + (I - i_1) R_{10} + I R_2;$$

$$E = i_1 R_1 + I R_{10} - i_1 R_{10} + I R_2;$$

$$E = i_1 (R_1 - R_{10}) + I R_{10} + I R_2;$$

$$i_1 = \frac{E - I \cdot (R_{10} + R_2)}{(R_1 - R_{10})};$$

$$i_1 = \frac{5 - 26,56 \cdot 10^{-6} \cdot (1600 \cdot 10^3 + 94,2 \cdot 10^3)}{100 \cdot 10^3 - 1600 \cdot 10^3};$$

$$i_1 = 25,4 \text{ мкА}$$

Тогда, мощность, рассеиваемая на термисторе:

$$P = (0,267 \cdot 10^{-6} \text{ А})^2 \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 71 \text{ мкВт}$$

А при максимальной температуре:

$$I = \frac{5}{102,9 \cdot 10^3} = 48,55 \text{ мкА};$$

$$i_1 = 48,55 \text{ мкА};$$

$$P = 20,8 \text{ мкВт};$$

Сравнив полученные показания мощности, выделяемой на термисторе с максимальной заявленной производителем, убеждаемся, что имеется огромный запас, что и требовалось подтвердить.

С1 необходим для стабилизации напряжения на преобразователе температуры. Исходя из незначительного потребления узла возьмем 10нФ с запасом на случай возникновения просадок по аналоговой части питания [16].

Конденсатор с повышенным значением емкости позволит сгладить подобные скачки: это предотвратит появление промаха и ложное срабатывание защиты со стороны микроконтроллера.

Получим следующую принципиальную схему с указанными номиналами элементов (рис 2.6):

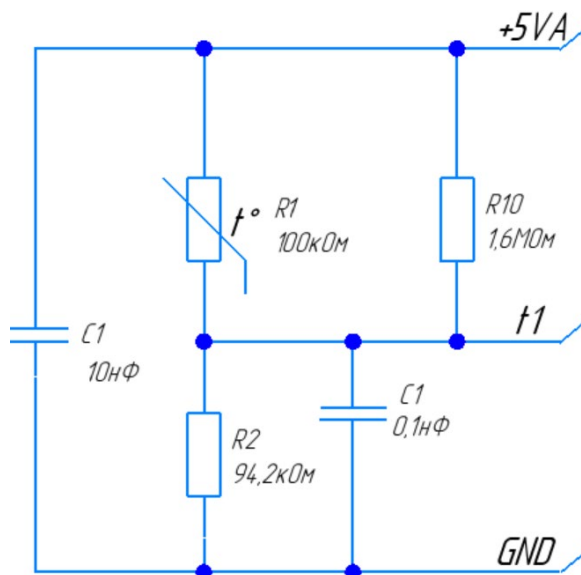


Рисунок 2.6- Принципиальная схема преобразователя температуры в напряжение с номиналами элементов

2.3.3 Выбор АЦП для датчиков температуры

Спроектированная АКБ будет обладать 4 идентичными блоками измерения температуры, показания общей погрешности не должны превышать 1°C , а частота замеров, как уже предьявлялось выше к БИТ, не менее 100 мс.

С большим запасом возьмем *ADS7841E* [17], исходя из современных решений, представленных на рынке. Частота семплирования в 200 кГц позволит в кратчайшие сроки регистрировать параметры температуры и в случае ее возрастания преждевременно отключать элемент от АКБ, а разрядность в 12 бит позволит выдавать значения напряжения в разы, превышающие погрешность на самом датчике (рисунок 2.7).

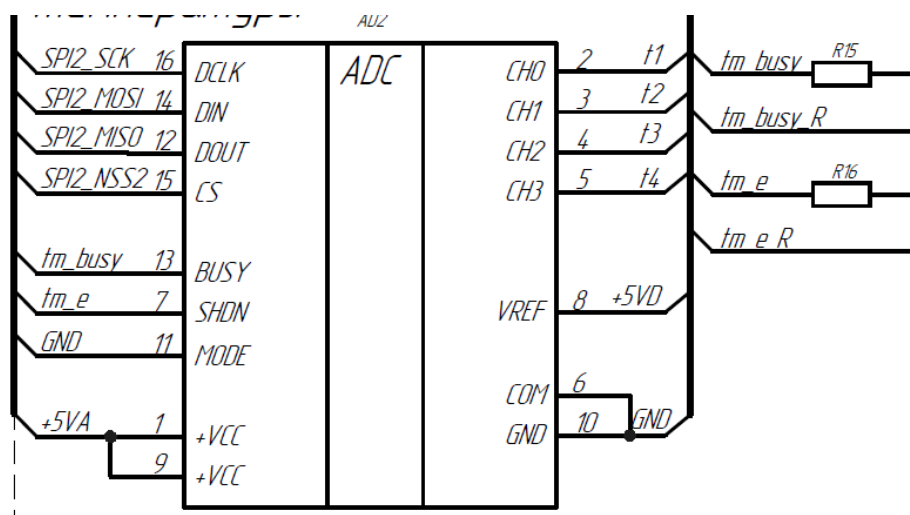


Рисунок 2.7 - *ADS7841E* с обвязкой для нормального функционирования

Рассмотрим схему его подключения.

Выходы *DCLK*, *DIN*, *DOUT*, *CS* образуют шину передачи по протоколу *SPI* непосредственно к микроконтроллеру.

BUSY - нога, отвечающая за отклик во время передачи данных. 1, если идет передача данных, 0- Если АЦП свободен.

SHDN – вывод, отвечающий за перевод устройства в выключенный режим работы и в сверхэкономичный режим потребления.

Когда необходимо выключение, необходимо подтянуть вывод к земле, соответственно АЦП будет находиться в постоянном мониторинге, поэтому подтягиваем к *+5VA*.

MODE- отвечает за режим работы АЦП. При подтяжке к земле – стандартный режим работ на максимальной разрядности, иначе – необходимо подать контрольный байт с кодом разрядности.

VCC- аналоговое напряжение питания для переключения внутренних коммутаторов.

CH 0-3 входные аналоговые каналы АЦП

VREF-опорное напряжение АЦП

GND- общий провод

2.3.4 Расчет общего блока коммутации

При топологии блока АКБ 6S18P имеем 108 точек коммутации, которые перекрывают минимально возможное значение.

Для понимания рассмотрим 6S1P первую и вторую сборку (2.10):

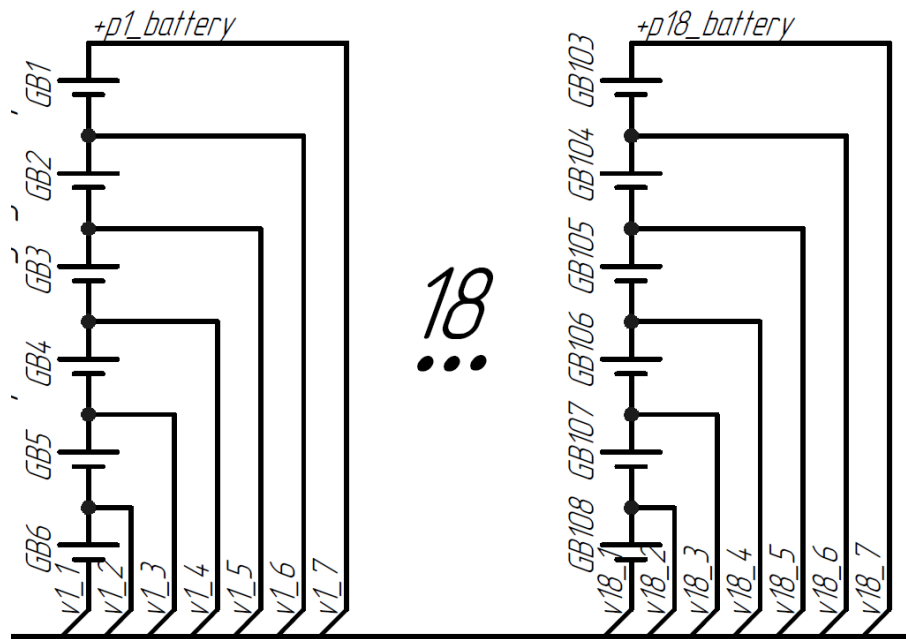


Рисунок 2.10 – Первая и последняя последовательные сборки АКБ в графическом представлении массива из 18 структур

В первой сборке без потерь исключить контакта нельзя, однако во второй сборке замечаем, что $V_{11}=V_{12}$ и $V_{17}=V_{27}$. Тогда контакты V_{i1}, V_{i7} , где $2 \leq i \leq 18$ можно исключить. В конечном итоге получим новое количество контактов как:

$$n = (nS+1) \cdot nP - 2 \cdot nP + 2, \text{ где}$$

n – количество полученных контактов

nS – количество последовательно соединенных элементов

nP – количество параллельно соединенных элементов АКБ

Однако, соединения V_{li} в последующем будут подвергаться коммутации, так как система контроля АКБ будет обладать возможностью коммутирования 6S1P сборок для их изолирования как друг от друга, так и от выхода с АКБ. В связи с этим для контроля напряжения балансировки элементов B_{li} необходимы точки V_{li} . Поэтому, конечное выражение примет вид:

$$n = (nS+1) \cdot nP - nP + 1;$$

Тогда, $n = 7 \cdot 18 - 18 + 1 = 109$

Для измерения напряжения необходимо одновременно измерять 2 точки из АКБ. Поэтому используются 2 блока коммутации, которые будут перекрывать коммутируемые источники каждого из них.

Составим коммутирующий блок из 2 каскадов коммутаторов. Первое звено составим из 8 канальных коммутаторов (исходя из факта перекрытия количества контактов одной 6S1P сборки). Наиболее принципиальными параметрами при подборе будут являться:

- Скорость переключения
- Сопротивление открытого канала
- Максимальный ток коммутирования
- Максимальное напряжение коммутирования
- Цена компонента

Наиболее подходящим вариантом по вышеперечисленным параметрам является *NX3L4051PW* [18](таблица 2.4):

Таблица 2.4 - основные параметры *NX3L4051PW*

Параметр	Значение
Скорость переключения	8-19 нс
Сопротивление открытого канала	0,5 Ом
Максимальный ток коммутирования	500 мА
Максимальное напряжение коммутирования	4,6 В
Цена компонента	\$ 1.83

Минимальное количество таких коммутаторов на одно плечо рассчитаем исходя из выражения:

$$n_{\text{ком}} = \frac{n_{\text{конт}}}{n_{\text{кан}}}, \text{ где}$$

$n_{\text{ком}}$ – число необходимых коммутаторов

$n_{\text{конт}}$ – число коммутируемых контактов

$n_{\text{кан}}$ – число каналов коммутатора

Тогда, $n_{\text{ком}} = \frac{109}{9} \approx 14;$

На рисунке 2.11 представлена схема подключения первого коммутатора. Аналогично последовательно подключаются остальные 12. В последнем коммутаторе 2 последних входа не используются и подтянуты к земле.

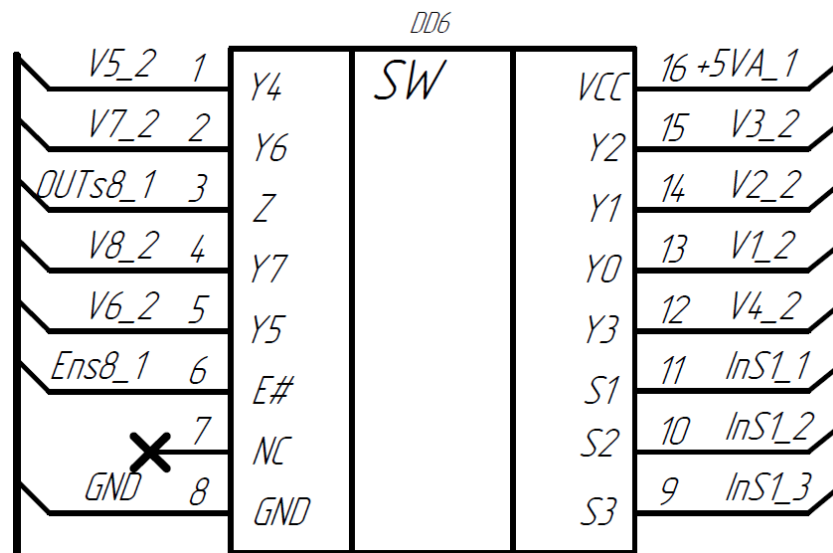


Рисунок 2.11 – Аналоговый 8 каналный коммутатор *NX3L4051PW*

Рассмотрим назначение выводов микросхемы:

$Y0$ -7- входные коммутируемые сигналы

VCC - напряжение питания аналоговой части микросхемы

GND - общий провод

$E\#$ - разрешающий сигнал

Z - выходной коммутируемый сигнал

$S1$ -3- логический сигнал выбора канала коммутирования

Имеем 14 выходных сигналов. Далее их необходимо скоммутировать в один для измерения напряжения. Для этого выберем 16 каналный коммутатор *ADG706BRUZ* со следующими основными техническими характеристиками [19] (таблица 2.5):

Таблица 2.5- основные параметры *ADG706BRUZ*

Параметр	Значение
Скорость переключения	40 нс
Сопротивление открытого канала	0,5 Ом
Максимальный ток коммутирования	100 мА
Максимальное напряжение коммутирования	5,5 В
Цена компонента	\$ 9.92

На рисунке 2.12 представлена схема подключения коммутатора измерения напряжения:

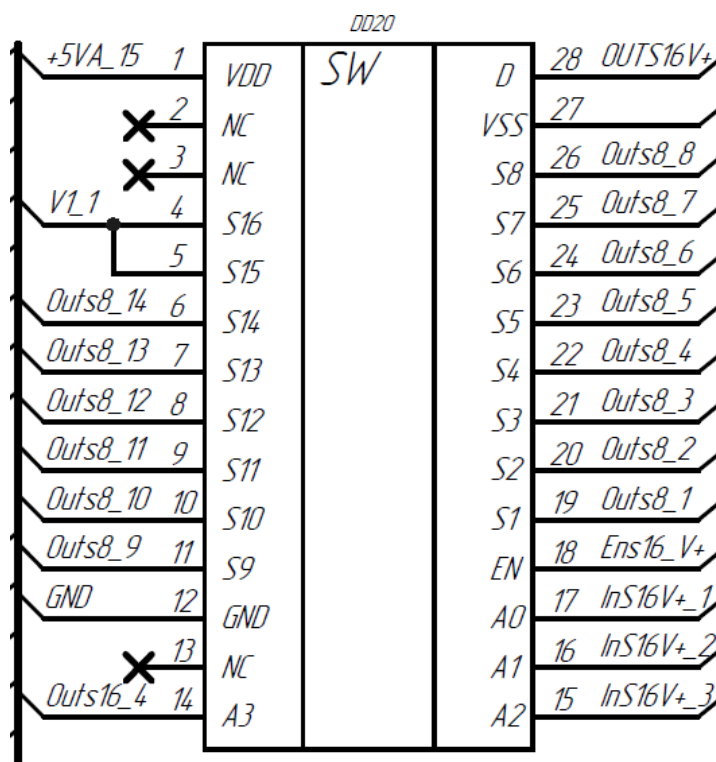


Рисунок 2.12 – Аналоговый 16 каналный коммутатор *ADG706BRUZ*

Подключение типичное: имеем питание микросхемы (*VSS*, *GND*), 16 входных каналов(*S1-16*), 1 выходной (*D*), разрешающий сигнал (*EN*) и логические сигналы переключения (*A0-2*).

Параллельно подключению этого коммутатора подключим коммутатор балансировки *ADG1406BCPZ*. Его выбор преимущественно связан с большим значением максимального тока на канал переключения, что является нестандартным решением для аналоговых коммутаторов. Это позволит

уместить необходимый функционал в одной микросхеме вместо того, чтобы проектировать отдельный узел коммутации для таких токов на полевых транзисторах. В таблице 2.6 представлены основные характеристики данного коммутатора [20]:

Таблица 2.6 - основные параметры *ADG1406BCPZ*

Параметр	Значение
Скорость переключения	40 нс
Сопротивление открытого канала	9,5 Ом
Максимальный ток коммутирования	550 мА
Максимальное напряжение коммутирования	5,5 В
Цена компонента	\$15.07

На рисунке 2.13 представлена схема подключения коммутатора балансировки:

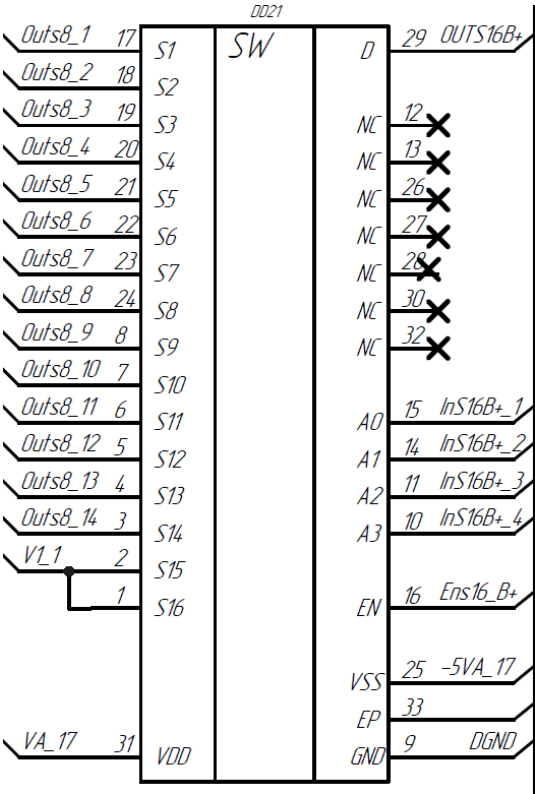


Рисунок 2.13 – Аналоговый 16 каналный коммутатор *ADG1406BCPZ*

Данная топология несет в себе как преимущества в виде экономия коммутаторов и скорости быстрогодействия, так и недостаток в виде ограничения процесса измерения напряжения некоторых элементов во время балансировки.

Опираясь на рисунок 2.14, рассмотрим эти ограничения:

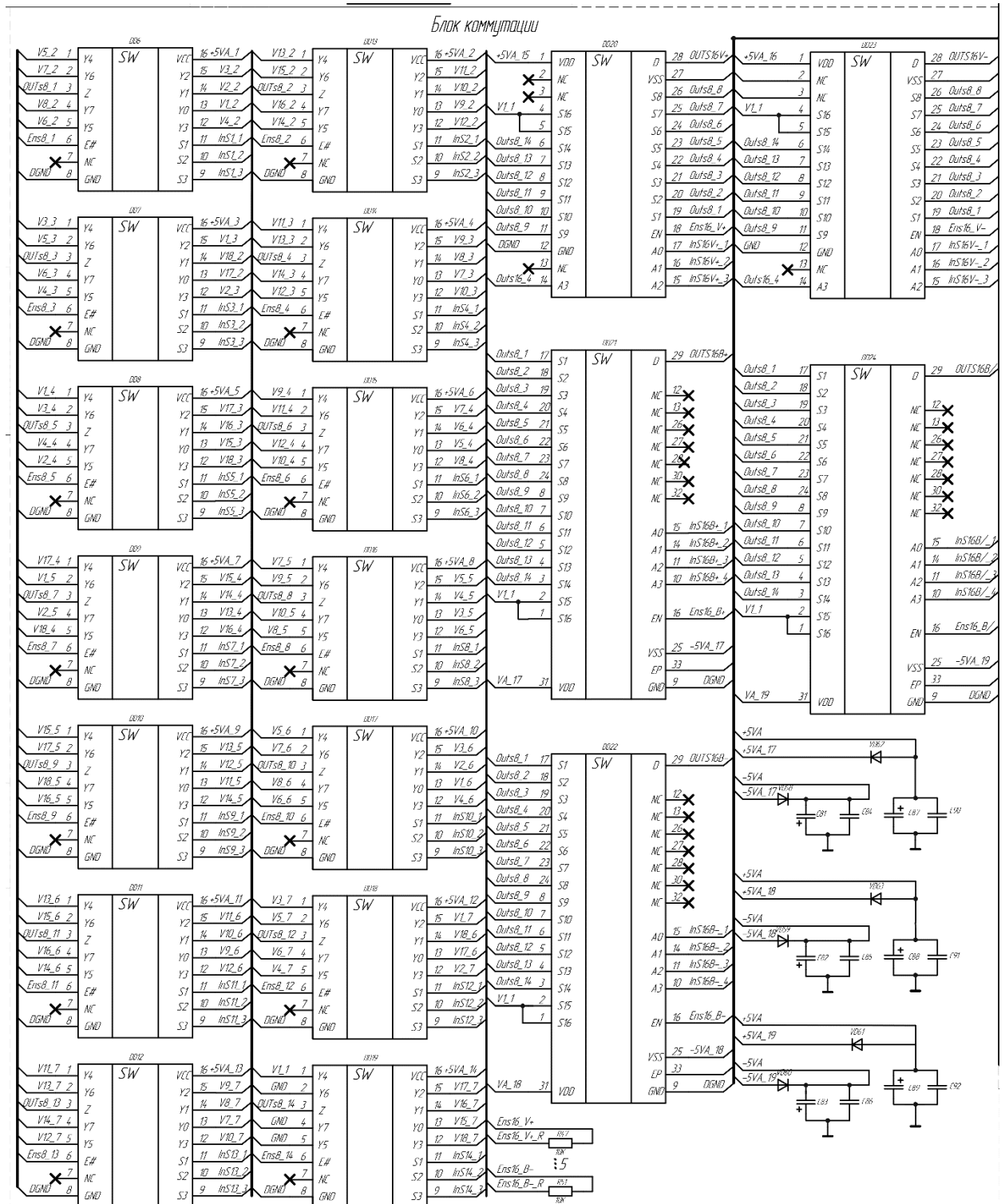


Рисунок 2.14 – Принципиальная схема узла общего блока коммутации

Точки измерения и балансировки в соответствии с рисунком 2.10, расположенные на элементах АКБ, поступают на 8 каналные коммутаторы U58-27. Далее 14 выходов с этих коммутаторов поступают на 16 каналные коммутаторы измерения напряжения и балансировки. Рассматривая выход коммутатора U17, получаем любую из точек измерения в диапазоне $V1_1 - V18_6$.

Важно отметить систематику, посредством которой подключены контакты сборки АКБ к коммутатору 1 звена. Такая последовательность позволяет производить коммутацию двух любых последовательно соединенных элементов для активной балансировки и, соответственно, без труда позволяет произвести коммутацию одного элемента для измерения напряжения и пассивной балансировки. Эта возможность в силу громоздкости системы была проверена и рассчитана с помощью программы, реализующей последовательный подбор и оптимизацию решения (рисунок 2.15):

```
[ [ 11  22  32  42  52  62  72  82 ]
  [ 92 102 112 122 132 142 152 162 ]
  [172 182  13  23  33  43  53  63 ]
  [ 73  83  93 103 113 123 133 143 ]
  [153 163 173 183  14  24  34  44 ]
  [ 54  64  74  84  94 104 114 124 ]
  [134 144 154 164 174 184  15  25 ]
  [ 35  45  55  65  75  85  95 105 ]
  [115 125 135 145 155 165 175 185 ]
  [ 16  26  36  46  56  66  76  86 ]
  [ 96 106 116 126 136 146 156 166 ]
  [176 186  17  27  37  47  57  67 ]
  [ 77  87  97 107 117 127 137 147 ]
  [157 167 177 187  12   0   0   0 ]]
Количество пересечений = 0
```

Рисунок 2.15-Вывод программы подбора топологии входов для 1 звена коммутаторов

В обычном режиме работы BMS происходит поочередное измерение

напряжения каждого из элементов, однако, когда необходима балансировка, то приоритет отдается коммутатору балансировке. Это означает, что 8 канальный коммутатор, на котором находится ячейка, которой необходима балансировка резервируется для коммутатора балансировки и происходит процесс балансировки.

Остальные незадействованные 8 канальные коммутаторы подвергаются вышеописанному циклу измерения напряжения с помощью коммутатора измерения напряжения. Однако, измерение напряжения также необходимо и ячейке, которая балансируется и тем ячейкам, точки измерения которых расположены на 8 канальном коммутаторе, зарезервированном для балансировки.

Поэтому, во время процедуры балансировки процесс измерения напряжения будет происходить в первую очередь на зарезервированном канале балансирования, далее - свободные каналы и после - останавливая на короткий промежуток времени процесс балансировки и коммутируя остальные точки этого канала, контакты ячеек, находящихся на этих точках.

Такой подход позволит максимально использовать коммутаторы 1 звена и обеспечат высокие показатели измерения напряжения на элементах АКБ.

Рассмотрим обвязку узла. Резисторы *R18, R19* [13] подтягивают к напряжению питания входы *Enable* коммутаторов 1 звена, так как они инвертированы по логическому входу. Резисторы *R20, R21* [13] наоборот-подтяжка к земле ножек *Enable*, но уже коммутаторов 2 звена.

Пара из керамического и танталового конденсатора *C81-C92* [14,15] образуют фильтр по питанию, необходимый для подавления ВЧ и НЧ помех.

C19-C22 [14,15] несут аналогичную функцию за исключением того, что эта сборка ориентирована на двухполярное питание и кроме того, за счет диодов *D58-D63* [16] реализуется падение напряжения до номинального напряжения питания коммутатора.

2.3.5 Расчёт блока измерения напряжения на элементах АКБ

Топология блока основывается на использовании дифференциального усилителя на основе ОУ с предварительной фильтрацией ВЧ помех и выбросов.

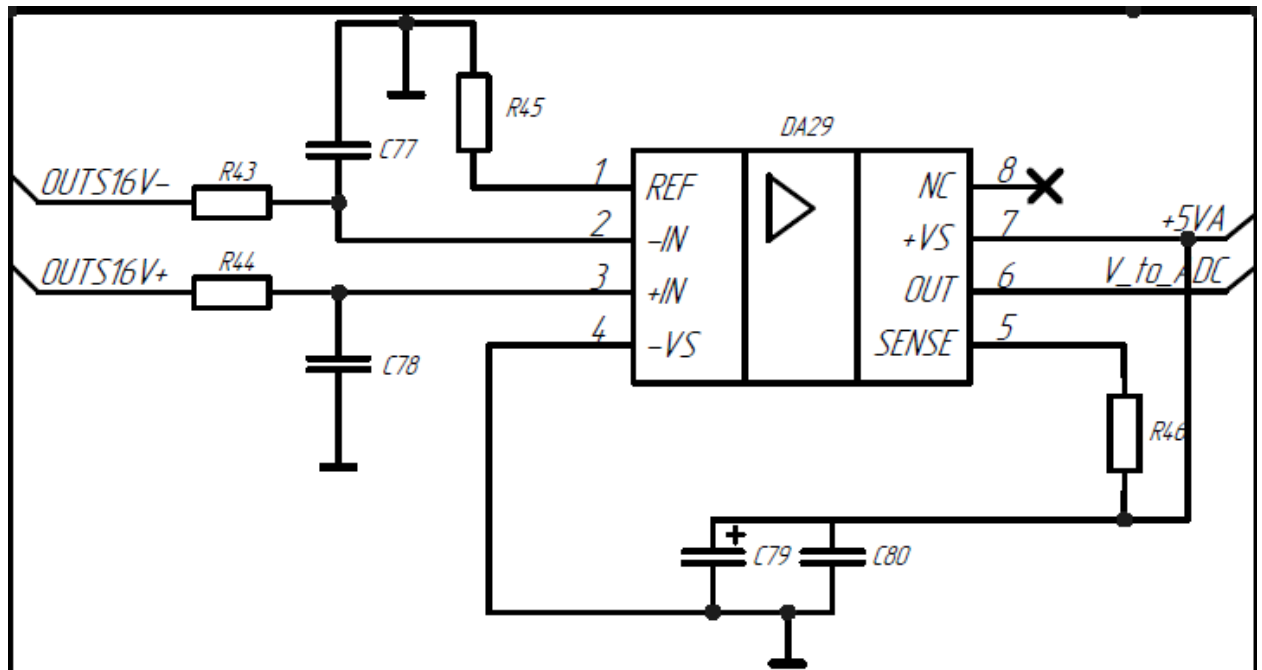


Рисунок 2.16 – Принципиальная схема блока измерения напряжения

Как видно из представленной схемы узла на рисунке, дифференциальный усилитель представлен в виде микросхемы, внутри которой уже установлены входные резисторы. Кроме того, присутствует возможность подключения смещения каждого из дифференциальных уровней с помощью ног *REF* и *SENSE*. Они же являются и каналами для настройки коэффициента обратной связи.

Фильтрация ВЧ помех построена на пассивных RC фильтрах по каждому из каналов. Частота среза- 10кГц.

Учитывая, что входное сопротивление в виде резистора уже реализовано внутри микросхемы и составляет 40 кОм, необходимо выбрать емкость, заряд которой не окажет существенного влияния на выходной дифференциальный сигнал по уровню. Примем *C52*, *C53* равными 1 нФ [17]

Тогда, рассчитаем сопротивление резисторов исходя из выражения:

$$f_{cp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C};$$

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot f_{cp}};$$

$$R = \frac{1}{6,28 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^3} = 15,92 \text{ кОм}.$$

Выберем сопротивление 16 кОм производства *BOURNS* [16].

Важно обеспечить стабильное питание микросхемы. Для этого традиционно используют связку из керамического конденсатора и электролита, в нашем случае танталового. Первый из них обеспечит сглаживание высокочастотных помех, а второй - стабильность при незначительных просадках напряжения, а также сглаживание низкочастотных помех и наводок.

В источнике 19 приведены оптимальные номиналы и типоразмеры для таких задач. Керамический конденсатор принято брать номиналом 0,1 мкФ, а танталовый конденсатор величиной 1мкФ. В соответствии с этим примем C50, C51 емкостью 1 мкФ [14,15].

Резисторы на *sense* и *ref* - 36к

2.3.6 АЦП измерения напряжения

Показания с блока измерения напряжения необходимо оцифровать для дальнейшей математической обработки и принятия решения микроконтроллером. Для этих задач применяют аналого-цифровой преобразователь. Необходим одноканальный высокочастотный АЦП с высоким количеством разрядов, имеющий в своей топологии возможность передачи данных по протоколу *SPI*. Он должен обеспечить погрешность преобразования не более 100 мкВ.

Зная диапазон входных данных от 0 до 5 вольт и разрешение по напряжению рассчитаем разрядность АЦП:

$$\Delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^n}; n = \log_2 \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\Delta U}$$

$$n = \log_2 \frac{5}{100 \cdot 10^{-6}} = 15,6$$

Следовательно, необходим АЦП с 16 разрядами.

Необходимо, чтобы процесс измерения напряжения на всех элементах происходил один раз в 1 мс. Имея время переключения коммутаторов 1 звена, рассчитаем время, которое потребуется для коммутирования всех элементов поочередно с задержкой на зарядку фильтрующих конденсаторов в 3τ :

$$\begin{cases} T_{\text{ц.изм.}} = (T_{\text{ком}} + 3\tau) \cdot n_p \cdot n_s \\ T_{\text{ком}} = T_{\text{откр}} + T_{\text{закр}} \\ \tau = R \cdot C \end{cases}$$

$$T_{\text{ц.изм.}} = (T_{\text{откр}} + T_{\text{закр}} + 3 \cdot R \cdot C) \cdot n_p \cdot n_s$$

$$T_{\text{ц.изм.}} = (19 \cdot 10^{-9} + 8 \cdot 10^{-9} + 3 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9}) \cdot 6 \cdot 18 = 3,24 \text{ мс}$$

А время переключение одного канала соответственно:

$$T_{\text{ц.}} = \frac{T_{\text{ц.изм.}}}{108};$$

$$T_{\text{ц.}} = \frac{3,24 \text{ мс}}{108} = 30 \text{ мкс};$$

$$f = \frac{1}{T_{\text{ц.}}};$$

$$f = \frac{1}{30 \cdot 10^{-6}} = 33,33 \text{ кГц};$$

Рассчитаем шаг дискретизации по времени исходя из выражения:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2 \cdot f_{\max}};$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{2 \cdot 33,33 \cdot 10^3} = 15 \text{ мкс}$$

Был выбран *MAX11100EUB+* со следующими основными характеристиками [20] (таблица 2.7):

Таблица 2.7 – основные параметры АЦП *MAX11100EUB+*

Параметр	Значение
Название	<i>MAX11100</i>
Тип АЦП	Последовательной аппроксимации
Максимальная частота выборки	<i>200ksps</i>
Количество разрядов	16
Максимальный ток потребления	2.45 мА
Ток потребления в спящем режиме	0.1 мкА
Протокол передачи данных	SPI

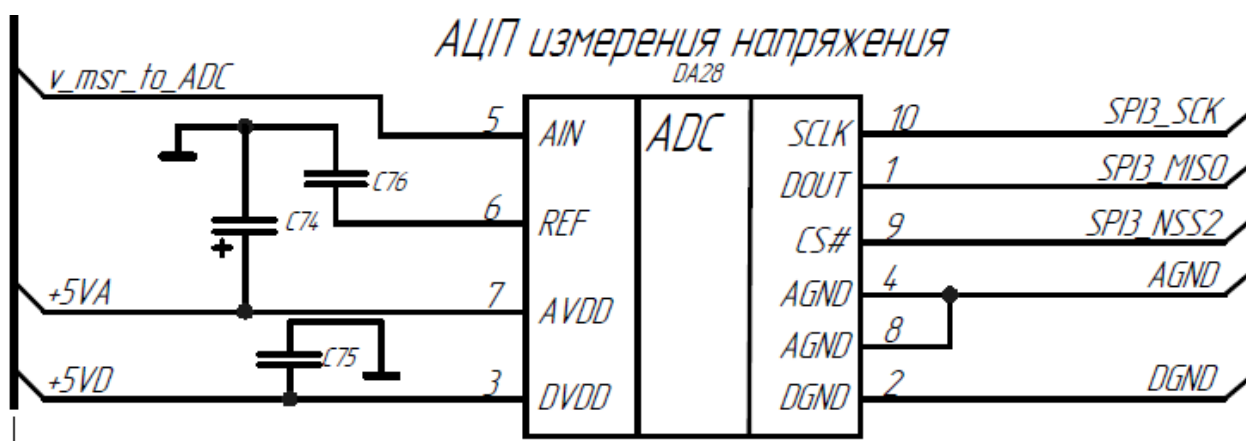


Рисунок 2.17 – Принципиальная схема блока АЦП измерения напряжения

C74 необходим для фильтрации помех на аналоговом питании микросхемы, а *C75* для цифрового питания соответственно. *C76* рекомендован к подключению производителем [20]. Он выполняет функцию настройки разрешения по напряжению. Выводы *SCLK*, *DOUT*, *CS#* образуют протокол передачи данных *SPI*.

2.3.7 Расчет узла переключения р-сборок АКБ

Данный узел представляет собой ключ на МОП транзисторе с защитами от скачков напряжения как со стороны затвора и логического вывода микроконтроллера, так и со стороны силовой части напряжения сток-исток

реализованные с помощью параллельно подключенного стабилитрона в случае с защитой от перенапряжения сток-исток и подтянутого к земле с обратной полярностью в другом (рисунок 2.18):

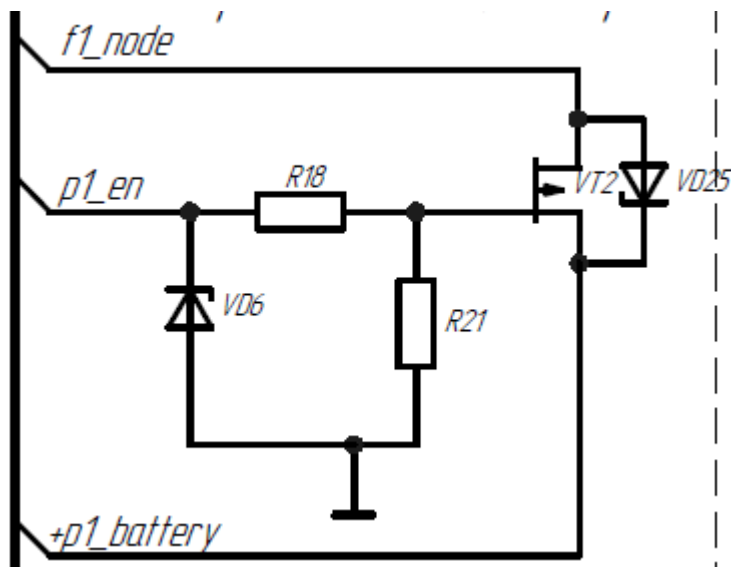


Рисунок 2.18 – Принципиальная схема узла переключения *P*-сборок АКБ

В первую очередь необходимо определить максимальное значение тока через такой узел. Так как таких узлов будет 18, исходя из факта, что параллельно подключенных сборок 6S1P-18, то ток, протекающий через один такой узел будет рассчитываться исходя из выражения:

$$I_{\text{узла}} = \frac{I_{\text{н.макс.}}}{p_n - 0.1p_n}$$

$$I_{\text{узла}} = \frac{25\text{A}}{18 - 2} = 1,57\text{A}$$

Выражение $0.1p_n$ несет следующий функциональный смысл: во время работы АКБ допускается аварийное отключение не более 10% последовательных сборок, не прекращая питание нагрузки. Соответственно, максимальный ток на узел необходимо рассматривать исключая 2 сборки. Кроме того, предъявляются требования по напряжению сток-исток как максимальное напряжение последовательной сборки из 6 элементов 18650 с запасом 10% на влияние побочных факторов:

$$U_{\text{СИ}} \geq 1,1 \cdot (U_{\text{эл.макс.}} \cdot n_s)$$

$$U_{\text{СИ}} \geq 1,1 \cdot (4,2 \cdot 6)$$

$$U_{\text{СИ}} \geq 27,72 \text{ В}$$

Учитывая то, что необходимо коммутировать нагрузку положительным потенциалом, то целесообразно использовать *P*-канальный МОП транзистор.

Исходя из всего вышесказанного, выберем *CES2323* [21]. Его основные характеристики представлены в таблице:

Таблица 2.8 - Основные характеристики МОП транзистора *CES2323*:

Параметр	Значение
Тип проводимости	<i>P</i>
Сопротивление открытого канала	70 мОм
Непрерывный ток стока	4,2 А
Напряжение сток-исток	30 В

Сопротивление *R18* необходимо для ограничения большого тока заряда затворной емкости в процессе закрытия или открытия ключа. Ограничимся оптимальным значением для прямого подключения к логическому выводу микроконтроллера/расширителя портов как 25 мА. Тогда:

$$R_3 = \frac{U_{\text{л.мк.}}}{I_{\text{мк.макс.}}}$$

$$R_3 = \frac{5}{0,025} = 200 \text{ Ом}$$

Резистор *R25* исходя из источника 4 примем 1 кОм.

Требования к стабилитрону *VD6* и *VD25* складываются из порогового напряжения их пробития, а также краткосрочной рассеиваемой мощности. Напряжение пробития *VD6* примем 7В, а *VD25*-30В. Тогда, в роли *VD6* выберем *UCLAMP0541Z* [22], а в роли *D25* *1.0SMBJ30A* [23].

2.3.8 Расчёт блока измерения тока на p-сборках АКБ

Измерение тока происходит за счет *ACS714* - датчика тока на эффекте Холла [24]. Это решение повышает безопасность измерения за счет гальванической развязки между измеряемым током и напряжением, образующимся на выводах микросхемы (рисунок 2.19):

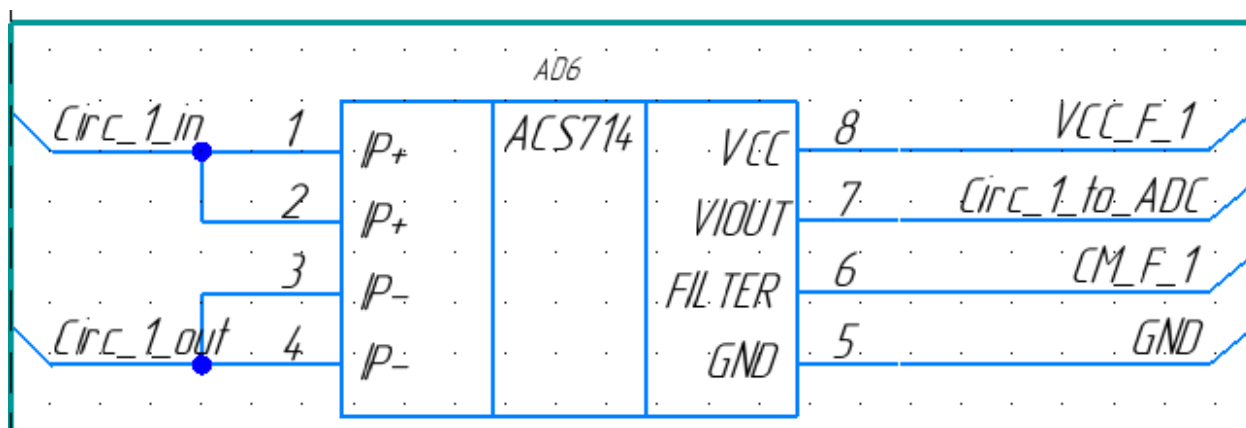


Рисунок 2.19- Принципиальная схема блока измерения тока на P-сборках АКБ

Данная микросхема выбрана в первую очередь за счет ее показателей измеряемого тока до 5А с ошибкой измерения в 1,5 процента и всего 5 мкс задержки между измеряемым током и полученным эквивалентом напряжения.

Контакты используемой микросхемы имеют интуитивное назначение, исходя из предоставленных обозначений.

IP+ представляет собой контакт для подключения измеряемого тока, а *IP-* выход этого же контакта, которые в дальнейшем идет на нагрузку.

Ножки *VCC*, *GND* представляют собой основные контакты для питания самого датчика.

VIOUT выходной контакт, представляющий собой сигнал напряжения, отражающий величину протекающего через датчик измеряемого тока.

Filter- представляет собой контакт для подключения дополнительного керамического конденсатора обвязки для подавления ВЧ помех.

Питание микросхемы следует подкрепить танталовым конденсатором на 1 мкФ [15], а фильтрующий керамический конденсатор на вышеописанных контактах выберем номиналом 1 нФ [14] исходя из рекомендаций производителя [19].

2.3.9 Расчёт АЦП для блока измерения тока на р-сборках АКБ

К измерению тока предъявляются требования погрешности не более 1 мА. Учитывая, что датчики тока преобразовывают величину тока в напряжение, из коэффициента преобразования равен 66 мВ/А , то разрядности в 12 бит дающей точность до 76,3 мкВ будет с избытком. Кроме того, необходима микросхема не только, содержащая в себе АЦП, но и внутренний коммутатор на 18 каналов. Было найдено решение в виде 11 канального *SAR* АЦП. Использование двух таких микросхем даст желаемый результат, а также сократит общее время цикла измерения тока на последовательных сборках АКБ.

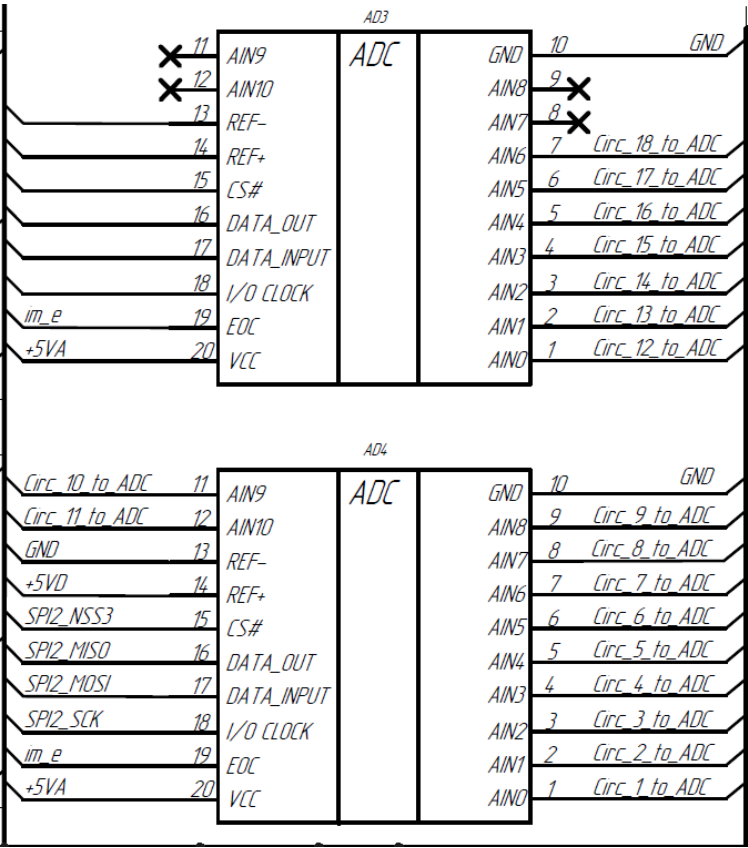


Рисунок 2.20- Принципиальная схема блока АЦП измерения тока на P-сборках АКБ

Был выбран *TLC2543N* [25] со следующими основными характеристиками (таблица 2.9):

Таблица 2.9 – основные параметры АЦП *TLC2543N*

Параметр	Значение
Название	<i>TLC2543N</i>
Тип АЦП	<i>SAR</i>
Максимальная частота выборки	10 <i>MSPS</i>
Количество разрядов	12
Максимальный ток потребления	4 мА
Ток потребления в спящем режиме	1 мкА
Протокол передачи данных	<i>SPI</i>

2.3.10 Расчет блока переключения балансировки

Блок переключения балансировки представляет собой сборку из n-канальных МОП транзисторов с изолированным друг от друга управлением. Микроконтроллер, подавая положительный потенциал со своего логического выхода(ов) открывает один из транзисторов, тем самым подтягивая всю схему одной из балансировок к общему проводу (рисунок 2.21).

время прохождения коммутационных процессов. *D24* - выполняет роль защиты от перенапряжения канала транзистора сток-исток.

Выбор транзистора *VT1* основан на достижении необходимых параметров максимального напряжения и тока сток-исток, сопротивления открытого канала и вытекающей из него необходимости величины максимальной рассеиваемой мощности. Первый из перечисленных параметров известен, исходя из значения максимально возможного напряжения элемента АКБ - 4.2 В. Ток, протекающий в этом контуре, должен быть не более $0,1C$, где *C*-емкость батареи. Однако для плавного и стабильного протекания балансировки в устройствах аналогичного назначения и в источнике 6 принято не превышать это значение более 120 мА для аналогичных элементов АКБ. Сопротивление открытого канала желательно выбрать меньше 1 Ома, а при более точном подборе опираться на оптимум цена-качество.

Исходя из всего вышеперечисленного был выбран *MTN003N02Y3* [28], основные характеристики которого представлены в таблице:

Таблица 2.11- Основные параметры *MTN003N02Y3*

Параметр	Значение
Тип проводимости	<i>N</i>
Сопротивление открытого канала	290 мОм
Непрерывный ток стока	560 мА
Напряжение сток-исток	20 В
Мощность рассеивания	150 мВт

Для расчета сопротивления резистора нагрузки ограничимся током балансировки в 100 мА. Исходя из выражения:

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{эл.макс.}}}{I_{\text{бал.}}};$$

$$R_{\text{н}} = \frac{4,2 \text{ В}}{100 \text{ мА}} = 42 \text{ Ом};$$

Конденсатор выберем номиналом 1 мкФ

К коммутатору не предъявляется высоких требований по скорости переключения, основные интересующие параметры — это сопротивление открытого канала, максимальное напряжение и ток выходного канала.

Выберем *NLAS4157* [29]. Его основные характеристики представлены в таблице 2.12:

Таблица 2.12- Основные параметры *NLAS4157*

Параметр	Значение
Тип проводимости	N
Сопротивление открытого канала	1 Ом
Длительный ток, протекающий через входной и выходной каналы	300 мА
Максимальное напряжение канала	5,5 В
Время переключения	15/20 нс

В роли фильтрующий обвязок *C29*, *C31* выберем уже рассмотренную связку из танталового и керамического конденсатора емкостями 1 и 0,1 мкФ [14,15].

2.3.12 Расчет активной балансировки

Данный балансировщик относится к типу дроссельных по запатентованной технологии *PowerPump* компании *TexasInstruments* (рисунок 2.23). Специально для реализации такой балансировки были выпущены в серийное производство контроллеры балансировки, однако, топология их

применения сильно отличается как по количеству балансируемых ячеек, так и способом подключения.

Идея технологии *PowerPump* заключена в 3 важных этапах, на которые разделяется работа схемы.

Рассмотрим случай, когда верхняя ячейка перезаряжена, а нижняя недозаряжена.

Верхний ключ открывается, и энергия с верхнего элемента начинает передаваться в $L1$.

После того, как катушка накопила энергию электрического тока в эквиваленте электромагнитного поля, происходит закрытие верхнего ключа и теперь энергия, запасенная в катушке, начинает протекать по нижнему контуру в том числе и по паразитному диоду нижнего ключа. Нижняя ячейка начинает заряжаться энергией верхней ячейки, запасенной с помощью посредника в виде катушки.

Когда паразитный диод нижнего ключа перестает пропускать ток, возникает колебательный контур, образованный $L1$, $R9$, $C6$ и паразитного диода верхнего ключа. $R36$ выступает в роли демпфирующего элемента для этого колебательного процесса, а $C5$, $C6$ позволяет уменьшить пульсации напряжения балансировки во время переходных импульсных процессов.

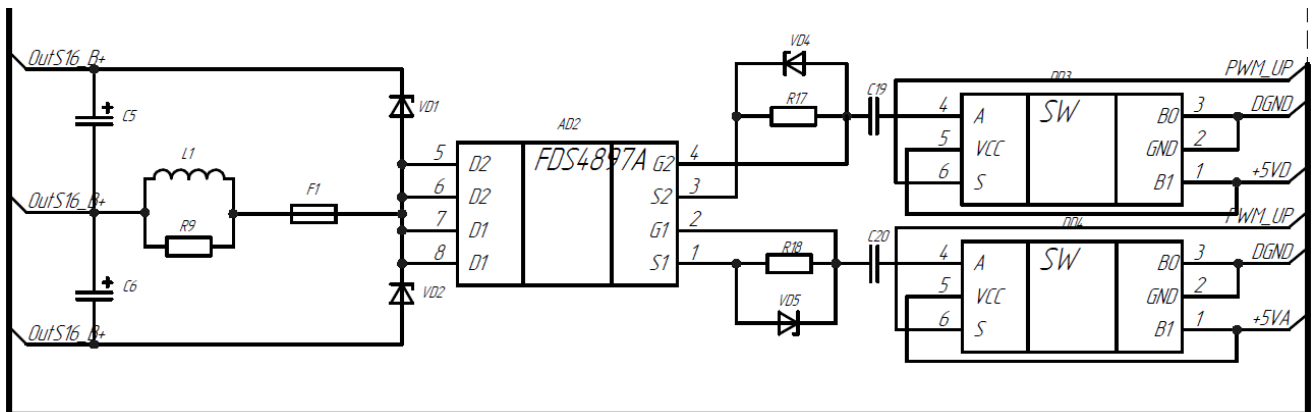


Рисунок 2.23- Принципиальная схема блока активной балансировки

В роли транзисторной комплементарной пары с большим запасом по

току была выбрана микросхема *FDS4897A* [30]. Ее характеристики представлены в таблице 2.13:

Таблица 2.13 – Основные характеристики КМОП сборки *FDS4897A*

Параметр	Значение
Тип проводимости	<i>N, P</i>
Сопротивление открытого канала	0.028 Ом, 0.050 Ом
Непрерывный ток стока	4,7 А, 4,5 А
Напряжение сток-исток	60 В
Мощность рассеивания	3,4 Вт

Стабилитроны *D1, D2* выбраны аналогично стабилитрону *D24*. Управление ключами будет производиться ШИМ сигналом частотами порядка 200 кГц. С целью подавления постоянной составляющей сигнала установлены конденсаторы *C19, C20*. Коммутаторы *DD3, DD4* выбраны аналогичными *DD5*.

Элементы *L1, C5, C6, R9* выбраны исходя из рекомендаций технической документации обладателя технологии [31].

R17, R18 выполняют роль подтяжки затвора к истоку для исключения ложного срабатывания.

F1 представляет собой предохранитель на 2 А [32] для предотвращения случая короткого замыкания, в момент, когда процесс балансировки может стать неуправляемым и опасным.

2.3.13 Блок коммутатора нагрузки

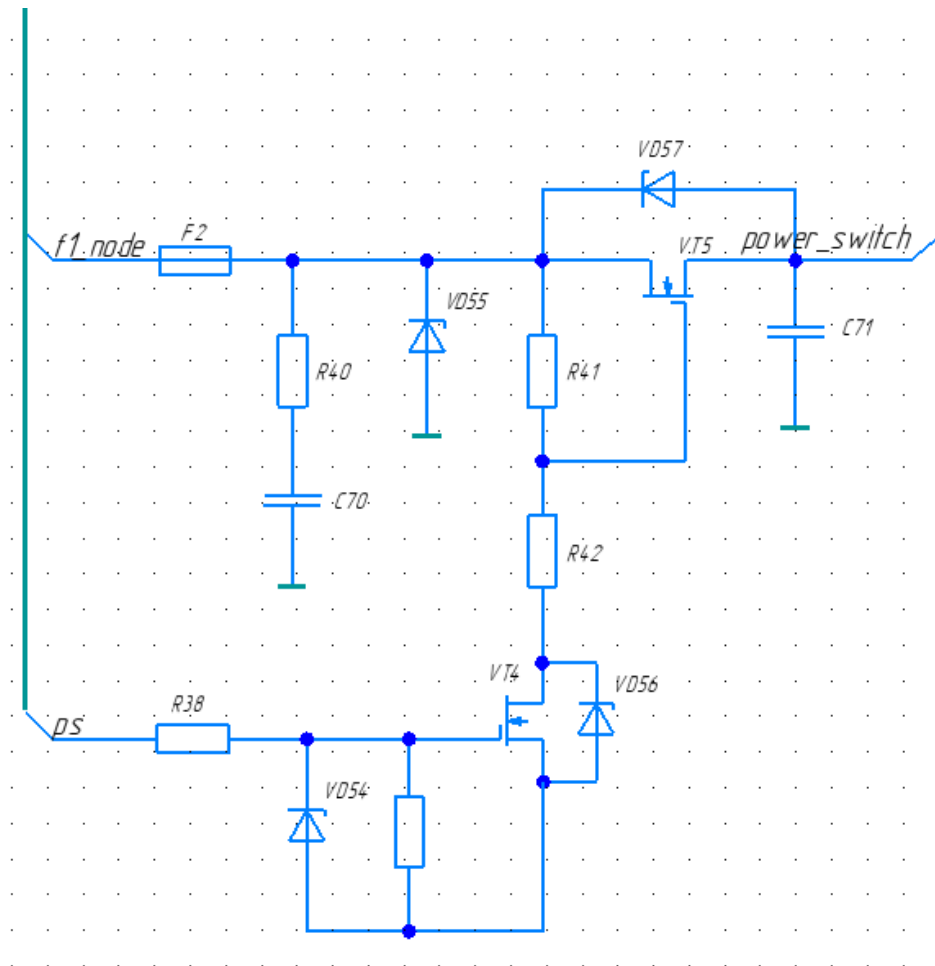


Рисунок 2.24- Принципиальная схема блока коммутатора нагрузки

Исходя из технической документации имеем величину стандартного тока зарядки одного элемента в 1300 мА, а напряжение заряженного элемента 4,2В. Зная количество S и P элементов в сборке, определим величину тока и напряжения:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{BX}} &= n_p \cdot I_{\text{з.ст.}}; \\
 U_{\text{BX}} &= U_{\text{э.м.}} \cdot n_s; \\
 I_{\text{BX}} &= 18 \cdot 1,3 = 23,4 \text{ A}; \\
 U_{\text{BX}} &= 4,2 \cdot 6 = 25,2 \text{ В};
 \end{aligned}$$

В роли силового переключающего элемента был выбран N -канальный МОП транзистор *SM4186T9RL* [33]. Его характеристики представлены в таблице 2.14:

Таблица 2.14 – основные характеристики транзистора *SM4186T9RL*:

Параметр	Значение
Тип проводимости	<i>N</i>
Сопротивление открытого канала	13,3 мОм
Непрерывный ток стока	35А
Напряжение сток-исток	40 В
Мощность рассеивания	50 Вт

Для корректного открытия силового транзистора необходимо предварительно усилить сигнал с микроконтроллера. Для этого подойдет еще один N-канальный МОП транзистор с меньшими характеристиками *SM2326NSANC-TRG* [34]. Его основные характеристики представлены в таблице 2.15:

Таблица 2.15 – основные характеристики транзистора *SM2326NSANC-TRG*

Параметр	Значение
Тип проводимости	<i>N</i>
Сопротивление открытого канала	70 мОм
Непрерывный ток стока	3А
Напряжение сток-исток	20 В
Мощность рассеивания	830 мВт

R41 выполняет роль подтяжки затвора силового транзистора к его истоку.

D54,55 выполняют аналогичную функцию *D44*, как и *D56, D57 D53* [27]. выберем *MMSZ5233BS-7-F, BZT52B10S RRG*, а для *D22*

1SMAF4751A- максимальное обратное напряжение 30 В.

F2- предохранитель на 30А [35]

2.3.14 Расчет блока контроля входных и выходных параметров

Данный блок реализован на высокоточном модуле измерения тока и

напряжения *INA229* [36]. Это связано, в первую очередь, с высокими требованиями как по точности измерений входных и выходных параметров батареи, так и по скорости передачи данных.

В таблице 2.16 представлены основные характеристики данного модуля

Таблица 2.16 – основные характеристики INA 229

Параметр	Значение
Максимальное значение измеряемого напряжения	85 В
Протокол передачи данных	<i>SPI</i>
Разрядность АЦП	20 Бит
Ток потребления	640 мкА
Точность мониторинга мощности	0,5%

Топология узла основана на микросхеме измерения тока и напряжения и заключается в правильном подключении обвязочных элементов, контактов входа, выхода и контактов протокола передачи (рисунок 2.25):

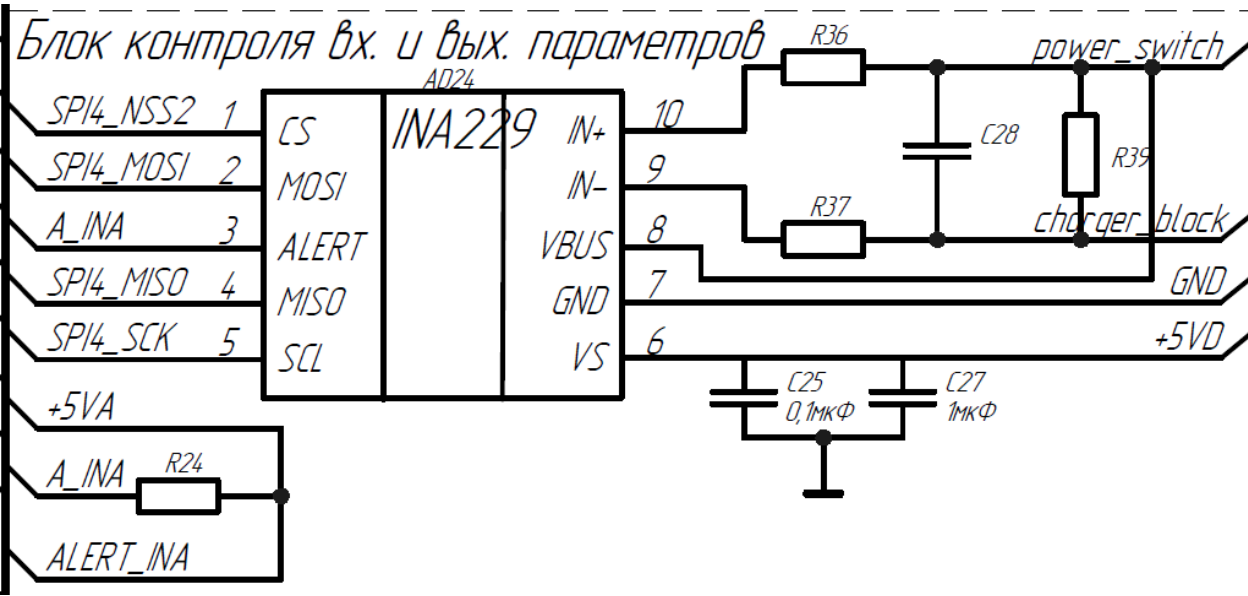


Рисунок 2.25- Принципиальная схема блока контроля входных и выходных параметров

Рассмотрим подключение микросхемы к периферии. Выводы *CS*, *MOSI*, *MISO*, *SCL* образуют протокол передачи *SPI*. Вывод *ALERT* сигнализирует о

работе контроллера, а если углубляться в внутреннюю топологию, то это многофункциональный вывод сигнала предупреждения, открытый сток. Соответственно данный логический вход необходимо ограничить по току с помощью $R24$. Ограничение в 20 мА обеспечит резистор в 10 кОм при напряжении 5 В[13].

Рассчитаем сопротивление шунта. Микросхема поддерживает 2 падения напряжения на выводах $in+$, $in-$ — это 163,84 и 40,96 мВ. Выберем второе показание как наиболее точное. Зная ток, протекающий через шунт и падение напряжения на нем рассчитаем его сопротивление:

$$R_{ш} = \frac{U_{пад}}{I_{вх.макс}};$$
$$R_{ш} = \frac{40,96 \cdot 10^{-3}}{24A} = 1,7 \text{ мОм};$$

Элементы $R36$, $R37$, $C28$ подобраны исходя из рекомендаций в технической документации микросхемы и обеспечивают фильтрацию сигнала падения напряжения с шунтирующего резистора [36].

Конденсаторы $C30$, $C32$ выполняют функцию фильтрации напряжения питания микросхемы. Их номиналы аналогичны вышеприведенному подбору в узлах [19].

2.3.15 Расчет системы индикации устройства

Система индикации устройства представляет собой ряд светодиодов, которые сигнализируют о том или ином состоянии системы. Они подключены к сдвиговому регистру через токоограничивающие конденсаторы (рисунок 2.26):

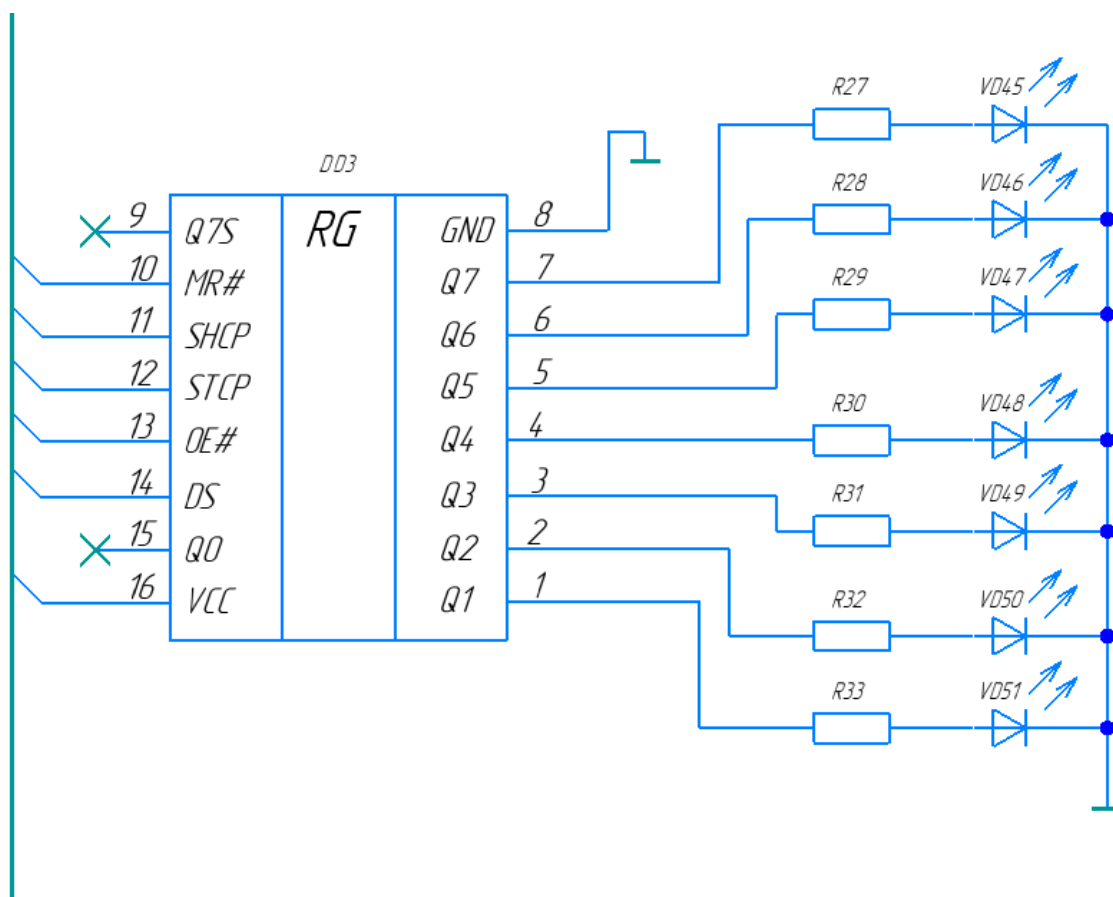


Рисунок 2.26- Принципиальная схема индикации устройства

В качестве светодиодов выберем *C72044* [37] с напряжением питания 5 В и током 5 мА.

Зная ток ограничения в 5 мА рассчитаем сопротивление резисторов *R19-R25*:

$$R = \frac{U_{\text{рег}}}{I_{\text{св}}};$$

$$R = \frac{5 \text{ В}}{5 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 1 \text{ кОм};$$

Выберем сопротивление номиналом 1 кОм.

Выберем в качестве сдвигового регистра *74HC595PW* [38]. Это 8 разрядная микросхема, выдающая на контактах *Q1-Q7* сигнал величиной до 35 мА 5,3 В.

2.3.16 Расчет системы интерфейса устройства

Интерфейс реализован посредством дисплея с тачскином 320x240 точек с дополнительным управлением в виде энкодера [39,40] (рисунок 2.27):

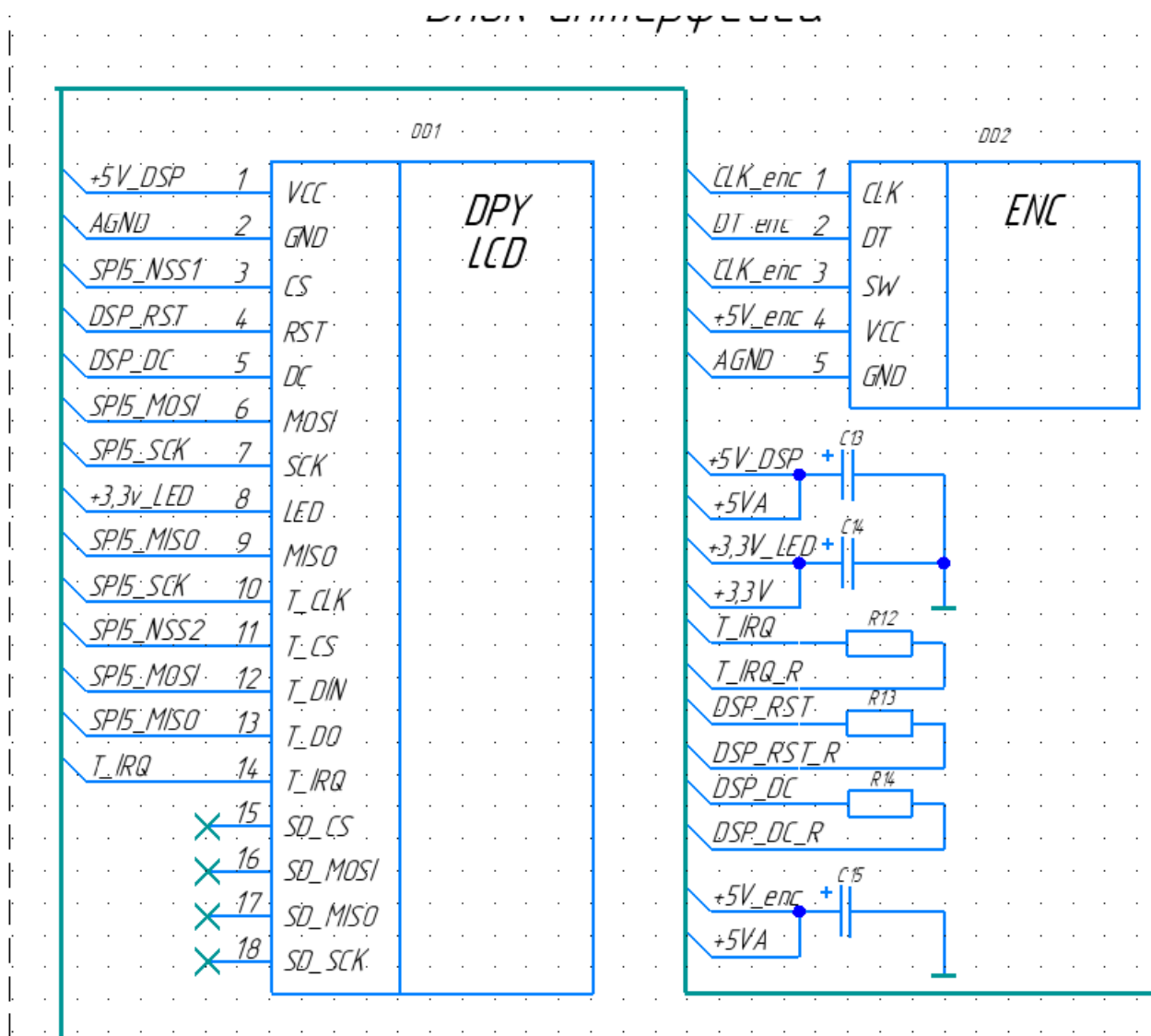


Рисунок 2.27- Принципиальная схема интерфейса устройства

Контакты для подключения SD карты не требуются.

Передача данных дисплея происходит по протоколу *SPI*.

C13, *C14* выступают в качестве фильтрующих электролитических конденсаторов по питанию подсветки (3,3 В) и самого контроллера с дисплеем (5 В).

2.3.17 Подбор микроконтроллера и расчет необходимых к нему систем обвязки.

Был выбран *STM32F411CCU6TR* [41] в связи с высокой нагрузкой на шину передачи данных *SPI*, большим количеством периферийных узлов и высокими требованиями к математической обработке массива входящих данных.

В таблице 2.17 приведены его основные характеристики:

Таблица 2.17 – основные характеристики микроконтроллера *STM32F411CCU6TR*

Параметр	Значение
Ядро	Arm 32-bit Cortex
Максимальная частота работы	100 MHz
Память	Up to 512 Kbytes of Flash memory – 128 Kbytes of SRAM
Количество портов ввода-вывода	81
Интерфейсы передачи данных	I2C, USART, SPI, SDIO, ISO 7816 interface, USB 2.0 full-speed device/host/OTG controller
Напряжение сток-исток	40 В
Мощность рассеивания	50 Вт
Напряжение питания	1.7 V to 3.6 V
Рабочая температура	- 40 to + 125 °C

На рисунке 2.28 представлена принципиальная схема подключения элементов обвязки к микроконтроллеру:

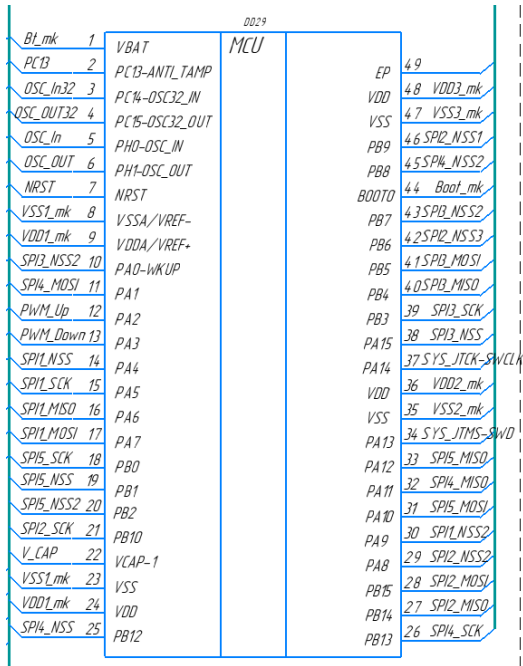
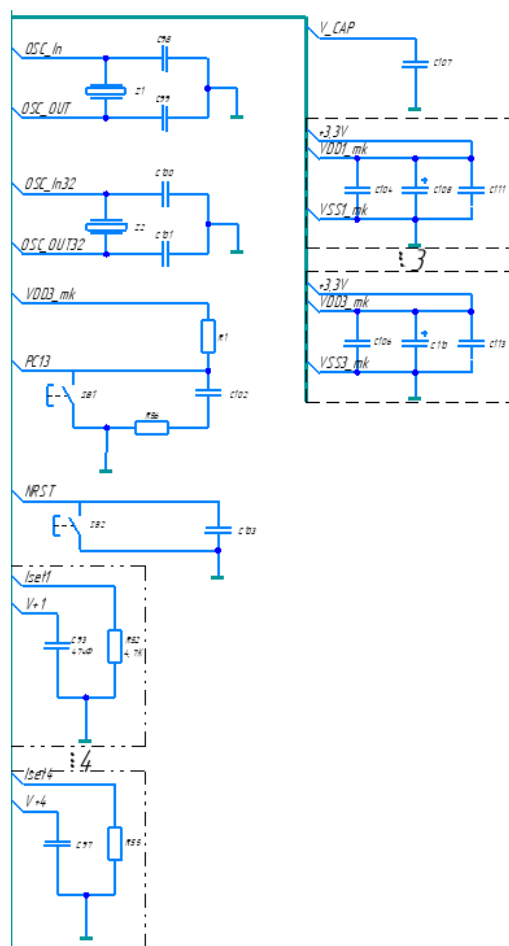


Рисунок 2.28- Схема подключения микроконтроллера

На рисунке 2.29 представлена схема узлов кварцевых резонаторов, включения и перезапуска устройства



Топология схем взята из технической документации и рекомендована производителем [41].

Для понимания необходимости в расширителе портов необходимо просчитать всю периферию, представляющую собой блоки, описанные в 2.3.1-2.3.14.

Составим сводную таблицу (таблица 2.18) по количеству портов ввода, вывода каждого из блоков, необходимые ему протоколы передачи и количество передаваемых данных, если таковые присутствуют.

Таблица 2.18 – Сводная таблица использования протоколов передачи и портов ввода вывода на каждый из блоков устройства

Название узла	Количество модулей в узле	Общее количество необходимых портов ввода вывода	Протокол передачи
Блок измерения температуры	4	1	SPI
АЦП для датчиков температуры			
общий блок коммутации	14*3, 4*4 + 14 в 1 и 4 в 1(enable)	58	
блок измерения напряжения на элементах АКБ	1	1	SPI
узел переключения р-сборок АКБ	1*18	18	
блок измерения тока на р-сборках АКБ	2	4	SPIx2
блок переключения балансировки	2	2	
пассивная балансировка	1	1	отдельные порты
активная балансировка	2 ШИМ	2	
коммутатор нагрузки	1	1	SPI
блок контроля входных и выходных параметров	1	1	
индикация устройства	3	3	SPI
интерфейс устройства	11	11	
		102	

В общем итоге получаем 114 порта ввода вывода. Имеем 30 фактических контактов ввода вывода на самом микроконтроллере с учетом уже занятых портов, на которых расположена обвязка, необходимая для его функционирования.

Используем расширитель портов *MAX7301AAI+* [42] позволяющий передавать 28 портов ввода вывода по протоколу SPI. 4 таких расширителя обеспечат дополнительные 114-4 контактов, если использовать одну шину передачи данных. Но, так как микроконтроллер поддерживает одновременно 5 шин, то разделим периферию на основную *SPI* шину с наиболее чувствительным ко времени узлам сбора и измерения данных, а на дополнительные - остальные узлы. В этом случае получим свободное количество выводов исходя из выражения:

$$N_{\text{св}} = n_{\text{св.мк.}} + k \cdot (n_{\text{ком}} - n_{\text{SPI}}), \text{ где } k - \text{количество расширителей портов}$$

$$N_{\text{св}} = 30 + 3 \cdot (28 - 4) = 102$$

Для увеличения скорости передачи данных будет использоваться радиальный тип подключения *Slaves* к *Master* (рисунок 2.30)

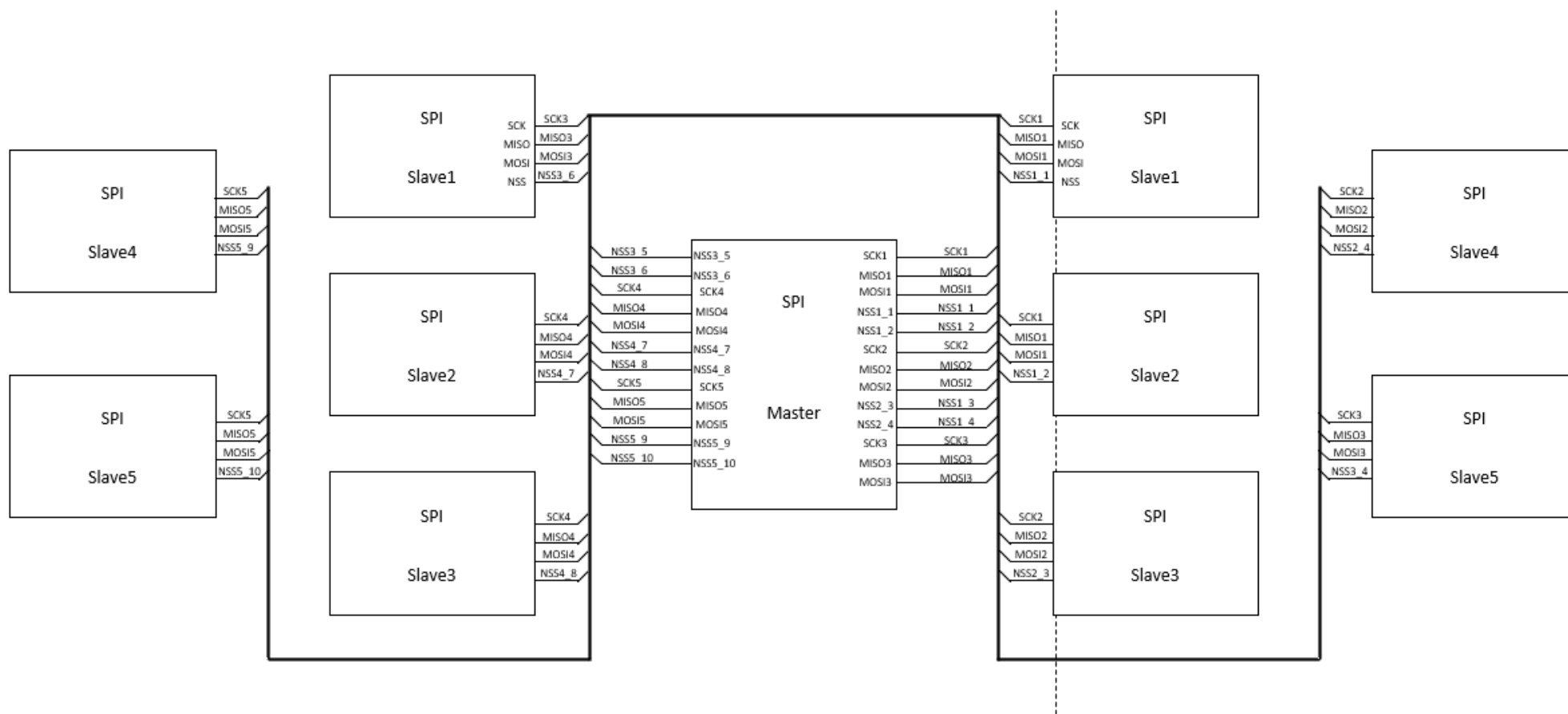


Рисунок 2.30- Условная схема подключения микроконтроллера к периферийным узлам устройства посредством шины *SPI*.

В таком случае, будут заняты все свободные порты микроконтроллера за исключением двух. Блок активной балансировки требует подачи высокочастотного ШИМ сигнала на верхнее и нижнее плечо. Сформируем ШИМ сигнал с помощью встроенных в микроконтроллер таймеров, сигнал которых выведем на эти два свободных порта (рисунок 2.31):

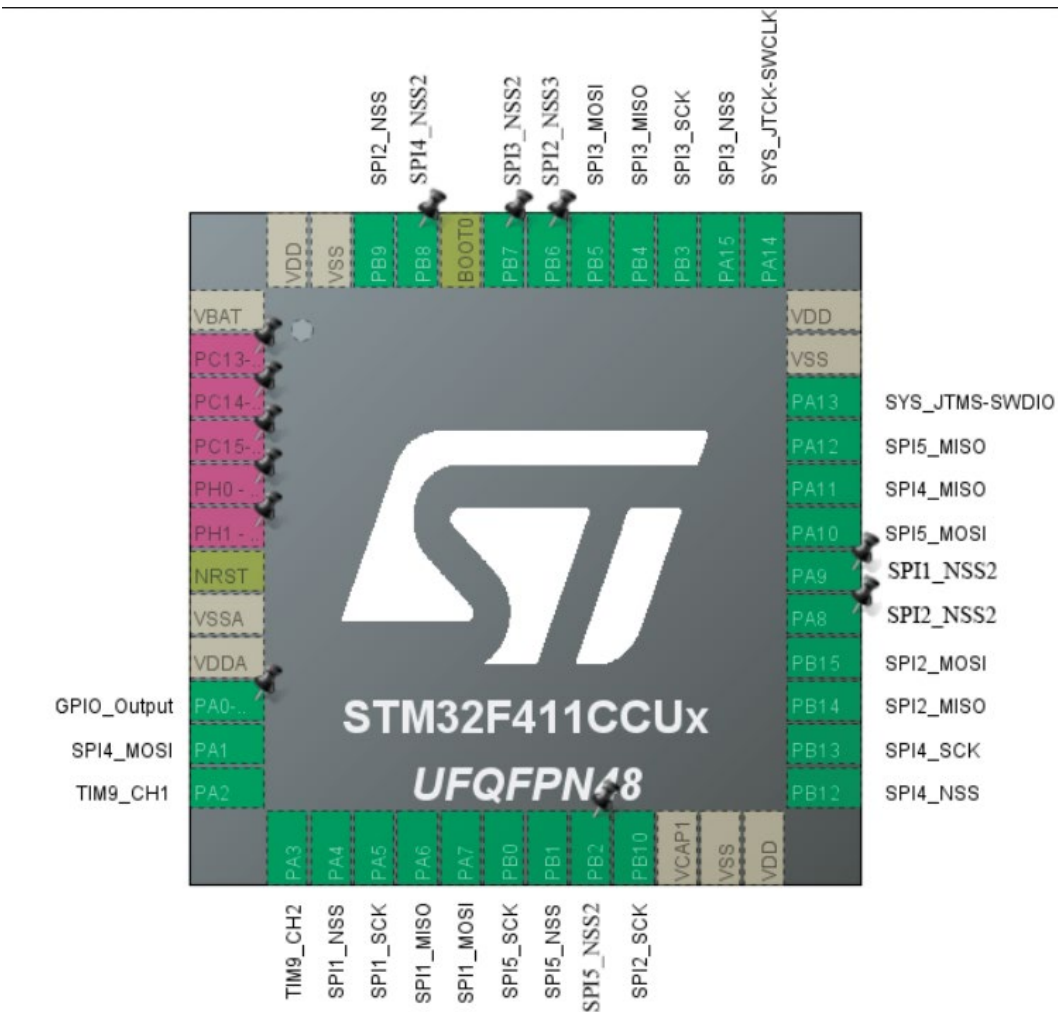


Рисунок 2.31- Условная схема подключения периферии к выводам микроконтроллера

Приведем таблицу подключения периферии к микроконтроллеру, в которой указано к какой шине *SPI* и под каким приоритетом подключен периферийный модуль (таблица 2.19):

Таблица 2.19 – Таблица соответствия периферийного устройства каналу *NSS* и номеру шины *SPI*

	NSS1	NSS2	NSS3
SPI1	РП1	АЦП датчик температуры	
SPI2	РП2	АЦП тока сборки 1	АЦП тока сборки 2
SPI3	РП3	АЦП измерения напряжения	
SPI4	РП4	Блок контроля входных и выходных параметров	
SPI5	Дисплей	Тачскрин	

На рисунке 2.32 представлен конечный вариант узла микроконтроллера с расширителями портов:

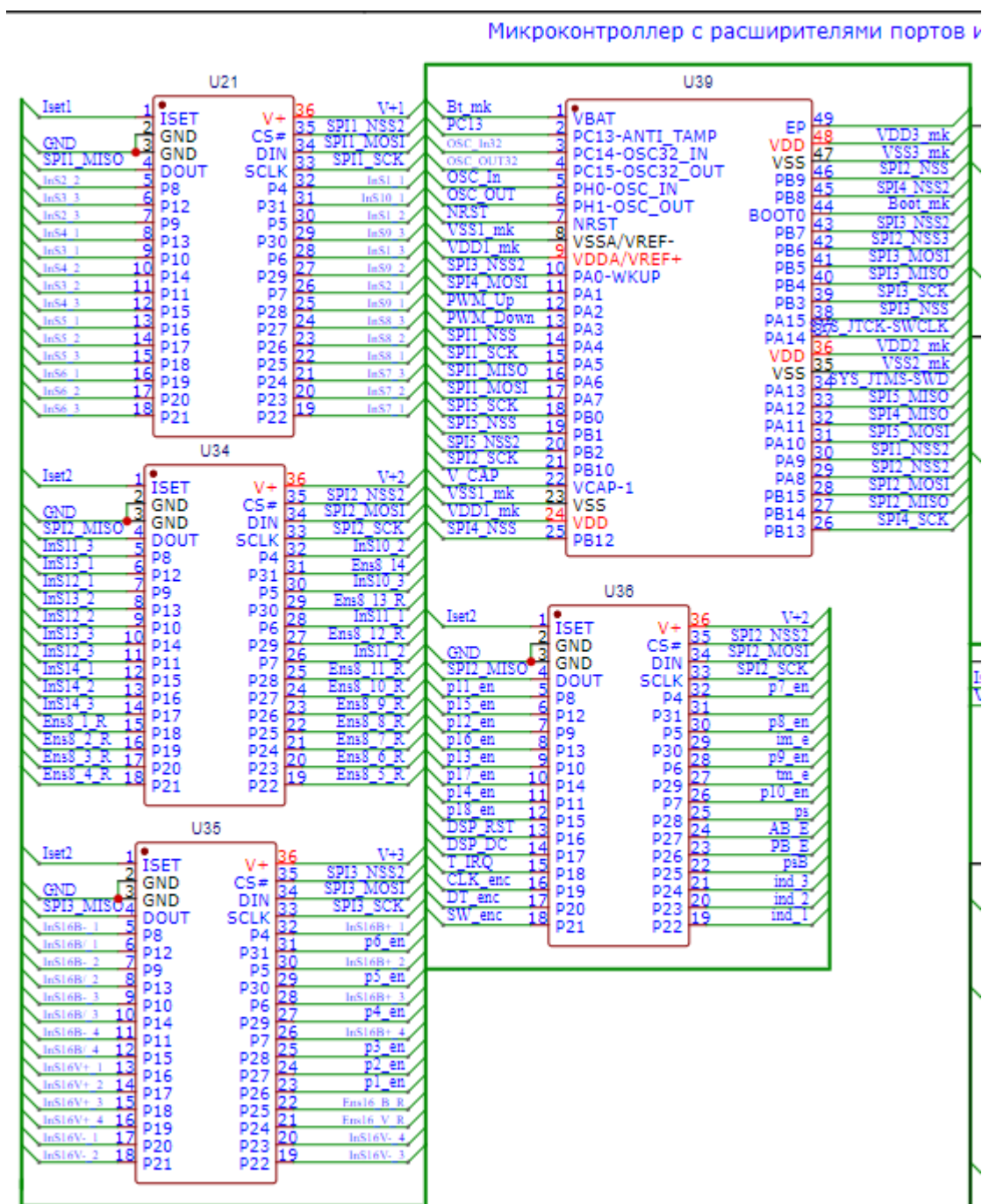


Рисунок 2.32 -Принципиальная схема подключения микроконтроллера к периферийным модулям

2.3.19 Системы питания +5В, +5В, 3,3В

Основным источником питания измерительной системы устройства будет являться DC-DC понижающий преобразователь напряжения, входным напряжением которого будет выходное напряжение АКБ. В качестве такого преобразователя выберем *LM2678SX-ADJ/NOPB* [43] со следующими характеристиками (таблица 2.20)

Таблица 2.20 – основные характеристики *LM2678SX-ADJ/NOPB*

Параметр	Значение
Эффективность	92%
Выходной переключатель DMOS	120 мОм
Ток потребления в режиме ожидания	50 мкА
Погрешность выходного напряжения	+2%
Диапазон входного напряжения	8-40 В
Частота работы импульсного преобразователя	260 кГц

Топология принципиальной схемы преобразователя подобрана исходя из рекомендаций производителя и основана на высокочастотной коммутации входного напряжения посредством сигнала управления прямоугольной формы, за счет чего возможна реализация широтно-импульсной модуляции.

Полученный сигнал с помощью индуктора и емкостей преобразовывается в практически в линейный, имея некоторый процент шумовых всплесков (рисунок 2.33).

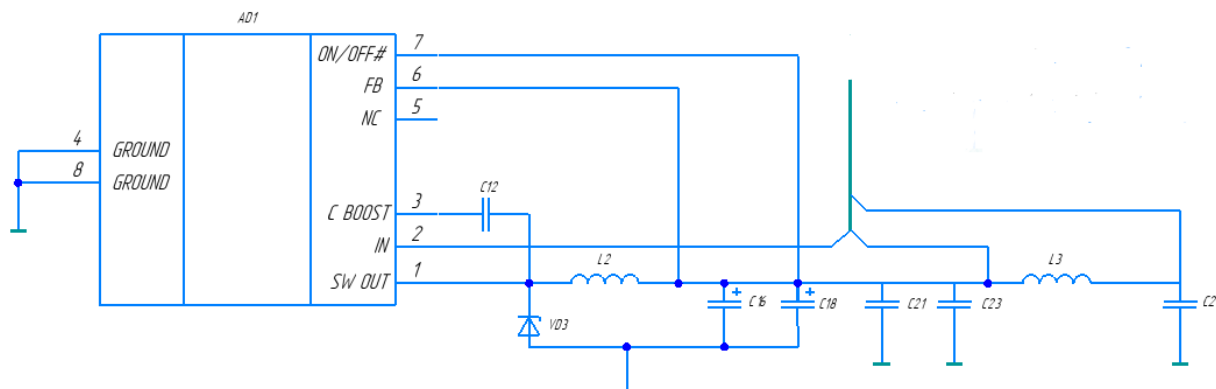


Рисунок 2.33 – DC-DC преобразователь напряжения *LM2678SX-ADJ/NOPB*

Ввиду реализации аналого-цифрового устройства необходимо разделить питание на 2 части: аналоговую и цифровую. Это позволит избежать просадок напряжения в момент коммутации внутри цифровых элементов схемы.

Рассчитаем общие токи цифровых элементов (таблица 2.21):

Таблица 2.21 – Расчет токов потребления блоков устройства

	5VA	5VD	3,3V	5uni							
Блок измерения температуры		0,000182				4	4,55E-05				
АЦП для датчиков температуры		0,0009				1	0,0009				
общий блок коммутации		0,002127				14	0,00005	3	0,000475	2	0,000001
блок измерения напряжения на элементах АКБ				0,0004		1	0,0004				
узел переключения р-сборок АКБ		0									
блок измерения тока на р-сборках АКБ		0,234				18	0,013				
блок переключения балансировки											
пассивная балансировка		0,000001				1	0,000001				
активная балансировка		0,000002				2	0,000001				
коммутатор нагрузки		0									
блок контроля входных и выходных параметров		0,00064				1	0,00064				
индикация устройства		0,07016				7	0,01	1	0,00016		
интерфейс устройства		0,09				1	0,09				
Расширители портов		0,00024				1	0,00024				
Микроконтроллер			0,0049			70	0,00007				
Итого		0.398252	0.0049	0.0004							

Для реализации стабильного источника напряжения для цифровых устройств применяется участок схемы, собранный с помощью элемента *L3*, представляющего собой ферритовую бусину, которая обладает определенной характеристикой значения импеданса от частоты и препятствует высокочастотным скачкам тока.

Питание устройства от 3.3 вольт реализуется посредством микросхемы *MIC29152WD-TR* [44], входное напряжение которой поступает с аналоговой линии питания +5VA.

Двухполярный источник питания +/-5V реализован на микросхеме *DD1718PA* [45]. Его питание поступает с аналоговой линии питания +5VA.

На рисунке 2.34 представлен конечный вариант системы питания устройства:

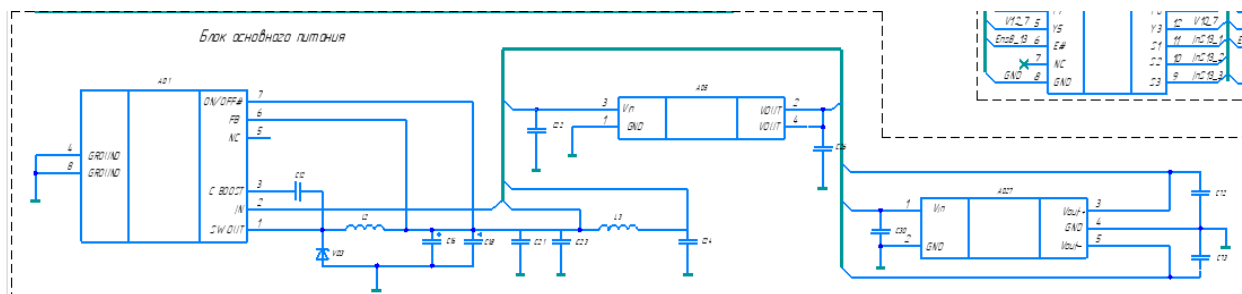


Рисунок 2.34- Принципиальная схема блока системы питания +5, +/-5, 3.3 В

2.4 Расчет метрологических погрешностей устройства

2.1.1 Измерение температуры

Погрешность измерения температуры делится на следующие составляющие:

- 1- Погрешность номиналов элементов
- 2- Погрешность, связанная с допуском погрешностей элементов
- 3- Температурная погрешность

Опираясь на рисунок 2.35, составим выражения для нахождения искомых погрешностей.

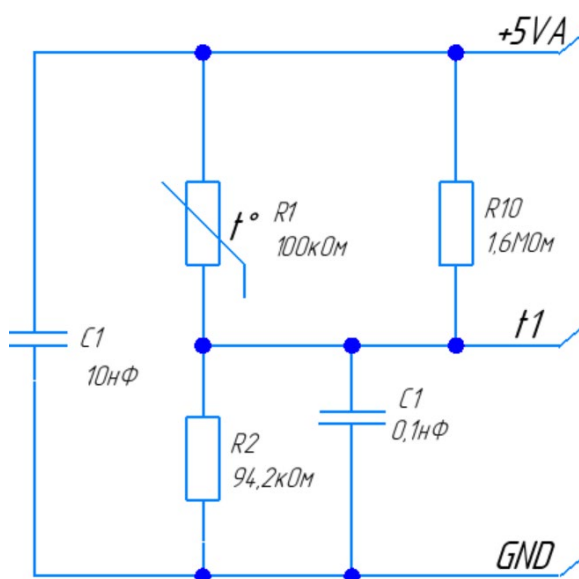


Рисунок 2.35- Принципиальная схема блока измерения температуры

Рассчитаем погрешность номиналов элементов исходя из следующего выражения:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{ном}} &= \frac{R_{10} \cdot R_1}{R_{10} + R_1} - R_2; \\ \Delta_{\text{ном}} &= \frac{1600 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^3}{1600 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3} - 94,2 \cdot 10^3 = 82,35 \\ \delta_{\text{ном}} &= \frac{82,35}{94,2 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 0.09\%\end{aligned}$$

Значение погрешности, связанное с разбросом сопротивления от заявленного номинала, найдем исходя из выражения [46]:

$$\begin{cases} \Delta_{\text{доп}} = R_B - (\Delta(\frac{R_1 \cdot R_{10}}{R_1 + R_{10}}) + \Delta R_2); \\ \Delta(\frac{R_1 \cdot R_{10}}{R_1 + R_{10}}) = \frac{(\Delta R_1 + \Delta R_{10}) \cdot (R_1 + R_{10}) + (R_1 \cdot \Delta R_{10} + R_{10} \cdot \Delta R_1) \cdot (R_1 \cdot R_{10})}{(R_1 + R_{10})^2} \end{cases}$$

Примем во внимание, что:

$$\begin{cases} \Delta R_1 = R_1 \cdot \delta R_1 \\ \Delta R_{10} = R_{10} \cdot \delta R_{10}; \\ \Delta R_2 = R_2 \cdot \delta R_2 \end{cases}$$

Тогда численное значение погрешностей сопротивлений:

$$\begin{cases} \Delta R_1 = 100 \cdot 10^3 \cdot 1\% = 1 \cdot 10^3 \text{ Ом} \\ \Delta R_{10} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 1\% = 16 \cdot 10^3 \text{ Ом}; \\ \Delta R_2 = 94,2 \cdot 10^3 \cdot 0,1\% = 94,2 \text{ Ом} \end{cases}$$

Составим систему линейных уравнений для приведения уравнения к виду, когда останутся только переменные R_e, R_1, R_{10} и их составляющие погрешностей:

$$\begin{cases} \Delta(\frac{R_1 \cdot R_{10}}{R_1 + R_{10}} + R_2) = \Delta(\frac{R_1 \cdot R_{10}}{R_1 + R_{10}}) + \Delta(R_2) \\ \Delta(\frac{R_1 \cdot R_{10}}{R_1 + R_{10}}) = \Delta(\frac{(R_1 + R_{10}) \cdot \Delta(R_1 \cdot R_{10}) + (R_1 \cdot R_{10}) \cdot \Delta(R_1 + R_{10})}{(R_1 + R_{10})^2}); \\ \Delta(R_1 + R_{10}) = \Delta R_1 + \Delta R_{10} \\ \Delta(R_5 \cdot R_9) = \Delta R_5 \cdot R_9 + \Delta R_9 \cdot R_5 \end{cases}$$

Подставив выражение в первоначальное уравнение, получим:

$$\Delta\left(\frac{R1 \cdot R10}{R1 + R10} + R2\right) = \frac{(R1 + R10) \cdot (\Delta R1 \cdot R10 + \Delta R10 \cdot R1) + (R1 \cdot R10) \cdot (\Delta R1 + \Delta R10)}{(R1 + R10)^2} + \Delta(R2);$$

$$\Delta_{\text{доп}} = R_B - \frac{(\Delta R1 + \Delta R10) \cdot (R1 + R10) + (R1 \cdot \Delta R10 + R10 \cdot \Delta R1) \cdot (R1 \cdot R10)}{(R1 + R10)^2} + \Delta R2$$

Тогда, абсолютная погрешность измерения:

$$\Delta_{\text{доп}} = 188,235 \cdot 10^3 - \left(\frac{(1 \cdot 10^3 + 16 \cdot 10^3) \cdot (100 \cdot 10^3 + 1,6 \cdot 10^6) + (100 \cdot 10^3 \cdot 16 \cdot 10^3 + 1,6 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^3) \cdot (1 \cdot 10^3 \cdot 160 \cdot 10^3)}{(1 \cdot 10^3 + 16 \cdot 10^3)^2} \right) + 94,2 = 1006,31 \text{ Ом}$$

Найдем относительную погрешность, исходя из выражения:

$$\delta_{\text{доп}} = \frac{1006,31 \text{ Ом}}{188,235 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 0.5\%$$

Погрешность, связанная с повышенной температурой работы, исходя из максимально допустимого режима работы, описанного в разделе 2.3.2, найдем исходя из выражения:

$$\begin{aligned} \Delta_t &= R_B - (\delta R10_{TKC} \cdot R10 \cdot \Delta t + \delta R2_{TKC} \cdot R2 \cdot \Delta t); \\ \Delta_t &= 188,235 \cdot 10^3 - (100 \cdot 10^{-6} \cdot 1600 \cdot 10^3 \cdot (90 - 25) + 200 \cdot 10^{-6} \cdot 94,2 \cdot 10^3 \cdot (90 - 25)) = 105 \text{ Ом} \\ \delta_t &= \frac{105}{188,235 \cdot 10^3} = 0,056\% \end{aligned}$$

Общую погрешность рассчитаем исходя из выражения, учитывая независимость погрешностей:

$$\begin{aligned} \delta_{t\Sigma} &= \sqrt{\delta_{\text{ном}}^2 + \delta_{\text{доп}}^2 + \delta_t^2}; \\ \delta_{t\Sigma} &= \sqrt{0,09^2 + 0,5^2 + 0,056^2} = 0,51\% \\ \delta_{t\Sigma} &< 1\% \end{aligned}$$

Общая погрешность узла по температуре не превышает заявленных требований.

2.1.2 АЦП датчиков температуры

Рассмотрим основные погрешности, которые вносят погрешность во

время процесса преобразования аналогового сигнала в цифровой, рассчитаем их общую характеристику и сравним с заявленными требованиями.

В качестве АЦП датчиков температуры выступает ADS7841- АЦП последовательного приближения.

Условимся, что измеряемый сигнал изменяется медленно или частота его изменения низкая. Тогда, следующие пять характеристик могут описать вызываемую погрешность преобразования [47]:

1- Аддитивная погрешность представляет собой смещение передаточной характеристики по горизонтали относительно оси входного напряжения. -3LSB

2- Мультипликативная погрешность-разность между идеальной и реальной передаточными характеристиками. 0,15 LSB

3- Дифференциальная нелинейность- погрешность, вызванная различием в длине соответствия аналогового входного диапазона с определенными цифровыми сигналами на его выходе. - 0.8 LSB

4- Интегральная нелинейность- такая погрешность, которая вызвана отклонением линейной функции передаточной характеристики АЦП от прямой линии. -2 LSB

Все вышеперечисленные погрешности в прямом или косвенном виде указываются производителем компонентов.

5- Погрешность квантования- погрешность, вызванная различием между квантованным значением и реальным

$$\xi = \frac{1}{2^N - 1};$$

$$\xi = \frac{1}{2^{12} - 1} = 0,049$$

Общая характеристика этих погрешностей принята в литературе как статическая погрешность АЦП.

Рассчитаем относительные значения погрешностей:

$$\delta_i = \frac{\Delta_i}{5};$$

$$\delta_{add} = \frac{3 \cdot \frac{5}{2^{12}}}{5} = 0,073\%;$$

$$\delta_{мульт} = \frac{0,15 \cdot \frac{5}{2^{12}}}{5} = 0,004\%;$$

$$\delta_{диф} = \frac{0,8 \cdot \frac{5}{2^{12}}}{5} = 0,020\%;$$

$$\delta_{инт} = \frac{2 \cdot \frac{5}{2^{12}}}{5} = 0,049\%;$$

$$\delta_{квант} = \frac{0,049}{5} = 0,001\%;$$

Рассчитаем общую погрешность, считая минимальным влияния погрешностей друг на друга:

$$\delta_{t \text{ АЦП}} = \sqrt{\delta_{add}^2 + \delta_{мульт}^2 + \delta_{диф}^2 + \delta_{инт}^2 + \delta_{квант}^2}$$

$$\delta_{t \text{ АЦП}} = \sqrt{0,073^2 + 0,004^2 + 0,020^2 + 0,049^2 + 0,001^2} = 0,09\%$$

Имея относительную погрешность предыдущего узла измерения температуры, найдем общую погрешность измерения температуры:

$$\delta_{t \text{ общ}} = \sqrt{\delta_{t \Sigma}^2 + \delta_{t \text{ АЦП}}^2};$$

$$\delta_{t \text{ общ}} = \sqrt{0,51^2 + 0,09^2} = 0,52\%;$$

2.4.1 Измерение напряжения на элементах АКБ

Данный блок состоит из фильтра и операционного усилителя. Рассчитаем погрешность элементов, задающих обратную связь на дифференциальный канал: погрешность ряда резисторов обратной связи, и температурная погрешность.

Погрешность, связанную с отклонением номинала входного резистора и

резистора обратной связи, рассчитаем исходя из выражения:

$$\delta_{\text{ряда}} = \left(1 - \frac{K_{\text{расч}}}{K_{\text{теор}}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\frac{R_{\text{обр}} + R45 + \Delta R45}{R_{\text{вх}} + R43 - \Delta R43}}{K_{\text{теор}}}\right) \cdot 100\%;$$

$$\delta_{\text{ряда}} = \left(1 - \frac{\frac{20 \cdot 10^3 + 36 \cdot 10^3 \cdot 0,01 + 36 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^3 - 16 \cdot 10^3 \cdot 0,01 + 16 \cdot 10^3}}{1}\right) \cdot 100\% =$$

$$= \left(1 - \frac{56,36 \cdot 10^3}{55,84 \cdot 10^3}\right) \cdot 100\% = 0,92\%$$

Температурную погрешность исходя из выражения (при $t=60^\circ\text{C}$):

$$\delta_t = \left(1 - \frac{K_{\text{расч}}}{K_{\text{теор}}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\frac{R_{\text{обр}} + R45 + \Delta R45_t}{R_{\text{вх}} + R43 + \Delta R43_t}}{K_{\text{теор}}}\right) \cdot 100\%;$$

$$\delta_t = \left(1 - \frac{\frac{20 \cdot 10^3 + 36 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} (60 - 25) + 36 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^3 + 16 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} (60 - 25) + 16 \cdot 10^3}}{1}\right) \cdot 100\% =$$

$$= \left(1 - \frac{56,126 \cdot 10^3}{56,056 \cdot 10^3}\right) \cdot 100\% = 0,12\%$$

Тогда, общая погрешность узла:

$$\delta_{t \text{ общ}} = \sqrt{\delta_{\text{ряда}}^2 + \delta_t^2};$$

$$\delta_{t \text{ общ}} = \sqrt{0,92^2 + 0,12^2} = 0,93\%;$$

2.4.2 АЦП напряжения банки

Аналогично разделу 2.4.2 произведем расчеты погрешности АЦП

Рассчитаем относительные значения погрешностей:

$$\delta_i = \frac{\Delta_i}{5};$$

$$\delta_{\text{адд}} = \frac{1 \cdot \frac{5}{2^{16}}}{5} = 1,53 \cdot 10^{-3}\%;$$

$$\delta_{\text{мульт}} = \frac{2 \cdot \frac{5}{2^{16}}}{5} = 3,05 \cdot 10^{-3}\%;$$

$$\delta_{\text{диф}} = \frac{1 \cdot \frac{5}{2^{16}}}{5} = 1,53 \cdot 10^{-3}\%;$$

$$\delta_{\text{инт}} = \frac{0,6 \cdot \frac{5}{2^{16}}}{5} = 0,915 \cdot 10^{-3}\%;$$

$$\delta_{\text{квант}} = \frac{\frac{1}{2^{16}-1}}{5} = 2,33 \cdot 10^{-8}\%;$$

Рассчитаем общую погрешность, считая минимальным влияния погрешностей друг на друга:

$$\delta_{t_{\text{АЦП}}} = \sqrt{(1,53 \cdot 10^{-3})^2 + (3,05 \cdot 10^{-3})^2 + (1,53 \cdot 10^{-3})^2 + (0,915 \cdot 10^{-3})^2 + (2,33 \cdot 10^{-3})^2} = 3,85 \cdot 10^{-3}\%$$

Имея относительную погрешность предыдущего узла измерения температуры, найдем общую погрешность измерения температуры:

$$\delta_{t_{\text{общ}}} = \sqrt{\delta_{t_{\Sigma}}^2 + \delta_{t_{\text{АЦП}}}^2};$$

$$\delta_{t_{\text{общ}}} = \sqrt{0,93^2 + (3,85 \cdot 10^{-3})^2} = 0,96\%;$$

2.4.3 Измерение тока

Погрешность измерения тока основывается на выходной ошибки с датчика тока на эффекте Холла. Исходя из технической документации это заявленные 1,5%. С ростом температуры до интересующих нас 60°C погрешность падает до значения 0,5%. Примем погрешность при нормальных условиях максимально возможной при заявленных условиях эксплуатации (рисунок 2.36):

Mean Total Output Error versus Ambient Temperature

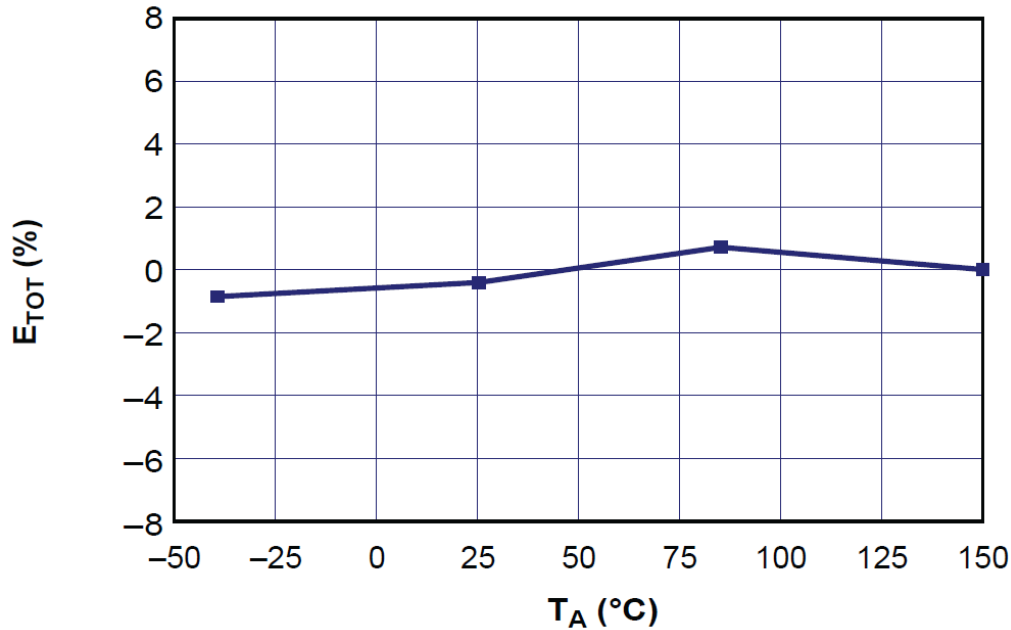


Рисунок- 2.36 График зависимости относительной погрешности измерения от температуры датчика ACS714

$$\delta_{i \text{ изм}} = 1,5\%$$

2.4.4 АЦП измерения тока на p-сборках АКБ

На АЦП *TLC2543* в технической документации было указано значение общей абсолютной погрешности, исходя из множества вышеперечисленных составляющих [48]. Приведем ее в относительный вид:

$$\delta_{I \text{ АЦП}} = \frac{1,75 \cdot \frac{5}{2^{12}}}{5} = 0,24\%;$$

Имея относительную погрешность предыдущего узла измерения температуры, найдем общую погрешность измерения тока:

$$\begin{aligned} \delta_{t \text{ общ}} &= \sqrt{\delta_{i \text{ изм}}^2 + \delta_{t \text{ АЦП}}^2}; \\ \delta_{t \text{ общ}} &= \sqrt{1,5^2 + 0,24^2} = 1,52\%; \end{aligned}$$

2.4.5 Выходные параметры

Погрешность входной и выходной мощности будет складываться из составляющих погрешности микросхемы измерения мощности и погрешности

шунтирующего резистора (его погрешность ряда и температурная погрешность):

Исходя из технической документации АЦП имеем:

$$\delta_{\text{р АЦП}} = 0,5\%$$

Исходя из технической документации шунта имеем:

$$\delta_{\text{ряд Ш}} = 1\%$$

Температурную погрешность шунта рассчитаем исходя из выражения:

$$\delta_{t \text{ Ш}} = \frac{150 \cdot 10^{-6} \cdot (60 - 25) \cdot 0,55}{0,55} = 0.52\%$$

Тогда, общая погрешность будет складываться соответствуя следующему выражению:

$$\delta_{t \text{ общ}} = \sqrt{\delta_{\text{р АЦП}}^2 + \delta_{\text{ряд Ш}}^2 + \delta_{t \text{ Ш}}^2};$$

$$\delta_{t \text{ общ}} = \sqrt{0,5^2 + 1^2 + 0,52^2} = 1,23\%;$$

3. ОПИСАНИЕ МАШИННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ УСТРОЙСТВА

3.1 Описание программ

Рассмотрим 2 САПР, которые будут использоваться при моделировании узлов устройства:

1) Micro-Cap 12 — это интегрированный редактор схем и симулятор смешанного аналогового и цифрового моделирования работы схем, который предоставляет интерактивную и имитирующую среду для инженеров-электронщиков. С момента своего первоначального выпуска в 1982 году Micro-Cap постоянно расширяется и улучшается. Micro-Cap 12, двенадцатое поколение, сочетает в себе современный интуитивно понятный интерфейс с надежной численные алгоритмы для обеспечения беспрецедентного уровня мощности моделирования и простоты использования[49].

Данная САПР обладает рядом преимуществ, которые открывают возможности глубокого и реалистичного исследования:

1. Возможности графического редактора схем;
2. Моделирование;
3. Синтез аналоговых фильтров;
4. Создание новых моделей компонентов;
5. Основные возможности обработки результатов анализа.
6. Возможность задания параметров моделирования и моделей с помощью скриптов
7. Широкий выбор уровня синтеза работы модели в зависимости от вида и узконаправленности исследования

2) Пакет Proteus 8 представляет собой систему моделирования,

базирующуюся на основе моделей электронных компонентов, принятых в системе PSpice. Отличительной чертой пакета *PROTEUS* является возможность моделирования работы программируемых устройств: микроконтроллеров, микропроцессоров, *DSP*. В *Proteus 8* реализована концепция сквозного проектирования. Библиотека компонентов содержит справочные данные. Дополнительно в пакет *PROTEUS VSM* входит система проектирования печатных плат. Пакет *Proteus* состоит из двух частей, двух подпрограмм: *ISIS* — программа синтеза и моделирования непосредственно электронных схем и *ARES* — программа разработки печатных плат [50].

САПР имеет доступ к платформам с огромным количеством готовых электронных компонентов (*SnapEDA, SamacSys*): их УГО, модель посадочного места на плате, 3Д модель и даже имитационную модель, позволяющую проводить симуляции с этим компонентом.

Также в состав *Proteus 8* входит среда разработки *VSM Studio*, позволяющая быстро написать программу для микроконтроллера, используемого в проекте, и скомпилировать.

3.2 Этапы проведения модельного эксперимента

В данном разделе будут рассмотрены моделирования некоторых узлов устройства.

3.2.1 Моделирование работы узла переключения Р-сборок

Произведем 3 симуляции, которые целостно позволят судить о работе всех функциональных особенностей узла.

1) Моделирование коммутационного процесса н-канального МОП транзистора
Составим схему одного узла переключения р-сборок в программе симуляции Micro-Cap 12 (рисунок 3.1):

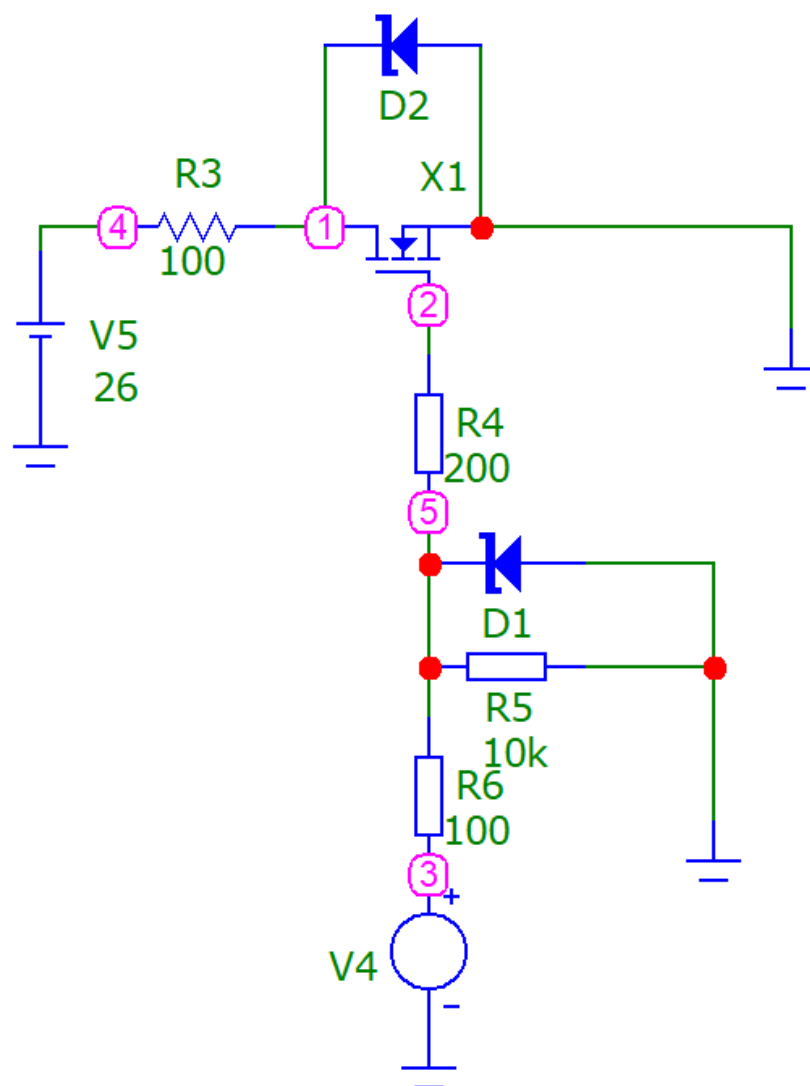


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема узла переключения р-сборки в программе Micro-Cap 12

Рассмотрим осциллограммы в узлах 1, 5 и тока, протекающего через $R3$ при условной генерации логического сигнала с I/O порта микроконтроллера в форме миандра с амплитудой 5 В и периодом 1 мс (рисунок 3.2):

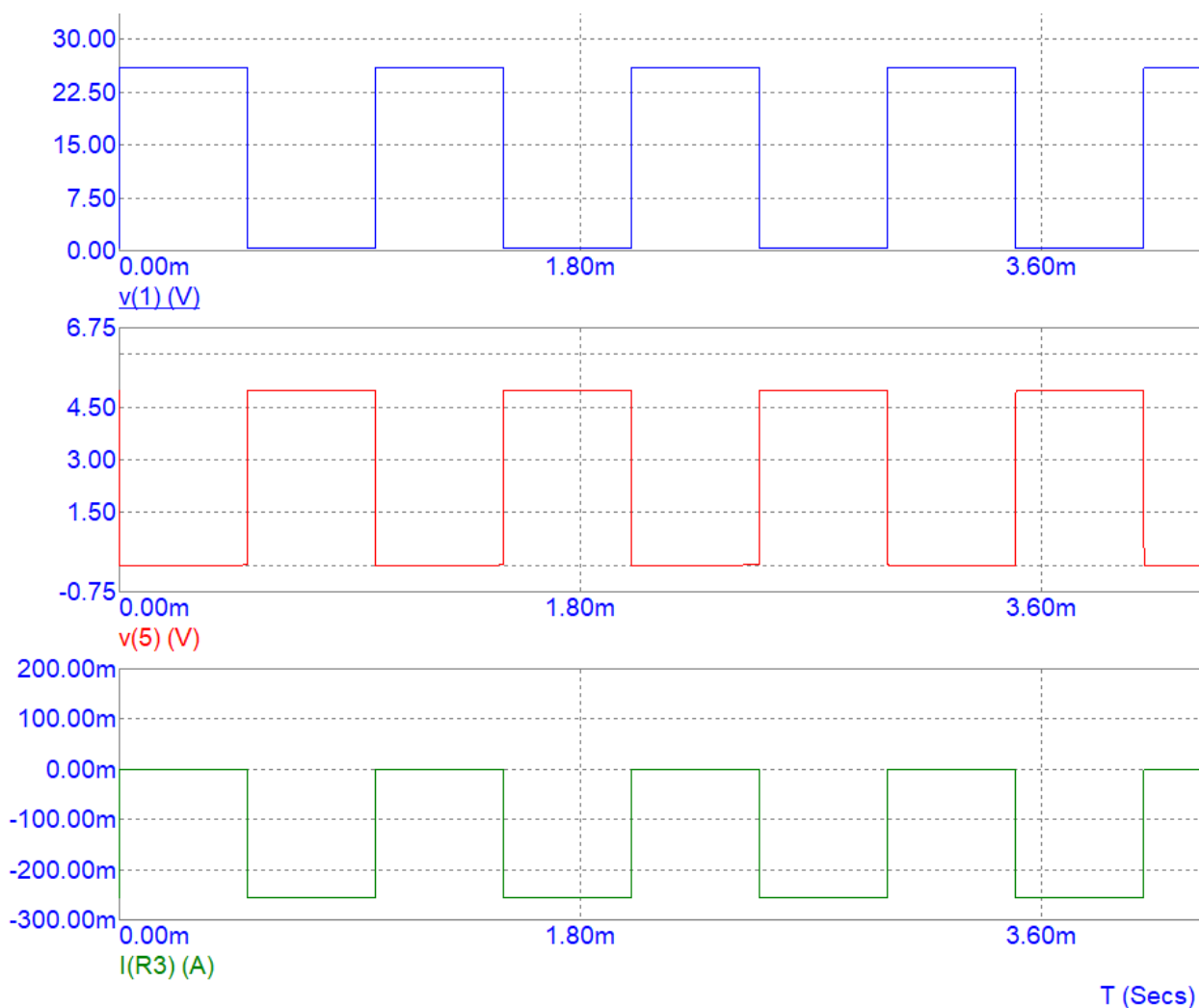


Рисунок 3.2 - Осциллограммы напряжений узлов и тока на резисторе R3

Исходя из рисунка видим, что происходит коммутация ключа при подаче на затвор положительного напряжения. Основная топология узла не нарушена, коммутация соответствует расчетным ожиданиям

1) Моделирование защиты затвора от перенапряжения n-канального МОП транзистора

Произведем моделирование работы защиты от скачков напряжения на затворе собранное по схеме на рисунке 3.3 :

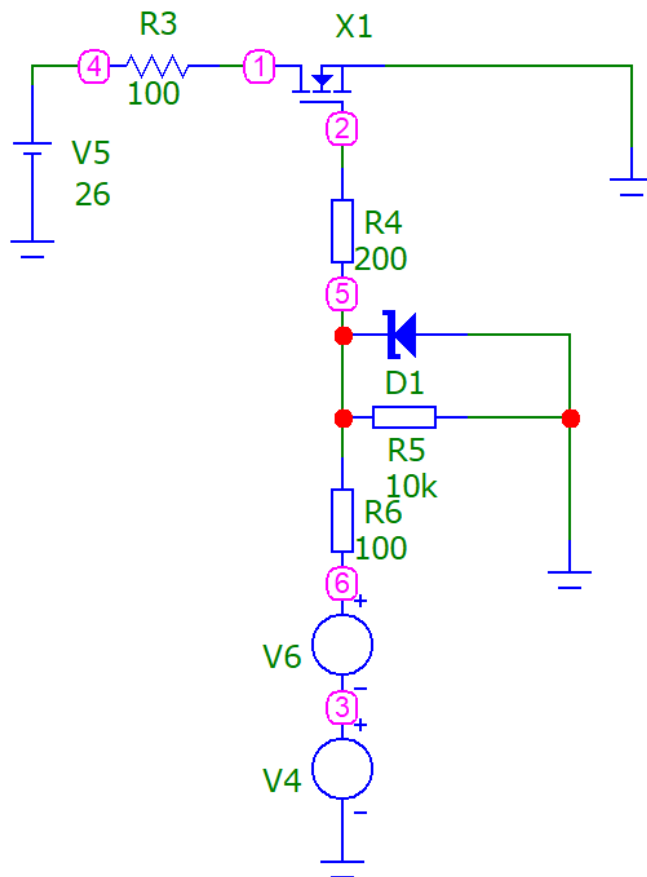


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема узла для исследования защиты затвора МОП транзистора от перенапряжения

В качестве V5 выступает 6s сборка из полностью заряженных элементов АКБ, которые коммутируют на условную нагрузку в 100 Ом. В качестве V6 выступает логический сигнал формы меандра, условно поступающий с микроконтроллера величиной 5 В.

R6 имитирует ограничения по выходному току порта I/O микроконтроллера.

D1- диод Зенера, с обратным напряжением в 8 В

R5- подтягивающий к нулевому потенциалу резистор

Произведем моделирование работы схемы. Для этого выберем тип моделирования «Анализ переходных процессов» и выведем осциллограммы узлов 5,6 и тока, протекающего через диод D1(рисунок 3.4)

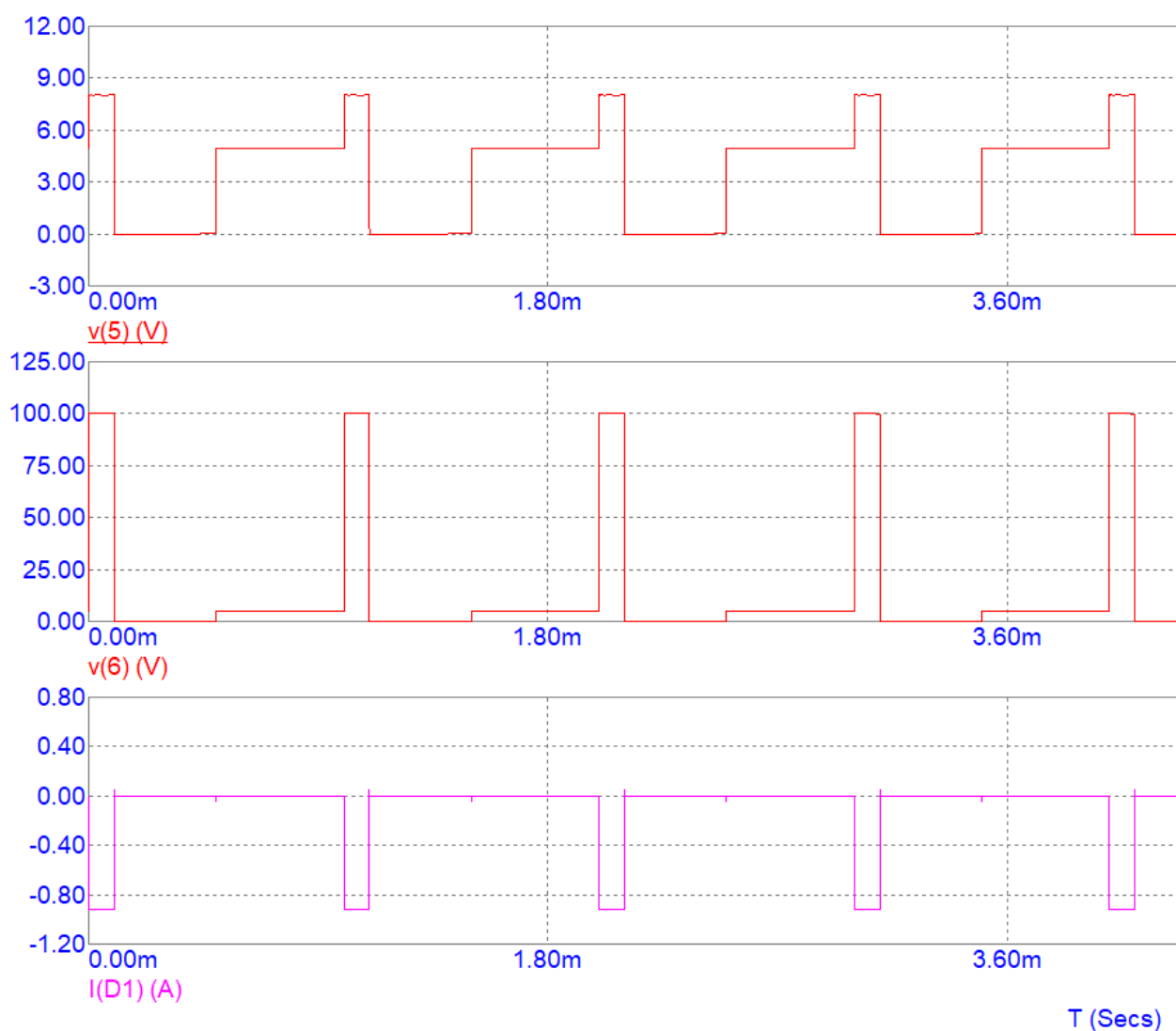


Рисунок 3.4 - Осциллограммы напряжений узлов и тока на резисторе D1

Исходя из рисунка видим, что пульсация в 100 В успешно устраняется, диод пробивается, через него начинает протекать обратный ток величиной 0,9 А и в момент пульсации напряжения на затворе не превышает его порогового значения в 12 В и стабилизируется в районе значения максимального обратного напряжения диода Зенера в 8 В

3) Моделирование работы защиты от скачков напряжения на сток исток n-канального МОП транзистора

Произведем моделирование работы защиты от скачков напряжения на переходе сток-исток собранное по схеме на рисунке 3.5:

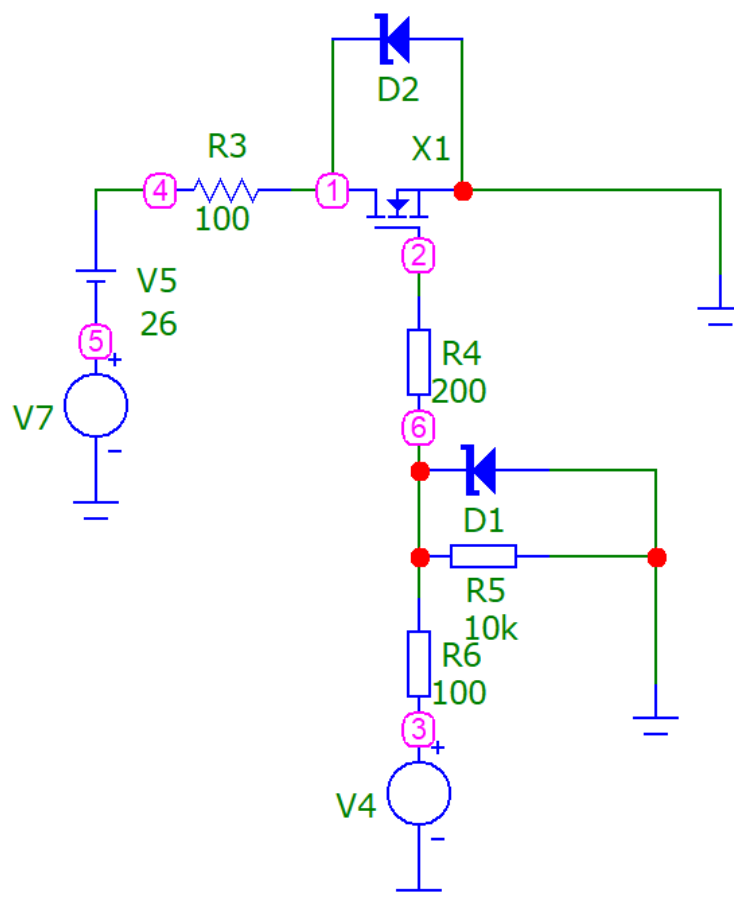


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема узла для исследования защиты перехода сток-исток МОП транзистора от перенапряжения

D2 представляет собой диод Зенера с обратным напряжением величиной 30 В. V7 представляет собой периодически повторяющуюся во времени наводку, величиной 100 В.

Произведем моделирование работы схемы. Для этого выберем тип моделирования «Анализ переходных процессов» и выведем осциллограммы узла 1,5 и тока, протекающего через диод D2 (рисунок 3.6):

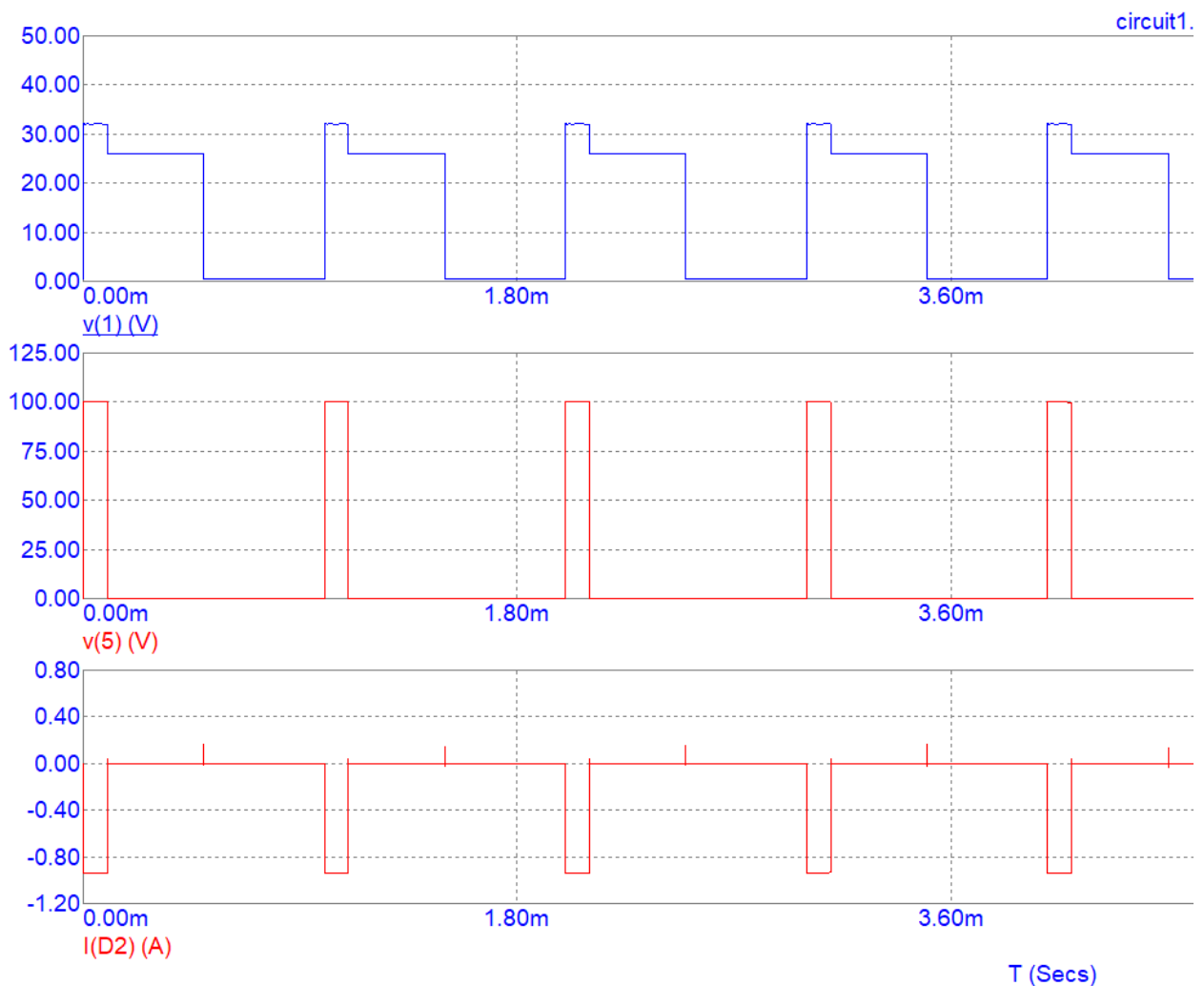


Рисунок 3.6- Осциллограммы напряжений узлов и тока на резисторе D2

Видим, что пульсации величиной 100 В устраниаются диодом, путем его обратного открытия в моменты превышения напряжения на его катоде значения максимального обратного напряжения. Через него начинает протекать кратковременный обратный ток величиной 0,9 А, а величина напряжения сток-исток не превышает максимально допустимое

3.2.2 Моделирование работы блока измерения напряжения

Произведем 2 симуляции, которые целостно позволят судить о работе функциональных особенностей узла.

Проверим, что теоретические расчеты, приведенные в пункте расчета данного узла соответствуют полученным данным при моделировании, учитывая рассчитанные погрешности.

Составим принципиальную схему блока измерения напряжения (рисунок 3.7):

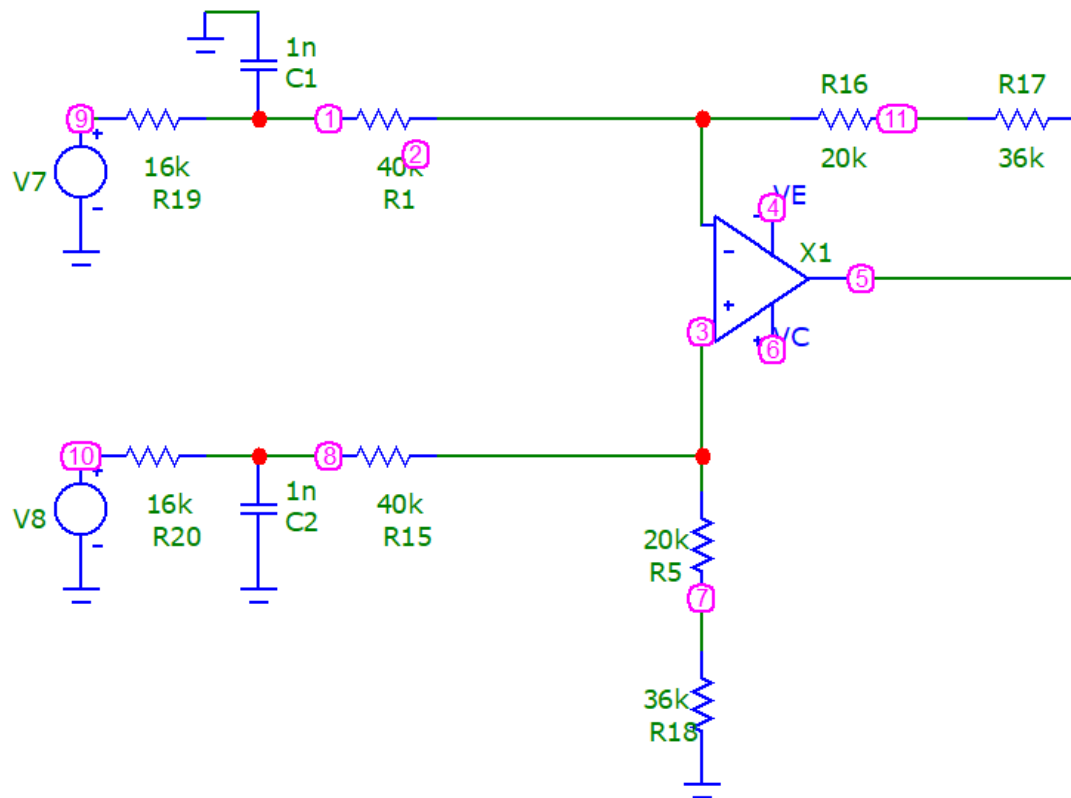


Рисунок 3.7 – Принципиальная схема узла для исследования блока измерения напряжения

1) Моделирование работы дифференциального усилителя

Произведем моделирование работы схемы. Для этого выберем тип моделирования «Анализ переходных процессов» и выведем осциллограммы узлов 5,9,10 (рисунок 3.8):

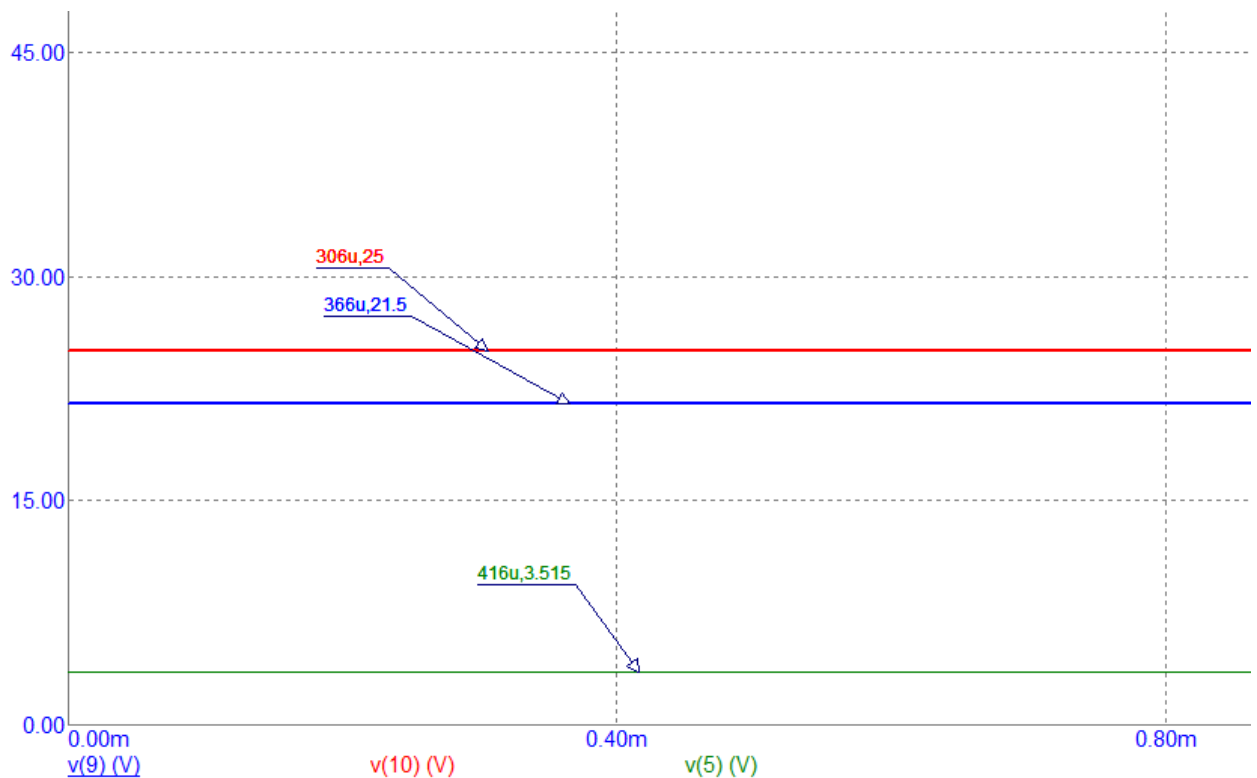


Рисунок 3.8- Осциллограммы напряжений узлов 5,9,10

Рассчитаем дифференциальную разность между входами

$$U_{\text{д}} = U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}};$$

$$U_{\text{д}} = 25 - 21,5 = 3,5 \text{ В};$$

Зная коэффициент усиления равный единице, посчитаем абсолютную погрешность узла:

$$\Delta = U_{\text{э}} - K \cdot U_{\text{д}};$$

$$\Delta = 3,515 - 3,5 = 0,015 \text{ В}$$

Тогда, относительная погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta}{U_{\text{д}}} \cdot 100\%$$

$$\delta = \frac{0,015}{3,15} \cdot 100\% = 0,48\%$$

2) Моделирование работы дифференциального RC фильтра низкой частоты

Для построения АЧХ (рисунок 3.9) и ФЧХ (рисунок 3.10) фильтра. Воспользуемся анализом по переменному току, указав выходной узел фильтра как узел исследования и диапазон отображаемых частот

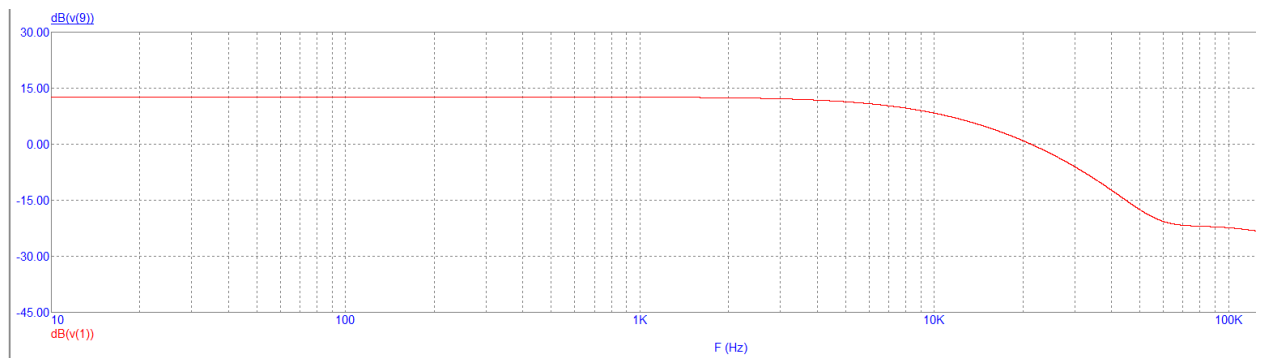


Рисунок 3.9 – АЧХ фильтра

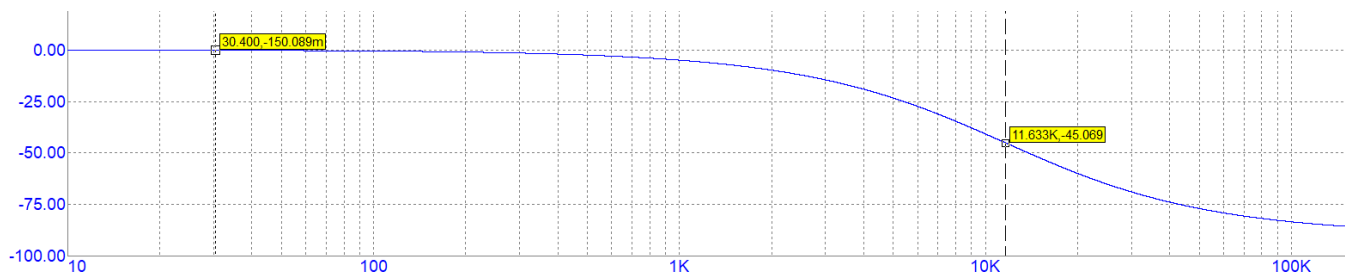


Рисунок 3.10 – ФЧХ фильтра

Наиболее точно частоту среза возможно определить по ФЧХ. Она будет соответствовать значению частоты, которое находится на сдвиге фазы в -45° .

Зная коэффициент усиления равный единице, посчитаем абсолютную погрешность узла:

$$\Delta = f_s - f_p;$$

$$\Delta = 11,633 \cdot 10^3 - 10 \cdot 10^3 = 1,633 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

Тогда, относительная погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta}{U_d} \cdot 100\%$$

$$\delta = \frac{1,633 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 16,33\%$$

К блоку фильтра перед дифференциальным усилителем предъявляются весьма лояльные требования к погрешности, и полученная относительная погрешность удовлетворяет задачам фильтрации высокочастотных изменений напряжения на элементах АКБ и наведенных помех.

3.2.3 Моделирование работы блока измерения тока на р-сборках

Построим принципиальную схему, позволяющую судить о функционировании датчика тока на эффекте Холла (рисунок 3.10):

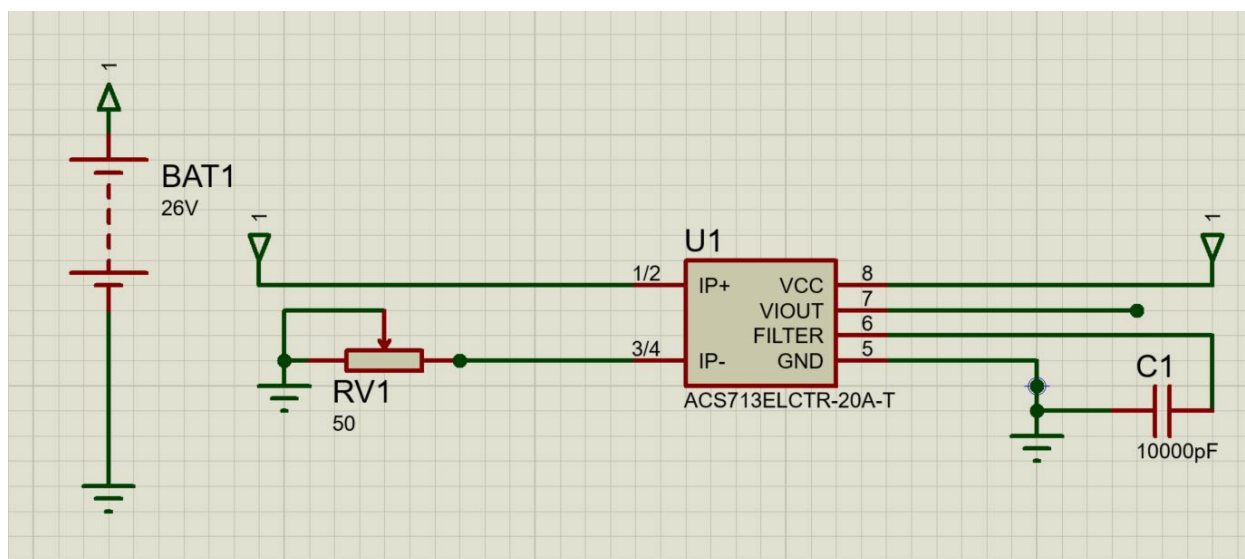


Рисунок 3.10 -Принципиальная схема измерения тока на р-борках
Здесь, BAT1 представляет собой 6S сборку АКБ, RV1 имитирует нагрузку АКБ, U1- датчик тока на эффекте Холла, C1-фильтрующий конденсатор, рекомендованный производителем в даташите.

Расставим датчики измерения тока и напряжения на вход IP+ и датчик напряжения на выход VIOU (рисунок 3.11).

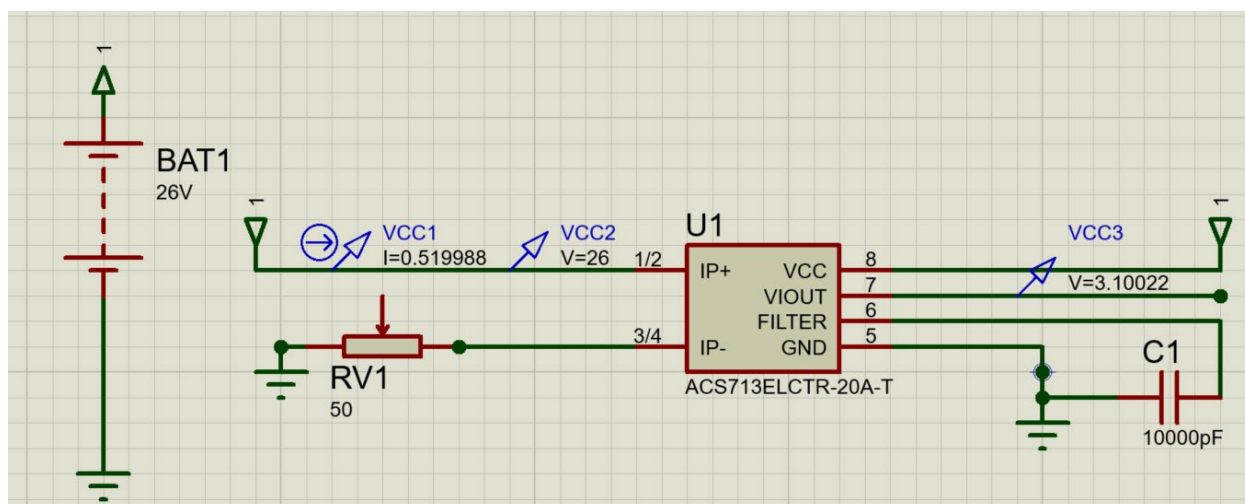


Рисунок 3.11- Принципиальная схема со значениями измеряемых величин тока и напряжения на входе и выходе датчика

Наблюдаем Увеличение напряжения на выходе по сравнению с уровнем, когда контур между IP+ IP- не замкнут (величина напряжения в этом случае 2,6 V).

Рассчитаем коэффициент передачи, отражающий пропорциональность между выходным напряжением с датчика и током, протекающим в цепи входного контура:

$$\begin{cases} 2,6K = 0 \\ 3,1K = 0,52; \\ 0,5K = 0,52; \\ K = 1,04 \end{cases}$$

3.3 Алгоритм измерения, мониторинга и контроля системы BMS

Основа алгоритма представлена на рисунке 3.12:



Рисунок 3.12- Алгоритм измерения, мониторинга и контроля системы BMS

Не вдаваясь в подробности программы прогнозирования рассмотрим основной

функционал подпрограмм схемы.

Подпрограмма температурной защиты АКБ выполняет поочередное считывание данных датчиков температуры после чего сравнивает полученные результаты с критически допустимыми значениями температуры, а после численные значения дифференциала температуры по времени.

Подпрограмма балансировки измеряет напряжение на каждом элементе АКБ, после чего определяет нужна ли балансировка этому элементу, а после этого тип необходимой балансировки: пассивная или активная.

Подпрограмма зарядки разрядки контролирует входные, выходные параметры напряжения и тока и в случае выхода хотя бы одного из них из диапазона разрешенных значений происходит декоммутация нагрузки, источника напряжения от устройства.

Подпрограмма токовой защиты P -сборки АКБ контролирует входной и выходной ток на каждой P -сборке и в случае превышения диапазона допустимых значений декоммутирует одну или несколько сборок, предотвращая отключения всего устройства и продолжая функционировать с меньшим запасом емкости и максимальным выходным током.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В курсовом проекте была выполнена разработка интеллектуальной системы контроля и мониторинга аккумулятора (BMS)

В первой главе приведен обзор и анализ устройств аналогичного назначения, то есть описание назначения, принцип действия, сфера его применения, физические принципы работы устройства. Выполнен анализ патентных исследований и разработана структурная схема устройства на основе патентных источников и научно-технической литературы.

Во второй главе разработана и описана функциональная схема разрабатываемого устройства на основе структурной схемы. Рассчитана принципиальная схема устройства, которая поделена на рассмотрение каждого из узлов устройств по отдельности, а именно, произведены основные расчеты узлов регистрации параметров с датчиков: напряжения каждого элемента, напряжения АКБ, токов р-сборок, входного и выходного токов устройства, температуры. Подобрана оптимальная топология основного блока коммутации, активного фильтра дифференциального сигнала измерения напряжения на элементе, необходимых АЦП для преобразования нормированного отфильтрованного аналогового сигнала в цифровой код. Произведен расчет микроконтроллера и подобрана оптимальная конфигурация его работы и подключения к устройствам периферии. Рассчитаны метрологические погрешности для основных блоков измерения и АЦП.

В третьей главе приведено описание системы моделирования работы электрических схем, описаны ее преимущества и основные команды для получения необходимого результата. Проведены симуляции работы наиболее важных узлов схемы. Сделан вывод о полученных результатах исходя из сопоставления теоретических расчетов и экспериментальных данных. Приведен алгоритм измерения, мониторинга и контроля элемента АКБ устройством.

Полученные результаты топологии схемы, ее параметров соответствуют предъявленным к устройству техническим требованиям

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davide Andrea Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs . - Norwood: ARTECH HOUSE, 2010. - 290 с.
2. Ricardo Velho, Miguel Beirão, Maria do Rosário Calado *, José Pombo, João Fermeiro and Sílvio Mariano Management System for Large Li-Ion Battery Packs with a New Adaptive Multistage Charging Method // Energies . - 2017. - №10
3. Что такое BMS (Battery Management System) и для чего она нужна? // На Токе заряженный портал URL: <https://natoke.ru/articles/223-chto-takoe-bms-battery-management-system-i-dlja-chego-ona-nuzhna.html> (дата обращения: 21.10.21).
4. Компьютер и периферийные устройства // APC URL: <https://www.apc.com/shop/ru/ru/categories/power/uninterruptible-power-supply-ups-/computer-and-peripheral/N-a4lk5l> (дата обращения: 21.10.21).
5. Gregory L. Plett Battery Management Systems Battery Modeling. - Volume I изд. - Norwood: ARTECH HOUSE, 2015. - 330 с.
6. Компьютер и периферийные устройства // Best Energy URL: Система управление аккумуляторной батареей (дата обращения: 21.10.21).
7. А. А. Леута, А. Н. Лукичев, Т. П. Руднева Система управления зарядом-разрядом батареи литий-ионных аккумуляторов // Автоматизация и управление. - 2017. - №2
8. Спецификация на Li-ion аккумуляторную батарею // Samsung ICR18650-26F URL: <https://clck.ru/ZRxrS> (дата обращения: 21.10.21).
9. Joonas Sainio Battery Management System Design and Implementation in Electric Raceabout - Electric Sportscar: бакалаврская работа Bachelor's Thesis Automotive Electrics Engineering: Helsinki, 2013. - 87 с.
10. Борисевич Алексей Валерьевич МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БАТАРЕЯМИ: ОБЗОР ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ // Современная техника и технологии. - 2014. - №5
11. Температурные датчики класса NTC // osensorax.ru URL:

<https://osensorax.ru/klimat/datchik-ntc> (дата обращения: 21.10.21).

12.Datasheet MF52A104F3950 // LCSC URL:
[https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1810170712_Nanjing-Shiheng-Elec MF52A104F3950-A1_C13424.pdf](https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1810170712_Nanjing-Shiheng-Elec_MF52A104F3950-A1_C13424.pdf) (дата обращения: 21.10.21).

13..Datasheet GRM033R71A103KA01D // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1811081513_Murata-Electronics-GRM033R71A103KA01D_C76941.pdf (дата обращения: 21.10.21).

14..Datasheet 16SVP180MX // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1807281732_PANASONIC-16SVP180MX_C236288.pdf (дата обращения: 21.10.21).

15.Datasheet WSB5557Z // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1808311538_WILLSEMI-Will-Semicon-WSB5557Z-2-TR_C239812.pdf (дата обращения: 21.10.21).

16.Datasheet CR1206 // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437_BOURNS-CR1206-FX-1602ELF_C204680.pdf (дата обращения: 21.10.21).

17.RadioProg Чистое питание для каждой микросхемы, часть 2: Выбор и использование блокировочных конденсаторов URL: <https://radioprogram.ru/post/461> (дата обращения: 21.10.21).

18. Datasheet MAX11100EUB+ // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1806111013_Maxim-Integrated-MAX11100EUB-C143329.pdf (дата обращения: 21.10.21).

19. Datasheet CES2323 // LCSC URL: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1806071625_CET-Chino-Excel-Tech-CES2323_C83044.pdf (дата обращения: 21.10.21).

20.Datasheet UCLAMP0541Z // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1810232121_SEMTECH-UCLAMP0541Z-TFT_C193630.pdf (дата обращения: 21.10.21).

21. Datasheet Me-TECH 1.0SMBJ20A // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2004071903_Me-TECH-1-0SMBJ20A_C501367.pdf
(дата обращения: 21.10.21).
22. Datasheet ACS714 // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1811061514_Allegro-MicroSystems--LLC-ACS714ELCTR-30A-T_C163289.pdf (дата обращения: 21.10.21).
23. Datasheet SI1422DH // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1804171930_Vishay-Intertech-SI1422DH-T1-GE3_C144842.pdf (дата обращения: 21.10.21).
24. Datasheet MMSZ5233BS-7-F // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2004082133_Diodes-Incorporated-MMSZ5233BS-7-F_C508230.pdf (дата обращения: 21.10.21).
25. Datasheet BZT52B10S // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2002261103_Taiwan-Semiconductor-Taiwan-Semicon-BZT52B10S-RRG_C485479.pdf (дата обращения: 21.10.21).
26. Datasheet MTN003N02Y3 // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437_CYTECH-MTN003N02Y3_C373445.pdf
(дата обращения: 21.10.21).
27. Datasheet NLAS4157 // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1811132110_onsemi-NLAS4157DFT2G_C106912.pdf
(дата обращения: 21.10.21).
28. Datasheet FDS4897A // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2006291535_VBsemi-Elec-FDS4897A_C693180.pdf
(дата обращения: 21.10.21).
29. PowerPump Balancing (Rev. B) // LCSC URL:
<https://www.ti.com/lit/an/slua524b/slua524b.pdf> (дата обращения: 21.10.21).
30. Datasheet 0435002.KR // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1808072326_Littelfuse-0435002-KR_C206948.pdf

(дата обращения: 21.10.21).

31.Datasheet SM4186T9RL // LCSC URL: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2003182035_SPS-SM4186T9RL_C496601.pdf (дата обращения: 21.10.21).

32.Datasheet SM2326 // LCSC URL: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437_Sinopower-Semicon-SM2326NSANC-TRG_C368561.pdf (дата обращения: 21.10.21).

33.35.Datasheet 65NM-300H // LCSC URL: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437_HOLLY-65NM-300H_C356573.pdf (дата обращения: 21.10.21).

34.Datasheet INA229 // LCSC URL: https://lcsc.com/product-detail/Pre-ordered-Products_Texas-Instruments-INA229AIDGST_C2924677.html (дата обращения: 21.10.21).

35.37.Datasheet 19-217/R6C-AL1M2VY/3T // LCSC URL: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1811101510_Everlight-Elec-19-217-R6C-AL1M2VY-3T_C72044.pdf (дата обращения: 21.10.21).

36.74HC595PW

37.TFT LCD Arduino Shield Datasheet // LCSC URL: <https://clck.ru/ZS2TN> (дата обращения: 21.10.21).

38.Datasheet KY-40 // LCSC URL: <https://clck.ru/ZRxn timer> (дата обращения: 21.10.21).

39.Datasheet STM32F411CCU6TR // LCSC URL: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1810011020_STMicroelectronics-STM32F411CCU6TR_C190642.pdf (дата обращения: 21.10.21).

40.Datasheet MAX7301AAI+ // LCSC URL: <https://clck.ru/ZRxmu> (дата обращения: 21.10.21).

41.Datasheet LM2678SX-ADJ/NOPB // LCSC URL: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1806141624_Texas-Instruments-LM2678SX-ADJ-

NOPB_C40844.pdf (дата обращения: 21.10.21).

42.Datasheet MIC29152WD-TR // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2104251233_Microchip-Tech-MIC29152WD-TR_C627903.pdf (дата обращения: 21.10.21).

43.Datasheet DD1718PA // LCSC URL: *https://www.nickbel.com/2019/09/21/dcdc-dvuhpolyarka-iz-kitaya-dd1718pa.html* (дата обращения: 21.10.21).

44.Курепин В. В., Баранов И. В. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ Методические указания к лабораторным работам для студентов 1, 2 и 3-го курсов всех специальностей. - Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2003. - 57 с.

45.Н.Д. Наракидзе, Д.В. Шайхутдинов Цифровые измерительные устройства// Учебно-методическое пособие к выполнению курсового проекта Новочеркасск, 2016г.

46.Datasheet TLC2543IM // LCSC URL:
https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2005111432_HGSEMI-TLC2543IM_C512769.pdf
(дата обращения: 21.10.21).

47.М.А. Амелина С.А. Амелин Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. - Смоленск: Электронное издание, 2013. - 618 с.

48.Proteus // URL: *https://clck.ru/ZRzQi* (дата обращения: 21.10.21).

ПРИЛОЖЕНИЕ А. 12.03.01.К21.063.01.00.Э1
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА
АККУМУЛЯТОРА (BMS)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. 12.03.01.К21.063.01.00.Э2
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА
АККУМУЛЯТОРА (BMS)

ПРИЛОЖЕНИЕ В. 12.03.01.K21.063.01.00.ЭЗ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА
АККУМУЛЯТОРА (BMS)
СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. 12.03.01.К21.063.01.00.ПЭ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА
АККУМУЛЯТОРА (BMS)
ПЕРЕЧЕНЬ ЭЛЕМЕНТОВ