

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра _____

«Промышленная электроника»

(наименование)

11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

(код и наименование направления подготовки)

Электронные приборы и устройства

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Устройство для тестирования аккумуляторных батарей»

Обучающийся

Р.Н. Майоров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

к.т.н., доцент, А.В. Прядилов

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2024

Содержание

Введение.....	3
1 Основные типы аккумуляторных батарей и их основные параметры	5
1.1 NiMH аккумуляторы.....	11
1.2 NiCd аккумуляторы.....	14
1.3 LiIon аккумуляторы	16
1.4 LiPol аккумуляторы	22
2 Методы контроля основных параметров аккумуляторов	25
3 Обзор рыночных предложение устройств тестирования аккумуляторов	33
4 Структурная схема устройства для контроля параметров аккумуляторов ..	44
5 Разработка алгоритма работы устройства тестирования	47
5.1 Выбор режима измерения	48
5.2 Измерение напряжения на аккумуляторе	50
5.3 Измерение емкости аккумулятора.....	51
5.4 Измерение внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току	53
5.5 Измерение внутреннего сопротивления аккумулятора по постоянному току	55
5.6 Емкость аккумулятора при коротком режиме разряда	57
6 Разработка принципиальной схемы устройства для контроля параметров аккумуляторов	59
6.1 Разработка узла электронной нагрузки.....	59
6.2 Разработка узла тестирования по переменному току.....	68
6.3 Разработка узла коммутации.....	74
6.4 Узел измерения силового тока аккумулятора.....	77
6.5 Узел АЦП.....	79
6.6 Микроконтроллерный узел.....	82
Заключение	86
Список используемой литературы	87

Введение

Актуальность и научная значимость настоящего исследования.

Аккумуляторы и аккумуляторные батареи как вторичные электрохимические источники электрической энергии нашли широчайшее применение, как в промышленности, так и в быту. Продление ресурса аккумуляторов и аккумуляторных батарей является особой и актуальной задачей, поскольку, с одной стороны позволяет сократить эксплуатационные затраты как в производственно-промышленной сферах и так и в личных бюджетах. Поэтому разработка аппаратных решений, позволяющих реализовать алгоритмы тестирования аккумуляторов и аккумуляторных батарей, удовлетворяющих требований ГОСТ в этой области и позволяющих модифицировать и модернизировать программное обеспечение, а также развивать платформенные решения с минимальными аппаратными изменениями представляется актуальной задачей.

Объект исследования.

Объектом исследования является устройство тестирования аккумуляторных батарей, основанных на литиевых технологиях.

Цель исследования: Целью исследования является построение максимально универсального с аппаратной точки зрения решения для построения устройства тестирования аккумуляторов с возможностью реализации требований различных ГОСТ путем программной модернизации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Собрать данные об основных типах аккумуляторов и аккумуляторных батарей, распространенных в настоящее время на рынке.
2. Исследовать имеющиеся решения устройств для тестирования аккумуляторов и аккумуляторных батарей.

3. Провести анализ требований ГОСТ по испытанию аккумуляторов и их батарей на основе литиевой технологии.
4. Спроектировать электрическую принципиальную схему устройства для тестирования аккумуляторов и их батарей с возможностью управляемого разряда и измерением характеристик, указанных в соответствующих ГОСТ.

При использовании аккумуляторов выделяют два периодических процесса в их эксплуатации - этапы заряда и разряда. При эксплуатации батарей аккумуляторов, особенно в промышленных и ответственных приложениях важно понимать текущее состояние аккумулятора, его оставшийся ресурс. В этом могут помочь измерения основных характеристик, регламентированные ГОСТ для соответствующих типов аккумуляторов. Как правило, это внутренние сопротивления измеренные и вычисленные на постоянном и переменном токе, характеристики разового короткого разряда, периодических заряд/разрядных процедур. В связи с этим удобно иметь устройство, позволяющее провести тестирование перечисленных параметров и предоставить информацию об измеренных и вычисленных параметрах в удобном, читаемом виде и при этом предоставляющее возможности к модернизации программного обеспечения без переделок, или с минимальной модернизацией схемотехнических решений.

Итогом данной работы должна стать схема электрическая принципиальная устройства тестирования аккумуляторов, позволяющая проводить измерения параметров аккумуляторов в соответствии с требованиями ГОСТ, построенная на микроконтроллере, содержащая разрядные цепи и необходимые узлы для измерения и коммутации, а также необходимые элементы для взаимодействия с пользователем.

1 Основные типы аккумуляторных батарей и их основные параметры

Химические источники питания, к которым относятся гальванические элементы и их батареи, а также аккумуляторные батареи, делят на первичные и вторичные. К первичным источникам тока относят гальванические элементы, которые генерируют напряжение за счет первичной химической реакции, происходящей в них. Аккумуляторы относят к вторичным источникам напряжения, что подразумевает, что за счет процесса заряда происходит регенерация химической среды и появляется возможность вторичного ее использования для генерации электрической энергии. При этом, процесс заряда возникает, когда ток протекает в направлении, противоположном направлению разряда.

Назначение аккумуляторов – автономное электропитание электронных и электротехнических устройств различного назначения, резервирование источников основного питания во всех отраслях деятельности человека.

Различают понятия аккумулятора или элементарной аккумуляторной ячейки и аккумуляторной батареи, состоящей из типового набора аккумуляторных ячеек. В аккумуляторной батарее, в общем случае, аккумуляторные ячейки могут соединяться между собой как последовательно, для увеличения напряжения на клеммах аккумуляторной батареи, так и параллельно, для увеличения емкости аккумуляторной батареи.

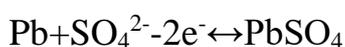
Если рассматривать внешний, относительно аккумулятора, контур замкнутой цепи, то процесс разряда протекает в направлении от положительного полюса аккумулятора через внешнюю замкнутую цепь к отрицательному полюсу аккумулятора. Соответственно, если создать ток, который внутри аккумулятора протекает от положительного к отрицательному электроду, то начнется процесс заряда аккумулятора [33].

Терминология, относящаяся к аккумуляторам, как химическим источникам тока, регламентируется ГОСТ 15596-82 «ИСТОЧНИКИ ТОКА ХИМИЧЕСКИЕ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ» [15].

Принцип действия аккумуляторов базируется на химических реакциях, которые могут протекать под действием разрядного тока одним образом, а под действием зарядного тока – другим. При этом при заряде, аккумуляторную ячейку можно рассматривать как электролитическую ячейку, в которой происходит процесс электролиза. На аноде и катоде аккумуляторной ячейки происходят разные реакции.

В качестве примера рассмотрим процессы, происходящие в свинцово-кислотных аккумуляторах, в которых в зависимости от стадии работы аккумулятора происходят реакции взаимодействия свинца и серной кислоты на аноде, в результате которой возникают свободные электроны, и диоксида свинца и серной кислоты на катоде, в результате которой поглощается два электрона и образуется сульфид свинца и вода.

Анод:



Катод:



Для случая разряда аккумулятора (при работе на внешнюю нагрузку) эти операции следует рассматривать слева направо, а для случая заряда (подключения к внешнему источнику электрического тока) – справа налево.

Следующим крупным типом аккумуляторных батарей являются щелочные аккумуляторы. В таких аккумуляторах в качестве электролита используются щелочные растворы: или водный раствор КОН, также известный как «едкий калий», или же водный раствор NaOH – «едкий натрий». В настоящее время самыми распространенными типами щелочных аккумуляторов являются аккумуляторы с электродом никель-кадмиевого типа (NiCd аккумуля-

муляторы) и никель-металлогидридные аккумуляторы (NiMH аккумуляторы).

С развитием химии процессов аккумуляторов появились литиевые аккумуляторы. У литиевых аккумуляторов выделяют литий-ионные и литий-полимерные типы аккумуляторов.

В литий-ионном аккумуляторе в качестве катода используют алюминиевую фольгу, которая отделяется пористыми сепараторами различных типов от анода, выполненного из медной фольги. В таких аккумуляторах положительный ион лития переносит электрический заряд. Такой ион лития встраивают в кристаллическую решетку графита, получая LiC_6 , в оксиды, получая LiMO_2 или соли металлов – LiMROn.

Таким образом, исходя из вышесказанного, можно выделить, что в настоящее время на рынке наиболее широко представлены и получили наибольшее распространение следующие основные типы аккумуляторов:

- NiMH аккумуляторы;
- NiCd аккумуляторы;
- LiIon аккумуляторы;
- LiPol аккумуляторы;
- щелочные аккумуляторы.

Эти типы аккумуляторов используют разные химико-физические процессы и обладают различными массо-габаритными и эксплуатационными свойствами.

Сведем в таблицу 1 основные «параметры этих аккумуляторов.

Таблица 1 – Параметры аккумуляторов различного типа.

Параметр	Свинцово-кислотные	NiCd	NiMH	Li-ion		
				Кобальт лития	Литий-марганцевые	Литий-феррофосфатные
Удельная плотность энергии, Вт·ч/кг	30–50	45–80	60–120	150–190	100–135	90–120
Жизненный цикл (80% разряда)	200–300	1000	300–500	500–1000	500–1000	1000–2000
Время быстрой зарядки, ч	8–16	~1	2–4	2–4	<1	<1
Терпимость к перезарядке	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая. Не переносят постоянную перезарядку		
Саморазрядка/месяц (при комнатной температуре), %	5%	20%	30%	<10%		
Номинальное напряжение, В	2	1,2	1,2	3,6	3,8 ⁸	3,3
Напряжение отсечки при зарядке (В/элемент, 1С)	2,25–2,4			4,2		3,6
Напряжение отсечки при разрядке (В/элемент, 1С)	1,75	1,00		2,5–3,0		2,8
Пиковый ток нагрузки	5С	20С	5С	>3С	>30С	>30С
Температура зарядки, °С	-20...+50	0...+45		0...+45		
Температура разрядки, °С	-20...+50	-20...+65		-20...+60		
Требования к обслуживанию	3–6 месяцев (подзарядка)	30–60 дней (разрядка)	60–90 дней (разрядка)	Не требуется		
Требования к безопасности	термически стабильны	Термически стабильны. Обычно используются термопредохранители		Обязательный защитный контур		

Отметим, что в таблицу 1 сведены наиболее коммерчески распространенные типы аккумуляторов, в то же время существует еще множество типов аккумуляторов, как показано в »[35]:

«Cn-Po — графен-полимерный аккумулятор.

La-Ft — лантан-фторидный аккумулятор

Li-Ion — литий-ионный аккумулятор (3,2-4,2 В), общее обозначение для всех литиевых аккумуляторов

Li-Co — литий-кобальтовый аккумулятор, (3,6 В), на базе LiCoO₂, технология в процессе освоения

Li-Po — литий-полимерный аккумулятор (3,7 В), полимер в качестве электролита

Li-Ft — литий-фторный аккумулятор

Li-Mn — литий-марганцевый аккумулятор (3,6 В) на базе LiMn₂O₄

LiFeP или LFP — литий-железно-фосфатный аккумулятор (3,3 В) на базе LiFePO₄

LiFeYPO₄ — литий-железо-иттрий-фосфатный (добавка иттрия для улучшения свойств)

Li-Ti — литий-титанатный аккумулятор (2,3 В) на базе Li₄Ti₅O₁₂

Li-Cl — литий-хлорный аккумулятор (3,99 В)

Li-S — литий-серный аккумулятор (2,2 В)

LMPo — литий-металл-полимерный аккумулятор

Fe-air — железо-воздушный аккумулятор

Na/NiCl — никель-солевой аккумулятор (2,58 В)

Na-S — натрий-серный аккумулятор, (2 В), высокотемпературный аккумулятор

Ni-Cd — никель-кадмиевый аккумулятор (1,2 В)

Ni-Fe — железо-никелевый аккумулятор (1,2-1,9 В)

Ni-H₂ — никель-водородный аккумулятор (1,5 В)

Ni-MH — никель-металл-гидридный аккумулятор (1,2 В)

Ni-Zn — никель-цинковый аккумулятор (1,65 В)

Pb — свинцово-кислотный аккумулятор (2 В)

Pb-H — свинцово-водородный аккумулятор

Ag-Zn — серебряно-цинковый аккумулятор (1,85 В)

Ag-Cd — серебряно-кадмиевый аккумулятор (1,6 В)

Zn-Br — цинк-бромный аккумулятор (1,8 В)

Zn-air — цинк-воздушный аккумулятор

Zn-Cl — цинк-хлорный аккумулятор

RAM (Rechargeable Alkaline Manganese) — перезаряжаемая разновидность марганцево-цинкового щелочного гальванического элемента (1,5 В)

Ванадиевый аккумулятор (1,41 В)

Алюминиево-графитный аккумулятор (2 В)

Алюминиево-ионный аккумулятор (2 В)» [35]

В таблицу 2 сведем «основные области применения наиболее распространенных типов аккумуляторов:

Таблица 2 – Области применения основных типов аккумуляторов

Тип	ЭДС (В)	Область применения
свинцово-кислотные Pb	2,1	троллейбусы, трамваи, воздушные суда, автомобили, мотоциклы, электропогрузчики, штабелеры, электротягачи, аварийное электроснабжение, источники бесперебойного питания
никель-кадмиевые Ni-Cd	1,2	замена стандартного гальванического элемента, строительные электроинструменты, троллейбусы, воздушные суда
никель-металл-гидридные Ni-MH	1,2	замена стандартного гальванического элемента, автомобили
литий-ионные Li-ion	3,7	мобильные устройства, строительные электроинструменты, автомобили
литий-полимерные Li-pol	3,7	мобильные устройства, автомобили
никель-цинковые Ni-Zn	1,6	замена стандартного гальванического элемента

Электрические и эксплуатационные характеристики аккумулятора зависят от материала электродов и состава электролита.» [35]

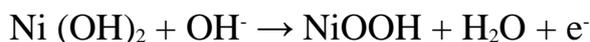
Рассмотрим каждый из перечисленных типов аккумуляторов более подробно.

1.1 NiMH аккумуляторы

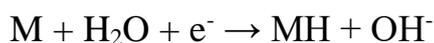
Аккумуляторы, обозначаемые как NiMH аккумуляторы являются никель-металл-гидридными аккумуляторами [28]. Никель-металлгидридные аккумуляторы основываются на накоплении водорода в объеме анода. Такой анод изготавливается из сплава, позволяющего абсорбировать водород. В качестве такого сплава выступает сплав никеля с лантаном. В процессе развития технологии изготовления NiMH аккумуляторов, последовательно переходили от сплава лантана и никеля LaNi_5 , в последующем стали использовать сплавы никеля, лантана и кобальта. Эти сплавы обладают возможностью абсорбировать атомы водорода. При этом химическая реакция в равновесном состоянии приводит к накоплению на аноде свободных электронов, которые при замыкании внешней цепи через нагрузку перемещаются к катоду. Таким образом происходит разряд аккумуляторов.

При подключении аккумулятора к внешнему источнику тока происходит заряд аккумулятора, который выражается в накоплении в объеме анода электронов.

Реакция заряда на аноде выглядит как:



Реакция заряда на катоде:



Реакции разряда идут в противоположном направлении.

Эти процессы проиллюстрированы на рисунке 1.

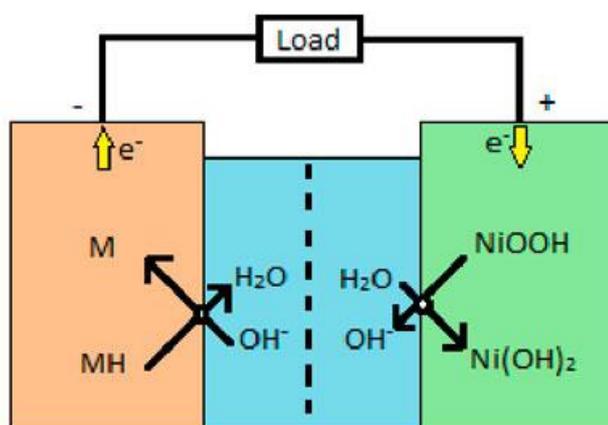


Рисунок 1 – Иллюстрация химических реакций в NiMh аккумуляторе при заряде

Структура NiMh аккумулятора кроме описанных ранее электродов включает в себя разделяющий электроды сепаратор. В цилиндрическом типе аккумуляторов сепаратор располагается между электродами и этот «бутерброд» сворачивается трубочкой и помещается в анодный стакан. Сверху свернутых электродов и сепаратора располагается термозащита, защитный клапан и катодный контакт. Вокруг анодного стакана располагается изолятор. Структура типового цилиндрического NiMh аккумулятора показана на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структура типового цилиндрического NiMh аккумулятора

С позиции безопасности NiMh аккумуляторы, как правило взрыво- и пожаробезопасны. В качестве дополнительной меры безопасности можно встраивать в зарядные устройства термисторы или другие схемотехнические решения, которые будут ограничивать протекающий через них зарядный ток при повышении температуры аккумулятора во время заряда.

NiMh аккумуляторы характеризуются зарядными токами величиной 0,2-0,5 C, что является достаточно небольшими величинами и не позволяет произвести быструю зарядку аккумуляторов, а следовательно использовать батареи большой емкости из таких аккумуляторов там, где требуется высокая скорость заряда. При этом, при хранении NiMh аккумуляторов необходимо учитывать, что скорость саморазряда при хранении составляет около 10-20% в месяц, при этом, что является достоинством таких аккумуляторов, при дли-

тельном хранении в разряженном состоянии процессы их деградации не ускоряются.

Если в процессе эксплуатации NiMh аккумуляторов происходит либо неполный разряд, либо неполный заряд, то классические аккумуляторы, как правило, проявляют так называемый «эффект памяти». Этот эффект возникает из-за роста количества кристаллов в объеме электролита и на поверхности электродов при прохождении окислительно-восстановительной реакции. При этом площадь контакта электродов с электролитом уменьшается, а следовательно снижается емкость аккумуляторов. Восстановления емкости можно добиться при проведении подряд нескольких циклов разряда-заряда, или, так называемой, тренировкой. Она заключается в заряде аккумуляторов импульсным током с кратковременным отрицательным импульсом. В таком режиме происходит разрушение образовавшихся ранее кристаллов и емкость аккумуляторов в некоторой степени восстанавливается. Однако, если рост кристаллов преодолел некоторый порог, то изменения могут быть необратимыми и аккумулятор выводится из эксплуатации.

1.2 NiCd аккумуляторы

Никель-кадмиевые аккумуляторы используют электроды, изготовленные из гидроксида оксида никеля один и металлического кадмия в качестве второго. Максимальное напряжение Ni-Cd аккумуляторов сразу после заряда составляет 1.3 В, опускаясь в течение короткого времени до 1.2В и на этом уровне удерживающееся с небольшим снижением почти до полного разряда. Никель—кадмиевые аккумуляторы имеют достаточно высокий срок эксплуатации при оценке по времени, а в циклах это порядка 2000 циклов заряда-разряда. Кроме этого, никель-кадмиевые аккумуляторы обеспечивают хорошие эксплуатационные показатели при пониженных температурах и при отрицательных температурах теряют емкость только незначительно [26].

Кроме этого, никель-кадмиевые аккумуляторы могут отдавать практически полную мощность при высоких токах разрядки за короткие интервалы времени.

К главным недостаткам никель-кадмиевых аккумуляторов относят большую стоимость материалов по сравнению с некоторыми другими типами аккумуляторов, а также безусловно высокую скорость саморазряда.

На уход никель-кадмиевых аккумуляторов с массового рынка в значительной мере влияют успехи в построении аккумуляторов высокой емкости NiMH типа, а также высокая токсичность материалов при утилизации никель-кадмиевых аккумуляторов.

Однако крупные вентилируемые батареи никель-кадмиевых аккумуляторов используют в аварийном освещении, резервном питании и т.п.

Рассмотрим физико-химические процессы, протекающие в никель-кадмиевых аккумуляторах.

В состав такого аккумулятора входит положительный электрод из оксид-гидроксида никеля, отрицательный электрод изготавливают непосредственно из металлического кадмия, между электродами располагается сепаратор с щелочным электролитом в виде гидроксида калия. Вся эта конструкция представляет собой закатанный в цилиндрическую форму «бутерброд», который помещается в металлический стакан, имеющий уплотнительную пластину и предохранительный клапан.

Электрохимические реакции, протекающие на электродах и в электролите выглядят следующим образом:

Во время разряда на кадмиевом электроде происходит выделение свободного электрона



Параметры никель кадмиевых аккумуляторов, в соответствии с [27] имеют «следующие значения:

удельная энергоемкость – около 50-65 Вт*ч/кг;

- удельная энергетическая плотность: от 50 до 150 Вт *ч/дм³;
- удельная мощность 150-500 Вт/кг;
- ЭДС 1.38В;
- рабочее напряжение 1.0-1.35В;
- нормальный ток зарядки от 0,1С до 1С
- максимальное количество циклов зарядки-разрядки: 100-900;
- саморазряд 10%/месяц;
- диапазон рабочих температур:-50...+40 °С;

Достоинства никель-кадмиевых аккумуляторов

- допускают глубокий разряд и при эксплуатации и при хранении;
- терпимы к высоким токам разряда вплоть до 50С;
- имеют более высокий, по сравнению с металл-гидридными аккумуляторами ток разряда: никель кадмиевые аккумуляторы допускают ток разряда до 15С, а металл-гидридные - только до 5С;
- по сравнению со свинцово-кислотными аккумуляторами имеют гораздо более высокую плотность энергии.» [27]

1.3 LiIon аккумуляторы

Литий-ионные аккумуляторы имеют внутреннюю структуру, показанную на рисунке 3

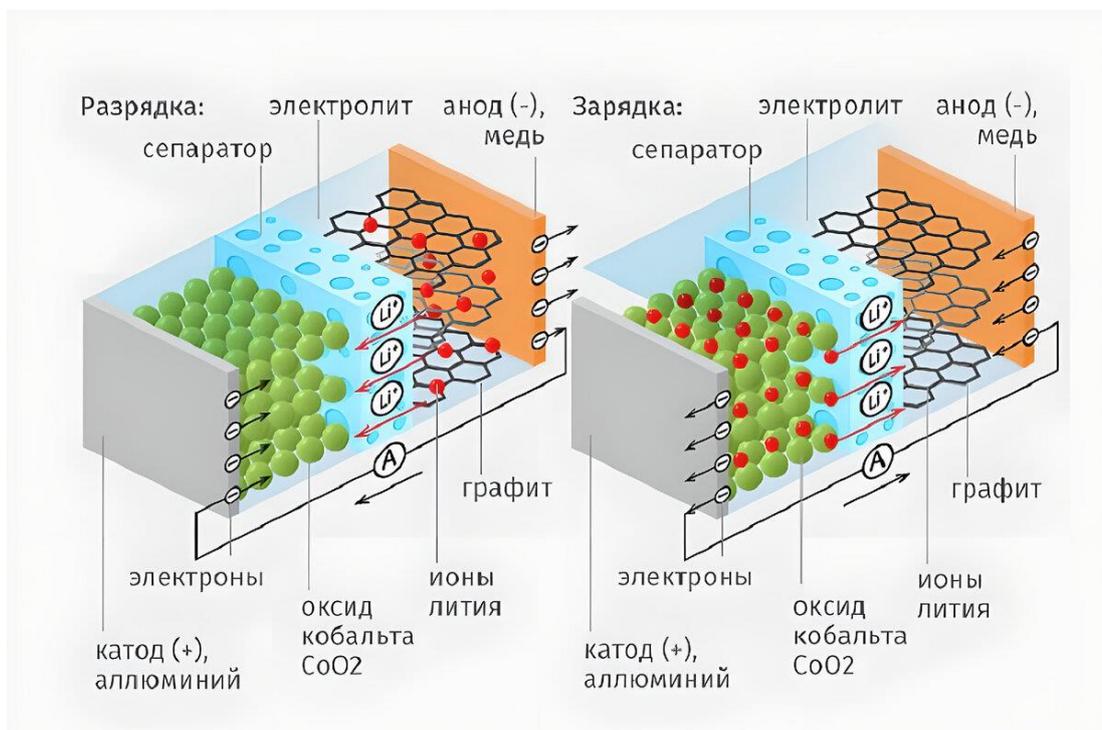


Рисунок 3 – Структура Li-Ion аккумулятора

Литий-ионные аккумуляторы делятся на следующие типы [21].

Литий-кобальтовые (ICR), имеют наиболее высокую емкость, ограниченный ресурс и высокие требования к условиям работы, выходные напряжения – 3...4.2В, удельная энергоемкость – 250Вч/кг, максимальный ток разряда - 2С, длительный рабочий ток разряда -1С, Взрывоопасны и могут воспламеняться или при глубоком разряде при перегрузке или при значительных тока потребления, превышающие номинальные.

Литий-никель-марганец-кобальт-оксидный (NMC), имеют номинальное напряжение 3.7В с диапазоном рабочих напряжений 2.6-4.3 В, токоотдачу до 2С, до 1000 циклов заряда/разряда, при частичном разряде – до 5000 циклов;

Литий-никель-кобальт-алюминий-оксидный (NCA) [22] имеет удельную плотность энергии от 200 до 260 Вт*ч/кг, число циклов до 500 максимальное напряжение на элементе 4.2В и диапазон рабочих напряжений 3.0-3.6В;

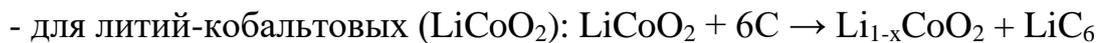
Литий-марганцевые (IMR или INR) – эти аккумуляторы имеют диапазон рабочих напряжений от 2.5 до 4.2В, удельную энергоемкость 14-150 Втч/кг и ресурс по времени эксплуатации до 6 лет, а по циклам заряд/разряд – до 1000 циклов. Ток нагрузки в стационарном режиме может достигать уровня 5С. Эти аккумуляторы теряют работоспособность при температурах ниже -10°С, имеют низкий уровень саморазряда и как правило не подвержены возгоранию и взрывам.

Литий железофосфатные аккумуляторы (LiFePO₄, LiFe, LFP, IFR) – в таких аккумуляторах катод выполняют из феррофосфата лития, анод - составной. Основой анода является медная подложка, на которую наносится тем или иным способом графит. Поскольку такие аккумуляторы имеют в совокупности очень привлекательные потребительские характеристики: невысокую удельную стоимость, низкую токсичность при утилизации и изготовлении, длительный срок службы измеряемый и во времени и в циклах заряда/разряда, такие аккумуляторы широко используют в электромобилях потребительского, коммерческого и технологического сегментов, в ИБП и вообще аккумуляторах, имеющих использование в стационарных установках. В настоящий момент доля таких аккумуляторов, используемых для электромобилей составляет около 30% всего рынка. Такое широкое использование в электротранспорте обусловлено низкой пожароопасностью таких аккумуляторов, но с другой стороны, что более актуально для широт Российской Федерации – такие аккумуляторы невозможно заряжать на морозе. К прочим особенностям таких аккумуляторов относят более длительный чем у остальных типов срок службы аккумуляторов во временном измерении, имеют стабильное напряжение разряда – почти всё время разряда напряжение на электродах аккумулятора составляет 3.2В, поскольку вместо кобальта, как у других типов литий-ионных аккумуляторов, используются фосфор для создания фосфата железа, снижается экологическая опасность таких аккумуляторов, по сравнению с кобальтовыми, имеют высокий пиковый ток и пиковую мощ-

ность, литий фосфатные аккумуляторы имеют более низкую скорость заряда по сравнению с другими типами литий-ионных и свинцово-кислотных аккумуляторов. С течением времени литий фосфатные аккумуляторы медленнее теряют емкость при эксплуатации по сравнению с другими типами литий-ионных аккумуляторов. ;

Литий-титанатные аккумуляторы (LTO) [24] в качестве анода используют соединение $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, - пентатитанат лития, поверхность анода сделана пористой и разработчики называют такое строение анода нанокристаллической решеткой, за счет такого решения поверхность анода типовой аккумуляторной ячейки можно оценивать, имеющей удельную плотность $100\text{м}^2/\text{г}$, что многократно превышает значение в $3\text{м}^2/\text{г}$ для углеродных электродов. Имеют самый широкий рабочий температурный диапазон от -60 до $+60^\circ\text{C}$ и диапазон рабочих напряжений одной ячейки от 1.6 до 2.7В , номинальное напряжение одной ячейки таких аккумуляторов 2.3В , величина удельной емкости около $100\text{Вт}\cdot\text{ч}$, имеют самый большой ресурс по циклам разряд/заряд – до 15000 , поскольку имеют самое низкое внутреннее сопротивление из всех модификаций LiIon аккумуляторов, то позволяют использовать сверхбыстрый заряд большими токами и большими токами же разряжать аккумулятор в случае необходимости, имеют сверхнизкий собственный саморазряд – около 0.02% в сутки. За счет того, что напряжение литий-титанатных аккумуляторов ниже, чем в целом у других типов литий ионных аккумуляторов, они имеют сравнительно меньшую удельную энергию – $30-11\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$. Из-за этого, несмотря на их гигантский ресурс, использование таких аккумуляторов в носимой электронике, требующей максимальную плотность энергии в объеме аккумулятора не получило распространения. Имеют теоретически самую большую востребованности для автомобилестроения, но большой ресурс аккумуляторов производители автомобилей воспринимают как рыночный недостаток, приводящий к снижению количества необходимых продаж.

Электрохимические уравнения литий-ионных аккумуляторов выглядят следующим образом:



Для литий-ионных аккумуляторов при их соединении в батареи последовательно актуальной становится задача выравнивания напряжения на последовательно включенных ячейках. Разные случаи, возникающие при заряде/разряде литий-ионных аккумуляторов показаны на рисунке 4.

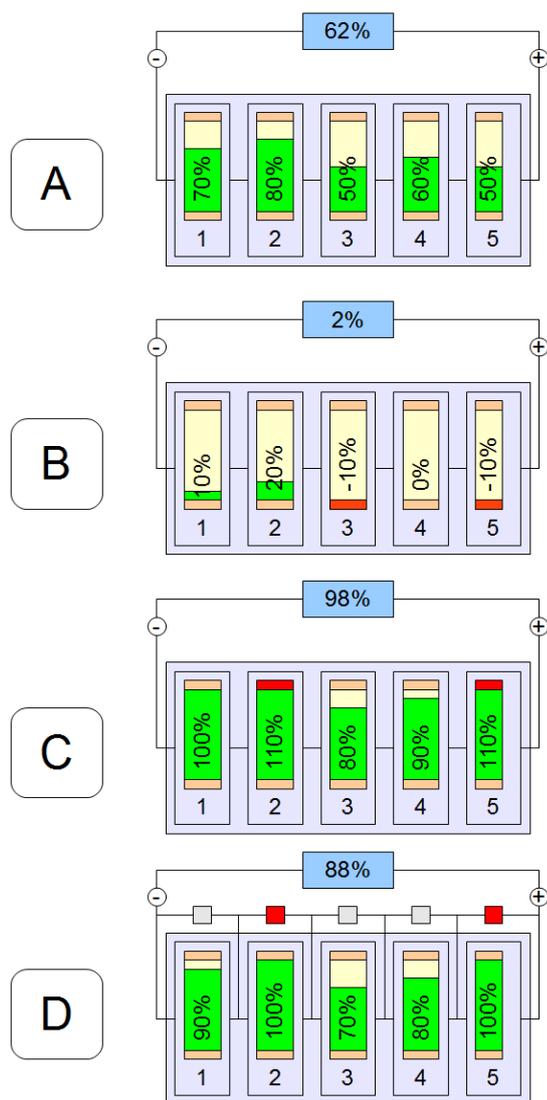


Рисунок 4 – Ситуации, возникающие при заряде батарей литий-ионных батарей аккумуляторов

Ситуация А: процесс разряда ячеек батареи во время работы.

Ситуация В: переразряд ячеек при отсутствии балансировочно-контрольного устройства.

Ситуация С: перезаряд ячеек при отсутствии балансировочно-контрольного устройства.

Ситуация Д – недозаряженные до номинальной емкости ячейки.

Для того, чтобы минимизировать негативный эффект от перечисленных ситуаций в состав устройств, питающихся от батарей аккумуляторов или в сами батареи аккумуляторов встраивают платы контроллера-выравнивателя напряжения.

Этот контроллер отслеживает уровень напряжения на каждой ячейке аккумуляторной батареи и либо отключает аккумуляторную батарею от нагрузки, если происходит переразряд ячеек, либо отключает ячейки от зарядного устройства, если напряжение на ячейке достигает верхнего заданного значения. При этом, контроллер заряда отключает от зарядного устройства ячейки, достигшие необходимого напряжения и оставляет заряжаться ячейки, напряжение на которых еще не достигло необходимого уровня.

Такие контроллеры называют контроллером или балансировочной платой или, общепринятой англоязычной аббревиатурой BMS (Battery Management System – система управления батареями).

Недостатками, общими для всех типов литий-ионных аккумуляторов, является их повышенная огнеопасность, особенно при повреждении защитных корпусов, высокая вероятность потери работоспособности при переразряде, а также значительные потери емкости при работе на морозе.

Вспыхнувший литиевый аккумулятор способен гореть даже без доступа воздуха, поскольку при его горении выделяются вещества, поддерживающие горение, а в случае литий-феррум-фосфатных аккумуляторов даже кислород, что делает или невозможным, или значительно затрудненным тушение загоревшихся аккумуляторов.

Считается, что литий-ионные аккумуляторы не обладают эффектом памяти, однако он был обнаружен в 2013 году, несмотря на то, что его величина достаточно незначительна.

1.4 LiPol аккумуляторы

LiPol аккумуляторы [23] являются усовершенствованной версией литий-ионных аккумуляторов, у которых сепаратор изготавливается из полимерных материалов. Это позволяет изготавливать аккумуляторы или их батареи не скручивая в цилиндр/спираль многослойные структуры анод/сепаратор/катод, а располагая их плоским образом, получая тонкие аккумуляторы. Толщина одной ячейки может быть ниже 3 мм. Но по сравнению с литий-ионными аккумуляторами их ресурс по циклам заряда и по времени эксплуатации меньше почти в два раза. Главной отличительной чертой Li-Pol аккумуляторов от Li-Ion является возможность изготовления батарей с максимальным разрядным током до 130С.

Считается, что из-за отсутствия металлического корпуса взрывоопасность литий-полимерных аккумуляторов ниже чем литий-ионных, а вот пожароопасность – выше. Надежность литий-полимерных аккумуляторов ниже, чем литий-ионных, срок службы у них также почти в два раза меньше срока службы литий-ионных аккумуляторов.



Рисунок 5 – Внешний вид одной ячейки Li-Pol аккумулятора

Внутренняя структура Li-Pol аккумулятора показана на рисунке 6.

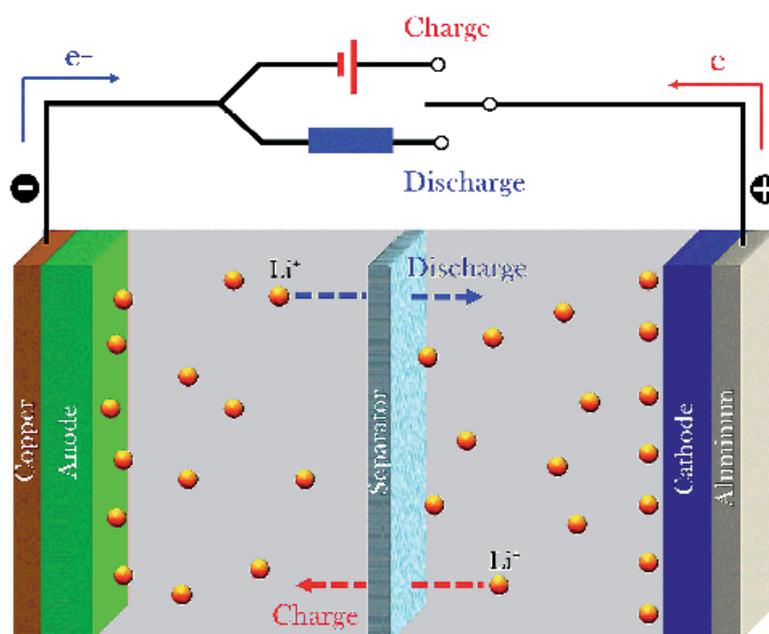


Рисунок 6 – Структура ячейки Li-Pol аккумулятора

Как и в литий-ионных аккумуляторах, ионы лития перемещаются от катода к аноду при зарядке и в обратном направлении – при работе аккумуля-

лятора на нагрузку. При этом, в отличие от текстильного сепаратора в литий-ионных аккумуляторах, в литий-полимерных аккумуляторах ионы лития перемещаются в электролите представляющем собой добавленные в полимер соли лития. Уровень напряжения на ячейке литий-полимерного аккумулятора меняется от 2.7...3 В в разряженном состоянии до 4.2В в заряженном.

Основные правила при работе с литий-полимерными аккумуляторами следующие:

- максимальное напряжение заряда – 4.2В;
- не допускать короткого замыкания, приводящего к перегреву и возгоранию аккумулятора;
- не допускать повышения температуры аккумулятора выше 60 °С%;
- не нарушать герметичность оболочки, что может привести к возгоранию;
- следить за уровнем разряда не ниже 3В на ячейку;
- не хранить в разряженном состоянии;
- после нахождения на морозе поднимать температуру аккумулятора перед зарядом;
- для хранения следить, чтобы напряжение аккумулятора было около половины диапазона изменения напряжения между максимальным и минимальным значениями.

2 Методы контроля основных параметров аккумуляторов

Опишем основные, используемые на сегодняшний день методы контроля параметров аккумуляторов, которые регламентируются российскими ГОСТами.

Рассмотрим, в первую очередь ГОСТ Р МЭК 61960-2007 «АККУМУЛЯТОРЫ И АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ, СОДЕРЖАЩИЕ ЩЕЛОЧНОЙ И ДРУГИЕ НЕКИСЛОТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ» [16], который в первую очередь «устанавливает основные технические требования, требования к обозначению, маркировке, размерам, а также методы испытаний для определения основных характеристик и другие требования, предъявляемые к литиевым аккумуляторам и батареям, применяемым в оборудовании, предназначенном для портативного применения.» [16]. Структура испытаний в соответствии с этим ГОСТом показана на рисунке 7. Содержательно испытания включают в свой состав измерение емкости аккумулятора - номинальную и при коротком режиме разряда, сохранность и отдачу заряда, долговечность при циклировании, измерение внутреннего сопротивления и испытание статическим разрядом

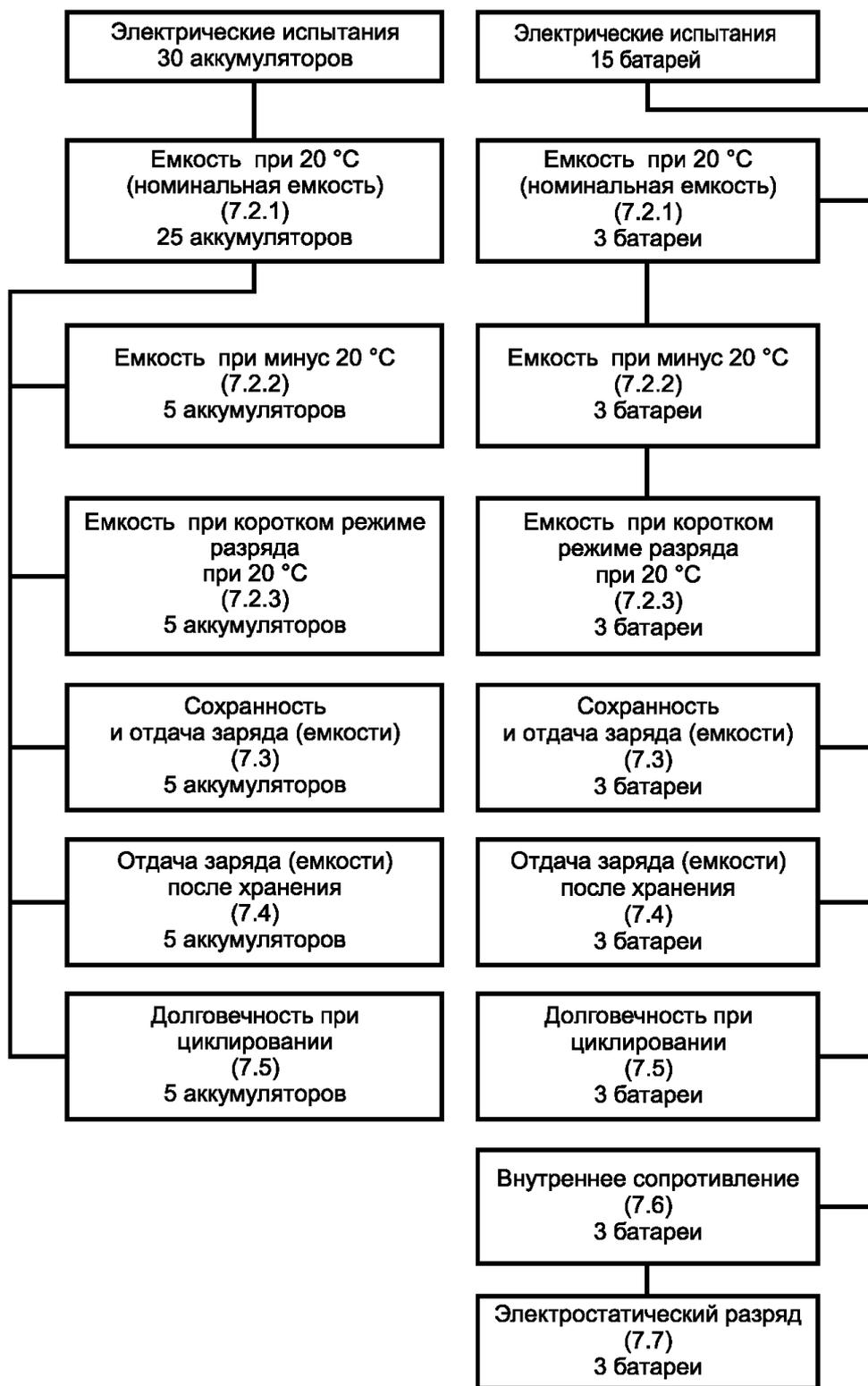


Рисунок 7 – Перечень испытаний в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61960-2007

Рассмотрим более подробно термины и определения, регламентируемые этим ГОСТом:

- «отдача заряда: емкость, которую может отдать аккумулятор после заряда, следующего (по окончании проведения) за испытанием на сохранность заряда,

- сохранность заряда: емкость, выраженная в процентах от номинальной емкости, которую может отдать аккумулятор после хранения в течение установленного времени при заданной температуре без последующего заряда;

- конечное напряжение: установленное напряжение замкнутой цепи, при котором разряд аккумулятора или батареи считается законченным;

- номинальное напряжение: подходящее приблизительное значение напряжения, используемое для идентификации напряжения аккумулятора или батареи,

- номинальная емкость: количество электричества C_5 в А*ч, выражаемое в ампер – часах, указанное изготовителем, которое может отдать аккумулятор или батарея при 5-часов разряде в условиях заряда, хранения и разряда, установленных в п.7.2 этого стандарта.» [16]

- приведенный разрядный ток I_t , которым аккумулятор разряжается в течение 1 часа: $I_t A = C_5 Aч / 1ч$.

Для определения номинальной емкости аккумуляторной батареи определяют разрядную характеристику и проводят следующие действия:

- аккумуляторы должны быть заряжены до номинального тока;
- аккумуляторы выдерживают при температуре окружающего воздуха не менее 1ч;

- испытуемый аккумулятор разряжают током $0,2I_t, A$, отслеживая необходимую величину конечного напряжения,

- подсчитывают емкость аккумулятора, в идеале она должна совпадать со значением, указываемым производителем в качестве номинального для данного аккумулятора.

Характеристика короткого режима разряда снимается по следующему алгоритму:

- аккумулятор полностью заряжен,
- аккумулятор или батареи выдерживаются при комнатной температуре не менее одного часа,
- аккумулятор или батарея разряжаются постоянным током $1.0 \cdot I_t$, до установленного значения конечного напряжения,
- значение емкости в ампер-часах, полученное для предыдущего пункта должно быть не меньше номинального для испытуемого аккумулятора.

Сохранность и отдачу заряда измеряют следующим образом:

- аккумулятор или батарея полностью заряжается при комнатной температуре, предварительно находясь при этой температуре не менее часа,
- аккумулятор или батарея разряжаются постоянным током $0,2 I_t$ при температуре окружающей среды до установленного конечного напряжения,
- аккумулятор хранится в течение 28 суток, а затем у него измеряется емкость, которая должна быть не меньше 70% для аккумулятора и 60% для батареи.

Устойчивость при циклировании (наработка в циклах):

- аккумулятор или батарея полностью заряжается при комнатной температуре, предварительно находясь при этой температуре не менее часа,
- аккумулятор или батарея разряжаются постоянным током $0,2 I_t$ при температуре окружающей среды до установленного конечного напряжения,
- аккумулятор или батарея полностью заряжается при комнатной температуре методом, который указывает производитель,
- аккумулятор или батарею подвергают циклам разряда-заряда до тех пор, пока полученная емкость не станет меньше 60% номинальной емкости,

- число циклов, после которых емкость станет меньше 60% номинальной, должно быть больше, чем указанные в таблице 3 величины.

Граничные параметры емкостей аккумуляторов после тех или иных испытаний сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Требования для стандартных типов аккумуляторов и батарей на их основе

Наименование параметра	Пункт стандарта ГОСТ Р МЭК 61960- 2007	Значение параметра для приемки	
		аккумулятора	батарей
Емкость при $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ (номинальная емкость), в процентах от C , $A^*ч$, не менее	7.2.1.	100	100
Емкость при $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ (номинальная емкость), в процентах от C , $A^*ч$, не менее	7.2.2.	30	30
Емкость при коротком режиме разряда при $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ (номинальная емкость), в процентах от C , $A^*ч$, не менее	7.2.3.	70	60
Сохранность заряда (емкости) в процентах от C , $A^*ч$, не менее	7.3	70	60
Отдача заряда (емкости) в процентах от C , $A^*ч$, не менее	7.3	85	85
Отдача емкости после хранения, в процентах от C , $A^*ч$, не менее	7.4	50	50
Долговечность при циклировании, число циклов, не менее.	7.5	400	300
Электростатический разряд	7.7	-	Работоспособна

Испытание по определению внутреннего сопротивления батареи можно выполнять двумя способами: испытанием переменным током или испытанием постоянным током.

Регламентировано, что если над аккумулятором необходимо провести оба типа испытаний, то сначала проводят испытание по переменному току, а потом – по постоянному. В таком случае исчезает необходимость в проведении цикла разряда/заряда между испытаниями.

Перед проведением испытаний должны быть проведены следующие действия:

- аккумулятор или батарея полностью заряжается при комнатной температуре, предварительно находясь при этой температуре не менее часа,
- аккумулятор или батарея разряжаются постоянным током $0,2It$ при температуре окружающей среды до установленного конечного напряжения,
- аккумулятор или батарея полностью заряжается при комнатной температуре методом, который указывает производитель.

После выполнения этих действий можно приступить к проведению испытаний.

Определение внутреннего сопротивления методом переменного тока.

При таких испытаниях необходимо обеспечить протекание через аккумулятор переменного тока частотой $(1,0 \pm 0,1)$ кГц с некоторым среднеквадратичным значением I_a . При этом необходимо измерить падение напряжения на клеммах аккумулятора/батареи со среднеквадратичным напряжением U_a .

Тогда импеданс, примерно равный на частоте 1кГц внутреннему сопротивлению, будет получен по выражению

$$R_{ac} = U_a / I_a \quad (1).$$

И это значение принимают за внутреннее сопротивление аккумулятора/батареи. При этом переменный ток должен быть такой величины, чтобы пиковое напряжение на аккумуляторе не превышало 20мВ.

Следят, чтобы полученное значение R_{ac} не превышало указанного производителем.

Измерение внутреннего сопротивления по постоянному току проводят следующим образом.

- берут заряженную описанным выше способом батарею или аккумулятор,
- начинают разряд аккумулятора/батареи током $I_1=0,2 \cdot I_t$,
- на 10-й секунде разряда измеряют и фиксируют напряжение U_1 на аккумуляторе под нагрузкой,
- сразу после замера напряжения U_1 разрядный ток увеличивают до величины $I_2=1,0 \cdot I_t$ и на 1-й секунде разряда измеряют и регистрируют напряжение на аккумуляторе/батареи под нагрузкой U_2 .

Все напряжения необходимо измерять непосредственно на клеммах аккумулятора/батареи. После этого вычисляют внутреннее сопротивление аккумулятора/батареи по постоянному току:

$$R_{dc}=(U_1-U_2)/(I_2-I_1), \quad (2)$$

Измеренное значение R_{dc} должно быть меньше указанного производителем.

Зафиксируем основные диапазоны токов, коммутируемые силовыми приборами и напряжения, которые должны преобразовать масштабирующие цепи нашего измерителя.

Для введения определенности ограничимся литий ионными и литий полимерными аккумуляторами, а также батареями на их основе с номинальной емкостью до 10000 мАч и максимальным количеством последовательно соединенных ячеек 5 штук, или в условном обозначении 5S, что даст номинальное напряжение $3.7В \cdot 5 = 18.5В$ или в максимальном значении $4.2 \cdot 5=21 В$.

В соответствии с изложенным выше материалом из ГОСТ Р МЭК 61960-2007, устройство контроля параметров должно измерять постоянный

ток $0,2I_t$, I_t , а также переменный ток при определении и вычислении внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току. Например, если мы рассматриваем аккумулятор с номинальной емкостью 10Ач, то ток I_t для такой емкости будет равняться 10А

В соответствии с изложенным, мы можем сформулировать следующие требования к разрабатываемому устройству диагностики аккумуляторов:

- возможность измерять напряжение на аккумуляторе/батарее;
- возможность измерять ток, протекающий через аккумулятор/батарею;
- измерение интервалов времени, в течение которых происходит коммутация;
- управлять коммутационными устройствами (реле, транзисторы), которые подключают к аккумулятору необходимую на разных этапах нагрузку;
- устройство индикации результатов измерений;
- устройство для выбора режима измерения и выбора типа аккумуляторов, испытываемых разрабатываемым устройством

Погрешности измерений также приведены в ГОСТ. Для напряжения это 1%, для тока – 1%, для емкости 1%, для температуры 2 %, для времени 0,1%.

3 Обзор рыночных предложение устройств тестирования аккумуляторов

В настоящее время на рынке представлены разнообразные предложения тестеров параметров аккумуляторных батарей. Подобные приборы можно разделить на несколько основных типов:

- тестеры автомобильных аккумуляторов, рассчитанные на работу с кислотными типами аккумуляторов, используемых как стартерные батареи в автомобилях с ДВС;

- тестеры аккумуляторов, рассчитанные на использование с определенными типами аккумуляторов: Li-Ion, Li-Pol, NiMHg, NiCd;

- универсальные зарядно-диагностические комплексы, включающие в свой состав зарядные устройства, электронные нагрузки для управления процессом разряда, а также функции измерения и расчета нормированных разными стандартами параметров аккумуляторов.

Соответственно различаются ценовые категории, массогабаритные показатели и функционал этих устройств.

Рассмотрим некоторые из них из разных ценовых категорий.

Цифровой измеритель параметров аккумуляторов JUNTEK VAT1100 [34].

Это измерительный прибор, имеющий жидкокристаллический сенсорный экран, на котором построен интерфейс взаимодействия с пользователем. Функционально он позволяет измерять напряжение, ток, потребляемую мощность и электроэнергию, а также емкость тестируемого аккумулятора. С помощью выносного термодатчика он также позволяет измерять температуру аккумуляторной батареи.

Конструктивно измеритель разделен на блоки по исполняемым функциям: у него есть отдельный измерительный блок и отдельный блок индикации.

Внешний вид измерителя показан на рисунке 8.



Рисунок 8 – Внешний вид измерителя JUNTEK VAT1100

Связь между этими блоками может строиться либо по проводному каналу – с помощью USB кабеля, или по беспроводному каналу стандарта NRF. Питание осуществляется от внешнего напряжения 10-30В.

«Прибор имеет следующие характеристики:

Диапазон измерения напряжения 0 ~100 В

Точность измерения напряжения 0.01 В

Диапазон измерения тока 0 ~ 100 А

Точность измерения тока 0.1 А

Диапазон измерения температуры -20 ~ 120 °С

Мощность отображения на дисплее 0 % ~ 100%

Диапазон измерения мощности 0 ~ 200 кВт

Точность измерения мощности 0.001Вт

Диапазон измерения емкости батарей 0 ~ 2000 кА·ч

Разрешающая способность 0.001 А·ч

Диапазон измерения электроэнергии 0 ~ 4000 кВт·ч

Точность измерения электроэнергии 0.001 Вт·ч

Диапазон измерения времени 0 ~ 99 дней
Точность измерения времени 1 секунда
Диапазон настройки беспроводного канала А ~ Z (29 каналов)
Диапазон адресов 01 ~ 99
Погрешность измерения напряжения $\pm 2 \%$
Погрешность измерения тока $\pm 5 \%$
Частота дискретизации 5 с-1
Расстояние связи до 10 метров
Мощность, потребляемая измерительным модулем около 0.4 Вт
Мощность, потребляемая дисплеем 0.5 Вт
Защита от перегрузки по току 0 ~ 300 А
Защита нагрузки от повышенного напряжения 0 ~ 100 В
Защита нагрузки от пониженного напряжения 0 ~ 100 В
Защита реле 0 ~ 10 с
Общие характеристики
Питание 5 В
Дисплей LCD
Габариты дисплейного модуля 92 мм x 54 мм x 20.8 мм
Габариты измерительного модуля 113.2 мм x 57.2 мм x 48.8 мм
Масса около 300 г.» [25].

Прибор поддерживает несколько способов подключения к тестируемой нагрузке.

Питание от тестируемого аккумулятора. В этом случае аккумуляторная батарея должна иметь напряжение от 10 до 100В. Подключение показано на рисунке 9.

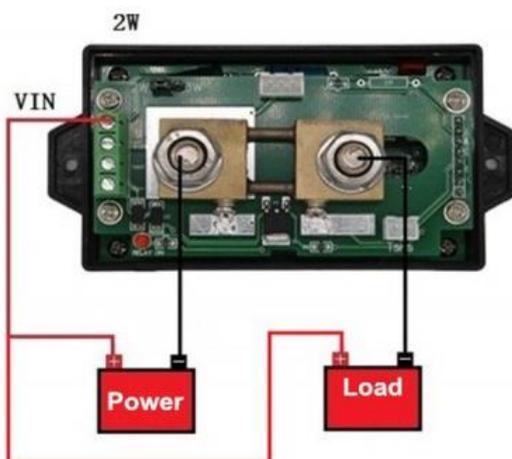


Рисунок 9 – Подключение тестера JUNTEK VAT1100 при питании его от тестируемого аккумулятора с подключаемой внешней нагрузкой

Другим вариантом подключения является использование отдельного источника энергии (сетевого блока питания или аккумуляторной батареи) для питания прибора. Тогда подключение выглядит, как показано на рисунке 10.

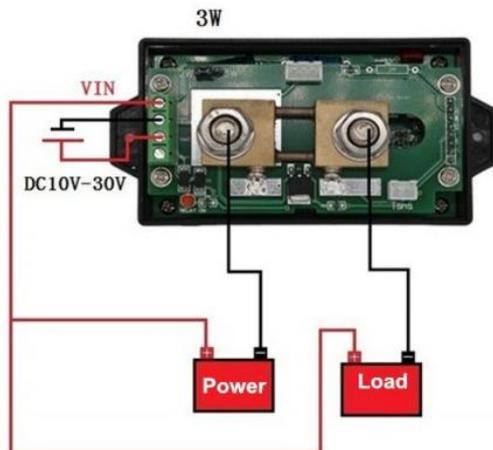


Рисунок 10 – Подключение тестера JUNTEK VAT1100 при питании его от отдельного аккумулятора или источника питания с подключаемой внешней нагрузкой

И, наконец, третий вариант подключения, когда используются встроенные цепи управления внешним реле, выполняющим защитные функции, показан на рисунке 11.

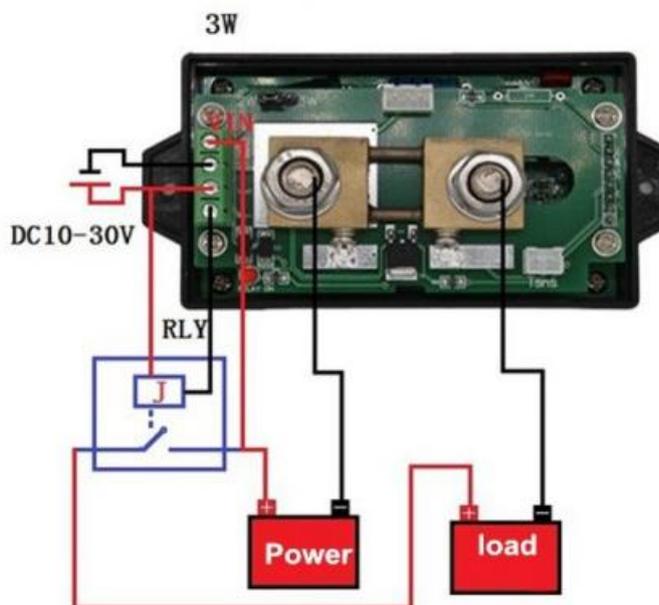


Рисунок 11 – Подключение тестера JUNTEK VAT1100 при питании его от отдельного аккумулятора или источника питания с подключаемой внешней нагрузкой и использованием защитного реле

К достоинствам этого прибора можно отнести беспроводной канал связи между силовым и информационным модулями, а также возможность использования дополнительных защитных цепей на основе реле.

Недостатками является не совсем удобное подключение нагрузки и тестируемых источников к измерительному шунту прибора, требующее вскрытие корпуса прибора.

Стоимость прибора 3124 рубля.

Измеритель емкости аккумуляторов ZH-YU ZB206+

Следующим прибором, который мы будем рассматривать будет Измеритель емкости аккумуляторов ZH-YU ZB206+ [20].

Этот прибор поставляется в минималистическом конструктивном оформлении: в виде распаянной платы в бескорпусном варианте. Внешний вид измерителя емкости показан на рисунке 12.

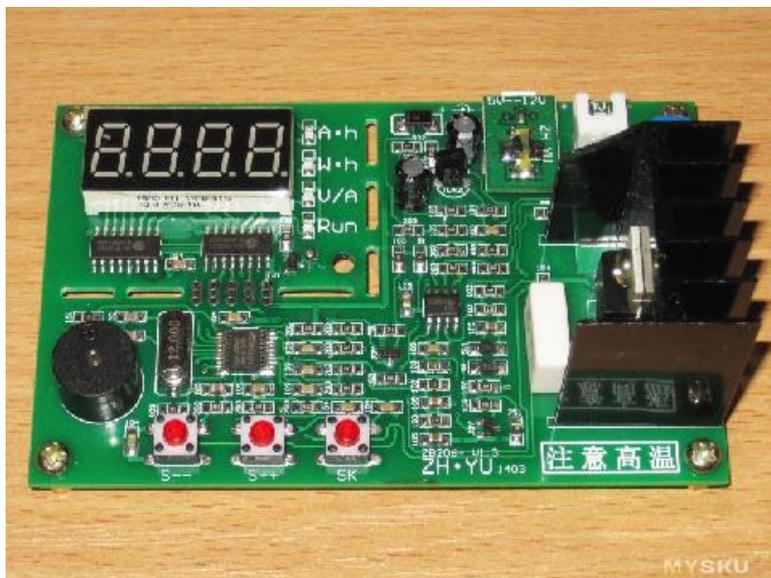


Рисунок 12 - Измеритель емкости аккумуляторов ZH-YU ZB206+

«Прибор имеет следующие характеристики:

Напряжение питания: DC12V / 5V (опционально)

Рабочий ток: <35 мА

Максимальное входное напряжение батареи: 8.5V

Максимальная погрешность тока разряда: 1% + 2 мА

Ошибка измерения напряжения: 1% -3D

Максимальная ошибка общих результатов измерений: 0,1-0,2 А 2,5%,
0,3-0,5 А 1,6%, 0,6-1,0 А 1,2%, 1,1 А-2,6 А 1%

Размер печатной платы (без медных опор): 97 x 62 x 38 мм

Вес (с медными ножками): 47 г» [20].

Для индикации показаний измерений и вычислений используется четырехразрядный семисегментный индикатор. Для изменения настроек вели-

чины тока уставки используются две кнопки. Для использования меню предназначена третья кнопка. Меню позволяет провести следующие настройки:

«1, 2. — Двухпроводный или четырехпроводный режим измерения.

3. Автоопределение типа аккумулятора и соответственно автоматическая установка напряжения окончания разряда. Для заряженного LiIon это 3 Вольта, LiFe — 2.5 Вольта, Никелевых — 1 Вольт.

4. Отключение пищалки.

5. Отключение лимита максимальной рассеиваемой мощности.

6, 7. — Мощность в ваттах при которой будет включаться вентилятор, при 00 работает всегда пока идет разряд.

8. Максимально можно выставить 10 Ватт, но включается этот режим несколько оригинально, не перебором 7-8-9, а в обратную сторону 3-2-1-10.» [20].

К достоинствам данной модели относят:

- корректное измерение тока и напряжения аккумулятора,
- удобство пользования меню для выбора конечных значений измерений,
- возможность продолжения тестирования после отключения питания, проведенные частичные замеры сохраняются в памяти устройства.

Недостатки:

- неудобные коммутации для выполнения измерения внутреннего сопротивления,
- отсутствуют измерения сопротивления на переменном токе в 1кГц,
- неустойчивые измерения и их показания.

Стоимость прибора 550 руб.

Электронная нагрузка EBC-A10H марки ZKEtech с функцией тестирования аккумуляторов [36].

Внешний вид электронной нагрузки показан на рисунке 13



Рисунок 13 – Внешний вид электронной нагрузки ZKEtech EBC-A10H

Данный прибор имеет следующие технические характеристики:

- «- питание — 19-24 В 4 А или от 220 В при наличии встроенного БП;
- диапазон входного напряжения — 0.00-30.00 В, дискретность измерения 0.01 В;
- диапазон выходного напряжения — до 18 или 22 В;
- ток нагрузки — 0.05-10.00 А, дискретность установки 0.01 А;
- ток заряда — 0.05-5.00 А, дискретность установки 0.01 А;
- режим нагрузки — СС, СР;
- режим заряда — СV;
- погрешность измерения напряжения: до 4.5 В — дискретность измерения 0.003 В, погрешность $\pm 0.5\%$, от 4.5 до 30 В — дискретность измерения 0.01 В, погрешность $\pm 0.5\%$, измерение тока — 0.05-10.00А, дискретность 0.01А, погрешность $\pm 0.5\%$;
- измерение емкости: до 10Ач — дискретность 0.001Ач (1мАч), 10-100Ач — дискретность 0.01Ач (10мАч), 100Ач и больше — 0.1Ач.» [36]

На экран в ручном режиме выводится:

1, 2. Режим работы, текущее напряжение и ток, а также время, емкость мАч, текущая мощность, емкость Втч.

3, 4. То же самое в работе.

5, 6. Есть режим СС (постоянный ток) и СР (постоянная мощность).

7 — 11. Режимы заряда для аккумуляторов разных типов, при этом LiPo подразумевает и работу с LiIon.

12. Ручной режим заряда, где ток и напряжение выставляется вручную.

Электронная нагрузка имеет программное обеспечение. «Главное окно включает в себя большую область для построения графиков, по умолчанию выводится ток и напряжение, но можно включить отображение и графика мощности.

Правее располагается область индикации и управления, где отображается текущее напряжение, установленный ток нагрузки, а в режиме заряда реальный, мощность и время с момента старта теста.

Чуть ниже управление режимами, кнопки запуска теста, остановки, изменения тока нагрузки без остановки теста (только в режиме нагрузки) и кнопка «Монитор», в этом режиме нагрузка работает как логгер тока и напряжения никак не влияя на процесс.

В самом низу строка где выводится: название устройства, режим работы и параметры, напряжение в начале и конце теста, емкость мАч, Втч, среднее напряжение за весь тест, цвет соответствия графиков.» [36].

Рабочий экран программного обеспечения показан на рисунке 14.

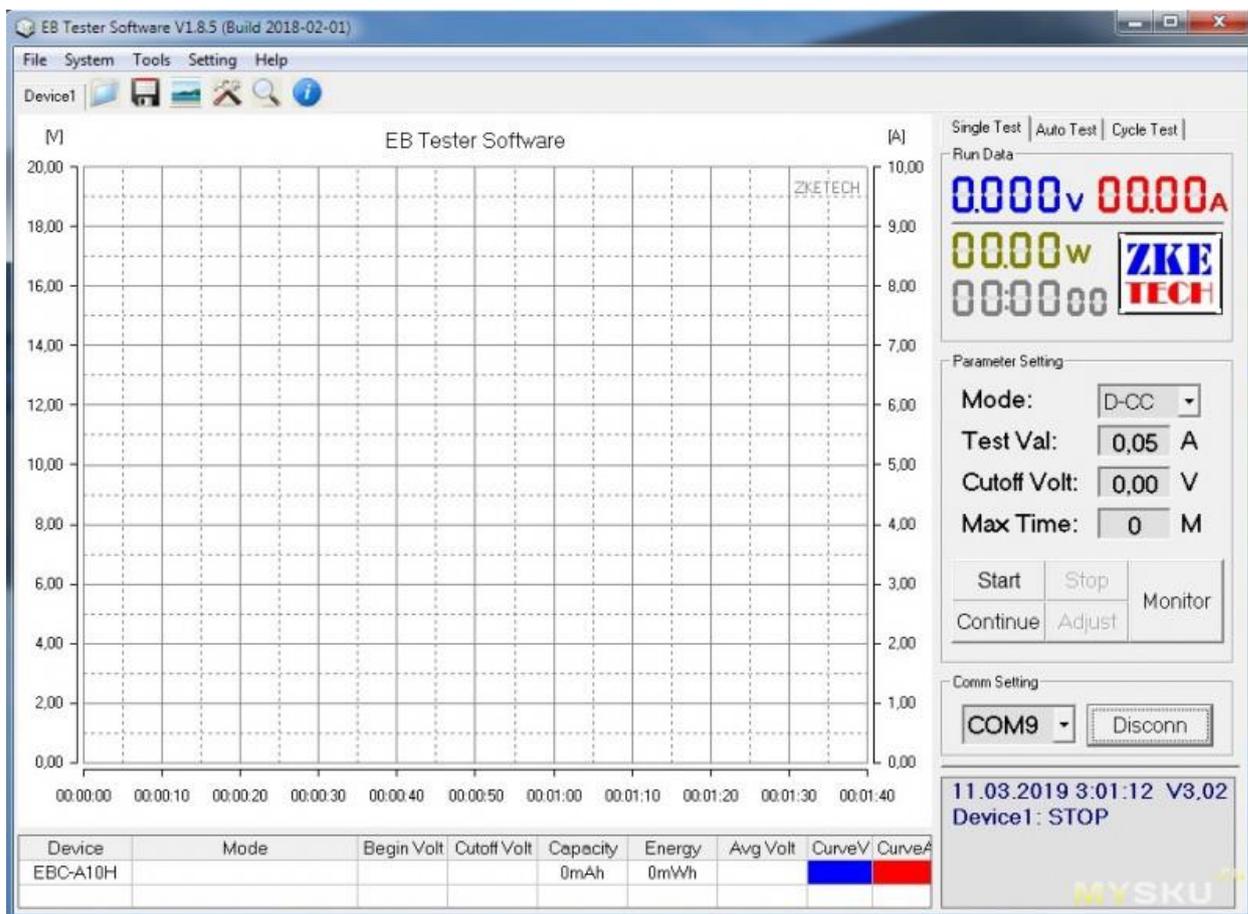


Рисунок 14 - Рабочий экран программного обеспечения ZKEtech EBC-A10H

Рассмотрим следующий тип тестеров аккумуляторов, ориентированный на тестирование автомобильных 12 вольтовых аккумуляторов. Это модель Foxwell BT100Pro [32].

Его внешний вид показан на рисунке 15.



Рисунок 15 – Внешний вид автомобильного тестера ZKEtech EBC-A10H

Производитель публикует следующие технические характеристики.

- назначение – тестирование автомобильных аккумуляторов;
- номинальные напряжения тестируемых аккумуляторов: 6 и 12 В;
- пусковой ток от 100 до 1100 А ;
- типы аккумуляторов: гелевые, абсорбционные, кислотные;
- определение неисправных элементов;
- тестирование в стандартах CCA, VCI, CA, MCA, JIS, DIN, IEC, EN, SAE;
- фиксация результатов тестирования через 3с после начала замеров;
- тестируемое напряжение 6-18 вольт постоянного тока;
- рабочий диапазон температур: -20С — 60С

Для подключения к тестируемым аккумуляторам предусмотрены крупноразмерные зажимы типа «крокодил».

4 Структурная схема устройства для контроля параметров аккумуляторов

В предыдущем разделе были сформулированы основные требования к разрабатываемому устройству: возможность коммутировать нагрузочное сопротивление, присоединяя его к аккумулятору для потребления от него токов разных номиналов в соответствии ГОСТ, для этого в состав разрабатываемого устройства необходимо включить силовой коммутатор. Для выбора режима измерения и удобства пользователя, в состав устройства необходимо включить кнопочную клавиатуру для выбора режимов измерения и экран, на котором отображались бы текущие режимы и меню пользователя. Кроме этого, было бы удобно, чтобы измеренные значения сохранялись бы в памяти устройства. Соответственно, центральным обрабатывающим узлом целесообразно выбрать микроконтроллер.

Для определения величины внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току выделим отдельный модуль, который будет генерировать переменное напряжение в соответствии с требованиями ГОСТ и отслеживать величину переменной составляющей тока, протекающего при этом через аккумулятор.

Для получения необходимых управляющих аналоговых сигналов будем использовать цифро-аналоговый преобразователь ЦАП.

Аналоговые сигналы, снимаемые с разных точек схемы через аналого-цифровой преобразователь АЦП будем подавать в микроконтроллер для проведения необходимых вычислений.

Для измерения напряжения, поскольку объектом измерения является аккумуляторная батарея, можно использовать шунты и делители напряжения, с соответствующими преобразователями сигналов.

Таким образом, структурную схему разрабатываемого устройства можно собрать из блоков, как показано на рисунке 16

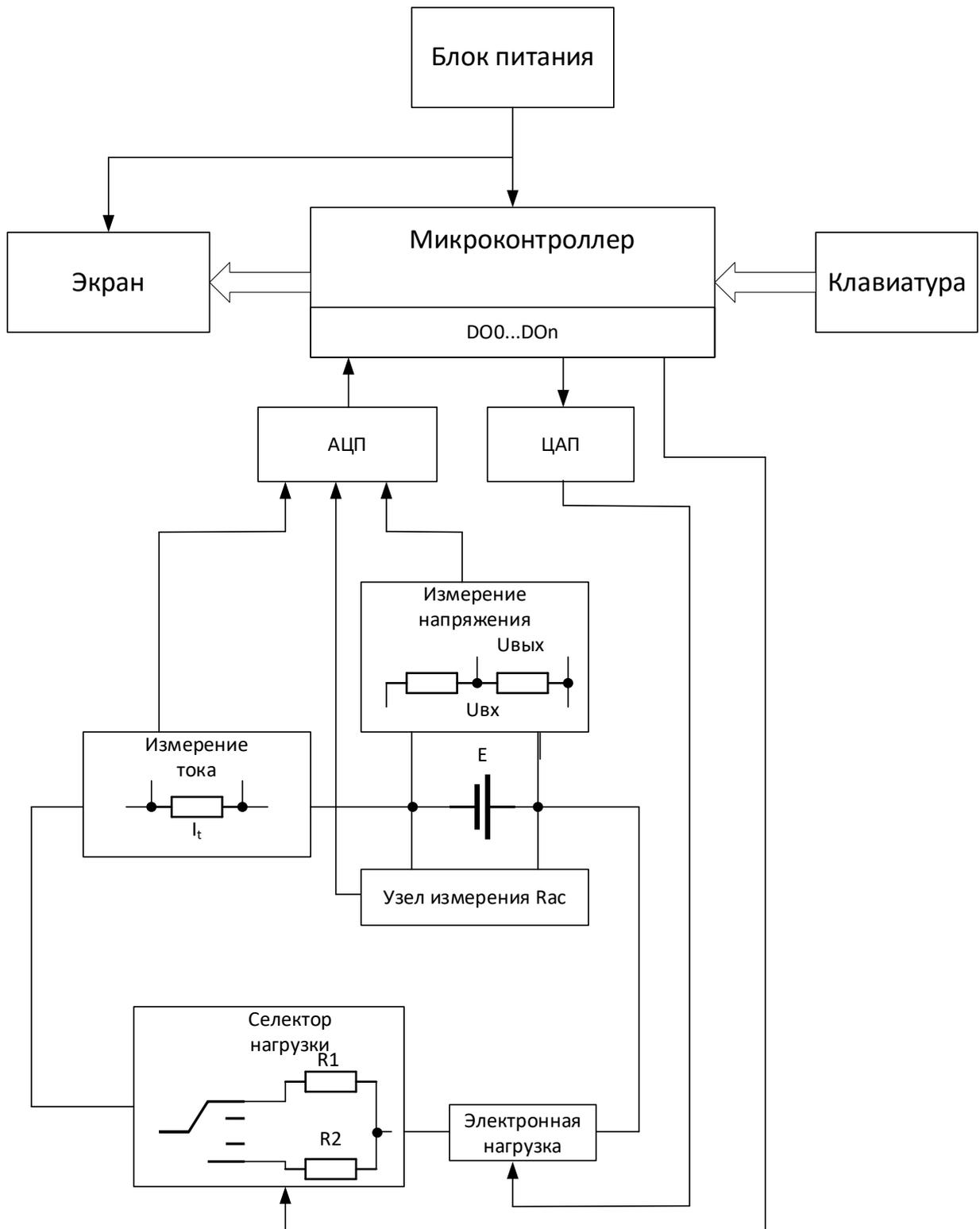


Рисунок 16 – Структурная схема устройства для тестирования аккумуляторных батарей

На этой схеме показан микроконтроллер, выполняющий функции вычислителя, модуль измерения тока, модуль измерения напряжения, подключаемый непосредственно к клеммам аккумулятора, экран для отображения интерфейса пользователя и результатов измерений/вычислений, а также клавиатура для выбора режима работы.

Также на схеме указан отдельный блок для генерации переменного напряжения, необходимого при определении внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току.

Блок питания включает в свой состав как собственно блок питания, так и необходимые для работоспособности схемы преобразователи постоянного напряжения.

Перейдем к составлению алгоритма работы устройства для тестирования аккумуляторных батарей.

5 Разработка алгоритма работы устройства тестирования

В работе устройства будем в первую очередь ориентироваться на алгоритмы работы с аккумуляторами по ГОСТ Р МЭК 61960-2007. При этом должен выполняться ряд последовательных действий, которые с позиции макроуровня измерений ГОСТ являются служебными.

Микроконтроллер производит инициализацию своей внутренней периферии. Выставляет на всех выходах комбинацию логических уровней, замыкающих все силовые цепи и отключающие от аккумулятора всю нагрузку.

После этого появляется начальный экран предоставляющий пользователю возможность выбора режима работы и микроконтроллер переходит в режим ожидания реакции пользователя и выбора следующего действия.

Как было описано выше нам необходимо обеспечить проведение следующих измерений:

- измерение напряжения на аккумуляторе;
- измерение емкости аккумулятора;
- измерение внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току;
- измерение внутреннего сопротивления аккумулятора по постоянному току;
- емкость аккумулятора при коротком режиме разряда.

Все эти операции выполняются при определенных коммутациях узлов схемы и временных интервалах, отслеживаемых микроконтроллером.

Опишем, как будут проводиться все эти действия применительно к предложенной структурной схеме.

5.1 Выбор режима измерения

Пользователь выбирает нажатием кнопок «вверх» или «вниз» из меню методом последовательного перебора тип аккумулятора, количество последовательно соединенных ячеек аккумулятора и его номинальную емкость и подтверждает выбор нажатием кнопки «ввод». Подтвердив свой выбор, он переходит на уровень проведения измерений и выбирает перебором одну из пяти позиций:

- измерение напряжения на аккумуляторе;
- измерение емкости аккумулятора;
- измерение внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току;
- измерение внутреннего сопротивления аккумулятора по постоянному току;
- емкость аккумулятора при коротком режиме разряда.

После выбора пользователь нажимает кнопку ввод и попадает на соответствующий экран действия.

Блок схема, описывающая перечисленные действия показана на рисунке 17.



Рисунок 17 – Блок-схема этапа инициализации

5.2 Измерение напряжения на аккумуляторе

Для измерения напряжения на аккумуляторе необходимо отключить нагрузку, выставить на коммутаторе напряжения комбинацию, подключающую аттенюатор с максимальным коэффициентом деления, после чего провести опрос порта АЦП, к которому подключается аттенюатор с максимальным коэффициентом деления.

Если после измерений на этом входе получается максимально возможное цифровое значение, то устанавливается флаг переполнения, коммутатор отключается от аккумулятора и на экран выводится сообщение о том, что напряжение на аккумуляторе превышает максимально допустимое.

Если на входе АЦП получается напряжение меньше чем, две третьих диапазона текущего измерения, то микроконтроллер выдает команду на переключение на ступень масштабирующего аттенюатора с меньшим коэффициентом деления.

Если измеренное напряжение лежит в диапазоне между двумя третями и максимальным значением, то производятся последовательные итерации.

Предусмотрим возможность подключения к нашему тестеру не только силовых полюсов аккумулятора или аккумуляторной батареи, но и балансировочного разъема, что позволит измерять напряжения каждой ячейки аккумуляторной батареи Li-Ion или Li-pol типа. Соответственно, микроконтроллер считывает через многоканальный АЦП значения напряжений каждой ячейки батареи и по запросу пользователя выводит их на экран. Все считанные значения микроконтроллер сохраняет в своей оперативной памяти.

5.3 Измерение емкости аккумулятора.

В соответствии с требованиями ГОСТ, описанными выше, для определения фактической емкости аккумулятора необходимо полностью заряженный аккумулятор разряжать током $0,2I_t$ до величины конечного напряжения 2,6В. Для этого микроконтроллер подает управляющий сигнал на подключение разрядной нагрузки к аккумулятору и выставляет режим ее работы с разрядным током $0,2I_t$, при этом значение I_t берется как число, равное номинальной емкости аккумулятора или аккумуляторной батареи, которую пользователь вводит на этапе 4.1 данного алгоритма. Например, если пользователь ввел номинальную емкость 2000мАч, то разрядный ток будет равен 2А.

Микроконтроллер непрерывно отслеживает значение напряжения на аккумуляторе (одной ячейке), фиксируя текущую длительность времени разряда суммируя фиксированные такты счетчика и как только величина напряжения станет равной 2.6В, отключает разрядную нагрузку от аккумулятора и вычисляет значение номинальной емкости как произведение времени разряда, приведенное к часам и разрядного тока $0,2I_t$. Вычисленное значение выводится на экране устройства и микроконтроллер ожидает нажатия кнопок пользователем для выполнения следующих операций.

Блок-схема этой части действий показана на рисунке 18.

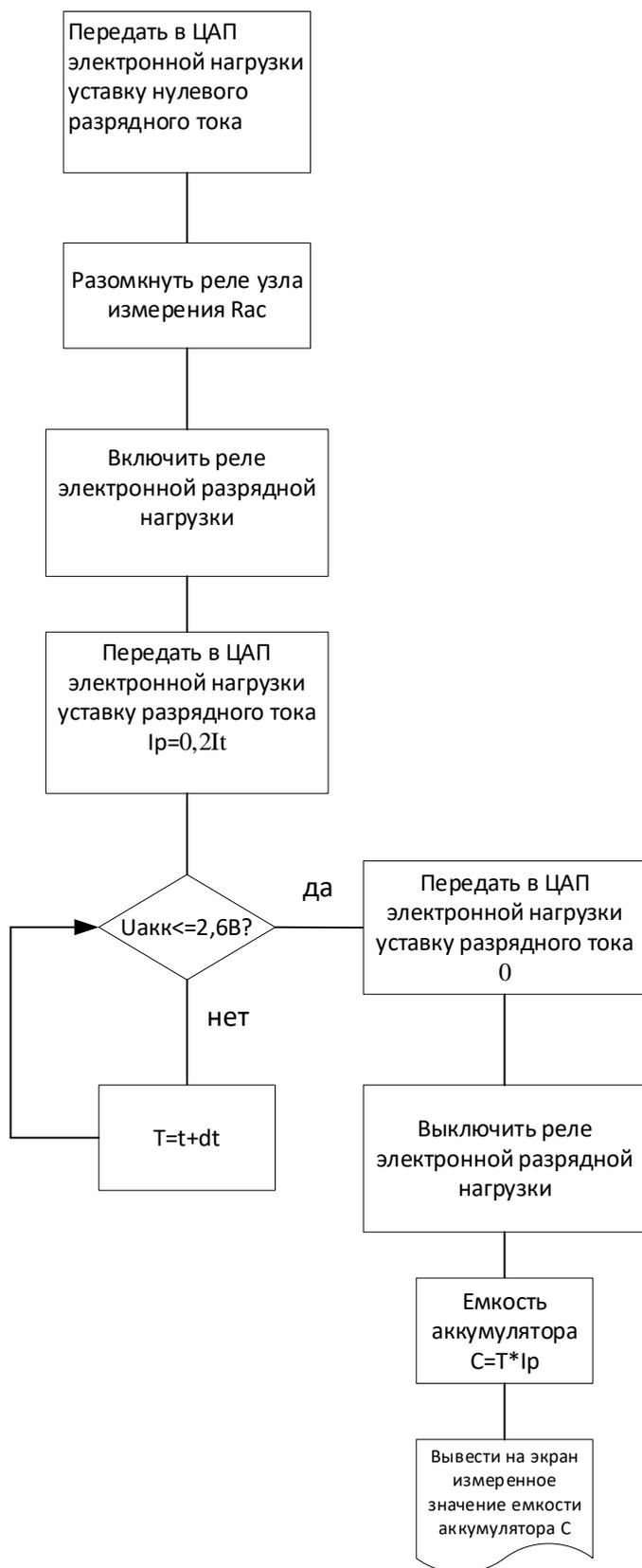


Рисунок 18 – Блок-схема алгоритма действий по измерению емкости аккумулятора

5.4 Измерение внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току

Для проведения испытаний по определению внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току, микроконтроллер, после соответствующего выбора пользователя выполняет следующие действия:

- измеряет напряжение на аккумуляторе или аккумуляторной батарее;
- если напряжение выше величины конечного напряжения 2.6В, то подается команда на подключение к силовым клеммам аккумулятора узла измерения по переменному току, который генерирует переменное напряжение частотой 1кГц и такой величины, чтобы пульсации напряжения на клеммах аккумулятора не превышали 20мВ, соответственно в функции этого же узла входит слежение за величиной потребляемого от аккумулятора тока и удержание его на таком уровне, чтобы опять таки напряжение на аккумуляторе не превышало 20мВ;
- удерживают узел переменного напряжения подключенным к аккумулятору в течение 10 секунд;
- по прошествии 10 секунд измеряют и фиксируют среднеквадратичное значение переменного напряжения на аккумуляторе и среднеквадратичное значение переменной составляющей тока, протекающего через аккумулятор;
- вычисляют величину внутреннего сопротивления аккумулятора в соответствии с выражением (1);
- полученное значение внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току микроконтроллер высвечивает на экране и ожидает дальнейших действий пользователя.

Блок-схема алгоритма измерения внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току показана на рисунке 19.

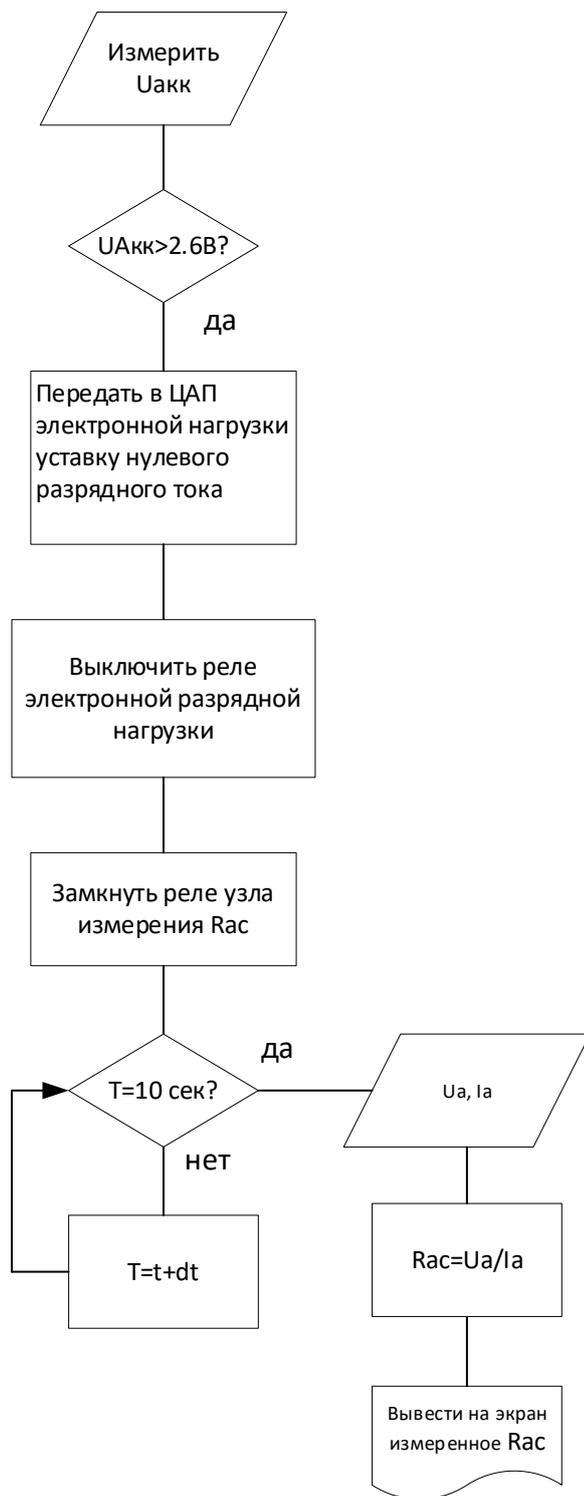


Рисунок 19 - Блок-схема алгоритма измерения внутреннего сопротивления аккумулятора по переменному току

5.5 Измерение внутреннего сопротивления аккумулятора по постоянному току

Для измерения внутреннего сопротивления по постоянному току микроконтроллер выполняет следующие действия:

- передает в модуль электронной нагрузки уставку на потребление тока величиной $0,2 \cdot I_t$;
- подает команду на подключение модуля электронной нагрузки к аккумулятору;
- запускает отсчет 10 секунд и по истечении этого интервала времени фиксирует напряжение U_1 ;
- после фиксации напряжения U_1 контроллер отправляет в электронную нагрузку уставку на потребление тока величиной I_t ;
- через 1 секунду разряда аккумулятора током I_t микроконтроллер измеряет на нем и фиксирует напряжение U_2 ;
- измеренные значения напряжения и тока подставляются в выражение (2), по которому микроконтроллер вычисляет значение R_{dc} и выводит его на экран.

Блок-схема алгоритма измерения внутреннего сопротивления аккумулятора по постоянному току показана на рисунке 20.

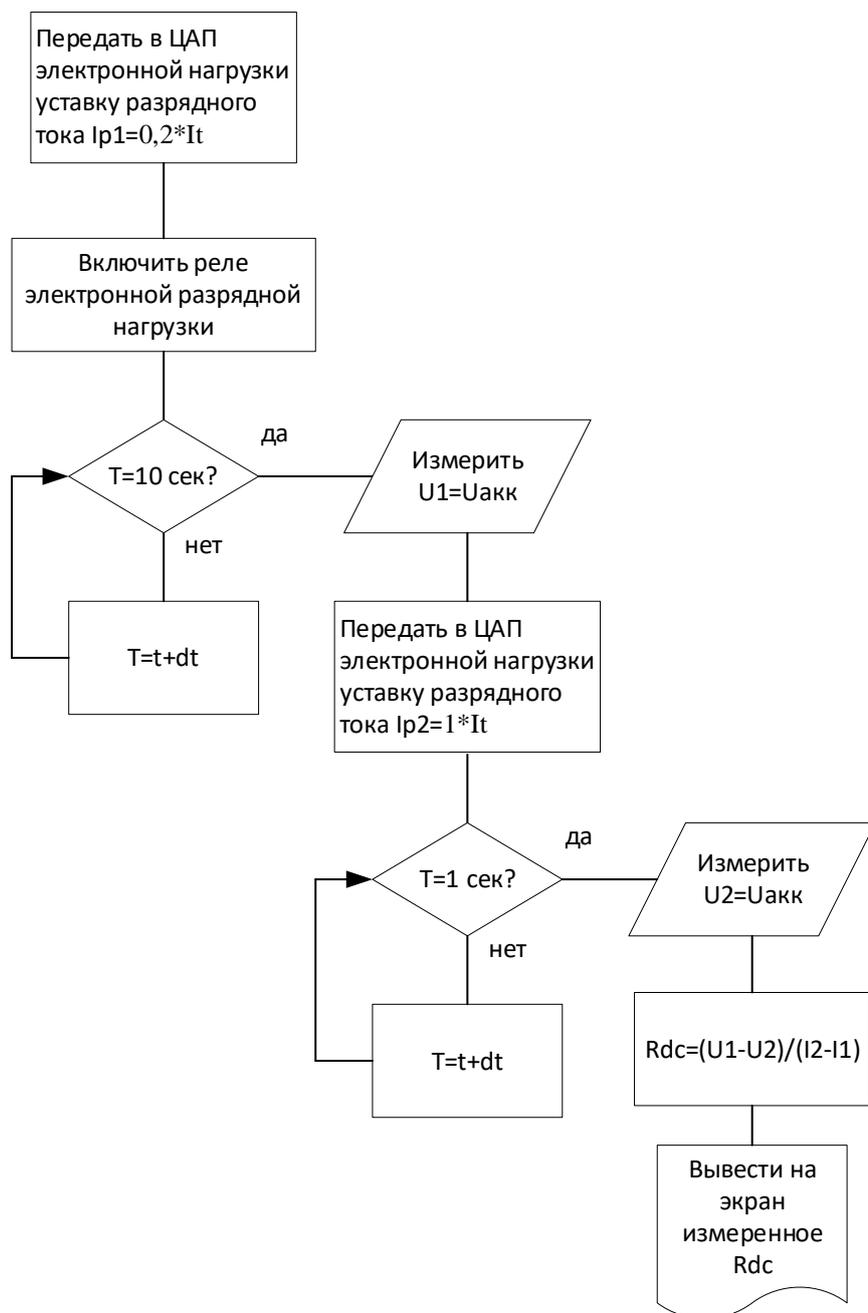


Рисунок 20 - Блок-схема алгоритма измерения внутреннего сопротивления аккумулятора по постоянному току

5.6 Емкость аккумулятора при коротком режиме разряда

Так называемый короткий режим разряда подразумевает разряд предварительно заряженного аккумулятора током с величиной $1.0 \cdot I_t$ до величины установленного значения конечного напряжения. Поэтому микроконтроллер будет выполнять следующие операции:

- после выбора соответствующего действия пользователем микроконтроллер замыкает контакт, подключающий электронную нагрузку к аккумулятору;

- микроконтроллер отправляет в модуль электронной нагрузки уставку разрядного тока I_t в соответствии с выбранным пользователем номинальным значением емкости аккумулятора или батареи;

- модуль электронной нагрузки разряжает аккумулятор до тех пор, пока напряжение на клеммах аккумулятора не достигнет величины установленного значения конечного напряжения или значения по умолчанию в 2.6В;

- как только значение конечного напряжения будет достигнуто, микроконтроллер отключает модуль электронной нагрузки от аккумулятора;

- микроконтроллер подсчитывает импульсы встроенного генератора в течение всего времени разрядки для подсчета его суммарной длительности, умножив полученное значение в часах на величину разрядного тока;

- вычисленное значение емкости аккумулятора при коротком режиме разряда высвечивается на экране;

- микроконтроллер ожидает последующих действий пользователя.

Блок-схема алгоритма измерения емкости аккумулятора при коротком режиме разряда показана на рисунке 21.

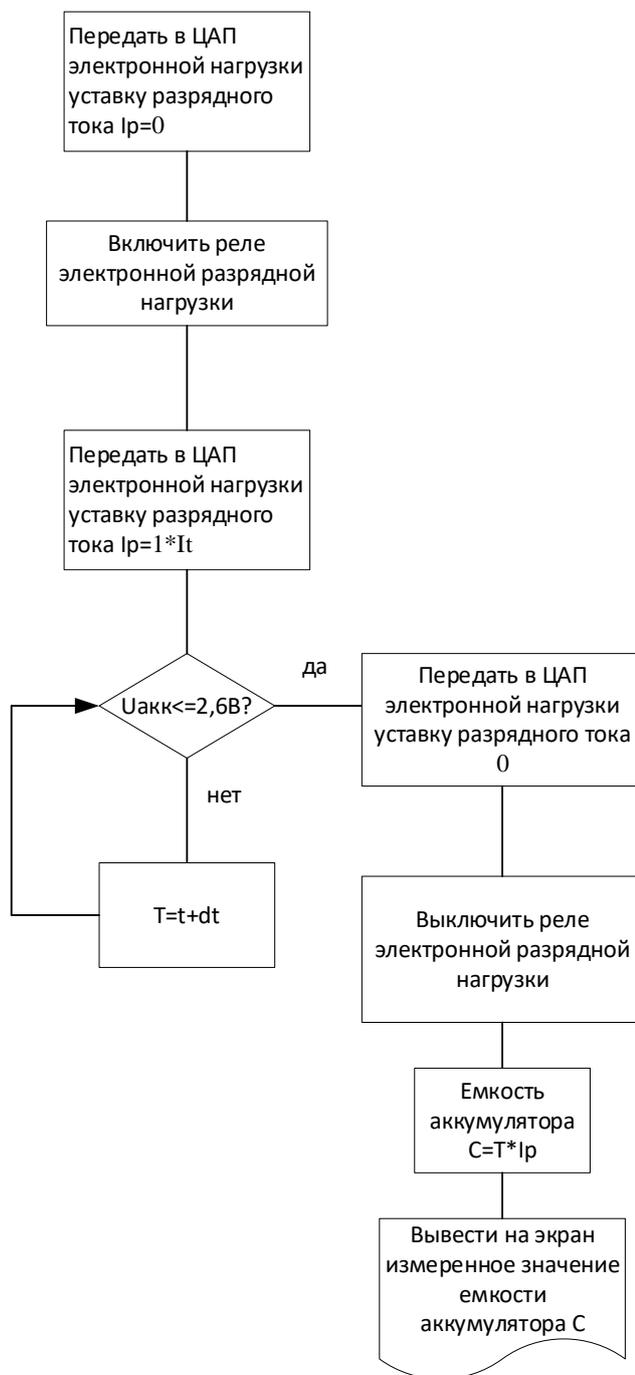


Рисунок 21 - Блок-схема алгоритма измерения емкости аккумулятора при коротком режиме разряда

Таким образом, мы сформулировали основные этапы действия алгоритма работы управляющего микроконтроллера устройства для тестирования аккумуляторов для решения поставленных в диссертации задач.

6 Разработка принципиальной схемы устройства для контроля параметров аккумуляторов

В разделе 4 на основании разработанной структурной схемы и алгоритма функционирования устройства на различных этапах приступим к разработке электрической принципиальной схемы.

Начнем разработку в следующей последовательности: сначала разработаем периферийные узлы – узел электронной нагрузки и узел тестирования по переменному току, затем узлы коммутации, узел АЦП и на завершающем этапе – выберем микроконтроллер исходя из получившихся по факту необходимых входов/выходов и необходимых интерфейсов связи. На последнем этапе подберем дисплей модуль преобразования постоянного напряжения.

6.1 Разработка узла электронной нагрузки.

В качестве основы для расчетов возьмем схему, рассмотренную в [37]. Достоинством этой схемы является возможность масштабировать необходимое количество каналов потребления тока, управление потребляемым током с помощью единого управляющего напряжения низкого уровня и возможность модернизации схемы с добавлением в нее узла согласования с микроконтроллером.

Схема основывается на элементарной ячейке, в которой полевой транзистор используется как нагрузка с управляемым током потребления. Внешний вид такой ячейки показан на рисунке 22.

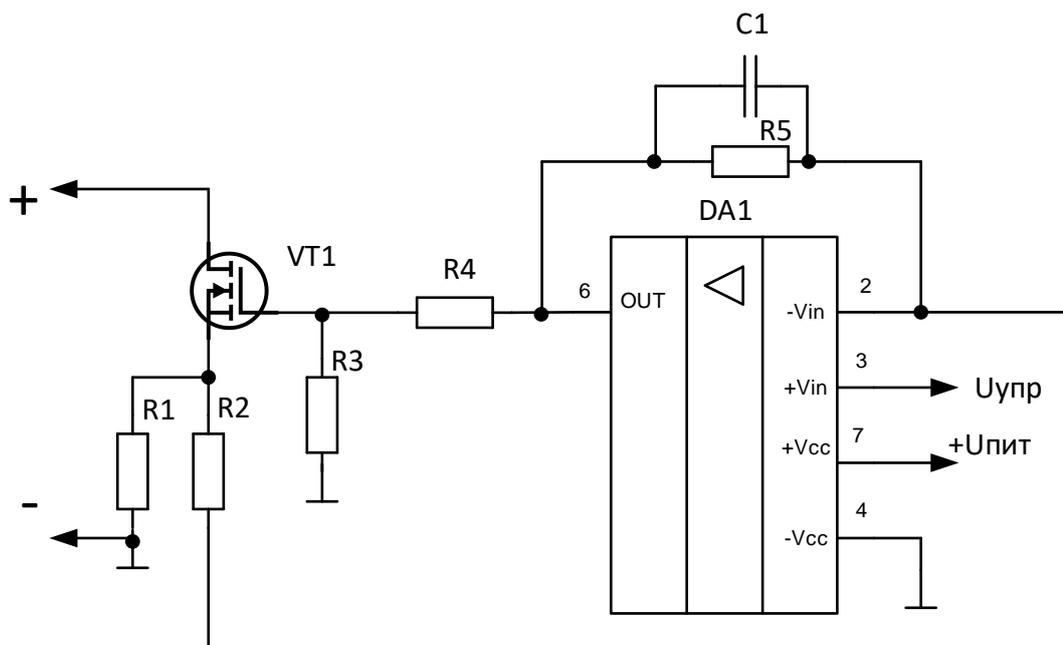


Рисунок 22 – Схема одной нагрузочной ячейки на полевом транзисторе

Транзистор VT1 выступает в роли регулируемой нагрузки и работает в активном режиме, управляя током, протекающим через резистор R1, выполняющим роль нагрузочного сопротивления, на котором выделяется основная нагрузочная мощность. Управляющее напряжение на транзистор поступает с выхода операционного усилителя DA1 через делитель напряжения на резисторах R3 и R4, при этом в начальный момент импульса резистор R4 выполняет также роль токоограничивающего резистора. Отрицательная обратная связь организована на резисторах R2, R5 и конденсаторе C1, который сглаживает высокочастотные пульсации напряжения в цепи обратной связи, стабилизируя отчасти работу каскада на операционном усилителе. В цепь обратной связи ОУ через резистор R2 поступает сигнал обратной связи, пропорциональный падению напряжения на нагрузке R1 и меняющий величину входного напряжения усилителя таким образом, чтобы компенсировать отклонения тока через транзистор и R1 под действием внешних обстоятельств.

Изменяя величину напряжения управления $U_{упр}$ на входе операционного усилителя можно изменять – уменьшать или увеличивать величину выходного напряжения, а как следствие – величину напряжения управления на затворе транзистора VT1, меняя тем самым его состояние на более закрытое или более открытое, как следствие, изменяя ток протекающий через него и резистор нагрузки R1.

Для снижения уровня тока, приходящегося на один транзистор при работе с аккумуляторами с емкостями около максимального принятого значения равного 10000 мАч, что соответствует разрядному току режиме короткого разряда в 10А, будем считать, что у нас параллельно работает несколько ячеек. Это особенно важно, если учитывать, что транзистор работает в активном режиме и на нем выделяется значительная мощность.

Выберем в качестве транзистора активной нагрузки транзистор IRFP260N, выпускаемый фирмой International Rectifier [8].

Этот транзистор имеет следующие характеристики:

- максимальный длительный ток исток-сток при температуре 25 °С при напряжении затвор-исток 10В – 50 А;

- максимальный длительный ток исток-сток при температуре 100 °С при напряжении затвор-исток 10В – 30 А;

- максимальное напряжение затвор исток – 20В;

- максимальное напряжение сток – исток 200В;

- сопротивление транзистора в открытом состоянии 0,04 Ом;

В соответствии с характеристикой транзистора, приведенной в [8] и показанной на рисунке 23.

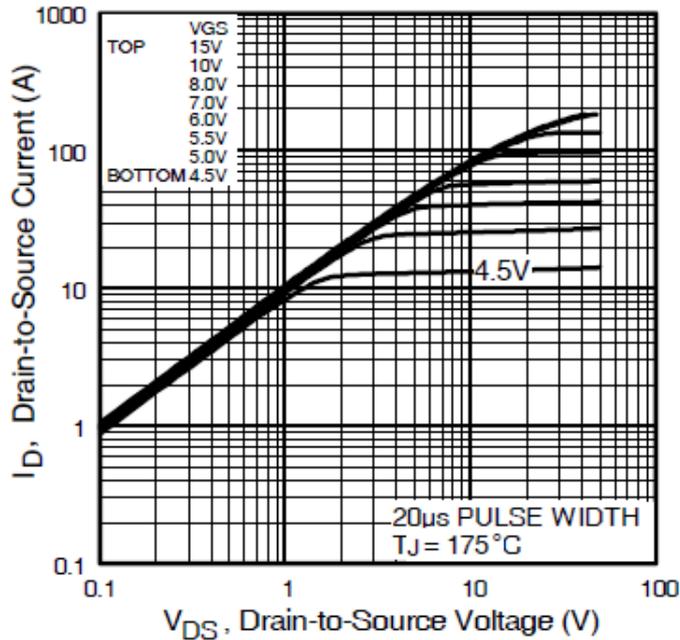


Рисунок 23 – Нагрузочная характеристика транзистора IRFP260N

Из рисунка видно, что при прикладывании напряжения между стоком и истоком около 20-30 В, как в нашем случае при подключении 5-ти ячеичного аккумулятора, через транзистор будет протекать тока около 10 А, и следовательно на транзисторе будет выделять около 200-300 Вт мощности, что является избыточным для него. Соответственно, выбрав 4 одинаковых нагрузочных ячейки мы получим ситуацию с выделением на одном транзисторе 50-60Вт, и током, протекающим через транзистор около 2.5 А, что является уже безопасным для длительной эксплуатации, что видно из областей безопасной работы на рисунке 24

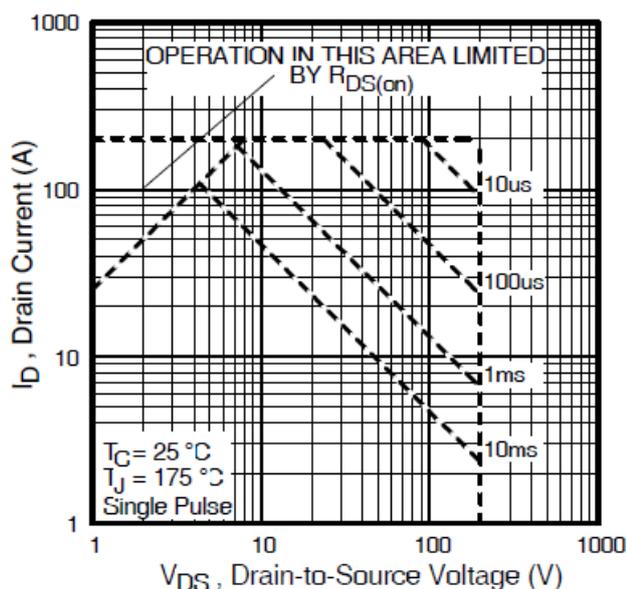


Рисунок 24 – Области безопасной работы транзистора

В качестве шунтового резистора R1, выступающего в роли датчика тока, выберем резистор сопротивлением 0,22 Ом и мощностью рассеивания $P=0,22 \cdot 2,5^2=1.375$ Вт, выбираем с запасом резистор SQP- 5Вт-0,22-5% [29]

Сопротивление резисторов в цепи обратной связи выбираем равными $R5 = 220\text{k}\Omega$, $R2=1\text{k}\Omega$. Это даст коэффициент усиления инвертирующего каскада на операционном усилителе $K=220$, что позволит значительно усилить сигнал с шунта R1.

Выберем резисторы RC0804FR-220KL и RC0804FR-1,0KL.

Делитель выходного напряжения усилительного каскада на ОУ, передает напряжение на затвор полевого транзистора VT1. При питании операционного усилителя от источника напряжения 9В, его максимально возможное напряжение будет соответствовать 9 В. Максимальное напряжение, которое может попасть на транзистор при 5-ти ячеечном аккумуляторе это 21 В. Ведем запас до 30В и будем считать, что напряжение затвора при таком напряжении между стоком и истоком не должно допускать ток больше 20А.

Для этого на затвор транзистора должно поступать напряжение в соответствии с рисунком 15 не более 5,5В. Это означает, что коэффициент делителя на R4, R3 должен быть $5.5В / 9В = 0,611$. Тогда сопротивления резисторов, с учетом соответствия стандартному ряду E24 можем выбрать R4=1кОм, R3=1,6кОм. Через резисторы такого сопротивления может протекать ток максимум

$$I_{R3,R4} = 9В / 2,6кОм = 3,46мА,$$

На резисторах выделяется мощность на R3 - 0,02Вт, а на R4 – 0,012Вт.

Таким образом, в качестве R3,R4 можно выбрать резисторы RC0804FR-01KL и RC0804FR-1,6KL.

В качестве конденсатора C1 выбираем модель GRM31MR72A13KA01L емкостью 1нФ в корпусе 1206 на допустимое напряжение 100В и точностью 10%.

Операционный усилитель будет питаться от источника напряжения +9В.

Поскольку ранее было решено, что мы используем четыре канала подобных ячеек, а на рынке предлагаются микросхемы, содержащие в своем составе четыре операционных усилителя, например LM324, то в качестве операционных усилителей и будем использовать элементарные ячейки этой микросхемы.

Рассмотрим параметры микросхемы LM324 [9]

- питание от одного источника: от 3,0 В до 32 В
- низкие входные токи смещения: максимум 100 нА (LM324A)
- четыре усилителя в одном корпусе.

Внутренняя структурная схема этой микросхемы показана на рисунке 25.

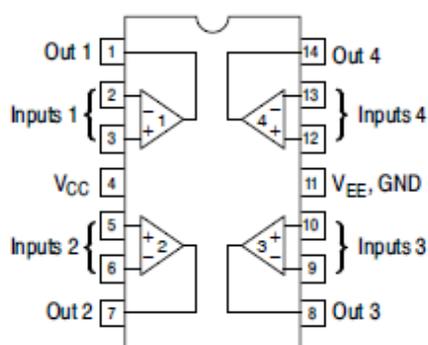


Рисунок 25 – Внутренняя структура и назначение выводов микросхемы LM324

Для управления выходным напряжением операционных усилителей, в качестве источника напряжения $U_{упр}$ на рисунке 14 будем использовать цифро-аналоговый преобразователь. Выберем модель MCP4725. Этот ЦАП имеет следующие характеристики [11]:

- разрешение 12 бит;
 - встроенная энергонезависимая память (EEPROM);
 - внешний адресный вывод A0;
 - обычный режим или режим отключения питания;
 - быстрое установление времени: 6 мкс (типичное значение);
 - опорное внешнее напряжение (VDD);
 - низкое энергопотребление;
 - работа от одного источника питания: от 2,7 до 5,5 В;
 - интерфейс I2C;
 - восемь доступных адресов
 - стандартный (100 Кбит/с), быстрый (400 Кбит/с) и высокоскоростной (3,4 Мбит/с) режимы;
 - компактный корпус SOT-23 с 6 выводами;
 - расширенный диапазон температур: от -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$;
- Внешний вид корпуса и распределение функций по выводам показаны на рисунке 26.

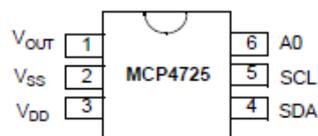


Рисунок 26 - Внешний вид корпуса и распределение функций по выводам микросхемы MCP4725

Отличительной чертой этого ЦАП является подключение к источнику сигнала, в нашем случае к микроконтроллеру, по шине I2C, что упрощает собственно, соединения в схеме. Схема включения ЦАП с необходимыми для работы фильтрующими конденсаторами по питанию показана на рисунке 27.

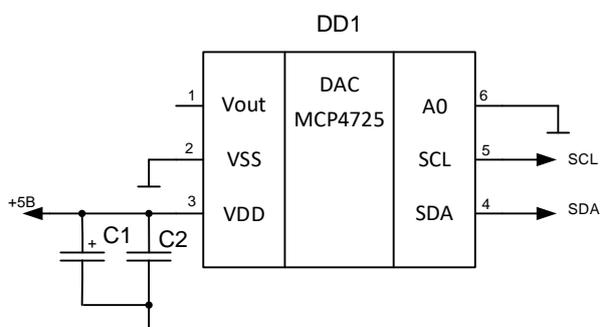


Рисунок 27 - Схема включения ЦАП с необходимыми для работы фильтрующими конденсаторами по питанию

Выход Vout подключается к неинвертирующему входу операционного усилителя ячейки электронной нагрузки и управляет состоянием нагрузочного транзистора.

Скомпоновав четыре канала электронной нагрузки с учетом размещения четырех операционных усилителей в одном корпусе, объединением стоков полевых транзисторов и их подключением к положительному полюсу тестируемого источника, общих точек каждого канала и их подключением к отрицательному полюсу источника энергии, получим схему узла, показанную на рисунке 28.

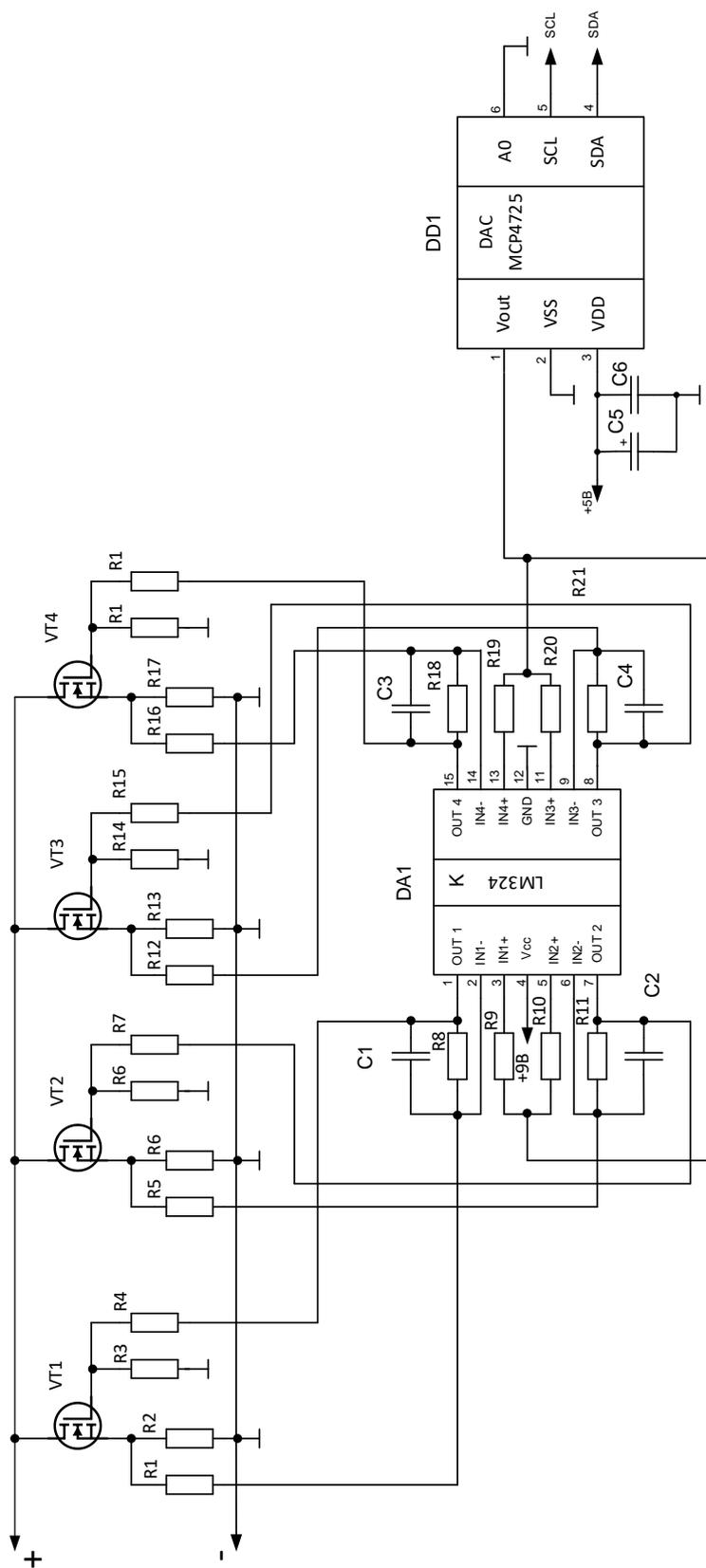


Рисунок 28 – Схема узла электронной нагрузки

6.2 Разработка узла тестирования по переменному току

Функционирование узла тестирования по переменному току решает две задачи: генерирование переменного напряжения с частотой 1 кГц и поддержание неизменным тока, потребляемого от аккумулятора. Соответственно, для решения этих двух задач в состав узла тестирования по переменному току будет входить два модуля: модуль генерации напряжения и модуль контроля тока.

Построим первый модуль на основе отечественной микросхемы - интегрального генератора КР1006ВИ1.

Эта микросхема предназначена для построения времязадающих цепей, которые могут работать как в ждущем режиме, так и в режиме автогенерации. Микросхема имеет следующие характеристики:

Номинальное напряжение питания 5 ... 15 В

Ток потребления, не более:

при $U_{П}=15В$, $U_{пор}= 11,5... 14 В$, $U_{зап}=7...9,5 В$ - 15 мА ,

при $U_{П}=5 В$, $U_{пор}= 3,7 ...4,7 В$, $U_{зап}=2,3...3,3 В$ - 6 мА.

Выходное напряжение низкого уровня, не более:

при $U_{П}=15В$, $U_{пор}= 11,5...14 В$, $U_{зап}=7...9,5 В$, $I_{Н}=100 мА$ - 2,5 В,

при $U_{П}=5 В$, $U_{пор}=3,7...4,7 В$, $U_{зап}=2,3...3,3 В$, $I_{Н}=5 мА$ - 0,35 В.

Выходное напряжение высокого уровня, не менее:

при $U_{П}=15В$, $U_{пор}= 5,5...8 В$, $U_{зап}=0,7...1,5 В$, $I_{Н}=100 мА$ - 12,5 В,

при $U_{П}=5 В$, $U_{пор}= 1,8...2,8 В$, $U_{зап}=0,3...0,8 В$, $I_{Н}=100 мА$ - 2,75 В.

Ток сигнала сброса

при $U_{П}=15В$, $U_{пор}= 5,5...8 В$, $U_{зап}=0,7...1,5 В$, не более - 1,5 мА

Входной ток

при $U_{П}=15В$, $U_{пор}= 5,5...8 В$, не более - 2 мкА.

Ток срабатывания, типовое значение - 250 нА

Время нарастания и время спада выходного импульса, типовое значение - 300 нс.

Начальная погрешность в генераторном режиме при $U_{п}=15$ В, типовое значение - 3%

Нестабильность начальной погрешности в генераторном режиме от напряжения питания более:

при $U_{п}=15$ В - $0,3\%/V$,

при $U_{п}=5$ В - $0,5\%/V$.

Напряжение питания - 4,5...16 В.

Ток нагрузки - 100 мА .

Рассеиваемая мощность ($T=+50^{\circ}C$) 500 мВт

Температура окружающей среды - $-45...+70^{\circ}C$

Типовая схема включения микросхемы в генераторном режиме показана на рисунке 29.

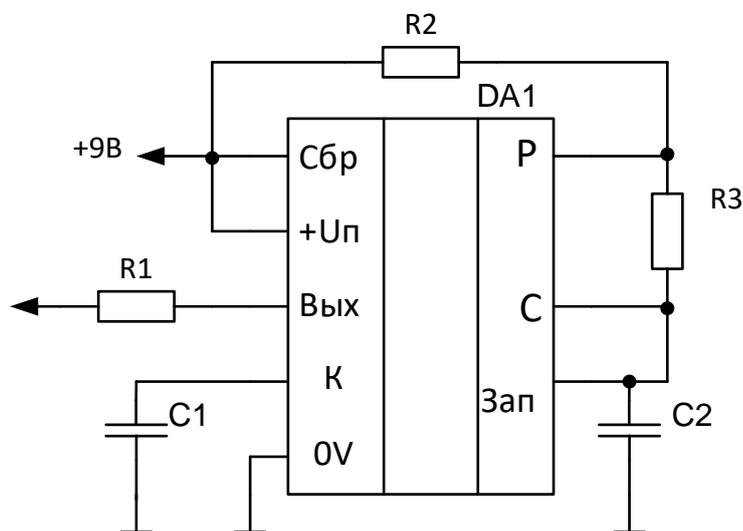


Рисунок 29 – Типовая схема включения микросхемы КР1006ВИ1 в автоколебательном режиме

Через резистор R1 будем подавать импульсы с переменной составляющей на транзисторы, как показано на рисунке 30.

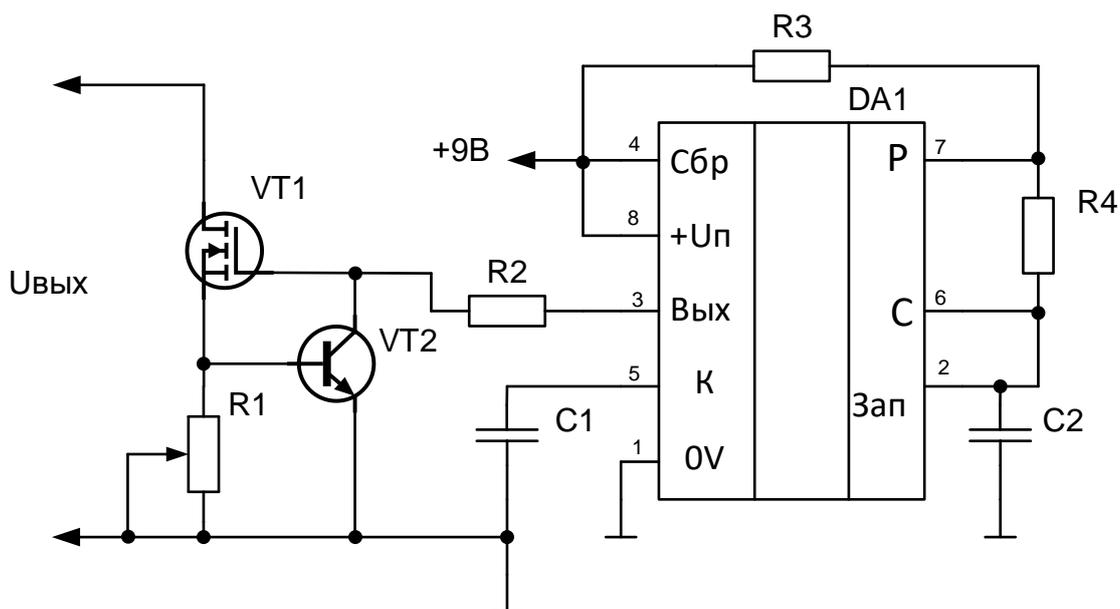


Рисунок 30 – Схема узла генератора импульсов

Параметры импульсов – длительность и пауза, задаются с помощью элементов R3, R4 и конденсатора C2. Параметры импульсов связаны с параметрами перечисленных компонентов следующим образом:

- длительность импульса: $t_{и} = 0,69(R3 + R4)C2$,
- длительность паузы: $t_{п} = 0,69R4C2$.

Транзистор VT2 управляется напряжением на резисторе R1 и управляет поддержанием состояния затвора VT1 таким образом, чтобы узел VT1, VT2, R1 поддерживал фиксируемый выходной ток источника импульсов.

Примем длительность импульса и паузу между ними равными между собой. При частоте следования импульсов в 1кГц его период 0,001 с. С учетом того, что в длительность импульса входит сумма сопротивлений резистора, а в длительность паузы только одно из слагаемых этой суммы, примем длительность импульса 0,65мс, а длительность паузы – 0,35мс.

Тогда можно вычислить необходимые сопротивления резисторов, приняв емкость конденсатора C2 равной 0,1мкф:

$$R1+R2=t_{и}/(0,69*C2)= 0.00065/(0,69*0.1*10^{-6})=9.4 \text{ кОм},$$

$$R2=t_{п}/(0,69*C2) = 0,00035/(0,69*0.1*10^{-6}) = 5,1 \text{ кОм}.$$

$$R1=9,4 \text{ кОм}-5,1 \text{ кОм}=4,3 \text{ кОм}$$

Принимаем резисторы RC0804FR-5,1KL, RC0804FR-4,3KL, конденсатор GRM31MR72A16KA01L

Резистор R2 принимаем равным 22кОм и выбираем резистор RC0804FR-22KL.

В качестве транзистора VT1 выбираем полевой транзистор BUZ10 [7], он имеет следующие характеристики:

- напряжение стока-истока VDS (VGS = 0) 50 В;
- напряжение стока-затвора VDGR (RGS = 20 Ком) 50 В;
- напряжение затвора-истока VGS ± 20 В;
- ток стока ID (постоянный) при Tc = 25 °С 23 А;
- ток стока IDM (импульсный) 92 А
- общее рассеивание Ptot при Tc = 25°С - 75 Вт.

В качестве VT2 – биполярный транзистор BC548В со следующими характеристиками [5]:

- напряжение коллектор - эмиттер V_{CEO}

BC546 - 65 В

BC547 - 45 В

BC548 - 30 В

- напряжение между коллектором и базой V_{сво}

BC546 – 80 В

BC547 - 50 В

BC548 - 30 В

- напряжение на базе эмиттера V_{ЕВО} - 6,0 В постоянного тока;

- ток коллектора – 100 мА;

- общее рассеяние устройства при T_А = 25°С - 625 мВт , 5,0 мВт/°С ;

- общее рассеивание устройства при T_С = 25°С 1,5 Вт , 12 мВт/°С .

В качестве резистора R1 выбираем переменный резистор сопротивлением 100 Ом для подстройки величины выходного напряжения генератора СПЗ-4АМ, 0,25 Вт, 100 Ом, 3-20, 20%, [30]

Таким образом, расчет параметров генератора импульсов напряжения частотой 1кГц закончен. Перейдем к схеме контроля за потребляемым от аккумулятора током во время проведения измерения сопротивления по переменному току. Эту схему построим на основе схемотехнического предложения, опубликованного в публикации [31]. Измененный вариант схемы показан на рисунке 31

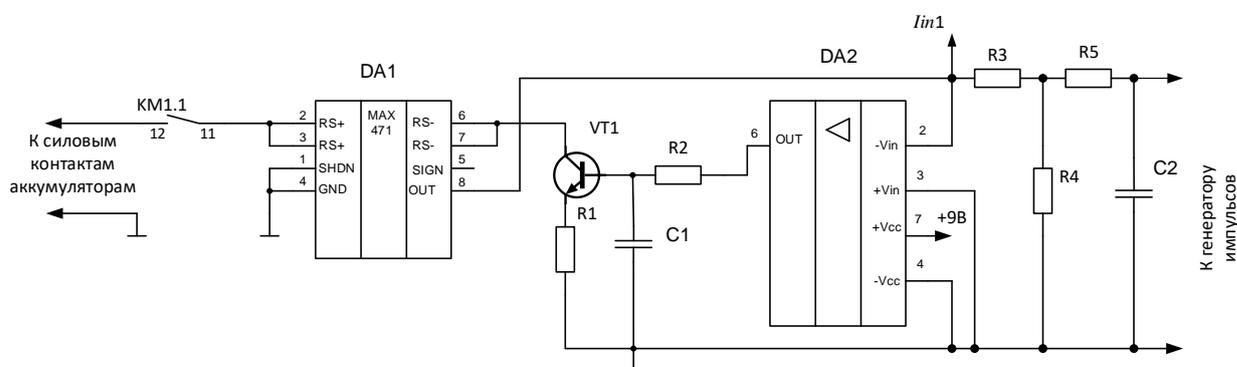


Рисунок 31 – Схема узла измерителя пульсирующего тока аккумулятора

Схема работает следующим образом. Напряжение, поступающее с генератора импульсов, через операционный усилитель DA2 управляет уровнем тока, протекающим через транзистор VT1. Ток коллектора этого транзистора является током, потребляемым от аккумулятора и проходящим через измеритель тока DA1. Отмасштабированное аналоговое значение измеренного тока поступает на модуль АЦП, цифровой код с которого передается в микроконтроллер. Резисторы R4 и R5 образуют делитель напряжения, масштабирующий входное напряжение, поступающее от генератора импульсов.

Резистор R3 для операционного усилителя DA2 является входным резистором, а выходное напряжение измерителя тока DA1 выступает в роли

сигнала цепи обратной связи. Таким образом, достигается стабильность потребляемого от аккумулятора импульсного тока. Конденсатор С1 сглаживает возможные пульсации выходного напряжения DA1, дополнительно стабилизируя работу VT1 и увеличивая стабильность потребляемого от аккумулятора переменного тока.

Режим работы этого модуля подбирают, изменяя выходное напряжение модуля генератора импульсов с помощью переменного резистора R1 на рисунке 22.

Для модуля контроля тока выбираем следующие компоненты.

В качестве измерителя тока DA1 будем использовать микросхему MAX471 [10].

Эта микросхема имеет следующие основные параметры:

- полное измерение тока на стороне высокого напряжения;
- высокоточный внутренний чувствительный резистор (MAX471) ;
- точность измерения составляет 2%;
- контролирует как заряд, так и разряд;
- возможность измерения тока до 3 А с помощью внутреннего чувствительного резистора (MAX471);
- более высокая возможность измерения тока с помощью внешнего чувствительного резистора (MAX472);
- максимальный ток питания 100 мкА;
- максимальный режим отключения 18 мкА;
- напряжение питания от 3 В до 36 В;
- 8-контактные корпуса DIP/SO.

Подробно работа данной микросхемы описана, например в [19].

В качестве биполярного транзистора VT1 возьмем транзистор модели BC548B, как и в генераторе импульсов напряжения. Его характеристики приведены в соответствующем параграфе.

Операционный усилитель DA2 возьмем модели MAX400.

Сопротивления резисторов R3 и R4 примем равными 510 Ом с мощностью рассеивания 0,125Вт.

Сопротивление R1 в эмиттерной цепи транзистора VT1 выполняет роль ограничителя тока. Примем его равным 2 Ом с мощностью рассеивания 2Вт. Резистор R2 совместно с конденсатором C1 образуют интегрирующую цепь с обеспечением смещения на базе VT1. Принимаем сопротивление R2 равным 1кОм, а емкость C1 - 33мкФ.

6.3 Разработка узла коммутации.

Назначение узла коммутации заключается в подключении необходимого узла – или узла контроля по переменному напряжению, или узла электронной нагрузки к тестируемому аккумулятору.

Для того, чтобы максимально снизить сопротивление узла коммутации, а следовательно максимально уменьшить падение напряжения на коммутирующих элементах, построим этот узел на основе электромеханических реле, состоянием которых через согласующие элементы будет управлять микроконтроллер.

Схема узла коммутации показана на рисунке 32.

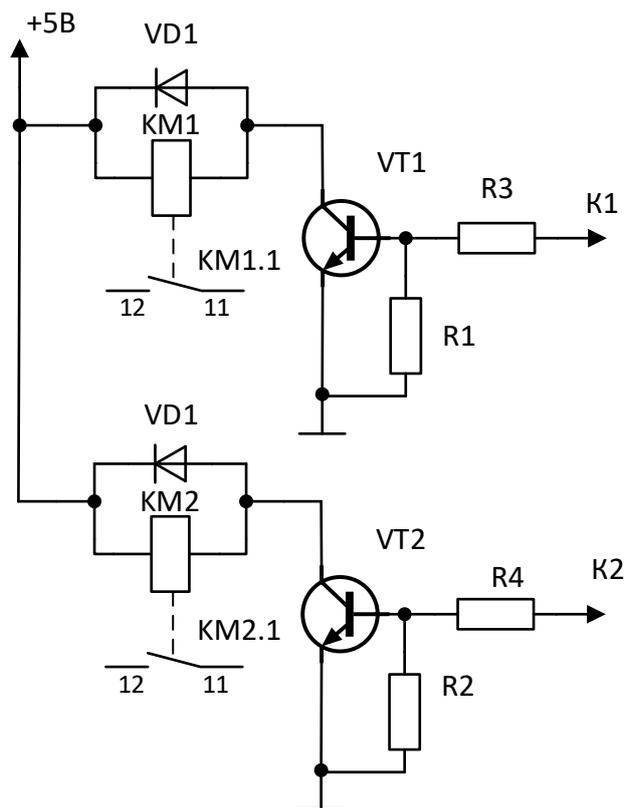


Рисунок 32 - Схема узла коммутации

На этой схеме KM1 и KM2 – электромеханические реле, нормально открытые контактные группы которых KM1.1 и KM2.1 подключают к аккумулятору или узел тестирования по переменному току, или электронную нагрузку, соответственно.

В качестве реле выберем модель NRP-15-C-05D производства NCR [12]. Они имеют следующие параметры:

- род управляющего напряжения – постоянное;
- начальное состояние – моностабильное;
- поляризация – нейтральная;
- количество обмоток – 1;
- сопротивление обмотки – 26,9 Ом;
- номинальное рабочее напряжение управления – 5В;
- максимальное коммутируемое постоянное напряжение – 30В;

- максимальное коммутируемое переменное напряжение – 240В;
- максимальный коммутируемый ток – 30А.

Для коммутации реле микроконтроллером используются транзисторы VT1 и VT2, работающие в ключевом режиме. В качестве этих транзисторов для сокращения номенклатуры выберем те же транзисторы, что и ранее - BC548В.

Для обеспечения работы в ключевом режиме этого транзистора необходимо в соответствии с [6] на контакты база-эмиттер подавать напряжение больше 0,8 В для того, чтобы обеспечить падение напряжения на насыщенном переходе 0,77В. Коэффициент передачи тока базы для этой модели транзистора в соответствии с паспортными данными не меньше 200. Значит, для того, чтобы обеспечить необходимый ток срабатывания реле равный

$5В/29,6Ом = 185мА$, будем считать ток коллектора транзистора должен быть более 200мА.

С учетом написанного ранее коэффициента передачи тока 200 ток базы должен быть больше $200мА/200=1 мА$.

Необходимое для поддержания транзистора в открытом и насыщенном состоянии напряжение база-эмиттер создается с помощью делителей напряжения на R1 R3 для VT1 и R2 R4 для VT2.

Считая, что на делитель приходит при уровне лог «1» от выхода микроконтроллера напряжение 4.8 В при 5В питании, на резисторе R1 и R2 должно падать напряжение 0,8В, тогда на резисторах R3 R4 будет падать напряжение 4В. Ток базы транзистора должен быть более 1 мА с одной стороны, с другой выход микроконтроллера выдает ток от 10 до 20мА, поэтому ограничимся током делителя, соответственно током, протекающим через R3 R4 величиной в 7мА. Тогда сопротивление резисторов R3 R4 можно рассчитать по закону Ома как

$$R3,R4=4В/7мА= 571 Ом.$$

Сопротивление резисторов R1 R2 с учетом протекания через них тока не более 6 мА и падения напряжения на них 0,8В:

$$R1, R2 = 0,8\text{В} / 6\text{мА} = 133\ \text{Ом}$$

Принимаем из ряда E24 для R3 R4 сопротивления равными 560Ом, а для сопротивлений R1, R2 значения 130 Ом. Все резисторы имеют мощность рассеяния 0,125Вт.

Для того, чтобы избежать возникновения напряжений обратной полярности при коммутации обмоток реле параллельно им установлены встречно включенные диоды, через которые в моменты отключения обмотки рассеивается запасенная в них энергия. В качестве этих диодов выбираем диоды 1N5822. [17]. Таким образом, выбраны все элементы узла коммутации.

6.4 Узел измерения силового тока аккумулятора.

Для измерения тока, потребляемого от аккумулятора нагрузкой, который может иметь значения до 10-15А предназначен узел, схема которого показана на рисунке 33.

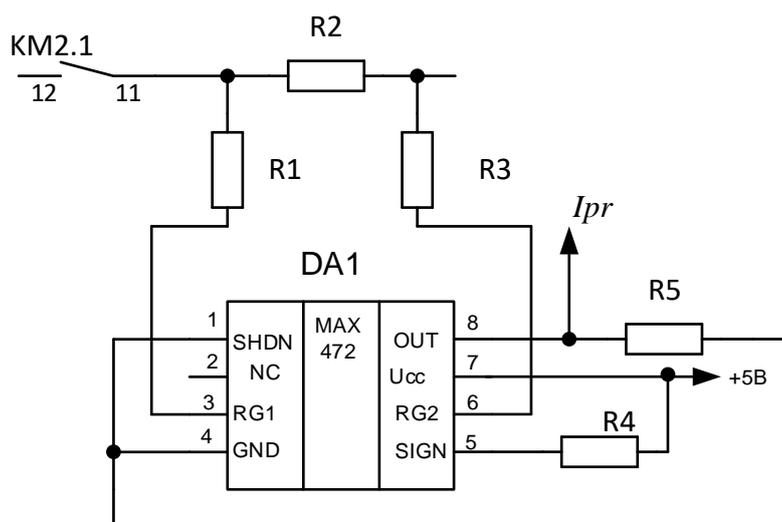


Рисунок 33 - Узел измерения силового тока

На этом рисунке роль измерительного преобразователя выполняет микросхема Max472 фирмы Maxim [10]. В отличие от MAX471, описанного ранее, в этой микросхеме используется не встроенный, а внешний шунт R2, напряжение с которого через резисторы R1 и R3 поступает на входы встроенных усилителей и масштабируется в выходной ток, изменяющийся пропорционально току нагрузки. На подключенном к выходу 8 (OUT) микросхемы резисторе R5 выделяется напряжение, которое затем подается на модуль АЦП и далее анализируется микроконтроллером.

Сопротивление резистора R5 в соответствии с рекомендациями производителя микросхемы вычисляется по выражению $R_{out} = V_{out} / (I_{нагр} * 500 \text{ мкА/А})$.

Из таблицы 1, приведенной в [10] для тока, потребляемого из контролируемого источника и равного 10А получаем значения параметров рекомендованных элементов. В соответствии с рисунком 24 это:

$$R2 = 5 \text{ мОм}, R1 = R2 = 500 \text{ Ом}, R5 = 2 \text{ кОм}.$$

Сопротивление резистора R4 рекомендуется выбирать величиной 100кОм.

Тогда коэффициент преобразования, который следует учитывать при вычислениях в микроконтроллере и который связывает выходное напряжение на выводе 8 (OUT) микросхемы и ток аккумулятора равняется 0,2:

$$K_{масшт} = V_{out} / I_{sens} = 0,2$$

В качестве резистора R2 выбираем резистор RX27-1 0.01 Ом 5W 5% / SQP5 [14] и включаем параллельно два таких резистора для получения сопротивления 5мОм.

Резисторы R1 R2 выбираем RC0402JR-0750RL [13].

Резистор R5 - RC0805FR-072KL [1].

Резистор R4 - RC1206FR-07100KL [3].

Таким образом выбраны все элементы узла измерения силового тока аккумулятора.

6.5 Узел АЦП.

Для ввода в микроконтроллер у нас в итоге имеются следующие сигналы:

- входное напряжение ячеек аккумулятора – 5 штук,
- значение напряжения, пропорционального току, потребляемого от аккумулятора, и поступающее с выхода узла измерения тока – 1 шт.
- значение напряжения, пропорционального току аккумулятора при тестировании на переменном токе – 1 шт.

Таким образом, у нас получается 7 измеряемых напряжений, которые надо преобразовать в цифровую форму и передать в микроконтроллер.

Для выполнения этой операции выберем АЦП модели ADS1115. Эти АЦП имеют следующие отличительные черты [4] :

- напряжение питания: от 2В до 5В;
- ток потребления: 150 мкА;
- тактовый генератор: интегрирован;
- разрешение: 16 бит;
- количество входных каналов: 4;
- передача данных по шине - I2C;
- скорость передачи данных: от 8 до 860 выб/сек;
- диапазон входного напряжения: ± 256 мВ ... ± 6.144 В;
- количество модулей на одной шине: 4.

Схема модуля АЦП с использованием двух микросхем ADS1115 показана на рисунке 34.

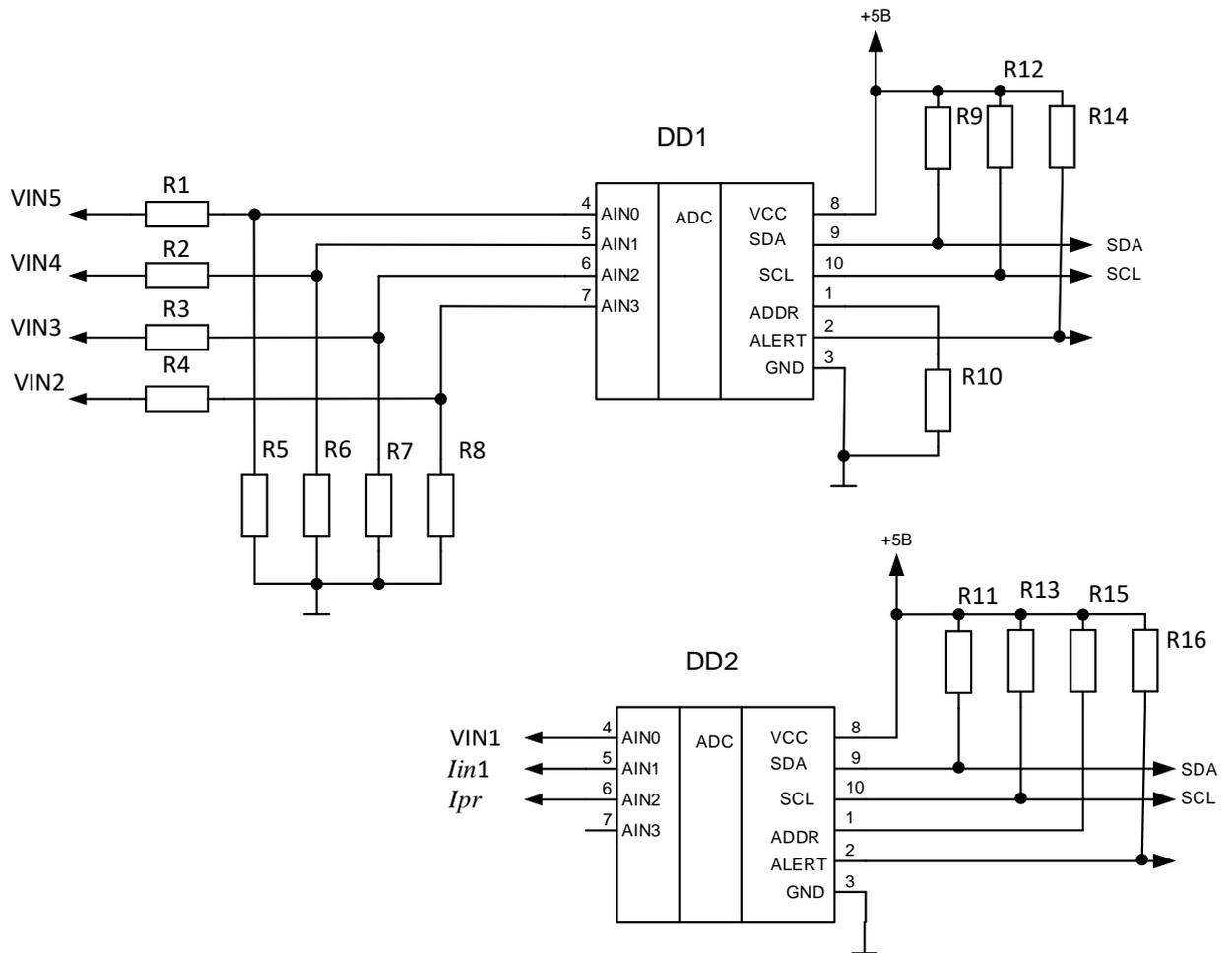


Рисунок 34 – Схема модуля АЦП

Входы VIN1...VIN5 предназначены для подачи на них напряжений с ячеек аккумулятора с балансировочного разъема аккумулятора, на вход In1 подается напряжение пропорциональное переменному току модуля тестирования по переменному току, на вход Ipr поступает напряжение, пропорциональное силовому току аккумулятора, протекающему в разрядном режиме через электронную нагрузку.

Резисторы R9-R16 выполняют роль подтягивающих потенциалы цифровых выходов микросхем к уровню питающего напряжения +5В.

Их выбираем, в соответствии с рекомендациями производителя сопротивлением 10 кОм, мощности рассеивания достаточно 0,125 Вт. Выбираем модель резисторов RC1206FR-0710KL в [2].

Резисторы R1-R8 включены делителями напряжений и предназначены попарно для масштабирования напряжения ячеек аккумуляторной батареи для VIN5... VIN2, или передачи напряжения одной ячейки для VIN1.

На каждый из входов для группы ячеек с балансирующего разъема аккумулятора поступают следующие максимальные значения напряжений:

$$VIN2=2*4,2В=8,4В;$$

$$VIN3=3*4,2В=12,6В;$$

$$VIN4=4*4,2В=16,8В;$$

$$VIN5=5*4,2В=21В.$$

Эти значения надо отмасштабировать в диапазон входных значений до 4.5В, который может быть точно подстраиваем программным образом за счет запаса по разрядности в 16 разрядном АЦП.

С учетом того, что сопротивления резисторов должны удовлетворять набору выбранного стандартного ряда E24 и приняв значения резисторов R5,R6,R7,R8 равными 10кОм, получим следующие значения для остальных резисторов:

$$R1=R5*(VIN5/4.5-1)=10*10^3*(21/4.5-1)=36.6кОм;$$

$$R2= R6*(VIN4/4.5-1)=10*10^3*(16,8/4.5-1)=27,3кОм;$$

$$R3= R7*(VIN3/4.5-1)=10*10^3*(12,6/4.5-1)=18кОм;$$

$$R4= R8*(VIN2/4.5-1)=10*10^3*(8,4/4.5-1)=8,67кОм.$$

Из ряда E24 выбираем резисторы:

$$R1 = 36кОм;$$

$$R2 = 27кОм;$$

$$R3 = 18кОм;$$

$$R4 = 8,2кОм.$$

6.6 Микроконтроллерный узел.

В качестве микроконтроллера нам необходимо выбрать устройство, которое имеет шину I2C, входы для функционирования 3 кнопок для работы пользователя и кнопку сброса, два цифровых выхода для управления двумя реле и питанием 5В.

Возьмем один самых распространенных для данного уровня изделий микроконтроллеров - ATmega328P.

Этот микроконтроллер имеет следующие характеристики:

- используемая архитектура – RISC;
- объем ОЗУ – 2 кБ;
- объем флэш-памяти программ – 32 кБ;
- объем энергонезависимой памяти EEPROM – 1 кБ;
- регистров общего назначения (РОН) – 32;
- восьмиразрядных таймер/счетчиков – 2;
- выводов в корпусе – 32 шт;
- интерфейсов USART – 2.

Схема узла из микроконтроллера и экрана дисплея показана на рисунке

35.

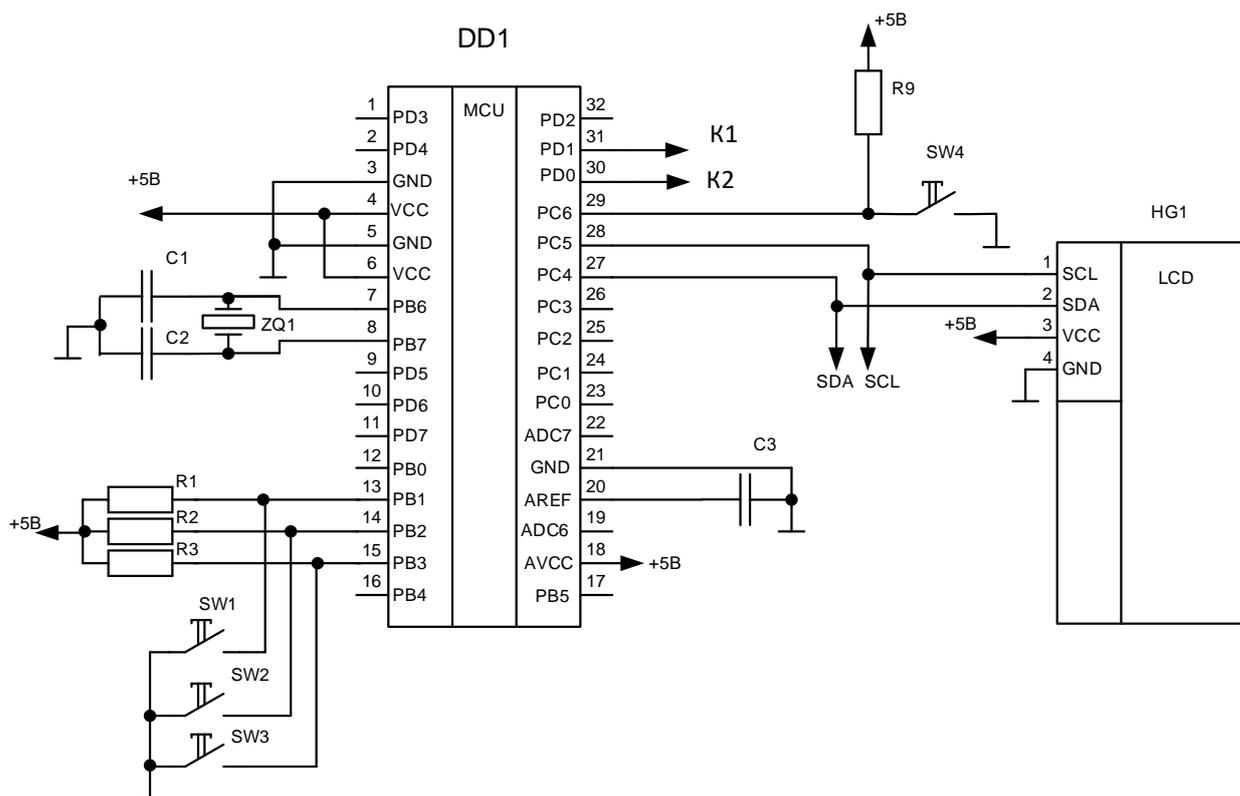


Рисунок 35 – Схема узла микроконтроллера и дисплея

Поскольку решаемая в работе задача нетребовательна к скорости вычислений и аналогоцифровых преобразований, будем использовать для подключения внешних АЦП к микроконтроллеру шину I2C на аппаратном уровне.

Сопrotивления резисторов R1...R3, подтягивающих потенциал выводов микроконтроллеров к которым подключены кнопки для пользователя SW1...SW3 к напряжению питания.

Кнопки выбираем модели TS-A6PG, рассчитанную на напряжение до 12 В и ток до 50мА.

Конденсатор C3 сглаживает паразитные высокочастотные пульсации напряжения на входе опорного напряжения, его емкость выбираем 0,1мкФ, а конденсатор – керамического типа.

На конденсаторах C1 C2 и кварцевом резонаторе ZQ1 собран внешний узел задающего тактового генератора. Выбираем кварцевый резонатор на 16МГц, а емкость конденсаторов, в соответствии с рекомендациями производителя равной 22пкФ.

В качестве дисплея выбираем модель графического дисплея Waveshare Electronics 14657. Этот дисплей имеет диагональ 0,91 дюйма, разрешение 128x32 точки, серый уровень, задаваемый 16 разрядами, драйвер дисплея SSD1306.

Рабочее напряжение этого дисплея 3.3В – 5В. Внешний вид дисплея показан на рисунке 36.



Рисунок 36 – Внешний вид дисплея Waveshare Electronics 14657 с лицевой и обратной стороны

Результующая схема всего устройства тестирования аккумуляторов показана на рисунке 37.

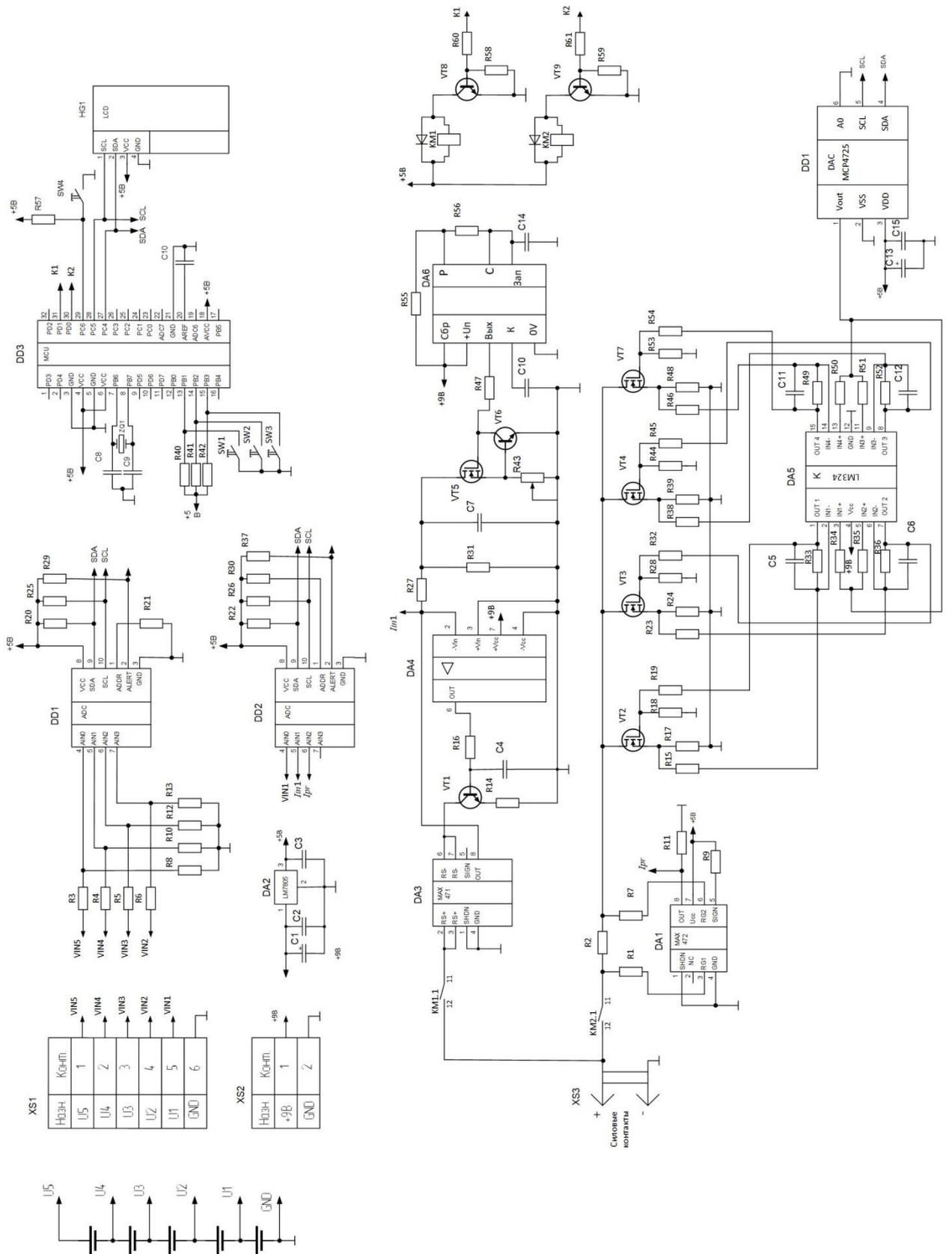


Рисунок 37 – Полная схема устройства для тестирования аккумуляторов

Заключение

В результате проделанной работы выполнен обзор основных типов аккумуляторов, представленных на рынке, их структуры, химико-физических процессов, происходящих в них, эксплуатационных особенностей. Зафиксированы их достоинства и недостатки.

Выполнен обзор и анализ основных характеристик представленных на рынке устройств для тестирования аккумуляторов и аккумуляторных батарей. Установлено, что можно выделить устройства с минимальными измерениями: напряжениями аккумулятора и ячеек аккумуляторных батарей, емкости батарей с произвольными, выбираемыми производителями самостоятельно, разрядными процессами. Как правило, это приборы из низкой ценовой категории. Кроме этого, на рынке имеются диагностические устройства, имеющие в своем составе узлы электронной нагрузки и позволяющие выполнять в том числе и короткие циклы разряда аккумуляторов / аккумуляторных батарей. Однако анализ выявил малое количество изделий, которые осуществляют тестирование в соответствии с требованиями ГОСТ.

Проведен анализ требований ГОСТ к тестированию аккумуляторов и аккумуляторных батарей. Установлен алгоритм проведения измерений и последующих вычислений требуемых ГОСТом параметров.

Разработана структурная и принципиальная схемы устройства тестирования аккумуляторов. Разработанное устройство содержит модуль управляемой микроконтроллером электронной нагрузки, модуль измерений по переменному и постоянному току, модули измерения основного тока аккумулятора и токов в режиме замера по переменному току, модуль аналого-цифровых преобразователей, собственно микроконтроллер и жидкокристаллический матричный экран, элементы для управления устройством.

Разработан алгоритм функционирования устройства для обеспечения требований ГОСТ по тестированию аккумуляторов.

Список используемой литературы

1. 0.125Вт 0805 2 кОм, 1%, Чип резистор (SMD).
<https://www.chipdip.ru/product/0.125w-0805-2-kom-1>
2. 0.25Вт 1206 10 кОм, 1%, Чип резистор (SMD)//
<https://www.chipdip.ru/product/0.25w-1206-10-kom-1>
3. 0.25Вт 1206 100 кОм, 1%, Чип резистор (SMD).
<https://www.chipdip.ru/product/0.25w-1206-100-kom-1>
4. ADS1113, ADS1114, ADS1115 Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference. SBAS444B –MAY 2009–REVISED OCTOBER 2009. - Texas Instruments Incorporated
5. BC546B, BC547A, B, C, BC548B, C. Amplifier Transistors. DATA SHEET. Publication Order Number: BC546/D . August, 2021 – Rev. 8. - Semiconductor Components Industries, LLC, 2012
6. BC548, BC548A, BC548B, BC548C NPN General Purpose Amplifier. 548-ABC, Rev B // Fairchild Semiconductor Corporation, 1997
7. BUZ10. N - CHANNEL 50V - 0.06Ω - 23A TO-220 StripFET. MOSFET. // STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES
8. IRFP260NPBF. HEXFET® Power MOSFET. PD - 94004B // <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/n-channel/irfp260n/>
9. LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902 Single Supply Quad Operational Amplifiers. DATA SHEET. Publication Order Number: LM324/D. October, 2021 – Rev. 31// Semiconductor Components Industries, LLC
10. MAX471/MAX472. Precision, High-Side Current-Sense Amplifiers. 19-0335; Rev 2; 12/96 . - Maxim Integrated Products
11. MCP4725. 12-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM Memory in SOT-23-6. DS22039D. // 2009 Microchip Technology Inc.

12. NRP-15-C-05D. Реле 1 переключ. 5VDC, 30A/240VAC SPDT // <https://www.chipdip.ru/product/nrp-15-c-05d>
13. RC0402JR-0750RL. <https://www.chipdip.ru/product0/8002863221>
14. RX27-1 0.01 Ом 5W 5% / SQP5 <https://www.chipdip.ru/product0/8007169447>
15. ГОСТ 15596-82 «ИСТОЧНИКИ ТОКА ХИМИЧЕСКИЕ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ»
16. ГОСТ Р МЭК 61960-2007 «АККУМУЛЯТОРЫ И АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ, СОДЕРЖАЩИЕ ЩЕЛОЧНОЙ И ДРУГИЕ НЕКИСЛОТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ»
17. Диод Шоттки 1N5822 [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product/1n5822-sunmate>
18. Измерение внутреннего сопротивления свинцово-кислотного аккумулятора в режиме его зарядки. В.М. Афанасьев, А.С. Григорьев, К.А. Клестов, Д.В. Павлов, В.В. Печак. // Электрохимическая энергетика. 2014. Т.14. №3.с.164-169.
19. Измерение потребляемого тока с помощью микросхем MAX471/472. Часть первая. // <https://www.radiokot.ru/articles/08/>
20. Измеритель емкости аккумуляторов ZH-YU ZB206+ и как он измеряет внутреннее сопротивление. <https://mysku.club/blog/china-stores/71936.html>
21. Литий-ионный аккумулятор/ https://ru.wikipedia.org/wiki/Литий-ионный_аккумулятор
22. Литий-никель-кобальт-алюминий-оксидный аккумулятор. https://ru.wikipedia.org/wiki/Литий-никель-кобальт-алюминий-оксидный_аккумулятор
23. Литий-полимерные аккумуляторы. <https://craftmann.ru/articles/battery/type/li-polymer.html>

24. Литий-титанатный аккумулятор.
https://ru.wikipedia.org/wiki/Литий-титанатный_аккумулятор
25. Многофункциональный цифровой измеритель JUNTEK VAT1100. <https://mysku.club/blog/ebay/72440.html>
26. Никель-кадмиевая батарея. https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel-cadmium_battery
27. Никель-кадмиевая батарея. Никель-кадмиевый аккумулятор.
https://ru.wikipedia.org/wiki/Никель-кадмиевый_аккумулятор
28. Никель-металл-гидридные аккумуляторы (NiMH): эффективное решение для повседневного использования
<https://electricalschool.info/power/2873-nikel-metall-gidridnye-akkumulyatory-nimh.html>
29. Резистор 5 Вт 0,22 Ом SQP-5 27 [Электронный ресурс] URL:
<https://www.chipdip.ru/product/sqp-5w-022-om-5> (дата обращения 10.05.2024)
30. СПЗ-4АМ, 0.25 Вт, 100 Ом, 3-20, 20%,
<https://www.chipdip.ru/product0/68520945>
31. Схема измерителя выходного сопротивления батарей.
<https://radiostorage.net/899-skhema-izmeritelya-vyhodnogo-soprotivleniya-batarej.html>
32. Тестер аккумуляторов Foxwell BT100Pro.
<https://mysku.club/blog/china-stores/62732.html>
33. Хрусталёв Д. А. Аккумуляторы. М: Изумруд, 2003.
34. Цифровой измеритель параметров аккумуляторов JUNTEK VAT1100 <https://mysku.club/blog/ebay/72440.html>
35. Электрический аккумулятор. [Электронный ресурс], URL:
https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический_аккумулятор
36. Электронная нагрузка EBC-A10H от ZKEtech с функцией тестирования аккумуляторов <https://mysku.club/blog/taobao/71182.html>

37. Электронная нагрузка своими руками

https://usamodelkina.ru/12450-jelektronnaja-nagruzka-svoimi-rukami.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fusamodelkina.ru%2F12450-jelektronnaja-nagruzka-svoimi-rukami.html%3Futm_referrer%3Dhttps%253A%252F%252Fyandex.ru%252F