

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

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Кафедра «Промышленная электроника»

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Промышленная электроника

(наименование профиля, специализации)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Система контроля аккумуляторных батарей

Студент(ка)

С. Е. Качалов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

А. К. Кудинов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.А. Шевцов

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

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2016

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

ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

(институт)

Промышленная электроника

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой «Промышленная электроника»

А.А. Шевцов

(подпись)

(И.О. Фамилия)

« _____ » _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение бакалаврской работы

Студент Качалов Станислав Евгеньевич

1. Тема Система контроля аккумуляторных батарей

2. Срок сдачи студентом законченной выпускной квалификационной работы 30 мая 2016 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе Назначение: автономное энерго-снабжение объекта. Объект: административное здание по ул. Ботанической

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов) Введение. 1. Состояние вопроса. 2. Основная часть: 2.1. Анализ сезонного энергопотребления объекта. 2.2. Расчет и выбор аккумуляторной батареи. 2.3. Разработка системы контроля аккумуляторных батарей. Заключение.

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала 1. Структурная схема автономного электроснабжения объекта. 2. Структурная схема системы контроля. 3. Принцип балансировки ячеек аккумуляторной батареи. 4. Внутренняя структура микросхемы балансировки. 5. Модуль балансировки аккумуляторной батареи. 6. Месячный график работы автономной системы электроснабжения.

6. Консультанты по разделам _____

7. Дата выдачи задания « 01 » апреля _____ 2016 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы

А.К. Кудинов

(подпись)

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

С.Е. Качалов

(подпись)

(И.О. Фамилия)

Аннотация

Объем 77 с., 21 рис., 13 табл., 20 источников.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ БАТАРЕИ, АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ, АККУМУЛЯТОРНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ, СОСТОЯНИЕ ЗАРЯДА, ЛИТИЙ-ФЕРРОФОСФАТНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ, АККУМУЛЯТОРНЫЕ ЯЧЕЙКИ, БАЛАНСИРОВКА ЯЧЕЕК

Объектом исследования является система контроля аккумуляторных батарей (СКБ) для автономных систем электропитания.

Цель бакалаврской работы — улучшение эксплуатационных показателей аккумуляторных накопителей: срока эксплуатации, КПД, надежности, путем разработки системы контроля аккумуляторных батарей.

Задачи бакалаврской работы заключались в разработке простой оптимальной структурной схемы системы контроля аккумуляторного накопителя и проработке структурных элементов этой схемы, разработке принципиальной схемы системы и обоснованном выборе ее элементов и анализе ее экономической эффективности.

Работа состоит из трех глав, в которых решены упомянутые задачи.

В процессе работы была создана система контроля аккумуляторных батарей, которая реализована на практике и введена в эксплуатацию на реальном объекте. Там же проводились экспериментальные исследования режимов заряда и получены практические результаты.

Областью применения данной системы являются аккумуляторные накопители электроэнергии, использующие аккумуляторные ячейки для автономного электропитания потребителей электроэнергии.

Содержание

Введение.....	5
1 Состояние вопроса	6
1.1 Анализ известных систем автономного электроснабжения	6
1.2 Выбор первичного источника электроэнергии	8
1.3 Выбор накопителя электроэнергии	11
1.4 Выбор инверторов.....	15
1.5 Выбор СКБ.....	17
2. Основная часть	20
2.1 Анализ сезонного энергопотребления объекта.....	20
2.2 Расчет и выбор аккумуляторной батареи	24
2.3 Разработка системы контроля аккумуляторных батарей.....	27
2.3.1 Микросхема балансировки ячеек LTC 3300-1	28
2.3.2 Работа последовательного порта.....	55
2.3.3 Выбор внешних компонентов.....	66
2.3.4 Соединение микросхем балансировки и мониторинга	72
Заключение	74
Список использованных источников	745

Введение

Автономные системы электроснабжения занимают особое место в стратегии развития энергетики и все чаще получают широкое распространение и внедрение в системах электроснабжения не только специального (изолированного), но и общего пользования. Чаще всего такие системы строятся на базе возобновляемых источников энергии, таких как солнечные батареи или ветряные генераторы, но так как они зависят от суточной погоды, то для построения автономной системы электроснабжения необходим накопитель энергии. В качестве накопителей электроэнергии нередко выступают аккумуляторные батареи, которые имеют ограниченный срок службы ввиду ограниченного числа циклов заряда / разряда, а также разброс электрических параметров в зависимости от внешних дестабилизирующих факторов. Данная проблема является актуальной и подлежит решению.

Целью данной выпускной квалификационной работы является снижение затрат на электроэнергию, а также повышение надежности и продление срока службы накопителя электроэнергии на аккумуляторных батареях за счет разработки системы контроля аккумуляторных батарей, которая устраняет недостатки аккумуляторных батарей, повышает надежность всей системы автономного электроснабжения в целом.

1 Состояние вопроса

Автономные системы электроснабжения (АСЭ) выгодны там, где прокладка линий электропередач требует существенных затрат, а если необходима ещё и установка подстанции, то сумма подключения увеличится в разы. Причем эти деньги пойдут на покупку оборудования, которое не станет вашей собственностью, а будет принадлежать местным энергосетям. Таким образом автономная система может стоить дешевле (при учете стоимости платы за электроэнергию), чем подключение к линиям электропередач (ЛЭП). Также следует упомянуть, что автономная система будет являться вашей собственностью, при должном уходе она прослужит очень долго, а собственник, регулярно проверяя её состояние, обезопасит себя от внезапных отключений электроэнергии. Если предполагаемое место размещения АСЭ находится в регионе с подходящими климатическими условиями, то стоимость энергии, вырабатываемой автономной системой может быть ниже, чем при подключении к централизованным сетям [1].

Таким образом данный способ получения электроэнергии является актуальным в ряде случаев и совершенно безопасен для окружающего мира, поэтому он всегда выгоден для природы.

1.1 Анализ известных систем автономного электроснабжения

Существуют разные виды АСЭ (см. рисунок 1.1), принцип их построения одинаков, а главное их различие между собой это использование различных первичных источников электрической электроэнергии, таких как: генератор, работающий на бензине или дизельном топливе, ветроэлектрическая установка, фотоэлектрическая установка (солнечные батареи), гидроэлектростанция малого размера [2].

При построении АСЭ желательно иметь не один, а два источника энергии, в таком случае потребитель будет полностью застрахован от отключений. Как правило, в качестве дополнительного источника используется дизельный генератор. Потребность в нем может и не возникнуть, обычно этот источник простаивает, однако, он может пригодиться в любой момент. В ряде случаев, для того чтобы минимизировать стоимость АСЭ и исходя из погодных условий и климата определенной местности целесообразно использовать один первичный источник электроэнергии.

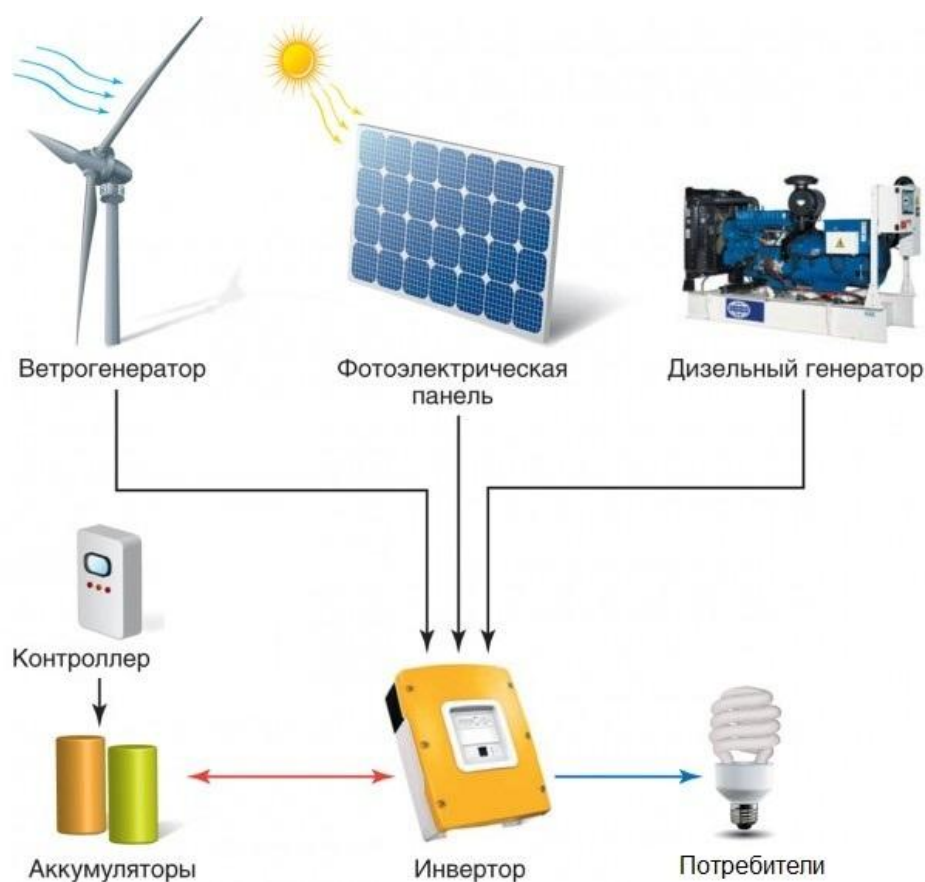


Рисунок 1.1 - Упрощенная схема автономной системы электроснабжения

Второй необходимый элемент — аккумуляторная батарея. Без неё автономная система не может существовать, поскольку возобновляемый ресурс непостоянен. Даже для систем, где источником является генератор, необходима

аккумуляторная батарея, позволяющая отключать его на некоторое время, а пользоваться электроэнергией постоянно.

Ещё одна важная часть автономной системы электроснабжения — инвертор, который преобразует постоянный ток в переменный. Необходимость обуславливается высокими потерями в проводах постоянного тока. К тому же большинству устройств необходим переменный ток на напряжение 220 В, который можно получить от инвертора.

Контроллер заряда аккумуляторной батареи бывает отдельным, а бывает и встроенным в инвертор. Задача контроллера, следить за состоянием батареи и не допускать полной разрядки и перезаряда, а также улучшать эксплуатационные характеристики и продлевать срок службы аккумуляторной батареи (АКБ). Также следует отметить, что вместо контроллера заряда АКБ может выступать и целая система, например СКБ, которой и посвящена данная выпускная квалификационная работа.

Также следует отметить, что в стоимость АСЭ также входит все необходимое оборудование: кабели, автоматы, щиты, система заземления, выключатели и прочее [3].

1.2 Выбор первичного источника электроэнергии

Видов первичных источников электроэнергии не так много — это дизельный, бензиновый или ветряной электрогенератор, солнечные батареи и аккумуляторы, а также портативные гидроэлектростанции. Все эти источники обладают как преимуществами, так и недостатками, с которыми необходимо разобраться в первую очередь.

Топливные генераторы. Топливные генераторы (см. рисунок 1.2) — это самый простой и дешевый способ обеспечить небольшой объект электроэнергией. Работа устройства основана на принципе сжигания топлива, поэтому если

речь идет о такой системе бесперебойной подачи электроэнергии, то она подразумевает создание немалой базы для хранения топлива. Как минимум, в запасе



Рисунок 1.2 - Топливные генераторы: а) бензиновый; б) дизельный; в) газовый.

должно находиться около двухсот литров дизельного топлива, бензина или других горючих материалов. Бензиновые агрегаты бесшумны, компактны, просты в эксплуатации, стоят недорого и могут работать при низких температурах. Но время непрерывной работы у них невелико. Дизельные системы более производительны, чем бензиновые аналоги. Дизельные генераторы надежны и долговечны, но для них придется приобрести или сделать своими руками отдельный контейнер (или хозяйственную постройку). Это необходимое условие, чтобы шум работающего устройства не мешал людям. Выгодно отличаются газовые электрогенераторы – если к строению подведен газопровод, то проблема с источником топлива решается автоматически. Главными недостатками всех вышеперечисленных генераторов является то, что они не подходят в качестве первичного источника электроэнергии для крупных и средних объектов [4].

Возобновляемые источники энергии. Традиционным возобновляемым источником энергии являются гидроэлектростанции. Если поблизости объекта расположена речка или озеро, можно воспользоваться водяными источниками энергии. Гидроэлектроэнергия в небольших масштабах является наиболее реальным и выгодным вариантом автономного электроснабжения. Плюсами использования данного типа первичных источников электроэнергии являются экологичность и безопасность, простота в эксплуатации и долгий срок службы, но все же данный

тип первичных источников электроэнергии не является распространенным в виду необходимости водоема поблизости. В следствие этого целесообразно использование нетрадиционных возобновляемых источников электроэнергии, таких как ветряные электрогенераторы и солнечные батареи (см. рисунок 1.3). Ветряные электрогенераторы используют энергию ветра, с помощью которой вращаются турбины, расположенные на высоких башнях (от 3 м). Ветряные электрогенераторы имеют плюсы, такие как экологичность, надежность, но их недостатки зачастую перекрывают все плюсы. Основными недостатками ветряных электрогенераторов являются их высокая стоимость, габариты, шум при работе большого количества генераторов, а также обязательное наличие постоянного ветра со скоростью не менее 14 км/ч.



Рисунок 1.3 - Нетрадиционные возобновляемые источники энергии

В большинстве случаев универсальным решением при выборе первичного источника электроэнергии выступают солнечные батареи. Они преобразуют падающий свет в электричество благодаря свойства р-п перехода при поглощении кванта света. Энергии солнечных лучей вполне хватает, чтобы преобразовывать ее в нужное человеку электричество. Солнечные батареи являются эффективным автономный источник электроснабжения, который прослужит минимум 40 лет. Плюсами солнечных батарей является их простота работы, экологичность, возможность использования на крупных объектах, а недостатками явля-

ются габариты, необходимость специальной конструкции крепления и зависимость выработки электроэнергии от погодных условий, а также полное отсутствие выработки электроэнергии в ночное время, в связи с чем для автономной системы на солнечных батареях необходимо наличие накопителя электроэнергии [5].

Исходя из перечисленных достоинств и недостатков всех видов источников первичной электроэнергии, а также учитывая географическое положение, климат и площадь объекта в качестве первичного источника электроэнергии для автономной системы электроснабжения целесообразно использование солнечных батарей совместно с накопителем электроэнергии.

1.3 Выбор накопителя электроэнергии

По принципу действия накопителя электрической энергии в целом можно разделить на три основные группы: механические, электрохимические и электромагнитные. В дальнейшем будем рассматривать только электрохимические накопители. Электрохимические накопители делятся на: аккумуляторные батареи, водородные накопители, проточные редокс-аккумуляторы и суперконденсаторы.

Аккумуляторные батареи (АБ) являются одним из наиболее экономически эффективных и удобных обратимых накопителей электрической энергии [6]. Аккумуляторные батареи бесшумны, при своей работе не загрязняют окружающую среду. Емкость запасенной в них энергии может быть увеличена за счет коммутации отдельных батарей. Они могут быть расположены практически в любом месте и установлены относительно быстро. Зарядка аккумулятора не является быстрым процессом и по продолжительности, как правило, совпадает с продолжительностью разряда [7]. Быстрое реагирование на подключение к нагрузке является важным преимуществом АБ, некоторые типы батарей могут реагировать на изменения в нагрузке в течение 20 миллисекунд. Это определило

их использование как основных резервных источников питания. Эффективность аккумуляторных батарей коэффициент полезного действия (КПД) находится в диапазоне 70÷90 % [8]. Батареи, однако, имеют и недостатки. Процесс цикла заряда-разряда, также как температура в батарее должны быть под контролем, т.к. они влияют на срок службы батареи. Другой серьезной проблемой является жизненный цикл батареи, т.е. количество циклов заряда/разряда, который зависит от глубины разряда АБ. Если глубина разряда велика, то жизненный цикл батареи снижается. Как видно из рисунка 1.4, срок службы батареи Delta GS12-180 существенно снижается при увеличении глубины разряда АБ [9].

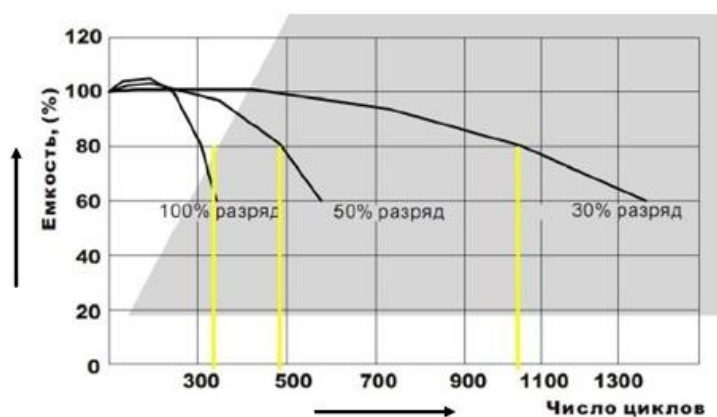


Рисунок 1.4 - Жизненный цикл аккумуляторной батареи

Основными типами АБ являются: свинцовые, никель-кадмиевые, никель-железные, никель-металлогидридные, никель-цинковые, серебряно-цинковые и серебряно-кадмиевые, литий-ионные, литий феррофосфатные, литий-полимерные, и металл-воздушные. Сравнительные характеристики всех видов АБ приведены в таблице 1.1 [10,11].

Таблица 1.1 — Основные характеристики АБ

Тип аккумулятора	К. П. Д. (%)	Стоимость (\$/кВт)	Количество циклов до определенного разряда (%)	Рабочая температура (°C)	Уд. энергия (Вт·ч/кг)	Саморазряд (%/месяц)
Свинцово-кислотный (малообслуживаемый - flooded)	72-78	50-150	1000-2000 (70%)	-5/+40	25	2-5

Таблица 1.1 — Основные характеристики АБ (продолжение)

Свинцово-кислотный (регулируемый клапаном - valveregulated)	72-78	50-150	200-300 (70%)	-5/+40	30-50	2-5
Никель- кадмиевый (Ni-Cd)	72-78	200-600	3000 (100%)	-40/+50	40-80	5-20
Сульфид-натриевый (NaS)	89	400-500	2500 (100%)	+300/+350	100	0
Литий-ионный	100	700-1000	3000 (80%)	-30/+60	90-190	1
Ванадий редокс (Vanadium, redox)	85	360-1000	10000 (75%)	0/+40	30-50	незначительный
Цинк-бромная (ZnBr)	75	360-1000	3500 (100%)	0/+40	70	незначительный
Металл - воздушные	50	50-200	<100	-20/+50	450-650	незначительный
Литий ферро-фосфатные (LiFePO ₄)	90	900-1200	3000-5000 (70%)	-20/+50	180-200	5

Водородные накопители являются достаточно перспективными накопителями электроэнергии, водород является уникальным энергоносителем и за счет процессов прямого электрохимического преобразования энергии в электролизерах и топливных элементах он может быть использован для аккумулирования электрической энергии. Достоинства данного типа накопителей это абсолютная экологичность, высокая энергоемкость (благодаря неограниченному хранению газов в сжатом состоянии), а недостатки — высокая стоимость разработки, низкий КПД ~40%, сложность конструкции, необходимость в баке для водорода [12].

Электрохимические суперконденсаторы отличаются от аккумуляторов тем, что электрохимические процессы происходят исключительно на поверхности электрода, что приводит к более высокой скорости протекания электрохимических процессов за счет отсутствия диффузионных затруднений. Процесс запа-

сания энергии в суперконденсаторах осуществляется за счет разделения заряда на границе электрод — электролит на двух электродах с высокоразвитой поверхностью и максимально возможной разностью потенциалов между ними [13]. Разность потенциалов обычно определяется величиной напряжения разложения электролита. Достоинства данного типа накопителей это практически идеальная обратимость, неограниченная циклируемость, быстрое время заряда, широкий температурный диапазон, отсутствие необходимости обслуживания, а недостатки — высокая стоимость, быстрое время разряда, электрохимическая деградация электродов [14].

Проточные редокс батареи (ПРБ) появились сравнительно недавно. Основное их отличие от аккумуляторных батарей состоит в том, что активные вещества здесь находятся не внутри батареи, в отдельных емкостях и подаются в батарею только для протекания окислительно-восстановительных реакций на электродах [29]. Среди многих редокс систем, практическое применение нашла ванадиевая редокс-система. Работа такой батареи основана на том, что ванадий может находиться в растворе в четырёх разных степенях окисления. В её состав входят две ёмкости с электролитом (растворы сернокислых солей ванадия в серной кислоте) в баках, насосы и электрохимический блок, в котором жидкости отделяются друг от друга протонообменной мембраной (см. рисунок 1.4).

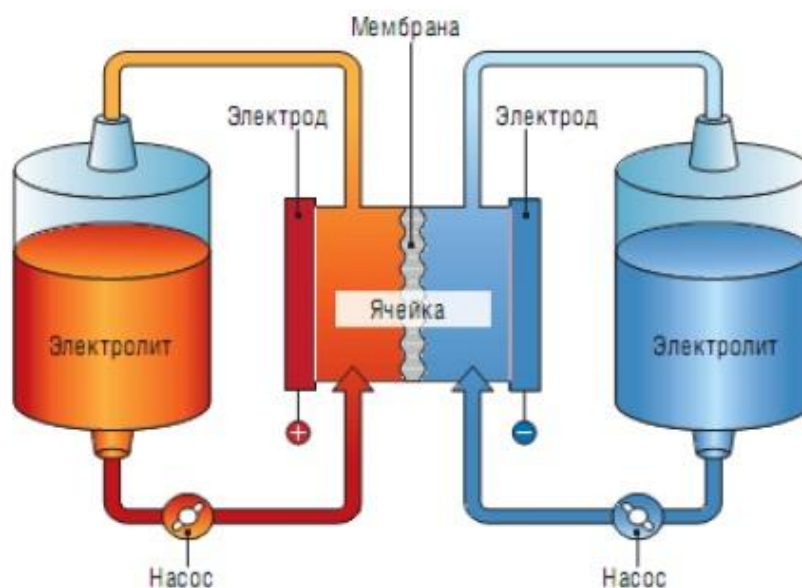


Рисунок 1.4 - Схематичное изображение проточной редокс-батареи

Одна ёмкость содержит ионы V^{5+} , а другая V^{2+} ; ЭДС суммарной реакции составляет $E = 1,246$ В. При разряде батареи степень окисления ванадия в анодном контуре изменяется с +2 на +3, при этом из состава соли высвобождается один атом водорода, который ионизируется. Протон через мембрану, а электрон – через внешнюю цепь отправляются на катод, где степень окисления ванадия в составе католита изменяется с +5 на +4. Для заряда жидкостей батареи на электроды подают внешнее напряжение и процесс запускают в обратную сторону. Достоинства данного типа накопителей это высокая энергоемкость, простота перезарядки, возможность работы при перегрузках, а недостатки — высокая стоимость, сложная конструкция [15].

Исходя из перечисленных достоинств и недостатков всех видов электрохимических накопителей электроэнергии более предпочтительным вариантом для использования являются литий-феррофосфатные аккумуляторные батареи, так как у них более низкая стоимость по сравнению с другими типами накопителей, а также самый широкий диапазон температур работы, большое число циклов заряд/разряд и высокий КПД.

1.4 Выбор инверторов

Инвертор, т.е. преобразователь постоянного тока в переменный. Необходим, для потребителей переменного тока на напряжение 220 В, или если потребители находятся на значительном расстоянии от АБ (потери в проводах постоянного тока низкого напряжения могут оказаться существенными). Прежде всего, выбранный инвертор должен обеспечить необходимую выходную мощность. Входное (низковольтное) напряжение связано с этой мощностью довольно тесно. Но помимо этого у инверторов есть и другие характеристики, на которые следует обратить внимание.

Во-первых, это форма вырабатываемого тока. Простейшие модели вырабатывают переменный ток треугольной или даже прямоугольной формы (меандр). Правда, это их «теоретическая» форма тока, в реальности обычно сильно

ухудшенная огромными помехами и искажениями. Более-менее успешно такой ток «едят» лишь нагревательные приборы, не содержащие электронных блоков, и лампы накаливания. Вся остальная электротехника (электромоторы, трансформаторы, люминесцентные и энергосберегающие лампы и пр.) от тока подобной формы могут либо выйти из строя, либо не запуститься, либо работать, но очень плохо, даже если тестер честно показывает 220 В. Несколько более приемлем ток трапецеидальной формы. К счастью, в настоящее время инверторы, вырабатывающие на выходе переменный ток таких форм, встречаются редко. Наиболее часто современные инверторы выдают так называемый «модифицированный синус», представляющий собою ступенчатое приближение к синусоидальной форме. Такая форма тока вполне успешно «переваривается» практически всеми современными бытовыми устройствами и электроинструментами, но звук работы некоторых из них заметно меняется и становится громче, а блоки питания могут начать заметно «звенеть». Чтобы устранить эту проблему, можно попытаться использовать различные фильтры, сглаживающие неровности тока. Наконец, инверторы, вырабатывающие «чистый синус», выдают ток, форма которого очень близка к идеальному синусу и обычно намного лучше, чем форма тока в общественной электросети. Единственный недостаток этого класса инверторов — они немного крупнее и в полтора-два раза дороже аналогичных инверторов с «модифицированным синусом».

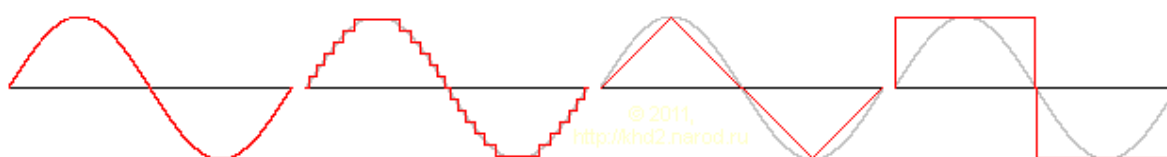


Рисунок 1.5 - Схемы формы тока и напряжения на выходе инвертора (слева направо): чистый синус, модифицированный синус, треугольник, меандр.

Во-вторых, КПД инвертора. Чем он выше, тем меньше непроизводительные потери энергии. Большинство современных инверторов имеет КПД более 90%.

В-третьих, это способность инвертора работать в режиме зарядки аккумуля-

муляторов. Такой инвертор в комплекте с мощными аккумуляторами интересен уже сам по себе, — он по сути представляет собой источник бесперебойного питания (UPS) — примерно такой, какие используются для компьютеров, но мощностью в несколько киловатт и ёмкостью в несколько киловатт-часов.

В-четвёртых, полезна подробная индикация. Весьма желательна возможность контроля как входного напряжения (на аккумуляторах), так и выходного (в сети). Кроме того, желательно наличие защиты от перегрузки и от короткого замыкания в нагрузке.

В-пятых, инвертор должен допускать кратковременное превышение номинальной нагрузки хотя бы в полтора-два раза. Это позволяет использовать электромоторы и нагревательные приборы, мощность которых равна номинальной мощности инвертора.

В-шестых, полезна функция, которая при полном заряде аккумулятора подключает к отдельной линии дополнительную нагрузку, скажем водонагревателя. В солнечные дни это позволяет с пользой автоматически утилизировать избыток энергии и не допускать траты энергии на второстепенные цели тогда, когда её мало [16].

Исходя из выше перечисленных рекомендаций по выбору инверторов подберем из уже имеющихся технических решений инверторы для солнечных батарей марки SMA Sunny Tripower 20000 TL-30, а также инвертор для аккумуляторного накопителя электроэнергии марки SMA Sunny Island 8.0H.

1.5 Выбор СКБ

Под термином СКБ скрывается много значений и разные люди трактуют его по-разному. Для некоторых это просто слежение за состоянием батареи: параметрами заряда и разряда, напряжением и током, а также температурой батареи. Обычно цепи контроля должны сигнализировать или отключать батарею от нагрузки или зарядного устройства при выходе хотя бы одного параметра за допустимый диапазон.

Для разработчика, проектирующего систему питания, аккумуляторные батареи которой являются источником для выполнения устройством возложенных на него задач (будь то электромотор легкого транспортного средства или телекоммуникационное оборудование), СКБ означает систему контроля батарей. Такая система должна не только следить за параметрами и защищать аккумуляторную батарею, но и поддерживать её в состоянии готовности отдать требуемое количество энергии, а также выполнять меры по увеличению срока её жизни.

Структурно СКБ представляет собой плату на которой расположены несколько микросхем мониторинга, отвечающие за вывод и отображение основных параметров аккумуляторной батареи пользователю, а также из микросхем балансировки, которые осуществляют главную функцию балансировки всех основных ячеек аккумуляторной батареи, зарядного устройства аккумуляторных ячеек, а также внешних элементов обвязки.

Для контроля производительности и безопасности аккумуляторной батареи необходимо понимать, что требуется контролировать и зачем это требует контроля. А это требует понимания основ химических процессов, происходящих в аккумуляторных ячейках, эксплуатационных характеристик и состояния отказа батарей, особенно, литиевых. Аккумуляторную батарею нельзя воспринимать как «черный ящик». Поэтому при проектировании СКБ для аккумуляторных батарей следует обращать внимание на следующие функциональные возможности этой системы:

Защита ячеек. Защита батареи от условий, не совместимых с её работой, это основная функция всех BMS. BMS должны предоставлять защиту всех ячеек батареи от почти любой случайной ситуации. Эксплуатация батареи вне диапазона её эксплуатационных характеристик неизбежно приведёт к выводу её из строя.

Контроль заряда. Это жизненно важная функция BMS. Заряд батареи, осуществляемый не в соответствии с правилами заряда аккумулятора, это наиболее распространённая причина выхода батареи из строя.

Балансировка ячеек. В многоячеечной батарее отличия в характеристиках ячеек увеличиваются пропорционально количеству циклов заряда/разряда. Наиболее слабые ячейки во время цикла заряда перезаряжаются, что приводит к их ускоренной деградации и в последствие поломке батареи. Балансировка ячеек – это способ, позволяющий распределять заряд равномерно между всеми ячейками вне зависимости от разброса их параметров, который продлевает срок службы аккумуляторной батареи.

Определение состояния заряда (State of charge). В различных случаях требуется знать состояние заряда батареи или отдельной ячейки в цепи батареи. Эта информация используется для отображения остаточной ёмкости батареи, а также в контрольной цепи зарядного устройства для обеспечения оптимального режима заряда батареи.

Определение состояния исправности (State of Health). Этот параметр является показателем готовности батареи к нагрузке. Отказоустойчивость батареи находится в прямой зависимости от этого показателя. Служит для информирования пользователя о необходимости проведения обслуживания батареи и для предотвращения внезапного прекращения работы батареи.

Ведение журнала работы батареи. Хранение в памяти таких показателей как количество циклов заряда, максимальное и минимальное напряжение батареи и ячеек, максимальное и минимальное значение тока заряда и разряда. Доступ к этим показателям даёт возможность более точно определить состояние исправности батареи.

Взаимодействие с зарядным устройством или тестовым оборудованием. Интерфейс взаимодействия необходим для чтения технических данных о состоянии батареи, изменения параметров или для диагностического и тестового оборудования [17].

Исходя из выше перечисленных рекомендаций по выбору подходящей СКБ из уже имеющихся технических решений предпочтительнее всего является проектирование СКБ на микросхема производства компании Linear Technology, а

именно микросхемах балансировки LTC 3300-1, а также микросхемах мониторинга LTC 6803-1. Достоинствами данных микросхем является многофункциональность, возможность работы с литий-феррофосфатными аккумуляторными ячейками в количестве шести штук на одну микросхему, что сэкономит место при разводке платы, позволит сократить затраты на проектирование, а также максимально упростит всю СКБ в целом.

2. Основная часть

2.1 Анализ сезонного энергопотребления объекта

При проектировании структурной схемы трехфазной автономной системы электроснабжения объекта на ул. Ботанической исходными данными для расчета является таблица сезонного энергопотребления см. таблицу 2.1. Которая была получена программными расчетами пиковых нагрузок на электросеть, исходя из числа одновременно работающих потребителей электроэнергии.

Таблица 2.1 - Потребление электроэнергии объектом, Вт·ч

Час	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен	Окт.	Нояб.	Дек
0	1701	1768	1642	2774	3576	3769	3706	3003	1916	1801	1747	1694
1	1742	1811	1645	2774	3672	3870	3804	3083	1967	1848	1791	1736
2	1742	1811	1645	2774	3672	3870	3804	3083	1967	1848	1791	1736
3	1742	1811	1645	2774	3672	3870	3804	3083	1967	1848	1791	1736
4	1742	1811	1645	2774	3672	3868	3803	3083	1967	1848	1791	1736
5	1742	1811	1645	2774	3672	3866	3801	3082	1967	1848	1791	1736
6	1847	1923	2680	2847	3721	3922	3857	3127	1993	1899	1862	1827
7	4469	4724	3960	4960	5610	5976	5899	4780	2987	3398	3763	4161
8	8954	9139	8764	11249	11072	11602	11416	9597	6120	7592	8070	8590
9	7869	8017	7676	10013	10144	10645	10465	8823	5614	6812	7196	7518
10	6898	7004	6637	8456	9883	10395	10219	8226	5486	5758	6212	6633
11	6927	7025	6677	8495	10015	10582	10403	8824	5591	5772	6341	6676
12	4175	4267	4039	4816	6061	6434	6325	5282	3320	3338	3676	3956
13	6715	6952	6667	8256	9859	10430	10253	8741	5513	5688	6247	6598
14	7334	7693	7265	9112	10580	11185	10993	9364	5929	6202	6887	7302
15	8030	8419	8023	10349	10500	11039	10852	9202	5854	7037	7537	7993

Таблица 2.1 - Потребление электроэнергии объектом, Вт·ч (продолжение)

16	8461	8870	8440	10871	11033	11580	11384	9622	6121	7409	7886	8295
17	4269	4429	4410	6129	7634	8025	7893	6494	4144	4108	4155	4210
18	3741	3909	3720	5349	6674	7006	6896	5652	3611	3615	3645	3658
19	2427	2534	2348	3557	4428	4640	4564	3741	2394	2390	2380	2378
20	1742	1811	1645	2774	3670	3866	3801	3082	1967	1848	1791	1736
21	1742	1811	1645	2774	3672	3868	3803	3083	1967	1848	1791	1736
22	1742	1811	1645	2774	3672	3870	3803	3083	1967	1848	1791	1736
23	1650	1714	1645	2666	3555	3745	3682	2984	1904	1777	1714	1650
Сумма	99403	102873	97705	132018	153718	161922	159230	132520	84230	89379	93651	97024

Основой же для построения автономной системы электроснабжения, как было отмечено в п.1.3 послужили солнечные панели Qcells Q.Pro-G4 Poly 265Wp основанные на поликристаллическом кремнии с номинальной мощностью 265 Ватт в количестве 73 шт., а также солнечные панели BenQ PM060M02 Mono 280Wp основанные на поликристаллическом кремнии номинальной мощностью 280 Ватт в количестве 73 шт. Все панели размещаются на крыше здания под углом 10° относительно горизонта. Основные параметры солнечных панелей приведены в таблице 2.2 [18, 19].

Таблица 2.2 - Основные параметры солнечных панелей

<i>Модель солнечной панели</i>	<i>Qcells Q.Pro-G4 Poly</i>	<i>BenQ PM060M02 Mono</i>
<i>Номинальная мощность, Вт</i>	<i>265</i>	<i>280</i>
<i>Максимальный ток, А</i>	<i>8,62</i>	<i>8,57</i>
<i>Максимальное напряжение, В</i>	<i>30,75</i>	<i>32,7</i>
<i>Ток короткого замыкания, А</i>	<i>9,23</i>	<i>9,06</i>
<i>Напряжение холостого хода, В</i>	<i>38,01</i>	<i>38,9</i>
<i>Максимальная эффективность, %</i>	<i>15,9</i>	<i>17,4</i>
<i>Диапазон температур, С°</i>	<i>-40 ~ +85</i>	<i>-40 ~ +90</i>

Так как суммарная мощность данной фотовольтаической системы составляет 39,78 кВт, к данной системе подобрали два инверторных блока SMA Sunny Tripower 20000 TL-30 мощностью 20 кВт. Подробные характеристики инвертора приведены в таблице 2.3 [20].

Таблица 2.3 - Основные параметры инвертора SMA Sunny Tripower 20000 TL-30

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
<i>Макс. мощность постоянного тока, Вт</i>	<i>20440</i>
<i>Макс. входное напряжение, В</i>	<i>1000</i>
<i>Диапазон входного напряжения / номинальное напряжение, В</i>	<i>320-800 / 600</i>
<i>Мин. входное напряжение, В</i>	<i>150</i>
<i>Максимальный входной постоянный ток, А</i>	<i>33</i>
<i>Количество независимых входов / проводов в одном входе</i>	<i>2 / А:3; В:3</i>
<i>Выходное переменное напряжение, В</i>	<i>180-280</i>
<i>Выходной переменный ток, А</i>	<i>29</i>
<i>Частота сети переменного напряжения / диапазон частот, Гц</i>	<i>50 / 44-55</i>
<i>Количество входных фаз / фаз подключения</i>	<i>3 / 3</i>

Произведем расчет почасовой выработки с солнечных панелей в течение всего года. Для этого воспользуемся формулой:

$$E = P \cdot Ins \cdot N \cdot \eta ,$$

где $P = P_{\text{ном}} \cdot \left(1 + \frac{t_p \cdot (T - 25)}{100}\right)$ - мощность солнечной панели в течении дан-

ного месяца, Вт;

где $P_{\text{ном}}$ - номинальная мощность солнечной панели, Вт,

t_p - температурный коэффициент мощности (-0,04% / К для поликристаллических панелей и 0,42% / К для монокристаллических);

T - среднемесячная температура, С°.

Ins - месячная солнечная инсоляция, Вт/м² (данные берутся из интернета для данной местности и угла наклона солнечных панелей);

N - количество панелей (146),

η - КПД инвертора, % (0,9).

Полученное в результате расчетов значение месячной выработки разделяется нормальным распределением по синусоидальному закону, что на практике близко к истине. В результате получим теоретические исходные данные по выработке электроэнергии см. таблицу 2.4

Таблица 2.4 - Выработка электроэнергии со 146 солнечных панелей, Вт·ч

Час	Янв.	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен	Окт.	Нояб.	Дек
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	716	631	736	0	0	0	0	0
6	0	0	0	922	2769	2446	2844	771	0	0	0	0
7	0	0	0	3528	5881	5228	6040	2965	1055	0	0	0
8	0	0	1416	7367	9631	8641	9892	6249	3978	1086	0	0
9	1143	1529	5284	11776	13513	12272	13879	10122	8099	3998	1200	949
10	4037	5531	10569	15993	17004	15684	17464	13996	12475	7812	4237	3352
11	7328	10479	15853	19288	19631	18466	20162	17280	16102	11318	7691	6084
12	9475	14481	19721	21091	21039	20282	21609	19474	18150	13401	9946	7867
13	9475	16010	21137	21091	21039	20912	21609	20245	18150	13401	9946	7867
14	7328	14481	19721	19288	19631	20282	20162	19474	16102	11318	7691	6084
15	4037	10479	15853	15993	17004	18466	17464	17280	12475	7812	4237	3352
16	1143	5531	10569	11776	13513	15684	13879	13996	8099	3998	1200	949
17	0	1529	5284	7367	9631	12272	9892	10122	3978	1086	0	0
18	0	0	1416	3528	5881	8641	6040	6249	1055	0	0	0

Таблица 2.4 - Выработка электроэнергии со 146 солнечных панелей, Вт·ч
(продолжение)

19	0	0	0	922	2769	5228	2844	2965	0	0	0	0
20	0	0	0	0	716	2446	736	771	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	631	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма	43966	80050	126823	159930	180368	188212	185252	161959	119718	75230	46148	36504

Анализируя данные таблицы 2 и таблицы 5 видно, что построение полностью автономной системы электроснабжения невозможно, так как выработки электроэнергии солнечными панелями в осенние и зимние месяцы недостаточно для покрытия энергопотребления объекта, в связи с этим с структурную схему электроснабжения объекта следует включить внешнюю сеть.

2.2 Расчет и выбор аккумуляторной батареи

Как видно из таблиц 2 и 5 использование накопителя электроэнергии целесообразно в период с марта по октябрь, так как выработки электроэнергии солнечными панелями с избытком хватает на обеспечение энергопотребления объекта. Сам же накопитель будет заряжаться днем во время активной выработки электроэнергии солнечными панелями, а разряжаться ночью, а также в те моменты, когда выработки электроэнергии солнечными панелями не достаточно для покрытия пикового энергопотребления.

Для расчета необходимого количества энергии запасаемой в аккумуляторном накопителе энергии рассмотрим самый неблагоприятный по соотношению выработка-потребление месяц март, в котором меньше всего часов солнечного сияния. Далее отнимем от выработки электроэнергии солнечными панелями в каждый час мартовского дня соответствующее почасовое потребление электроэнергии и в результате получим, что накопитель энергии теоретически отдавать в сеть 37,4 кВт электроэнергии.

Для системы на солнечных батареях как было отмечено в п.1.3 был подобран накопитель электроэнергии на LiFePO4 аккумуляторах. Из имеющегося множества готовых технических решений накопителей на LiFePO4 аккумуляторах подберем накопитель Tesvolt Li 60, основные параметры которого приведены в таблице 2.5 [21].

Таблица 2.5 - Основные параметры накопителя электроэнергии Tesvolt Li 60

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>	
<i>Количество энергии, кВт·ч</i>	60	
<i>Макс. энергия заряда пост.тока, кВт</i>	18	
<i>Макс. энергия разряда пер.тока, кВт</i>	36	
<i>Глубина разряда, %</i>	70%	90%
<i>Используемая емкость, кВт·ч</i>	42	54
<i>Число циклов</i>	8000	5000
<i>Время заряда при ном. мощности, ч</i>	2,4	3,1
<i>Время разряда при ном. мощности, ч</i>	2,4	3,1
<i>Саморазряд, % / месяц</i>	<3%	
<i>Макс. эффективность, %</i>	90	
<i>Электрическая емкость, А·ч</i>	1200	
<i>Макс. ток заряда / разряда в течении 3 с, А</i>	375 / 800	
<i>Номинальное постоянное напряжение, В</i>	51,2	
<i>Система</i>	1-фазная / 3-фазная	

Чтобы удостовериться в пригодности данного накопителя рассчитаем реальное количество электроэнергии отдаваемое накопителем при разрядке и количество электроэнергии необходимое для заряда накопителя. Для расчета учтем следующие факторы выраженные следующими коэффициентами:

$P=60000$ кВт·ч - максимальное количество электроэнергии, запасаемое в накопителе;

$\alpha=0,7$ - глубина разряда LiFePO₄ аккумулятора;

$R_{\text{пров}}=0,95$ (5%) – потери электроэнергии в проводах;

$\eta = 0,9$ - КПД инвертора.

Рассчитаем количество электроэнергии необходимое на заряд накопителя с учетом потерь:

$$E_{\text{зар}} = \frac{P}{R_{\text{пров}} \cdot \eta} = \frac{60000 \text{ Вт} \cdot \text{ч}}{0,95 \cdot 0,95} = 66481 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Рассчитаем реальное количество электроэнергии отдаваемое накопителем при разряде с учетом потерь и глубины разряда:

$$E_{\text{разр}} = P \cdot R_{\text{пров}} \cdot \alpha \cdot \eta = 60000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \cdot 0,95 \cdot 0,7 \cdot 0,95 = 37905 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Как видно из расчетов при зарядке накопителя электроэнергии теряется примерно 6,5 кВт электроэнергии, а реальное количество электроэнергии которое накопитель энергии Tesvolt Li 60 способен выдать в сеть при данных условиях эксплуатации составляет 37,9 кВт·ч, что является достаточным для использования данного накопителя в проектируемой системе электроснабжения.

Для данного накопителя электроэнергии согласно рекомендациям п.1.4 подобрали инверторы SMA Sunny Island 8.0H мощностью 6 кВт, соединенные мультикластерной системой. Подробные характеристики инвертора SMA Sunny Island 8.0H приведены в таблице 2.6 [22].

Таблица 2.6 - Основные параметры инвертора SMA Sunny Island 8.0H

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Напряжение сети / Напряжение сети переменного тока, В	230 / 202 ... 253
Частота / диапазон частот (настраиваемый), Гц	50 / 45 ... 65
Мощность преобразования, Вт	6000
Сила тока / максимальный ток (пик), А	26 / 120

Таблица 2.6 - Основные параметры инвертора SMA Sunny Island 8.0H
(продолжение)

Входящее переменное напряжение / диапазон входящего напряжения, В	230 / 172,5 ... 264,5
Входящая частота / допустимый диапазон частот, Гц	50 / 40 ... 70
Максимальный входящий переменный ток, А	50
Входящее постоянное напряжение / диапазон входящего напряжения, В	48 / 41 ... 63
Максимальный ток из аккумуляторов, А	110
Ток при разрядке / зарядке аккумуляторов, А	90 / 103
Максимальная эффективность, %	95
3-х фазные системы / параллельное соединение / мультикластерное соединение	есть / есть
Мультикластерное соединение	есть

2.3 Разработка системы контроля аккумуляторных батарей

Как было отмечено в п.1.5 система контроля аккумуляторных батарей представляет собой плату, на которой располагаются микросхемы мониторинга, микросхем балансировки, зарядного устройства аккумуляторных ячеек, а также внешние элементы обвязки.

В качестве микросхем балансировки будем использовать микросхему LTC 3300-1, а в качестве микросхемы мониторинга будем использовать микросхемы LTC 6804-1.

В дальнейшем подробно рассмотрим структурные элементы, а также

принцип работы микросхемы балансировки LTC3300-1, как основного звена всей принципиальной схемы системы контроля аккумуляторной батареи. Микросхема мониторинга LTC6803-1 лишь дополняет функции микросхемы балансировки и выполняет вспомогательные функции мониторинга батареи [23].

2.3.1 Микросхема балансировки ячеек LTC 3300-1

Микросхема балансировки ячеек LTC3300-1 является ключевым компонентом в системе контроля батареи высокой производительности для последовательно соединенных литий-феррофосфатных аккумуляторов. Она предназначена для работы в сочетании с микросхемой мониторинга, зарядным устройством, и микропроцессором или микроконтроллером (см. рисунок 2.1).

Функция балансировки должна эффективно передавать заряд в / из данной неуравновешенной ячейки в стеке из / в большой группе соседних ячеек (которая включает в себя, данную индивидуальную ячейку) для того, чтобы привести напряжение этой ячейки или ее емкость в равновесие с соседними ячейками. В идеальном случае, заряд всегда будет передаваться непосредственно от / до всего стека, но это непрактично по причинам напряжения когда количество ячеек, в общем стеке велико. LTC3300-1 предназначена для взаимодействия с группой до 6 ячеек линейки, так что число LTC3300-1 микросхем требуется чтобы сбалансировать стек линейки из N ячеек $N / 6$ округляется до ближайшего целого числа, без ограничения в количестве N ячеек. которое может быть. Также к отдельной микросхеме LTC3300-1 возможно подключение в стеке менее чем 6 ячеек.

Поскольку функция балансировки влечет за собой переключение больших миллиамперы токов между ячейками, точность напряжения мониторинга в СКБ лучше отслеживается отдельной микросхемой мониторинга такой например как LTC6803-1 или один другой из этого же семейства микросхем. LTC6803-1 обеспечивает высокую точность контроля ячеек в линейке до 12. Единственное

напряжение которое контролируется микросхемой LTC3300-1 является грубым, не охваченным диапазоном превышения или понижения напряжения балансируемой ячейки и не может привести к обнаружению изменения плотности электролита в ячейке, которое является причиной безопасного отключения ячейки, в этом случае используется микросхема мониторинга.

В процессе приведения ячеек в состояние равновесия, общий стек немного разряжается. Компонент зарядного устройства обеспечивает средство для прямой зарядки всего стека от альтернативного источника питания.

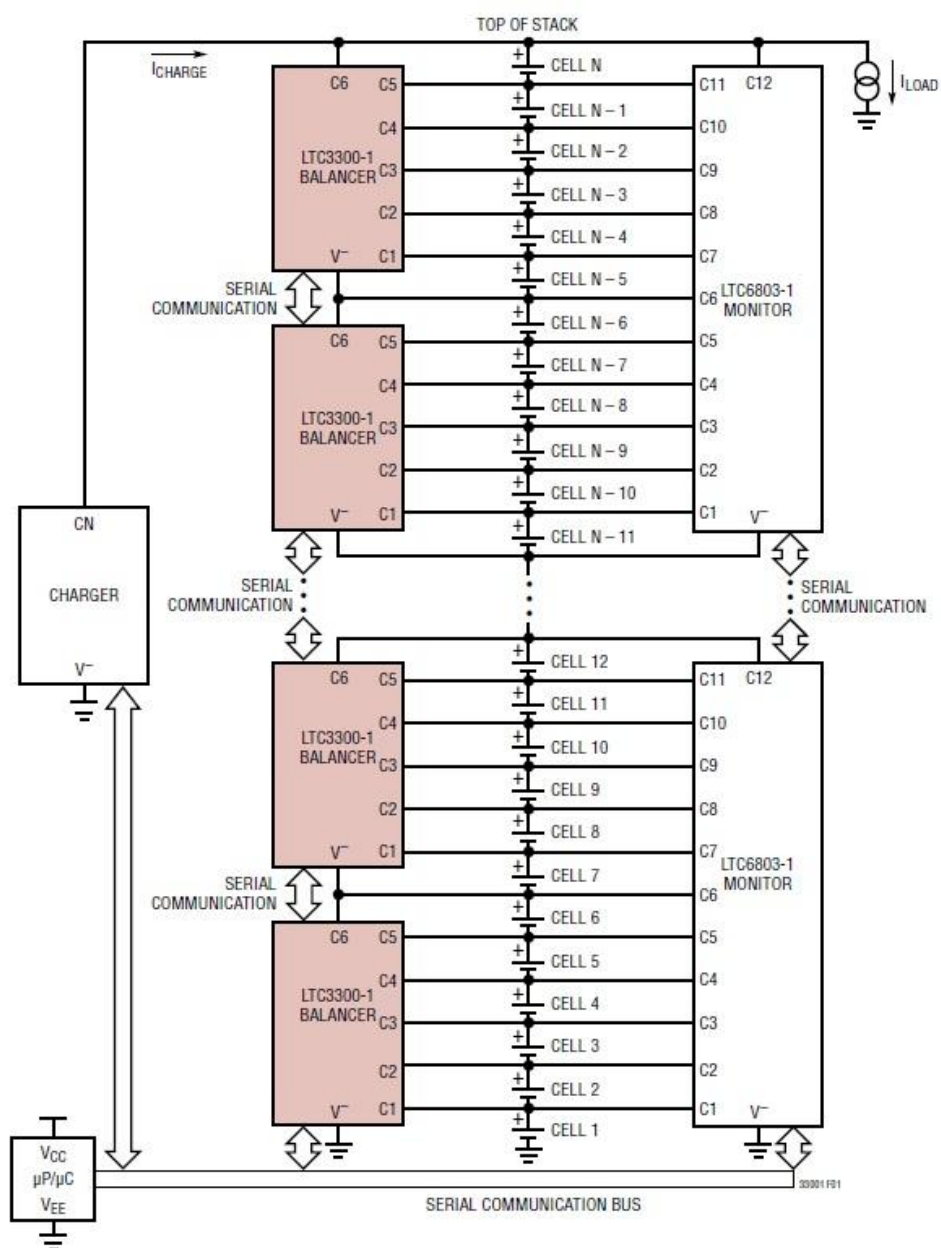


Рисунок 2.1 - Структурная схема СКБ

Последний компонент в СКБ является микропроцессор / микроконтроллер, который взаимодействует непосредственно с микросхемой балансировки, мониторинга, и зарядным устройством для получения напряжения, тока, и информации о температуре, чтобы реализовать алгоритм балансировки ячеек.

Не существует единого алгоритма балансировки оптимального для всех случаев. Например, во время чистой зарядки общего стека, может быть необходимо разрядить самое высокое напряжение ячейки в первую очередь, чтобы избежать достижения предела заряда на любой ячейке до того, как весь стек полностью заряжен. Аналогичным образом, во время прямой разрядки общего стека, может быть необходимо заряжать самые низкие напряжения ячеек в первую очередь и предотвращать их от достижения критически низкого уровня. Микросхема LTC3300-1 не реализует алгоритма для балансировки стека. Вместо этого, чтобы его обеспечить максимальную гибкость системы в целом, не навязывая никаких ограничений, алгоритм реализован в виде всех отдельных балансировочных ячеек, которые могут работать одновременно и двунаправленно.

2.3.1.1 Внешний вид LTC 3300-1 и назначение выводов

Микросхема балансировки LTC 3300-1 (см. рисунок 2.2) имеет 48 выводов и может выполняться в двух исполнениях QFN (Quad Flat Package) (пластиковом корпусе с четырехсторонним расположением выводов) и LQFP (Low profile Quad Flat Package) (низкопрофильном корпусе с четырехсторонним расположением выводов).

G6S, G5S, G4S, G3S, G2S, G1S (выводы 1, 3, 5, 7, 9, 11): G1S-G6S являются вентиляемыми выходы драйверов для управления внешними N-MOS транзисторами, соединенными последовательно с вторичными обмотками трансформаторов, чьи первичные обмотки соединены параллельно с ячейками батареи от 1 до 6. Минимальное количество деталей балансирования использует один трансформатор (CTRL = VREG), G2S через G6S нет соединений.

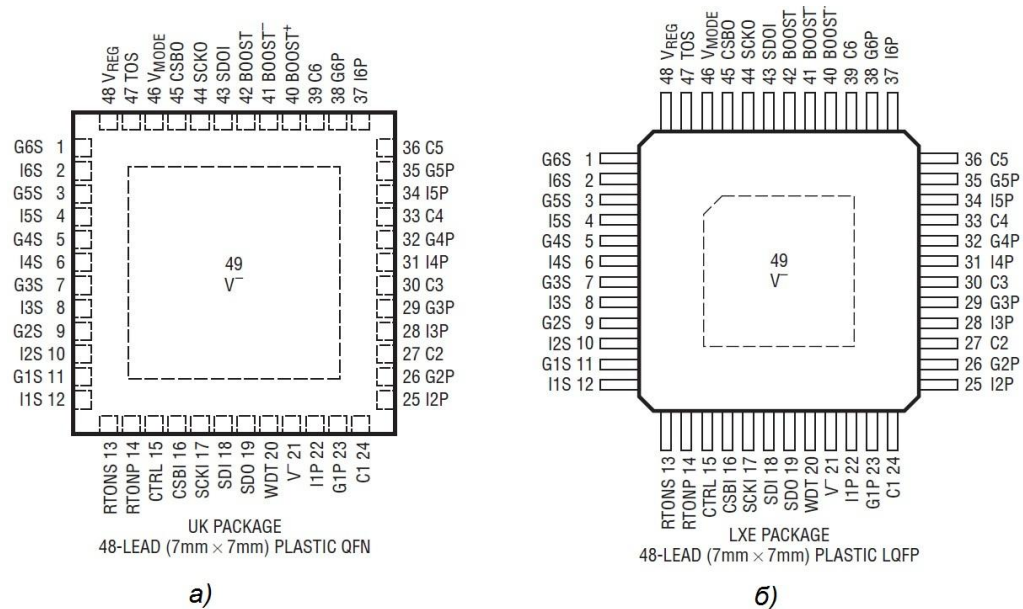


Рисунок 2.2 - Микросхема LTC 3300-1 (вид сверху): а) в корпусе QFN; б) в корпусе LQFN

I6S, I5S, I4S, I3S, I2S, I1S (выводы 2, 4, 6, 8, 10, 12): I1S- I6S являются входами датчика тока, их назначение - измерение вторичного тока обмоток трансформаторов, чьи первичные обмотки соединены параллельно с аккумуляторными ячейками с 1 по 6. Для получения минимального количества деталей балансировки, использующих один трансформатор (CTRL = VREG), I2S через I6S должны быть подсоединены к V-.

RTONS (вывод 13): Resistor Max Ton Secondary (резистор устанавливающий максимальное время включенного состояния ключа вторичной обмотки). Этот RTONS является следящей системой и подключается к 1.2 В. Резистор подключается к V- и программирует максимальное время включения для всех внешних N-МОП транзисторов, соединенных последовательно с вторичными обмотками. Это защищает от тока короткого замыкания резистор в любой вторичной обмотке. Чтобы использовать эту функцию, необходимо подключить RTONS к VREG, тем самым вторичная обмотка защищена от перенапряжений, а также скорректирована по значению RTONS резистора.

RTONP (вывод 14): Resistor Max Ton Primary (резистор устанавливающий максимальное время включенного состояния ключа первичной обмотки). Резистор подключается к V- и программирует максимальное время включения для всех внешних N-МОП транзисторов, соединенных последовательно с вторичными обмотками. Это защищает от тока короткого замыкания резистор в любой первичной обмотке. Чтобы использовать эту функцию, необходимо подключить RTONS к VREG.

CTRL: (вывод 15): Control Input (управления вводом). Вывод CTRL конфигурирует LTC3300-1 для минимального количества соединений с использованием одного трансформатора, если CTRL подключен к VREG или к многообмоточному трансформатору, если CTRL подключен к V-.

CSBI (вывод 16): Chip Select (Active Low) Input (выбор чипа с низким активным уровнем входа). Это CSBI контактный интерфейс с полным размахом выходного логического уровня, если VMODE подключен к VREG. CSBI должен привести в действие CSBO вывод другой LTC3300-1, если VMODE подключен к V-.

SCKI (вывод 17): Serial Clock Input (последовательный тактовый вход). Это SCKI контактный интерфейс с полным размахом выходного логического уровня, если VMODE подключен к VREG. SCKI должен привести в действие SCKO вывод другой LTC3300-1 если VMODE подключен к V-.

SDI (вывод 18): Serial Data Input (вход последовательной передачи данных). При записи данных в LTC3300-1, интерфейсный вывод SDI подключается к выходу логического элемента, если VMODE подключен к VREG или должны управляться SDOI выводом другой LTC3300-1 если VMODE подключен к V-.

SDO (вывод 19): Serial Data Output (выход последовательной передачи данных). При чтении данных от LTC3300-1, SDO вывод является N-МОП транзистором с открытым выходом стока, если VMODE подключен к VREG. SDO вывод не используется если VMODE подключен к V-.

WDT (вывод 20): Watchdog Timer Output (Active High) (сторожевой тай-

мергда не выполняются команды балансировки, вывод WDT имеет высокое сопротивление (внутренне подсоединен к $\sim 5.6 \text{ В}$), если внешний нагрузочный резистор присутствует. В то время как идет балансировка (или при неудачных попытках балансировки, из-за напряжения / температуры неисправности) и при нормальной работе, WDT вывод смещен прецизионным источником тока скорректированным RTONS резистором. Тем не менее, если какой-нибудь байт команды не может обработаться в течение 1,5 секунд (типичное значение), то вывод WDT будет переключен в высокий уровень. Когда уровень WDT высокий, все балансиры выключены. Функция сторожевого таймера может быть отключена путем подключения WDT к V-. Функция защиты вторичной обмотки от перенапряжений может также быть реализована с помощью этого вывода.

V- (вывод 21): подключается V- к наиболее отрицательным потенциалом в ряду ячеек.

I1P, I2P, I3P, I4P, I5P, I6P (контакты 22, 25, 28, 31, 34, 37): I1P-I6P являются входами датчика тока для измерения токов в первичных обмотках трансформаторов, соединенных параллельно с ячейками батареи от 1 до 6.

G1P, G2P, G3P, G4P, G5P, G6P (выводы 23, 26, 29, 32, 35, 38): G1P -G6P являются вентиляльными выходами драйверов для управления внешними N-МОП (металл окисел полупроводник) транзисторами, соединенными последовательно с первичными обмотками трансформаторов, соединенных параллельно с ячейками батареи от 1 до 6.

C1, C2, C3, C4, C5, C6 (выводы 24, 27, 30, 33, 36, 39): C1-C6 присоединяются к положительным зажимам ячеек батареи от 1 до 6. Отрицательную клемма ячейки батареи подключается к выводу V-.

BOOST + (вывод 40): подключается к аноду внешнего навесного конденсатора, используется для создания достаточного импульса на драйвер затвора необходимого для выравнивания верхней ячейки батареи в данном суб-стеке. Диод Шоттки для BOOST+ также требуется.

BOOST- (вывод 41): подключается к катоду внешнего навесного конден-

сатора, используется для создания достаточного импульса на драйвер затвора необходимого для выравнивания верхней ячейки батареи в данном суб-стеке. С другой стороны, если BOOST + подключается к следующему более высокому ячейке в указанном выше суб-стеке, если необходимо вывод не подсоединяется.

BOOST (вывод 42): подключает BOOST к VREG для того, чтобы форсировать затвор, необходимо для балансировки верхней ячейки в заданном суб-стеке. Если BOOST + вывод может быть подключен к следующей ячейке вверх в стеке (т.е. C1 следующей LTC3300-1 в стеке), то BOOST должен не быть подключен к V- и BOOST- не связаны между собой. Этот вывод должен быть привязан к любому выводу VREG или V-.

SDIO (вывод 43): Serial Data Output/Input (вывод / ввод последовательных данных). SDIO передает данные и из следующей интегральной схемы выше в последовательной цепочке, во время записи и чтения.

SCKO (вывод 44): Serial Clock Output (последовательный тактовый выход), является буферным и еще одним вариантом последовательный тактовый входа. Приводит в действие следующую интегральную схему выше в цепи.

CSBO (вывод 45): Chip Select (Active Low) (выбор чипа с низким активным уровнем выхода) CSBO. Представляет собой буферизированный вариант выбора микросхемы ввода, CSBI. CSBO приводит в действие следующую интегральную схему выше в цепочке.

VMODE (вывод 46): Voltage Mode Input (режим напряжения входного сигнала). Когда VMODE подключен чтобы VREG и выводы CSBI, SCKI, SDI и SDO были настроены в качестве входов и выходов напряжения. Это означает, что эти контакты принимают VREG-упомянутые полный размах напряжения логических уровней. подключают VMODE к VREG, когда LTC3300-1 нижнее устройство в последовательной цепи. Когда VMODE подключен к V-, в CSBI, SCKI и SDI выводы настроены в качестве текущих входов и выходов, и SDO не используется. Подключение VMODE к V-, когда LTC3300-1 подключается к

другой LTC3300-1 ниже в последовательной цепи этот вывод должен быть связан к любому выводу VREG или V-.

TOS (вывод 47): Top of Stack Input (верхняя часть входа стека). Подключается TOS к VREG когда LTC3300-1 является главным устройством в последовательной цепи. Подключается TOS к V-, когда LTC3300-1 любое другое устройство в общей цепи. Когда TOS подключен к VREG, то LTC3300-1 игнорирует вход SDOI. Когда TOS подключен к V-, в LTC3300-1 данные ожидают передачи из вывода SDOI. Этот вывод должен быть подключен к любому VREG или V-.

VREG (Pin 48): Voltage Regulator (вывод линейного регулятора напряжения). Этот 4.8 В вывод должен быть зашунтирован с 1 мкФ или большим конденсатор к V-. Вывод VREG способен передавать до 40 мА для внутренних и внешних нагрузок.

V- (незащищенная контактная площадка вывод 49): незащищенная контактная площадка должна быть подключена к непрерывной (земля) плоскости и смещена в V- на второй слой печатной платы с помощью нескольких контактных отверстий непосредственно под LTC3300-1.

2.3.1.2 Особенности микросхемы LTC3300-1

Микросхема LTC3300-1 способна работать при максимальном напряжении 40 В между выводами BOOST + и V-. При разводке печатной платы следует соблюдать осторожность для поддержания физического разделения трасс с различными потенциалами. Цоколёвка микросхемы LTC3300-1 помогает решить эту проблему. При работе микросхемы не наблюдается напряжения больше чем 8.4 В между любыми двумя соседними выводами, за исключением двух случаев (между выводами VMODE и CSBO, BOOST и SDOI / BOOST-). В этих случаях, один из выводов (VMODE или BOOST) структурно связан с выводом V- или VREG и нет необходимости проводить трассы вдали от микросхемы LTC3300-1.

Основание корпуса микросхемы используется для отделения самого высокого напряжения (например, 25.2 В) от самого низкого напряжения (0 В). В качестве примера, на рисунке 2.3 показаны уровни напряжений постоянного тока на каждом выводе по отношению к выводу V-, когда шесть ячеек напряжением 4,2 В подсоединены к микросхеме LTC3300-1.

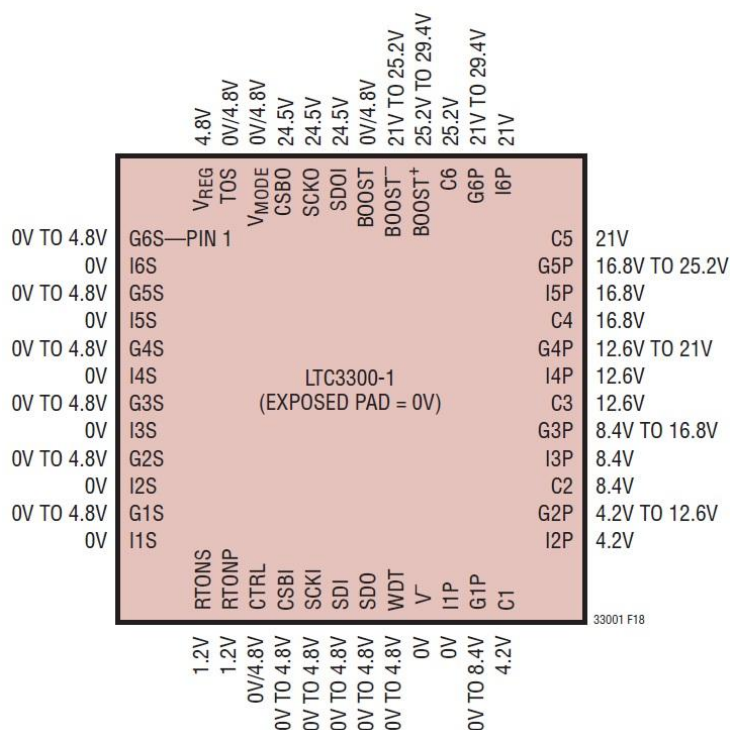


Рисунок 2.3 - Уровни напряжений постоянного тока на каждом выводе микросхемы LTC3300-1 (при подключении шести ячеек с напряжением 4,2 В)

При разработке печатной платы с микросхемой LTC3300-1 следует обратить внимание на следующие рекомендации:

1. Вывод VREG не должен быть подключаться на незащищенную открытую контактную площадку и вывод V-, каждый из этих выводов имеет конденсатор 1 мкФ или более мощный как можно ближе к микросхеме LTC3300-1, насколько это возможно.

2. Дифференциальные ячейчные входы (C6-C5, C5-C4, ..., C1 подключены к незащищенной контактной площадке) должна иметь конденсатор с емкостью 1 мкФ или больше мощный конденсатор как можно ближе к микросхеме LTC3300-1, насколько это возможно. Этот конденсатор устанавливается в до-

полнение к объемной емкости, присутствующей на этапе балансировки.

3. Вывод 21 (V-) является заземлением для датчиков тока подключаемых к выводам I1S-I6S и I1P (семь резисторов). Вывод 21 низкий импеданс, отслеживаемый на заземляющей стороне этих резисторов, перед подключением к контактной площадке микросхемы LTC3300-1.

4. Входы ячеек C1-C5 соединены с заземлением и являются заземлением для датчиков тока, подключенных к выводам I2P-I6P (пять резисторов). Эти выводы должны иметь низкий импеданс, отслеживаемый на заземляющей стороне этих резисторов.

5. Заземляющая сторона резисторов устанавливающих переключения состояния, подключаемых к выводам RTONS и RTONP должна подключаться к выводу 21 (V-) перед подключением к контактной площадке микросхемы LTC3300-1.

6. Длина трасс от выводов драйвера затвора микросхемы LTC3300-1 (выводы G1S-G6S и G1P-G6P) и выводов, подключаемых к датчикам тока (выводы I1S-I6S и I1P-I6P) должна быть как можно короче.

7. Внешние компоненты генератора импульсов на затвор транзисторов (диод Шоттки и конденсатор), если они используются, должны образовывать по возможности узкий контур вблизи микросхемы LTC3300-1, вывода C6, BOOST+ и BOOST-.

8. Для внешних силовых компонентов (трансформаторов, полевых транзисторов и датчиков тока, конденсаторов) важно образовать контур, охватывающий два контура цепей коммутации (первичной и вторичной обмотки трансформатора) который будет как можно более узким.

2.3.1.3 Балансировка ячеек

Сравнение однонаправленной и двунаправленной балансировки. Большинство микросхем балансировки используемых в настоящее время используют

однонаправленную (только разряд) балансировку. Самая простая из них работает на переключении резистора через ячейку с самым высоким напряжением в линейке (пассивная балансировка). Заряд при такой балансировке рассеивается в виде тепла в резистивном элементе. Этот механизм балансировки может быть улучшен за счет использования элементов накопления энергии (индуктивности или емкости), для передачи заряда из ячейки с самым высоким напряжением в линейке на другие нижние ячейки в линейке (активная балансировка). Этот механизм балансировки ячеек может быть очень эффективным (с точки зрения восстановления заряда) для случая, когда только несколько ячеек в общей линейке имеют повышенное напряжение, но будет очень неэффективным (отнимать много времени) для случая, когда только несколько ячеек в общей линейке с пониженным напряжением. Двухнаправленный метод балансировки к выравниванию ячеек, например такой, который используется в микросхеме LTC3300-1, необходим для достижения минимального времени балансировки и максимального восстановления заряда всей линейки ячеек аккумуляторной батареи.

Синхронная обратная балансировка. Балансировочная архитектура, реализуемая в микросхеме LTC3300-1 является двухнаправленной синхронной обратной. Каждая LTC3300-1 содержит шесть независимых синхронных контроллеров обратного хода, которые способны осуществлять непосредственно зарядку или разрядку отдельной ячейки. Балансировка тока осуществляется внешними компонентами. Каждая микросхема балансировки работает независимо от остальных и предоставляет средства для двухнаправленного заряда передачи между отдельными ячейками и более большой группой соседних ячеек (см. рисунок 2.4).

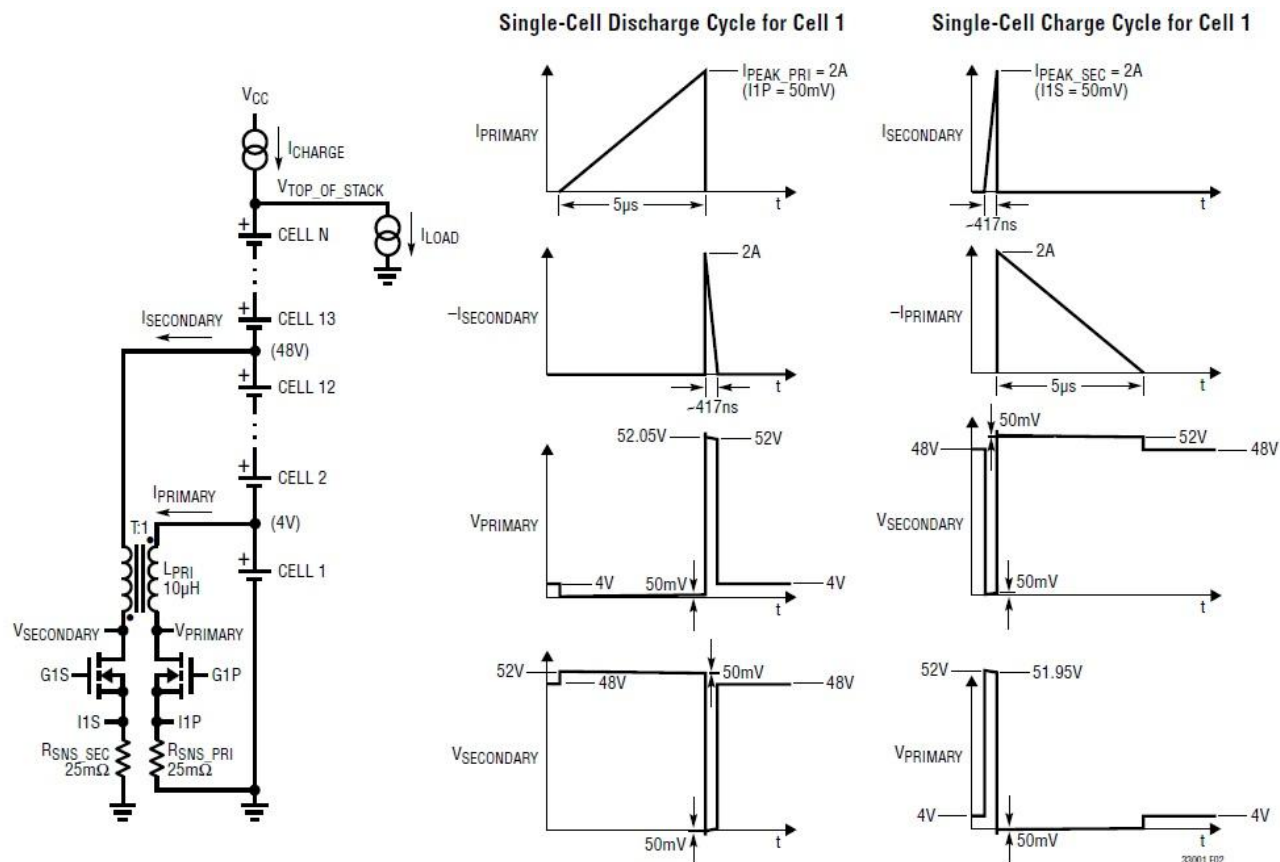


Рисунок 2.4 - Механизм синхронной обратногоходовой балансировки

Разрядка ячейки (синхронная). При разрядке данной подключенной ячейки, ключ первичной обмотки трансформатора включен в течение линейного пилообразного изменения тока в первичной обмотке трансформатора до запрограммированной амплитуды тока (I_{PEAK_PRI}) обнаруживаемой на выводе InP. Затем ключ первичной обмотки трансформатора выключается, и запасенная в трансформаторе энергия сбрасывается во вторичную обмотку трансформатора, подключенного к данной ячейке, вызывая протекание тока во вторичной обмотке трансформатора. Синхронный ключ вторичной обмотки включается чтобы минимизировать потери мощности во время передачи энергии за период до последующего спада тока до нуля (отслеживаемого на выводе InS). После того, как ток вторичной обмотки достигает нуля, ключ вторичной обмотки выключается, а ключ первичной обмотки включается снова, тем самым повторяя цикл. Таким образом, заряд переносится из разряжающейся ячейки ко всем ячейкам, соединенным между верхней и нижней частью вторичной обмотки, тем самым заря-

жая соседние ячейки. Пример см. рисунок 2.4 вторичная обмотка соединяется на двенадцать ячеек, включая ячейку которая разряжается.

Значение I_{PEAK_PRI} программируется согласно следующему выражению:

$$I_{PEAK_PRI} = \frac{50mB}{R_{SNS_PRI}},$$

где I_{PEAK_PRI} - амплитуда тока первичной обмотки трансформатора;
 R_{SNS_PRI} - значения сопротивления датчика тока первичной обмотки .

Ток разряда разрядной ячейки (первичной обмотки трансформатора) и вторичной обмотки ток восстановления заряда определяется в первом порядке по следующим уравнениям:

$$I_{DISCHARGE} = \frac{I_{PEAK_PRI}}{2} \left(\frac{S}{S+T} \right);$$
$$I_{SECONDARY} = \frac{I_{PEAK_PRI}}{2} \left(\frac{1}{S+T} \right) \eta_{DISCHARGE},$$

где S - количество ячеек подключенных ко вторичной обмотке трансформатора;

1:T - коэффициент трансформации трансформатора;

$\eta_{DISCHARGE}$ - эффективность передачи заряда из разряжаемой ячейки к линейке ячеек подключенной ко вторичной обмотке трансформатора.

Заряд ячейки. Когда включена данной ячейки, ключ вторичной обмотки трансформатора для включенной ячейки включен и ток протекает от ячеек подключенных ко вторичной обмотки трансформатора через трансформатор. После того, как во вторичной обмотке достигается ток I_{PEAK_SEC} (обнаруживается на выводе InS), ключ вторичной обмотки выключается и затем ток течет в первичной обмотке, таким образом, осуществляется зарядка выбранной ячейки из всей линейки ячеек подключенных ко вторичной обмотке. Синхронный ключ первичной обмотки включен, чтобы минимизировать потери мощности во время фазы зарядки ячейки. После того, как ток первичной обмотки спадает до нуля, ключ первичной обмотки выключается, а ключ во вторичной обмотке включается, таким образом, повторяя цикл.

Значение I_{PEAK_PRI} программируется согласно следующему выражению:

$$I_{PEAK_SEC} = \frac{50mB}{R_{SNS_SEC}},$$

где I_{PEAK_SEC} - амплитуда тока вторичной обмотки трансформатора;

R_{SNS_SEC} - значения сопротивления датчика тока вторичной обмотки .

Ток разряда разрядной ячейки (первичной обмотки трансформатора) и вторичной обмотки ток восстановления заряда определяется в первом порядке по следующим уравнениям:

$$I_{CHARGE} = \frac{I_{PEAK_SEC}}{2} \left(\frac{ST}{S+T} \right) \eta_{DISCHARGE};$$

$$I_{SECONDARY} = \frac{I_{PEAK_SEC}}{2} \left(\frac{T}{S+T} \right),$$

где S - количество ячеек подключенных ко вторичной обмотке трансформатора;

$1:T$ - коэффициент трансформации трансформатора;

η_{CHARGE} - эффективность передачи заряда из линейки ячеек подключенной ко вторичной обмотке трансформатора к ячейке первичной обмотки трансформатора.

Каждый заряд, переносимый микросхемой балансировки «частота» зависит от нескольких факторов, в том числе I_{PEAK_PRI} , I_{PEAK_SEC} , индуктивностей обмоток трансформатора, коэффициента трансформации, напряжения ячейки и числа ячеек подключенных ко вторичной обмотке трансформатора.

Частота переключения, наблюдаемая на выходах драйвера затвора транзистора при разряде и заряде находится согласно уравнениям:

$$f_{DISCHARGE} = \frac{S}{S+T} \cdot \frac{V_{CELL}}{L_{PRI} \cdot I_{PEAK_PRI}}$$

$$f_{CHARGE} = \frac{S}{S+T} \cdot \frac{V_{CELL}}{L_{PRI} \cdot I_{PEAK_SEC} \cdot T}$$

где I_{PEAK_PRI} - напряжение аккумуляторной ячейки;

L_{PRI} - индуктивность вторичной обмотки трансформатора.

Полная схема балансировки шести ячеек микросхемой LTC 3300-1 показана на рисунке 2.5.

Балансировка высоковольтной линейки батареи. Балансировка последовательно соединенных ячеек батареи, которые содержат более двенадцати последовательно соединенных элементов требует переключения вторичной обмотки трансформатора, соединения с целью достижения подключения полной линейки ячеек балансировки, ограничивая при этом напряжение пробоя полевого транзистора. На рисунке 2.6 показана структурная схема типичного перемежающегося соединения трансформаторов для многоячеечной батареи, а на рисунке 2.7 схема подключения к микросхеме LTC 3300-1 батареи состоящей из восемнадцати ячеек.

На рисунках 2.6 и 2.7 вторичная обмотка каждого трансформатора соединена с верхней ячейкой, которая на двенадцать позиций выше в линейке, чем в нижняя низковольтная ячейка в каждой шестиячеечной линейке отдельной микросхемы LTC3300-1. Для самой высшей микросхемы балансировки LTC3300-1 во всей батарее невозможно подключить вторичную сторону трансформатора через двенадцать ячеек. Вместо этого она подключена к вершине линейки ячеек, или эффективно только через шесть ячеек. Чередование подключения таким образом позволяет передавать заряд между шестью ячейками в линейке одной микросхемы балансировки на протяжении всей батареи.

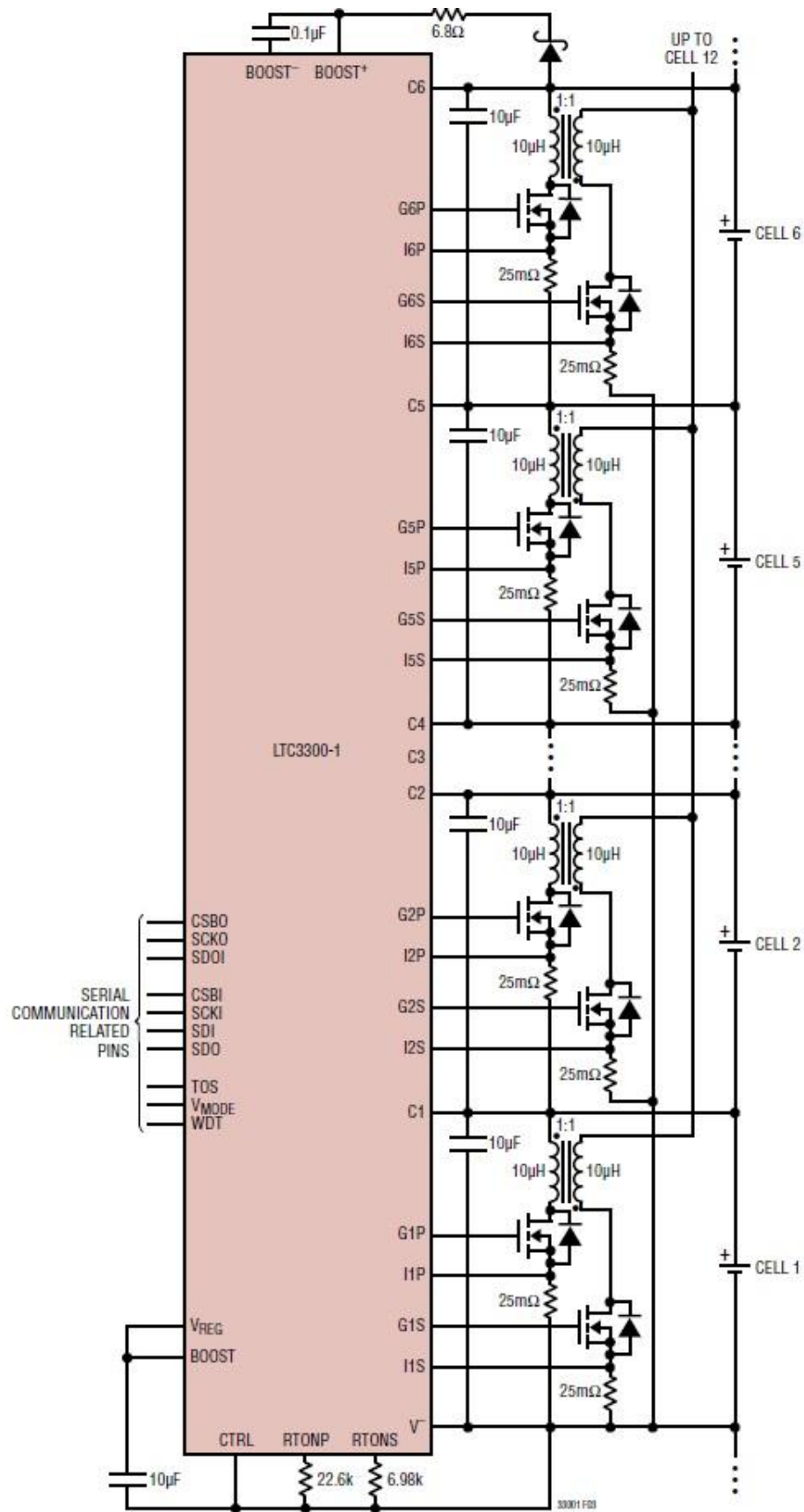


Рисунок 2.5 - Принципиальная схема балансировки шести ячеек батареи микро-схемой LTC-3300-1 с использованием нескольких трансформаторов

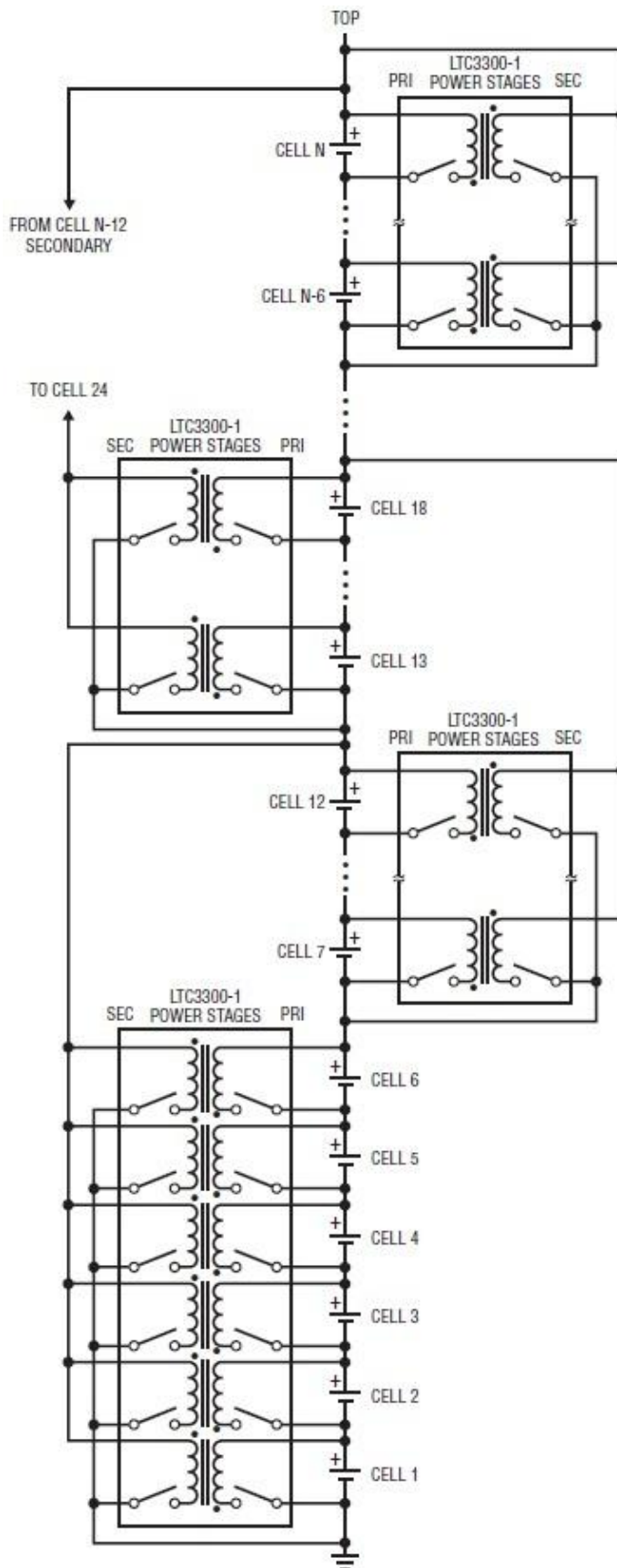


Рисунок 2.6 - Соединение обмоток трансформаторов для высоковольтной линейки батареи

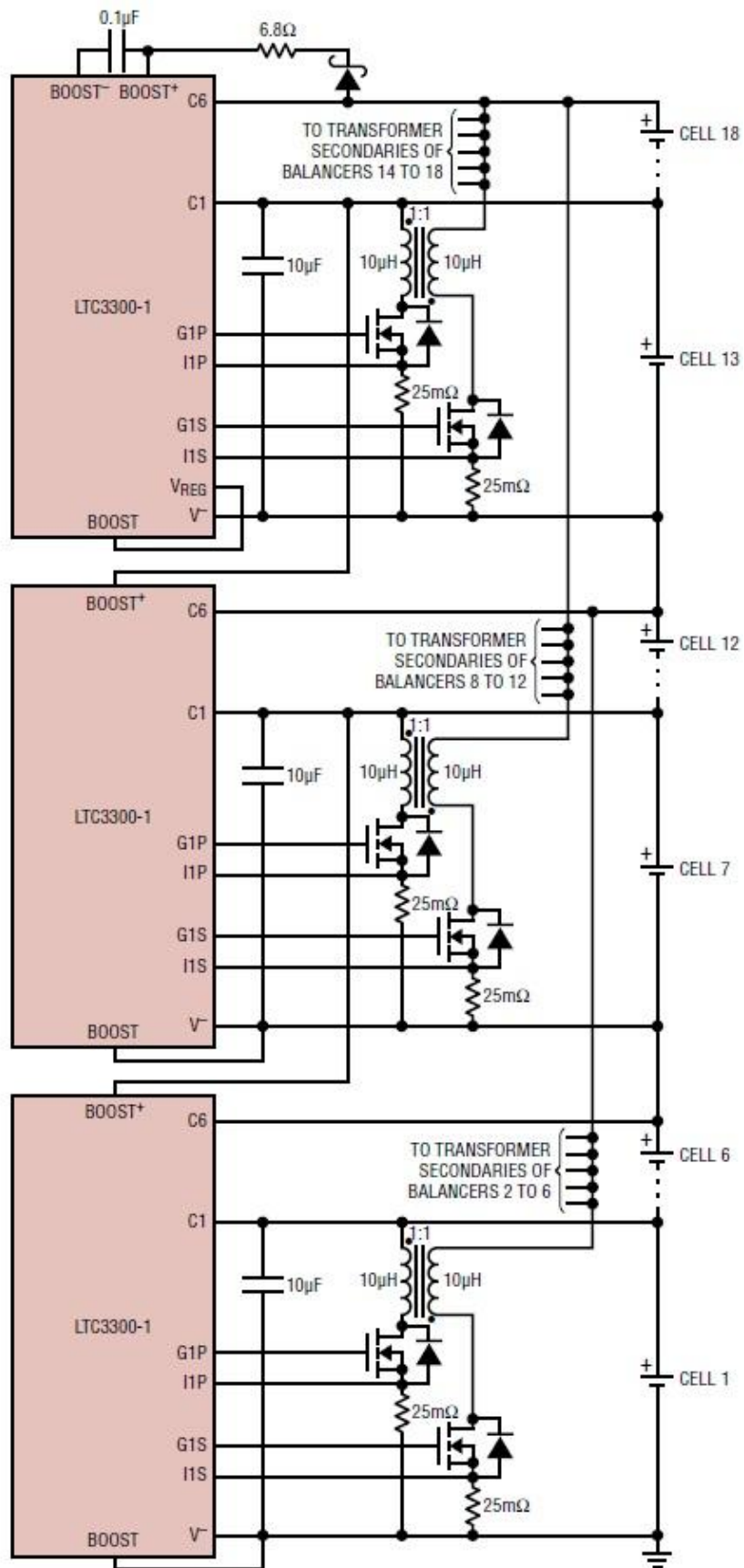


Рисунок 2.7 - Принципиальная схема балансировки батареи из восемнадцати ячеек

2.3.1.4 Основные компоненты микросхемы балансировки ячеек LTC-3300-1

Внутренняя структура микросхемы балансировки LTC-3300-1 приведена на рисунке 2.7.

Выводы защиты резисторов первичной обмотки трансформатора (Max On-Time Volt Sec Clamps). LTC3300-1 содержит в своей структуре программируемую защиту от замыканий выводов RTONS и RTONP (см. рисунок 2.8), которые ограничивают время нарастания тока либо в первичных, либо во вторичных обмотках трансформатора в случае короткого замыкания измерительного резистора (датчика тока). Максимальное время нарастания тока короткого замыкания для всех соединенных первичных обмоток трансформаторов (при активной разрядке ячейки) и для всех соединенных вторичных обмоток (при активной зарядке ячейки) индивидуально программируется путем подключения резисторов от выводов RTONP и вывода RTONS к выводу V- согласно к следующим уравнениям:

$$t_{ON(MAX)PRIMARY} = 7.2 \text{ мкс} \frac{R_{TONP}}{20 \text{ кОм}} ;$$

$$t_{ON(MAX)SECONDARY} = 1.2 \text{ мкс} \frac{R_{TONPS}}{15 \text{ кОм}} ,$$

где R_{TONP} - значение сопротивления резистора подключаемого к первичной обмотке трансформатора;

где R_{TONS} - значение сопротивления резистора подключаемого к вторичной обмотке трансформатора.

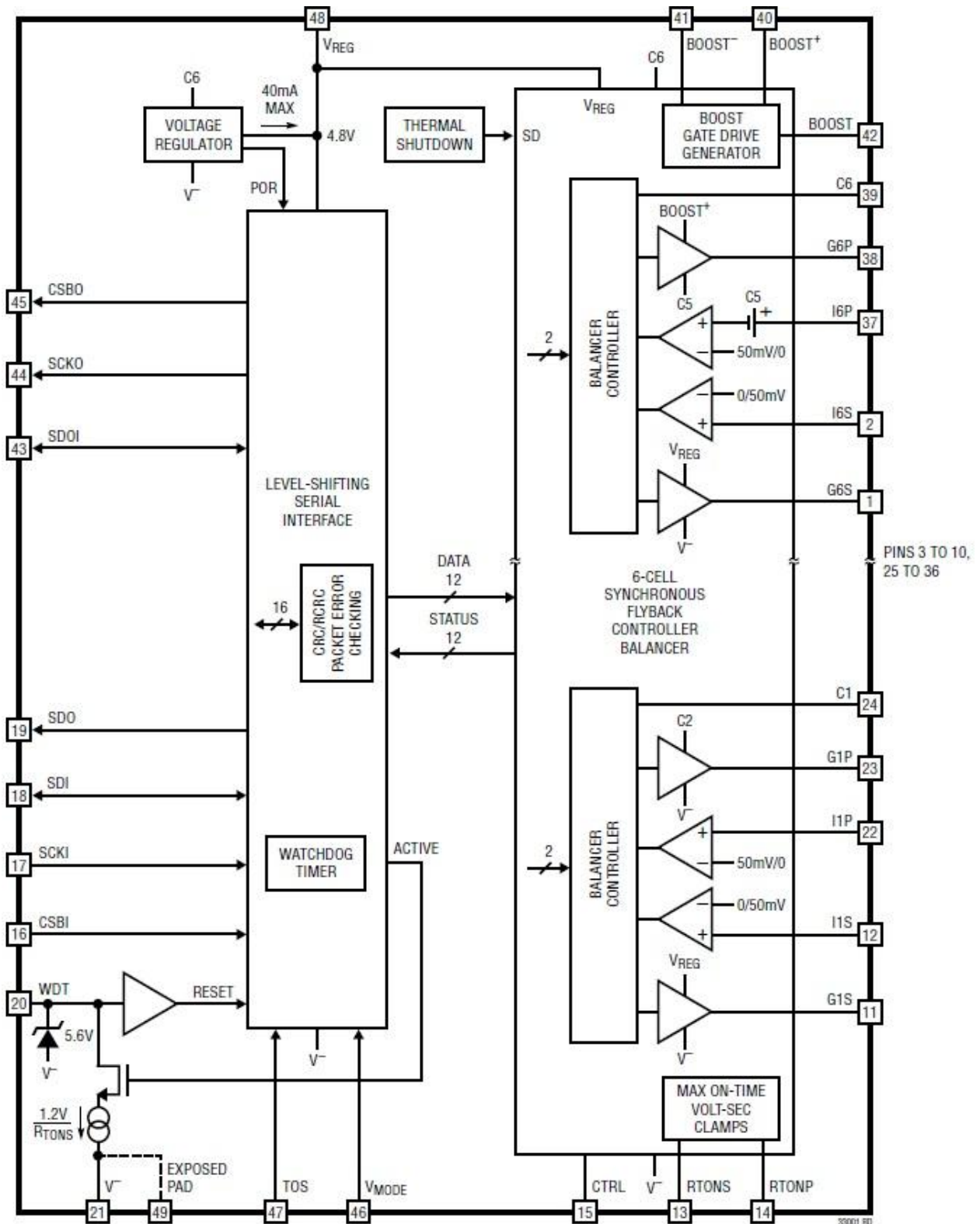


Рисунок 2.8 - Внутренняя структура микросхемы балансировки LTC-3300-1

Драйвер управления затворами / компараторы драйвера. Все выводы драйвера управления затворами вторичной обмотки трансформатора (выводы G1S-G6S) питаются от выхода VREG, устанавливаются до уровня 4,8 В при

включении и снижаются до уровня выхода V- при выключении. Все выводы драйвера первичной обмотки трансформатора (выводы G1P-G6P) питаются от соответствующее напряжения ячейки к которой они подключены и общим напряжением всей линейки ячеек. Каждая ячейка микросхемы балансировки будет подключаться к драйверу, если ее напряжение больше 2 В и напряжение ячейки следующей более высокой ячейки в линейке также больше, чем 2 В. Например вывод G6P драйвера затвора подключается к следующий выше ячейке в линейке (вывод С1 микросхемы LTC3300-1) (если она присутствует), и используется только в случае, если генератор импульсов на затвор отключен (при подключении вывода BOOST к выводу V-). Если генератор импульсов на затвор включен (путем подключения вывода BOOST к выводу VREG), только напряжение вывода ячейки подключенной к выводу С6 следит за тем, чтобы включить балансировку всей линейки ячеек. Для самого верхнего вывода драйвера затвора микросхемы LTC3300-1 генератор импульсов на затвор должен быть включен. Генератор импульсов на затвор требует подключения внешнего защитного диода подключаемого от вывода С6 к выводу BOOST + и внешнего фильтрующего конденсатора подключаемого от вывода BOOST + к выводу BOOST -.

Компараторы драйвера затвора имеют гистерезис постоянного тока шириной 70 мВ. Для повышения помехоустойчивости, внутренние входы отфильтрованы фильтром нижних частот и выходные сигналы фильтруются таким образом, чтобы происходило переключений, если состояние внутреннего компаратора является неизменным в течение 3-6 мкс (типичное значение). Если управление затвором осуществляется с перебоями, обнаруживается во время активного продолжающегося процесса балансировки (например, если линейка ячеек под большой нагрузкой), сбоящая цепь балансировки (может быть и несколько цепей) выключится. Команда балансировки сохраняется в памяти микроконтроллера, активная балансировка возобновится, где она была прервана, если драйвер затвора будет впоследствии восстановлен. Это может произойти, например при зарядке линейки ячеек.

Защитные компараторы от перенапряжений ячеек. В дополнение к достаточному количеству компараторов драйвера затвора требуется дополнительные компараторы, которые отключают все цепи балансировки, если любой из шести напряжений отдельных ячеек больше, чем 5 В. Эти компараторы имеют гистерезис постоянного тока шириной от 500 мВ. Для повышения помехоустойчивости, внутренние входы отфильтрованы фильтром нижних частот и выходные сигналы фильтруются таким образом, чтобы происходило переключений, если состояние внутреннего компаратора является неизменным в течение 3-6 мкс (типичное значение). Если во время активного продолжающегося процесса балансировки любое напряжение ячейки близится к перенапряжению, все функционирующие цепи балансировки отключатся. Команда балансировки сохраняется в памяти микроконтроллера, активная балансировка возобновится, где она была прервана, если напряжение на ячейке будет впоследствии снижено до допустимого диапазона изменения. Эти компараторы будут защищать микросхему LTC3300-1 если подключение к батарее теряется при процессе балансировки и напряжение ячейки продолжает увеличиваться в результате этой балансировки.

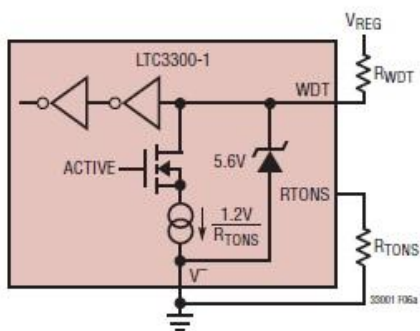
Регулятор напряжения. Линейный стабилизатор напряжения с питанием от вывода С6 создает уровень напряжения 4.8 В на выводе VREG, который используется для питания определенной внутренней схемы микросхемы LTC3300-1 включая все шесть драйверов управления затворами вторичных обмоток трансформаторов. Вывод VREG также может быть использован для питания внешних нагрузок, при условии, что общая нагрузка постоянного тока регулятора не превышает ток 40 мА, при которой точка ограничения тока накладывалась на ограничение рассеиваемой мощности на всем чипе. Внутренняя составляющая постоянного тока нагрузки преобладает в среднем токе драйверов управления затворами (выводы G1S-G6S), каждый из которых пропорционален $C \cdot V \cdot F$, где C это ёмкость затвора внешнего n-MOП транзистора, $V = VREG = 4.8$ В, и F - частота на которой работает драйвер управления затвором. Производители полевых транзисторов обычно указывают значение $C \cdot V$ в качестве Q_g (заряд затво-

ра) измеряющегося в кулонах при заданном напряжении вывода драйвера управления затвором. Частота F зависит от многих факторов, в первую очередь от напряжения каждой отдельной ячейки, количества ячеек в линейке, запрограммированного пикового тока балансировки, и индуктивностей первичной и вторичной обмотки трансформатора. В данном случае ток нагрузки вывода VREG как ожидается, будет низким единицы миллиампер на один вывод драйвера. Для случаев, когда токи балансировки очень большие и используются внешние N-MOS (металл-окисел-полупроводник) транзисторы с очень большой емкостью затвора, вывод VREG возможно потребует средний ток источника питания более чем 40 мА. Еще одна функция корректирующая вывод VREG это индикатор сброса при включении питания. При первоначальном включении питания и впоследствии, если напряжение на выводе VREG когда-либо упадет ниже 4 В (например из-за перегрузки), последовательный порт сбрасывается в состояние по умолчанию, отключая все цепи балансировки. Таким образом эта особенность гарантирует, что минимальное напряжение на затворах полевых транзисторов вторичных обмоток также 4 В. Заряжая при первоначальном включении питания фильтрующий конденсатор емкостью 10 мкФ, вывод VREG достигает регулирования в приблизительно за 1 мс.

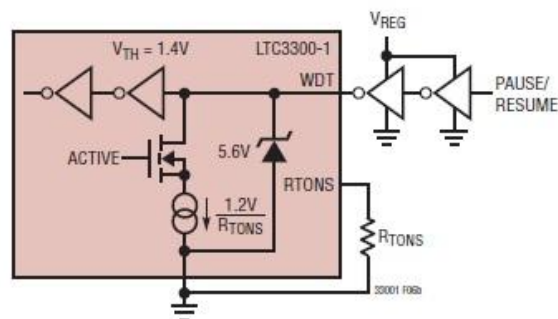
Защита от перегрева. Микросхема LTC3300-1 имеет схему защиты от перегрева, которая отключает все активные цепи балансировки, если температура внутренней структуры кремния повышается приблизительно до 155 °С. Когда происходит термическое отключение, все связи в цепи балансировки остаются активным, а статус цепи балансируемой ячейки (который содержит информацию о температуре) считывается обратно. Команда баланса которая все еще выполняется сохраняется в памяти. Эта функция имеет 10 °С гистерезис, так что когда достигается пороговая температура, цепи балансировки отключаются и когда температура спадает приблизительно до 145 °С, активная балансировка будет возобновлена с ранее выполняемой команды.

Сторожевой таймер цепи (WDT Watchdog timer circuit). Схема стороже-

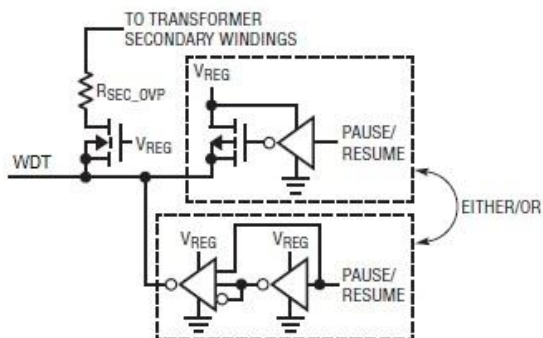
вого таймера обеспечивает средство отключения всех активных цепей балансировки в том случае, если подключение к микросхеме LTC3300-1 теряется. Сторожевой таймер включается, когда начинается команда балансировки и сбрасывается в ноль каждый раз, когда записывается действительный 8-битный байт команды (см. п. работа последовательного порта). Действующий байт команды может быть выполнен, записан или считан (команда или информация о состоянии). "Частичное" чтение и запись считаются действительными, т.е., необходимо чтобы только первые восемь битов были записаны и содержали правильный адрес. На рисунке 2.9, при первоначальном включении питания, когда нет балансировки, вывод WDT имеет высокое сопротивление и будет подключен (внутренне прикреплен к $\sim 5.6\text{ В}$), если внешний нагрузочный резистор присутствует. В то время как идет процесс балансировки, вывод WDT подключается к источником точного тока, равному $1.2\text{ В} / R_{\text{TONS}}$. (Если зажим защиты резистора вторичной обмотки отключен, подключением R_{TONS} к V_{REG} , функция сторожевой таймер также отключена). Если не действительный байт команды не записывается в течение 1.5 секунды (типичное значение), на выводе WDT будет высокий уровень напряжения. Когда уровень напряжения на выводе WDT высокий, все цепи балансировки будут отключены, но ранее выполняющаяся команда балансировки по-прежнему остается в памяти. Из отключенного состояния, последующий действительным байт команды сбросит таймер, но цепи балансировки будут активированы только если будет записана команда выполнения. Для того чтобы отключить функцию сторожевого таймера достаточно просто подключить вывод WDT к выводу V_{-} .



а) схема сторожевого таймера



б) схема паузы / возобновления процесса балансировки



с) внешняя схема защиты от перенапряжений вторичной обмотки трансформатора

Рисунок 2.9 - Схема подключения выводов сторожевого таймера

Пауза / Возобновление балансировки (через вывод WDT). Вывод WDT имеет две различные функции, может использоваться как логический вход (уровень транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ)) который может управляться с помощью внешнего логического элемента, как показано на Рисунок 2.8 б (без сторожевого таймера), или с помощью Р-МОП / тремя состояниями логики затвора транзистора, как показано на рисунке 2.8 с (со сторожевым таймером) для паузы и продолжения процесса балансировки. Внешний резистор, увеличивающий потенциал, должен иметь достаточную нагрузочную способность, способную перекрыть источник тока на выводе WDT ($= 1.2 \text{ В} / R_{TONS}$). При условии, что внутренний сторожевой таймер не имеет независимо от внешней цепи перерыв в работе, снаружи устанавливается высокий потенциал на выводе WDT и в процессе балансировки возникает пауза, процесс балансировки будет возобновлен, когда на выводе WDT снова будет низкий уровень напряжения.

Защита от перенапряжений вторичной обмотки трансформатора (че-

рез вывод WDT). Точный источник тока низкого напряжения на выводе WDT во время балансировки может быть использован для построения точной схемы защиты перенапряжений вторичной обмотки трансформатора, как показано на Рисунок 2.8 с. Второй внешний резистор, подбирается до номинала R_{TONS} и присоединяется ко вторичной обмотке трансформатора и используется для установки порогового напряжения компаратора. Каскад N-МОП транзистора (с затвором, подключенным к выводу VREG) также необходим для защиты вывода сторожевой таймера от высокого напряжения. Пороговые напряжения вторичной обмотки задаются уравнениями:

$$V_{SEC|OVP(НАРАСТАЮЩЕЕ)} = 1.4V + 1.2B \cdot \left(\frac{R_{SEC_OVP}}{R_{TONS}} \right),$$

$$V_{SEC|OVP(СПАДАЮЩЕЕ)} = 1.4V + 1.05B \cdot \left(\frac{R_{SEC_OVP}}{R_{TONS}} \right),$$

где R_{SEC_OVP} - значение сопротивления защитного резистора подключаемого к вторичной обмотке трансформатора;

R_{TONS} - значение сопротивления резистора подключаемого к вторичной обмотке трансформатора;

Этот компаратор защитит схему микросхемы LTC3300-1, если соединение вторичной обмотки с линейкой батареи во время балансировки будет потеряно и напряжение на вторичной обмотке трансформатора еще увеличивается в результате этого процесса. Команда балансировки остается в памяти, и активный процесс балансировки возобновится, где был прерван, если напряжение линейки батареи затем спадет до более безопасного уровня.

Внутренние защитные диоды. Каждый вывод микросхемы LTC3300-1 имеет защитные диоды, предназначенные для защиты от повреждения внутренних структур устройства, вызванных путем превышения внешнего напряжения на шине питания см. схему подключения внутренних диодов, показанную на рисунке 2.10. Показанные диоды являются обычными кремниевые диоды с пороговым напряжением 0.5 В. Стабилитроны имеют обратную ветвь вольтамперной

характеристики, которая изначально срывается с напряжением пробоя 9 В, а затем стабилизирующееся значение напряжения 7 В. Стабилитроны обозначенные как Z_{CLAMP} являются более высоковольтными с обратным напряжением пробоя 25 В и стабилизацией на уровне 22 В. Прямое падение напряжения на всех стабилитронах также равняется 0.5 В.

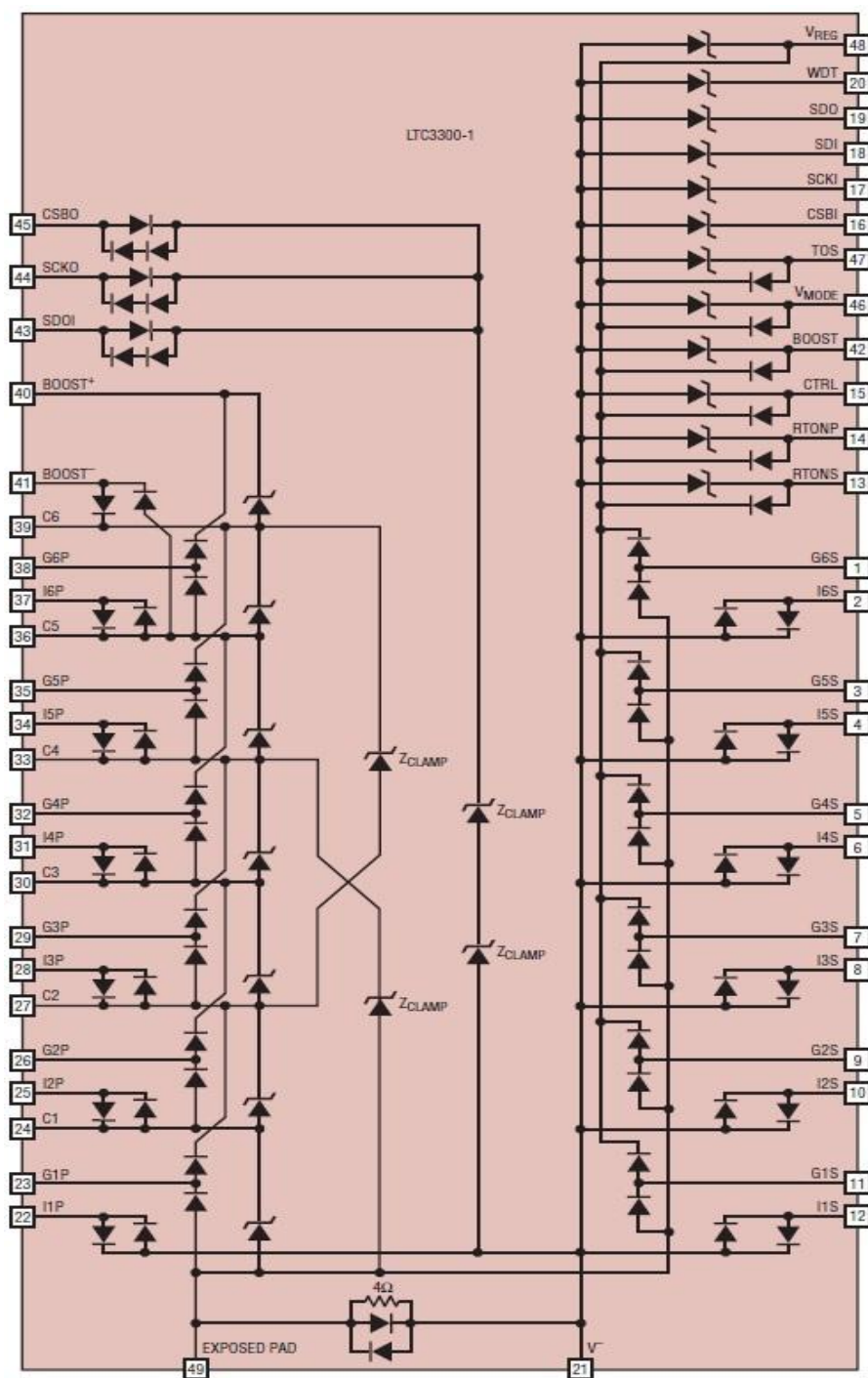


Рисунок 2.10 - Схема подключения внутренних защитных диодов в микросхеме LTC3300-1

Внутренние защитные диоды, показанные на рисунке 2.9, являются защитными компонентами внутренней структуры микросхемы LTC3300-1, которые предназначены для защиты от перенапряжений в результате переходных процессов при запуске микросхемы. При условии если эти напряжения превышают абсолютные максимальные допустимые значения напряжений микросхемы LTC3300-1, любая продолжительную работу на таких напряжениях повредит микросхему. В дополнение к вышеупомянутым внутренним диодам защиты, имеются дополнительные более низковольтные диоды на каждом из шести выводов, подключаемых к ячейкам аккумуляторной батареи (не показаны на рисунке 2.9), которые защищают микросхему LTC3300-1 во время первоначальной установки напряжения батареи в процессе эксплуатации всей системы контроля. Эти диоды имеют напряжение пробоя 5.3 В и добавочное сопротивление 20 кОм, и поддерживают дифференциальные напряжения ячеек ниже их абсолютного максимального значения при первоначальной подаче питания, когда токи нагрузки равны меняются от нуля до десятков микроампер.

2.3.2 Работа последовательного порта

Микросхема LTC3300-1 имеет SPI (*Serial Peripheral Interface, SPI bus* — последовательный периферийный интерфейс, шина SPI) совместимый последовательный порт (см. рисунок 2.11) [24].

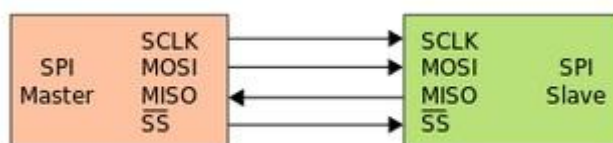


Рисунок 2.11 - SPI интерфейс (Master (управляющее устройство) Slave (управляемое устройство))

В SPI интерфейсе реализуются четыре вида цифровых сигналов:

MOSI — выход управляющего, вход управляемого (*Master Out Slave In*).

Служит для передачи данных от управляющего устройства управляемому.

MISO — вход управляющего, выход управляемого (*Master In Slave Out*). Служит для передачи данных от управляемого устройства управляющему.

SCLK — последовательный тактовый сигнал (*Serial Clock*). Служит для передачи тактового сигнала для управляющих устройств.

CS или SS — выбор микросхемы, выбор управляющего (*Chip Select, Slave Select*).

В SPI шине несколько устройств могут быть соединены в ромашку и соединять последовательно. У последовательного порта есть два набора выводов, обозначенные как выводы низкой стороны и высокой стороны. Выводы низкой и высокой стороны порта позволяют соединять устройства в ромашку даже тогда, когда они работают на разных потенциалах питания. В типичной конфигурации, плюс питания к первому, нижнее устройство подключено к минусу источнику питания второго сверху устройства. Когда устройства подключены таким образом, они образуют ромашку, путем подключения высокого вывода порта нижнего устройства к низкому выводу порта высшего устройства. При таком расположении, ведущее устройство записывает или считывает данные из каскадом соединенных устройств (микросхем), так как если бы они образовали один длинный регистр сдвига. Микросхема LTC3300-1 переводит уровень напряжения сигналов между выводами низкой и высокой стороны порта для передачи данных вверх и вниз по линейке батареи.

Физический уровень. На микросхеме LTC3300-1, семь выводов относятся к низкой и высокой стороне. Выводы низкой стороны: CSBI, SCKI, SDI и SDO. Выводы высокой стороны CSBO, SCKO и SDOI. CSBI и SCKI всегда входы, управляемые мастером или с помощью следующего нижнего устройства в линейке. CSBO и SCKO всегда выходы, которые могут управлять следующим более высоким устройством в линейке. SDI является входом данных при записи в линейку устройств. Для устройств, не находящихся в нижней части линейки, SDI является выходом данных при чтении из линейки. SDOI является выходом данных при записи и вводе данных при чтении линейки устройств. SDO является

выходом с открытым стоком, который используется только на нижнем устройстве линейки, где он может быть связан с SDI, при желании, для формирования одного двунаправленного порта. Вывод SDO контактный на нижнем устройстве линейки требует наличия внешнего резистора. Для устройств вверху в линейке, вывод SDO должен быть соединен с выводом V-. Для обмена данными между последовательно соединенными устройствами, выводы высокой стороны порта нижнего устройства (CSBO, SCKO и SDO1) должны быть подключены через высоковольтные диоды на соответствующие выводы низкой стороны порта следующего более высокого устройства (CSBI, SCKI и SDI). В этой конфигурации устройства соединяются по току, а не напряжению. См. рисунок 2.12, так как потенциалы выводов CSBO, SCKO и SDO1 близки к потенциалу вывода V- высокой стороны порта, потенциал вывода V- высокой стороны порта должен быть по крайней мере на 5В выше, чем потенциал нижней стороны порта, чтобы гарантировать протекание тока токового режима интерфейса.

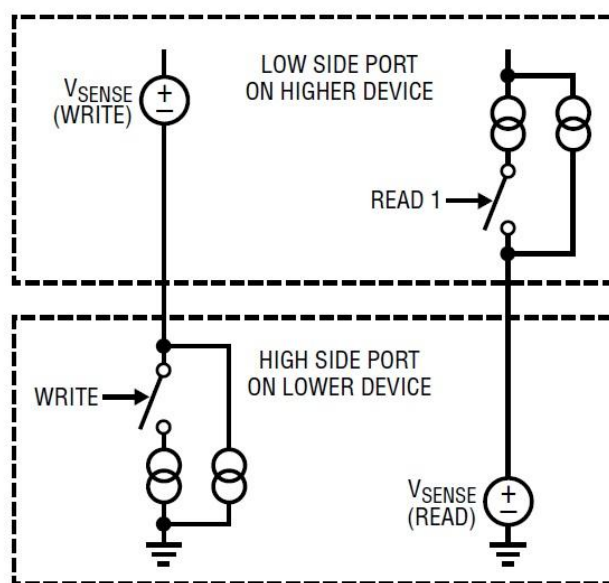


Рисунок 2.12 - Токковый режим интерфейса

Для предотвращения действия обратного напряжения на интегральную схему к выводам SPI шины подключаются диоды высокого напряжения см. рисунок 2.13.

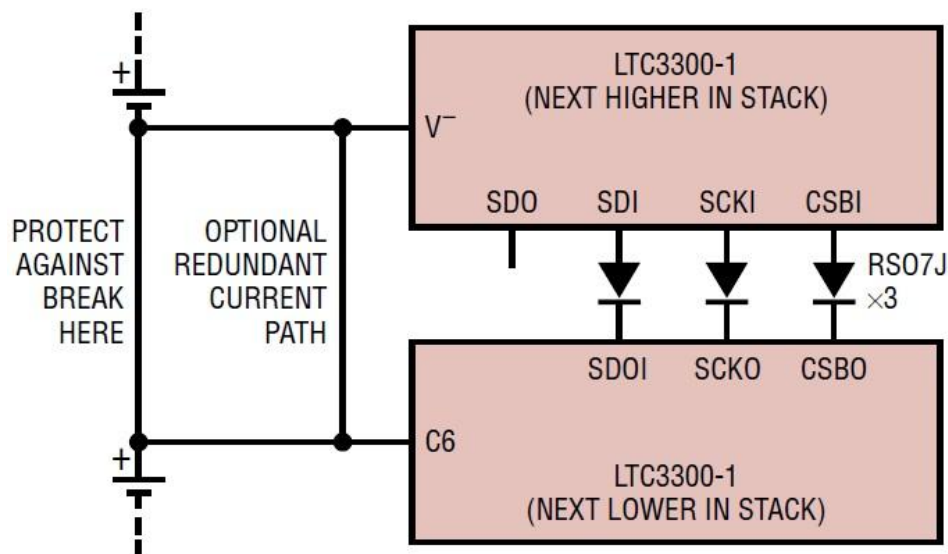


Рисунок 2.13 - Подключение защитных диодов к SPI-шине

Ток в режиме ожидания потребляемая в режиме токового режима интерфейса минимален, когда на выводе CSBI высокий логический уровень напряжения. Вывод выбора режима напряжения входного сигнала (VMODE) определяет, настроен ли последовательный порт на стороне низкого напряжения в режим напряжения или тока. Для нижнего устройства в последовательной линейке, этот вывод должен иметь потенциал вывода VREG. В других устройствах в последовательной линейке потенциал вывода VMODE должен быть таким же как на выводе V-, для обозначения текущего режима связи. Для того, чтобы обозначить вершину линейки устройств, вывод TOS на верхнем устройстве последовательной линейки должна иметь высокий потенциал. Другие устройства в последовательной линейке должны иметь низкий уровень напряжения на выводе TOS.

Байты команд. Все коммуникации к микросхеме LTC3300-1 проходят через вывод CSBI с низким логическим уровнем напряжения. Первые восемь тактов в битах данных после передачи сигнала изменением сигнала от высокого уровня к низкому представляют командный байт и находятся на одном уровне со сдвигом через все микросхемы LTC3300-1 в последовательной линейке с тем, чтобы одновременно считывать данные из всех микросхем LTC3300-1. Пример командного байта 8-бит приведен в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Структура командного байта

Номер бита	1 (MSB)	2	3	4	5	6 CMDA	7 CMDB	8 (LSB)
Значение	1	0	1	0	1	*	*	*

Первый бит (Most Significant bit MSB) старший значащий бит, первые пять битов соответствуют внутренним фиксированным адресам например [10101], который является общим для всех микросхем LTC3300-1 в линейке, все последующие данные будут игнорироваться до перехода вывода CSBI к высокому уровню, а затем снова к низкому. Шестой и седьмой биты это программа одной из четырех команд, как показано в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Командные биты

Бит		Операция
CMDA	CMDB	-
0	0	Запись команды балансировки (без запуска).
0	1	Обратное считывание команды балансировки.
1	0	Считывание статуса балансировки.
1	1	Запуск команды балансировки.

Восьмой бит (Least Significant bit LSB) младший бит байта команды должен быть установлен таким образом, чтобы весь 8-битный байт команды был четным. Если четность неверна, текущая команда балансировки выполняется (от последней ранее успешной записи) и прекращается немедленно, все же последующие данные (запись) игнорируется до перехода вывода CSBI к высокому уровню, а затем снова к низкому. Неправильное соотношение четности помогает

определить совпадает ли адрес команды с допустимым или нет. Это таким образом, обеспечивает быструю возможность немедленного прекращения процесса балансировки ячеек с помощью намеренной записи командного байта с неправильной четностью.

Запись команды балансировки. Если командные биты программы являются командами *записи команды балансировки*, то все последующие данные записи должны быть кратны шестнадцати бит (до перехода вывода CSBI к высокому уровню) или они будут проигнорированы. Текущая команда балансировки выполняется (из последней ранее успешной записи) и будет выполняться до тех пор, пока не будет записана *команда запуска балансировки*. Каждая микросхема LTC3300-1 в линейке ожидает 16 бит данных записи см. таблицу 2.9.

Таблица 2.9 - Побитовая структура команды записи балансировки

Номер бита	1 (MSB)	2	3	4	5	6	7	8
Обозначение	D1A	D1B	D2A	D2B	D3A	D3B	D4A	D4B
Номер бита	9	10	11	12	13	14	15	16 (LSB)
Обозначение	D5A	D5B	D6A	D6B	CRC3	CRC2	CRC1	CRC0

Последовательные 16-разрядные данные записи сдвинуты начиная с самой высокой микросхемы LTC3300-1 в линейке исходя вниз по линейке микросхем. Таким образом, первые шестнадцать бит будут записывать данные для верхней LTC3300-1 в линейке и смещены через все другие микросхемы LTC3300-1 в линейке. Последние 16 битов будут записывать данные для самой нижней микросхемы LTC3300-1 в линейке микросхем. Первые 12 бит команды

16-битной команды балансировки используются для указания того, какие цепи балансировки (или несколько цепей) активны и в каком направлении (зарядка и разрядка). Каждый из шестиячеечных балансиров управляет двумя битами этих данных пример приведен в таблице 2.10.

Таблица 2.10 - Управляющие биты ячейечного балансира

Бит		Выполняемая функция (n=1..6)
DnA	DnB	
0	0	-
0	1	Разрядка ячейки n (асинхронный)
1	0	Разрядка ячейки n (синхронный)
1	1	Зарядка ячейки n

Сущность алгоритма балансировки для данной ячейки. Зарядка ячейки n: линейное повышение тока во вторичной обмотке трансформатора до значения I_{PEAK} , линейный спад тока в первичной обмотке трансформатора до значения I_{ZERO} . Повторение. Разрядка ячейки n (синхронная): линейное увеличение тока в первичной обмотке трансформатора до значения I_{PEAK} , линейный спад тока во вторичной обмотке трансформатора до значения I_{ZERO} . Повторение.

Для несинхронной разрядки ячейки n, вторичный обмотки трансформаторов, драйвера управления затворами транзисторов и датчики тока отключены. Ток во вторичных обмотках будет проводить либо корпусной диод транзисторного ключа (если он присутствует) либо запасной диод Шоттки. Первичная обмотка трансформатора будет включаться только после того как отключатся выводы защитных резисторов первичной обмотки. В двунаправленной балансировке ключом во вторичной обмотке, можно достичь повышения эффективности разряда выбирая несинхронный режим разряда (если заряд на затворе транзистора превышает добавочные потери в диоде), но ток балансировки будет менее

стабилен, так как резисторы защитных выводов вторичной обмотки должны быть подобраны так, чтобы время спада тока до нуля было больше чем ожидаемое, чтобы гарантировать отсутствие обратного тока. В случае, когда диод Шоттки выступает в качестве ключа вторичной обмотки, можно построить односторонний алгоритм разрядки только с помощью балансировки заряжаемой изолированной вспомогательной ячейки, так как показано на рисунке 2.14.

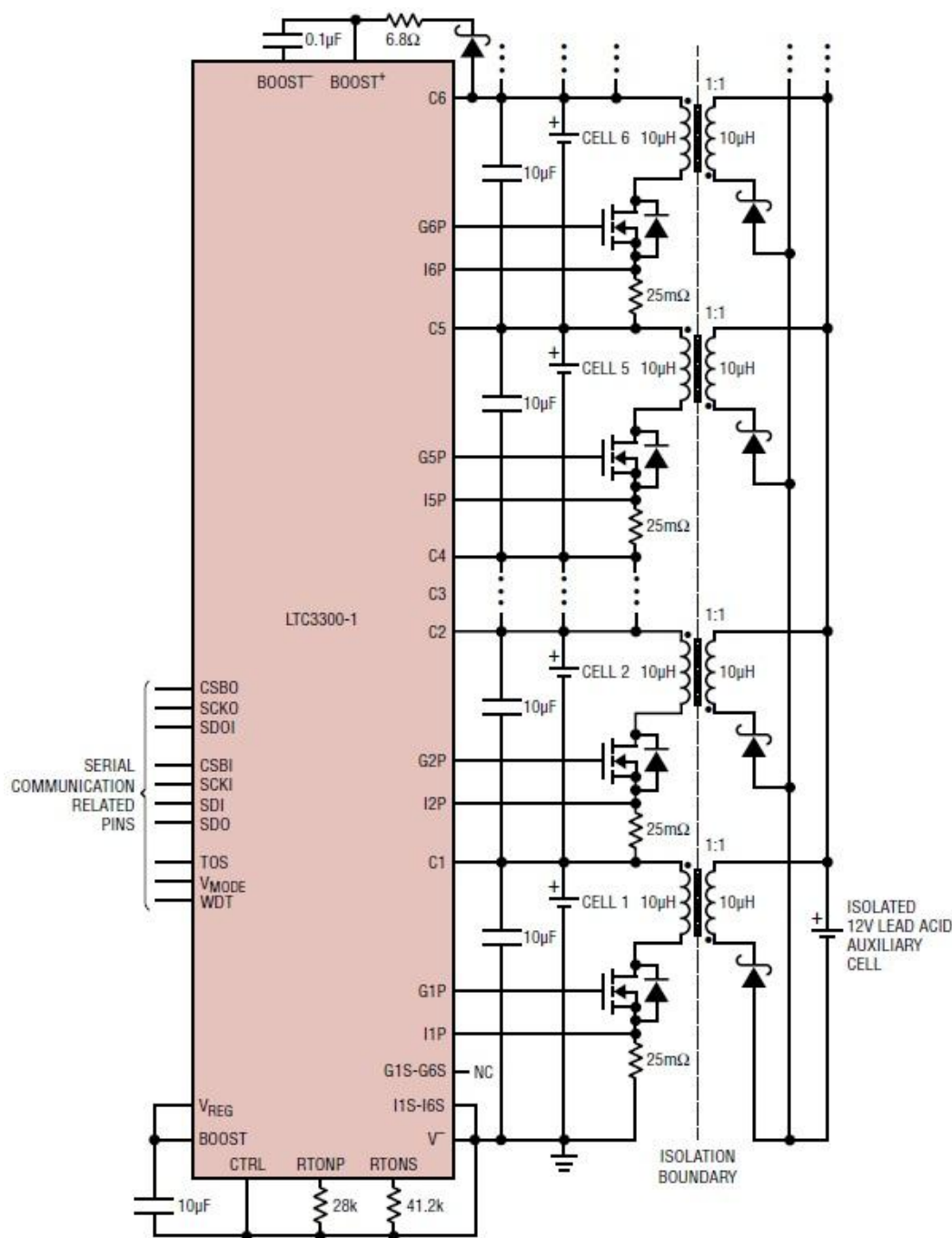


Рисунок 2.14 - Односторонняя (только разрядка) балансировка применяемая для зарядки изолированной вспомогательной ячейки

Последние четыре бита команды шестнадцати битной команды балансировки используются для проверки ошибок пакета (Packet Error Checking PEC). Шестнадцать битов данных записи (двенадцати битовое сообщение плюс четырех битный циклический избыточный код Cyclic Redundancy Check CRC), поступают на вход кода циклической избыточности (CRC) блок с использованием стандартного характеристического полинома:

$$x^4 + x + 1$$

В данных записи, 4-битный CRC код добавляющийся к сообщению должен быть выбран таким образом, чтобы остаток от деления CRC был равен нулю. Все биты CRC кода при записи команды балансировки инвертируются, это делается для того, что если "все нули" команда не выполнялась. Микросхема LTC3300-1 будет игнорировать запись данных, если остаток от деления не равен нулю, а внутренний регистр очищен и может быть проверен на обратное чтение команды. Текущая команда балансировки будет выполняться (от последней ранее успешной записи), но все активные цепи балансировки будут отключены, если команда запуска выполнения балансировки затем будет записана.

Обратное считывание команды балансировки. Побитовая структура команды обратного считывания балансировки идентична команде записи процесса балансировки. Биты команды программы обратного считывания процесса балансировки, последовательные шестнадцатиразрядные ранее записанные данные (зафиксированные в двенадцати битовом сообщении плюс вновь рассчитываемый четырехбитный CRC код сдвинутые в том же побитовом порядке (MSB бит первый), начиная с самой низкой микросхемы LTC3300-1 в линейке микросхем и исходя вверх по линейке. Эта команда позволяет микропроцессору проверить написанные команды перед выполнением. Биты CRC кода также как и в команде записи балансировки инвертированы.

Считывание статуса балансировки. Командные биты программы чтения статуса балансировки это последовательные данные о состоянии шестнадцать бит (12 бит данных плюс четырехбитный CRC код) сдвигаются старшими разря-

дами вперед в см. таблицу 2.11.

Таблица 2.11 - Побитовая структура команды чтения статуса балансировки

Номер бита	1 (MSB)	2	3	4	5	6	7	8
Обозначение	Gate Drive 1 OK	Gate Drive 2 OK	Gate Drive 3 OK	Gate Drive 4 OK	Gate Drive 5 OK	Gate Drive 6 OK	Cells not OV	Sec not OV
Номер бита	9	10	11	12	13	14	15	16 (LSB)
Обозначение	Temp OK	0	0	0	CRC3	CRC2	CRC1	CRC0

Аналогично команда обратного чтения балансировки, последние 4 бита в каждом шестнадцати битной команде статуса состояния балансировки используются для обнаружения ошибок. Первые двенадцать бит состояния поступают к блоку циклического избыточного кода (CRC) с использованием того же характеристического полинома как и для записи команды балансировки. Микросхема LTC3300-1 рассчитывает и добавляет соответствующий четырехбитный CRC код для исходящего двенадцати битового сообщения, которое затем обрабатывается микропроцессором для проверки ошибок. Последовательность исходящих данных во время обратного считывания является следующей: данные о состоянии (нижнего чипа), данные о состоянии (второго чипа снизу), ..., данные о состоянии (верхнего чипа), все биты CRC кода в команде чтения статуса балансировки инвертированы. Первые шесть битов команды чтения статуса балансировки показывают, статус драйверов затвора (Gate Drive OK) транзисторов каждой из шести цепей балансировки. На них может быть только высокий логический уровень напряжения если выполняется команда с участием цепи балансировки данного

драйвера затвора или низкий логический уровень если цепь балансировки не активна. Биты с седьмого по девятый указывают что на всех шести ячейках нет перенапряжения, что нет перенапряжения на вторичной обмотке трансформатора, и что температура микросхемы LTC3300-1 в пределах нормы. Эти три бита могут иметь только высокий логический уровень напряжения в ходе выполнения команды балансировки по крайней мере в одной цепи балансировки. Десятый, одиннадцатый, двенадцатый биты в команде чтения статуса балансировки не используются и всегда будут иметь низкий логический уровень напряжения. В качестве примера, если активны цепи балансировки первой и четвертой ячейки при отсутствии неисправностей напряжения или температуры, двенадцати разрядный код чтения статуса балансировки будет таков 100100111000.

Выполнение команды балансировки. Если командные биты программы запуска команды балансировки, последний раз были успешно записаны в память команда запуска балансировки будет немедленно выполнена. Все последующие записываемые данные будут игнорироваться до тех пор, пока на выводе CSBI микросхемы LTC-3300-1 не будет высокого уровня напряжения, а затем снова низкого.

Пауза / возобновление процесса балансировки (через SPI порт). Микросхема LTC3300-1 обеспечивает простое средство для прерывания процесса балансировки (всей линейки микросхем), а затем перезапуск без перезаписи предыдущей команды балансировки всех микросхем LTC3300-1 в линейке. Приостановление балансировки происходит, если записывается восьми битная команда запуска процесса балансировки с инвертированным битом четности: 10101110. Возобновляется процесс балансировки, записью команды запуска процесса балансировки с правильным битом четности: 10101111. Эта функция полезна при точном измерении напряжения ячейки с целью повышения производительности во время балансировки линейки ячеек. немедленная пауза в процессе балансировки будет происходить при записи любого восьми битного байта команды с неправильное соотношением четности. Время повторного запуска,

как правило составляет 2 мс, которое является таким же, как время задержки начала новой или другой команды балансировки (t_{DLY_START}).

2.3.3 Выбор внешних компонентов

Использование микросхемы LTC3300-1 с менее чем шестью ячейками.
Для того, чтобы сбалансировать линейку из N ячеек, требуется число из $N / 6$ микросхем LTC3300-1, которое округляется до ближайшего целого числа. Кроме того, каждая микросхема балансировки LTC3300-1 в линейке должна взаимодействовать как минимум с тремя ячейками (должны использоваться выводы C4, C5 и C6). Таким образом, любая линейка из трех или более ячеек может быть сбалансирована с помощью соответствующей линейки микросхем балансировки LTC3300-1. Недействующие ячейками выводы (C1, C1+C2 или C1+C2+C3) в микросхеме LTC3300-1 замыкаются на вывод V- (см рисунок 2.15). Тем не менее, во всех конфигурациях данные записи остаются шестнадцатитрибитными, но микросхема LTC3300-1 не будет оперировать с битами задействованными на неподключенные ячейки, но эти биты все равно будут использоваться при расчете CRC кода.

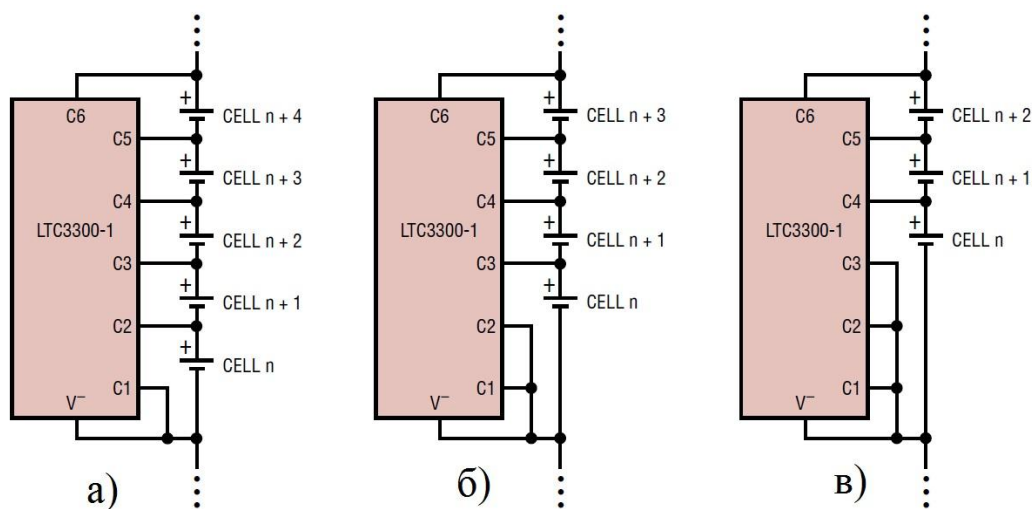


Рисунок 2.15 - Схема подключения а) пяти ячеек, б) четырех ячеек, в) трех ячеек к микросхеме LTC3300-1

В данном случае накопитель электроэнергии Li60 состоит из шестнадцати

ячеек напряжением 3,2 В каждая, это значит, что для балансировки накопителя понадобятся минимум три микросхемы балансировки LTC3300-1, причем в одной из них выводы С1 и С2 будут закорочены на вывод V-.

Выбор внешних резисторов. Номинальные значения внешних токочувствительных резисторов (датчики тока) для первичной и вторичной обмотки устанавливающие максимальный ток балансировки рассчитываются в соответствии со следующими формулами:

$$R_{SENSE|PRIMARY} = \frac{50\text{mV}}{I_{PEAK_PRI}} = \frac{50\text{mV}}{2\text{A}} = 0,025\text{Ом};$$

$$R_{SENSE|SECONDARY} = \frac{50\text{mV}}{I_{PEAK_SEC}} = \frac{50\text{mV}}{2\text{A}} = 0,025\text{Ом},$$

где 50 мВ - падение напряжения на токочувствительном резисторе,
 $I_{PEAK_PRI} = I_{PEAK_SEC} = 2\text{ А}$ - амплитуды токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

По рассчитанному значению сопротивления подберем в качестве токочувствительного резистора проволочный резистор 12FR025E, 10, 0.025 Ом, 2 Вт, ±1.

Выбор трансформатора. Микросхема LTC3300-1 оптимизирована для работы с простыми двух обмоточными трансформаторами с индуктивностью первичной обмотки от 1 до 20 мкГн, с соотношением витков один к двум (первичных к вторичным), а вторичную обмотку распараллелинную вверх на двенадцать ячеек. Если ко вторичной обмотке подключается больше ячеек в линейке, то для более эффективной балансировки требуется трансформатор с более высоким соотношением витков. Например, трансформатор с соотношением витков один к десяти оптимизирован для шестидесяти ячеек вторичной обмотки. Ток насыщения трансформатора должен быть больше максимального тока балансировки.

Для применения совместно с микросхемой LTC-3300-1 производителем в технической документации [23] рекомендуется использование трансформатора MA5421-AL, основные параметры которого приведены в таблице 2.12 [25].

Таблица 2.12 - Параметры трансформатора

Индуктив- ность обмо- ток (при $I = 0$ А), мкГн	Индуктив- ность обмо- ток (при I_{max}), мкГн	Активное со- противление R обмоток, Ом		Индук- тивность рессея- ния, мкГн	Кoeffи- циент трансфор- мации	Макси- мальный ток в первич- ной об- мотке I_{max} , А
		Пер- вич- ной	Вто- рич- ной			
3,4	2,8	0,009	0,011	0,15	1	10

Установка подходящего времени переключения состояния. Выводы за-
щиты первичной и вторичной обмотки трансформатора предназначены для ис-
пользования в качестве защиты от токов утечки, а не в качестве ограничителей
тока в обмотках трансформатора. Для того, чтобы не мешать нормальной работе
трансформатора соотношение I_{PEAK} / I_{ZERO} , максимальное время переключения
состояния должен устанавливается большим, чем время, необходимое для ли-
нейного возрастания амплитуды тока в обмотке I_{PEAK} (или I_{ZERO}) отнесенное к
минимальному напряжению ячейки аккумулятора:

$$t_{ON(MAX)PRIMARY} > \frac{L_{PRI} I_{PEAK_PRI}}{V_{CELL(MIN)}} > \frac{3,4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot 2 \text{ А}}{2,24 \text{ В}} = 3,035 \text{ мкс} ,$$

$$t_{ON(MAX)SECONDARY} > \frac{L_{PRI} I_{PEAK_PRI} T}{S \cdot V_{CELL(MIN)}} > \frac{3,4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot 2 \text{ А} \cdot 1}{6 \cdot 2,24 \text{ В}} = 0,505 \text{ мкс} ,$$

где $L_{PRI} = 3,4$ мкГн - индуктивность первичной обмотки трансформатора,
 $I_{PEAK_PRI} = 2$ А - амплитуда тока первичной обмотки трансформатора,
 $T = 1$ - коэффициент трансформации трансформатора,
 $S = 6$ - количество ячеек подключаемых к вторичной обмотке трансформатора,
 $V_{CELL(MIN)} = 2,24$ В - минимальное напряжение аккумуляторной ячейки.

Номинальные значения сопротивлений резисторов, определяющих мак-
симальное время включенного состояния транзисторов первичной и вторичной

обмоток трансформатора и подключаемых к выводам RTONP и RTONS рекомендуются производителем микросхемы LTC3300-1 и приводятся в []. Сопротивление резистора $R_{TONP}=22,6$ кОм, сопротивление резистора $R_{TONP}=6,98$ кОм. По данным значениям выберем тонкопленочные SMD (Surface Mounted Device) (компонент, монтируемый на поверхность) резисторы Royal Ohm 22,6 кОм, 0603, 1%; CPF0603B6K98E1.

Выбор внешнего полевого транзистора. В дополнение к работе на максимальный ток балансировки, внешние N-МОП транзисторы для первичной и вторичной обмоток трансформатора рассчитываются с учетом максимального напряжения пробоя сток-исток, которое для первичной обмотки рассчитывается по формуле:

$$V_{DS(BREAKDOWN)MIN} > V_{CELL} + \frac{V_{STACK} + V_{DIODE}}{T} = V_{CELL} \left(1 + \frac{S}{T}\right) + \frac{V_{DIODE}}{T} > 3,2B \cdot \left(1 + \frac{6}{1}\right) + \frac{0,6B}{1} > 23B ;$$

и для полевого транзистора вторичной обмотки:

$$V_{DS(BREAKDOWN)MIN} > V_{CELL} + T(V_{STACK} + V_{DIODE}) = V_{CELL}(S + T) + T \cdot V_{DIODE} > 3,2B \cdot (6 + 1) + 1 \cdot 0,6B > 23B ,$$

где $V_{CELL} = 3,2$ В - напряжение аккумуляторной ячейки;

$V_{STACK} = 19,2$ В - напряжение линейки ячеек (линейка из шести ячеек);

$V_{DIODE} = 0,6$ В - падение напряжения на диоде полевого транзистора;

$S = 6$ - число ячеек в линейке подключенных ко вторичной обмотке трансформатора;

$T = 1$ - коэффициент трансформации трансформатора.

Для учета более высоких напряжений, присутствующих из-за паразитных индуктивностей, увеличим это напряжение с запасом на 20%. С учетом максимального напряжения сток-исток большего, чем 27,6 В и максимальным током стока больше чем 2 А подберем N-МОП транзистор RD07MVS1 в корпусе [SLP].

Выбор элементов фильтров. Особое внимание следует обращать на скачки напряжения на транзисторах, которые можно наблюдать на осциллограммах напряжений полевого стока транзисторов первичной и вторичной. Скачки напряжения не должны превышать напряжение пробоя транзистора. В ряде слу-

чаев значительно минимизировать эти скачки напряжения удастся рациональным выбором полевых транзисторов, минимизацией индуктивности рассеяния при использовании хорошей печатной платы. Но в большинстве случаев, легче установить вблизи полевого транзистора сглаживающий RC фильтр (см. рисунок 2.16), который будет существенно сглаживать эти скачки напряжения и тем самым стабилизировать напряжение стока транзистора в безопасной рабочей области. Также вблизи микросхемы LTC-3300-1 между соседними выводами ячейек установим С фильтр с целью снижения пульсаций напряжения ячейки.

Определение значения для номиналов R и C, как правило, требует некоторой оптимизации методом проб и подбора. Для выбранного трансформатора, см. таблицу 2.12, RC-фильтр рассчитан на SMD резисторе 0402 0,062 Вт, 330 Ом, 1% и керамическом SMD конденсаторе GRM2165C1H100J, 100 пФ, 50 В. В качестве С фильтра выберем электролитический SMD конденсатор ECAP B41121A4106M000, 10 мкФ, 16 В.

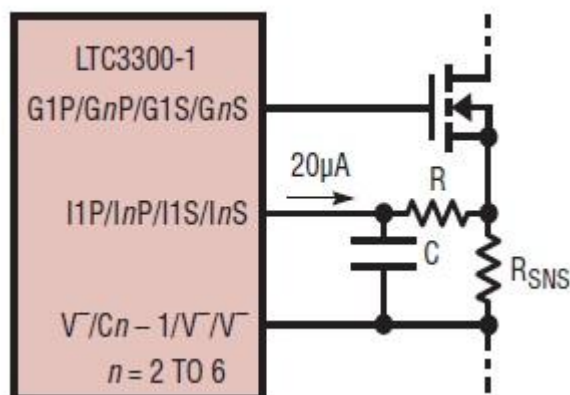


Рисунок 2.16 - Схема подключения RC-цепочки

Выбор внешних элементов генератора импульсов на затвор транзистора. Внешний импульсный конденсатор, подсоединяемый между выводами BOOST+ и BOOST- микросхемы LTC-3300-1 подает напряжение на драйвер затвора транзистора, необходимое для открытия внешних N-МОП транзисторов, подключенных к выводу G6P. Этот конденсатор заряжается через внешний диод Шоттки от вывода С6 через вывод BOOST+, когда транзистор выключен от вывода С5 через BOOST-. Когда транзистор открывается, вывод BOOST- переключается

чает нижнюю обкладку конденсатора от C5 до C6, потенциал вывода BOOST + равен напряжению ячейки которая располагается в линейке выше, чем ячейка подключенная к выводу C6. Когда транзистор закроется снова, вывод BOOST- переключает нижнюю обкладку конденсатора обратно к выводу C5, таким образом конденсатор перезаряжается. Рекомендуется, чтобы скорость перезаряда этого конденсатора была в сто раз быстрее, чем входной емкости N-MOS транзистора подключаемого к выводу G6P. Для большинства случаев достаточно конденсатора емкостью 0.1 мкФ напряжением 10 В. Максимальное обратное напряжение диода Шоттки должно быть больше чем 6 В для того, чтобы предотвратить чрезмерные броски напряжения и тока протекающего в генератор импульсов затвора и компоненты драйвера затвора во время первоначального подключения напряжения аккумуляторной батареи к микросхеме LTC3300-1. Для ограничения тока используется резистор сопротивлением 6.8 Ом последовательно с диодом Шоттки как показано на рисунке 2.5.

С учетом вышеперечисленных требований и рекомендаций подберем следующие элементы: керамический SMD конденсатор GRM2165C1H101J, 0,1 мкФ, 10 В; SMD резистор 0402, 0,062 Вт, 6,8 Ом, 1%; диод Шоттки BAT60A E6327, 3 А, 10 В в корпусе [SOD-323].

Выбор защитных диодов для последовательного порта шины SPI. Проверка целостности соединения всех ячеек батареи с целью выявления разрыва в линейке соединения ячеек батареи является важной задачей для всей системы контроля аккумуляторной батареи. В случае, когда линейка ячеек батареи имеет разрыв между группами ячеек, сбалансированных микросхемой LTC3300-1, любая нагрузка приведет к большому обратному потенциалу на связи в месте обрыва связи. Эта ситуация может возникнуть в модульной системе батареи во время первоначального запуска или процедура обслуживания. Также во время фазы зарядки, этот разрыв будет приводить к перемещению в последовательной цепи электростатического заряда, который также приведет к повреждению части микросхем. Альтернативное соединение для прохождения электростатического

тока в данном случае позволяет избежать этого. С этой целью устранения этих нежелательных последствий в результате обрыва в линейке ячеек выводы последовательного порта защищены от обратного потенциала внешними высоковольтными диодами, которые также образуют цепь для замыкания электростатического тока. Подключаются внешние диоды к выводам последовательного порта так, как показано на рисунке 2.13. По максимальному обратному напряжению большему чем 51,2 В (напряжение всей линейки ячеек аккумуляторной батареи) подберем диоды 2Д706АС9 с максимальным обратным напряжением 70 В.

2.3.4 Соединение микросхем балансировки и мониторинга

Микросхема LTC3300-1 совместима и удобна в использовании со всеми чипами микросхем мониторинга производителя LTC, такими как микросхемы LTC6803 и LTC6804. В данном случае мы используем микросхему LTC6803, принципиальная схема подключения системы контроля батареи на микросхемах LTC3300-1 и LTC6803 с использованием общего SPI порта показана на рисунке 2.14. Выводы SCKI, SDI и SDO линий нижних микросхем LTC3300-1 и LTC6803-1 связаны между собой. Выводы CSBI разделены, чтобы предотвратить одновременную связь микросхем. Это обеспечивается с помощью подключения вывода GPIO микросхемы LTC6803-1 через инвертор к выводу CSBI микросхемы LTC3300-1. При таком подключении, обмен данными с LTC6803-1 ничем не отличается чем без микросхемы LTC3300-1, так как вывод GPIO1 по умолчанию имеет высокий уровень напряжения. Для того, чтобы произвести обмен данными с микросхемой LTC3300-1, состояние вывода GPIO1 должно быть сброшено микроконтроллером в низкий уровень и обратно в высокий после завершения процедуры обмена данными. Связь вверх по линейке микросхем и с ячейками батареи проходит между микросхемами LTC3300-1 и LTC6803-1, как показано на рисунке 2.17.

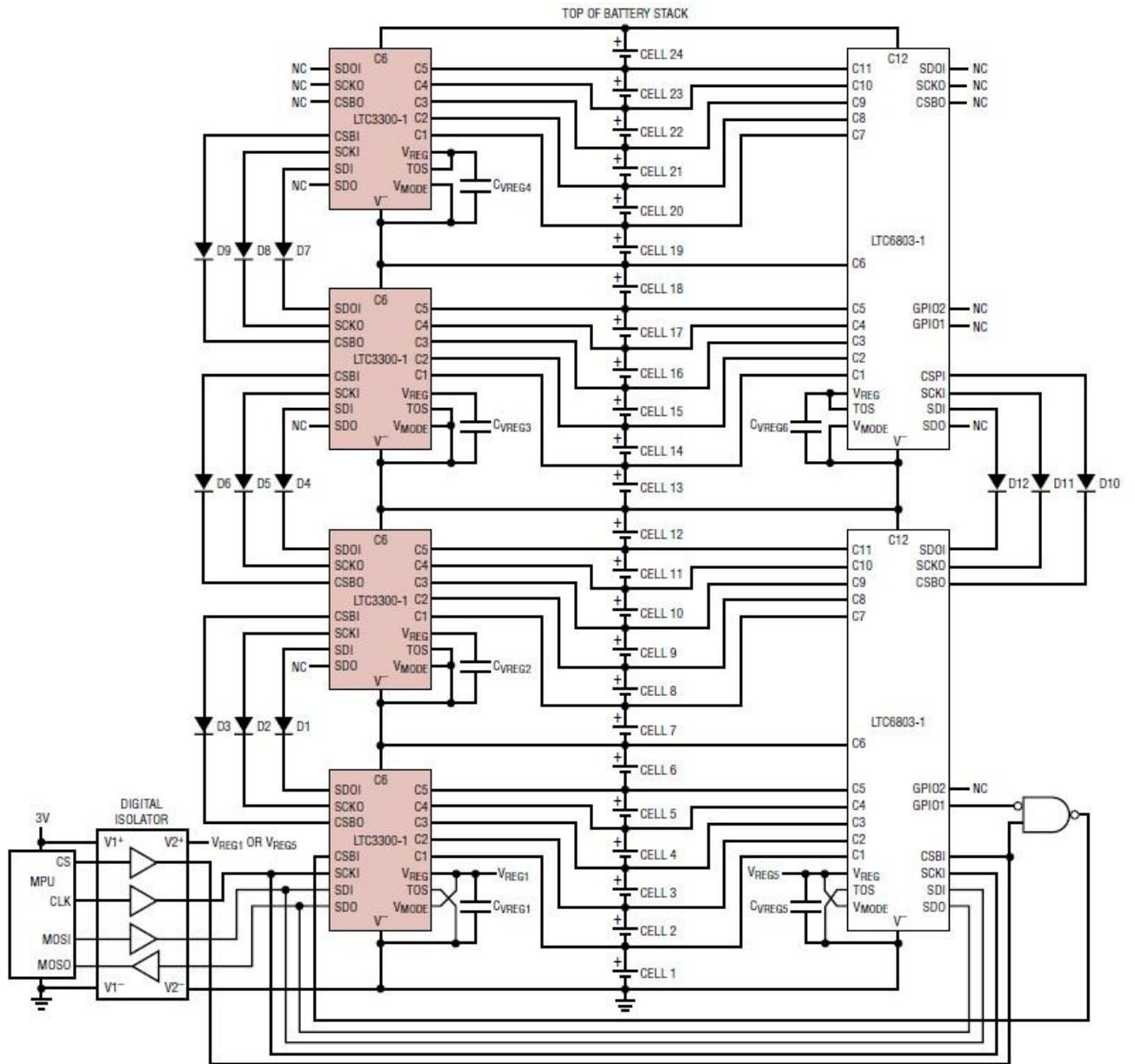


Рисунок 2.17 - Структурная схема системы контроля батареи на микросхемах LTC3300-1 и LTC6803

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы удалось выяснить, что построение полностью автономной системы электроснабжения для исходного объекта является невозможным его ввиду географического положения, а также климатических условий. В соответствии с исходными данными был подобран аккумуляторный накопитель энергии, собранный на литий-феррофосфатных ячейках. Для выбранного накопителя энергии была разработана система контроля аккумуляторных батарей, которая является совместимой и оптимизированной для работы с этим типом накопителей. В ходе разработки системы контроля была проработана ее структурная схема, работа ее основных составляющих, а также произведен необходимый подбор элементов данной системы.

Применение данной системы контроля как ожидается, позволит улучшить эксплуатационные показатели аккумуляторных накопителей, снизить затраты на их эксплуатацию, продлить срок службы накопителей, увеличить их КПД, а также их надежность.

Разработанная система контроля является реальным образцом, который введен в эксплуатацию на реальном объекте. В результате экспериментального исследования режимов заряда и разряда накопителя получены практические данные о функционировании данной системы.

Список использованных источников

1. Автономные системы электроснабжения: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.solarhome.ru/autonom> (дата обращения: 10.05.2016).
2. Автономные системы электроснабжения: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://home-ideas.ru/2015/06/avtonomnyie-sistemyi-elektrosnabzheniya> (дата обращения: 12.05.2016).
3. Автономное электроснабжение: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.apxu.ru/article/nontradit/autonom/auto.htm> (дата обращения: 12.05.2016).
4. Автономное электроснабжение дома своими руками: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://fb.ru/article/164696/avtonomnoe-elektrosnabjenie-doma-svoimi-rukami> (дата обращения: 12.05.2016).
5. Электричество от солнца: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.zs-z.ru/zagorodnoe-stroitelstvo/elektrosnabzhenie/elektrichestvo-ot-solnca.html> (дата обращения: 12.05.2016).
6. Хрусталеv Д.А. «Аккумуляторы», Москва, ООО «Изумруд», 2003 г. - 224 стр.
7. Ribeiro P. F., Johnson B. K., Crow M. L., Arsoy A., Liu Y. Energy Storage Systems for Advanced Power Applications // Proceedings of the IEEE, 2001. – Vol. 89. – No. 12. – P. 1744–1756.
8. Коровин Н. В. «Химические источники тока» справочник /под редакцией Коровина Н.В., Скундина А.М. - Москва: Издательский дом МЭИ, 2003 г. – 740 стр.
9. Официальный сайт компании «DeltaBatter»: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.delta-batt.com/catalog/gel> (дата обращения: 13.05.2016).
10. J.I. San Martín, I. Zamora, J.J. San Martín V. Aperribay, P. Eguía. Energy Storage Technologies for Electric Applications. International Conference Renewable Energies and Power Quality. (ICREPQ'11) Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2011, P. 1-7.

11. K.C. Divya, J. Østergaard, “Battery energy storage technology for power systems - An overview”, Electric Power Systems Research, Vol.79, p.511-520, 2009.
12. Андреев В.М., Забродский А.Г., Когновицкий С.О. Интегрированная энергоустановка с накопителем энергии на основе водородного цикла. Международный журнал «Альтернативная энергетика и экология» АЭЭ (2008) №2 (46), стр. 99-105.
13. Вольфкович Ю.М., Сердюк Т.М. Электрохимическая энергетика, 2001, Т.1 №4., стр. 14–28.
14. В. Шурыгина. Суперконденсаторы. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 3/2003, стр. 20-24.
15. Vanadium redox battery: [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Vanadium_redox_battery (дата обращения: 14.05.2016).
16. Электроснабжение от автономных источников: [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://khd2.narod.ru/gratis/autonet.htm#CHOOSE_INVERTOR (дата обращения: 15.05.2016).
17. BMS разработка и производство аппаратно-программных комплексов. Цифровая лаборатория: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.harlab.ru/lifepo4/bms> (дата обращения: 16.05.2016).
18. Q.PRO-G4 255-265 Polycrystalline solar module: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.q-cells.com> (дата обращения: 17.05.2016).
19. GreenTriplex PM060M02 Mono-Crystalline Photovoltaic Module: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.benqsolar.com> (дата обращения: 17.05.2016).
20. SMA Sunny Tripower 20000TL / 25000TL solar inverter: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sma.de> (дата обращения: 17.05.2016).
21. TESVOLT Lithium Batterie Speicher System Li 60 kWh: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tesvolt.com> (дата обращения: 17.05.2016).

22. SMA Sunny Island 8.0H battery inverter: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sma.de> (дата обращения: 17.05.2016).

23. Linear Technology High Efficiency Bidirectional Multicell Battery Balancer: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.linear.com> (дата обращения: 18.05.2016).

24. Serial Peripheral Interface: [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface (дата обращения: 21.05.2016).

25. Coilcraft MA5421-AL Flyback Transformer: [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.coilcraft.com/ma5421.cfm> (дата обращения: 22.05.2016).