

Контроллеры солнечных батарей

10, октябрь 2014

Карлащук В. И.^{1,*}

УДК: 620.91

¹Россия, Российский университет дружбы народов

*wkarl@yandex.ru

1. Введение

В данной работе речь идет о схемотехнике аналоговых контроллеров для солнечных батарей (СБ) (в литературе они известны также под названием On/Off контроллеров), которые могут быть использованы на первых этапах знакомства с солнечной электроэнергетикой, а также при проведении лабораторных работ по альтернативным источникам электроснабжения. Показано, что такие контроллеры по принципу работы близки к промышленным ШИМ контроллерам (с широтно-импульсной модуляцией — ШИМ), но значительно проще их по схемотехнической реализации.

2. Краткий обзор схемотехнических решений

Пожалуй, впервые схема On/Off контроллера была опубликована в 1984 г. в книге [1]. Несколько отредактированная и исправленная схема такого контроллера показана на рис. 1. Он выполнен на счетверённом компараторе LM339 (используется только три, выводы 10, 11, 13 четвертого соединены с общей шиной), который питается непосредственно от солнечной батареи (СБ). Выход СБ подключается к аккумуляторной батарее (АКБ) через токоограничивающий резистор R_s и защитный диод Шоттки D1, предназначенный для предотвращения саморазряда АКБ в тёмное время суток и в «нерабочую» пасмурную погоду. В качестве источника опорного напряжения 6,2 В используется параметрический стабилизатор напряжения на стабилитроне D2 и балластном резисторе R3.

Напряжение с АКБ поступает на вход делителя на резисторах R1, VR1 и R2. Когда напряжение на выходе делителя меньше 6,2 В (при этом напряжение на аккумуляторе меньше 12,6 В), на выходе 14 гистерезисного компаратора на IC1/1 формируется высокий уровень положительного напряжения (условная логическая единица 1), в результате чего

— на выходе 2 компаратора IC1/2 формируется сигнал 1 и загорается светодиод СД1 (большой зарядный ток);

— на выходе 1 компаратора IC1/3 формируется сигнал логического 0 и тем самым блокируется работа светодиода СД2 (малый зарядный ток);

— открывается транзистор Q1, срабатывает реле RL1, замыкая своими контактами токоограничивающий резистор Rs, и максимально возможный выходной ток СБ через защитный диод D1 поступает на АКБ.

Когда напряжение на выходе делителя R1-VR1-R2 начинает превышать 6,2 В (напряжение на АКБ достигает значения 12,6 В — уровень заряда 70-80%, начало газовыделения), срабатывает компаратор IC1/1 и на его выходе формируется сигнал условного логического 0, под действием которого

— на выходе 2 компаратора IC1/2 формируется сигнал 0 и блокируется работа светодиода СД1;

— на выходе 1 компаратора IC1/3 формируется сигнал логической 1, что индицируется светодиодом СД2;

— закрывается транзистор Q1, выключается реле RL1 и раскорачивается токоограничивающий резистор Rs для дозарядки АКБ до 100% (13.2 В) и ее компенсационной подзарядки током 2% от емкости АКБ.

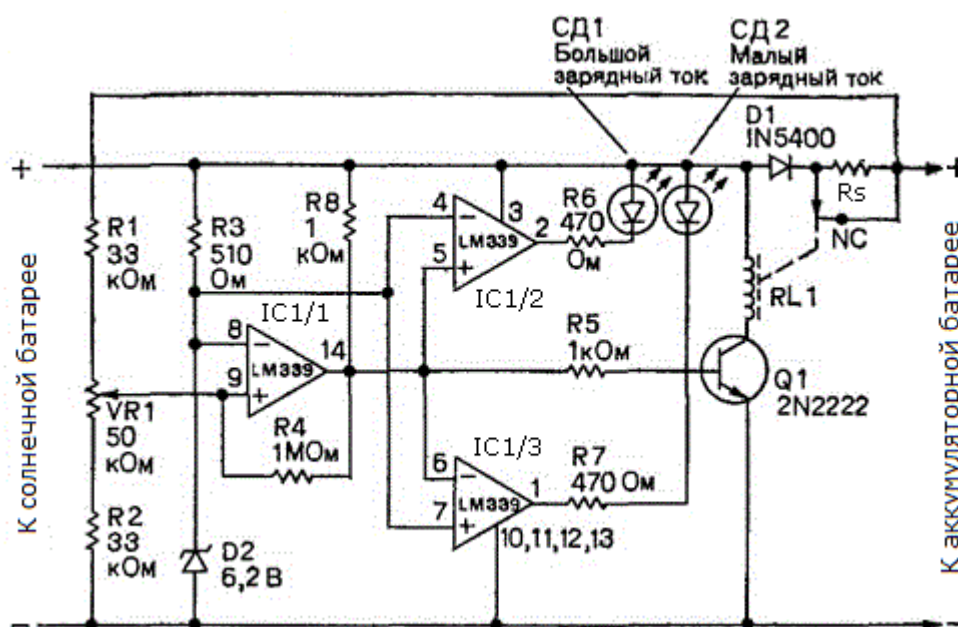


Рис. 1. Контроллер заряда [1]

Автор работы [1] считает, что дозарядка АКБ должна проводиться током 2-5%, а компенсационная подзарядка — током 1,5-2% от емкости АКБ. Вариант 2% считается компромиссным с целью упрощения схемы контроллера. Таким образом, в схему заложен принцип двухступенчатой регулировки, что выгодно отличает его от обычного одноступенчатого On/Off контроллера, но заметно удлиняет процесс дозарядки по сравнению с более сложным трехступенчатым.

Рекомендуемые в работе [1] сопротивления резисторов Rs в зависимости от емкости АКБ приведены в табл. 1. Если ориентироваться на наш пробный вариант (АКБ типа AGM емкостью 4,5 А·час) и принять Rs = 23 Ом, падение напряжения на D1 0,5 В, напряжение

на АКБ 13,2 В, то можно подсчитать при этом выходное напряжение СБ как $23 \cdot 0,1 + 0,5 + 13,2 = 16$ В, что примерно на 1-2 В ниже точки максимальной мощности.

Таблица 1. Зависимость сопротивления резистора R_s от емкости АКБ

Емкость батарей Ah	Ток дозаряда A	Сопротивление R_s , Ом	Мощность R_s , Вт
5	0,1	23	0,25
10	0,2	12	0,50
15	0,3	8,7	0,8
25	0,5	4,6	1,15
50	1	2,3	2,3
75	1,5	1,5	3,4
100	2	1,2	4,8
150	3	0,7	6,3

Схема на рис. 1, на наш взгляд, обладает следующими недостатками:

1. Нет фильтрующих и защитных элементов в выходной цепи СБ, что может приводить к ложным срабатываниям компараторов.

2. Нет защиты от короткого замыкания в цепи АКБ, ее глубокого разряда и ограничения максимально допустимых токов ее заряда (более 25% емкости) при достаточно мощной СБ, т. е. необходимо, чтобы ее максимальный выходной ток не превышал максимально допустимый ток заряда для используемой АКБ.

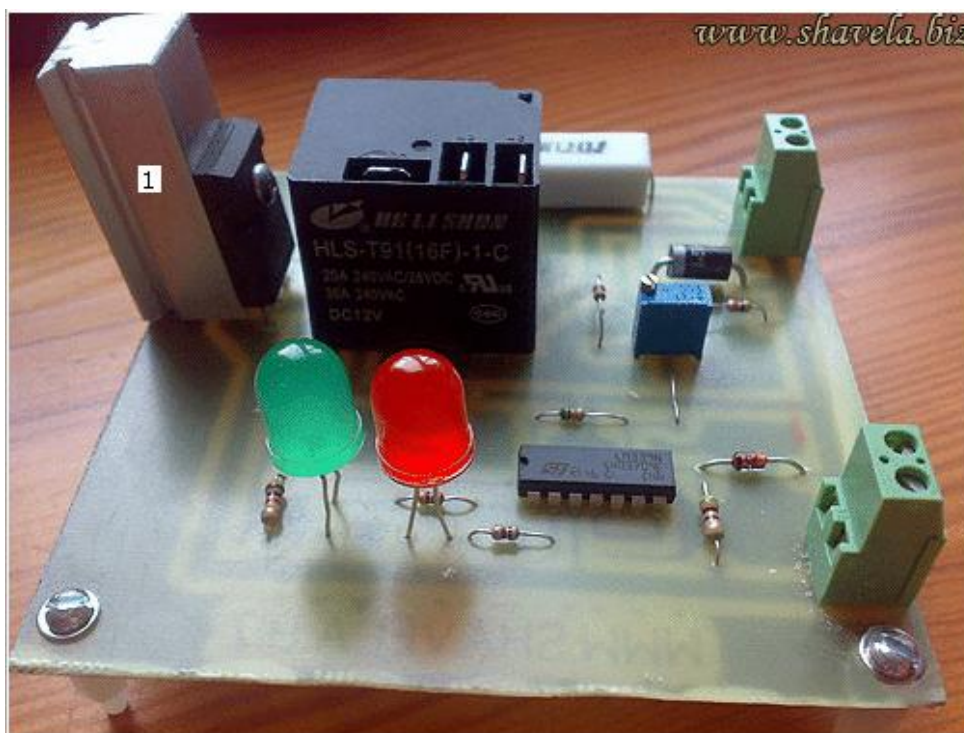


Рис. 2. Макет контроллера по схеме рис. 1

Практическая реализация рассмотренной схемы (фото на рис. 2) приведена на сайте <http://shavela.biz/modules.php?name=News&file=article&sid=15>. Судя по использованному значению $R_s = 1,2 \text{ Ом}$, контроллер рассчитан для заряда АКБ емкостью около 100 А·час. В качестве защитного диода D1 в макете установлен сдвоенный диод Шоттки SBL3045PT с радиатором (позиция 1 на рис. 2) от материнской платы IBM PC с суммарным током 30 А. На такой же ток рассчитана и контактная группа реле HLS-T91 на 12 В. Заслуживающих внимания результатов испытания не приводится.

Схема контролера аналогичного класса, но одноступенчатого типа показана на рис. 3 (<http://cxem.net/greentech/greentech18.php>). Он предназначен для заряда АКБ от трехфазного ветрогенератора. В роли компараторов выступает счетверенный операционный усилитель (ОУ) TL084, питание которого производится от стабилизатора напряжения на ИМС LM78L08.

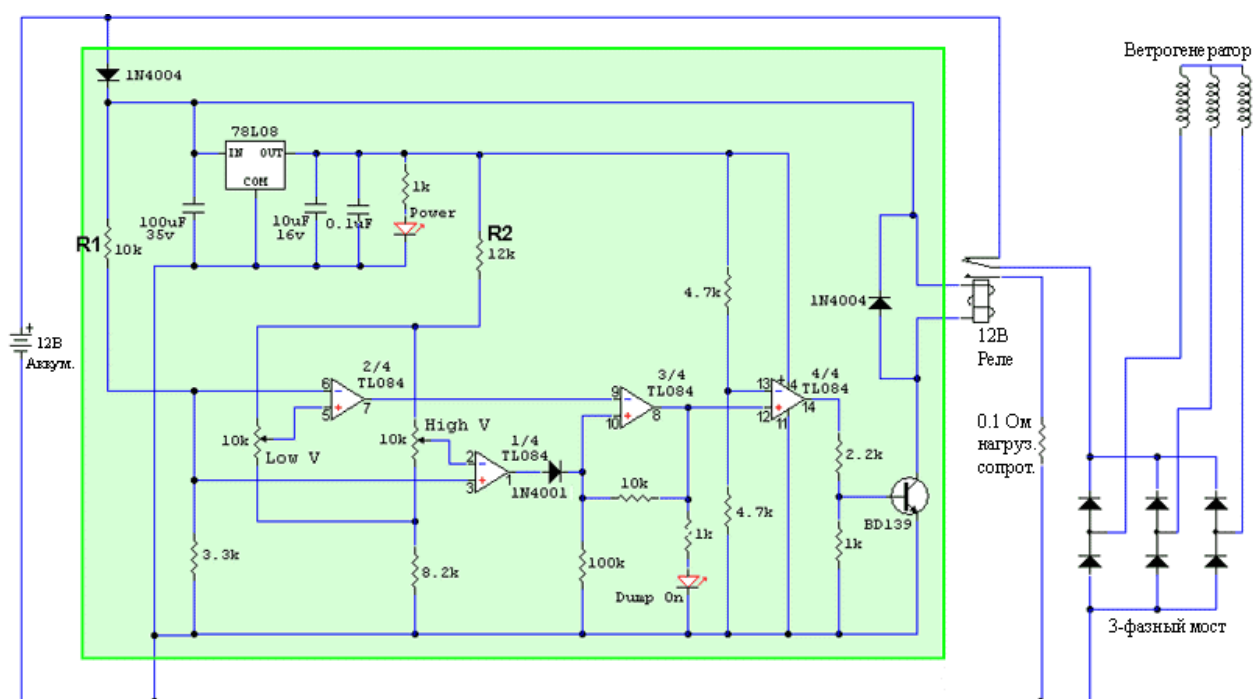


Рис. 3. Контроллер для ветрогенератора

Когда напряжение на АКБ меньше 12 В (устанавливается резистором Low V), на выходе 7 компаратора 2/4 TL084 формируется напряжение положительной полярности (логическая 1), которое после инвертирования в ОУ 3/4 TL084 в виде низкого уровня (логического 0) через ОУ 4/4 TL084 передается на базу транзистора BD139, в результате чего он закрывается, обмотка реле обесточивается и через его нормально замкнутые контакты начинается заряд АКБ. Когда напряжение на ней достигает 15 В (устанавливается резистором High V), срабатывает компаратор 1/4 TL084 и на его выходе формируется сигнал логической 1 (индицируется светодиодом Dump On), который без инверсии проходит через ОУ 3/4 TL084 и 4/4 TL084 на базу транзистора BD139, в результате чего он открывается, срабатывает реле, выход выпрямителя ветрогенератора отключается от АКБ и нагру-

жается на обязательное для таких устройств балластное сопротивление (в данном случае 0,1 Ом).

Очевидно, что рассмотренную схему при наличии соответствующей контактной группы реле нетрудно использовать и в случае, как альтернативы, солнечной батареи, а также ввести дополнительную ступень регулирования, поскольку верхний предел напряжения на АКБ в 15 В может оказаться опасным для аккумуляторов.

Рассмотренные On/Off контроллеры относятся к классу последовательных, характерным признаком которых является отключение после зарядки АКБ от СБ или подключение ее через токоограничивающие резисторы в случае многоступенчатой дозарядки и компенсационной подзарядки. Кроме такого класса контроллеров на практике находят применение и контроллеры шунтового (параллельного) типа, характерным признаком которых является шунтирование СБ вплоть до безопасной для нее полной закоротки. В качестве примера на рис. 4 приведена простая схема такого контроллера (<http://cxem.net/greentech/greentech22.php>), рассчитанная на СБ с током короткого замыкания не более 500 мА и АКБ емкостью до 20 А·час.

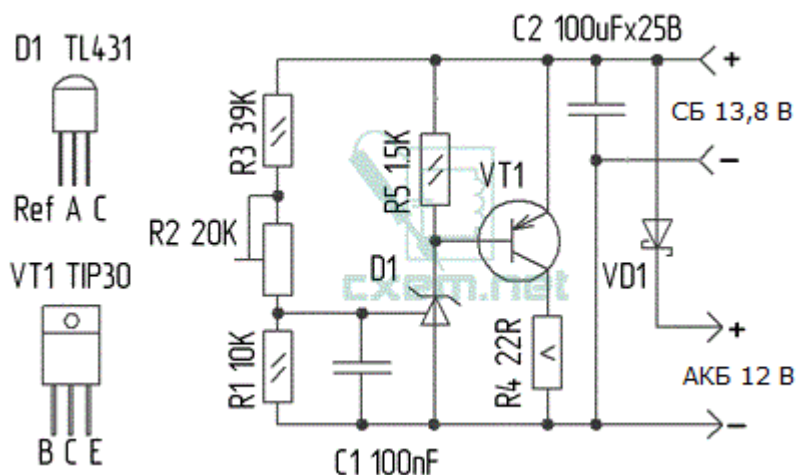


Рис. 4. Контроллер шунтового типа

СБ подключается к АКБ через защитный диод Шоттки VD1. В исходном состоянии управляемый стабилитрон D1 и транзистор VT1 закрыты. Когда в ходе зарядки напряжение на АКБ повышается, то синхронно повышается и напряжение на управляющем электроде стабилитрона D1. Когда оно достигает точки его включения (пробоя), на базе транзистора VT1 устанавливается напряжение около 2,5 В, в результате чего VT1 открывается, СБ нагружается практически на низкоомное сопротивление R4 и заряд АКБ прекращается.

Разработчик схемы рекомендует следующий порядок настройки контроллера:

1. Вместо СБ подключается лабораторный источник питания с регулируемым напряжением и током стабилизации.
2. Устанавливаются напряжение 13,8 В и ток 500-600 мА.
3. К зажимам АКБ подключается через амперметр предварительно заряженный аккумулятор 12 В.

4. Подстроечным резистором R2 добиваемся нулевых показаний амперметра. Подстройку можно контролировать и измерением напряжения на резисторе R4, а также по моменту перехода лабораторного источника в режим стабилизации тока. Например, в источнике Б5-44 такой переход сопровождается достаточно громким щелчком внутреннего реле и световой индикацией.

В заключение рассмотрим ещё одну достаточно простую схему контроллера со стабилизацией напряжения и тока заряда на ИМС LM317 (рис. 5) (<http://cxem.net/greentech/greentech13.php>), на вход которой через защитный диод D1 подключена 12-вольтовая СБ. Требуемое для зарядки напряжение 9 В устанавливается переменным резистором VR. Резистором R3 ограничивается ток заряда, а диод D2 предотвращает разряд аккумулятора.

Транзистор T1 и стабилитрон ZD служат для выключения зарядки после того, как аккумулятор будет полностью заряжен. Когда напряжение аккумулятора превышает 6,8 В, стабилитрон ZD пробивается, в результате чего транзистор T1 открывается и выходное напряжение LM317 снижается до минимального значения.

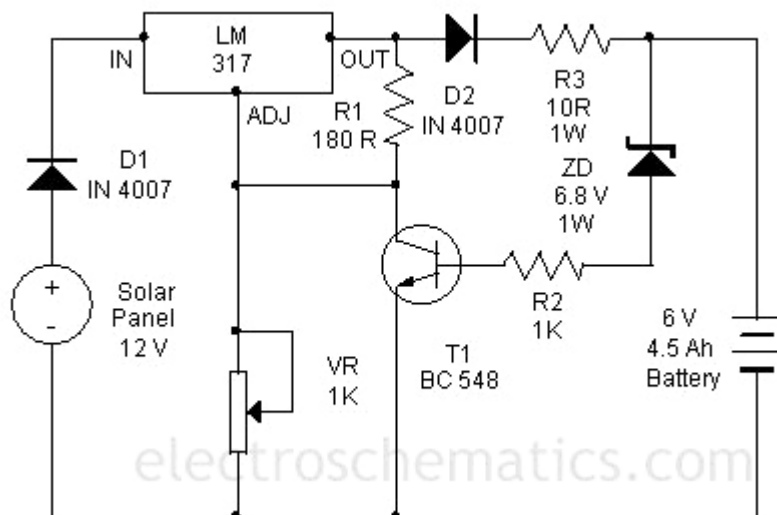


Рис. 5. Контроллер со стабилизацией напряжения и тока заряда

Разработка мощных MOSFET транзисторов с весьма малыми сопротивлениями канала в открытом состоянии (десятки мОм) перевели силовую электронику на новый уровень развития в части коммутации больших токов, повышения КПД, расширения функциональных возможностей и микроминиатюризации, поскольку отпала необходимость в использовании громоздких и тяжеловесных радиаторов и в большинстве случаев мощных электромеханических реле [2]. Эта инновация коснулась и контроллеров для заряда аккумуляторов в солнечной энергетике. Так, промышленностью выпускаются «солнечные» контроллеры с выходными токами до 80 А [3] и, очевидно, это не предел возможностей MOSFET транзисторов (особенно, n-канальных, отличающихся пониженным сопротивлением канала по сравнению с p-канальными).

рах R3 и многооборотного резистора R4 начинает срабатывать ждущий мультивибратор на ОУ 2, что вызывает мигание светодиода Д1 и включение/выключение Т2. При включении Т2 АКБ нагружается на резистор R5, что вызывает падение напряжения на АКБ и выключение Т1.

Автор статьи отмечает, что в процессе заряда АКБ диод Д1 сначала мигает длинными импульсами с короткими паузами, а в конце зарядки — короткими импульсами с длинными паузами. При этом в процессе наладки контролируется напряжение на АКБ. Далее автор предлагает более мощный вариант контроллера с выходным током до 20 А путем замены транзистора IRFD110 на IRFZ44N, диода 1N5818 на 20L15T и установкой этих элементов на теплоотводящие радиаторы. Нагрузочный резистор R5 должен иметь сопротивление 0,6 Ом и мощность 250 Вт.

Если в качестве нагрузочного резистора использовать термоэлектрический холодильник, то схема на рис. 6 представляется достаточно привлекательной. Кроме того, циклический процесс разряд/заряд может сыграть положительную роль по десульфатации пластин АКБ.

Перейдем к полнофункциональным контроллерам с MOSFET ключами. Одна из наиболее часто цитируемых в Интернете схем такого контроллера приведена на рис. 7. Фотошаблон печатной платы и монтажную схему такого контроллера можно найти по адресам:

<http://cxem.net/greentech/greentech17.php>

<http://www.windsolardiy.com/kontrolleri-zaryada-akkumulyatorov/kontroller-dlya-zaryada-akkumulyatora-ot-solnechnich-batarey.html>

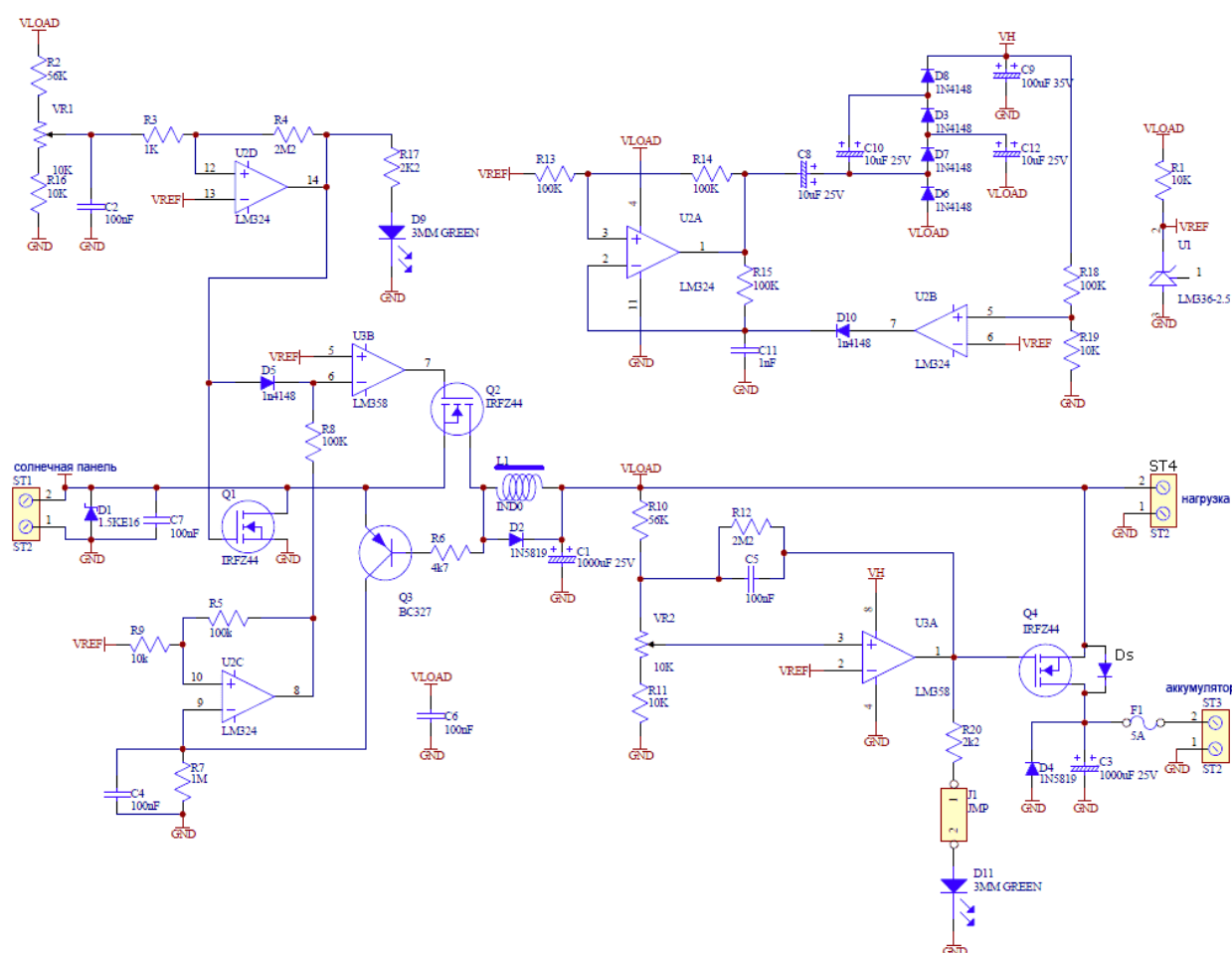


Рис. 7. Полнофункциональный контроллер смешанного типа

Поскольку схема на этих сайтах показана в весьма мелком масштабе, то для удобства читателей в табл. 2 приведен список используемых радиоэлементов.

Таблица 2. Спецификация к схеме на рис. 7

R6	4K7
R10,R2	56K
R5,R18,R8,R13,R15,R14	100K
R16,R1,R9,R11,R19	10K
R3	1K
R7	1M
R17,R20	2K2
R4,R12	2M2
VR1,VR2	10K
C1,C3	1000мкФ 25В
C7,C6,C5,C4,C2	100нФ
C9	100мкФ 35В
C8,C12,C10	10мкФ 25В
C11	1нФ
D7,D3,D8,D5,D10,D6	1N4148 (КД522А)
D4,D2	1N5819 (КДШ2105В)
D1 (сапрессор Transil [2, 3])	1.5KE16
D9	зел. LED
D11	кр. LED
Q3	BC327 (КТ685А)
Q1,Q2,Q4	IRFZ44 (КП723А)
L1	25 витков 1мм на сердечнике Т68-52А
F1	25А
U1	LM336
U2	LM324
U3	LM358

Питание контроллера поступает от АКБ (зажимы ST3, ST2) по шине VLOAD. Солнечная батарея подключается к зажимам ST1, ST2 с фильтрующим конденсатором C7 и специальным защитным диодом D1 (так называемый сапрессор Transil [2, 4]). Источник опорного напряжения VREF = 2,5 В выполнен на микромощном стабилизаторе U1 LM336-2.5 (в правом верхнем углу схемы). Для уменьшения сопротивления каналов транзисторов Q2 и Q4, которые управляются ОУ U3, его питание осуществляется повышенным напряжением 24 В (шина VH), которое формируется умножителем напряжения на ОУ U2а и U2b с набором диодов и конденсаторов (схема слева от источника VREF).

Процесс работы контроллера целесообразно начать с настройки схемы защиты АКБ от глубокого разряда, состоящей из транзистора Q4 и гистерезисного компаратора на ОУ U3а. Для этого к зажимам «Нагрузка» подключается регулируемый блок питания с установленным выходным напряжением 10,5 В и подстроечным резистором VR2 добиваются

свечения светодиода D11, после чего джампер J1 может быть удален. Заметим, что при заряде АКБ используется внутренний диод Ds транзистора Q4 (добавлен автором для наглядности). Показанный на схеме предохранитель F1 служит для защиты АКБ от короткого замыкания в цепи нагрузки, а совместно с диодом D4 — от ее ошибочного обратного включения.

Для установки максимального напряжения зарядки АКБ в том же регулируемом блоке питания выставляем выходное напряжение 13,8 В и подстроечным резистором VR1 добиваемся прекращения свечения светодиода D9, затем медленным поворотом VR1 в обратную сторону возобновляем его свечение. При этом транзистор Q1 открывается и СБ закорачивается. Одновременно через D5 и U3b закрывается Q2, что приводит к полному отключению нагрузки и АКБ от СБ, что, в свою очередь, предотвращает разряд АКБ через открытый Q1.

Если в процессе зарядки АКБ (при открытом Q2 и закрытом Q1) прекращается подача тока с СБ, то за счёт ЭДС самоиндукции дросселя L1 открывается транзистор Q3 и происходит заряд конденсатора C4 от АКБ, напряжение на котором через U2с поддерживает Q2 в открытом состоянии до тех пор, пока напряжение на C4 не станет меньше $V_{REF} = 2,5$ В. Если подача тока с СБ возобновляется, то заряд АКБ производится через внутренний диод Q2, в противном случае (например, с наступлением сумерек) процесс заряда прекращается.



Рис. 8. Макет контроллера по схеме рис. 7

Макет контроллера (рис. 8) выглядит достаточно солидно, однако схема его неоправданно усложнена, например, зачем нужно было использовать умножитель напряжения, если при заряде АКБ используется только внутренний диод MOSFET транзисторов (Q2 и Q4). Излишне также использование Q1 для закоротки СБ. Отмеченные недостатки будут более очевидны после рассмотрения не менее известной схемы на рис. 9 (<http://www.mobipower.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=230>; <http://www.xs4all.nl/~odu/solar.html>). Разработчик контроллера — Oscar den Uijl (odu@xs4all.nl).

Контроллер выполнен на микромощном счетверённом компараторе TLC339 и MOSFET транзисторах BUZ 11. Питание контроллера осуществляется от заряжаемого ак-

кумулятора ВАТ и параметрического стабилизатора на 15-вольтовом стабилитроне, который служит в основном ограничителем питающего напряжения, поскольку максимально допустимое его значение для этой ИМС составляет 16 В. В качестве источника опорного напряжения 2,5 В используется параметрический стабилизатор напряжения на микромощном стабилитроне LM385-2.5.

Для настройки контроллера целесообразно вместо аккумулятора использовать регулируемый источник напряжения. Для настройки схемы защиты аккумулятора от глубокого разряда (компаратор 2, транзистор Т3) на выходе источника устанавливается напряжение 10,5 В и резистором R2 добиваемся срабатывания компаратора 2, при котором его выходное напряжение минимально (отключение нагрузки Load; Т3 закрыт). Затем медленно увеличиваем напряжение источника до напряжения, при котором компаратор перейдет в противоположное состояние (на затворе Т3 высокий потенциал — Т3 открыт; подключение нагрузки). Автор утверждает, что подключение нагрузки происходит при напряжении аккумулятора 12,5 В, т. е. зона гистерезисной нечувствительности составляет 2 В.

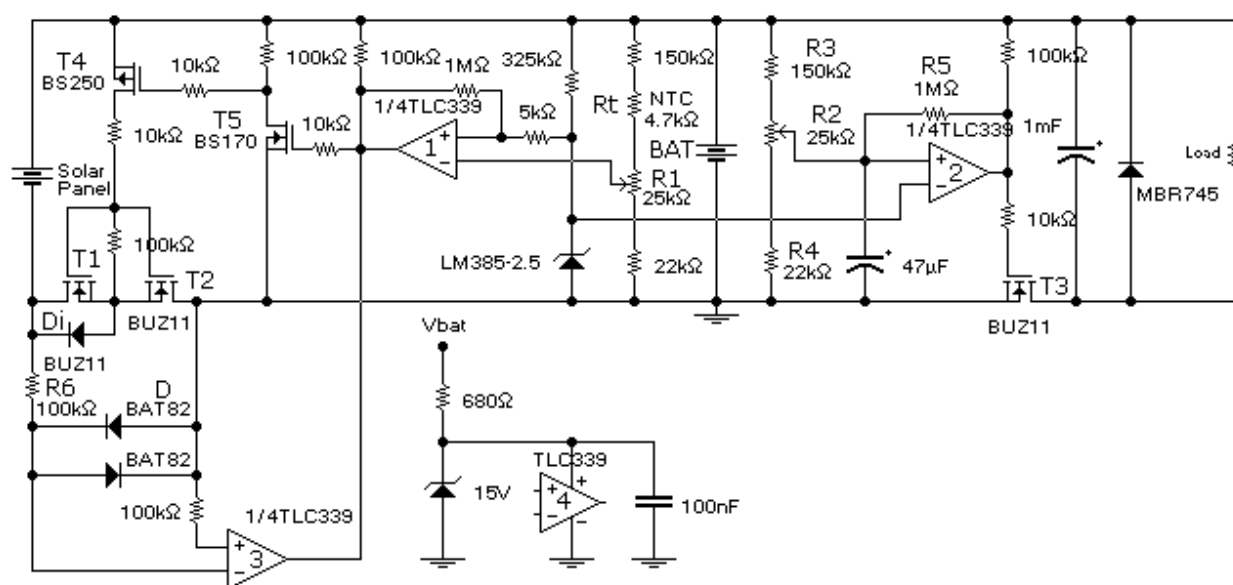


Рис. 9. Контроллер последовательного типа

Настройка схемы ограничения максимального напряжения зарядки АКБ (компаратор 1, транзисторы Т1, Т2, Т4 и Т5) производится при напряжении источника 13,8 В (рекомендация автора для герметичной АКБ). Резистором R1 добиваемся срабатывания компаратора 2, при котором его выходное напряжение минимально, что вызывает последовательное закрытие транзисторов Т5, Т4, Т1, Т2 и, следовательно, отключение АКБ от солнечной батареи. В этом действе основную роль играет транзистор Т2, поскольку в Т1 его внутренний диод Шоттки Di (добавлен автором статьи для наглядности рассуждений) открыт.

Естественно, возникает вопрос, а зачем тогда нужен Т1? Если предположить, что вследствие конечного сопротивления канала Т2 ток СБ создает на Di некое падение напряжения, которое вызывает срабатывание компаратора 3 и шунтирование выхода компа-

ратора 1, то более действенным является падение напряжения на диоде D, формируемое по цепи R6-D не только в светлое время суток, но и ночью за счет темнового тока СБ.



Рис. 10. Макет контроллера с DC/DC-конверторами и аккумуляторами

Очевидно, что для этой цели и служит схема на компараторе 3. Следует заметить, что операционные усилители (ОУ) при однополярном питании практически не работают в режиме компаратора при нулевом опорном напряжении, что было проверено автором на ОУ TL084. Возможно, что TLC339 является исключением. Попутно заметим, что для этого компаратора требуется включать на выходе сопротивление нагрузки (на схеме это 100 кОм — дополнительное усложнение схемы), поскольку на выходе каждого ОУ этой ИМС используется каскад с открытым стоком.

Для учёта температуры АКБ при её зарядке в схеме контроллера используется термосопротивление R_t типа NTC, которое, очевидно, располагается непосредственно на печатной плате, поскольку она находится в одном корпусе с двумя заряжаемыми аккумуляторами по 2,2 А·час каждый (см. рис. 10). Если АКБ располагается в другом месте, то термодатчик целесообразно сделать выносным.

3. Оригинальная разработка

Контроллер на рис. 9 был принят в качестве прототипа при разработке авторского варианта, схема которого показана на рис. 11. Контроллер выполнен на MOSFET транзисторах BUZ 11 и счетверённом операционном усилителе (ОУ) TL084 в режиме гистерезисного компаратора каждый. Потребление контроллера составляет около 7 мА, при включенных светодиодах — 14 мА.

Схема защиты аккумулятора от глубокого разряда (ОУ У1г, транзистор Т4) и схема ограничения его максимального напряжения зарядки (ОУ У1в, транзистор Т3) выполнены аналогично прототипу с тем отличием, что для индикации режимов отладки и работы мо-

гут быть использованы светодиоды Д6 и Д5, подключаемые движковыми выключателями П1в и П1б.

Главное же отличие заключается в том, что при достижении напряжения на аккумуляторе 13,8 В (как в прототипе) он переводится в режим дозаряда (вторая ступень) за счёт последовательного включения в цепь заряда резистора R_z , сопротивление которого, в зависимости от емкости АКБ, выбирается в соответствии с табл. 1. В нашем пробном варианте (АКБ типа AGM емкостью 4,5 А·час) ток дозаряда составляет примерно (если принять, что напряжение 100-процентного заряда АКБ равно 13,2 В) $(13,8 - 13,2)/56 = 100 \text{ мА}$ (2,22% от емкости АКБ).

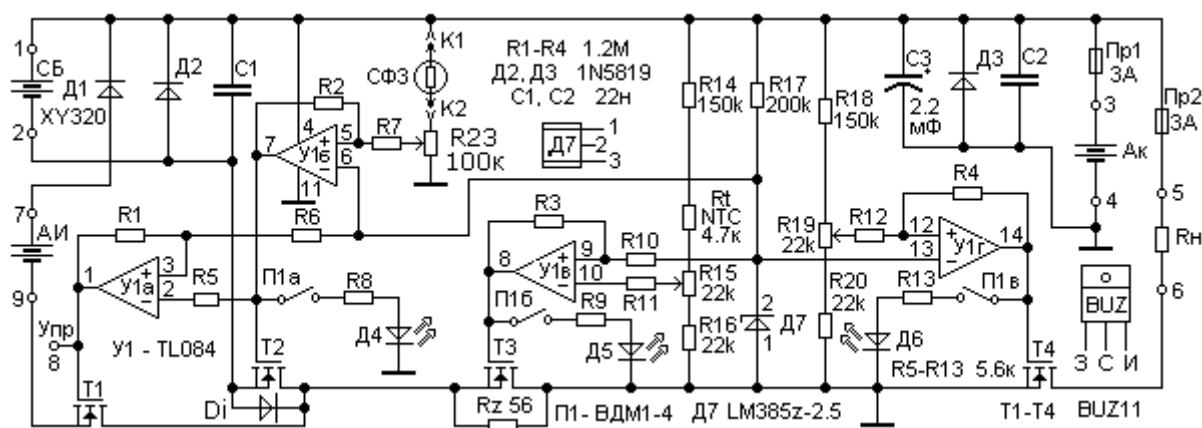


Рис. 11. Двухступенчатый контроллер (авторский вариант)

Второе отличие заключается в другом способе защиты АКБ от ее разряда через СБ в тёмное время суток или в пасмурную погоду, — за счёт применения датчика освещённости на фотосопротивлении СФЗ. В схему защиты входит также компаратор на У1б, транзистор Т2, светодиод Д4 и подстроечный резистор R23.

Третье отличие заключается в возможности автоматического подключения альтернативного источника (АИ, клеммы 7, 9) через защитный диод Д1 при нерабочем состоянии СБ (в темное время суток или в пасмурную погоду). Подключение производится транзистором Т1 и компаратором-инвертором У1а. Дополнительное управление альтернативным источником (например, включение/выключение стабилизатора АИ или его первичного источника, например коммунальной сети) может осуществляться сигналом «Упр» (клемма 8).

В случае использования в качестве АИ ветрогенератора придётся добавить еще один MOSFET транзистор, который отключал бы на его выходе обязательный для таких генераторов балластный резистор нагрузки. В этом случае возможен следующий вариант подключения: выход выпрямителя ветрогенератора подключается к клеммам 7 (+) и 9 (–); сток транзистора — к клемме 9, исток — к клемме 7 через балластный резистор нагрузки,

затвор — к выходу 7 У1б. И ещё один вариант (более безопасный): выход выпрямителя ветрогенератора подключается к клеммам 9 (–) и 7 (+) через балластный резистор; сток транзистора — к клемме 9, исток — к клемме 7, затвор — к выходу 7 У1б; между клеммами 7 и 9 дополнительно включается мощный стабилитрон вольт на 14 для защиты от перенапряжения при порывах ветра. Можно попытаться «подсмотреть» схему подключения ветрогенератора с помощью MOSFET транзистора, закрытую в самой интересной ее части рекламным щитом, по адресу http://soliaris2010.narod.ru/3dsds_motor.html.

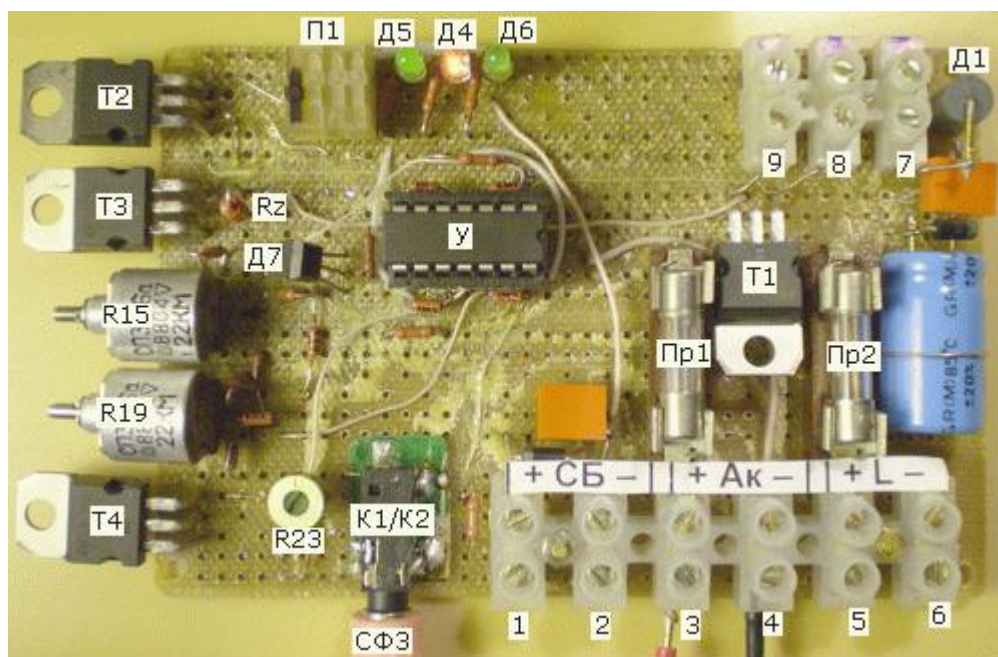


Рис. 12. Макет двухступенчатого контроллера

Конструктивно макет контроллера выполнен на отрезке макетной платы (рис. 12) и размещен в пластмассовой коробке из-под ЗИПа (рис. 13). Позиционные обозначения на макетной плате соответствуют обозначениям на схеме контроллера (за исключением R_t , который в данном случае не использовался). Надписи на крышке корпуса интуитивно понятны, за исключением, пожалуй только одной «Заряд П/Х», где П — полный (основной) заряд (светодиод Д5 включён), Х — дозаряд (Д5 выключен). Фотодатчик — выносной с соединительным кабелем (два неэкранированных проводника в полихлорвиниловой трубке) длиной около 1,5 м (рис. 14). Заметим, что контроллер может быть использован и в 24-вольтовой системе (СБ из 72 элементов и 24-вольтовая АКБ), поскольку для ОУ TL084 допустимое напряжение питания в однополярном режиме составляет 36 В.



Рис. 13. Контроллер в корпусе с откидывающейся крышкой



Рис. 14. Фотодатчик освещенности

В заключение рассмотрим результаты ознакомления с наиболее дешевым ШИМ контроллером LS0512 китайской компании EpSolar (600 руб. в интернет магазине <http://inventory.ru/product/kontroller-epsolar-ls0512/>). Это 12-вольтовый контроллер с выходным током 5 А, весом около 50 г (без упаковки), габаритными размерами 97 × 66 × 25 мм, максимальным входным напряжением с солнечных батарей 35 В, с АКБ — 16 В и максимальным сечением подключаемых проводов 2,5 мм². Диапазон рабочих температур от –35 до +55°C; коэффициент температурной компенсации –0,03 В/°С. Потребляемый контроллером ток составляет 6 мА, при включенных светодиодах 5 и 6 — около 12 мА.

На лицевой панели контроллера размещены следующие элементы управления, индикации и коммутации (рис. 15):



Рис. 15. ШИМ контроллер EpSolar-LS0512

1, 2, 3, 4 — светодиоды для индикации режимов заряда/разряда (табл. 3) и выбора типа АКБ после удержания кнопки 7 в течение 5 с (табл. 4)

Таблица 3. Система индикации режимов заряда и разряда АКБ

Светодиод №1	Светодиод №2	Светодиод №3	Светодиод №4	Состояние аккумулятора
Мигает медленно				Переразряд АКБ
Мигает быстро				Перезаряд (перенапряжение)
Состояние индикаторов уровня заряда аккумулятора во время зарядки				
☼	☼			>12,8 вольт
☼	☼	☼		>13,4 вольт
☼	☼	☼	☼	>14,1 вольт
Состояние индикаторов уровня заряда аккумулятора в процессе его разряда				
☼	☼	☼		< 13,4 вольт
☼	☼			< 12,8 вольт
☼				< 12,4 вольт

Символ ☼ обозначает, что соответствующий светодиод включён

Таблица 4. Индикация выбора типа АКБ

1	2	3	Тип аккумулятора
☼			Не обслуживаемый кислотный
☼	☼		Гелевый
☼	☼	☼	Обслуживаемый с жидким электролитом (обычный)

Символ ☼ обозначает, что соответствующий светодиод включён

5 — светодиод индикации подключения и состояния СБ: постоянное свечение — нормальный заряд; частое мигание — повышенное напряжение СБ, вызывающее перезарядку АКБ (проверить напряжение на АКБ и временно отключить СБ).

6 — светодиод индикации подключения и состояния нагрузки: не светится — нагрузка выключена; постоянное свечение — нагрузка включена (кнопкой 7); медленное мигание — перегрузка; частое мигание — короткое замыкание; в двух последних случаях нагрузка автоматически отключается и повторно включается кнопкой 7 после устранения неполадок в её цепи.

7 — кнопка включения/выключения нагрузки и выбора типа АКБ.

8, 9, 10 — клеммы для подключения СБ, АКБ и нагрузки соответственно; клеммы «+» соединены между собой, клеммы «-» — не прозваниваются, т. е. общая шина организована таким же образом, как и в двух рассмотренных выше контроллерах (с использованием n-канальных MOSFET транзисторов).

Печатная плата контроллера (рис. 16) и пайка выполнены неплохо и оставляют хорошее впечатление. К сожалению, названия большинства активных компонентов заляпаны каким-то лаком при входном контроле (или специально). Удалось установить, что микроконтроллер 1 из серии STM8S компании CТМ Электроникс (<http://stm-electronics.ru/>) (Гонг Конг). Другие обозначенные на рис. 16 компоненты: 2 — кварцевый резонатор; 3, 4, 5 — n-канальные MOSFET транзисторы; 6 — предположительно электронный предохранитель с несъемной полупрозрачной крышкой; 7 — кнопка включения/выключения нагрузки и выбора типа АКБ; 8 — 4 контакта для внутрисхемного программирования микроконтроллера (предположительно); 9 — клеммная колодка. Вообще схема достаточно сложная: в ней насчитывается около 48 резисторов (включая и термосоротивление), 18 конденсаторов, 19 диодов, 15 транзисторов и 4 ИМС, одна из которых опознана (микроконтроллер 1).

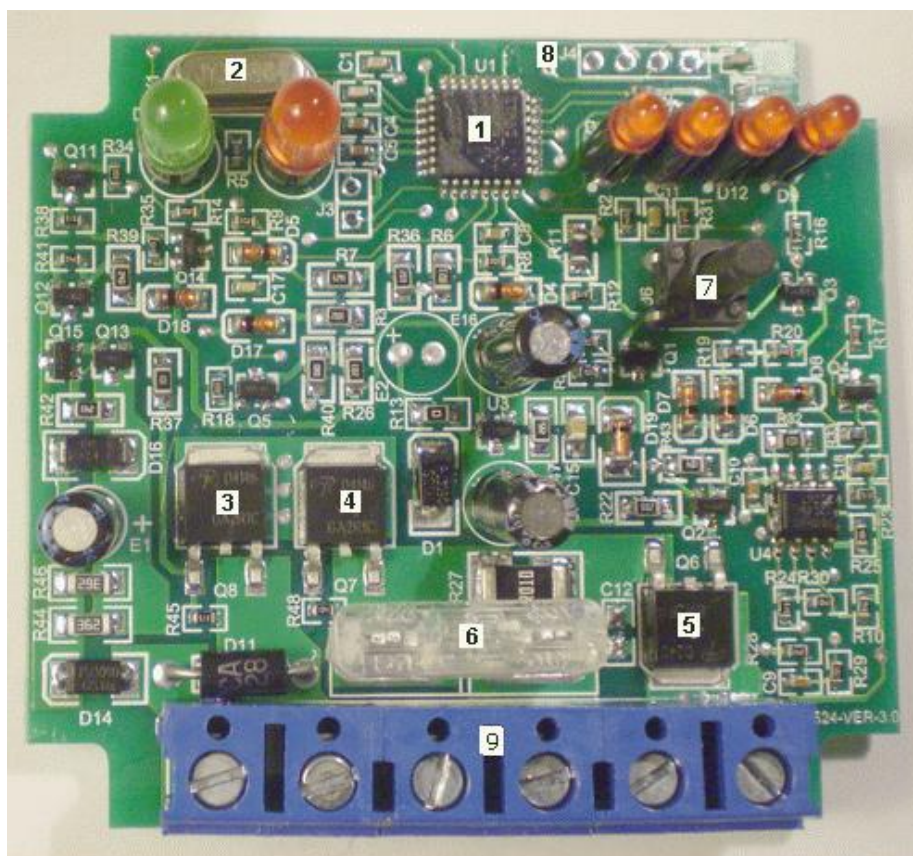


Рис. 16. Плата ШИМ контроллера

Для расширения функциональных возможностей ШИМ контроллера была разработана приставка (рис. 17 и 18), которая позволяет использовать для зарядки АКБ не только СБ, но и альтернативный источник АИ, о котором речь шла ранее. Кроме того, в приставке размещаются рекомендуемые компанией EpSolar плавкие предохранители Пр1 и Пр2 в цепи АКБ и нагрузки.

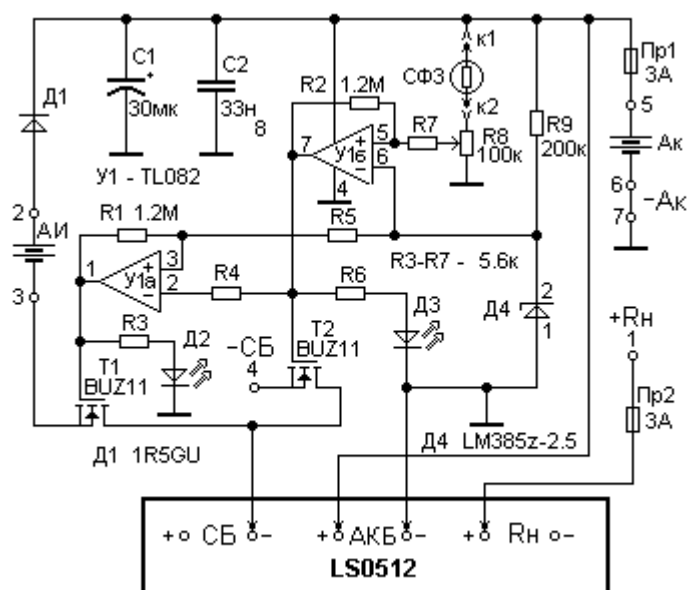


Рис.17. Приставка к ШИМ контроллеру

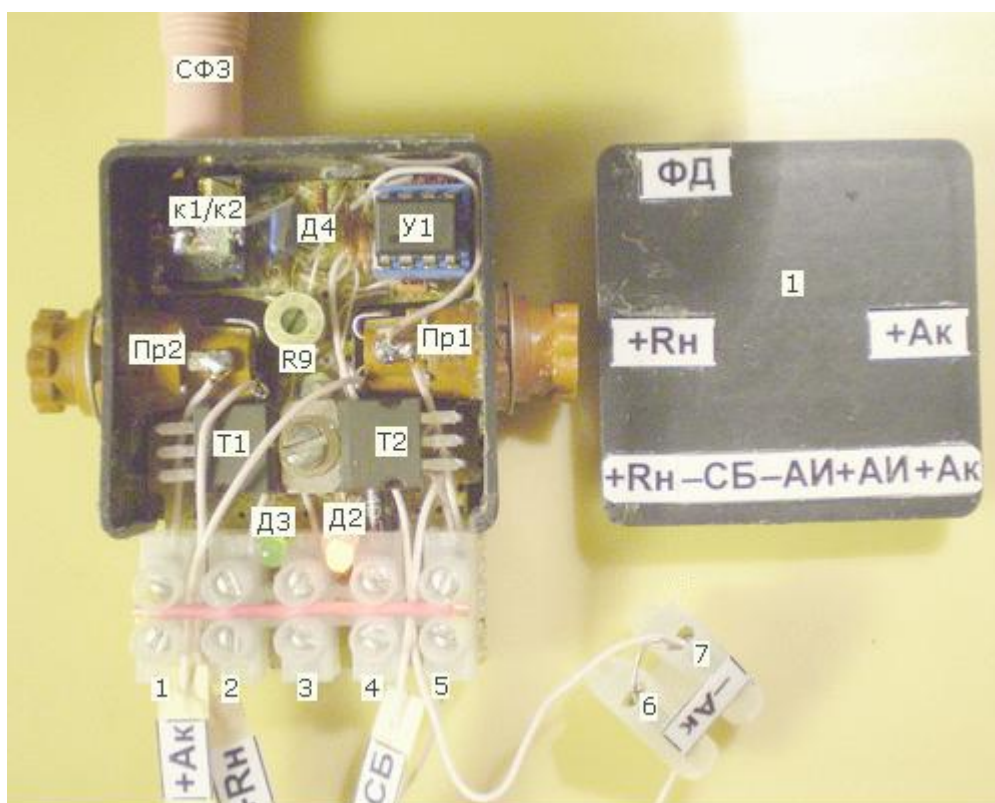


Рис. 18. Макет приставки

Приставка выполнена на двухканальном ОУ TL082. Как нетрудно видеть из сравнения рис. 11 и 17, ее схема полностью повторяет соответствующую часть схемы на рис. 11. Что же касается LS0512, то при использовании приставки

1. к его клемме –СБ подключаются стоки транзисторов Т1 и Т2, а отрицательный зажим СБ — к клемме 4 приставки;
2. +АКБ подключается к клемме 5 приставки и через предохранитель Пр1 — к шине питания приставки и к клемме +АКБ контроллера;
3. –АКБ к клемме 6 или 7 приставки и –АКБ контроллера;
4. положительный зажим нагрузки (+Rн) — к клемме 1 приставки и через предохранитель Пр2 — к клемме +Rн контроллера;
5. +СБ и –Rн — к одноимённым клеммам контроллера.

Обстоятельства сложились так, что сначала в коробке приставки на рис. 18 (1 — ее верхняя крышка с наименованиями компонентов) располагались только предохранители и 4-клемная колодка. Когда же родилась идея использования альтернативного источника для заряда АКБ, то за неимением другой коробки пришлось использовать «старую» и поскольку в ней не хватало места под 6-клеммную колодку, то для подключения минусового зажима АКБ пришлось использовать выносную сдвоенную колодку 6, 7.

Алгоритм работы контроллера LS0512 состоит из следующих этапов (диаграмма на рис. 19 и численные значения напряжений в табл. 5):

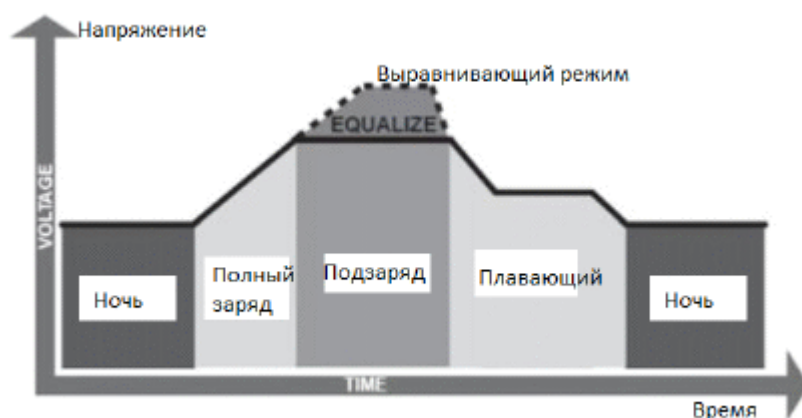


Рис. 19. Алгоритм работы контроллера LS0512 при зарядке АКБ

Таблица 5. Режимы зарядки аккумуляторов

Значения напряжений в зависимости от типа аккумулятора, вольт			
Тип аккумулятора	Гелевый	Необслуживаемый	Обслуживаемый
Защитное отключение из-за перенапряжения	16	16	16
Предел напряжение заряда	15,5	15,5	15,5
Порог возобновления работы после защитного отключения из-за перенапряжения	15	15	15
Напряжение режима выравнивания	—	14,6	14,8
Напряжение режима подзарядки	14,2	14,4	14,6
Напряжение плавающего заряда	13,8	13,8	13,8
Возобновление режима подзарядки	13,2	13,2	13,2
Порог возобновления работы после отключения из-за переразряда	12,6	12,6	12,6
Порог прекращения предупреждения о переразряде	12,2	12,2	12,2
Напряжение предупреждения о переразряде	12	12	12
Порог защитного отключения из-за переразряда	11,1	11,1	11,1
Предельное напряжение разряда	10,8	10,8	10,8
Длительность режима выравнивания	—	2 часа	2 часа
Длительность режима подзарядки	2 часа	2 часа	2 часа

1. Полный или основной заряд (Bulk) — заряд максимально возможным током солнечной батареи (но не выше максимально допустимого для данной АКБ) при напряжении 15 В для всех типов аккумуляторов; обеспечивает 60-80% заряда АКБ.

2. Подзаряд (Absorbion) — дозаряд до 100% при заданном напряжении на АКБ и времени 120 мин: 14,2 В — для гелевых АКБ (GEL); 14,4 В — для необслуживаемых АКБ (герметичных AGM и Flooded-аккумуляторов с жидким электролитом и рециркуляционными клапанами для рекомбинации газов); 14,6 В — для обслуживаемых (обычных заливных с жидким электролитом).

3. Плавающий (поддерживающий) заряд (Float) — поддержка АКБ в полностью заряженном состоянии с компенсацией саморазряда и других дестабилизирующих факторов (13,8 В для всех типов АКБ).

4. Выравнивание (Equalization) — только для обслуживаемых АКБ (14,8 В) и, возможно, мало обслуживаемых Flooded-аккумуляторов (14,6 В). На этом этапе выравниваются напряжения на отдельных банках АКБ и происходит очищение пластин от сульфатов с одновременным перемешиванием электролита. Процесс выравнивания сопровождается большим газовыделением (водород + кислород) и для предотвращения взрыва необходимо предусмотреть вентиляцию помещения аккумуляторной и устранение всех источников искрения. Для герметичных GEL и AGM аккумуляторов процесс выравнивания недопустим из-за возможного высыхания электролита и сокращения по этой причине срока их службы. Поэтому при выборе типа аккумулятора (табл. 4) в случае AGM целесообразно выбирать «Гелевый».

Обычно выравнивание производится по определенному графику, например, раз в 1 или 2 месяца. В этом случае в табл. 4 после 5-секундного удержания кнопки 7 (см. рис. 15) этой же кнопкой выбирается тип аккумулятора «Обслуживаемый...». Кроме того, необходимо

- отключить от контроллера нагрузку;
- проверить уровень электролита в каждой банке АКБ (он должен быть чуть выше пластин) и при необходимости долить, но только дистиллированную воду;
- слегка прикрыть крышки всех банок, поскольку при «кипении» будет разбрызгиваться электролит;
- подключить аккумулятор к клеммам АКБ контроллера;
- подключить источник питания к клеммам СБ контроллера.

Из приведенных данных видно, что контроллеры последовательного типа по сравнению с параллельными (шунтовыми) обладают тем преимуществом, что позволяют заряжать аккумуляторы не только от солнечных батарей, но и от любых других источников постоянного тока.

Здесь важно отметить, что первым подключается к контроллеру аккумулятор и только потом солнечная батарея или ветрогенератор, поскольку контроллер, во-первых, должен быть сначала приведен в рабочее состояние и, во-вторых, аккумулятор служит своеобразным фильтром при бросках зарядного напряжения, особенно в случае ветрогенератора. При отключении же контроллера порядок отключения обратный: в последнюю очередь отключается аккумулятор.

Напряжение разряженного аккумулятора 10,5 В означает, что он находится в режиме глубокого разряда (100 % разряда), которого следует избегать, особенно для автомобильных АКБ. И самое страшное для него — сохранять его в таком состоянии сравнительно длительное время. После такого разряда его необходимо немедленно зарядить, если нет желания расстаться с ним навсегда.

Из приведенных данных по режимам заряда и разряда АКБ нетрудно заметить, что такие режимы делятся на два подрежима. Так, например автор схемы на рис. 9 отмечает, что отключение нагрузки происходит при напряжении на АКБ 10,5 В, а ее подключение — при 12,5 В. Это становится возможным благодаря гистерезисной характеристике компаратора, обладающего двумя уровнями срабатывания. Случай такого компаратора на ОУ с двухполярным питанием рассмотрен в работе [5]. Здесь мы попытаемся исследовать работу компаратора с однополярным питанием с использованием его приближенных моделей на рис. 20 и моделирующей программы Electronics Workbench.

Схема модели одинакова как для случая отключения нагрузки в режиме разряда АКБ, так и ее заряда, и зависит от способа подключения опорного источника напряжения U_{op} и имитатора АКБ, которое осуществляется сдвоенным ключом 1, управляемого одной клавишей клавиатуры. В качестве ОУ использована модель Ideal с установкой в её диалоговом окне напряжения питания (и насыщения) $U_{sw+} = +12$ В и $U_{sw-} = -0,01$ В с целью максимального приближения к однополярному ОУ на рис. 11 при удовлетворительной работе использованной модели ОУ. Роль имитатора АКБ выполняет функциональный генератор напряжения (рис.20, в) в режиме треугольного напряжения частотой 1 Гц и коэффициентом заполнения (DUTY CYCLE) 50%. За счёт положительного смещения $OFFSET = 6$ В амплитуда однополярного треугольного сигнала составляет 12 В.

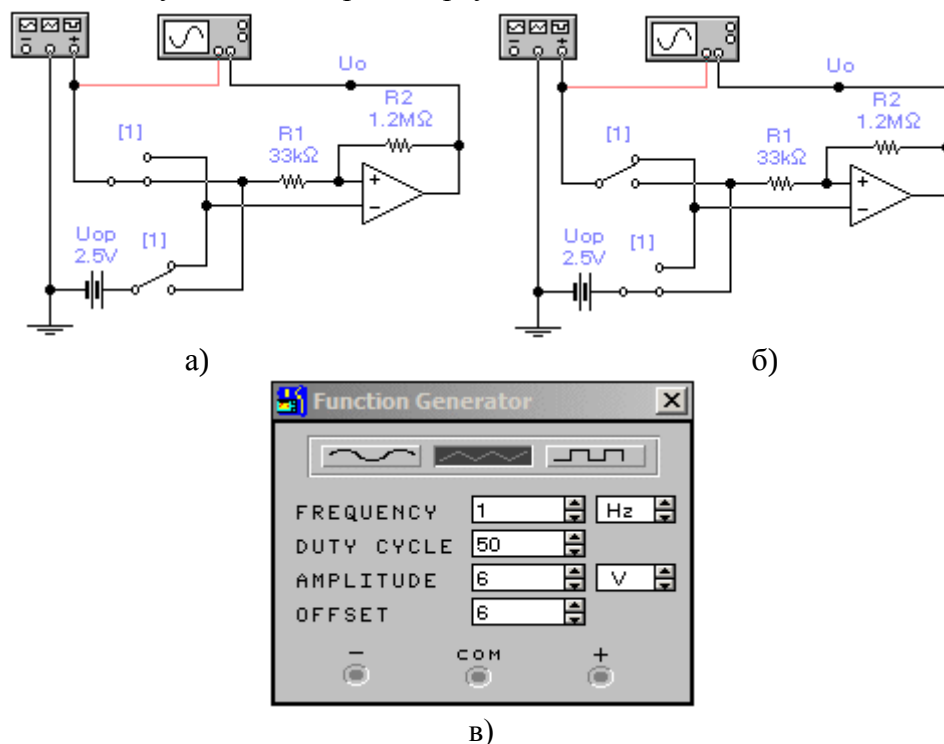


Рис. 20. Модели компаратора нагрузки (а) и заряда (б) с настройками функционального генератора (в)

Гистерезисная характеристика компаратора формируется за счёт введения положительной обратной связи (ПОС) путём подачи выходного напряжения U_o через делитель на резисторах $R1$ и $R2$ на неинвертирующий вход ОУ. Поскольку коэффициент ПОС

$$Kn = R1/(R1 + R2)$$

определяет не только помехозащищённость компаратора, но и пороги его срабатывания, что представляет в нашем случае наибольший интерес, то имеет смысл проверить их зависимость от КП.

Выберем в качестве варьируемой величины сопротивление резистора $R1$. Для компаратора на ОУ У1г (отключение/подключение нагрузки) сопротивление этого резистора может быть приблизительно определено по очевидной формуле (см. схему на рис. 11):

$$R1 = (R18 + 0,5 R19) \parallel (R20 + 0,5 R19) + R12 = 33 \text{ кОм},$$

где $\parallel$ — значок параллельного включения указанных в скобках цепочек резисторов.

При этом $Kn = R1/(R1 + R2) = 33/1233 = 0,027$.

При высоком уровне выходного напряжения $U_o = U_{sw+}$, которое передается на неинвертирующий вход ОУ (схема на рис.20, а) через делитель $R1$ - $R2$, опорное напряжение U_{op} возрастает на величину $\Delta U_1 = (U_{sw+} - U_{op}) \cdot K_n = (12 - 2,5) \cdot 0,027 = 0,256 \text{ В}$. В результате компаратор будет переключаться из состояния с высоким уровнем выходного напряжения при новом значении $U_{on} = U_{op} + \Delta U_1 = 2,5 + 0,256 = 2,756 \text{ В}$.

Как только входное напряжение превысит опорное напряжение U_{on} , выходное напряжение компаратора начнет уменьшаться и через резистор $R2$ передаваться на неинвертирующий вход, стимулируя дальнейшее падение выходного напряжения. За счет положительной обратной связи этот процесс происходит лавинообразно и компаратор быстро переключается в противоположное состояние. Поскольку на выходе компаратора действует теперь напряжение $U_o = U_{sw-}$, на его вход по цепи обратной связи передается напряжение $\Delta U_2 = -(U_{sw-} + U_{op}) \cdot K_n = -(0,01 + 2,5) \cdot 0,027 = -0,068 \text{ В}$. В этом случае устанавливается новое опорное напряжение для состояния с низким выходным уровнем $U_{off} = U_{op} + \Delta U_2 = 2,5 - 0,068 = 2,432 \text{ В}$. При этом ширина петли гистерезиса $\Delta U = U_{on} - U_{off} = \Delta U_1 - \Delta U_2 = 0,256 + 0,068 = 0,324 \text{ В}$ и может меняться варьированием коэффициента передачи K_n .

Результаты моделирования показаны на рис. 21, где обозначено:

$U_o = VB1 = 12 \text{ В}$ — выходное напряжение У1г, равное напряжению питания U_{sw+} и измеряемое в канале В осциллографа в точке установки визирной линейки 1; поступает на затвор $T4$ и переводит его в открытое состояние;

$U_{on} = VA1 = 2,64 \text{ В}$ — первый уровень срабатывания компаратора, вызывающий включение (Вкл) транзистора $T1$ и измеряемый в канале А осциллографа в точке установки визирной линейки 1;

$U_{off} = VA2 = 2,16 \text{ В}$ — второй уровень срабатывания компаратора, вызывающий выключение (Выкл) транзистора $T1$ и измеряемый в канале А осциллографа в точке установки визирной линейки 2; при этом напряжение на затворе $T1$ равно $VB2 \approx -0,01 \text{ В}$, из-

меряемое в канале В осциллографа в точке установки визирной линейки 2 и равное установленному напряжению питания U_{sw} – ОУ У1;

U_{ea} — эквивалентное напряжение АКБ;

$VA1 - VA2 = -0,48$ — ширина гистерезиса.

Из сравнения результатов расчёта и моделирования видно, что в последнем случае они несколько завышены, что объясняется, на наш взгляд, несовершенством модели компаратора и АКБ.

Для других значений сопротивления $R1$ результаты моделирования приведены в табл. 6. Измерения при указанном на рис. 11 значении сопротивления $R12$ показали, что подключение нагрузки происходит при напряжении 12,3 В, а отключение — при 10,8 В (гистерезис 0,5 В, что близко к его значению в табл. 6).

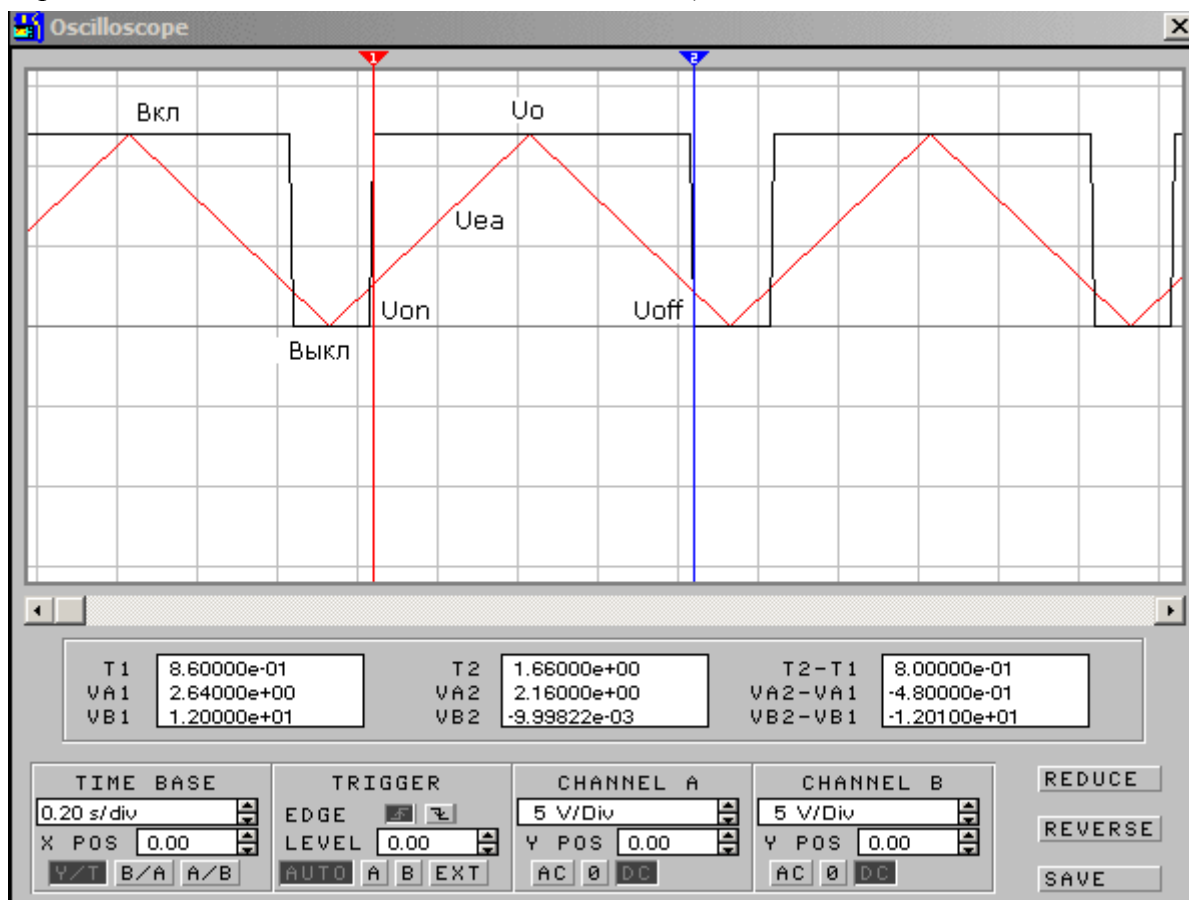


Рис. 21. Осциллограммы сигналов в компараторе нагрузки

Таблица 6. Параметры сигналов компаратора отключение/подключение нагрузки (ОУ У1г на рис. 11)

R1, кОм	Кп	Uon, В	Uoff, В	Гистерезис, В
5,6	0,0046	2,64	2,4	–0,24
10	0,0083	2,64	2,4	–0,24
18	0,0148	2,64	2,16	–0,48
33	0,027	2,64	2,16	–0,48
50	0,04	2,64	1,92	–0,72
100	0,077	2,88	1,68	–1,2
200	0,143	3,12	0,72	–2,4

Аналогичным образом получаем результаты и для компаратора заряда АКБ (ОУ У1в на рис. 11), представленные в табл. 7 и осциллограммами на рис. 22. Измерения показали, что приемлемое на практике значение напряжения на аккумуляторе в 13,4 В, при котором он подключается к зарядному устройству, и 14,4 В при отключении (гистерезис около 1 В) достигается при $R10 = 20 \text{ кОм}$ (вместо 5,6 кОм на рис. 11). При этом $Kп = (R10 + R7d)/(R10 + Rс + R3)$, где $Rс$ — статическое сопротивление стабилитрона Д7, которое может быть рассчитано следующим образом. При напряжении стабилизации Д7 $Uс = 2,5 \text{ В}$ и напряжении АКБ $Uа = 12,5 \text{ В}$ ток стабилизации составляет (см. рис. 11) $Iс = (Uа - Uс)/R17 = 10/200000 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ А}$. В таком случае $Rс = Uс/Iс = 20 \text{ кОм}$ и $Kп = (20 + 20)/(20 + 20 + 1200) = 0,0323$, что примерно соответствует гистерезису в 0,7 В табл. 7, т. е. заниженное на 0,3 В по сравнению с практически полученным. Такое различие объясняется несовершенством модели АКБ и неопределенностью поведения в динамике стабилитрона Д7, который представляет собой достаточно сложную ИМС (см. <http://datasheet.su/datasheet/ON%20Semiconductor/LM385Z-2.5>) с динамическим сопротивлением 0,6...1 Ом.

Таблица 7. Параметры сигналов компаратор заряда АКБ (ОУ У1в на рис. 11)

R1, кОм	Kп	Uon, В	Uoff, В	Гистерезис, В
5,6	0,0046	2,4	2,64	0,24
10	0,083	2,4	2,64	0,24
18	0,0148	2,4	2,88	0,48
33	0,027	2,4	2,88	0,48
50	0,04	2,16	2,88	0,72
100	0,077	2,16	3,36	1,2
200	0,143	1,92	4,08	2,16

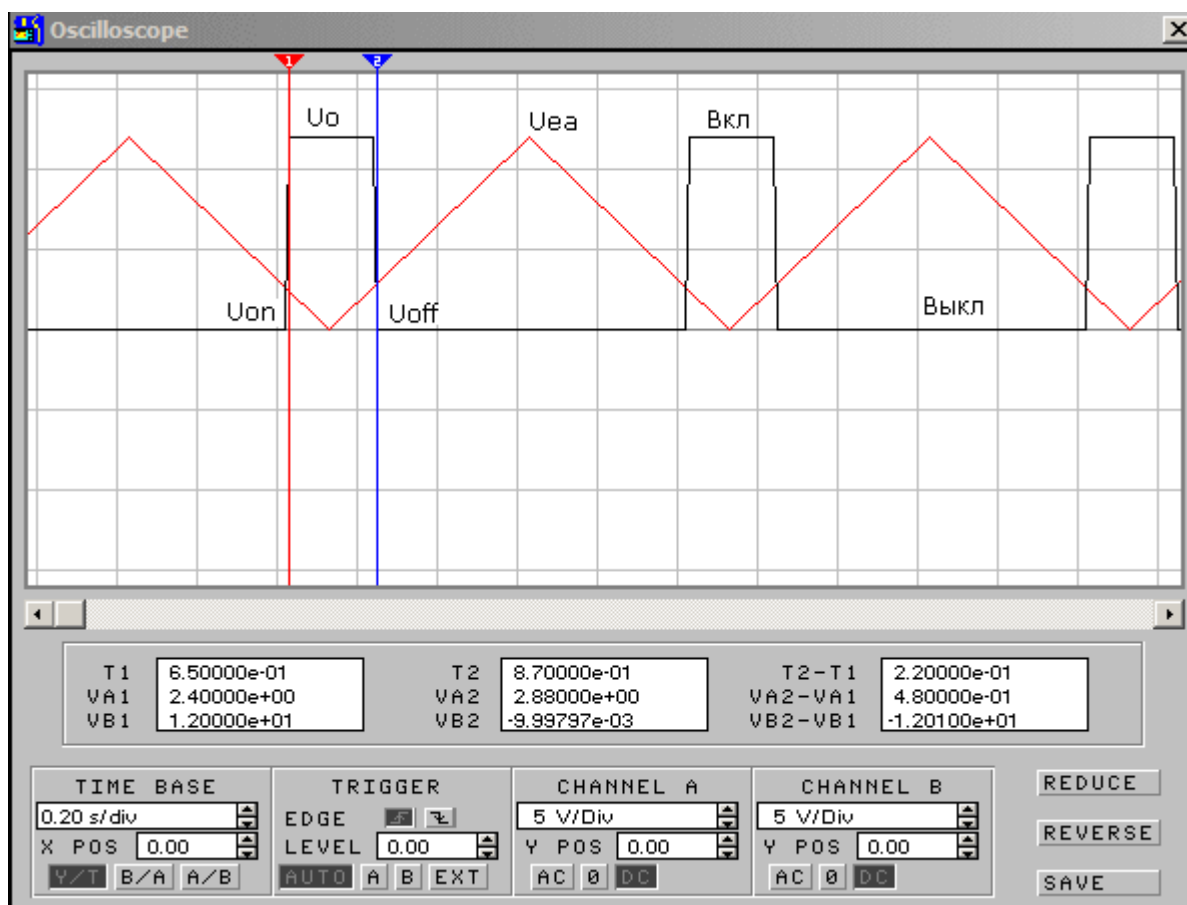


Рис. 22. Осциллограммы сигналов в компараторе заряда

Из сравнения данных табл. 6 и 7 видно, что зависимость уровней срабатывания от K_p имеет противоположный характер: если в первом случае (табл. 6) U_{on} растёт с увеличением K_p , то во втором случае (табл. 7) он уменьшается, что объясняется противоположным включением (по отношению к выходным зажимам ОУ) источника опорного и входного напряжения (см. также знаки ширины гистерезиса). Аналогичная картина наблюдается и для уровня U_{off} , однако при этом зона гистерезиса с ростом K_p растёт и имеет практически одинаковые значения. Полученные результаты имеют качественный характер, однако они позволяют выбрать желательное направление настройки такого типа контроллеров путём подбора сопротивлений резисторов R_5 , R_7 , R_{10} и R_{12} .

Заметим, что при ориентировочных расчетах режимов компараторов на ОУ TL084 в схемы на рис. 11 необходимо учитывать, что для этого ОУ условные значения U_{sw+} и U_{sw-} (напряжения, поступающие на затворы транзисторов BUZ 11) зависят от значения питающего напряжения. Путём измерения установлено, что при напряжении питания от +15 до +13,3 В U_{sw+} меняется в пределах от +13,7 до +12 В, а U_{sw-} остается на уровне +1,4 В, что вполне достаточно для обеспечения нормальной работы BUZ 11, у которого напряжение отсечки (параметр $V_{GS(TH)}$) находится в пределах 2,1...4 В.

Отличительной особенностью ШИМ или PWM контроллеров является использование принципа широтно-импульсной модуляции (Pulse-Width Modulation — PWM), заключающегося в управлении средним значением напряжения на нагрузке путём изменения [коэффициента](#) заполнения $D = T_u/T$ импульсной последовательности, формируемой MOSFET транзистором под управлением микроконтроллера (МК). Таким образом, выходное напряжение солнечной батареи U_{pv} и напряжение U_{ak} на аккумуляторе связаны соотношением:

$$U_{ak} = D \cdot U_{pv} = (T_u/T) \cdot U_{pv},$$

где T_u — регулируемая длительность импульса при постоянном периоде их следования.

Практически во всех описаниях работы ШИМ контроллеров утверждается, что на первом этапе заряда АКБ на нее подается максимальное напряжение СБ (15 В для всех АКБ в табл. 5) и только после достижения напряжения, например, на гелевой АКБ 14,2 В, на заключительном этапе включается ШИМ режим дозаряда. Если выбрать подобный режим для компаратора на $U_{1в}$ с гистерезисом $15 - 14,2 = 0,8$ В, то по миганию диода Д5 будем наблюдать своеобразный ШИМ дозаряд АКБ и в контроллере на рис. 11. Это видно также из осциллограмм на рис. 22.

Что касается MPPT контроллеров с поиском точки максимальной мощности (MPPT — Maximum Power Point Tracking), отличающихся неоправданно высокой ценой, то для их успешного применения требуется дополнительное исследование оптимального соотношения цена–эффективность–мощность солнечной электростанции [3].

4. Заключение

1. Составлен краткий обзор схемотехнических решений по аналоговым контроллерам солнечных батарей и других альтернативных источников питания. Сравнительно

большое количество публикаций по таким контроллерам показывает большой интерес читателей к таким контроллерам из-за простоты их схемы и настройки.

2. Разработана и испытана схема контроллера, отличающаяся от прототипа введением режима дозаряда (вторая ступень), более надежной схемой отключения аккумулятора в темное время суток или при непогоде за счёт применения датчика освещённости на фотосопротивлении и возможностью в этом случае автоматического подключения альтернативного источника для заряда аккумуляторной батареи (АКБ).

3. Разработана и испытана модель, имитирующая работу контроллера в режимах заряда аккумулятора и отключение/подключение нагрузки. Показано, что аналоговые контроллеры по принципу работы близки к промышленным ШИМ контроллерам (с широтно-импульсной модуляцией — ШИМ), но значительно проще их по схемотехнической реализации (на примере ШИМ контроллера LS0512 компании EpSolar). Модель позволяет выбрать правильное направление настройки такого типа контроллеров в указанных режимах.

4. Разработана и испытана схема приставки к ШИМ контроллеру LS0512, которая позволяет автоматически подключать альтернативный источник для заряда аккумулятора при неблагоприятных условиях работы солнечных батарей. Поскольку отключение СБ в таких условиях предусмотрено во всех промышленных контроллерах, то их модернизация заключается только в использовании дополнительного полевого транзистора и клемм для подключения альтернативного источника заряда АКБ.

Список литературы

1. Байерс Т. 20 конструкций с солнечными элементами: Пер. с англ.— М.: Мир, 1988, 197 с. [T.J. Byers. 20 Selected Solare Projects Making Photovoltaics Work For You: Micro Text Publication, Inc. Previfice-Hall, Inc., Englewood Clifts, New Jersey 07832, 1984, 197 p.]
2. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. М.: СОЛОН-Пресс, 2005, 416 с.
3. Карлащук В.И. [Элементы солнечных электростанций](http://engbul.bmstu.ru/doc/706074.html) // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный научно-технический журнал. 2014, №04, 31 с. URL. <http://engbul.bmstu.ru/doc/706074.html>
4. Радиолюбителям: полезные схемы. Книга 5 / Шустов И. П. М.: СОЛОН-Пресс, 2003, 240 с.
5. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC / Том I. Моделирование элементов аналоговых систем на Electronics Workbench и MATLAB. Изд. 6-е пер. и доп. М.: Солон-Пресс, 2006, 672 с.