

Построение систем резервного питания на основе суперконденсаторов. Схемные решения от Silego

Р. Рамасвейми, М. Патрик, Перевод: В.Гавриков

Суперконденсаторы (суперконденсаторы, ультраконденсаторы, ионисторы) могут отличаться формой, размерами, электрическими и эксплуатационными характеристиками. Например, эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) для некоторых моделей достигает нескольких десятков Ом, но в то же время они обладают компактными размерами и невысокой стоимостью, что позволяет применять их в маломощных электронных устройствах. Для других суперконденсаторов ESR составляет всего 50 мОм, что делает их пригодными для систем с большими импульсными нагрузками. Для построения надёжных и эффективных устройств разработчики должны учитывать все характеристики и особенности конкретных приложений. Забегая вперёд, стоит также отметить, что важно создать не просто законченное устройство, а устройство с возможностью последующей модификации с учётом быстроразвивающихся технологий суперконденсаторов. То есть речь идёт о разработке гибкой платформы, вокруг которой в дальнейшем можно создавать различные адаптированные решения.

В статье предлагается инструментарий или скорее набор готовых схем, позволяющих решать конкретные задачи. Каждое из решений включает в себя схемотехническую реализацию и проект-конфигурацию для программируемой микросхемы GreenPAK. Представленные проекты-конфигурации выполнены в среде GreenPAK Designer с использованием SLG46537V — программируемой ИС со смешанными сигналами. Однако, эти проекты могут быть перенесены на другие модели с минимальными изменениями. Такой подход позволяет разработчику выбирать те или иные актуальные части проекта и использовать их в своём устройстве.

Балансировка суперконденсаторов

Как известно, суперконденсаторы достаточно чувствительны к перенапряжениям. Например, при создании батарей из суперконденсаторов перенапряжения могут быть вызваны несогласованностью характеристик отдельных ячеек. Суперконденсаторы с рабочим напряжением 5,5 В, часто представляют собой пару последовательно включённых суперконденсаторов с рабочим напряжением 2,7 В. Чтобы каждая из ячеек при этом находилась в пределах допустимого диапазона напряжений, необходимо выполнять балансировку.

В простейшем случае для балансировки суперконденсаторов используются обычные резисторы. Номиналы согласующих сопротивлений выбирают одинаковыми для всех ячеек. К сожалению, применение резисторов неизбежно приводит к дополнительным потерям мощности. Кроме того, номиналы согласующих сопротивлений значительно уменьшаются при увеличении рабочих напряжений. Например, суперконденсаторы 1 Ф 5,5 В DMF4B5R5G105M3DTA0 от Murata при работе с максимальным напряжением 4,5 В требуют балансировочных резисторов 47 кОм, но, если максимальное напряжение составляет 5 В, величина сопротивления уменьшается до 4,7 кОм. Альтернативой балансировочным резисторам являются активные схемы балансировки, которые, как правило, строятся на базе ОУ и нескольких МОП-транзисторов. На рис. 1 показан ещё один альтернативный подход, который предполагает использование микросхем смешанных сигналов Silego GreenPAK.

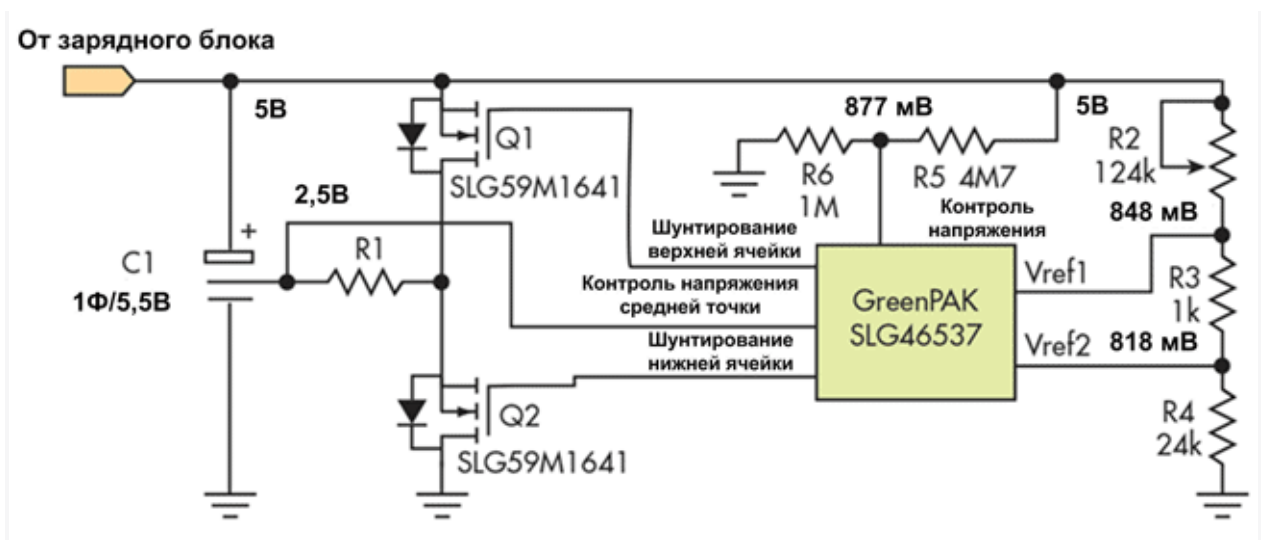


Рис. 1. Схема балансировки ячеек

На рис. 2 изображена схема внутренней конфигурации микросхемы SLG46537V. SLG46537V контролирует общее состояние заряда суперконденсатора. В схеме используется делитель напряжения. Это необходимо по двум причинам:

- Напряжение питания (Vdd) микросхемы SLG46537 может быть ниже, чем напряжение суперконденсатора при полном заряде;
- опорное напряжение встроенных компараторов АСМР2 и операционных усилителей не должно превышать 1,2 В.

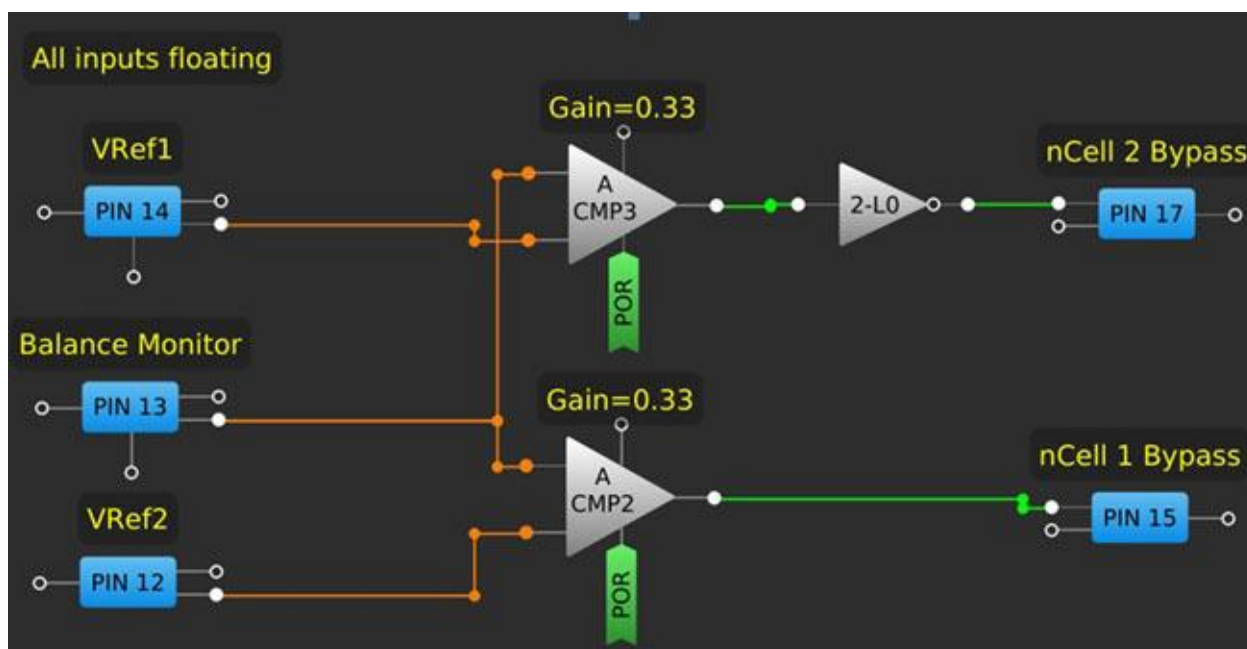


Рис. 2. Балансировка ячеек. Схема внутренней конфигурации микросхемы SLG46537V

На рис. 1 указаны напряжения в момент времени, когда суперконденсатор заряжен до 5 В. Напряжения на резисторах R3 и R4 выступают в качестве опорных напряжений VRef1 и VRef2 для двух встроенных компараторов АСМР (рис. 2), работающих с коэффициентом усиления 0,33. Таким образом, при напряжении суперконденсатора 5 В и идеальном балансе ячеек напряжение средней точки составит 833 мВ. Если напряжение в средней точке окажется больше VRef1, включается Q2. Когда Q2 включён, средняя точка подтягивается к земле, зарядный ток верхней ячейки увеличивается, а нижняя ячейка слегка разряжается. Когда напряжение в средней точке падает ниже VRef2, включается Q1. Номинал R1 определяет скорость балансировки, но обычно его выбирают в соответствии с наименьшим рекомендуемым значением для пассивной балансировки (например, 4,7 кОм для суперконденсаторов Murata). Не сложно заметить, что при использовании данной схемы рассеивание

дополнительной мощности на резисторе R1 происходит, только если возникает рассогласование ячеек, в то время как в схемах пассивной балансировки дополнительные потери мощности присутствуют постоянно. После того, как суперконденсатор полностью заряжен и сбалансирован, транзисторы Q1 и Q2 выключаются и рассеивания дополнительной мощности на резисторе R1 не происходит. Это позволяет удерживать заряд в течение значительно более длительного времени.

Если вместо обычных полевых транзисторов используются ключи Silego GreenFET (GFET), то необходимо помнить, что они выключаются при входном напряжении менее 1,5 В. Таким образом, когда напряжение ячеек падает менее 1,5 В, процесс балансировки не начинается, даже если GFET получают сигнал включения с компараторов. Как только напряжение обеих ячеек превышает 1,5 В, схема балансировки вновь становится работоспособной. Говоря простым языком, при низких напряжениях балансировка ячеек не выполняется. Впрочем, обычно это не имеет большого значения, так как в данном случае мы решаем проблему, связанную с перенапряжениями при полном заряде ячеек.

При тестировании предложенной схемы в лабораторных условиях мы усложнили задачу и использовали батарею, составленную из суперконденсаторов разных типов общей ёмкостью 1,5 Ф. При зарядке без балансирующей цепи разность напряжений между ними составляла около 1,5 В (при достижении полного заряда). При использовании активной схемы балансировки напряжения ячеек сначала увеличивались с разной скоростью, пока не сравнялись в точке 2,0 В. После этого напряжения оставались согласованными с точностью до 100 мВ вплоть до полного завершения процесса зарядки.

Поддержание постоянного выходного напряжения

В отличие от напряжения аккумулятора, напряжение суперконденсатора линейно уменьшается при разряде. По этой причине схема питания должна обеспечивать стабилизацию напряжения как в случае, когда входное напряжение оказывается ниже требуемого выходного уровня, так и в случае, когда входное напряжение превышает заданное значение. Другими словами, для полного использования накопленного заряда и поддержания постоянного выходного напряжения потребуются повышающе-понижающий преобразователь.

Существует альтернативный простой и недорогой вариант системы питания, использующий микросхему Silego GPAK, которая выполняет две основных функции. С одной стороны, она выступает в качестве ШИМ-контроллера понижающего преобразователя, а с другой стороны, при уменьшении напряжения суперконденсатора ниже определенного уровня, она активизирует повышающий преобразователь. В настоящий момент доступно множество вариантов реализации повышающих преобразователей. В качестве примера можно привести схему с интегральным преобразователем PAM2401 от Diodes Inc., который обеспечивает выходное напряжение 3,3 В при входном напряжении более 1 В. Ещё одним примером является контроллер MCP16251 от Microchip.

Типовая схема включения для PAM2401 представлена на рис. 3. Стоит отметить, что у PAM2401 есть огромное количество аналогов. Поэтому для большей универсальности на схеме преобразователь представлен в виде «черного ящика» с указанием функционала выводов, но без привязки к номерам контактов. В данном случае для подключения к Silego GPAK используется пять выводов:

- 1 Vin – входное напряжение;
- 2 PG – вывод функции Power Good (опционально);
- 3 EN – вывод разрешения работы;
- 4 Out – выходное напряжение;
- 5 GND – земля.

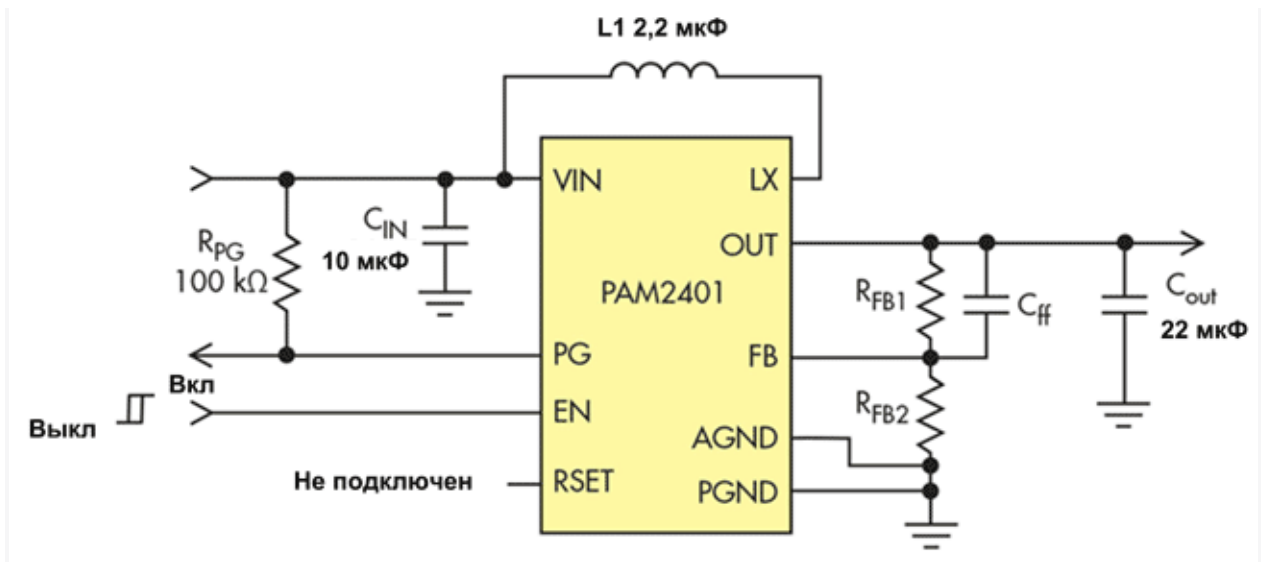


Рис. 3. Типовая схема повышающего регулятора напряжения

Обнаружение старения или высыхания электролита

- В процессе длительной работы свойства суперконденсаторов ухудшаются в связи со старением и высыханием электролита. Для предотвращения аварийных ситуаций необходимы надёжные методы диагностики этих процессов. Как показано в руководстве от компании Murata, повышение эквивалентного последовательного сопротивления ESR является хорошим индикатором надвигающегося старения или высыхания электролита. Таким образом, процесс диагностики работоспособности суперконденсатора заключается в периодическом измерении ESR. (Обратите внимание, что ESR на частоте 1 кГц обычно меньше, чем при постоянном токе.) В приложениях с длительными интервалами питания от суперконденсатора (секунды минуты) следует выполнять измерения ESR с низкой частотой. Для оценки ESR лучше всего заряжать суперконденсатор до заданного напряжения, например, 5 В, а затем определять мгновенное падение выходного напряжения при подключённой нагрузке. Важно понимать, что в процессе измерения сопротивления обычно требуется значительный тестовый ток, который может быть намного больше типовой нагрузки. Например, если взять высококачественный суперконденсатор 1 Ф с ESR порядка 50 мОм и зарядить его до 5 В, то для получения падения 50 мВ понадобится ток 1 А.

Схемная реализация предложенного решения на базе микросхемы GreenPAK показана на рис. 4, а проект конфигурации в GreenPAK Designer представлен на рис. 5. Предполагается, что зарядное устройство находится под управлением микросхемы GPAK, которая останавливает процесс заряда, когда суперконденсатор полностью зарядится. На рис. 4 вывод управления зарядным устройством подписан как «Контроль». Измерение ESR лучше всего выполнять после завершения зарядки и стабилизации напряжения суперконденсатора.

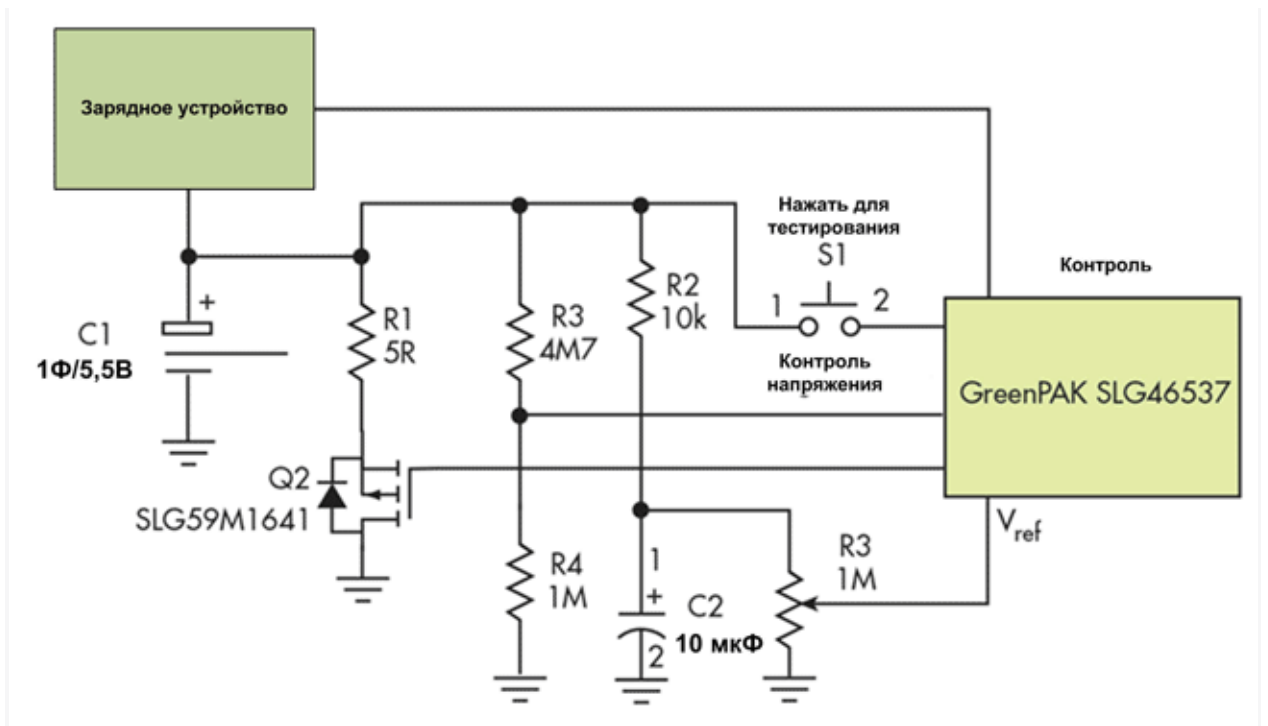


Рис. 4. Схема измерения последовательного сопротивления суперконденсатора

Тестовая клавиша S1 подает сигнал разрешения на счетчик DLY2. Этот счетчик выступает в качестве генератора с однократным запуском и формирует импульс длительностью приблизительно 120 мкс. Разрешающий импульс включает транзистор Q2, который коммутирует суперконденсатор на нагрузочный резистор R1. В течение интервала разряда компаратор ACMP0 сравнивает напряжение суперконденсатора с опорным напряжением. Как видно из схемы, опорное напряжение представляет собой не что иное, как отмасштабированное исходное напряжение суперконденсатора без нагрузки, сохранённое на конденсаторе C2. Если измеренное падение напряжения превысит допустимый порог, то будет сформировано предупреждение, указывающее, что ESR выглядит подозрительно высоким. Триггеры EDGE DET0 и DFF1 позволяют защёлкнуть сигнал, чтобы после окончания импульса 120 мкс на выходе сохранился аварийный сигнал. Вход данных DFF1 должен быть подключён к выводу Vdd, но при выполнении лабораторных испытаний он подключён к контакту 20.

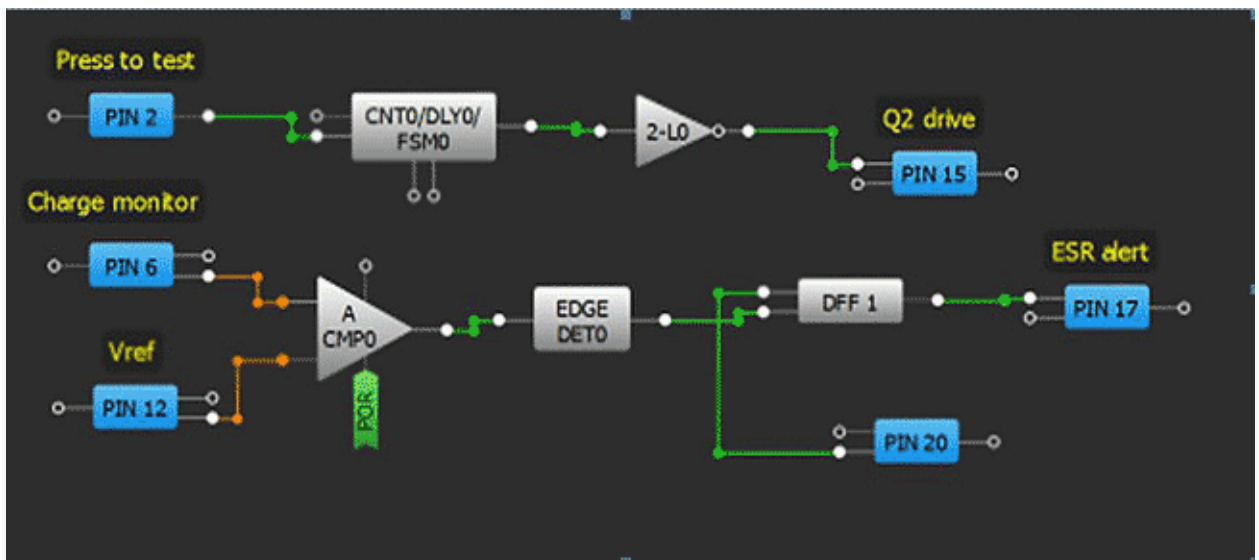


Рис. 5. Проект конфигурации GreenPAK в схеме измерения ESR

Зарядное устройство должно быть отключено не менее чем за 15-20 секунд до проведения испытания, чтобы напряжение суперконденсатора успело стабилизироваться. Может возникнуть резонный вопрос – почему был выбран тестовый интервал 120 мкс? Предположим, что ожидаемое падение напряжения, вызванное собственным сопротивлением ESR, составляет 50 мВ. Тогда снижение напряжения вследствие разряда, происходящего в ходе измерений, должно быть значительно меньше, например, не более 1% от 50 мВ, то есть 0,5 мВ. В данном случае, при разряде суперконденсатора 1 Ф током 1 А это означает максимальную продолжительность импульса 0,5 мс. Далее можно отметить, что время нарастания полевого транзистора SLG59M1641V составляет менее 5 мкс при 5 В. Таким образом, выбор длительности импульса 120 мкс с одной стороны не позволяет слишком сильно разрядить суперконденсатор, а с другой стороны гарантирует завершение всех переходных процессов, связанных с переключением транзистора Q2.

В качестве опорного напряжения в данной схеме используется напряжение на конденсаторе C2. При этом C2 заряжается через R2 до начала испытаний. Заряд происходит до исходного напряжения суперконденсатора C1. Это напряжение сохраняется в процессе измерения сопротивления. Для надёжной работы постоянная времени $R2C2$ выбрана равной примерно 0,1, с учётом, что $R3 \gg R2$.

В результате, в процессе измерений напряжение на C2 можно считать постоянным. Действительно, учитывая, что напряжение на C1 падает примерно на 50 мВ:

- ток разряда $\sim 50 \text{ мВ} / 10 \text{ кОм} = 5 \text{ мкА}$;
- скорость падения напряжения: $I / C = 5 \text{ мкА} / 10 \text{ мкФ} = 500 \text{ мВ/с}$;
- изменение напряжения в конце периода разряда
120 мкс: $500 \text{ мВ/с} \times 0,00012 \text{ с} = 0,06 \text{ мВ}$.

Таким образом, напряжение на C2 остаётся практически постоянным во время испытания и, следовательно, может использоваться в качестве опорного напряжения. Положение потенциометра R3 определяет допустимое падение напряжения во время теста. Заметим, что делитель R3/R4 необходим, так как суперконденсатор может быть заряжен до 5 В, что больше, чем напряжение питания микросхемы GreenPAK (Vdd), а также потому, что значение Vref ограничено входным напряжением компаратора АСМР на уровне 1,2 В.

Стоит отметить, что процедура измерения ESR может проводиться только в том случае, если она не мешает работе основной схемы питания устройства!

При проведении лабораторного теста возможно возникновение ложных срабатываний из-за шума на входах компаратора АСМР. Дополнительный конденсатор 1...10 мкФ на выходе потенциометра R3 решает эту проблему. Кроме того, при подаче питания на плату SLG46537V Eval board, выход DFF1 может защёлкнуться в высоком состоянии. Чтобы обойти эту проблему, логический генератор эмулятора первоначально удерживает низкий сигнал на входе 20, а перед выполнением измерений переводит его в высокое состояние.

При выполнении лабораторных испытаний для имитации увеличения сопротивления ESR использовался дополнительный резистор 500 мОм.

Мониторинг температуры окружающей среды

Срок службы суперконденсатора может быть существенно увеличен, если в процессе эксплуатации не допускать значительных перегревов. Стоит также помнить, что суперконденсаторы весьма чувствительны к пульсациям тока, из-за которых происходит дополнительный разогрев.

На самом деле речь идёт о решении двух проблем. Увеличение температуры окружающей среды на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к сокращению срока службы суперконденсатора в два раза. Поэтому следует использовать суперконденсаторы при как можно более низких температурах (разумеется, в разумных пределах). Кроме того, суперконденсаторы чувствительны к пульсациям тока, которые вызывают дополнительный нагрев. Измеряя температуру корпуса, можно говорить о том, находятся ли пульсации на допустимом уровне. Перегрев корпуса относительно температуры окружающей среды не должен превышать $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для измерения относительного перегрева корпуса можно использовать пару аналоговых датчиков температуры. Один из датчиков прикрепляется к корпусу суперконденсатора, а второй размещается на поверхности платы и служит для измерения температуры окружающей среды. Большинство недорогих аналоговых датчиков температуры имеют чувствительность $10\text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$, например, MCP9700 от Microchip. Типичный аналоговый датчик имеет два вывода питания и аналоговый выход напряжения. Для MCP9700 выходное напряжение составляет 500 мВ при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Заявленная разница $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствует дифференциальному сигналу 30 мВ , который и необходимо обнаружить.

В предлагаемой схеме оба датчика ($U1$ и $U2$) подключены к земле через дополнительные диоды 1N914 (рис. 6). Смещение для датчика $U2$, измеряющего температуру окружающей среды, составляет 530 мВ , а для датчика $U1$, измеряющего температуру поверхности суперконденсатора, 500 мВ . Для получения разницы в 30 мВ необходимо, чтобы ток через диод $D2$ был примерно в два раза больше, чем через $D1$. В данном случае токи смещения составляют $100/200\text{ мкА}$, соответственно. Так как питающие токи самих датчиков (6 мкА), значительно меньше токов смещения, то они не влияют на напряжения смещения в широком диапазоне температур. Потенциометр $R2$ можно использовать для точной установки разности напряжений 30 мВ . Поскольку разница напряжений определяется не самими токами смещения, а их соотношением, то калибровка не нарушается

при изменении температуры (при условии, одинаковых значений ТКР токозадающих резисторов R1и R2).

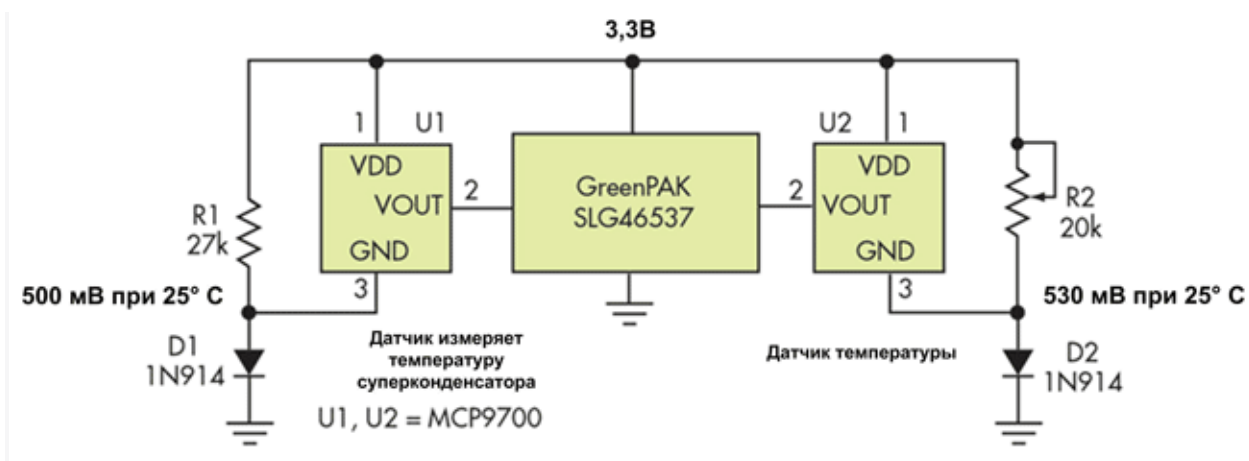


Рис. 6. Схема контроля температуры и уровня пульсаций тока

Часть схемы, определяющая превышение допустимого уровня температуры окружающей среды, довольно проста — сигнал с выхода датчика U2 подаётся на вход компаратор АСМР (рис. 7). Пороговый уровень срабатывания задаётся пользователем. При температуре 25 °С на выходе датчика с учётом смещения присутствует напряжение около 1 В. Чтобы остаться в пределах допустимой рабочей области напряжений компаратора, используется коэффициент усиления 0,5. При задании порогового напряжения 600 мВ АСМР0 будет срабатывать, когда температура окружающей среды увеличится до 42 °С.

Компаратор АСМР1 используется для сравнения напряжений датчиков U1 и U2. Он срабатывает, когда напряжение на выходе датчика U1 сравнивается с показаниями датчика U2. В нашем случае это означает, что температура поверхности суперконденсатора превысила температуру окружающей среды на 3 °С, а, значит, пульсации тока слишком велики.

Выходы компараторов АСМР могут использоваться для формирования сигнала тревоги, для прекращения зарядки и т.д. Ещё более интересным решением, которое выходит за рамки статьи, было бы фактическое уменьшение напряжения заряда при увеличении температуры.

Так как фактической целью тестирования является проверка способности схемы надёжно обнаруживать повышение температуры на 3 °С, то для проведения испытаний суперконденсатор не требуется. Если температура окружающей среды составляет около 32 °С,

для срабатывания схемы защиты достаточно будет коснуться пальцем датчика U1. Через несколько секунд на выходе nRippleAlert начнёт «проскакивать» низкий сигнал, а затем, когда палец нагреет датчик, низкий сигнал станет постоянным. Для точной настройки схемы с учётом погрешностей компараторов АСМР в режиме усиления 0,5× может потребоваться дополнительная калибровка.

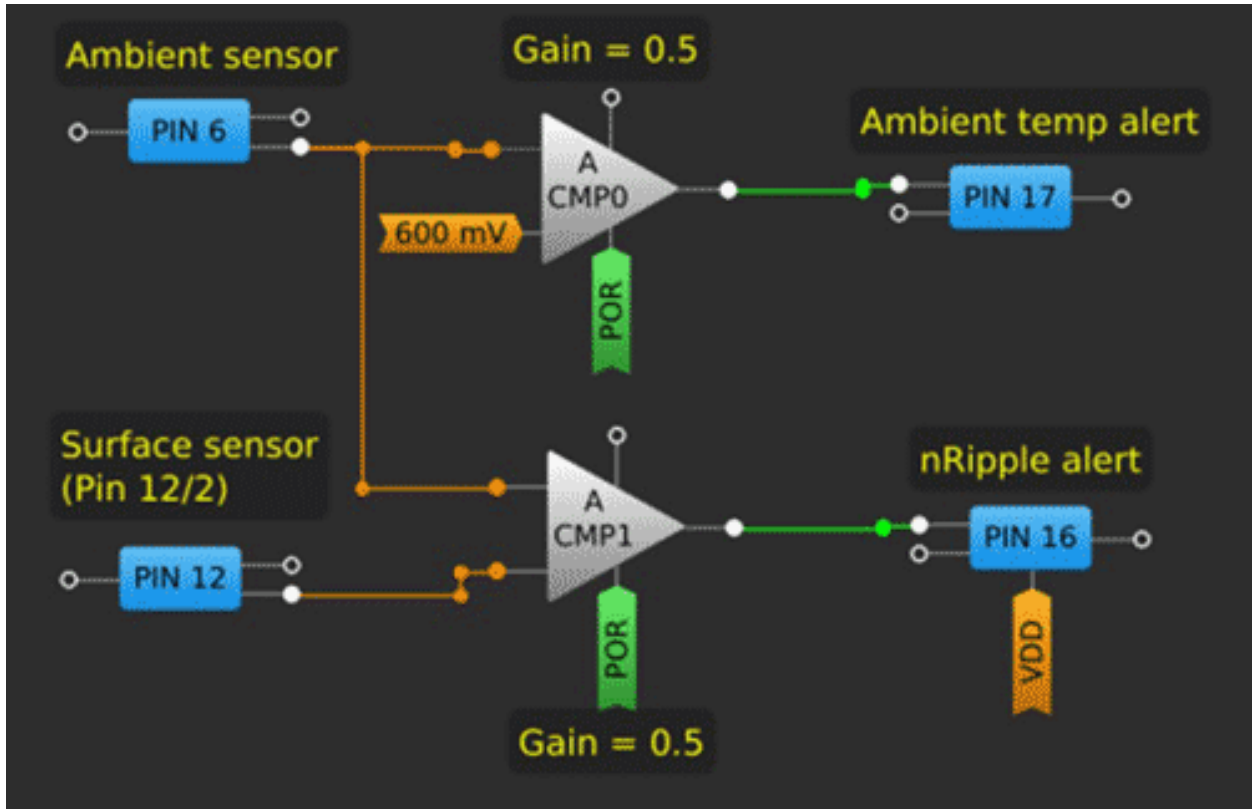


Рис. 7. Проект конфигурации GreenPAK в схеме контроля температуры и уровня пульсаций тока

Помимо проблем, рассмотренных выше, существует и ряд других особенностей. Кратко коснёмся некоторых из них.

Когда происходит быстрый и глубокий разряд батареи суперконденсаторов, некоторые ячейки могут оказаться при отрицательном напряжении. Чтобы этого избежать, необходимо каждую ячейку снабдить дополнительным диодом. При нормальной работе эти диоды обратно смещены, но при возникновении обратной полярности они смещаются в прямом направлении.

Суперконденсаторы чувствительны к перенапряжению. Данная проблема легко решается с помощью микросхем Silego GreenPAK. Например, SLG46537V может использоваться для активного мониторинга напряжения суперконденсатора и останавливать цикл заряда, как только будет достигнуто желаемое напряжение.

Суперконденсаторы имеют значительную ёмкость и способны выдерживать большие токи при условии невысокого собственного сопротивления ESR. Тем не менее, важно использовать дополнительные способы защиты от перегрузки по току, например, предохранители, расцепители или специализированные схемы, которые могут быть реализованы с помощью микросхем Silago.