

Фильтр LED-драйвера с рабочим током до 1 А

➔ Данный материал является продолжением статьи «Проектирование активного фильтра для PSR LED-драйвера» (ПС №3'2017). Рабочий ток фильтра увеличен с 350 мА до 1 А. Показаны пути снижения потерь на фильтре. Рассмотрен вопрос качества математического моделирования. Показан диапазон применения предложенного технического решения.

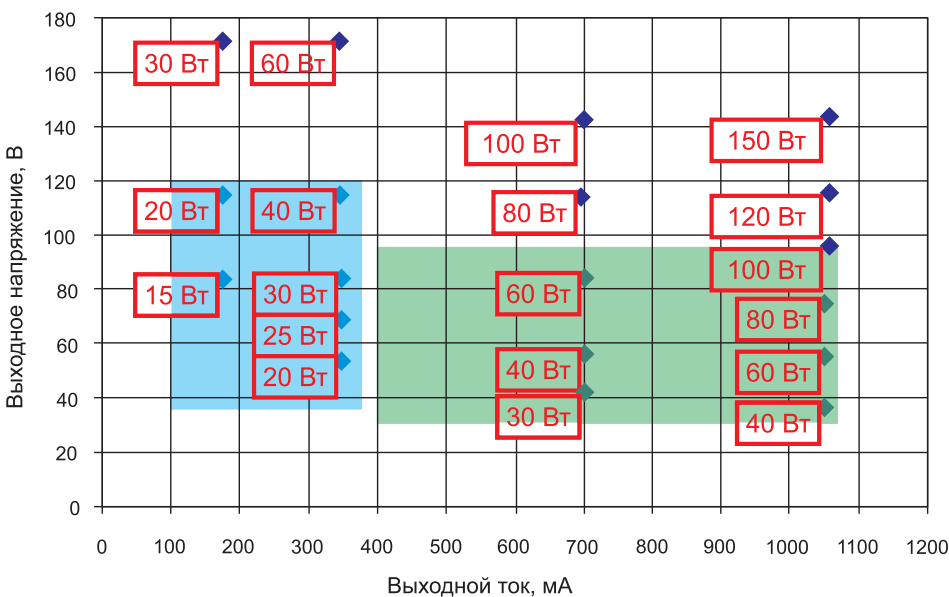


Рис. 1. Рабочий диапазон фильтра

Диапазон применения

Ранее было предложено схемотехническое решение активного фильтра на выходе LED-драйвера с выходным током 350 мА и мощностью 40 Вт. Такой фильтр эффективен в бюджетных драйверах и позволяет получить высокое качество выходного тока при относительно низкой себестоимости изделия. Как было показано, фильтр является адаптивным, т. е. он автоматически адаптируется под выходной ток драйвера. Диапазон автоматической подстройки фильтра, очевидно, ограничен, прежде всего, сверху. На рис. 1 приведен диапазон рабочих токов и напряжений ранее рассмотренного фильтра (голубая область).

На этом рисунке по горизонтальной оси отложен рабочий ток фильтра, по вертикальной — его максимальное выходное напряжение. Ромбовидные маркеры соответствуют типичным драйверам, доступным на рынке, красным указана выходная мощность соответствующего драйвера. Правая граница рабочего диапазона фильтра соответствует его номинальному или максимальному рабочему току, ограниченному допустимым током через силовой транзистор и рассеиваемой на нем мощностью. Верхняя граница обусловлена максимальным напряжением на силовом транзисторе. При этом приходится принимать во внимание, что схема ограничения выходного напряжения драйвера имеет конечную точность, и напряжение холостого хода оказывается выше максимального рабочего напряжения на 10–40%. Фильтр должен иметь соответствующий запас по максимальному рабочему напряжению. Левая граница области показана условно, так как обычно фильтр работоспособен на токах в несколько раз меньше номинального, но при этом его экономическая эффективность снижается. Нижняя граница области работы фильтра обусловлена снижением динамического сопротивления нагрузки и, как следствие, возрастающими пульсациями тока и опасностью потери устойчивости.

В рамках этой статьи рассматривается модификация ранее предложенного фильтра, которая позволит работать на токах до 1050 мА и выходной мощности до 100 Вт. Соответствующее поле на диаграмме отображено зеленым цветом. Дальнейшее расширение рабочего диапазона фильтра возможно. Однако на практике рассматриваемый фильтр чаще

применяется в однокаскадных драйверах с низкой себестоимостью, в то время как драйверы с относительно большим током и выходной мощностью имеют достаточно высокую стоимость и, как следствие, более сложную и совершенную двухкаскадную архитектуру, которая не требует применения выходного активного фильтра.

Базовая схема фильтра

На рис. 2 приведена схема фильтра, которая взята за основу при создании нового узла, она близка к схеме фильтра на ток 350 мА. Поскольку фильтр адаптивный, то, в общем случае, он должен работать при различных токах и напряжениях. Используя испытательную схему фильтра 350 мА, изменим ток на 1 А, увеличим емкость накопительного конденсатора и проверим характеристики базовой схемы в новом режиме.

Результаты моделирования базовой схемы

Анализ результатов моделирования начнем с наиболее информативной кривой, это напряжение «коллектор–эмиттер» силового транзистора в установившемся режиме. На рис. 3 показаны ток через фильтр и напряжение на силовом транзисторе.

Рассмотрим напряжение на силовом транзисторе подробнее. Литерой «Б» обозначено минимальное его значение,

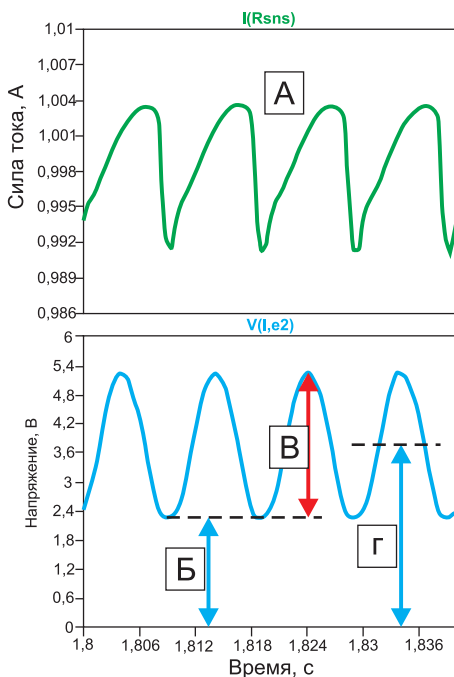


Рис. 3. Результат моделирования базовой схемы: зеленая кривая — ток через фильтр; синяя кривая — напряжение на силовом транзисторе

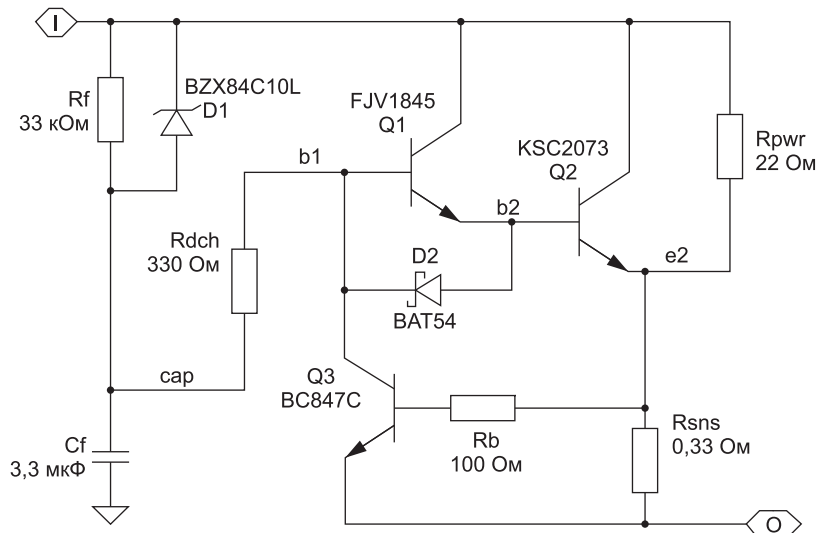


Рис. 2. Базовая схема активного фильтра

литерой «В» — двойной размах пульсаций, литерой «Г» — среднее значение. Последнее определяет рассеиваемую на транзисторе мощность, а значит, часть потерь в драйвере, и, таким образом, влияет на КПД устройства в целом. Например, при выбранном рабочем токе 1 А, выходной мощности 60 Вт и выходном напряжении 60 В на транзисторе рассеивается почти 4 Вт, что означает снижение общего КПД устройства на 7%. Улучшить параметры можно, уменьшив напряжения «В» и «Б».

Уменьшить величину «В» (пульсации на накопительном конденсаторе) можно, увеличив емкость накопительного конденсатора, что увеличивает стоимость. Поэтому начнем оптимизацию с величины «Б». Для этого рассмотрим, из чего складывается минимальное падение напряжения на силовом транзисторе фильтра.

Модернизация схемы фильтра

На рис. 4, литера «А», представлен одноструктурный составной транзистор,

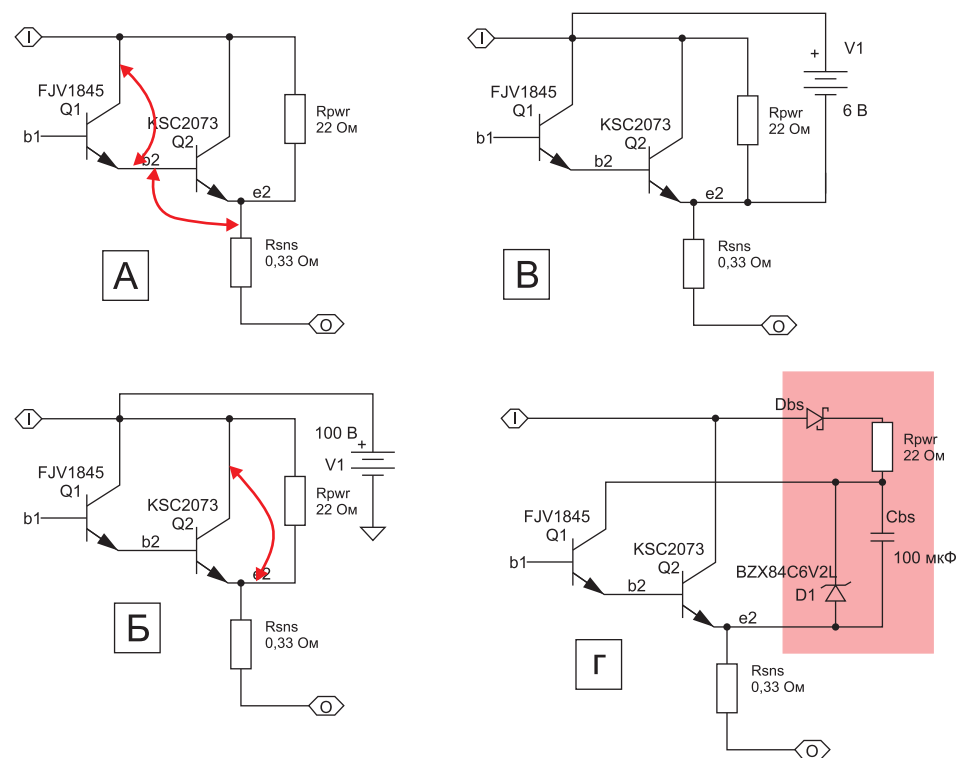


Рис. 4. Схема составного транзистора

который использовался в фильтре. Минимальное падение напряжения на нем складывается из величин, обозначенных красными стрелками: напряжение «коллектор–эмиттер» предоконечного транзистора и «база–эмиттер» окончного транзистора. Уменьшить падение можно, разделив питание транзисторов, как показано на рис. 4, литера «Б». Теперь минимальное падение равно напряжению насыщения «коллектор–эмиттер» окончного транзистора, оно обозначено красной стрелкой. Такое разделение питания потребовало использовать дополнительный высоковольтный источник питания, обозначен на схеме как батарея. Строить эквивалентный источник в реальном устройстве относительно сложно и дорого. Проще и дешевле применить низковольтный источник, как показано на рис. 4, литера «В». Кроме того, такой подход позволяет применить в качестве предоконечного транзистора низковольтный элемент. Что, в свою очередь, существенно расширяет доступный выбор типов транзистора. Например, можно выбрать широко распространенный транзистор с большим коэффициентом усиления по току и относительно хорошими характеристиками насыщения. Наконец, виртуальный источник низкого напряжения, который обозначался символом батареи, следует заменить реальным схемным решением. Это может быть параметрический стабилизатор напряжения из резистора и стабилитрона, дополненный детектором напряжения из диода и электролитического конденсатора. Соответствующая часть схемы обозначена красным прямоугольником на рис. 4, литера «Г». Предложенный гибридный детектор и стабилизатор испытывает серьезные токовые перегрузки

в момент короткого замыкания выхода фильтра. Поэтому резистор в его составе должен иметь повышенную допустимую импульсную и долговременную мощность. В таком случае логично возложить именно на него задачу плавного пуска фильтра после короткого замыкания. Фактически это означает перенос резистора R_{rw} со старого места в схеме на новое, в состав вспомогательного низковольтного источника.

Силовой транзистор фильтра

Выбор силового транзистора для фильтра LED-драйвера — задача традиционно противоречивая и ответственная. Обычно именно этот элемент оказывается самым дорогим в фильтре. Одновременно от его надежности зависит надежность драйвера в целом. В такой ситуации интересной представляется оптимизация по «запасу» электрических параметров. Например, ранее рассматривался силовой транзистор KSC2073. Его рабочее напряжение составляет 150 В, что существенно больше требуемого для нового фильтра. В то же время его токовые характеристики, которые были вполне удовлетворительны в схеме на 350 мА, при токе 1 А оказываются посредственными, снижается статическое усиление, увеличивается напряжение насыщения. Поэтому предлагается использовать транзистор KSD363Y. При рабочем напряжении до 120 В он обладает максимальным током до 6 А и существенно лучшими статическими характеристиками при токе 1 А.

Математическая модель

Одна из первых и, одновременно, наиболее трудоемких задач при построении математической модели той или иной электрической схемы — это получение моделей отдельных узлов и компонентов этой схемы. Есть несколько способов получения моделей компонентов. Некоторые компоненты доступны в базовом пакете LTspice. Например, это пассивные компоненты R, L, C, имеющие так называемые «идеальные» модели. Несколько сложнее с пассивными компонентами, в которых необходимо учитывать паразитные параметры. Например, накопительный электролитический конденсатор на выходе импульсного преобразователя. Использовать «идеальную» модель тут нежелательно. Найти более точную модель для именно этого конденсатора сложно. Но ее от-

носительно легко создать, достаточно взять за основу модель «идеального» конденсатора, указать его емкость, внести эквивалентное активное последовательное сопротивление конденсатора ESR и его эквивалентную последовательную индуктивность ESL. Обычно этого достаточно для моделирования рассматриваемой задачи. Параметры ESR и ESL можно взять из описания компонента. Дополнительно их целесообразно проверить с помощью специализированного измерителя импеданса. Особенно это важно для конденсаторов с низкой стоимостью и неизвестным производителем.

Некоторые модели активных компонентов можно найти в базовом пакете. Их не много. Возможно, там нет нужной модели. Но высока вероятность найти близкий по параметрам компонент. Например, вместо математической модели стабилитрона в SMD-корпусе можно применить модель близкого по мощности стабилитрона в выводном корпусе. Естественно, с тем же рабочим напряжением. Аналогично можно поступить с моделями диодов. Для наиболее ответственных компонентов желательно применить модель, максимально близкую к реальному элементу. В Интернете есть большое количество соответствующих библиотек. Важно помнить, что качество этих библиотек не гарантировано, поэтому такие модели приходится проверять перед применением.

В нашем случае наиболее ответственный активный компонент — силовой транзистор, KSD363Y. Допустим, мы имеем две математических модели этого транзистора. Первая — стандартная модель биполярного транзистора, принятая в программе LTspice, вторая — усовершенствованная модель, построенная по оригинальной схеме. Сравним их характеристики, снимем выходные кривые моделей. Это семейство зависимостей тока коллектора от напряжения «коллектор–эмиттер» при различных токах базы. Схема для снятия таких характеристик вполне очевидна и представлена на рис. 5.

На рис. 6 представлено семейство выходных кривых двух математических моделей одного транзистора (литеры «А» и «Б»). Под литерой «В» приведены оригинальные кривые, заимствованные из технической документации производителя.

На графиках по горизонтали отложено напряжение «коллектор–эмиттер», по вертикали — ток коллектора. Очевидно, что

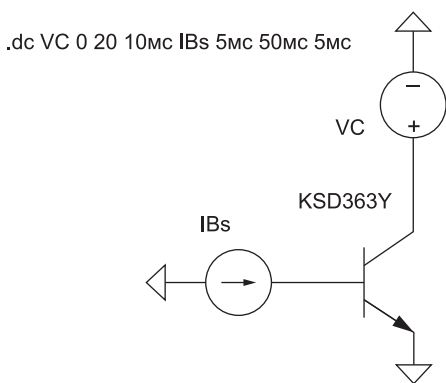


Рис. 5. Схема для снятия выходных характеристик модели.

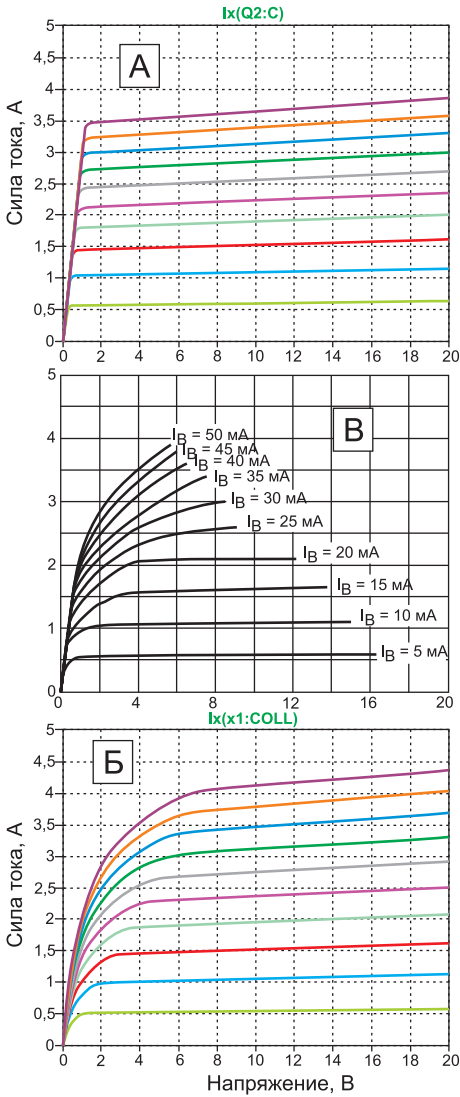


Рис. 6. Семейство выходных кривых разных моделей силового транзистора

нижняя группа кривых на рис. 6 больше похожа на оригинальные графики из документации. А значит, вторая модель ближе к оригиналу. Интересно отметить, что обе рассмотренные модели не идеально соответствуют реальному элементу. При этом в наиболее важном для нас режиме, при коллекторном токе около 1 А, обе модели имеют параметры, близкие к оригинальному компоненту. Что касается динамических параметров моделей, то в общем случае их тоже следует проверять. Но в нашем устройстве транзистор работает при низких частотах (100 Гц), и статические характеристики важнее динамических. Поэтому далее будем использовать более правдоподобную вторую модель без уточнения ее динамических характеристик. При необходимости более сложную и со-

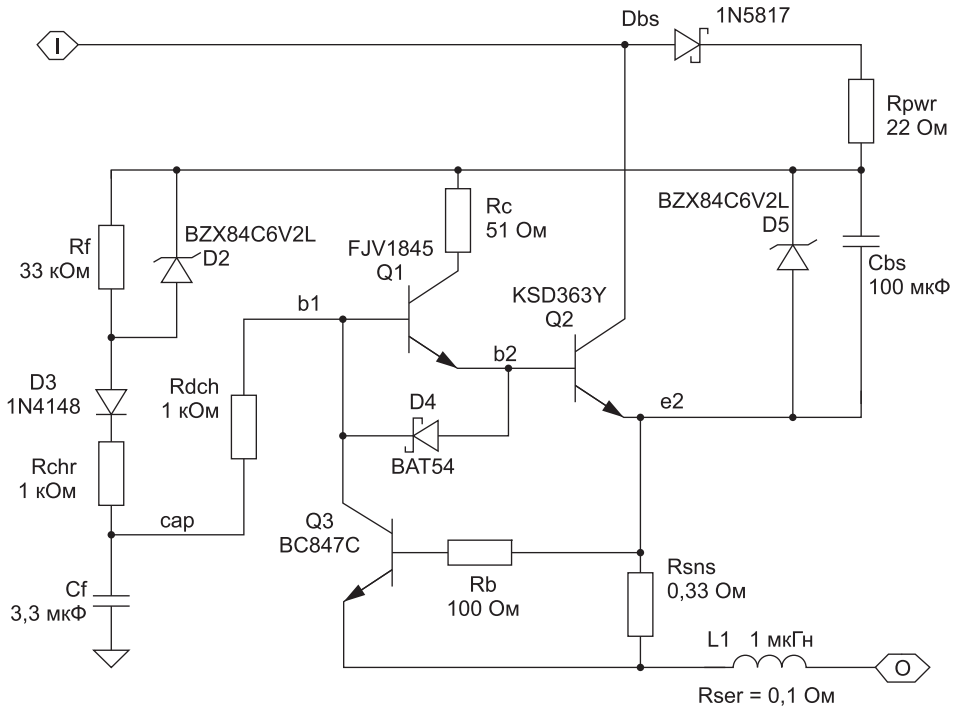


Рис. 7. Схема модели фильтра

вершенную статическую модель, которая использовалась в этой работе, можно получить у автора.

Схема фильтра на ток 1 А

На рис. 7 приведена принципиальная схема модели фильтра.

Относительно начальной версии в схему внесены изменения, добавлен ряд компонентов. Элементы D5, Cbs, Rpwr, Dbs образуют схему питания предоконечного транзистора. Rc ограничивает ток коллектора этого каскада. Диод D3 предотвращает разряд фильтрующего конденсатора через стабилитрон D2 вблизи локальных минимумов напряжения на фильтре. Индуктивность L1 снижает скорость нарастания тока в момент короткого замыкания на выходе, что дает достаточно времени для срабатывания активного ограничителя тока.

Результаты моделирования

На рис. 8 приведены эпюры работы фильтра в установившемся режиме. На графике под литерой «А» изображен ток через фильтр. На его основании можно оценить коэффициент пульсации, который в данном случае менее 1%. На нижнем графике приведены падения напряжения на различных элементах

фильтра. Литерой «Б» обозначено падение на активном сопротивлении дросселя, литерой «Г» — напряжение на резисторе Rsns, литерой «В» — напряжение насыщения на силовом транзисторе, литерой «Д» — размах пульсаций на силовом транзисторе. По этим графикам можно оценить возможности оптимизации филь-

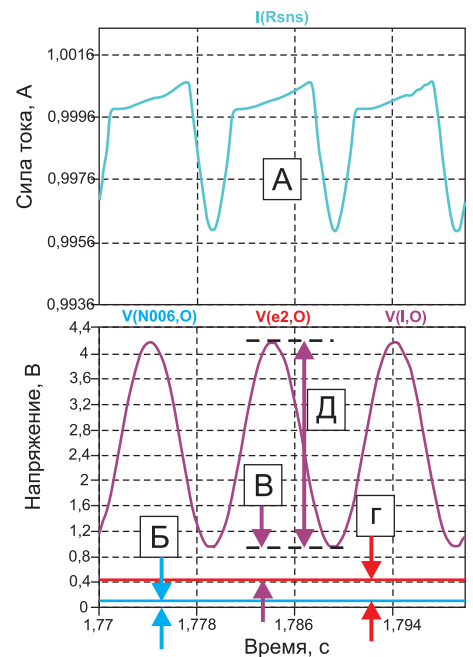


Рис. 8. Установившийся режим фильтра

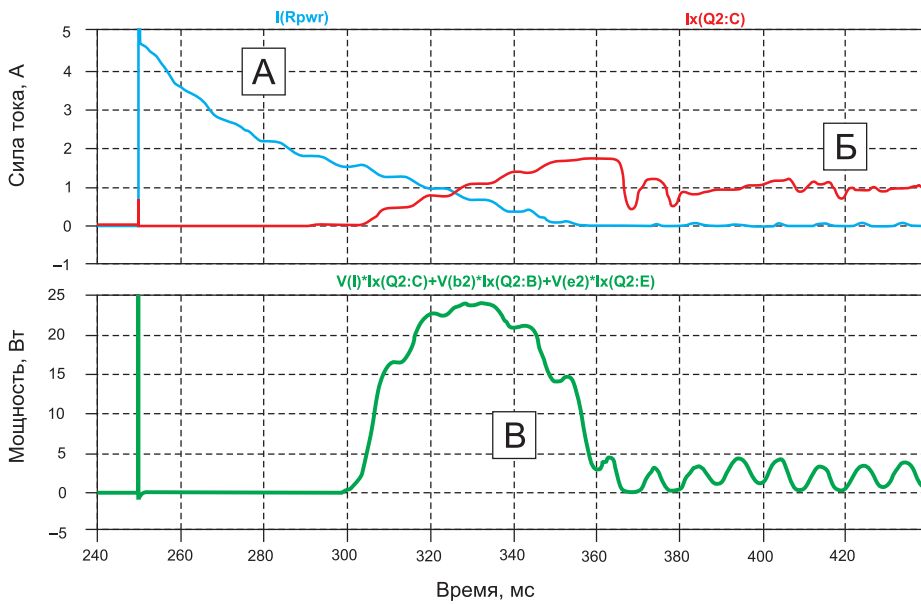


Рис. 9. Переходный процесс в фильтре

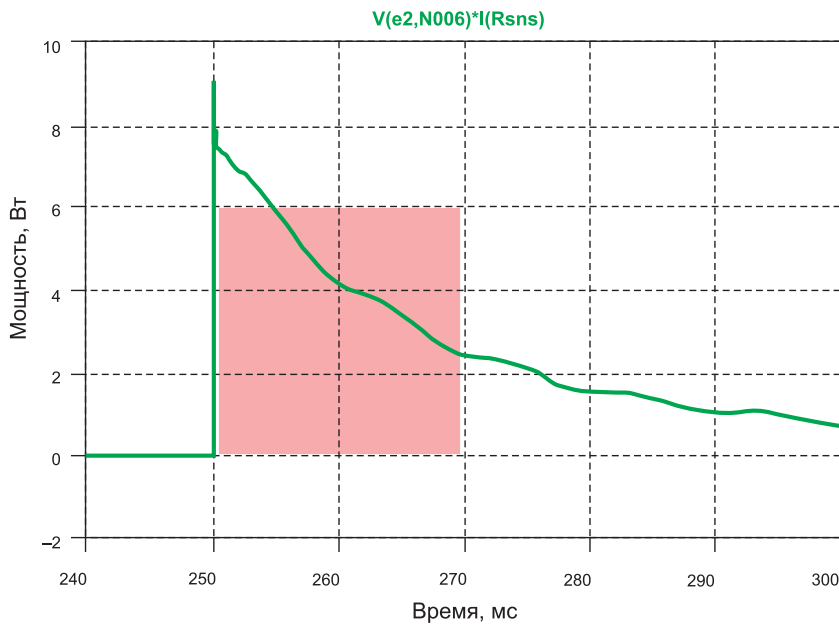


Рис. 10. Мощность на датчике тока в процессе коммутации

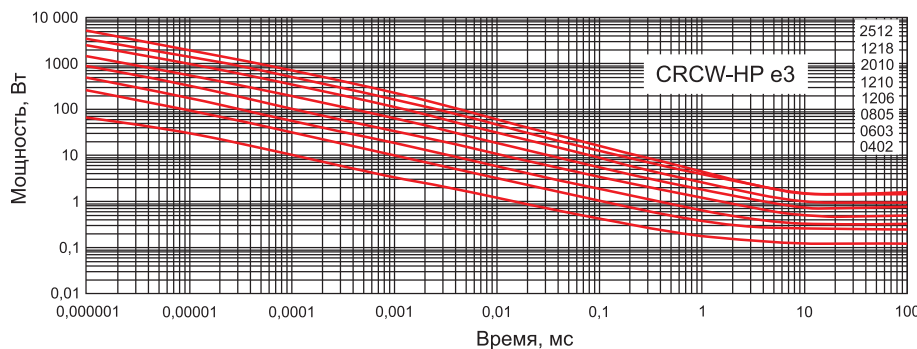


Рис. 11. Допустимые импульсные нагрузки

тра. В частности, если применить более дорогой дроссель с меньшим внутренним сопротивлением, то можно уменьшить падение напряжения на нем. Применяв более совершенную схему ограничения тока, можно уменьшить сопротивление датчика тока и соответствующие потери мощности. Наконец, изменив тип силового транзистора или увеличив ток его базы, можно уменьшить напряжение насыщения «коллектор–эмиттер».

Что касается напряжения пульсаций (литера «Д»), оно зависит, в первую очередь, от емкости накопительного конденсатора драйвера. Чтобы уменьшить его, например, в два раза, потребуется увеличить накопительную емкость вдвое, что, в большинстве случаев, неприемлемо по соображениям себестоимости конечного изделия.

Мощность, рассеиваемую на силовом транзисторе, легко оценить по напряжению на нем. Поскольку ток равен 1 А, средняя мощность численно равна среднему напряжению. В нашем случае на транзисторе рассеивается около 2,1 Вт мощности, что лучше аналогичного параметра немодифицированной схемы.

Следующий важный момент в работе фильтра — это переходный процесс при горячем коротком замыкании выхода.

На рис. 9 представлен ток через силовой транзистор в момент короткого замыкания выхода (литера «Б»). Ток через силовой резистор — литера «А». Мгновенная мощность на силовом транзисторе — литера «В». Несложно посчитать, что мгновенная мощность на резисторе достигает почти 500 Вт. В то же время мощность на транзисторе не превышает 25 Вт, что вполне безопасно для выбранного элемента.

Требования к компонентам схемы

Приведенная ранее схема соответствует математической модели, но, в зависимости от типа примененных компонентов, принципиальная схема фильтра может от нее отличаться. Поэтому важно тщательно подобрать все критические компоненты фильтра. Рассмотрим этот процесс на примере резистора датчика тока R_{sns} . Ограничения по мгновенному току и напряжению, как правило, не вызывают проблем. Ограничения по мощности в установившемся режиме также легко учесть. Сложнее учесть импульсную

мощность, выделяемую на этом резисторе в течение переходного процесса после короткого замыкания. Она показана на рис. 10.

Устойчивость резистора нормируется применительно к прямоугольному импульсу определенной мощности и продолжительности. Поэтому придется провести аппроксимацию исходной кривой, например считая ее эквивалентной прямоугольному импульсу длительностью 25 мс и мощностью 6 Вт. Это показано на рис. 10 красным прямоугольником. Полученную аппроксимацию можно соотнести с допустимыми нагрузками, указанными в описании на компонент. Пример соответствующих кривых из технической документации приведен на рис. 11.

Для каждой серии резисторов конкретного производителя набор кривых индивидуален и отличается от приведенного примера. Из этих кривых следует, что можно использовать резистор размера 1206. Если применить резисторы других серий, с меньшей импульсной мощностью, очевидно, потребуется больший размер резистора или параллельное соединение нескольких элементов.

Аналогичным образом следует оценить импульсную мощность для R_{chrg} , R_{dch} , R_c , R_{pwr} . По соображениям себестоимости изделия, в качестве R_{pwr} целесообразно рассмотреть выводной проволочный или металлопленочный резистор. Конденсатор C_{bs} желательно выбрать относительно большого габарита, т. к. в режиме короткого замыкания через него пройдет значительная часть тока резистора R_{pwr} .

Измерения на макете фильтра

При проведении измерений на практическом макете фильтра в установленном режиме сначала снимается диаграмма напряжения «коллектор–эмиттер» силового транзистора. Это наиболее информативная кривая, ее можно и нужно сравнить с результатами математического моделирования. Пример такой кривой приведен на рис. 12.

При рассмотрении приведенной диаграммы следует иметь в виду, что напряжение «коллектор–эмиттер» — это основная составляющая падения напряжения на фильтре, но не единственная. Кроме нее существуют потери на резисторе датчика тока и активном сопротивлении дросселя.



Рис. 12. Диаграмма напряжения «коллектор–эмиттер»

При измерении напряжения на дросселе придется столкнуться с большим уровнем импульсных помех. Вероятно, потребуется применение вторичного цифрового фильтра.

Заключение

Показана возможность построения относительно простого фильтра для светодиодного драйвера с выходным током 1 А. Рассмотрены этапы создания математической модели. Проведен частичный анализ результатов. ●