

«Электронный дроссель»

Евгений Карпов

В статье рассмотрены особенности работы электронного силового фильтра и возможность его использования в звуковоспроизводящей аппаратуре.

Побудительным мотивом написания этой небольшой статьи, с одной стороны, стали бескомпромиссные войны в сети на эту тему, а с другой – неоднократные частные разъяснения читателям сайта. Когда число этих разъяснений превысило разумный уровень, я решил оформить их в виде статьи и поставить точку в этом вопросе.

В общем, эта статья ориентирована не на специалистов в области электроники, а на любителей. Я постараюсь максимально просто, без углубления в математические дебри, показать особенности работы электронного фильтра. А также обратить внимание читателей на характерные ошибки при его использовании.

Наиболее часто используемая и многократно описанная в литературе схема фильтра с нагрузкой в цепи эмиттера, показана на рисунке 1.

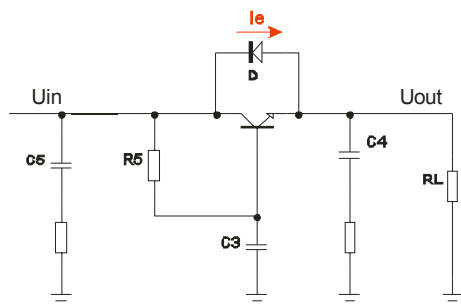


Рисунок 1

Фактически, схему можно рассматривать как простейший следящий стабилизатор. Функцию опорного напряжения выполняет напряжение на емкости $C3$, так как скорость изменения напряжения емкости определяется постоянной времени RC фильтра ($R5$, $C3$), которая выбирается гораздо больше периода сети. А транзистор работает как регулирующий и сравнивающий элемент.

В общем, совершенно очевидно, что уровень пульсаций на базе определяется параметрами этого же фильтра, и, в значительной мере, уровень этих пульсаций определяет уровень пульсаций выходного напряжения. Также на коэффициент подавления пульсаций влияют параметры используемого транзистора [1].

Хочу обратить внимание читателей, что величина выходной емкости $C4$ на уровень пульсаций влияет мало, так как эмиттерный повторитель имеет низкое выходное сопротивление.

Выбор номинала резистора $R5$ в такой схеме не может быть произвольным, так как его величина задается необходимым током базы транзистора при заданной нагрузке. Ограничение максимального значения $R5$ затрудняет получение малого уровня пульсаций на емкости $C3$. Фактически, снижение уровня пульсаций требует увеличения емкости $C3$ или использования многозвенного фильтра, что усложняет схему. Падение напряжения на резисторе $R5$ за счет протекания тока базы транзистора приводит к тому, что напряжение на конденсаторе $C3$ оказывается заметно меньше входного, что непосредственно сказывается на КПД фильтра. Из всех этих рассуждений можно сделать вывод, что одним из негативных факторов, ухудшающих параметры фильтра, является наличие тока базы.

Может показаться, что простая механическая замена биполярного транзистора на MOSFET с достаточно большой крутизной позволяет решить многие проблемы. Отсутствие тока в цепи затвора вроде позволяет значительно увеличить резистор $R5$, уменьшить $C3$ и получить больший коэффициент подавления пульсаций за счет уменьшения пульсаций в цепи затвора.

К сожалению, многие так и делают (рисунок 2), и это - просто катастрофа. Схема перестает нормально работать - существенно падает коэффициент подавления пульсаций и фильтр, попутно, становится генератором широкополосного шума.

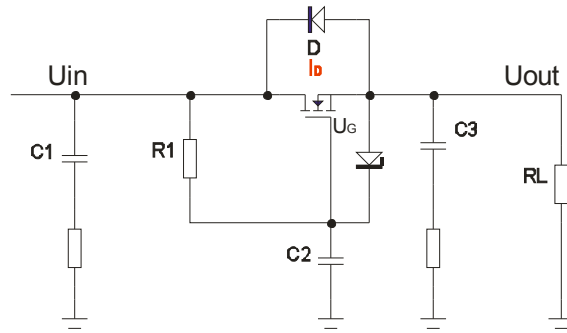


Рисунок 2

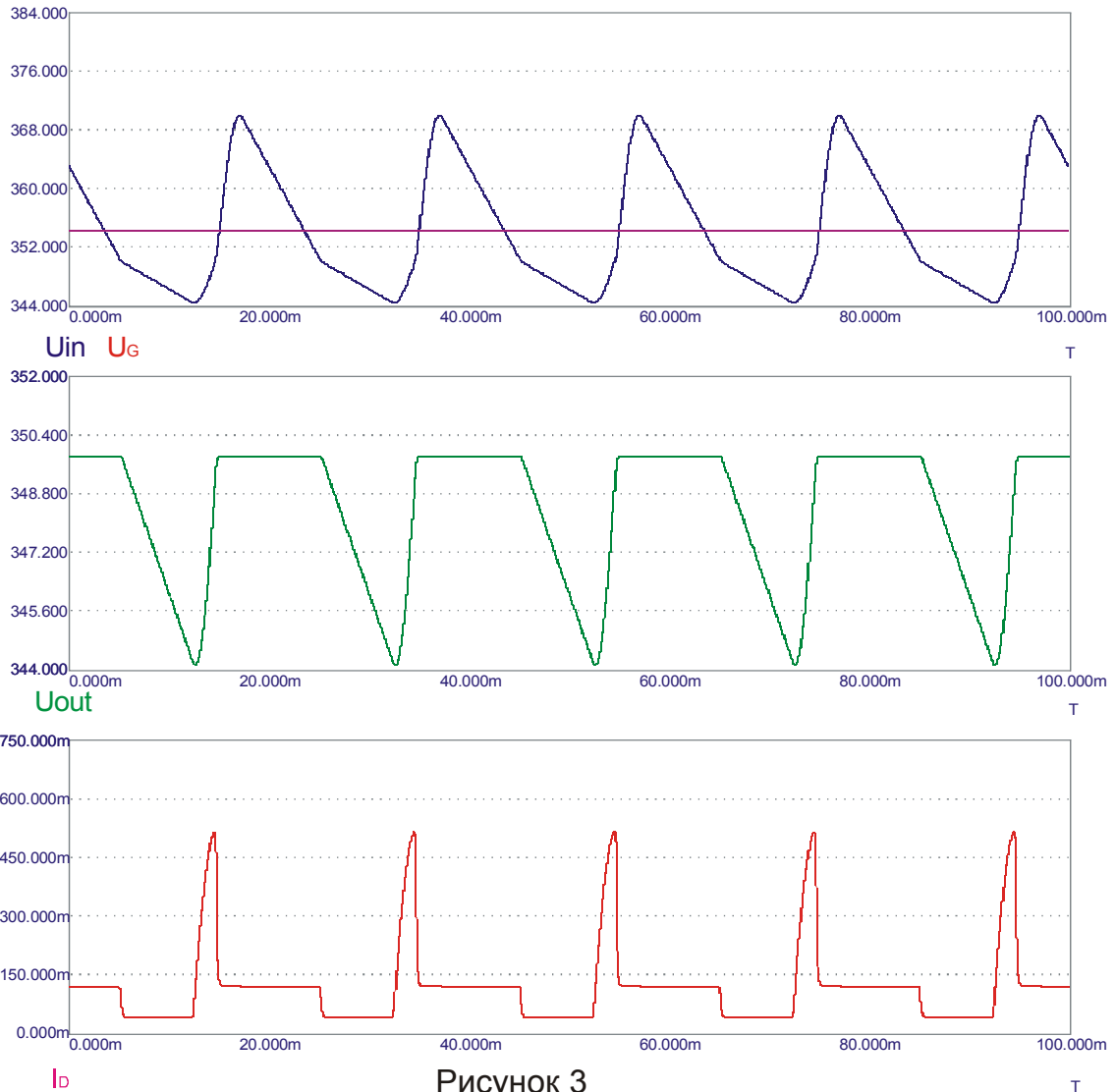


Рисунок 3

Почему это происходит, хорошо видно из графиков, показанных на рисунке 3.

Так как ток затвора транзистора близок к нулю, напряжение на затворе становится близким к среднему выпрямленному значению напряжения на входе. Среднее напряжение на выходе фильтра будет меньше входного приблизительно на величину порогового напряжения транзистора. Пока напряжение на входе фильтра превышает выходное, фильтр работает в нормальном режиме. Как только напряжение на входе становится ниже выходного, начинается падение напряжения на выходной емкости, а напряжение на затворе остается практически постоянным. По мере увеличения напряжения сток затвор (растет), транзистор выходит из линейного режима и превращается в ключ. К выпрямителю подключаются обе емкости. Напряжение на выходной емкости продолжает падать. Когда на-

пряжение на входе начинает возрастать, через малое сопротивление открытого транзистора начинается быстрый заряд обеих емкостей (что дает бросок тока). По мере повышения напряжения на выходной емкости транзистор выходит из ключевого режима и переходит в линейный режим.

Что мы имеем в результате: повышенный уровень пульсаций на выходе фильтра, значительные импульсные токи в его цепях, скачки внутреннего сопротивления фильтра и модуляцию эквивалентной емкости в такт с пульсациями. Такая ситуация возникнет обязательно, но степень возрастания пульсаций и амплитуды пиковых токов могут сильно варьироваться в зависимости от величины и соотношения емкостей, приведенного сопротивления выпрямителя, параметров транзистора. Кстати, аналогичная ситуация может возникнуть и при использовании биполярных транзисторов (например, составного) с очень большим коэффициентом передачи тока.

Чтобы избежать такого ненормального режима работы, необходимо гарантировать, что выходное напряжение всегда будет меньше входного на величину пульсаций (при использовании мощных биполярных транзисторов, чаще всего, это получается автоматически). В простейшем случае достаточно ввести схему еще один резистор (варианты включения показаны пунктиром), образующий де-

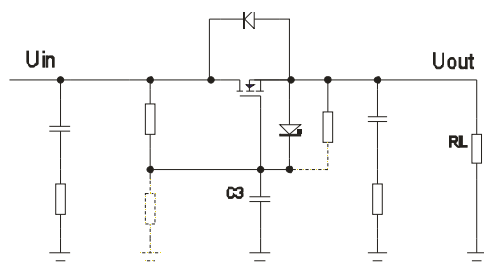


Рисунок 4

литель в цепи затвора (рисунок 4). В принципе, это вполне предсказуемое требование, так как фильтр - активное устройство, и для его работы в линейном режиме необходимо иметь некоторый запас напряжения для регулирования. Конечно, введение дополнительного резистора немного ухудшает фильтрующие свойства, но существует достаточно методов, позволяющих это компенсировать. Делитель можно делать достаточно высокоомным, но не следует забывать о наличии токов утечек в цепи затвора и защитного стабилитрона. Ток делителя должен превышать суммарный ток утечек (при максимальной рабочей температуре), как минимум, на порядок.

Отдельный вопрос - это выбор разницы между входным и выходным напряжением. Кроме очевидных составляющих: уровня пульсаций (при максимальном токе нагрузки) и порогового напряжения транзистора, надо учитывать еще две составляющих - кратковременную нестабильность сети (об этом часто забывают, и совершенно зря) и провал напряжения на выходе выпрямителя при изменении тока нагрузки (в частности, величину тока сигнала). Точный учет всех составляющих довольно громоздок, но в большинстве практических случаев вполне достаточно обеспечить разницу между входным и выходным напряжением в 20÷25 вольт.

Все-таки необходимо помнить, что механизм работы электронного фильтра и LC фильтра совершенно разный, они имеют разную жесткость выходных характеристик и разный отклик на возмущение, как со стороны нагрузки, так и со стороны сети.

Жесткость электронного фильтра выше, как за счет отсутствия активного сопротивления потерь дросселя, так и потому, что энергия на выход может быть быстро получена и из емкости фильтра выпрямителя, и непосредственно из сети. При колебаниях тока потребления исключено возникновение колебательного процесса в источнике. К положительным свойствам фильтра можно отнести и то, что его эффективность мало падает при фильтрации 50-ти герцовой составляющей в выпрям-

ленном напряжении (возникает в результате незначительной асимметрии в выпрямителе и самой сети).

Уровень шумовой составляющей в выходном напряжении электронного фильтра выше, чем с LC фильтром, спектр шумовой составляющей шире. Возможен кратковременный переход в режим «икания» при больших скачках сетевого напряжения, что сопровождается резким возрастанием уровня пульсаций и высокочастотного шума в выходном напряжении.

Достаточно важным моментом является и то, по каким цепям источника протекает ток сигнала. В LC фильтре ток сигнала преимущественно протекает именно по выходному конденсатору (кроме области самых низких частот), а в электронном фильтре значительная часть тока будет протекать и по цепи емкости фильтра выпрямителя, и частично через сам выпрямитель в значительно более широкой частотной области. В целом, это нежелательный фактор.

В общем, использование электронного фильтра (*правильно работающего*) вполне возможно в схемах, потребляющих постоянный средний ток, и к которым не предъявляются повышенные требования по шумам источника питания (усилители мощности, работающие в классе «А», предварительные усилители с небольшим коэффициентом усиления).

Использовать его в схемах со значительными колебаниями потребляемого тока (например, усилители, работающие в классе «АВ») нежелательно.

В заключение хочу заметить, что электронный фильтр - полумера. Необходимость иметь запас напряжения на регулирующем элементе сводит на нет его преимущества по КПД, а необходимость наличия охладителя сводит на нет преимущества по габаритам. Заметный выигрыш получается только в массе. Косвенным подтверждением этому является очень редкое использование такого решения в реальных устройствах.

Раз уж в источник вводятся активные силовые компоненты, то целесообразно реализовывать полноценный стабилизатор. Незначительное увеличение стоимости дает качественный скачок параметров системы питания устройства.

Литература

1. Исаков Ю. А. и др., Основы промышленной электроники. - К.: «Техніка», 1976г.
2. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник – М.: «Радио и связь», 1986г.