

Новые схемы сверхрегенеративных приемников для радиолюбителей, работающих в КВ и УКВ диапазонах

Традиционные схемы сверхрегенеративных каскадов

Для начала рассмотрим построение сверхрегенеративных каскадов на лампах — это поможет лучше понять основные принципы их схемотехники. На рис. 4 приведены некоторые схемы сверхрегенеративных детекторов на лампах, которые широко использовались в 1930-40 гг. прошлого столетия. В этих схемах частота радиочастотных (РЧ) колебаний (она же определяет частоту приема) устанавливается с помощью катушки L2 и подстроечного конденсатора. Процесс регенерации в приемнике контролируется изменением напряжения питания каскада.

На рис. 4, А показана классическая схема с «плавающим катодом». Анод лампы заземляется по высокой частоте, образуя схему с общим анодом. Внутренняя емкость между катодом и землей лампы (плюс любые паразитные емкости схемы) совместно с емкостью между катодом и управляющей сеткой лампы создают генератор Колпитца. Когда уровень регенерации в схеме становится достаточно высоким, возникают радиочастотные колебания. В ней дроссель RFC1 изолирует по вы-

сокой частоте катод лампы от общего провода для РЧ колебаний. Такая развязка дестабилизирует схему, позволяя нарастать РЧ колебаниям на катode.

В схеме на рис. 4, В используется катушка с центральным отводом, включенная по схеме генератора Хартли. Обратите внимание, что на этот раз катод лампы имеет потенциал общего провода. Анод лампы подключен к одному концу катушки L2, а управляющая сетка — к другому. Анодный ток протекает от источника напряжения через отвод катушки. Этот ток индуцирует во вторую половину катушки сигнал, который находится в фазе с входным сигналом (положительная обратная связь), что вызывает возникновение автоколебаний в схеме.

Схема, приведенная на рис. 4, С, основана на автогенераторе Колпитца. Для обеспечения инверсии фазы используется двоиный подстроечный конденсатор, это гораздо удобнее катушки с отводом. Здесь емкостный делитель, образованный между анодом, заземленным катодом и управляющей сеткой лампы, также заземлен в своей центральной точке. Такое включение подстроечного конденсатора имеет очевидное преимущество: заземлен-

ный статор позволяет избежать попадания оператора под высокое напряжение источника питания, а кроме того, уменьшается влияние паразитной емкости руки оператора. Такое построение схемы требует, чтобы подстроечный конденсатор имел достаточно длинную изолированную ручку для предотвращения изменения частоты от прикосновения руки оператора (емкость человеческой руки). Несмотря на то, что отвод катушки индуктивности L2 должен быть заземлен по высокой частоте на землю, обычно рекомендуется включать небольшую индуктивность RFC1 между отводом и шунтирующим конденсатором. Возможно, это вызвано тем, что паразитная емкость схемы между каждым концом катушки индуктивности и отводом должна быть соединена с общим проводом кратчайшим путем. Если паразитные емкости не сбалансированы, условия самовозбуждения будут нарушены и автоколебания в схеме не возникнут. При использовании катушки индуктивности RFC1 в схеме с «плавающим отводом» может быть достигнута максимальная частота генерации.

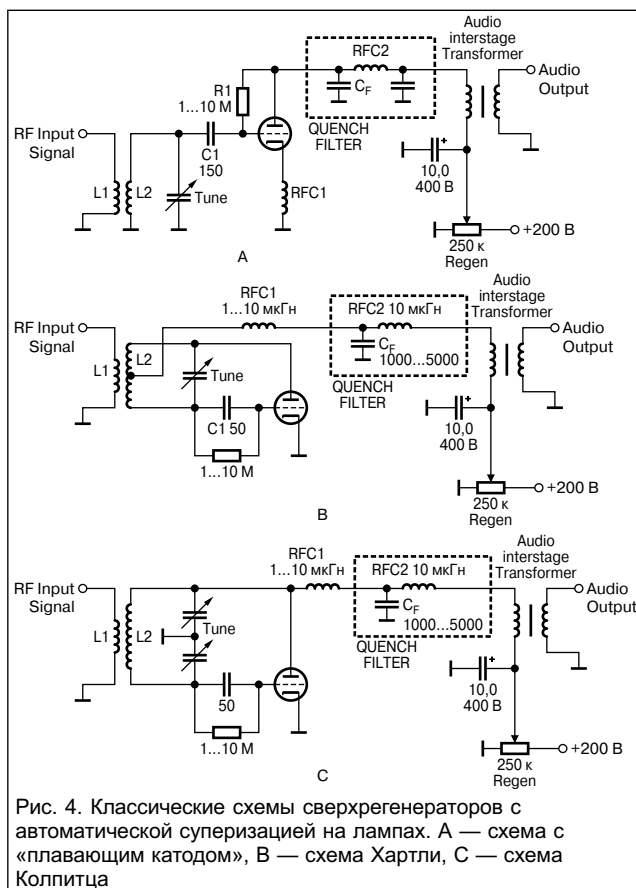
Уменьшение уровня излучаемых помех

Поскольку работа в режиме генерации является частью нормального рабочего цикла сверхрегенеративного детектора, такая схема будет излучать в эфир собственный РЧ сигнал. Очень высокий уровень излучаемых помех часто является результатом прямого подключения к ламповому сверхрегенератору антенны. При использовании лампы типа 6J5, работающей при токе в несколько десятков миллиампер и анодном напряжении 150-200 В, уровень помех может составлять около ватта и даже выше!

В настоящее время имеются отличные транзисторы, частотные и шумовые характеристики которых значительно лучше соответствующих характеристик ламп, и которые при этом работают при значительно меньших уровнях мощности. Сверхрегенеративные детекторы на полевых транзисторах с управляющим р-п переходом (JFET), описанные в этой статье, обычно потребляют 200 мкА и меньше от источника напряжения 6 В, что соответствует уровню мощности примерно 1,2 мВт. Несмотря на такое существенное понижение уровня потенциальных радиопомех, все современные сверхрегенеративные приемники, как правило, включают в себя радиочастотный каскад для обеспечения дополнительной развязки антенны и сверхрегенеративного каскада.

Сверхрегенеративные каскады на полупроводниковых элементах

На рис. 5 приведены несколько сверхрегенеративных каскадов на полупроводниковых элементах, разработанных в 1960-х гг. Схема на рис. 5, А очень похожа на схему с «плавающим катодом» на рис. 4, А. В качестве активного прибора применен п-р-п биполярный транзистор. Обратите внимание на то, что дроссель RFC1 отвязывает эмиттер транзистора от



избежать попадания оператора под высокое напряжение источника питания, а кроме того, уменьшается влияние паразитной емкости руки оператора.

Все описанные выше схемы характеризуются нестабильной работой и достаточно сложны в построении. Различия в индивидуальной разводке каждой схемы зависят от паразитных емкостей управляющей сетки и катода, требуя от радиолюбителя каждый раз подбирать величины дросселя RFC1 и подстроечного конденсатора для того, чтобы заставить сверхрегенеративный каскад генерировать (и гасить автоколебания) должным образом. В схеме на рис. 4, В содержится дополнительное неудобство: оба вывода подстроечного

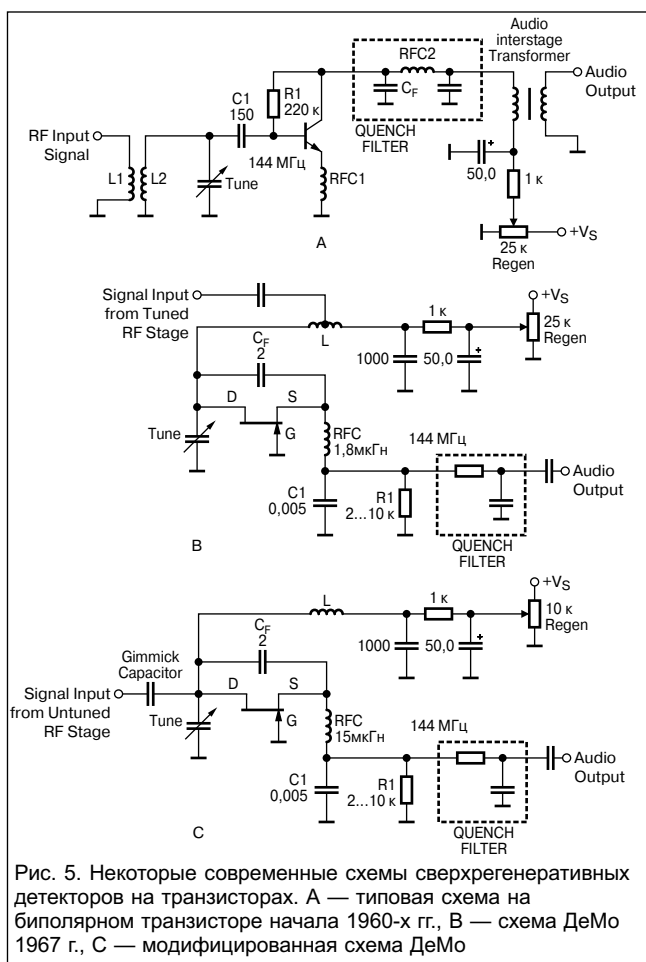


Рис. 5. Некоторые современные схемы сверхрегенеративных детекторов на транзисторах. А — типовая схема на биполярном транзисторе начала 1960-х гг., В — схема ДеМо 1967 г., С — модифицированная схема ДеМо

общего провода. Такое включение иницирует колебания в схеме и помогает предотвратить шунтирование катушки L2 слишком низким сопротивлением перехода эмиттер-база транзистора. При использовании каскадов на биполярных транзисторах достаточно трудно управлять процессом регенерации, поскольку слишком резкое изменение коэффициента усиления транзистора при изменении напряжения питания каскада не позволяет плавно регулировать процесс регенерации.

Несмотря на то, что схемы на транзисторах малогабаритны и просты, все приведенные на рис. 4 и 5 схемы обладают очень плохой избирательностью. Некоторые радиолюбители в своих разработках сверхрегенеративных приемников в 1940-50 гг. использовали высокودобротные настраиваемые коаксиальные линии. В таких схемах удавалось достичь значительно лучшей избирательности, чем в традиционных, однако изготовление коаксиальных линий для неопытных радиолюбителей — непростое дело, и поэтому такое конструктивное решение так и не стало популярным.

На рис. 5, В приведена схема, разработанная Дугом ДеМо (W1FB/W1CER) в 1967 г. Она имеет несколько существенных преимуществ перед предыдущими схемами. В схеме применен транзистор JFET, который имеет меньший, чем у биполярного транзистора коэффициент усиления, но его значение значительно

напряжения суперизации. Полезный сигнал звуковой частоты, предварительно пропущенный через НЧ фильтр, снимается с истока транзистора.

Пытаясь построить в 90-х годах версию этой схемы, автор не смог найти подходящую по параметрам катушку индуктивности 1,8 мкГн и поэтому вынужден был несколько модифицировать схему. В результате получилась схема, приведенная на рис. 5, в. В ней увеличена величина катушки индуктивности и уменьшена величина конденсатора Cf для того, чтобы обеспечить неизменную величину обратной связи. Таким образом, стало возможным использование дросселя с большим значением индуктивности в качестве RFC. Вместо сильно связанного со сверхрегенератором резонансного РЧ каскада, примененного в схеме ДеМо, автор использовал апериодический усилитель РЧ, который связан со сверхрегенератором через подстроечный конденсатор малой емкости. Апериодический каскад обеспечивает более чем достаточное усиление входного сигнала, очень стабилен и легко настраивается. Использование подстроечного конденсатора с маленькой емкостью несколько ухудшает

меньше зависит от изменения питающего напряжения, чем у биполярного транзистора. Транзистор включен по схеме с «общим затвором». Такое включение существенно улучшает стабильность каскада и обеспечивает большую полосу пропускания по сравнению с включением по схеме с «общим истоком». Схема ДеМо имеет несколько сходных элементов со схемой с «плавающим катодом». Внешний конденсатор, добавленный между стоком и истоком, помогает запустить в схеме автоколебания. Особенность такой схемы заключается в использовании большого (10 кОм) резистора R1 в истоковой цепи транзистора. Этот резистор служит для того, чтобы установить высокий уровень постоянного смещения для полевого транзистора, а также для формирования

чувствительности приемника за счет падения части усиленного сигнала на самом конденсаторе, однако позволяет избежать шунтирования LC-контура сверхрегенератора, сохраняя таким образом его высокую добротность. Такое включение увеличивает избирательность сверхрегенератора и обеспечивает дополнительную развязку сверхрегенератора от антенны.

Таким образом, модификации основной схемы ДеМо могут быть использованы при конструировании портативных АМ радиоприемников на диапазон УКВ (118–136 МГц), однако их селективность остается по-прежнему достаточно низкой, и поэтому прием узкополосных ЧМ сигналов в диапазоне 2 м невозможен. Возможным остается только прием несущей узкополосных ЧМ сигналов, в то время как демодулированный сигнал на выходе сверхрегенератора остается слишком слабым.

Схема сверхрегенератора для приема узкополосных ЧМ сигналов

На рис. 6 показана новая схема сверхрегенератора, имеющего несколько существенных отличий от традиционных схем с низкой избирательностью. До сих пор мы рассматривали добротность сверхрегенеративных каскадов как определяющий параметр избирательности приемника. Частота суперизации в литературе обычно упоминается как некритичный параметр, в то время как форма напряжения суперизации не упоминается вообще. Как и в любом другом приемнике, добротность настроенного РЧ каскада всегда важна, однако, как показывает собственный опыт автора, наиболее важным параметром, оказывающим влияние на избирательность сверхрегенеративного детектора, является именно форма напряжения суперизации. В процессе экспериментов автор обнаружил, что применение чистого синусоидального сигнала в качестве напряжения суперизации значительно повышает избирательность приемника и позволяет детектировать даже узкополосный ЧМ сигнал.

Первой особенностью схемы на рис. 6 является потенциометр Rqw для изменения формы напряжения суперизации. Он стоит последовательно с конденсатором C1 и имеет небольшой номинал. Это добавочное сопротивление

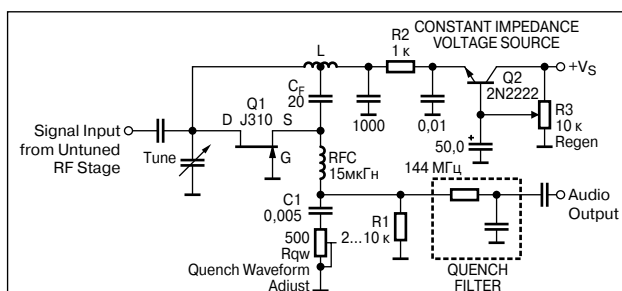


Рис. 6. Схема сверхрегенеративного приемника для приема узкополосного ЧМ сигнала

ние изменяет форму колебаний суперизации от обычной пилообразной до почти синусоидальной. Если колебания в сверхрегенераторе с автоматическим гашением возникают, то большая постоянная времени, устанавливаемая конденсатором С1 и резистором R1, вызывает увеличение постоянного смещения транзистора (заряжается конденсатор С1) до тех пор, пока в схеме не прекратятся РЧ колебания. Затем заряженный конденсатор С1 разряжается через резистор R1, и в схеме вновь начинаются автоколебания. Номиналы резистора R1 и конденсатора С1 плюс любые сопротивления и конденсаторы в цепях питания сверхрегенеративного каскада устанавливают частоту и форму колебаний таких релаксационных колебаний. И то, и другое критически важно при определении чувствительности радиоприемника.

Пилообразная модуляция приводит к широкому спектру побочных частот с каждой стороны несущей сверхрегенератора (первичных РЧ колебаний на частоте приема). Таким образом, боковые полосы содержат множество паразитных гармоник, которые являются помехой для узкополосного входного сигнала. Следовательно, для приема узкополосных ЧМ сигналов очень важно уменьшить эти побочные гармонические составляющие.

При введении потенциометра R_{qw} в схему сверхрегенератора с автоматическим гашением форма огибающей РЧ колебаний и амплитуда колебаний напряжения суперизации начинают изменяться — происходит сглаживание модуляционной огибающей РЧ колебаний. Поскольку форма колебаний напряжения суперизации теперь значительно ближе к синусоидальной, спектр РЧ колебаний сверхрегенератора содержит значительно меньше побочных гармонических составляющих, и, следовательно, полоса пропускания приемника становится значительно уже. Также снижается степень блокирования сверхрегенератора собственными излучениями (поскольку в детекторе эффективно подавляются собственные помехи приему) и значительно улучшается способность сверхрегенератора принимать узкополосные сигналы.

Заметьте, что в большинстве ранее рассмотренных сверхрегенеративных схем применялись высокоомные потенциометры для управления режимом регенерации, обычно порядка 25 кОм в транзисторных схемах и до 250 кОм в ламповых. Если управляющий потенциометр находился на конце своего диапазона, он создавал большое последовательное сопротивление в цепи питания сверхрегенератора. В схеме с автоматическим гашением такое сопротивление дополнительно искажает форму огибающей РЧ колебаний, еще больше ухудшая избирательность.

Использование простого источника напряжения на транзисторе Q2 помогает предотвратить любые значительные изменения последовательного сопротивления в цепи питания сверхрегенератора при регулировании уровня регенерации.

Десятиоборотный подстроечный резистор R3 изменяет напряжение на базе транзистора Q2, которое приблизительно на 0,7 В больше напряжения на его эмиттере. Если у вас отсутствует точный подстроечный резистор номиналом 10 кОм, вы можете заменить его комбинацией обычного подстроечного резистора на 1 кОм и постоянного резистора 9,1 кОм. Для этого надо соединить движок и один конец подстроечного резистора вместе, а затем последовательно соедините с постоянным резистором. Точку их соединения необходимо подключить к базе транзистора Q2. Такое соединение позволяет плавно регулировать уровень регенерации в схеме. Экспериментальным методом было установлено, что резистор R2 должен быть порядка 1 кОм. Именно такое значение последовательного сопротивления обеспечивает наилучшее качество демодуляции узкополосных ЧМ сигналов.

Второе важное усовершенствование традиционной схемы заключается в использовании сверхрегенеративного детектора на транзисторе, включенном по схеме с общим затвором в модифицированном генераторе Хартли. Сток транзистора соединен по высокой частоте с одним концом катушки индуктивности L1, в то время как другой конец катушки соединен с общим проводом, таким образом по высокой частоте соединяясь с затвором Q2. Исток транзистора соединен с отводом катушки индуктивности L. Отвод катушки обеспечивает необходимую инверсию фазы между затвором и стоком, поэтому в каскаде образуется положительная обратная связь. Радиочастотный дроссель RFC изолирует по высокой частоте исток транзистора от общего провода, но позволяет снимать НЧ сигнал с истока транзистора без шунтирования контура сверхрегенератора.

Схему на рис. 6 значительно легче настроить, чем схему с емкостной обратной связью между стоком и истоком на рис. 5. С. В схеме на рис. 6 величина обратной связи легко регулируется изменением точки, в которой конденсатор C_f соединен с катушкой L. Для подавляющего большинства вариантов разводки схемы присоединение конденсатора C_f к середине катушки дает отличные результаты. Эта схема намного меньше зависит от разброса в значениях C_f и RFC.

Для приема узкополосного ЧМ сигнала сверхрегенератор настроен на одну сторону от несущей и уровень регенерации подбирается таким образом, чтобы осуществить детектирование на склоне контурной частотной характеристики. Такой метод детектирования используется для приема ЧМ сигналов на обычный АМ детектор. Спектр сигнала с другой стороны от несущей ЧМ сигнала может быть перевернут, и амплитуда сигнала на выходе АМ детектора будет уменьшаться по мере удаления спектральных составляющих от несущей, а амплитуда протектированного

го сигнала будет изменяться в соответствии с законом частотной модуляции.

Детектирование на склоне частотной характеристики обычно трудно осуществить на супергетеродинных приемниках, потому что их селективность не может быть легко изменена, в то время как изменяемая селективность сверхрегенератора позволяет осуществить не только прием узкополосной ЧМ, но и фактически всех видов модуляций. Как и традиционные регенеративные приемники в КВ диапазоне, такие узкополосные схемы требуют аккуратной регулировки уровня регенерации и точной настройки. Несмотря на это, научиться настраивать и работать со сверхрегенератором намного проще, чем сконструировать чувствительный широкополосный супергетеродинный приемник.

Повышение избирательности сверхрегенеративного приемника с внешним гашением

Очень интересный эффект можно наблюдать, если в качестве источника сигнала суперизации для сверхрегенератора на рис. 6 использовать внешний синусоидальный генератор. Несмотря на то, что детектор остается по-прежнему очень чувствительным, и шум на выходе в отсутствие входного сигнала меньше, чем в традиционных схемах сверхрегенераторов с автоматическим гашением, приемник остается достаточно низкоизбирательным и не способен детектировать узкополосные ЧМ сигналы. Возможно, причина кроется в том, что модуляция автогенератора (детектора) и модуляция РЧ усилителя по своей сути не одно и то же. В случае, когда генерирующий сверхрегенеративный детектор гасится (модулируется) внешним синусоидальным напряжением, получается очень искаженная огибающая синусоидального сигнала. Форма напряжения и длительность рабочего цикла сверхрегенератора должны быть такими, чтобы огибающая РЧ колебаний в схеме была чисто синусоидальной. Эта область остается открытой для радиолюбительских экспериментов.

Сверхрегенеративный смеситель/демодулятор для узкополосной ЧМ

Радиолюбитель из Новой Зеландии, Нэт Бредли (ZL3VN) построил множество сверхрегенеративных приемников КВ и УКВ диапазонов, и при этом сделал несколько важных открытий. Возможно, наиболее интересное из них до сих пор не опубликовано. Если *соответствующий* РЧ синусоидальный сигнал ввести в контур сверхрегенеративного детектора, то при подаче на вход схемы узкополосного ЧМ сигнала на выходе детектора можно получить очень сильный НЧ сигнал. Под *соответствующим* сигналом понимается РЧ синусоидальный сигнал, сдвинутый от частоты принимаемого сигнала на значение частоты сигнала суперизации этого детектора. Автор проверил открытие Нэта Бредли, используя генератор синусоидального сигнала,

расположенный близко к сверхрегенератору (в прямом соединении нет необходимости). Выставляя на этом внешнем генераторе частоту сигнала примерно на 100 кГц (частота суперизации используемого сверхрегенератора) выше или ниже частоты принимаемого сигнала, автор на выходе приемника получал сильный узкополосный ЧМ сигнал с очень малыми искажениями, при этом регулировка процесса регенерации очень проста. Несмотря на то, что механизм работы такого приемника точно неизвестен, можно предположить, что сверхрегенеративный детектор производит смешивание двух сигналов. В результате смешивания на выходе приемника образуется два РЧ сигнала: сигнал с частотой 100 кГц «ПЧ» (сигнал с разностной частотой между генератором и несущей принимаемого сигнала) и второй РЧ сигнал с частотой напряжения суперизации. Этот второй сигнал промодулирован частотой ± 5 кГц принятого узкополосного ЧМ сигнала. Затем два сигнала смешиваются в детекторе с колебаниями частоты суперизации. Таким образом, удаляется 100 кГц несущая сигнала суперизации, и остается лишь исходный демодулированный ЧМ сигнал.

Это открытие означает, что могут быть построены очень чувствительные сверхрегенеративные смесители/детекторы, которые напрямую демодулируют узкополосный ЧМ сигнал на очень высоких частотах. И это при очень малой стоимости и потребляемой мощности стандартного супергетеродинного приемника! Не забывайте, однако, что хотя такая схема и обладает очень высокой чувствительностью, она все же обладает недостатком, свойственным всем супергетеродинным приемникам. Генератор должен очень точно отслеживать настройку смесителя при изменении частоты принимаемого сигнала. Следовательно, радиолюбитель должен собрать два генератора, один гетеродинный (*соответствующий*) и один сверхрегенераторный (с частотой суперизации), используя для этого переменный конденсатор с двумя или тремя ручками. Если эти требования выполняются, то можно получить очень хороший приемник для прослушивания одного радиолюбительского диапазона.

КВ приемник на диапазон 38-54 МГц

Схема, приведенная на рис. 7 обеспечивает перекрытие 6-метрового радиоловительского диапазона и других нижних частот КВ диапазона. Приемник может осуществлять демодуляцию АМ сигналов, широкополосных и узкополосных ЧМ сигналов, фазомодулированных сигналов. В схеме предусмотрена возможность регулировки уровня регенерации, что позволяет детектировать CW и SSB сигналы при работе в режиме прямой регенерации. Потребляемый приемником ток не превышает 20 мА, чувствительность — не хуже 0,5 мкВ.

Рассмотрим кратко работу схемы на рис. 7. Входной радиосигнал с антенны

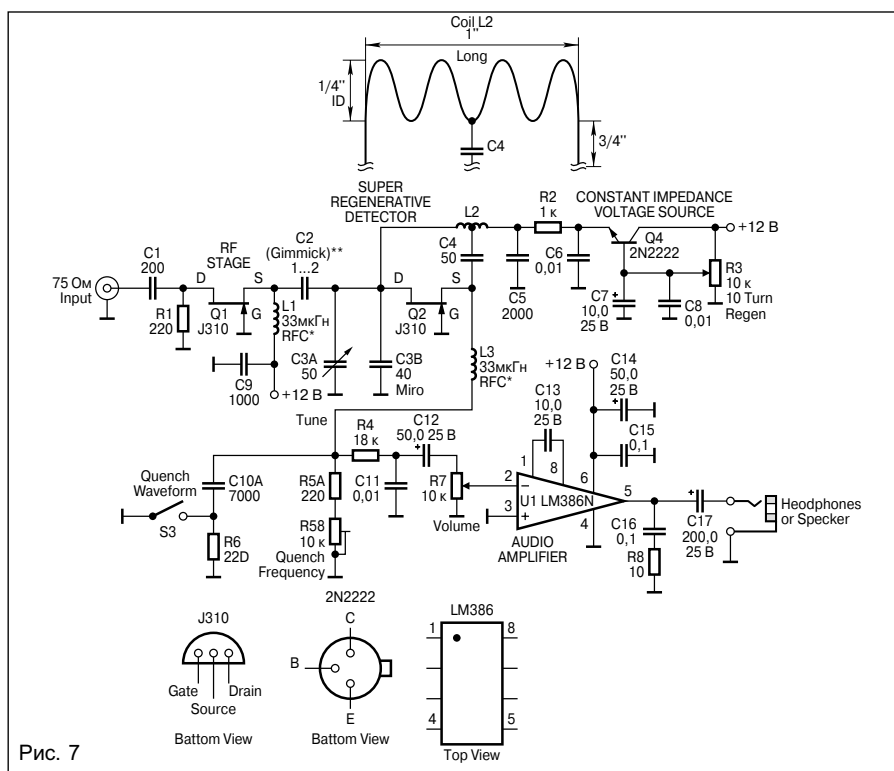


Рис. 7

через 75-омный коаксиальный кабель поступает на вход РЧ усилителя — источник транзистора Q1, включенного по схеме с общим затвором. Хотя каскад не имеет усиления по току, такая схема обеспечивает достаточный коэффициент усиления по напряжению во всем частотном диапазоне. Высокая чувствительность сверхрегенератора компенсирует любые потери в усилении РЧ каскада. РЧ усилитель на транзисторе, включенном по схеме с общей базой, характеризуется низким коэффициентом шума, защищенностью от блокирования сильным сигналом, высокой устойчивостью, работой в широком диапазоне частот и хорошей развязкой входной цепи от выхода усилителя. У такого каскада низкое входное сопротивление (простое согласование с коаксиальным кабелем) и высокое выходное сопротивление, которое минимизирует шунтирование контура сверхрегенератора.

Резистор R1 обеспечивает защитное постоянное смещение для полевого транзистора Q1. Катушка индуктивности L1, подключенная к стоку транзистора, служит нагрузкой РЧ усилителя, с которой снимается усиленный входной сигнал. Величина индуктивности L1 не критична, но желательно выбрать ее равной индуктивности L3 сверхрегенератора. Через подстроечный конденсатор C2 усиленный сигнал с РЧ каскада поступает на вход детектора. Подстроечный конденсатор может быть изготовлен из двух скрученных изолированных проводов длиной около 2,5 см. Емкость полученного таким образом конденсатора составляет порядка 1 пФ. По сравнению с постоянными конденсаторами большей емкости, подстроечный конденсатор очень слабо связывает усилитель с детектором. Слабая связь

между каскадами предотвращает понижение селективности сверхрегенератора и устраняет «дыры» приема в диапазоне настройки сверхрегенератора, которые часто возникают при сильной связи между каскадами.

Сверхрегенератор выполнен на транзисторе Q2, включенном по схеме модифицированного генератора Хартли. Конденсаторы C3b, C4 и C5 должны быть слюдяными или керамическими типа NP0, поскольку все они должны иметь очень малые утечки и высокую добротность. Резистор R6 имеет низкое сопротивление и включает последовательно с конденсатором C10a. Он преобразует форму напряжения суперизации в синусоидальную для повышения избирательности. Транзистор Q4 уменьшает любые изменения формы напряжения суперизации при регулировке уровня регенерации.

Выходной сигнал пропущен через НЧ фильтр R4C11. Такая фильтрация предотвращает проникновение сигнала с частотой суперизации в каскад усиления ЗЧ. Этот фильтр также срезает верхние звуковые частоты, что приводит к улучшению качества звука и понижает фоновые шумы сверхрегенератора в отсутствии входного сигнала. Через переходной конденсатор C12 сигнал поступает на регулятор громкости R7. Микросхема LM386 представляет собой интегральный усилитель мощности ЗЧ, имеет коэффициент усиления порядка 200 и обеспечивает на выходе достаточную мощность для работы на стандартные наушники или маломощный динамик.

Charles Kitchen

перевод **Сергея Иванова**
isv888@yandex.ru