

НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



РТРУЛ-9

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХРЕГЕНЕРАТИВНЫХ
РАДИОПРИЕМНИКОВ.**

Тула, 2012 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХРЕГЕНЕРАТИВНЫХ РАДИОПРИЕМНИКОВ.

Цель работы: исследовать теоретические принципы построения схемы сверхрегенеративного РПУ, экспериментально определить параметры сигналов в контрольных точках схемы.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Общие сведения о сверхрегенеративном РПУ.

Сверхрегенератор (его еще называют суперрегенератор) - это совершенно особый вид усилительного, или усилительно-детекторного устройства, обладающий при исключительной простоте уникальными свойствами, в частности, коэффициентом усиления по напряжению до $10^5 \dots 10^6$, т. е. достигающим миллиона! Это означает, что входные сигналы с уровнем в доли микровольта могут быть усилены до долей вольта. Разумеется, обычным способом такое усиление в одном каскаде получить невозможно, но в сверхрегенераторе используется совершенно другой способ усиления.

Сверхрегенератор работает с выборками входного сигнала, взятыми в определенные моменты времени. Затем происходит усиление выборки во времени, и через какой-то промежуток снимается выходной усиленный сигнал, часто даже с тех же зажимов или гнезд, к которым подведен и входной. Пока совершается процесс усиления, сверхрегенератор не реагирует на входные сигналы, а следующая выборка делается только тогда, когда все процессы усиления завершены. Именно такой принцип усиления и позволяет получать огромные коэффициенты, вход и выход не надо развязывать или экранировать - ведь входные и выходные сигналы разнесены во времени, поэтому не могут взаимодействовать.

В сверхрегенеративном способе усиления заложен и принципиальный недостаток. В соответствии с теоремой Котельникова-Найквиста, для неискаженной передачи огибающей сигнала (модулирующих частот) частота выборок должна быть не менее удвоенной наивысшей частоты модуляции. В случае радиовещательного АМ сигнала наивысшая модулирующая частота составляет 10 кГц, ЧМ сигнала - 15 кГц и частота выборок должна быть не менее 20...30 кГц (о стерео речь не идет). Полоса пропускания сверхрегенератора получается при этом почти на порядок больше, т. е. 200...300 кГц. Этот недостаток неустраним при приеме АМ сигналов и послужил одной из главных причин вытеснения сверхрегенераторов более совершенными, хотя и более сложными супергетеродинными приемниками, в которых полоса пропускания равна удвоенной наивысшей модулирующей частоте.

Как ни странно, при ЧМ описанный недостаток проявляется в значительно меньшей мере. Демодуляция ЧМ происходит на скате резонансной кривой сверхрегенератора - ЧМ превращается в АМ и затем детектируется. При этом ширина резонансной кривой должна быть не меньше удвоенной девиации

частоты (100...150 кГц) и получается гораздо лучшее согласование полосы пропускания с шириной спектра сигнала.

Ранее сверхрегенераторы выполнялись на электронных лампах и получили значительное распространение в середине прошлого века. Тогда на диапазоне УКВ радиостанций было мало, и широкая полоса пропускания не считалась особым недостатком, в ряде случаев даже облегчая настройку и поиск редких станций. Затем появились сверхрегенераторы на транзисторах. Сейчас они используются в системах радиоуправления моделями, охранной сигнализации и лишь изредка в радиоприемниках.

Схемы сверхрегенераторов мало отличаются от схем регенераторов: если у последнего периодически увеличивать обратную связь до порога генерации, а затем уменьшать ее до срыва колебаний, то получается сверхрегенератор. Вспомогательные гасящие колебания с частотой 20...50 кГц, периодически изменяющие обратную связь, получаются либо от отдельного генератора, либо возникают в самом высокочастотном устройстве (сверхрегенератор с самогашением).

Принцип действия сверхрегенератора.

Регенератор представляет собой недовозбужденный генератор на транзисторе, лампе или другом активном элементе. Благодаря наличию положительной обратной связи между входом и выходом схемы (например, между цепями базы и коллектора транзистора) в контур вносится отрицательное сопротивление, частично компенсирующее его потери, что и определяет регенеративный эффект. В результате добротность эквивалентного контура увеличивается, так что, если в этот контур ввести сигнал, можно получить увеличение выходного напряжения.

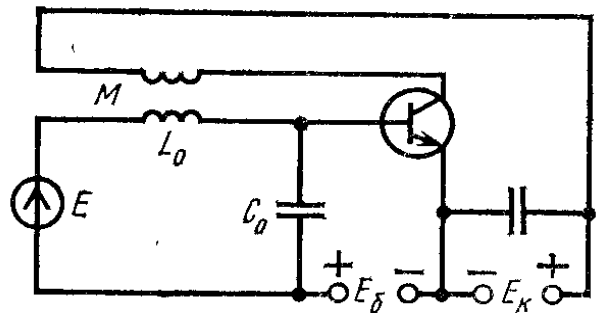


Рис. 1.1. Схема транзисторного регенератора

Оценим возможный выигрыш в добротности, который можно получить в регенераторе (рис. 1.1). Как известно, баланс напряжений в контуре регенератора при резонансе для установившегося режима:

$$IR_0 \mp j\omega MI_k = E, \quad (1.1)$$

где E , I и I_k — комплексные амплитуды ЭДС сигнала в контуре, контурного и коллекторного тока соответственно; R_0 — сопротивление потерь в контуре; M — взаимная индукция между цепями базы и коллектора. Знак перед вторым членом левой части определяется направлением витков в коллекторной катушке по отношению к базовой, и его легко изменить на обратный переключением концов одной из катушек. Таким образом, обратная связь может

быть положительной при внесении отрицательного сопротивления или отрицательной при внесении положительного. Нас интересует только первый случай.

Напряжение на контуре U_K и ток связаны очевидным соотношением:

$$I = j\omega C_0 U_K. \quad (1.2)$$

Пренебрегая для упрощения анализа реакцией коллектора, можно записать:

$$I_K \approx S U_K, \quad (1.3)$$

где S — крутизна транзистора в рабочей точке. Пренебрежение реакцией коллектора не меняет качественной картины процесса и дает лишь небольшую количественную погрешность.

Подставляя (1.2) и (1.3) в (1.1) и относя $|E|$ к $|U_K|$, получаем выражение для затуханий d_p эквивалентного (регенерированного) контура при

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} :$$

$$d_p = \omega_0 C_0 (R_0 - SM/C_0) = d_0 - \omega_0 SM. \quad (1.4)$$

Как видно из (1.4), вследствие эффекта регенерации уменьшается сопротивление потерь от R_0 до $R_0 - SM/C_0$ или затухание от d_0 до $d_0 - \omega_0 SM$. Добротность контура соответственно увеличивается от $Q_0 = 1/d_0$ до $Q_p = 1/d_p$, т. е. схема дает выигрыш в добротности

$$Q_p/Q_0 = d_0 / (d_0 - \omega_0 SM). \quad (1.5)$$

Однако реальный выигрыш при регенерации ограничивается по двум причинам. Первая заключается в значительной неустойчивости режима при сильной регенерации (обратной связи, при которой устройство близко к самовозбуждению). Действительно, в режиме, близком к критическому, достаточно незначительного изменения крутизны усилительного прибора, которое легко может быть вызвано изменением питающих напряжений, чтобы эквивалентное затухание стало отрицательным и схема возбудилась. Поэтому стабильность работы при больших степенях регенерации низка. Вторая причина связана с полосой пропускания схемы. При сильной регенерации эквивалентное сопротивление потерь в контуре и полоса регенерированного контура становятся весьма малыми. Между тем для приема информации при

любом виде модуляции необходимо пропустить определенный спектр частот, и из-за чрезмерно узкой частотной характеристики регенератора с малым коэффициентом прямоугольности невозможно осуществить прием модулированного сигнала без существенных искажений. В результате на практике приходится ограничиваться лишь небольшим увеличением добротности регенератора (в 5 ... 10 раз). Существенное же улучшение параметров схемы, т. е. повышение усиления, стабильности режима при расширении полосы пропускания и определенном улучшении формы частотной характеристики, можно получить, применяя режим сверхрегенерации.

Сверхрегенератор представляет собой регенератор, у которого эквивалентное затухание контура медленно меняется по сравнению с собственными колебаниями, причем на некоторых интервалах времени оно становится отрицательным и регенератор переходит в состояние самовозбуждения. На практике обычно эквивалентное затухание меняется со вспомогательной частотой F , которую часто называют частотой суперизации; она в несколько раз больше максимальной частоты модуляции сигнала и значительно меньше (в 500 ... 1000 раз) частот сигнала и резонансного контура.

На рис. 1.2 представлена структурная схема приемника на основе классического СР, а на рис. 1.3 ... 1.5 — несколько вариантов принципиальных схем

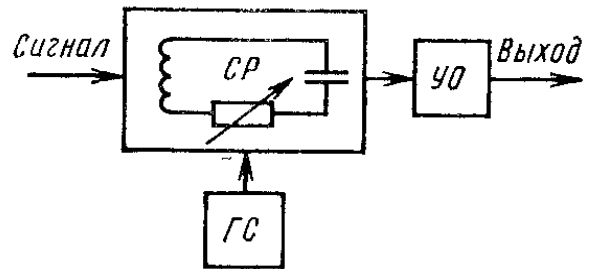


Рис. 1.2. Структурная схема сверхрегенеративного приемника

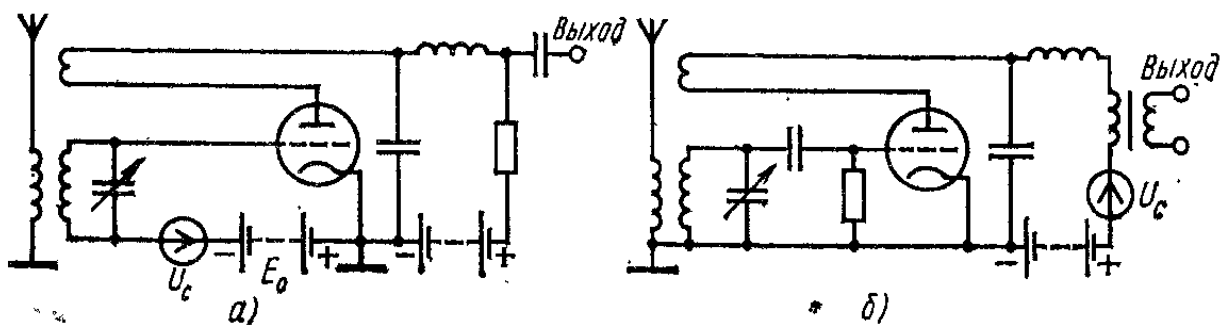


Рис. 1.3. Схемы ламповых СР с внешней суперизацией:
а — на сетку; б — на анод

классических СР. В некоторых случаях функции сверхрегенеративного усилителя, генератора суперизации ГС и детектора, входящего в устройство обработки УО, выполняет один каскад, также называемый СР.

В схеме на рис. 1.2 сигнал вводится в контур СР, охваченный положительной обратной связью, с помощью активного элемента. Напряжение суперизации, поступающее от ГС, меняет крутизну этого элемента, а следовательно, и вводимое в контур отрицательное сопротивление. В результате контур становится системой со знакопеременным затуханием и возникает эффект сверхрегенерации, обеспечивающий значительное усиление. Напряжение, снимаемое с контура, затем детектируется тем же усилительным прибором или отдельным детектором УО и усиливается уже на частоте модуляции.

В СР на электронных лампах напряжение суперизации может вводиться последовательно со смещением в сеточную цепь (рис. 1.3,а) или последовательно с анодным напряжением (рис. 1.3,б). Аналогично строятся СР на транзисторах, в которых напряжения суперизации подаются на базу (рис. 1.4,а) или на коллектор (рис. 1.4,б). Во всех этих случаях напряжение суперизации подается извне, от отдельного генератора, поэтому такие схемы называют схемами с внешней суперизацией. Однако можно построить СР и без внешнего источника суперизации, создав режим прерывистой генерации. Такие СР с автосуперизацией (рис. 1.5)—малогабаритные и экономичные приемники с высокой чувствительностью.

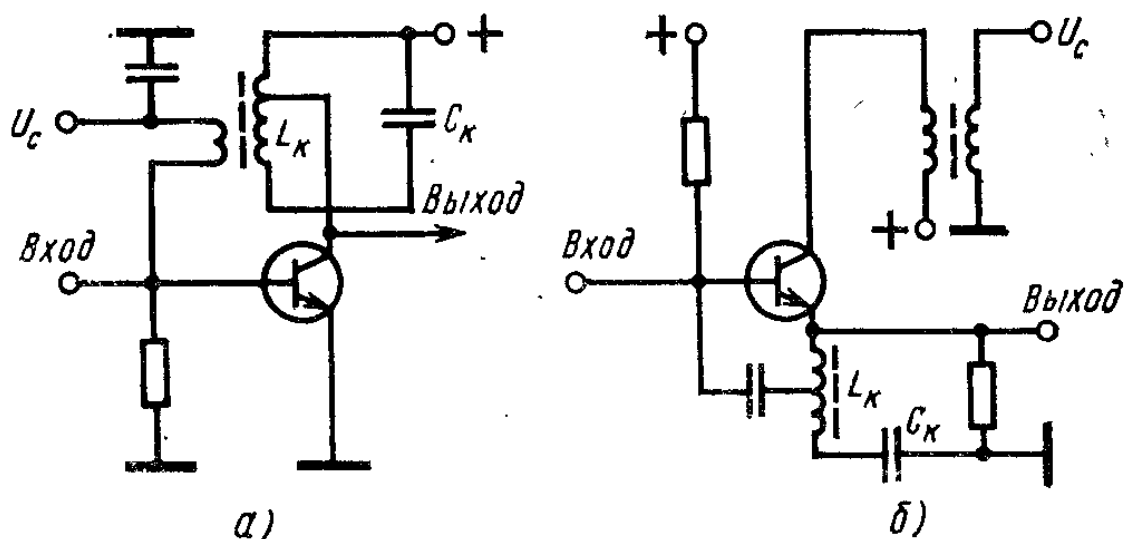


Рис. 1.4. Схемы транзисторных СР с внешней суперизацией:
а — на базу; б — на коллектор (U_c — напряжение суперизации)

В диапазонах умеренно высоких частот (до 300 МГц) выполняются СР на лампах и обычных транзисторах. В диапазоне СВЧ СР можно реализовать на высокочастотных транзисторах, а также на других вакуумных и полупроводниковых приборах. Были построены СР на магнетронах и

отражательных клистронах, однако они не нашли широкого применения из-за большого уровня внутренних шумов. Лучшие результаты были получены при использовании ламп бегущей волны (ЛБВ) и ламп обратной волны (ЛОВ). Еще менее шумящими являются СР на полупроводниковых диодах — туннельных или параметрических.

Процессы в схеме СР с суперизацией на базу транзистора или на сетку лампы иллюстрированы рис. 1.6, Напряжение смещения E_0 выбирается достаточно большим, чтобы в отсутствие напряжения суперизации U_c крутизна была меньше критической, при которой возникает генерация. Если напряжение суперизации имеет достаточную амплитуду, то в момент t_3 крутизна достигает своего критического значения и схема переходит в состояние самовозбуждения, которое будет длиться до момента t_5 . При этом в контуре нарастают свободные колебания тем быстрее, чем больше (по абсолютному значению) отрицательное затухание и начальная ЭДС сигнала в контуре. С момента t_5 условия для самовозбуждения исчезают и колебания затухают. В момент t'_3 они снова начинают нарастать и т. д.

Таким образом, на выходе СР получается серия вспышек колебаний, причем уровень, до которого успевают нарасти колебания в контуре, определяется режимом схемы и амплитудой сигнала. Если амплитуда сигнала будет меняться по какому-либо закону, то по этому же закону (в линейном режиме) должна меняться огибающая вспышек свободных колебаний на контуре (рис. 1.7). Следовательно, при надлежащем выборе параметров детектора можно на выходе его получить напряжение, меняющееся по закону амплитудной модуляции сигнала. При угловой модуляции сигнала полезную информацию извлекают из фазы заполнения вспышек СР.

Усиление, которое обеспечивает СР, ограничивается уровнем внутренних шумов в контуре: ЭДС сигнала, вводимого в контур, должна быть в несколько раз больше уровня шумов. Поскольку при обычно используемой полосе эта ЭДС оказывается порядка нескольких микровольт, а напряжение на выходе СР достигает нескольких вольт, усиление СР достигает $10^5 \dots 10^6$.

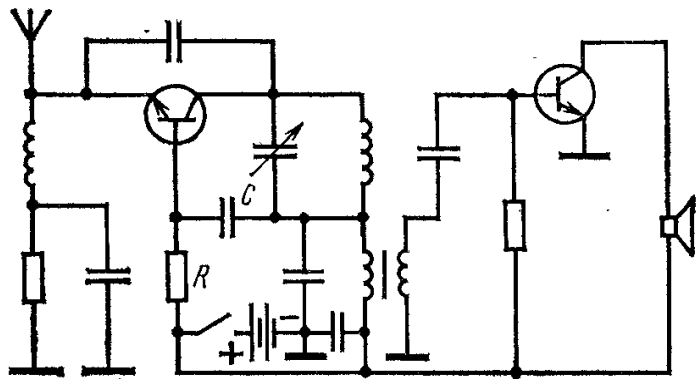


Рис. 1.5. Схема транзисторного СР с автосуперизацией

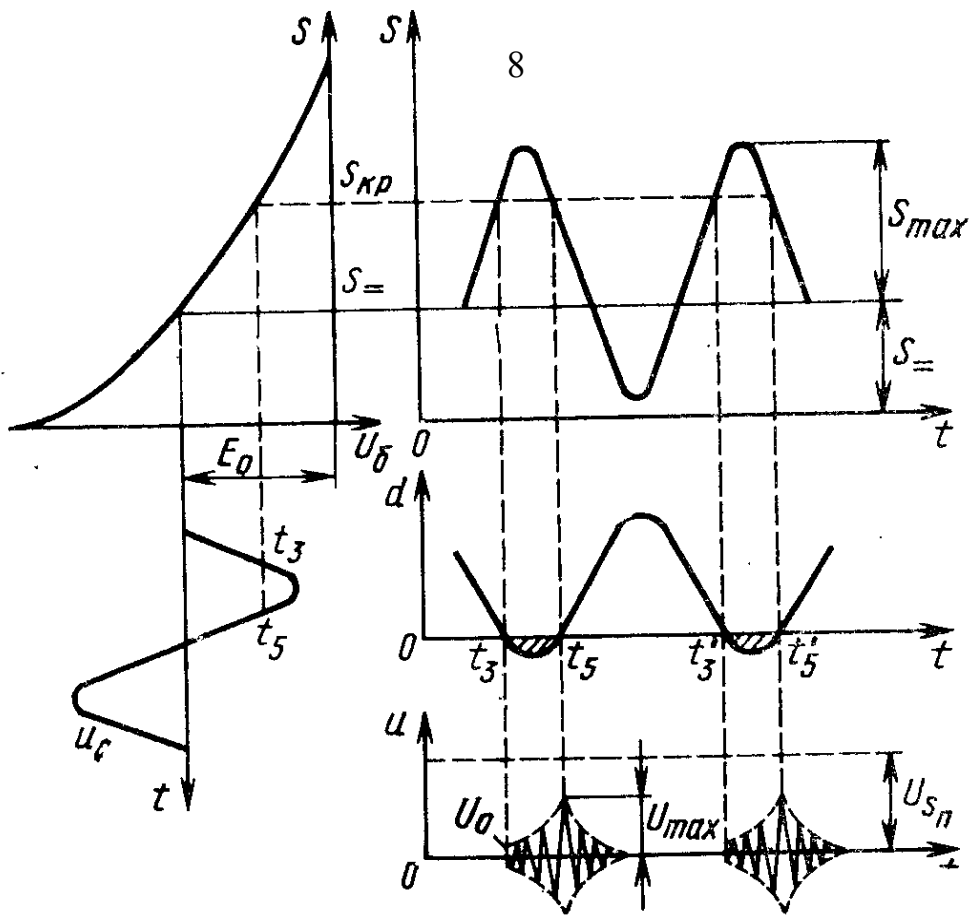


Рис. 1.6. Изменение крутизны $S(t)$, затухания $d(t)$ и напряжения на контуре $u(t)$ в СР

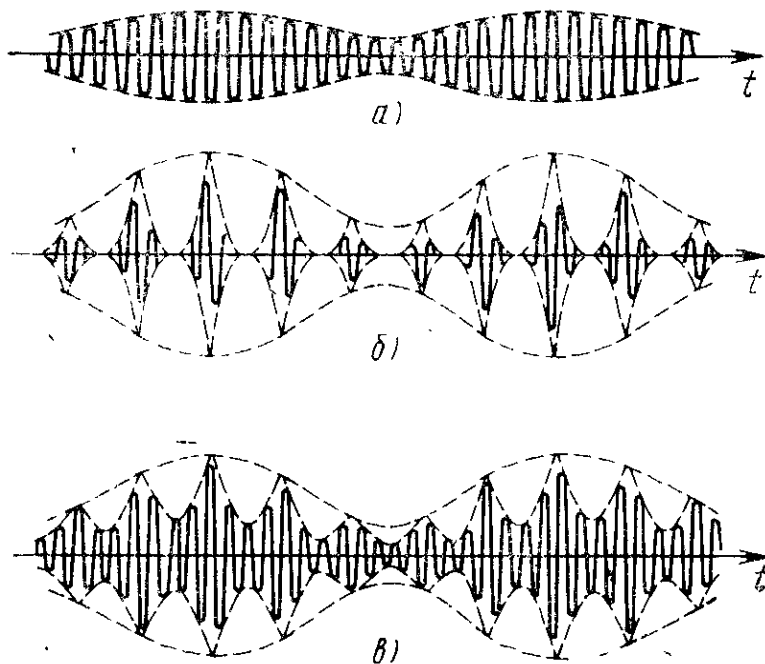


Рис. 1.7. Сигнал на входе (а) и напряжение на контуре СР (б) в линейном некогерентном режиме при АМ сигнале и в линейном когерентном режиме (в)

Режимы и основные свойства сверхрегенератора.

Режимы в СР можно классифицировать по виду амплитудной (линейный и нелинейный) или частотно-временных (некогерентный и когерентный) характеристик.

В линейном режиме (см. рис. 1.7) максимальное значение, до которого успевают за активное время $t_a = t_5 - t_3$ (см. рис. 1.6) нарасти свободные колебания U_{\max} , в несколько раз меньше U_{SII} — предельного напряжения стационарных колебаний при самовозбуждении, определяемого нелинейностью вольт-амперной характеристики активного элемента. В подобном режиме амплитудная характеристика, под которой понимают зависимость амплитуды всплеск свободных колебаний от амплитуды, вводимой в контур ЭДС, представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат. Достоинствами линейного режима являются низкий уровень выходных шумов в отсутствие полезного сигнала и малый уровень нелинейных искажений при усилении АМ колебаний. В этом режиме работают сверхрегенеративные приемники радиолокационных и радионавигационных систем.

Если начальная амплитуда или усиление в схеме настолько велики, что к моменту t_5 амплитуда свободных колебаний U_{\max} достигает порога U_{SII} (см. рис. 1.6) или приближается к нему, в схеме устанавливается нелинейный режим. В подобном режиме под амплитудной характеристикой часто понимают зависимость приращения площади всплеска (рис. 1.8, б) от амплитуды входной ЭДС. Эта зависимость обычно является логарифмической функцией, поэтому нелинейный режим называется также логарифмическим. Такой, режим характеризуется большим динамическим диапазоном по входу и наличием автоматической регулировки усиления (АРУ). Основным недостатком нелинейного режима, если речь идет об усилении АМ колебаний, следует считать большой уровень нелинейных искажений. Другим недостатком является высокий уровень выходных шумов в отсутствие полезного сигнала, что характерно вообще для всех систем с АРУ.

В нелинейном режиме уменьшается избирательность и расширяется частотная характеристика, если их оценивать по гармоническому сигналу. Однако реальная избирательность, определяемая при одновременном воздействии сигнала и помехи, при этом не ухудшается. Как и в супергетеродинном приемнике с ограничителем амплитуды, в нелинейном СР при большом усилении даже сильно расстроенная помеха создает на выходе напряжение, равное U_{SII} . Но если одновременно с помехой действует сильный сигнал, происходит подавление помехи сигналом и отношение сигнала к помехе получается примерно таким же, как в линейном режиме.

Виды огибающих напряжений на контуре СР при немодулированном сигнале на входе показаны на рис. 1.8. В линейном режиме выходные сигналы различаются по уровню и площади, а в нелинейном — только по площади, ограниченной огибающей и осью времени (рис. 1.8, а, б).

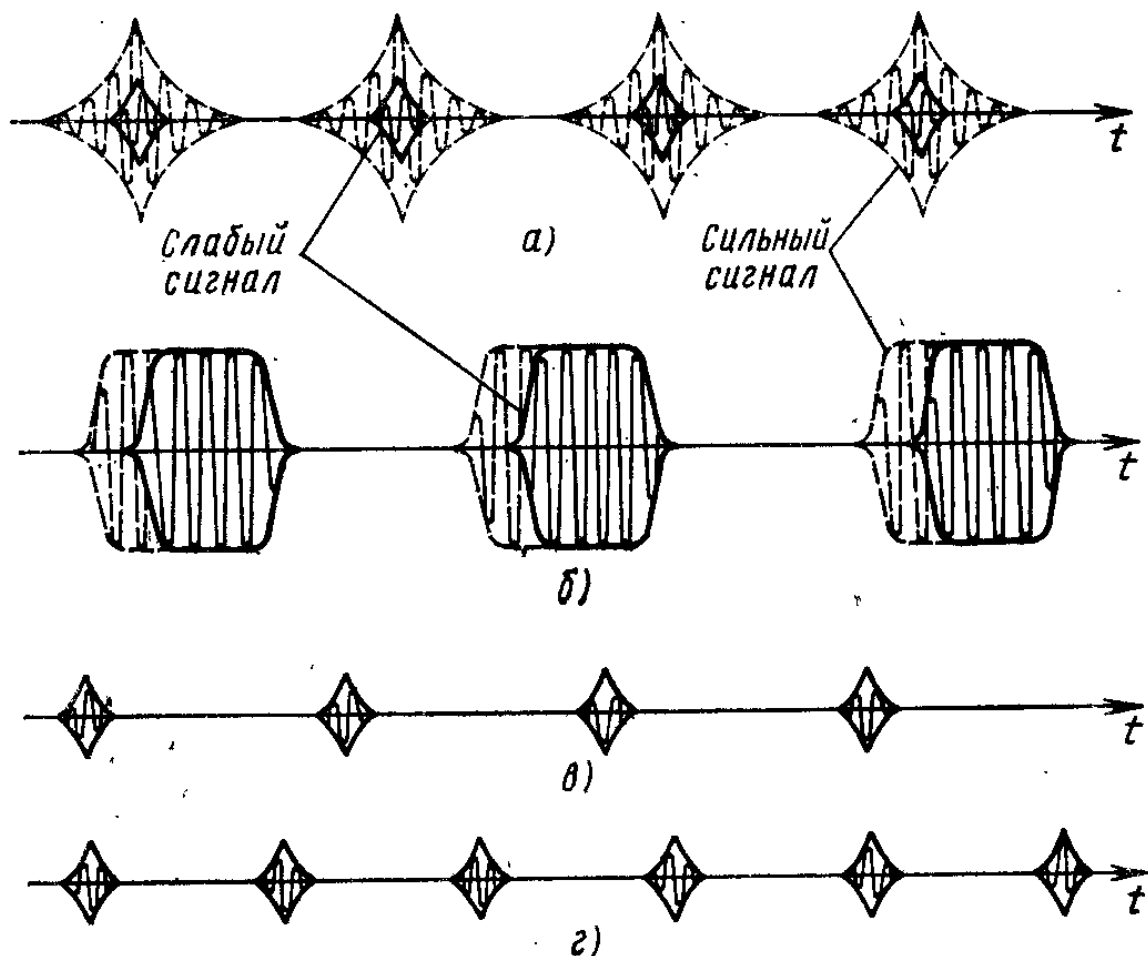


Рис. 1.8. Напряжение на контуре при немодулированном сигнале в разных режимах:

a — линейном; *б* — нелинейном; *в* — при слабом сигнале в схеме с автосуперизацией; *г* — при сильном сигнале в схеме с автосуперизацией

Сверхрегенератор в нелинейном режиме используется, когда необходимо принимать как сильные, так и слабые сигналы, при этом уровень нелинейных искажений существенного значения не имеет (например, в портативных радиотелефонных приемопередающих устройствах, в управляемых по радио моделях).

В СР с автосуперизацией процессы сложнее. Параметры этих СР выбирают так, чтобы установился режим прерывистой генерации. Амплитуда, до которой успевают нарасти колебания, определяется режимом и параметрами схемы генератора. Если при этом в контур подать сигнал, максимум напряжения будет достигнут быстрее и интервал между двумя соседними импульсами уменьшится. В общем случае степень увеличения частоты суперизации будет определяться уровнем сигнала в контуре, тогда как форма каждого импульса в отдельности должна оставаться почти неизменной (рис. 1.8, в, г).

Продетектированные импульсы на выходе СР в различных режимах показаны на рис. 1.9. В линейном режиме огибающая высокочастотных импульсов на контуре меняется по закону амплитудной модуляции внешнего сигнала (см. рис. 1.7), вследствие чего можно воспроизвести модулирующее колебание после пикового детектора. В логарифмическом режиме увеличивается или уменьшается в зависимости от амплитуды сигнала ширина (площадь) огибающей импульсов. В СР с автосуперизацией по закону модуляции меняется частота следования высокочастотных импульсов.

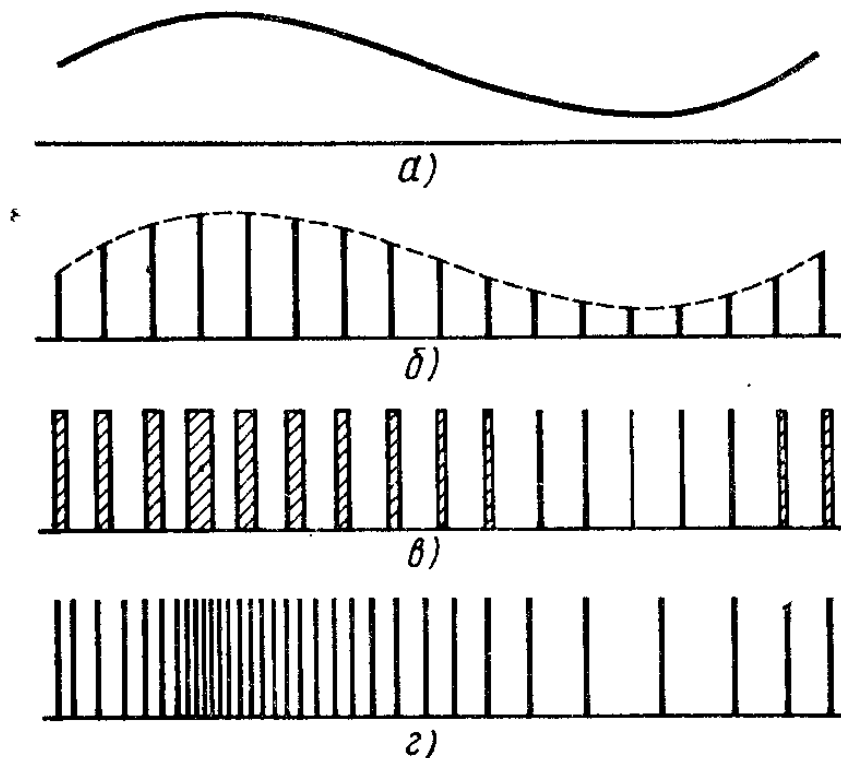


Рис. 1.9. Выходной сигнал в СР при модулированном сигнале на входе: а — огибающая сигнала на входе; б — сигнал на выходе в линейном режиме; в — сигнал на выходе в нелинейном режиме; г — сигнал на выходе в схеме с автосуперизацией

Как уже отмечено, существуют еще два режима СР— когерентный и некогерентный. Если в течение той части периода, когда затухание положительно, амплитуда свободных колебаний уменьшается до уровня внутренних шумов, а при отрицательном затухании начальная амплитуда, с которой начинается нарастание колебаний, определяется только значением ЭДС сигнала и шумами (см. рис. 1.7,б), режим называется некогерентным. Для этого режима характерны соотношение $P_p > F$; где P_p — полоса пропускания регенерированного контура; F — частота суперизации, и гладкая форма АЧХ (рис. 1.10,а).

Если же при положительном затухании свободные колебания не успевают значительно уменьшиться и начальная амплитуда в следующем периоде суперизации будет определяться не только сигналом и шумом в контуре, но и

свободными колебаниями от предыдущего периода суперизации (см. рис. 1.7,в), режим называют когерентным. Для этого режима характерна волнистая (рис. 1.10,б) или зубчатая (рис. 1.10,в) резонансная кривая в зависимости от степени когерентности колебаний и соотношения $\Pi_p < F$. При когерентном режиме в системе имеет место кратный резонанс на частотах, отстоящих от резонансной частоты контура на $\pm kF, k=1, 2, 3 \dots$, и АЧХ напоминает характеристику гребенчатого фильтра.

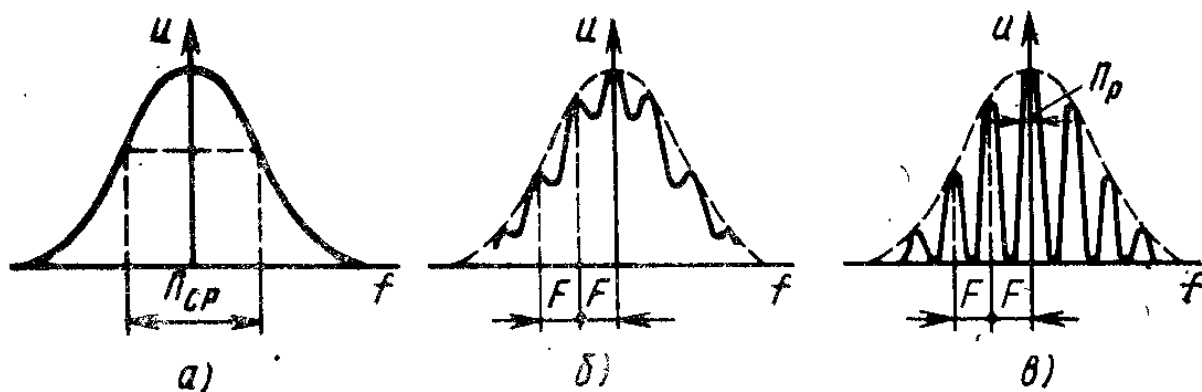


Рис. 1.10 Амплитудно-частотные характеристики СР:

а — гладкая кривая при $\Pi_p > F$ (—); б — волнистая при $\Pi_p \approx F$; в — многорезонансная при $\Pi_p < F$

На практике отдается предпочтение некогерентному режиму, обеспечивающему более равномерную АЧХ и большую стабильность усиления. Действительно, в когерентном режиме требуются более сильная регенерация, поскольку $\Pi_p = d_p f_0 < F$, и малое среднее затухание d_p , поэтому даже небольшое изменение крутизны активного элемента может вызвать непрерывное возбуждение. В некогерентном режиме степень регенерации меньше, среднее затухание больше и поэтому устойчивость работы схемы и стабильность усиления выше.

Заметим, что в зависимости от параметров и режима схемы СР в каждом из этих режимов можно получить как линейную, так и нелинейную АЧХ.

Аналогичные режимы — когерентный и некогерентный, линейный и нелинейный — наблюдаются и в параметрических СР. Следует лишь заметить, что здесь действуют различные механизмы ограничения амплитуды: расстроечный, диссипативный, реакция генератора накачки и др. Поэтому процессы нелинейного установления колебаний в подобных СР достаточно сложны и в каждом конкретном случае являются предметом самостоятельных исследований.

Как классические, так и параметрические СР помимо усиления осуществляют селекцию сигналов по частоте и во времени. Такое совмещение функций неблагоприятно сказывается на выходном отношении сигнал-шум, если на входе присутствует смесь сигнала с узкополосной модуляцией (амплитудной или угловой при малых индексах модуляции) и

широкополосного шума. Чтобы не потерять полезную информацию, заложенную в закон модуляции, при временной селекции (СР воспринимает внешние сигналы лишь на небольшом интервале времени перед возникновением вспышки) частоту суперизации приходится выбирать больше удвоенной частоты модуляции. В свою очередь, полоса пропускания СР в некогерентном режиме в несколько раз превышает частоту суперизации. Таким образом, указанная полоса должна быть значительно больше ширины спектра полезного колебания, что неблагоприятно сказывается на выходном отношении сигнал-шум.

Это отношение улучшается, если СР принимает сигналы с широкополосной угловой модуляцией или импульсные сигналы. Если же возникает необходимость, например, в обработке АМ колебаний на фоне широкополосных помех, перед СР можно поставить узкополосный фильтр, тогда расширение полосы СР, вызванное увеличением частоты суперизации, уже не будет приводить к ухудшению отношения сигнал-шум. Заметим, что максимизация этого отношения является важнейшим требованием при выборе не только схемы СР, но и режима его работы.

Базовая схема регенератора-сверхрегенератора.

Для лучшего уяснения процессов, происходящих в сверхрегенераторе, обратимся к устройству, изображенному на **рис. 2.1**, которое, в зависимости от постоянной времени цепочки R1C2, может быть и регенератором, и сверхрегенератором.

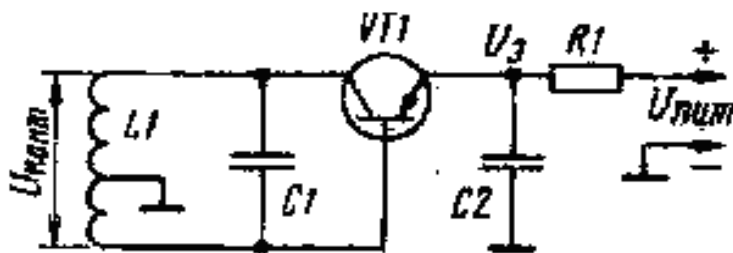


Рис. 2.1

Эта схема была разработана в результате многочисленных экспериментов, оптимальна по простоте, легкости налаживания и получаемым результатам.

Транзистор VT1 включен по схеме автогенератора - индуктивной трехточки. Контур генератора образован катушкой L1 и конденсатором C1, отвод катушки сделан ближе к выводу базы. Таким образом осуществляется согласование высокого выходного сопротивления транзистора (цепи коллектора) с меньшим входным сопротивлением (цепи базы).

Схема питания транзистора несколько необычна - постоянное напряжение на его базе равно напряжению коллектора. Транзистор, особенно кремниевый, вполне может работать в таком режиме, ведь открывается он при напряжении на базе (относительно эмиттера) около 0,5 В, а напряжение насыщения коллектор-эмиттер составляет, в зависимости от типа транзистора, 0,2...0,4 В. В данной схеме и коллектор, и база по постоянному току соединены с общим проводом, а питание поступает по цепи эмиттера через резистор R1.

При этом напряжение на эмиттере автоматически стабилизируется на уровне 0,5 В - транзистор работает подобно стабилитрону с указанным напряжением стабилизации. Действительно, если напряжение на эмиттере упадет, транзистор закроется, эмиттерный ток уменьшится, а вслед за этим уменьшится и падение напряжения на резисторе, что приведет к возрастанию эмиттерного напряжения. Если же оно возрастет, транзистор откроется сильнее и увеличившееся падение напряжения на резисторе компенсирует это возрастание. Единственное условие правильной работы устройства - напряжение питания должно быть заметно больше - от 1,2 В и выше. Тогда ток транзистора удастся установить подбором резистора R1.

Рассмотрим работу устройства на высокой частоте. Напряжение с нижней (по схеме) части витков катушки L1 приложено к переходу база-эмиттер транзистора VT1 и усиливается им. Конденсатор C2 - блокировочный, для токов высокой частоты он представляет малое сопротивление. Нагрузкой в

коллекторной цепи служит резонансное сопротивление контура, несколько уменьшенное из-за трансформации верхней частью обмотки катушки.

При усилении транзистор инвертирует фазу сигнала, затем ее инвертирует трансформатор, образованный частями катушки L1 - выполняется баланс фаз.

А баланс амплитуд, необходимый для самовозбуждения, получается при достаточном усилении транзистора. Последнее зависит от тока эмиттера, а его очень легко регулировать, изменяя сопротивление резистора R1, включив, например, вместо него последовательно два резистора, постоянный и переменный.

Устройство обладает рядом достоинств, к которым относятся простота конструкции, легкость налаживания и высокая экономичность: транзистор потребляет ровно столько тока, сколько необходимо для достаточного усиления сигнала. Подход к порогу генерации получается весьма плавным, к тому же регулировка происходит в низкочастотной цепи, и регулятор можно отнести от контура в удобное место. Регулировка слабо влияет на частоту настройки контура, поскольку напряжение питания транзистора остается постоянным (0,5 В), а следовательно, почти не изменяются и междуэлектродные емкости.

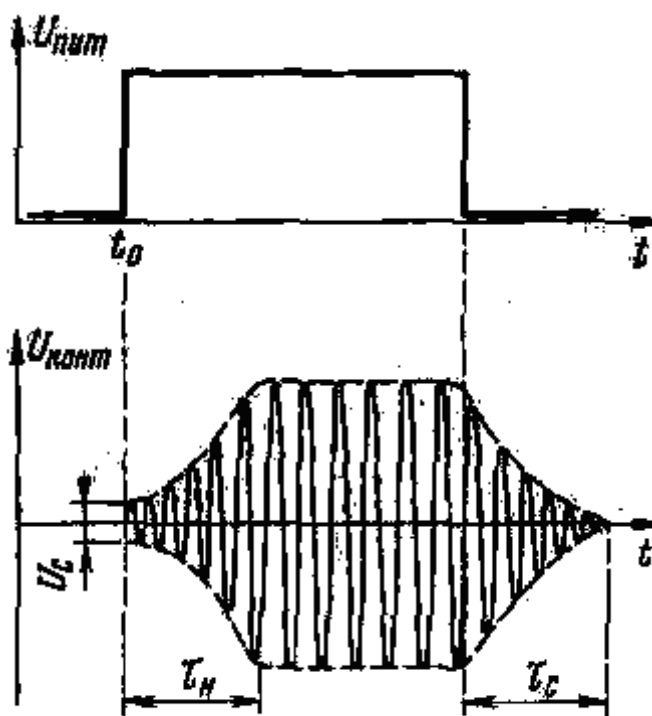


Рис. 2.2

Описанный регенератор способен повышать добротность контуров в любом диапазоне волн, от ДВ до УКВ, причем катушка L1 не обязательно должна быть контурной - допустимо использовать катушку связи с другим контуром (конденсатор C1 в этом случае не нужен). Можно намотать такую катушку на стержень магнитной антенны ДВ-СВ приемника, причем число витков ее должно составить всего 10-20 % от числа витков контурной катушки, Q-умножитель на биполярном транзисторе получается дешевле и проще, чем на полевом.

Регенератор подойдет и для КВ диапазона, если связать антенну с контуром L1C1 либо катушкой связи, либо конденсатором малой емкости (вплоть до долей пикофарады). Низкочастотный сигнал снимают с эмиттера транзистора VT1 и подают через разделительный конденсатор емкостью 0,1...0,5 мкф на усилитель ЗЧ. При приеме АМ станций подобный приемник обеспечивал чувствительность 10...30 мкВ (обратная связь ниже порога

генерации), а при приеме телеграфных станций на биениях (обратная связь выше порога) - единицы микровольт.

Процессы нарастания и спада колебаний.

Пусть напряжение питания на описанное устройство подается в виде импульса в момент времени t_0 , как показано на рис. 2.2 сверху. Даже, если усиление транзистора и обратная связь достаточны для генерации, колебания в контуре возникнут не сразу, а будут нарастать по экспоненциальному закону некоторое время τ_n . По такому же закону происходит и спад колебаний после выключения питания, время спада обозначено как τ_c .

В общем виде закон нарастания и спада колебаний выражается формулой:

$$U_{\text{конт}} = U_0 \exp\left(-\frac{r}{2L} \cdot t\right)$$

где U_0 - напряжение в контуре, с которого начался процесс; r - эквивалентное сопротивление потерь в контуре; L - его индуктивность; t - текущее время. Все просто в случае спада колебаний, когда $r = r_{\Pi}$ (сопротивление потерь самого контура, рис. 2.3).

Иначе обстоит дело при нарастании колебаний: транзистор вносит в контур отрицательное сопротивление $-r_{oc}$ (обратная связь компенсирует потери), и общее эквивалентное сопротивление становится отрицательным. Знак минус в показателе экспоненты исчезает, и закон нарастания запишется:

$$U_{\text{конт}} = U_c \exp\left(\frac{r}{2L} \cdot t\right)$$

где $r = r_{oc} - r_{\Pi}$

Из приведенной формулы можно найти и время нарастания колебаний, учитывая, что рост начинается с амплитуды сигнала в контуре U_c и продолжается только до амплитуды U_0 , далее транзистор входит в режим ограничения, его усиление уменьшается и амплитуда колебаний стабилизируется:

$$\tau_n = \frac{2L}{r} \ln\left(\frac{U_0}{U_c}\right)$$

Как видим, время нарастания пропорционально логарифму величины,

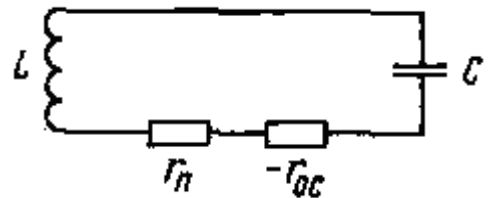


Рис. 2.3

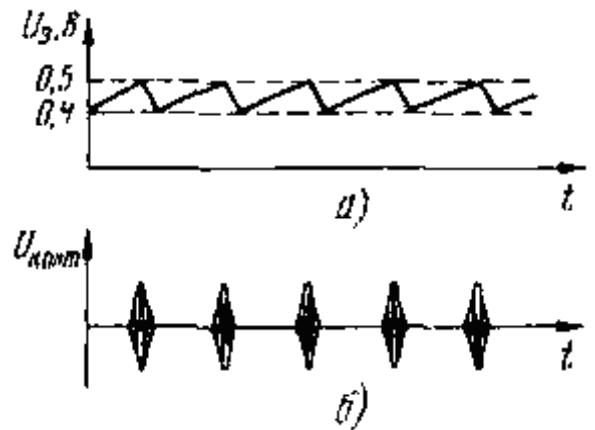


Рис. 2.4

обратной уровню принимаемого сигнала в контуре. Чем больше сигнал, тем меньше время нарастания.

Если импульсы питания подавать на сверхрегенератор периодически, с частотой суперизации (гашения) 20...50 кГц, то в контуре будут происходить вспышки колебаний (рис. 2.4), длительность которых зависит от амплитуды сигнала - чем меньше время нарастания, тем больше длительность вспышки. Если вспышки протектировать, на выходе получится демодулированный сигнал, пропорциональный среднему значению огибающей вспышек.

Усиление самого транзистора может быть небольшим (единицы, десятки), достаточным лишь для самовозбуждения колебаний, в то время как усиление всего сверхрегенератора, равное отношению амплитуды демодулированного выходного сигнала к амплитуде входного, весьма велико.

Описанный режим работы сверхрегенератора называют нелинейным, или логарифмическим, поскольку выходной сигнал пропорционален логарифму входного. Это вносит некоторые нелинейные искажения, но играет и полезную роль - чувствительность сверхрегенератора к слабым сигналам больше, а к сильным меньше - здесь действует как бы естественная АРУ.

Для полноты описания надо сказать, что возможен и линейный режим работы сверхрегенератора, если длительность импульса питания (см. рис. 2.2) будет меньше времени нарастания колебаний. Последние не успеют нарасти до максимальной амплитуды, а транзистор - не будет входить в режим ограничения. Тогда амплитуда вспышки станет прямо пропорциональна амплитуде сигнала. Такой режим, однако, нестабилен - малейшее изменение усиления транзистора или эквивалентного сопротивления контура r приведет к тому, что либо резко упадет амплитуда вспышек, а следовательно, и усиление сверхрегенератора, либо устройство выйдет на нелинейный режим. По этой причине линейный режим сверхрегенератора используется редко.

Надо также заметить, что совершенно необязательно коммутировать напряжение питания, чтобы получить вспышки колебаний. С равным успехом можно подавать вспомогательное напряжение суперизации на сетку лампы, базу или затвор транзистора, модулируя их усиление, а значит, и обратную связь. Прямоугольная форма гасящих колебаний также неоптимальна, предпочтительнее синусоидальная, а еще лучше пилообразная с пологим нарастанием и резким спадом. В последнем варианте сверхрегенератор плавно подходит к точке возникновения колебаний, полоса пропускания несколько сужается и появляется усиление за счет регенерации. Возникшие колебания растут сначала медленно, затем все быстрее. Спад же колебаний получается максимально быстрым.

Наибольшее распространение получили сверхрегенераторы с автосуперизацией, или с самогашением, не имеющие отдельного генератора вспомогательных колебаний. Они работают только в нелинейном режиме. Самогашение, иначе говоря, прерывистую генерацию, легко получить в устройстве, выполненном по схеме рис. 2.1, надо лишь, чтобы постоянная

времени цепочки $R1C2$ была больше времени нарастания колебаний.

Тогда произойдет следующее: возникшие колебания вызовут увеличение тока через транзистор, но колебания будут некоторое время поддерживаться зарядом конденсатора $C2$. Когда он израсходуется, напряжение на эмиттере упадет, транзистор закроется и колебания прекратятся. Конденсатор $C2$ начнет относительно медленно заряжаться от источника питания через резистор $R1$ до тех пор, пока не откроется транзистор и возникнет новая вспышка.

Осциллограммы напряжений на эмиттере транзистора и в контуре показаны на рис. 2.4 так, как они обычно видны на экране широкополосного осциллографа. Уровни напряжений 0,5 и 0,4 В показаны совершенно условно - они зависят от типа примененного транзистора и его режима.

Что же произойдет при поступлении в контур внешнего сигнала, ведь длительность вспышки теперь определяется зарядом конденсатора $C2$ и, следовательно, постоянна? С ростом сигнала, как и прежде, уменьшается время нарастания колебаний, вспышки следуют чаще. Если их продетектировать отдельным детектором, то средний уровень сигнала будет возрастать пропорционально логарифму входного сигнала. Но роль детектора с успехом выполняет и сам транзистор $VT1$ (см. рис. 2.1) - средний уровень напряжения на эмиттере падает с ростом сигнала.

Наконец, что же произойдет в отсутствие сигнала? Все то же самое, только рост амплитуды колебаний каждой вспышки будет начинаться от случайного напряжения шумов в контуре сверхрегенератора. Частота вспышек при этом минимальна, но нестабильна - период повторения меняется хаотическим образом. Усиление сверхрегенератора при этом максимально, а в телефонах или громкоговорителе слышен сильный шум. Он резко снижается при настройке на частоту сигнала. Таким образом, чувствительность сверхрегенератора по самому принципу его работы очень высока - она определяется уровнем внутренних шумов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Приборы и оборудование.

Лабораторная работа по исследованию и демонстрации работы сверхрегенеративного РПУ выполняется на комбинированном лабораторном приборе РТРУЛ-9.

Установка предназначена для проведения лабораторных работ по курсу «Радиотехника и электроника» в высших и средне-технических учебных заведениях.

Установка может быть использована в различных курсах, изучающих основы электронной техники в высших и средних специальных учебных заведениях.

Установка выполнена в климатическом исполнении УХЛ, категория 4.2 ГОСТ 15150-69 для эксплуатации в помещении при температуре от 10°C до 35°C и относительной влажности до 80 %.

Учебная установка конструктивно состоит из нескольких элементов, объединенных в одном корпусе:

- набора изучаемых элементов и устройств;
- стабилизированного источника питания, подающего питание нужной полярности и значения на все элементы схемы;
- схемы контроля необходимых параметров, осуществляющей вывод информации о ходе эксперимента на экран LCD дисплея.

Принципиальная электрическая блок — схема учебной установки для изучения сверхрегенеративного радиоприемного устройства приведена на рис. 3.1.

Для наблюдения сигналов в контрольных точках XS1 ... XS7 схемы следует подать сигнал с контрольной точки на вход XS8 усилителя DA с помощью переключки типа «тюльпан — тюльпан». При этом, усиленный микросхемой DA сигнал, поступает на выход XS9 к которому необходимо подключить провод «тюльпан-BNC» из комплекта и подать этот сигнал на вход Y осциллографа.

При отключенной переключке «тюльпан — тюльпан» (отключенном входе XS8) на экран осциллографа выводится амплитудно-частотная характеристика схемы, по виду схожая с рис. 1.10 б). Для измерения амплитудно-частотной характеристики схемы в учебном приборе используется модель прибора измерителя частотной характеристики (ИЧХ). При этом сигнал переменной частоты, но равной амплитуды $U_{вх}$ от ИЧХ подается на вход схемы. Сигнал с выхода микросхемы $U_{вых}$ подается на ИЧХ и затем, после необходимых преобразований в приборе, в виде амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) поступает на вход Y электронного осциллографа.

Установка учебная РТРУЛ-9. Сверхрегенеративное РПУ.

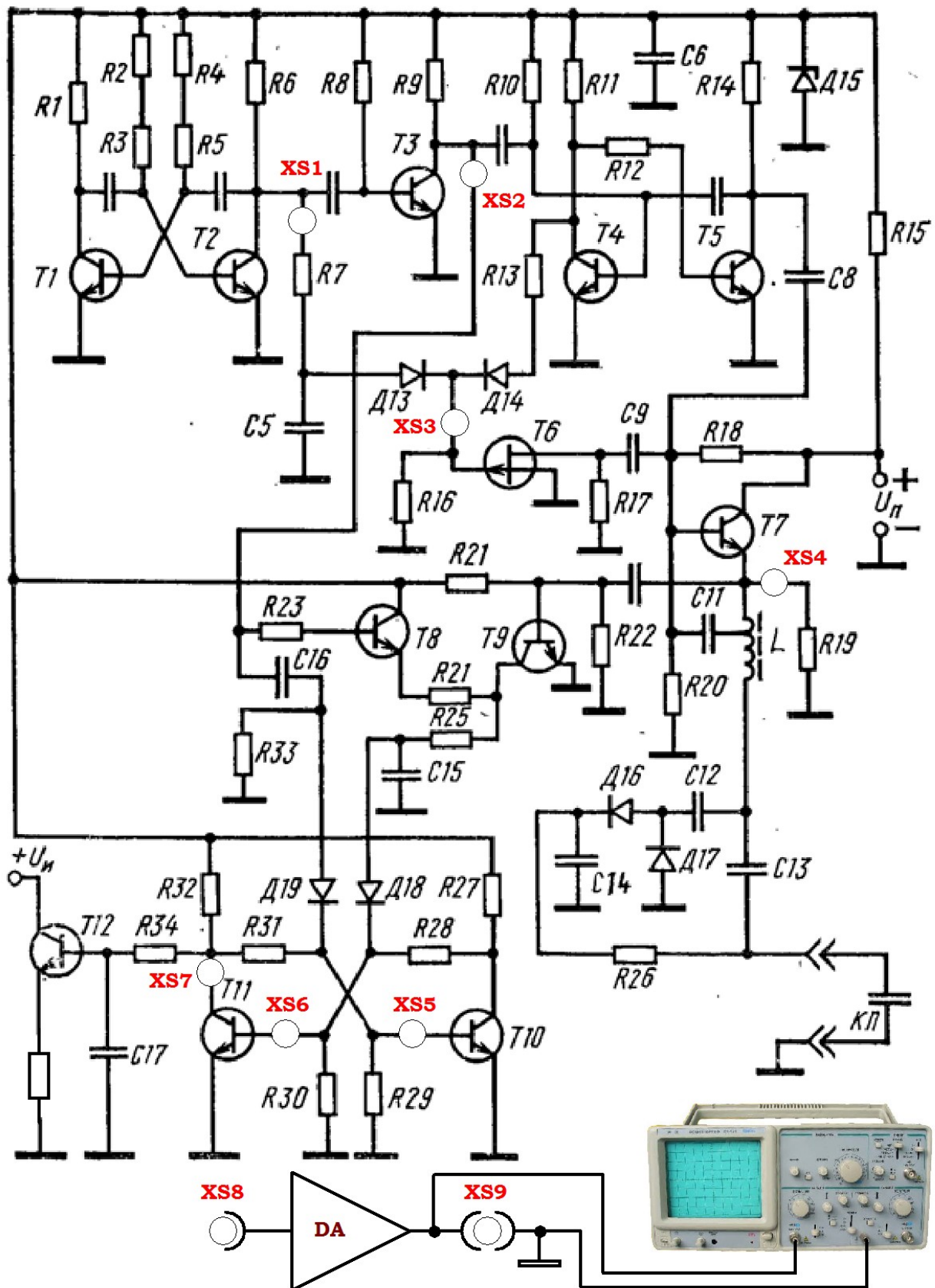


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая блок — схема учебной установки РТРУЛ-9.

Таким образом, на экране осциллографа визуализируется вид АЧХ данной схемы, т. е. зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты $U_{\text{вых}}=U_{\text{вых}}(f)$. При этом, из за особенности работы прибора ИЧХ, на экране осциллографа может визуализироваться сразу несколько одинаковых характеристик с периодом, совпадающим с периодом работы внутреннего развертывающего генератора прибора ИЧХ. Вращением ручек разверток частоты и амплитуды на осциллографе следует добиться четкого изображения одной ветки АЧХ в середине экрана.

Вращая многофункциональную ручку «УПРАВЛЕНИЕ» и изменяя частоту сигнала с выхода генератора, можно снять АЧХ данной схемы по точкам с одновременной визуализацией на экране электронного осциллографа. При этом одновременно с АЧХ на экран осциллографа выводится «метка», указывающая на текущее положение точки, для которой на дисплее отображаются показания частоты f и амплитуды выходного сигнала схемы U .

Для наглядности и соответственно возможностям применяемого учебного универсального демонстрационного осциллографа все эксперименты по визуальному наблюдению сигналов проводятся на низких частотах, при этом применяются соответствующие делители частоты.

Учебная установка представляет собой учебную модель неадаптивного акустического обнаружителя. Характеристики реального устройства, собранного по схеме рис. 3.1: дальность обнаружения объектов с большой площадью отражения (автомобиль, вагон и т. п.) 2 20 м, частота заполнения всплеск 27 кГц, ширина зоны обнаружения в радиальном направлении около 2 м, ширина мертвой зоны 2,5 м, время обнаружения при максимальном расстоянии до объекта 160 мс, потребляемая мощность 150 мВт, напряжение питания 12 В.

В качестве приемопередающего преобразователя в приборе используется модель конденсаторного преобразователя КП с шириной диаграммы направленности 10° .

Генератор суперизации ГС выполнен по схеме несимметричного мультивибратора на транзисторах Т1 и Т2 (см. рис. 3.1) и вырабатывает последовательность импульсов с периодом повторения T_c (диаграмма 1 рис. 3.2). Резисторы R2 и R4 позволяют регулировать T_c и τ_6 . С выхода ГС напряжение подается на формирователь приемных импульсов суперизации ФПИ (интегрирующая цепь R7C5). Процесс формирования сводится к сглаживанию фронтов импульсов суперизации для получения безударного запуска СР. Одновременно выходное напряжение ГС подается на устройство задержки УЗ, выполненное на транзисторе Т3, которое генерирует импульс длительностью τ_3 (диаграмма 2). Срезом этого импульса запускается одновибратор Т4, Т5, который является формирователем зондирующих импульсов суперизации ФЗИ: На вход модулятора М (транзистор Т6) импульсы

с ФЗИ и ФПИ подаются через развязывающие диоды Д13, Д14 (диаграмма 3).

Сверхрегенератор выполнен на транзисторе Т7 по схеме с общим коллектором. Модулятор Т6 меняет глубину положительной обратной связи с частотой суперизации. Подобный СР имеет широкий динамический диапазон по входу и отличается высокой стабильностью усиления при изменениях температуры и напряжения питания. Частота заполнения вспышек определяется резонансной частотой контура, образованного индуктивностью L и емкостью преобразователя КП, подключенного к индуктивности через разделительный конденсатор С13. Напряжение смещения для КП вырабатывается пиковым детектором Д16, Д17, С12, С14 и подается на КП через резистор R26.

Вспышки СР показаны на диаграмме 4. Для исключения флуктуаций амплитуды зондирующих вспышек на вход СР через небольшую емкость С8 подаются короткие импульсы, полученные в результате дифференцирования фронтов импульсов ФЗИ. Таким образом реализуется ударный запуск для зондирующих и безударный — для приемных вспышек.

В отсутствие объекта амплитуда приемных вспышек мала и определяется собственными шумами СР и КП. Если объект появляется в зоне обнаружения в момент t_1 , то амплитуда приемных вспышек увеличивается. Расстояние между КП и зоной обнаружения

$$h = c(T_c - \tau_z - \tau_y - \tau_c \pm \Delta\tau/2)/2,$$

где τ_y — длительность зондирующего импульса суперизации; $\tau_c = t_5 - t_3$; $\Delta\tau = \Delta D/c$, ΔD — размер зоны обнаружения в радиальном направлении.

Выделение приемных вспышек из общей последовательности сигналов на выходе СР и их детектирование осуществляются схемой стробирования СС (транзисторы Т8, Т9). На Т8 подаются стробирующие импульсы (диаграмма 2), на Т9 — сигналы СР (диаграмма 4). В результате на выходе схемы наблюдается огибающая только приемных вспышек в то время, когда их амплитуда превышает некоторый порог, устанавливаемый делителем R21, R22.

В обнаружителе применяется специальное устройство обработки выходного сигнала УО с бинарным выходом, которое легко может быть согласовано с системами цифровой автоматики.

Работа УО иллюстрируется диаграммами 5, 6, 7. На один из входов симметричного триггера $T10, T11$ подаются устанавливающие импульсы, которые формируются (дифференцируются) из фронта импульсов задержки (диаграмма 5). На другой вход поступает выходное напряжение схемы стробирования. На выходе триггера (диаграмма 7) наблюдаются низкий потенциал (сигнал «0») в отсутствие объекта и практически постоянный высокий потенциал (сигнал «1») при появлении объекта.

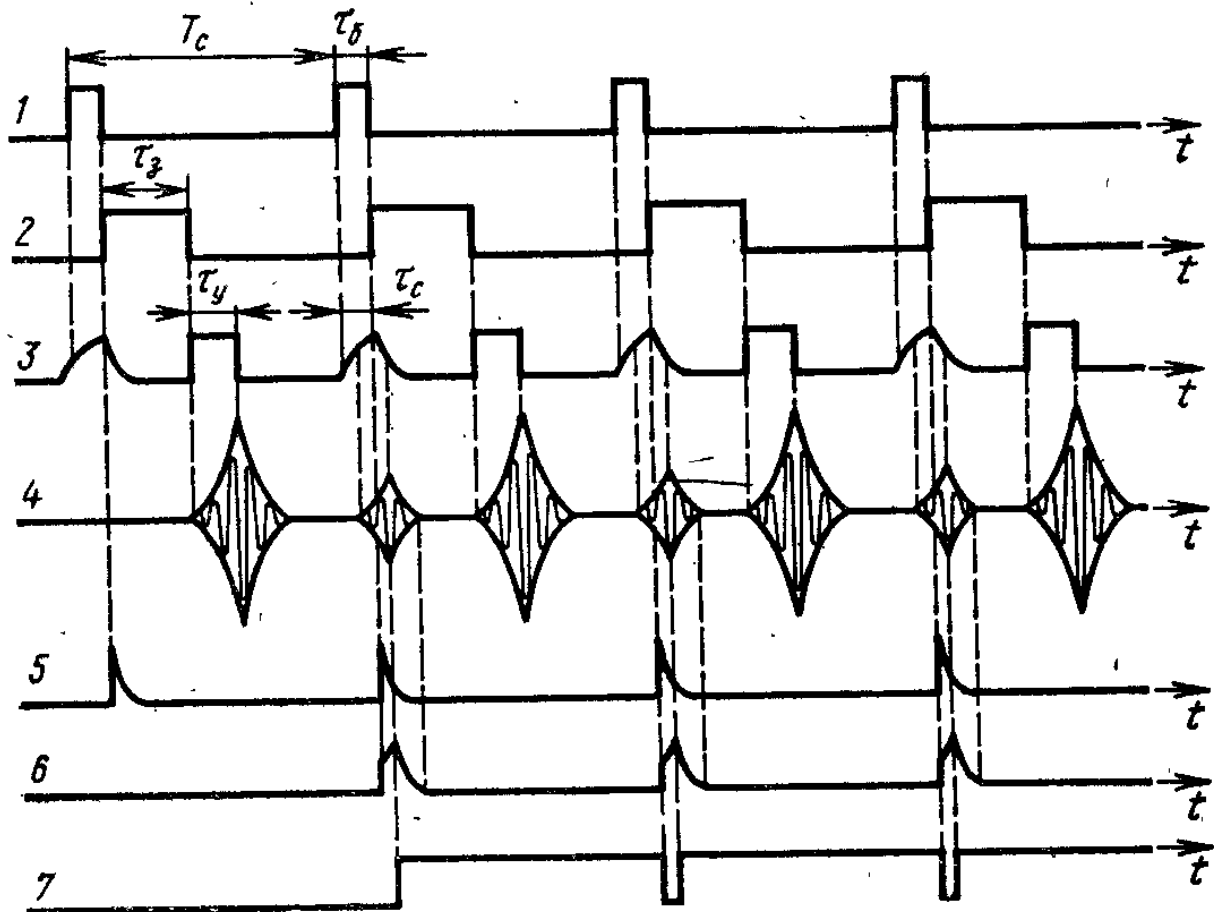


Рис. 3.2. Диаграммы сигналов в контрольных точках схемы XS1 (график 1) ... XS7 (график 7) учебной установки РТРУЛ-9.

Порядок выполнения.

1. Перед включением установки в сеть необходимо убедиться в целостности сетевых и соединительных проводов. Все соединительные провода и контрольные точки использовать следует только по назначению, запрещается замыкать выход нагрузки и выходы контрольных точек.
2. Включить установку и осциллограф в сеть ~ 220 В с помощью прилагаемого силового сетевого кабеля евро-стандарта. Поставить переключатель есть на панели учебного модуля и осциллографа в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор «СЕТЬ».
3. Подключить вход Y осциллографа к выходу XS9 учебной установки.
4. Ручка «Y-LINE-EXT» метода синхронизации должна находиться в положении **INT ВНУТР (синхронизация внутренним сигналом)**.
5. При отключенном входе XS8 усилителя DA (перемычка «тюльпан — тюльпан» отключена от схемы) на электронном осциллографе визуализируется АЧХ схемы. Вид АЧХ должен соответствовать рис. 1.10 б) и рис. 3.3.
6. Вращением ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV (ВОЛЬТ/ДЕЛ и ВРЕМЯ/ДЕЛ) и ручек POSITION осей X и Y на электронном осциллографе добиться визуально наиболее удобного изображения сигнала. Для дополнительной синхронизации можно использовать ручку LEVEL (кнопку БЛК). При этом следует учитывать, что оси X (время) и Y (амплитуда) откалиброваны правильно (т. е. подписи у ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV верны) только при повернутых до упора ручках плавной регулировки VOLT VAR. и TIME VAR. Однако для лучшей синхронизации допускается медленно вращать ручку плавной регулировки TIME VAR.
7. Вращая многофункциональную ручку «УПРАВЛЕНИЕ» и изменяя частоту сигнала, подаваемого на вход схемы, снять АЧХ по точкам с одновременной визуализацией на экране электронного осциллографа, т. е. получить зависимость $U_{\text{вых}}=U_{\text{вых}}(f)$.
8. По измеренной АЧХ определить частоту F_0 , в которой сигнал с выхода имеет наибольшую амплитуду U_m (рис. 3.3 центральный пик).

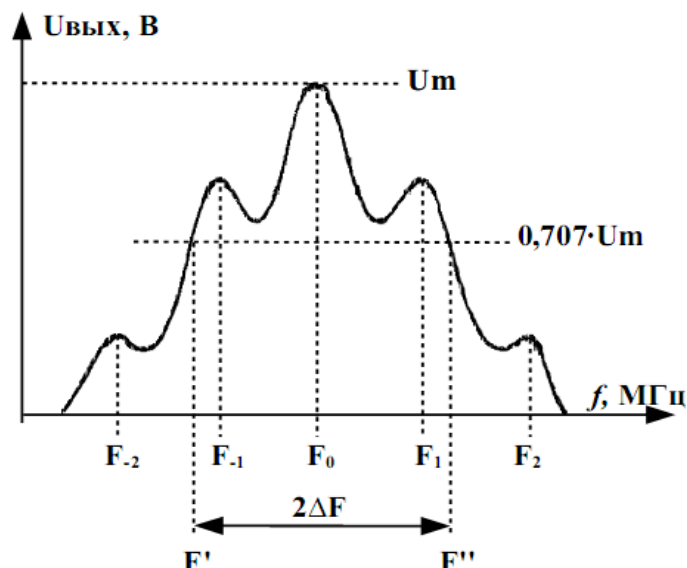


Рис. 3.3. АЧХ, полученная на приборе РТРУЛ-9.

9. Оценить значения других кратных частот F_k где $k=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ в которых пики сигнала имеют чуть меньшие по сравнению с центральным пиком амплитуды см. рис. 3.3.
10. Вычислить разницу между всеми кратными соседними частотами $F_{k+1} - F_k$
11. Определить частоты F' и F'' , соответствующие уровню 0,707 от максимальной амплитуды U_m (рис. 3.3).
12. Оценить ширину полосы пропускания схемы как $2\Delta F = F'' - F'$.
13. Соединить с помощью переключки типа «тюльпан — тюльпан» контрольную точку XS1 со входом XS8 усилителя DA.
14. Вращением ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV (ВОЛЬТ/ДЕЛ и ВРЕМЯ/ДЕЛ) и ручек POSITION осей X и Y на электронном осциллографе добиться визуально наиболее удобного изображения сигнала. Для дополнительной синхронизации можно использовать ручку LEVEL (кнопку БЛК). При этом следует учитывать, что оси X (время) и Y (амплитуда) откалиброваны правильно (т. е. подписи у ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV верны) только при повернутых до упора ручках плавной регулировки VOLT VAR. и TIME VAR.
15. Вид полученного сигнала должен соответствовать справочной кривой рис. 3.2 Диаграмма 1. Определить период T_c и время τ_6 по показаниям электронного осциллографа. Следует помнить, что для наглядности и соответственно возможностям применяемого учебного универсального демонстрационного осциллографа все эксперименты по визуальному наблюдению сигналов проводятся на низких частотах, при этом применяются соответствующие делители частоты.
16. Таким образом, реальные временные промежутки сигнала $T_{\text{реал}}$ будут определяться выражением:

$$T_{\text{реал}} = K \cdot T_{\text{осц}} \quad (2.1)$$

где $T_{\text{осц}}$ — время, определенное согласно визуальным показаниям электронного осциллографа, K — коэффициент делителя частоты. Для данных экспериментов следует принять $K \approx 5 \cdot 10^{-6}$. Пример: пусть согласно измерениям на электронном осциллографе получено значение величины T_c ВЧ модулированного сигнала $T_{c \text{ осц}} = 7,6 \cdot 10^{-3}$ сек (период следования сигналов на диаграмме 1 рис. 3.2), следовательно реальное значение величины T_c будет

$$T_{c \text{ реал}} = K \cdot T_{c \text{ осц}} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 7,6 \cdot 10^{-3} = 3,8 \cdot 10^{-8} \text{ сек} .$$

При этом реальная частота, определяемая как $\nu_{\text{реал}} = \frac{1}{T_{c \text{ реал}}}$ оказывается равной $\nu_{\text{реал}} \approx 26$

МГц. При этом все измерения являются оценочными.

17. Аналогично по формуле (2.1) вычислить длительность $\tau_{6 \text{ реал}}$ импульса.
18. Подключая переключку типа «тюльпан — тюльпан» к другим контрольным точкам схемы XS2 ... XS7 наблюдать сигналы в данных точках, сравнивая их со справочными на рис. 3.2.

19. Определить характерные временные характеристики τ_z , τ_y и τ_c по показаниям электронного осциллографа и вычислить по формуле (2.1) реальные значения этих временных параметров, считая коэффициент $K \approx 5 \cdot 10^{-6}$.
20. По окончании работы поставить переключатель «СЕТЬ» на панели установки и осциллографа в положение «выкл», при этом должен погаснуть индикатор сети и вынуть сетевые вилки из розеток.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

1. Авиационные системы радиоуправления // Максимов М.В., Горгонов Г.И., Чернов В.С. — М: Издание ВВИА им. Проф. Н.Е.Жуковского. — 1984.
2. *Гюнтер Миль*. Электронное дистанционное управление моделями. — М: Издательство ДОСААФ СССР. — 1980.
3. *А.Анучкин*. Десятикомандная аппаратура управления моделями. В помощь радиолюбителю, вып. 94, стр.46—56. Издательство ДОСААФ СССР. — 1986.
4. *В.Л. Шило*. Популярныe цифровые микросхемы. Издательство «Металлургия», Челябинск. — 1988.
5. *М.С. Шумилин, В.Б. Козырев, В.А. Власов*. Проектирование транзисторных каскадов передатчиков. — М: Радио и связь. — 1987.
6. *Браммер Ю.А.* Радиотехника. — М: Высшая школа. — 1969.
7. *Белкин Н.И.* Сверхрегенераторы. — М: Радио и связь. — 1983.
8. Барьерный режим работы транзистора // В. Стасенко. Радиолюбитель № 1. — 1996. — С. 15.
9. Сверхрегенератор // В.Т. Поляков. — Радио № 3. — 2002.
10. Малогабаритная радиостанция с модуляцией CLC // В. Рубцов. — Моделист-конструктор, № 3. — 1999.
11. Интегральные схемы для бытовой радиоаппаратуры // Справочник. И.В. Новаченко, В.А. Телец, Ю.А. Краснодубец. — М: Радио и связь. — 1995.
12. *В.Т. Поляков*. Радиолюбителям о технике прямого преобразования. — М: Патриот. — 1990.
13. Двойной балансный смеситель SA612A. — Радио № 4. — 2004.
14. Авиационные радиосвязные устройства // Под ред. В.И. Тихонова. — М: издательство ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского.
15. *Андреев С.* Приемный тракт на MC3361 с двойным преобразованием частоты. — Радиоконструктор № 2. — 2006.
16. *И. Гаврилов, А. Войтко*. Современный любительский приемник. www/redesign.ru/articles/electronics/receiver_igva.
17. Микросхемы для управления двигателями // Энциклопедия ремонта. — Вып. 12. — М.: ДОДЭКА. — 1999.
18. Моделист-конструктор, № 8. — 1998.
19. Твори, выдумывай, пробуй // Сост. Н.С. Тимофеева. — М.: Просвещение. — 1986.
20. Малогабаритный мощный преобразователь напряжения // И. Нечаев. — Радио № 2. — 2003.
21. Индикатор напряженности поля // И.Нечаев. — Радио № 3. — 2005.
22. Зарядные устройства для герметичных свинцовых кислотных аккумуляторов // С. Малахов. Схемотехника № 1. — 2003. — С. 14.