



И. А. Моторцев

РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ и АПЧ

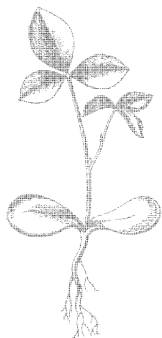
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1958

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ТЕХНИКА

И. А. МОТОРИЧЕВ

РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ
И
АПЧ

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1958



И. А. Моторичев. РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ И АПЧ

Брошюра «Регулировка усиления и АПЧ» входит в выпускаемую Военным издательством библиотеку «Радиолокационная техника». Библиотека рассчитана на офицеров, связанных с эксплуатацией радиотехнических средств. Она может быть также использована широким кругом читателей, желающих подробно ознакомиться с работой отдельных узлов и элементов радиолокационных станций.

Перечень брошюр, входящих в библиотеку «Радиолокационная техника», помещен на 3-й странице обложки.

В брошюре «Регулировка усиления и АПЧ» рассматриваются основные автоматические регулировки в современных радиоприемниках. Большое внимание уделено физическим процессам, происходящим в схемах автоматической регулировки усиления и автоматической подстройки частоты.

ВВЕДЕНИЕ

Современный радиоприемник представляет собой сложное устройство. В нем, помимо большого числа каскадов, выполняющих основную задачу приемника — усиление и преобразование принятого сигнала, имеются еще дополнительные системы, обеспечивающие нормальную работу основных каскадов, а значит, и всего радиоприемника. К ним прежде всего относятся системы регулировки усиления, автоматической подстройки частоты и регулировки режима работы источников питания.

В основном в данной брошюре будет рассмотрена работа двух систем — регулировки усиления (РУ) и автоматической подстройки частоты (АПЧ) в приемнике.

В зависимости от назначения приемника (радиолокационный, широковещательный, телевизионный и т. д.) устройство систем регулировки усиления и автоматической подстройки частоты может быть различным. Здесь будем рассматривать устройства РУ и АПЧ главным образом радиолокационных приемников.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ

Коэффициент усиления приемника

Приемник радиолокационной станции, как правило, супергетеродинного типа. Основные каскады приемника радиолокационной станции метрового диапазона представлены на блок-схеме рис. 1.

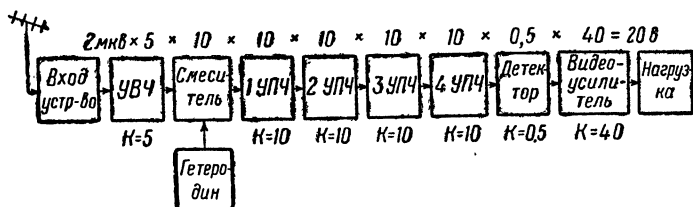


Рис. 1. Блок-схема приемника радиолокационной станции метрового диапазона

Допустим, что отраженный сигнал, принятый антенной, создает на входе приемника напряжение около 2 мкВ , а усилитель высокой частоты имеет коэффициент усиления

$$K_{\text{увч}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 5.$$

Тогда на выходе усилителя принятый сигнал будет иметь амплитуду напряжения в пять раз большую, т. е. $U_{\text{увч}} = 2 \times 5 = 10 \text{ мкВ}$. Это напряжение подается на управляющую сетку лампового смесителя.

В смесителе благодаря совместному действию двух напряжений разных частот (частоты сигнала и частоты гетеродина) сверхвысокая частота принятого сигнала преобразуется в более низкую, так называемую промежуточную

частоту. При этом ламповый смеситель также усиливает принятый сигнал. Предположим, что коэффициент усиления смесителя $K_c = 10$. Тогда, очевидно, амплитуда напряжения на выходе смесителя

$$U_c = 10 \cdot 10 = 100 \text{ мкв.}$$

Далее сигнал промежуточной частоты поступает на несколько последовательно включенных усилителей промежуточной частоты (УПЧ), в которых осуществляется основное усиление приемника. Представим себе, что приемник имеет только четыре каскада УПЧ и коэффициент усиления каждого из них равен 10. Тогда сигнал напряжением 100 мкв, поступивший на вход первого УПЧ, создаст на его выходе напряжение $U_{1\text{УПЧ}} = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ мкв}$. Это напряжение усилится вторым каскадом УПЧ в 10 раз, и на выходе второго каскада амплитуда напряжения сигнала будет $U_{2\text{УПЧ}} = 1000 \cdot 10 = 10\,000 \text{ мкв}$. На выходе третьего каскада УПЧ $U_{3\text{УПЧ}} = 10\,000 \cdot 10 = 100\,000 \text{ мкв}$, а после усиления четвертым каскадом $U_{4\text{УПЧ}} = 100\,000 \cdot 10 = 1\,000\,000 \text{ мкв}$, т. е. 1 в.

В радиолокационных приемниках обычно применяется диодный детектор, в котором после детектирования сигнал уменьшается по амплитуде. Допустим, что коэффициент передачи детектора $K_d = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 0,5$. Тогда на вход виде усилителя будет подано напряжение $U_d = 1 \times 0,5 = 0,5 \text{ в}$. Если коэффициент усиления всех каскадов видеоусилителей $K_{\text{ву}} = 40$, то на выходе приемника амплитуда напряжения достигнет $U_{\text{вых}} = 0,5 \cdot 40 = 20 \text{ в}$.

Таким образом, отраженный сигнал с амплитудой напряжения 2 мкв на входе приемника благодаря усилению достигнет 20 в на его выходе. Зная напряжение на выходе приемника $U_{\text{вых}}$ и напряжение на его входе $U_{\text{вх}}$, нетрудно подсчитать, во сколько раз усиливает весь приемник, т. е. определить общий коэффициент его усиления.

Коэффициентом усиления всего приемника $K_{\text{пр}}$ называют отношение его выходного напряжения к входному

$$K_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Для рассмотренного выше примера

$$K_{\text{пр}} = \frac{20 \text{ в}}{2 \text{ мкв}} = \frac{20\,000\,000}{2} = 10\,000\,000.$$

Коэффициент усиления всего приемника зависит от коэффициентов усиления отдельных каскадов и равен их произведению

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{увч}} K_{\text{с}} K_{1\text{упч}} K_{2\text{упч}} K_{3\text{упч}} K_{4\text{упч}} K_{\text{д}} K_{\text{ву}}.$$

Из последней формулы видно, что коэффициент усиления всего приемника определяется главным образом коэффициентами усиления каскадов промежуточной частоты.

Необходимость регулировки усиления

При работе станции на вход приемника поступают импульсы, значительно отличающиеся один от другого по напряжению (в десятки тысяч раз). Дело в том, что воздушная обстановка в секторе действия станции непрерывно изменяется. На вход приемника поступают сигналы от целей, удаленных на 100—150 км, и от целей, удаленных на 5—10 км; одна и та же цель (самолет) может непрерывно изменять свое расстояние до радиолокационной станции; в зоне действия станции могут оказаться местные предметы, находящиеся также на различном расстоянии от станции; кроме того, могут изменяться условия распространения радиоволн и т. д.

Пусть коэффициент усиления приемника выбран таким, что на экране электронно-лучевой трубки создается нормальный импульс от цели, находящейся на расстоянии 100 км от станции. Если оператору потребуется следить за целью, пролетающей на расстоянии 10 км от станции, то отраженные от этой цели импульсы будут создавать очень большое напряжение на входе приемника. Под действием этого напряжения может наступить или перегрузка приемника или на экране электронно-лучевой трубки создастся такой импульс, что отсчет координат окажется затруднен, а работа системы, например, автоматического сопровождения при изменении интенсивности входного сигнала будет невозможна из-за резких «рывков» и больших изменений ускорения движения.

Следовательно, усиление, необходимое для приема слабых сигналов, оказывается не только излишним, но и вредным при приеме сильных сигналов. В то же время усиление, рассчитанное на прием сильных сигналов, делает приемник малочувствительным, и такой приемник не сможет принять слабые сигналы. Чтобы один и тот же приемник мог принимать и слабые и сильные сигналы, необходимо предусмотреть регулировку его усиления.

Принцип действия регулятора усиления

Усиление приемника можно регулировать ручным и автоматическим способами при помощи специальных устройств (систем) — регуляторов усиления. Регулятор усиления изменяет коэффициент усиления приемника, уменьшая его при приеме сильных сигналов и увеличивая при приеме слабых.

Принцип действия регулятора усиления сводится к уменьшению в той или иной степени максимального коэффициента усиления приемника. Его работу можно отчасти сравнить с действием тормозов поезда. Допустим, что поезд без торможения развивает максимальную скорость 100 км/час. С помощью тормоза эта скорость может быть установлена 30 км/час; уменьшив торможение, ее можно довести до 50—80 км/час и т. д. Но тормозами нельзя увеличить скорость поезда до 110 км/час. То же самое и с регулятором усиления. Он работает по принципу торможения. Поэтому включение регулятора усиления в схему даже при приеме очень слабых сигналов приводит к некоторому уменьшению коэффициента усиления, что не всегда бывает желательно.

Сеточная характеристика лампы

Как известно, при изменении напряжения на управляющей сетке лампы изменяется и анодный ток. Эту зависимость обычно выражают графически. График, показывающий зависимость анодного тока лампы I_a от изменения напряжения на управляющей сетке U_g при постоянном анодном напряжении U_a , называют сеточной характеристикой лампы. Ее обычно обозначают так:

$$I_a = f(U_g).$$

Каждый тип ламп в зависимости от устройства и напряжений на ее электродах имеет свою сеточную характеристику. Сеточные характеристики отличаются друг от друга прежде всего крутизной характеристики S .

Крутизной характеристики S называют отношение прироста анодного тока ΔI_a к вызвавшему его приросту сеточного напряжения ΔU_g :

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{I'_a - I''_a}{U'_g - U''_g}.$$

Если витки сетки намотаны редко или они дальше удалены от катода (рис. 2, а), то действие сетки ослабляется, изменение напряжения на сетке на 1 в приводит к меньшему изменению анодного тока и лампа имеет пологую характеристику. Ее крутизна

$$S = \frac{15 - 12}{2 - 1} = 3 \text{ ма/в.}$$

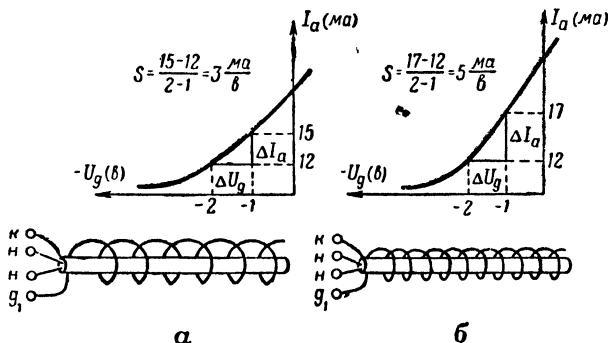


Рис. 2. Зависимость крутизны характеристики от конструкции сетки лампы

Если лампа имеет густонамотанную сетку или ее витки расположены близко к катоду (рис. 2, б), то действие сетки усиливается, изменение напряжения на сетке на тот же 1 в приводит к большему изменению анодного тока и лампа имеет более крутую характеристику. Ее крутизна

$$S = \frac{17 - 12}{2 - 1} = 5 \text{ ма/в.}$$

Наша промышленность выпускает специальные лампы (6К7, 2К2М и др.) с переменной крутизной характеристики (рис. 3, а). Получить такую характеристику можно, используя управляющие сетки различной конструкции:

- с переменным шагом витков (рис. 3, б);
- с различным диаметром витков (рис. 3, в);
- с вырезом одного витка в середине равномерно намотанной сетки (рис. 3, г).

Сущность работы лампы с переменной крутизной характеристики заключается в получении переменного отношения

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \quad \text{в зависимости от величины отрицательного на-}$$

пряжения на управляющей сетке. Если, например, на управляющую сетку с переменным шагом витков подается малое отрицательное напряжение (-5 в) и оно изменяется в небольших пределах, то электроны от катода к аноду проходят через все участки сетки как с большим, так и с малым шагом. Лампа работает на крутой части характеристики. При подаче на такую сетку большого отрицательного

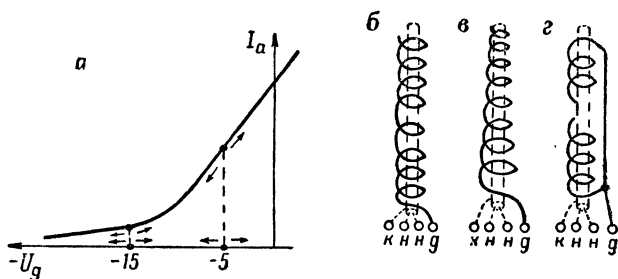


Рис. 3. Характеристика лампы с переменной крутизной и различные виды конструкции управляющих сеток

напряжения (-15 в) участки сетки, имеющие малый шаг намотки, не пропускают электронов, поэтому управляет величиной анодного тока не вся сетка, а лишь тот ее участок, который имеет большой шаг намотки. Лампа работает на пологой части характеристики.

Лампы с переменной крутизной характеристики очень удобно использовать в схемах регулировки усиления.

Коэффициент усиления усилительного каскада

Выше указывалось, что коэффициент усиления всего приемника равен произведению коэффициентов усиления отдельных его каскадов. Следовательно, изменять усиление всего приемника можно регулировкой коэффициентов усиления отдельных каскадов.

Чтобы усилительный каскад (рис. 4, а) работал без искажений и без сеточных токов, на управляющую сетку его лампы с сопротивлением R_k подается отрицательное напряжение смещения $-E_q$, смещающее начальную рабочую точку а в область левой части сеточной характеристики (рис. 4, б). Чтобы уменьшить потери переменной составляющей тока высокой частоты, сопротивление R_k блокируется конденсатором C_6 . Из сеточной характеристики

видно, что при $E_g = -2$ в в анодной цепи лампы протекает постоянный ток $I_a = 10$ ма.

Допустим, что на управляющую сетку такой лампы подается переменное напряжение сигнала U_g , амплитуда которого равна 1 в. В анодной цепи будет протекать переменная составляющая анодного тока I_a , которую принято изображать на графике $I_a = f(t)$, совмещенном с графиком се-

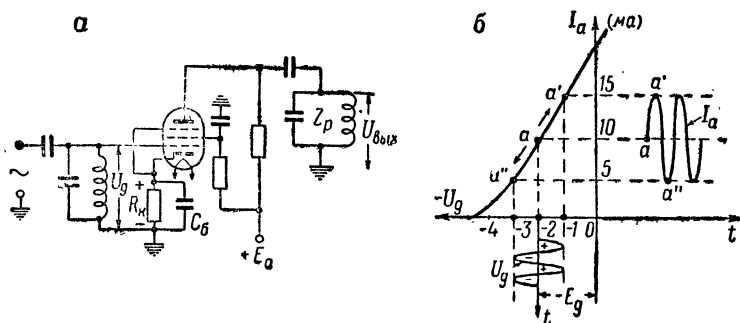


Рис. 4. Схема усилительного каскада (а) и график (б), иллюстрирующий принцип его работы

точной характеристики. Переменная составляющая анодного тока I_a будет тем больше, чем больше подводимое к сетке напряжение U_g и чем больше крутизна характеристики лампы S (рис. 5)

$$I_a \approx S U_g.$$

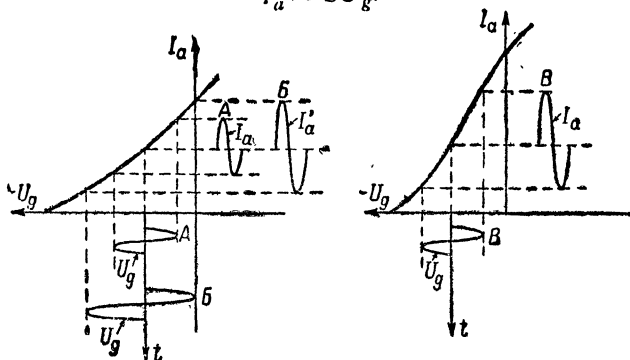


Рис. 5. Зависимость переменной составляющей анодного тока I_a от напряжения на сетке U_g и от крутизны характеристики S

Контур в анодной цепи настраивается в резонанс с частотой подводимого напряжения, поэтому для настроенной частоты он представляет активное сопротивление Z_p , и анодный ток I_a , протекая через контур, создает на нем падение напряжения

$$U_k = I_a Z_p = U_{\text{вых}},$$

которое является выходным напряжением каскада. Если в последнем равенстве заменить ток I_a его значением, то получим

$$U_{\text{вых}} = I_a Z_p = S Z_p U_g = S Z_p U_{\text{вх}}.$$

Разделив обе части равенства на $U_{\text{вх}}$, получим

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{S Z_p U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}};$$

так как

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = K,$$

то

$$K = S Z_p.$$

Таким образом, коэффициент усиления высокочастотного каскада приемника тем больше, чем больше крутизна характеристики лампы S и резонансное сопротивление контура Z_p . Отсюда можно сделать вывод, что регулировать усиление каскада можно изменением крутизны характеристики лампы S и резонансного сопротивления контура Z_p .

Способы регулировки усиления

Следует отметить, что изменением резонансного сопротивления контура Z_p для регулировки усиления в радиолонкационных приемниках почти никогда не пользуются, так как в этом случае ухудшается и без того недостаточное качество регулируемого контура. Поэтому, как правило, усиление регулируют за счет изменения крутизны характеристики лампы S .

На примере пятиэлектродной лампы рассмотрим влияние изменения напряжений на электродах лампы на изменение крутизны характеристики S .

Представим себе, что в пятиэлектродной лампе мы установили постоянное напряжение на аноде $U_a = 200$ в, а на экранирующей сетке — $U_{g2} = 140$ в и, изменяя напряжение на управляющей сетке U_{g1} , сняли сеточную характери-

стику a (рис. 6). Чтобы проследить влияние изменения анодного напряжения, уменьшим это напряжение до $U'_a = 160$ в, а напряжение на экранирующей сетке оставим тем же ($U_{g2} = 140$ в). Изменяя напряжение U_{g1} , построим сеточную характеристику b . Чтобы проследить влияние изменения напряжения на экранирующей сетке, уменьшим напряжение на ней до величины $U'_{g2} = 100$ в и таким же образом построим еще две сеточные характеристики: при $U_a = 200$ в — кривая c и при $U'_a = 160$ в — кривая d .

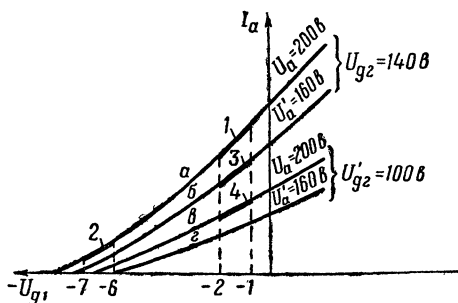


Рис. 6. Зависимость крутизны характеристики S от режима работы пентода

Из полученного семейства сеточных характеристик следует, что:

— крутизна одной и той же характеристики не постоянна, она зависит от напряжений на управляющей сетке (на участке 1 крутизна больше, чем на участке 2);

— крутизна характеристики зависит от напряжения на аноде (на участке 1 крутизна больше, чем на участке 3);

— крутизна характеристики зависит от изменения напряжения на экранирующей сетке (на участке 1 крутизна больше, чем на участке 4);

— уменьшение U_a или U_{g2} «сдвигает» характеристику вправо и вниз.

Таким образом, крутизну характеристики S , а значит, и коэффициент усиления можно регулировать, изменяя напряжение на управляющей сетке, на экранирующей сетке или на аноде лампы.

Требования к регуляторам усиления

Регулятор усиления должен предотвращать перегрузку приемника. Под перегрузкой понимают такое состояние приемника, когда при превышении входного напряжения $U_{вх}$ некоторого уровня выходное напряжение прекращает рост и даже начинает уменьшаться, несмотря на увеличение входного напряжения (рис. 7). Перегрузка приемника вызывается перегрузкой одного или нескольких усилительных каскадов. Объясняется перегрузка тем, что при мощном импульсе в сеточной цепи усилителя вследствие перераспределения электронов возникает большой сеточный ток; анодный ток при этом уменьшается, уменьшая выходное напряжение каскада. Сеточный ток заряжает все конденсаторы в сеточной цепи, увеличивая отрицательное смещение на сетке и значительно уменьшая (до нуля) усиление каскада. Затем после прекращения мощного импульса конденсаторы начинают разряжаться через сопротивления по экспоненциальному закону. При этом большое отрицательное смещение на сетке некоторое время сохраняется на таком уровне, при котором слабый сигнал может быть пропущен.

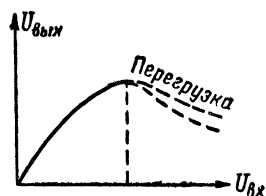


Рис. 7. Перегрузочная характеристика усилителя

Регулятор усиления не должен уменьшать отношение $\frac{U_{сигн}}{U_{шум}}$. Термин «шумы» в радиолока-

ционную технику перешел из области слухового приема. В диапазоне УКВ решающее значение имеют внутренние шумы приемника, обусловленные неравномерным прохождением тока по проводам и сопротивлениям. Основной причиной неравномерности являются колебания анодного тока ламп в результате дробового эффекта, перераспределения электронов между положительно заряженными сетками и т. д. Эти отклонения (флуктуации) создают на нагрузках свои напряжения, которые, усиливаясь приемником, вызывают беспорядочные отклонения светящегося пятна на экране трубки («траву»), на фоне которых наблюдаются отраженные импульсы.

Если амплитуда сигнала на входе приемника равна амплитуде шумов, то, получив одинаковое усиление с шу-

мами, полезный сигнал может быть потерян. При регулировке напряжение сигнала не должно оказаться ниже уровня шумов.

Регулятор усиления не должен вносить искажений в принимаемый сигнал. Искажения возможны чаще всего из-за неправильного выбора режима работы усилительной лампы.

Регулятор усиления должен плавно изменять и устанавливать требуемое напряжение на выходе приемника и, если необходимо, поддерживать это напряжение постоянным.

В соответствии с этими требованиями рассмотрим, в каких каскадах целесообразнее регулировать усиление, сколько каскадов должно подвергаться регулированию и на какие электроды должно воздействовать регулируемое напряжение.

На выбор регулируемых каскадов влияют главным образом два фактора:

— защита приемника, а значит, и отдельных каскадов от перегрузок;

— сохранение наивыгоднейшего соотношения $\frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\text{шум}}}$.

Необходимость защиты каскадов от перегрузок требует регулировки каскадов, ближайших к входу приемника. Так, например, если перегрузка угрожает третьему и всем последующим каскадам УПЧ, то регулировку усиления начинают со второго каскада УПЧ; если перегрузка возможна во втором каскаде УПЧ, то регулировку усиления начинают с первого каскада УПЧ и т. д.

Однако нельзя забывать, что регулятор усиления не должен ухудшать отношения $\frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\text{шум}}}$ в приемнике. Чем больше напряжение сигнала по отношению к напряжению шумов, тем легче выделить этот сигнал на выходе приемника и тем эффективнее работа всего приемника. Мы уже отмечали, что действие системы регулировки усиления сводится к уменьшению в той или иной степени амплитуды полезного сигнала $U_{\text{сигн}}$. Известно также, что величина отношения

$\frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\text{шум}}}$ в приемнике зависит главным образом от работы первой лампы: чем больше шумы первой лампы, тем

меньше это отношение. Если при данном напряжении шумов $U_{\text{шум}}$ первой лампы регулировать ее коэффициент усиления, уменьшая $U_{\text{сигн}}$, то отношение $\frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\text{шум}}}$ может получить невыгодное значение. Следовательно, регулировка усиления в первом каскаде приемника нежелательна.

Рассмотрим применение указанных положений на примере следующих трех приемников с различными схемами входных каскадов:

— приемник, предназначенный для работы на частотах ниже 1 000 Мгц и имеющий один или два каскада УВЧ (рис. 8, а);

— приемник, предназначенный для работы на частотах, несколько выше 1 000 Мгц и имеющий на входе ламповый смеситель (без каскадов УВЧ) (рис. 8, б);

— приемник сантиметрового диапазона, имеющий на входе кристаллический смеситель (рис. 8, в).

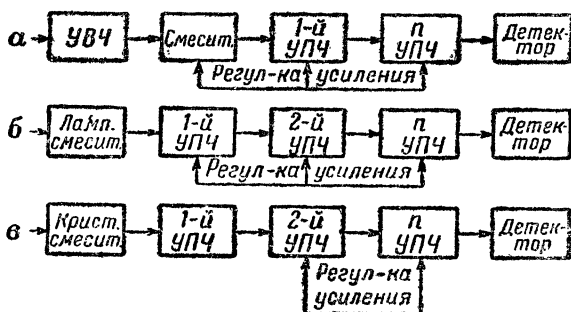


Рис. 8. Место регулятора усиления для приемников различного диапазона частот:

а — приемник с УВЧ; б — приемник с ламповым смесителем на входе; в — приемник с кристаллическим смесителем на входе

В приемниках с усилением по высокой частоте, особенно если каскадов УВЧ больше одного, регулировку усиления во избежание перегрузки следует начинать со второго каскада УВЧ или лампового смесителя.

В тех приемниках, в которых каскады УВЧ отсутствуют и первым каскадом является ламповый смеситель, регулировку усиления обычно начинают с первого каскада УПЧ. Так как смеситель увеличивает вместе с амплитудой сигнала и амплитуду шумов настолько, что шумы первого кас-

када УПЧ, уже не имеют решающего значения, то заботятся лишь об отсутствии перегрузки.

В приемниках сантиметрового диапазона, имеющих на входе кристаллический смеситель (для уменьшения собственных шумов), регулировку усиления начинают со второго каскада УПЧ, так как кристаллический смеситель сам перегружается раньше, чем его выходное напряжение может перегрузить первый каскад УПЧ. Кроме того, в УПЧ с полосой пропускания в несколько мегагерц усиление первого каскада будет настолько мало, что максимальный сигнал, который может дать смеситель, не сможет перегрузить даже второй каскад (после усиления первым). Поэтому регулировку усиления начинают с третьего каскада УПЧ и т. д., что дает возможность поставить первые каскады УПЧ в такой режим, чтобы получить наивыгоднейшее отно-

$$\text{шение } \frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\text{шум}}}.$$

Число регулируемых каскадов определяется величиной требуемого изменения усиления приемника и допустимой нелинейностью амплитудной характеристики каскада в режиме нелинейного усиления (т. е. искажениями, которые могут быть допущены при регулировке усиления).

Прежде всего отметим, что в радиолокационных приемниках при работе на очень высоких частотах за счет регулировки одного каскада нельзя снизить до нуля принимаемый сигнал. Если усилительный каскад поставить в такой режим, когда лампа не усиливает (например, в режим отсечки), то часть напряжения полезного сигнала все равно пройдет на выход каскада через проходную емкость C_{ag_1} лампы (рис. 9) и образует на нагрузке Z падение напряжения $U_{\text{вых}}$. Это напряжение поступает на следующий каскад и усиливается.

Обычно за счет регулировки одного каскада усиление можно уменьшить в 100 раз. Поэтому если при работе приемника усиление необходимо уменьшить в 10 000 раз, то достаточно осуществить регулировку двух каскадов, а если более чем в 10 000 раз — то трех и более каскадов.

На выбор числа регулируемых каскадов влияет еще и допустимая нелинейность амплитудной характеристики каскада в режиме пониженного усиления. Поясним эту зависимость.

Предположим, что усиление регулируется изменением напряжения на управляющей сетке. Если, например, на вход усилителя поступают мощные импульсы от близкостоящей цели *A* (рис. 10), то для устранения перегрузки уменьшают усиление, сдвигая рабочую точку в область отсечки анодного тока. При этом импульсы средней величины *B*, отраженные от более удаленной цели, усиливаются

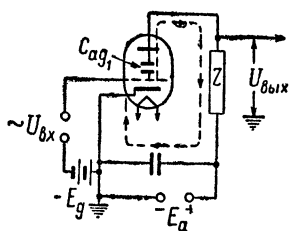


Рис. 9. Прохождение тока через емкость C_{ag1} лампы

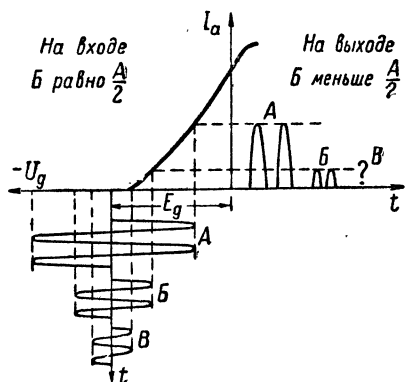


Рис. 10. Пояснение нелинейности усиления

в меньшей степени, так как они оказываются на криволинейном участке характеристики; слабые импульсы *B*, отраженные от дальней цели, совсем не смогут открыть лампу и будут потеряны.

Таким образом, регулировка усиления в одном каскаде приводит к меньшему усилению слабых сигналов по сравнению с усилением сильных сигналов, т. е. к нелинейности амплитудной характеристики усилителя. Избавиться от этого недостатка можно, если не заходить в область нелинейной части сеточной характеристики, т. е. уменьшив диапазон (глубину) регулировки в одном каскаде. Получить же необходимое изменение усиления можно увеличением числа регулируемых каскадов.

Следовательно, иногда по величине изменения усиления было бы достаточно регулировать два каскада, но для сохранения линейности амплитудной характеристики число регулируемых каскадов увеличивают до трех и т. д. Чем

больше число регулируемых каскадов в приемнике, тем в больших пределах изменяется их общее усиление при изменении входного напряжения и тем меньше изменяется линейность выходного напряжения.

Вопрос о том, на какие электроды должно воздействовать регулируемое напряжение, будет рассмотрен конкретно на схемах ручной регулировки усиления.

РУЧНАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ

Ручная регулировка усиления в приемниках осуществляется как в высокочастотной (до детектора), так и в низкочастотной (после детектора) частях приемника при помощи ручки, выведенной на его переднюю панель. Как правило, ручная регулировка позволяет изменять усиление приемника от максимума до нуля.

В высокочастотной части приемника усиление регулируется изменением коэффициента усиления одного или нескольких каскадов усилителя. Мы уже выяснили, что коэффициент усиления каскада зависит от крутизны характеристики лампы и от величины резонансного сопротивления:

$$K = SZ_p.$$

В настоящее время наиболее распространены схемы регулировки усиления за счет изменения крутизны характеристики ламп. Крутизна S , а значит, и коэффициент усиления каскада зависят от режима работы последнего, т. е. от напряжений на электродах усилительных ламп. Следовательно, изменяя эти напряжения вручную, можно изменять усиление всего приемника. Рассмотрим возможные способы ручной регулировки усиления.

Регулировка усиления изменением смещения на управляющей сетке

Эта регулировка наиболее распространенная и в простейшем случае может быть осуществлена за счет изменения величины катодного сопротивления R_k (рис. 11, а). Напряжение, падающее на сопротивлении R_k , плюсом приложено к катоду, а минусом — к управляющей сетке. Оно

сдвигает начальную рабочую точку на сеточной характеристике влево в положение A' (рис. 11, б).

При приеме слабых сигналов движок регулятора усиления ставится в верхнее положение и управляющая сетка имеет нулевой потенциал по отношению к катоду. Лампа при этом обладает наибольшим коэффициентом усиления, но работает с сеточными токами, внося искажение в принимаемый сигнал.

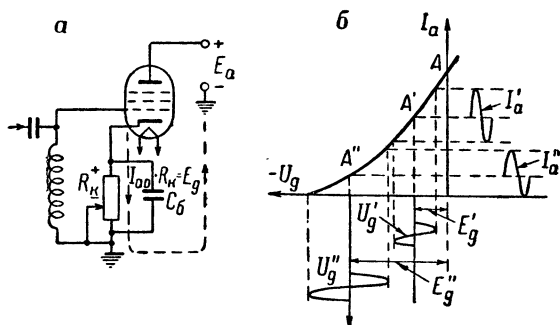


Рис. 11. Регулировка усиления изменением смещения на управляющей сетке:

а — принципиальная схема каскада; б — график, иллюстрирующий принцип регулировки усиления

При приеме более мощных сигналов движок регулятора усиления перемещают вниз. На управляющей сетке отрицательное напряжение смещения увеличивается, рабочая точка сдвигается в область более пологой части сеточной характеристики, коэффициент усиления каскада уменьшается.

Таким образом, перемещая вручную движок сопротивления R_k , устанавливают необходимое усиление.

Чтобы работать без сеточных токов при выведенном регуляторе усиления, часто сопротивление R_k делают регулируемым и используют его для начального смещения. Для регулировки усиления последовательно с сопротивлением R_k включают переменное сопротивление $PУ$ (рис. 12), которое работает аналогично сопротивлению R_k в предыдущем случае. Для уменьшения потерь переменной составляющей анодного тока каскада переменное сопротивление $PУ$ или R_k всегда должно быть шунтировано блокировочным конденсатором $C_б$ достаточной величины.

Однако получение смещения за счет постоянной составляющей анодного тока, проходящей через включенное в цепь катода сопротивление, имеет тот недостаток, что для получения большого смещения сопротивление PY или R_k должно быть большой величины. При этом постоянная времени цепи катодного смещения (например, $\tau_p = R_k C_k$) может стать настолько большой, что после воздействия мощного импульса конденсатор C_k будет разряжаться через сопротивление R_k длительное время и в результате запирающего приемника последующий сигнал может быть пропущен.

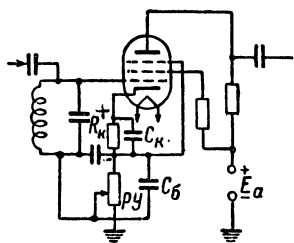


Рис. 12. Вариант схемы регулировки усиления изменением смещения на управляющей сетке

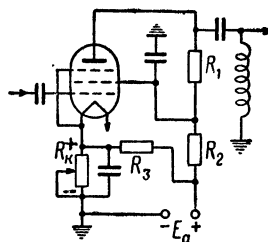


Рис. 13. Комбинированная схема регулировки усиления изменением смещения на управляющей сетке

Устранить указанный недостаток можно применением комбинированной схемы регулировки усиления (рис. 13). В этой схеме переменное сопротивление R_k является не только катодным сопротивлением, но и составной частью делителя R_3 , R_k напряжения источника анодного питания. Сопротивление R_3 значительно больше сопротивления R_k , поэтому ток делителя почти не зависит от величины R_k . Так как через сопротивление R_k проходят токи I_a и I_{g2} , на нем создается значительное отрицательное напряжение смещения при сравнительно небольшой величине R_k , а значит, и небольшой постоянной времени τ_p , что исключает потерю сигнала после действия мощного импульса.

Лучшие результаты регулировки усиления дает схема изменения напряжения смещения, снимаемого от специального источника — E_c (рис. 14). В этой схеме переменное сопротивление PY подключается как потенциометр к источнику смещения — E_c , положительный зажим которого сое-

диняется с корпусом, а значит, и с катодом регулируемых ламп. С движка потенциометра $PУ$ отрицательное напряжение подается на управляющие сетки двух каскадов УПЧ. При приеме слабых сигналов движок $PУ$ перемещают вправо, рабочая точка перемещается в область большой крутизны характеристики, коэффициент усиления увеличивается. При приеме мощных сигналов движок перемещают влево, увеличивая отрицательное напряжение смещения и уменьшая коэффициент усиления приемника.

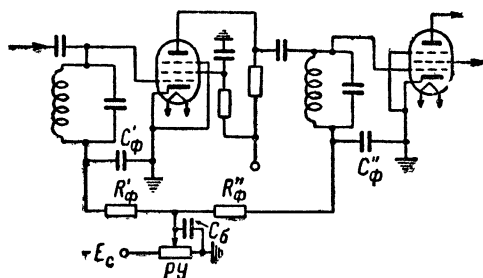


Рис. 14. Регулировка усиления за счет специального источника смещения

Из рис. 14 видно, что при регулировке усиления одновременно в нескольких каскадах их сеточные цепи связаны через общие регулирующие элементы. Контур в сеточной цепи второго каскада служит анодной нагрузкой первого каскада. Следовательно, через цепи регулировки возможна паразитная связь анодной и сеточной цепей усилителя. Эта связь может привести схему к самовозбуждению. Для устранения самовозбуждения каждый каскад в схеме регулировки должен обязательно иметь развязывающие фильтры, состоящие из сопротивления $R'_ф$ ($R''_ф$) и конденсатора $C'_ф$ ($C''_ф$). Работу этих элементов можно пояснить следующим образом.

Сопротивление $R'_ф$ большой величины представляет значительное препятствие прохождению тока высокой частоты через общие элементы каскадов, а конденсатор $C'_ф$ создает для этих токов обходной путь на катод (мимо $R'_ф$), и самовозбуждение устраняется.

Регулировка усиления изменением напряжения на экранирующей сетке

Напряжение на экранирующую сетку одной или нескольких регулируемых ламп подается с переменного сопротивления PY (рис. 15, *а*), обычно являющегося составной частью делителя источника анодного напряжения. Напряжение смещения на управляющей сетке не изменяется.

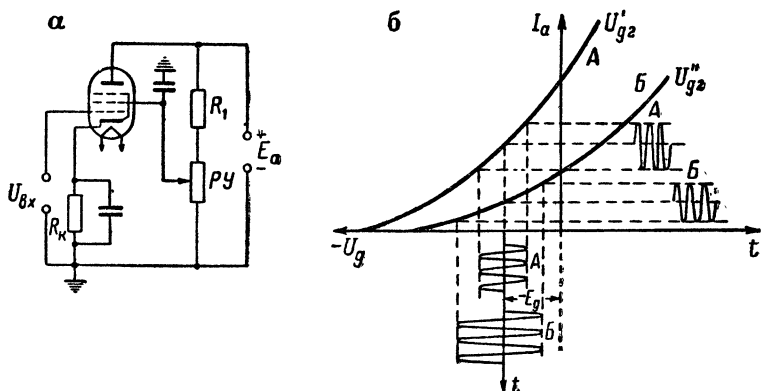


Рис. 15. Регулировка усиления изменением напряжения на экранирующей сетке:

а — принципиальная схема каскада; *б* — график, иллюстрирующий принцип регулировки усиления

В случае приема слабых сигналов *А* (рис. 15, *б*) движок регулятора усиления перемещают вверх. При этом на экранирующей сетке напряжение увеличивается, сеточная характеристика перемещается влево и вверх, рабочая точка оказывается на более крутой части характеристики и коэффициент усиления каскада возрастает. При приеме более мощных сигналов *Б* движок сопротивления PY перемещают вниз, напряжение на экранирующей сетке понижается, сеточная характеристика перемещается вправо и вниз, крутизна характеристики уменьшается и коэффициент усиления каскада падает.

Таким образом, перемещая вручную движок сопротивления PY и изменяя напряжение на экранирующей сетке, устанавливают необходимое усиление в зависимости от мощности приходящего сигнала.

Этот способ применяется на практике, но имеет тот недостаток, что при неизменном напряжении смещения и

уменьшении напряжения на экранирующей сетке сеточная характеристика может настолько сдвинуться вправо, что два достаточно сильных сигнала разных входных уровней могут перегрузить регулируемый каскад, создать на его выходе одинаковые напряжения и затруднить разделение сигналов.

Регулировка усиления изменением анодного напряжения

Эта регулировка применяется очень редко. Осуществляется она при помощи переменного сопротивления PY (рис. 16), включенного в анодную цепь лампы и изменяю-

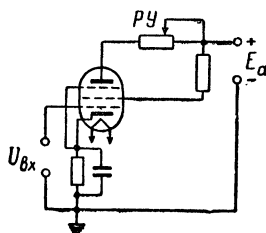


Рис. 16. Регулировка усиления изменением анодного напряжения

щего анодное напряжение. Физические процессы в этом случае так же, как и в предыдущем, связаны с перемещением сеточной характеристики и изменением ее крутизны.

Регулировка усиления изменением напряжения на защитной сетке

При использовании пятиэлектродной лампы в регулируемом каскаде иногда применяется еще регулировка усиления за счет изменения отрицательного напряжения на защитной сетке. Для уменьшения усиления увеличивают отрицательное напряжение на защитной сетке (при этом анодный ток уменьшается) и наоборот.

Этот способ регулировки усиления возможен только в том случае, если регулируемая лампа имеет отдельный вывод защитной сетки. Кроме того, возможность регулировки ограничивается допустимой мощностью рассеивания экранирующей сетки, так как электроны, отталкиваясь от отрицательно заряженной защитной сетки, попадают на экранирующую сетку и увеличивают ее ток примерно на ту же величину, на которую уменьшается анодный ток.

Регулировка усиления в каскадах видеочастоты

В низкочастотной части (после детектора) приемников радиолокационных станций обычно нет регуляторов усиления. Чаще всего один из каскадов усилителя видеочастоты (первый после детектора) ставят в режим ограничения. На выходе этого каскада амплитуда напряжений для всех сигналов, превышающих определенный уровень, постоянна, вследствие чего предупреждается перегрузка последующих каскадов. Однако даже при наличии такого ограничительного каскада в случае использования ламп с несколько повышенными параметрами, а также при величинах напряжения накала и высокого напряжения больше номинальных максимальное выходное напряжение может оказаться выше требуемого. Чтобы избежать перегрузки каскадов и расплывания пятна на экране индикатора, в этом случае предусматривают регулировку усиления в блоке видеосигналов. Если индикатор совмещен с приемником или расположен вблизи него, то регулятор включают между ограничивающим и последующим каскадами, чтобы избежать перегрузки всех каскадов индикаторного блока. Если индикаторное устройство удалено от приемника, то для удобства управления регулятор усиления включают в состав каскадов индикаторного блока, а каскады видеосигналов, совмещенные с приемником, выполняют так, чтобы в них не было перегрузки. В этом случае регулятор включают между кабелем и первым каскадом или вводят в состав первого каскада индикаторного блока.

Если после детектора приемник имеет несколько каналов, то регулировку усиления предусматривают в каждом канале, причем регулятор усиления размещают возможно ближе к тому каскаду, в котором происходит разделение каналов.

Обычно регулятор усиления представляет собой потенциометр, заменяющий сопротивление нагрузки одного из усилительных каскадов (рис. 17, а). При перемещении движка вниз на сетку усилительного каскада подается меньшее входное напряжение и, следовательно, выходное напряжение с нагрузки последующих каскадов снимается также меньшее, т. е. перегрузка каскадов исключена.

Иногда в каскадах видеочастоты применяют регулировку усиления за счет изменения степени отрицательной обратной связи без изменения смещения на сетке лампы

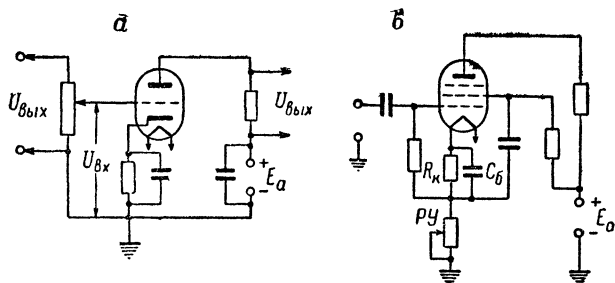


Рис. 17. Регулировка усиления в каскадах видеочастоты:

a — изменением входного напряжения каскада; *б* — изменением степени отрицательной обратной связи

(рис. 17, *б*). Под действием отрицательной обратной связи входное напряжение по амплитуде уменьшается, уменьшая усиление всего блока.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ

Необходимость автоматической регулировки усиления

В радиолокационных станциях, имеющих систему автоматического сопровождения цели, для плавной и устойчивой работы этой системы необходимо на ее входе (на выходе приемника) всегда поддерживать постоянную амплитуду сигнала, независимо от амплитуды напряжения на входе приемника. На вход приемника могут поступать сигналы различной интенсивности, поэтому для получения выходного напряжения постоянной амплитуды нужно изменять усиление приемника в соответствии с изменением амплитуды входного сигнала. Так как закон изменения напряжения входного сигнала неизвестен, то невозможно вручную «подготовить» заранее соответствующий коэффициент усиления приемника для различных сигналов. Кроме того, скорость изменения сигнала, отраженного, например, от быстролетящего самолета, может быть настолько велика, что оператор не успеет вручную изменять коэффициент усиления приемника.

В радиолокационных станциях дальнего обнаружения имеется необходимость одновременного наблюдения слабых сигналов от далеко расположенных целей и сильных сигналов — от близко расположенных целей. При этом усиление приемника необходимо устанавливать различным для каждого сигнала. Но производить вручную такие быстрые изменения усиления опять-таки невозможно.

В самом радиолокационном приемнике могут также происходить различные непредвиденные изменения, как например:

- изменение режима работы той или иной лампы вследствие изменения накального или анодного напряжения;

— изменение параметров лампы вследствие частичной потери эмиссии или замены лампы другой (с лучшими или худшими параметрами) и т. д.

Подобных изменений, приводящих к необходимости регулировки усиления, предвидеть невозможно, да оператор и не в состоянии следить за всеми этими изменениями. Поэтому в приемнике, кроме ручной, должна быть еще автоматическая регулировка усиления (АРУ).

Чтобы своевременно изменять коэффициент усиления приемника в зависимости от изменения, например, входного сигнала, автоматическая регулировка должна быть практически безынерционной. Это достигается использованием в системах электронных приборов.

Принцип действия схемы АРУ

Принцип действия схемы автоматической регулировки усиления (рис. 18) заключается в установлении обратного воздействия выходной цепи детектора на усилительные лампы, работающие в каскаде промежуточной, а иногда и в каскаде высокой частоты.

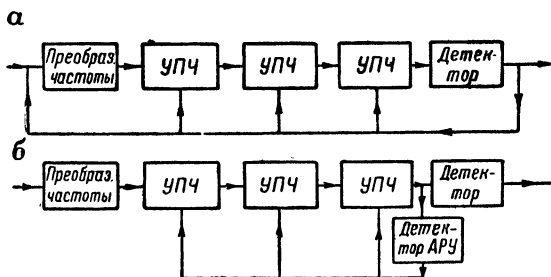


Рис. 18. Принцип действия АРУ:

а — с общим детектором; б — с детектором канала АРУ

Отраженный сигнал, поступающий на вход приемника, после усиления выпрямляется детектором в постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде входного напряжения. Это выпрямленное напряжение в виде отрицательного смещения подается, например, на управляющие сетки одной или нескольких ламп каскадов УПЧ. При увеличении амплитуды отраженного сигнала на входе приемника пропорционально увеличивается выпрямленное напряжение на выходе детектора. Это напряжение увеличивает отрицательное смещение на сетках регулируемых ламп, уменьшая

усиление настолько, что напряжение на выходе приемника остается почти постоянным.

Основными элементами схемы АРУ являются детектор и регулируемая усилительная лампа. В качестве регулируемых ламп лучше всего использовать лампы с переменной крутизной характеристики, а в качестве детектора — диодный детектор.

Характеристика $I_a = f(U_a)$ диодного детектора имеет большой линейный участок. Следовательно, изменение напряжения промежуточной частоты в больших пределах вызывает пропорциональное изменение напряжения на выходе детектора. А эта пропорциональность как раз необходима для правильной работы схемы АРУ. Кроме того, диодный детектор не боится перегрузок, потребляет мало энергии и имеет сравнительно малые размеры.

В некоторых приемниках в качестве детектора АРУ используется детектор основного канала приемника и в схему добавляют только связывающие цепи (рис. 18, а). Иногда канал АРУ имеет отдельный детектор (рис. 18, б).

Действие схемы АРУ в конечном счете сводится к изменению амплитудной характеристики приемника — зависимости выходного напряжения приемника от величины э.д.с., наведенной в его антенне.

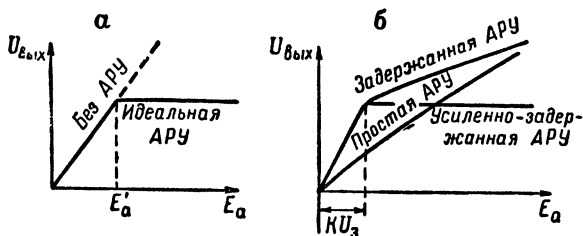


Рис. 19. Амплитудные характеристики приемника с различными системами АРУ:

а — идеализированные характеристики; б — реальные характеристики

В приемнике без АРУ амплитудная характеристика имеет вид прямой линии (рис. 19, а). Из этой характеристики видно, что чем больше э.д.с. E_a в антенне, тем больше выходное напряжение $U_{\text{вых}}$.

Если в приемнике есть АРУ, то в идеальном случае его амплитудная характеристика с некоторой величины E'_a параллельна оси E_a . Такая характеристика означает, что

АРУ до некоторого заданного предела E'_a не уменьшает усиления слабых сигналов. При дальнейшем же увеличении E_a напряжение на выходе приемника остается постоянным.

Реальные амплитудные характеристики приемников с различными схемами АРУ (простой, задержанной и усиленно-задержанной) показаны на рис. 19, б.

Обычно амплитудные характеристики схем АРУ называют просто характеристиками АРУ.

Простая схема АРУ

В простой схеме АРУ (рис. 20) диод \mathcal{L}_2 служит общим детектором для основного канала приемника и для канала АРУ. Лампа \mathcal{L}_1 представляет собой усилитель промежуточной частоты.

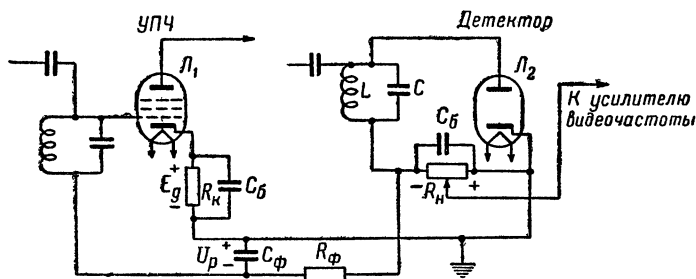


Рис. 20. Простая схема АРУ

Напряжение промежуточной частоты после усиления подается с контура LC на диод \mathcal{L}_2 и выпрямляется им. На нагрузке R_n диода создается постоянное напряжение, пропорциональное напряжению промежуточной частоты. Ток по сопротивлению R_n течет справа налево, следовательно, положительный потенциал этого напряжения находится на корпусе, а значит, и на катодах всех регулируемых ламп. Отрицательный же потенциал через сопротивление фильтра R_ϕ подается на управляющие сетки регулируемых ламп. Таким образом, на управляющую сетку каждой регулируемой лампы действуют начальное напряжение, смещение E_g , снятое с катодного сопротивления лампы, и регулирующее напряжение U_p , снятое с нагрузки детектора и изменяющееся в зависимости от амплитуды напряжения промежуточной частоты.

На рис. 21 приведен график, иллюстрирующий работу простой схемы АРУ. Если на диодный детектор поступает слабый сигнал U'_g промежуточной частоты, то на нагрузке детектора R_n создается небольшое выпрямленное напряжение U'_p и на управляющую сетку лампы с переменной крутизной подается сравнительно небольшое отрицательное смещение E'_g . Рабочая точка перемещается на участке с большой крутизной сеточной характеристики лампы, в результате чего переменная составляющая анодного тока равна I'_a .

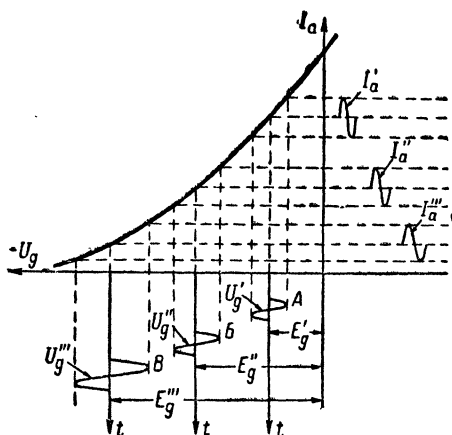


рис. 21. График, иллюстрирующий работу простой схемы АРУ

При действии более сильного сигнала U''_g на нагрузке детектора создается большее выпрямленное напряжение U''_p и на управляющую сетку действует большее напряжение смещения E''_g . Рабочая точка в этом случае перемещается на участок со средней крутизной сеточной характеристики лампы, и переменная составляющая тока в анодной цепи равна I''_a .

При еще большем напряжении сигнала U'''_g на управляющую сетку лампы подается смещение E'''_g . Рабочая точка оказывается в пологой части характеристики, коэффициент усиления каскада значительно уменьшается, и переменная составляющая анодного тока равна I'''_a .

Сравнивая токи I'_a, I''_a и I'''_a , видим, что, несмотря на различные амплитуды входных сигналов, в результате действия АРУ получаются выходные сигналы с примерно равными амплитудами.

Достоинство рассмотренной схемы АРУ — простота устройства. В приемнике с такой АРУ нужен только один диодный детектор. Недостаток простой схемы АРУ состоит в том, что она начинает уменьшать усиление приемника даже при очень слабых сигналах, когда в этом уменьшении нет необходимости. Кроме того, характеристика схемы АРУ недостаточно полого и далека до идеальной (см. рис. 19, б). При простой схеме АРУ с увеличением амплитуды входного сигнала выходное напряжение все же увеличивается и может перегрузить оконечные каскады приемника.

Схема задержанной АРУ

В схеме задержанной АРУ усиление приемника остается неизменным, пока его входное напряжение не достигнет определенного уровня.

Для задержанной АРУ требуется отдельный диодный детектор (например, один из диодов ламп 6Х6С, 6В8С и др.). В схеме, приведенной на рис. 22, диод \mathcal{L}'_2 используется

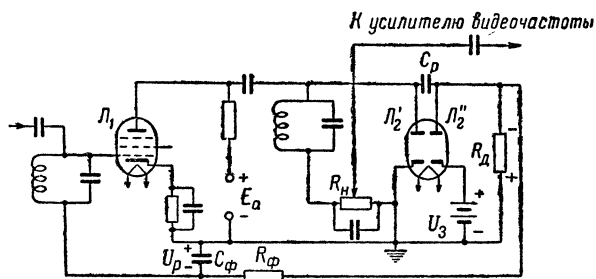


Рис. 22. Схема задержанной АРУ

для детектирования в основном канале приемника, а диод \mathcal{L}'_2 — для детектирования в канале АРУ. На диод \mathcal{L}'_2 подается напряжение задержки U_a в несколько вольт. На этот же диод через конденсатор C_p поступает напряжение промежуточной частоты. При слабых сигналах (сигнал А на рис. 23), пока напряжение промежуточной частоты меньше

напряжения задержки, диод L_2' заперт и схема АРУ не работает. Происходит как бы задержка действия АРУ. При сильных сигналах (сигнал B на рис. 23) в анодной цепи детектора АРУ протекает выпрямленный ток, создающий на его нагрузке R_k регулирующее напряжение U_p , минус которого подается на сетки регулирующих ламп, уменьшая в той или иной степени усиление приемника.

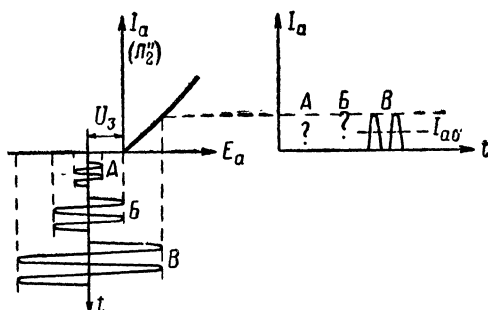


Рис. 23. Диаграмма, поясняющая работу задержанной АРУ

Недостаток такой схемы — увеличение шунтирования контура последнего каскада УПЧ входными сопротивлениями двух детекторов при их работе. Это ухудшает избирательность контура и уменьшает усиление каскада УПЧ. Кроме того, при изменении входного сигнала в широких пределах напряжение на выходе приемника непостоянно (см. рис. 19, б), так как регулирующее напряжение недостаточно для того, чтобы получить необходимое изменение крутизны характеристики. Лучшие результаты в этом отношении дает усиленно-задержанная АРУ.

Схемы усиленно-задержанной АРУ

Усиленно-задержанная АРУ поддерживает постоянным выходное напряжение приемника при изменении входного напряжения в больших пределах. Как видно из рис. 19, б, характеристика усиленно-задержанной АРУ близка к идеальной. Наиболее широко применяются схемы усиленно-задержанной АРУ с предварительным усилением по промежуточной частоте и с усилителем постоянного тока.

На рис. 24 изображена схема усиленно-задержанной АРУ с предварительным усилением по промежуточной частоте. Здесь в канал АРУ до детектора введен усилитель промежуточной частоты, собранный на лампе \mathcal{L}_2 . Напряжение U_a создает задержку, и при поступлении слабых сигналов система АРУ не работает. При сильных сигналах, амплитуда которых превышает напряжение задержки, диод \mathcal{L}_3 отпирается и с его нагрузки R_n на сетки регулируемых ламп подается регулирующее напряжение U_p , уменьшающее усиление приемника пропорционально увеличению входного сигнала.

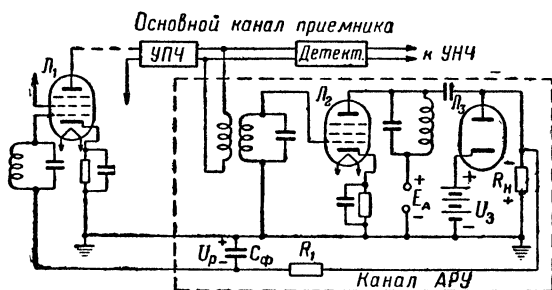


Рис. 24. Схема усиленно-задержанной АРУ с предварительным усилением по промежуточной частоте

Очевидно, что после того как схема АРУ начала работать (диод \mathcal{L}_3 открыт), величина регулирующего напряжения U_p в рассматриваемой схеме будет больше, чем в схеме задержанной АРУ. Поэтому характеристика усиленно-задержанной АРУ идет более полого, чем задержанной АРУ (см. рис. 19, б).

На рис. 25 представлена схема усиленно-задержанной АРУ с усилителем постоянного тока. Диод \mathcal{L}_2 (одна половина лампы 6Х6С) является детектором канала АРУ (другая половина лампы 6Х6С работает в основном канале приемника). Лампа \mathcal{L}_3 служит усилителем постоянного тока. На сопротивлениях R_1 , R_2 и R_3 , образующих делитель напряжения в цепи источника E , создаются напряжения U_0 , U'_a и U_a .

Напряжение U'_a используется для смещения на управляющей сетке усилителя постоянного тока, U'_a — в качестве анодного напряжения усилителя постоянного тока, U_0 — как

начальное смещение на сетки регулируемых ламп. Сопротивления подбираются такой величины, чтобы напряжение смещения U_a при отсутствии сигнала запирало лампу L_3 .

Напряжение U_a подается на сетку лампы L_3 через сопротивление нагрузки детектора R_n . При поступлении сигнала на сопротивлении R_n создается постоянное напряжение U_n , которое также подается на участок сетки — катод усилителя постоянного тока. Напряжения U_a и U_n имеют противоположную полярность, поэтому при слабых входных сигналах лампа L_3 заперта ($U_a > U_n$) действие схем АРУ задерживается. При сильном входном сигнале отрицательное напряжение на сетке лампы L_3 уменьшается и лампа L_3 отпирается. Ток, проходящий через лампу (от источника U'_a), создает на сопротивлении R_4 усиленное па-

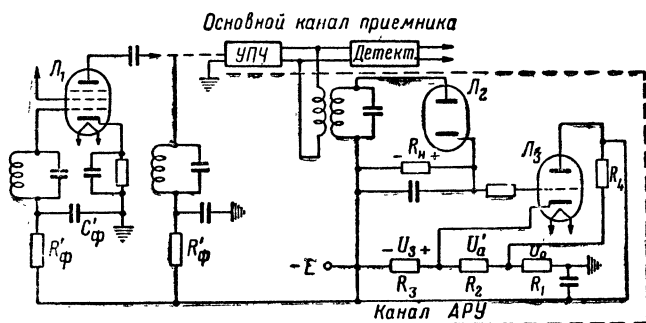


Рис. 25. Схема усиленно-задержанной АРУ с усилителем постоянного тока

дение напряжения, положительный потенциал которого через сопротивление R_1 подается на корпус и на катоды регулируемых ламп, а отрицательный потенциал — на их управляющие сетки.

Следовательно, на управляющие сетки регулируемых ламп действуют два напряжения — напряжение начального смещения U_0 и усиленное регулирующее напряжение U_p ; результирующее напряжение на сетках

$$E_g = U_0 + U_p.$$

С ростом сигнала на входе приемника увеличивается ток, проходящий через лампу L_3 , регулирующее напряжение U_p повышается, а усиление приемника падает.

Схемы АРУ с цепями временной селекции

В импульсных приемниках полезный сигнал принимается очень короткое время, равное длительности импульса. В промежутках между импульсами на вход приемника могут поступать импульсные сигналы той же самой частоты, но от других объектов, не интересующих оператора в данное время. Эти мешающие сигналы, как правило, не имеют определенной закономерности, амплитуда же их может быть очень велика. Если такой сигнал будет действовать на обычную систему АРУ, то последняя значительно уменьшит усиление регулируемых ламп. На восстановление усиления до нормального уровня потребуется некоторое время. За это время на вход приемника может поступить полезный сигнал от удаленной цели, имеющий малую амплитуду. Не получив достаточного усиления, сигнал может быть потерян. Поэтому желательно, чтобы усиление приемника зависело только от амплитуды полезных сигналов. Для этой цели в приемниках применяют автоматическую регулировку усиления с цепями временной селекции (избирательности).

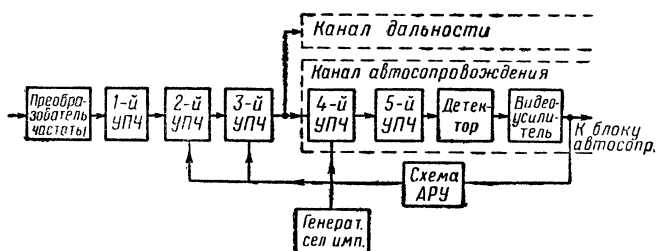


Рис. 26. Блок-схема АРУ с цепями временной селекции

Особенно хорошие результаты схемы АРУ с цепями временной селекции дают в приемниках радиолокационных станций с автоматическим сопровождением цели. В этом случае цепи временной селекции из всех сигналов, действующих на вход приемника, выделяют на вход канала автосопровождения сигналы только от цели, выбранной для сопровождения.

Блок-схема АРУ с цепями временной селекции представлена на рис. 26. Как видно из схемы, в приемнике после преобразователя частоты имеются три каскада УПЧ, общих для канала дальности и канала автосопровождения. Четвертый каскад УПЧ обычно называют дистанционным се-

детектором. Он же является первым усилительным каскадом в канале автосопровождения.

На вход дистанционного селектора действуют импульсы, отраженные от всех целей, облучаемых в данный момент станцией (рис. 27, а). На экранирующую сетку лампы этого каскада подается отрицательное напряжение, запирающее лампу, а значит, и канал автосопровождения. Для отпирания дистанционного селектора используется генератор селекторных импульсов, вырабатывающий специальные положительные сигналы. Оператор совмещает на экране даль-

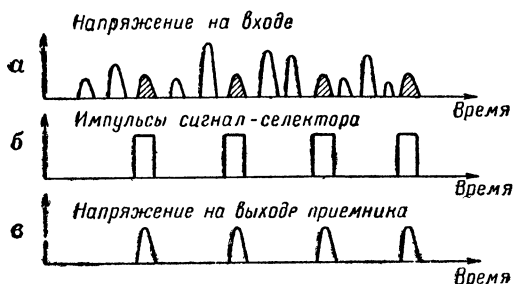


Рис. 27. Графики, иллюстрирующие работу схемы АРУ с цепями временной селекции

ности селекторный импульс с импульсами, отраженными от сопровождаемой цели (рис. 27, б). При этом в момент приема полезного сигнала (заштрихован) селекторный импульс компенсирует отрицательное напряжение на экранирующей сетке и канал автосопровождения открывается. Схема АРУ изменяет усиление регулируемых каскадов УПЧ только в зависимости от амплитуды полезного сигнала. Постоянная времени схемы АРУ выбирается такой, чтобы амплитуды импульсов на выходе приемника были одинаковыми (рис. 27, в), а глубина модуляции, полученная в результате конического развертывания, не изменялась.

Назначение фильтра и постоянная времени схемы АРУ

Фильтр состоит из активного сопротивления R_{ϕ} и конденсатора C_{ϕ} (рис. 28) и предназначен для отфильтровывания составляющих высоких и низких частот, которые могут быть в составе выпрямленного детектором напряжения. Если фильтрации нет (или она плохая), с нагрузки детек-

тора на сетки регулируемых ламп УПЧ через цепь АРУ будут действовать высокочастотные составляющие напряжения (например, напряжение промежуточной частоты). Даже незначительной величины этого напряжения достаточно, чтобы вызвать самовозбуждение усилителя и нарушить нормальную работу приемника.

Если принимаемый сигнал в результате, например, комического развертывания был промодулирован по амплитуде напряжением низкой частоты, то на сетки регулируемых ламп при плохой фильтрации вместе с постоянным напряжением будут подаваться и незначительные переменные составляющие низкой частоты, которые могут вызвать вторичную модуляцию сигнала. Вторичная модуляция приводит к уменьшению глубины модуляции принимаемого сигнала,

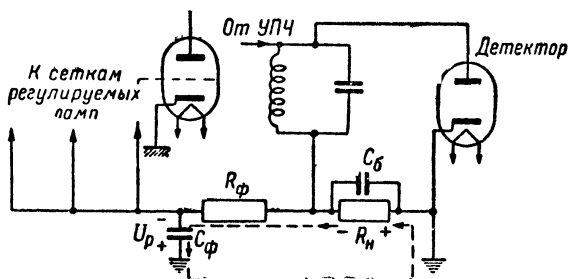


Рис. 28. Включение фильтра в цепь АРУ

так как максимальной амплитуде модулированного колебания будет соответствовать максимальное отрицательное смещение на сетках регулируемых ламп, которое уменьшает усиление каскада, а минимальной амплитуде модулированного колебания — минимальное отрицательное напряжение смещения, увеличивающее усиление каскада.

Следовательно, схемы АРУ при плохой фильтрации могут не улучшить, а ухудшить работу приемника. Поэтому применение фильтров, освобождающих создаваемое детектором напряжение смещения от переменных составляющих, необходимо. Действие фильтра $R_\phi C_\phi$ можно объяснить так.

Данные элементов фильтрующей цепи выбираются такими, чтобы для токов низкой частоты сопротивление R_ϕ было во много раз больше сопротивления конденсатора C_ϕ (и емкость конденсатора C_ϕ должна быть велика). Если рассматривать сопротивление R_n как источник напряжения переменных составляющих для участка сетка — катод регу-

лируемых ламп, то нагрузкой этого источника будут большое сопротивление R_ϕ и малое сопротивление конденсатора C_ϕ . Ясно, что все переменное напряжение гасится на сопротивлении R_ϕ , а конденсатор C_ϕ , фактически подключенный к участкам сетка — катод регулируемых ламп, представляет для переменных составляющих короткое замыкание. Поэтому на сетку регулируемых ламп будет действовать только снимаемое с конденсатора C_ϕ постоянное регулирующее напряжение, средняя величина которого пропорциональна амплитуде входного сигнала.

Каждый фильтр характеризуется постоянной времени τ

$$\tau = R_\phi C_\phi.$$

Чем больше емкость C_ϕ и сопротивление R_ϕ , т. е. чем больше постоянная времени τ , тем лучше фильтрация и, казалось бы, тем лучше работа приемника. Однако это не так. Мы уже говорили, что с конденсатора C_ϕ фактически подается регулирующее напряжение на сетки регулируемых ламп. Для получения хороших результатов регулирования это напряжение в каждый момент времени должно быть пропорционально напряжению входного сигнала, строго «следя» за его изменениями. При большой постоянной времени τ для заряда конденсатора C_ϕ через большое сопротивление R_ϕ необходимо продолжительное время, и авторегулировка будет «запаздывать» относительно изменений входного сигнала.

При слишком малых постоянных времени τ , т. е. при малых величинах R_ϕ и C_ϕ , регулирующее напряжение будет «мгновенно» следовать за изменениями входного сигнала, но фильтр будет плохо выполнять свои фильтрующие свойства, и на сетки регулируемых ламп вместе с постоянным напряжением U_p будут действовать и переменные составляющие, внося искажения в результате вторичной модуляции или вызывая самовозбуждение.

Мгновенная автоматическая регулировка усиления

В настоящее время схемы мгновенной автоматической регулировки усиления (схемы МАРУ) широко используются для борьбы с помехами радиолокационными станциями. Работа схемы МАРУ (рис. 29) заключается в следующем.

Если помеха отсутствует, на управляющую сетку регулируемой лампы Λ_2 подается напряжение смещения — E_g . При этом полезный сигнал U_g усиливается лампой и нор-

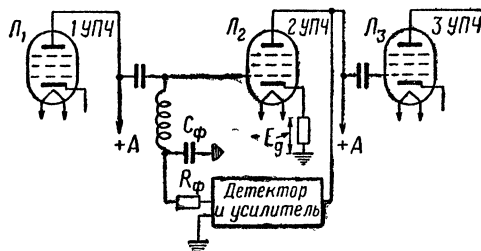


Рис. 29. Принципиальная схема МАРУ

мально воспроизводится на нагрузке в анодной цепи каскада (рис. 30, а).

Допустим теперь, что на вход приемника одновременно поступают напряжение помехи большой амплитуды и напряжение полезного сигнала незначительной амплитуды, причем помеха действует дольше (непрерывная), чем полез-

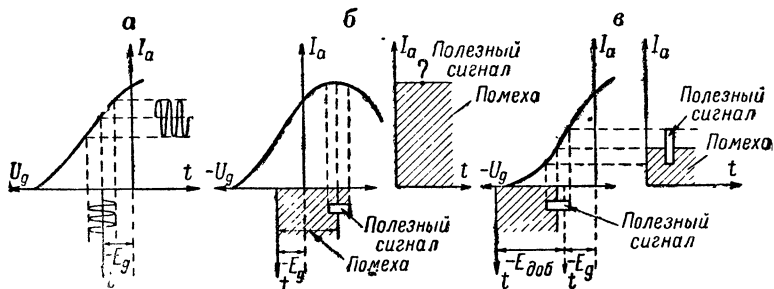


Рис. 30. Графики, иллюстрирующие работу схемы МАРУ

ный сигнал, и изменение ее амплитуды происходит медленнее. В этом случае на управляющую сетку усильтельной лампы действует напряжение помехи, промодулированное полезным сигналом. Для наглядности на рис. 30, б и в эти напряжения представлены огибающими их амплитуд. Если приемник имеет обычную схему АРУ, то ввиду большой постоянной времени $\tau = C_\phi R_\phi$ конденсатор C_ϕ заряжается медленно и напряжение смещения на сетке усильтельной лампы в течение некоторого времени остается неиз-

менным (равным E_g). Следовательно, усилительный каскад под действием сильной помехи окажется перегруженным, рабочая точка полезного сигнала попадет на плоскую часть характеристики и полезный сигнал будет потерян (рис. 30, б). Перегрузка каскада создается при заходе мгновенного напряжения на управляющей сетке лампы в область положительных значений. При этом сеточный ток возрастает, а анодный ток уменьшается.

Чтобы избежать в рассмотренном случае потери сигнала, применяют схемы МАРУ, в которых постоянная времени τ уменьшена до такой величины, что выполняются следующие условия:

- изменение регулирующего напряжения (на конденсаторе) почти мгновенно следует за сравнительно медленными изменениями входного напряжения помехи;

- регулирующее напряжение остается практически постоянным при быстрых изменениях полезного сигнала; когда на сетку усилительной лампы поступает напряжение помехи, промодулированное полезным сигналом, через цепь обратной связи (цепь АРУ) на эту же сетку сразу (так как τ мало) подается как бы добавочное отрицательное смещение, полученное в результате детектирования напряжения помех детектором схемы МАРУ; это добавочное смещение сдвигает рабочую точку на характеристике лампы так, что коэффициент усиления каскада для помехи значительно уменьшается, а полезный сигнал попадает на прямолинейный участок характеристики и нормально усиливается (рис. 30, в).

Итак, принципиальное отличие схем АРУ от схем МАРУ состоит в том, что схема АРУ имеет большую постоянную времени τ и уменьшает усиление полезного сигнала, а схема МАРУ поддерживает постоянным усиление полезных сигналов и уменьшает усиление приемника только для помех. Кроме того, вследствие соответствующего выбора элементов фильтра $R_\Phi C_\Phi$ в приемнике нет искажения сигнала за счет АРУ; в схемах же МАРУ из-за уменьшения постоянной времени фильтрация выпрямленного напряжения получается недостаточной и схема регулировки усиления вносит искажения в принятый сигнал (рис. 31), что при импульсной работе не имеет существенного значения.

В идеальном случае добавочное смещение должно быть равно (или сравнимо) пиковому значению или огибающей напряжения помехи, действующего на сетке рассматриваемого каскада. Однако для такого соотношения детектор при

своей работе не должен уменьшать амплитуды детектируемого напряжения, т. е. его коэффициент передачи должен быть равен единице:

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 1.$$

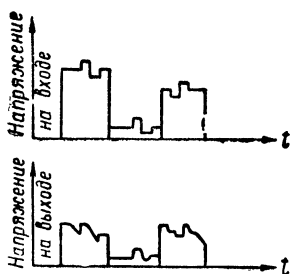


Рис. 31. Искажения, вносимые схемой МАРУ

Получить такое соотношение в детекторном каскаде невозможно (требуются большие величины R_n и C_b , т. е. большое τ). Поэтому выпрямленное напряжение помех с детектора МАРУ подают или на сетку лампы предыдущего каскада (рис. 32, а), что иногда вызывает неустойчивую работу усилителя (возможно самовозбуждение), или же на сетку лампы того же каскада, с выхода которого снимается выпрямленное напряжение смещения. Чтобы регулирующее напряжение в этом случае было сравнимо с амплитудным значением помехи, действующей в цепи сетки, в цепь МАРУ после детектора включают усилитель (рис. 32, б). Обычно в качестве усилителя применяют ка-

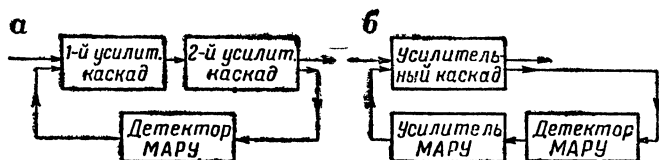


Рис. 32. Способы подачи добавочного смещения

тодный повторитель с положительной обратной связью, обеспечивающей более устойчивую работу схемы.

Чтобы схема МАРУ не создавала добавочного смещения при малых напряжениях помех, часто предусматривают задержку их действия путем подачи напряжения задержки — E_a .

Таким образом, схемы МАРУ могут быть простые, задержанные и усиленно-задержанные.

Если для устранения перегрузки в приемнике регулирования одного каскада недостаточно, то применяют МАРУ в двух и более последовательно включенных каскадах УПЧ

(рис. 33). В этом случае при сравнительно небольших помехах включается МАРУ третьего регулируемого каскада, При увеличении амплитуды помех дополнительно включается МАРУ второго, а затем и первого регулируемого каскада.

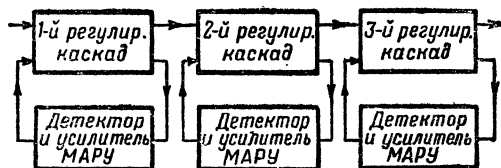


Рис. 33. Три каскада УПЧ с самостоятельными цепями добавочного смещения

На рис. 34 представлена наиболее распространенная схема МАРУ. Лампа Π_1 с нагрузкой R_2 представляет собой детектор, а лампа Π_2 с катодным сопротивлением R_k — катодный повторитель схемы МАРУ. На анод лампы Π_2 подается напряжение 150 в, под действием которого протекает анодный ток по цепи: Π_2 , R_k , R_1 , корпус. Между корпусом и катодом действует напряжение 105 в от постороннего источника. В результате действия двух напряжений катод лампы Π_2 находится почти под потенциалом корпуса ($\pm 0,7$ в). При этом на управляющую сетку лампы Π_2 с делителя напряжения R_2 , R_3 , подключенного к источнику — 105 в, через сопротивление R_1 подается напряжение смещения — 2 в. Это же напряжение является напряжением задержки, предотвращающим работу схемы МАРУ при поступлении на вход приемника слабых сигналов.

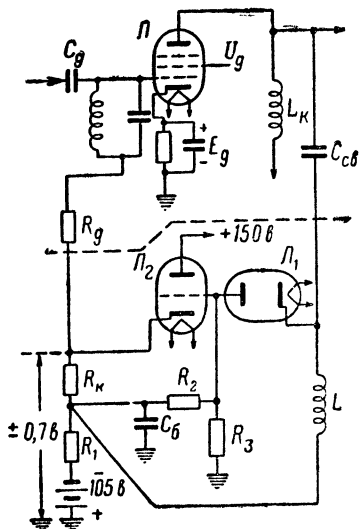


Рис. 34. Схема МАРУ с детектором и усилителем

Напряжение промежуточной частоты с анода УПЧ (лампа Π) подается как на сетку следующего каскада, так и на

схему МАРУ по цепи: анод лампы L , $C_{св}$, L , C_6 , корпус, катод лампы L . Сопротивление $R_2 = 1,3 \text{ Мом}$ предохраняет сетку катодного повторителя от воздействия напряжения промежуточной частоты. Если на вход УПЧ поступают слабые сигналы, то на катушке индуктивности L создается напряжение, недостаточное для отпириания диода L_1 , и схема МАРУ не работает. На управляющую сетку УПЧ при этом действует начальное смещение — $E_g \pm 0,7 \text{ в}$. При более сильных сигналах на катушке индуктивности L создается напряжение, достаточное для отпириания диода, и на его нагрузке создается выпрямленное напряжение, увеличивающее отрицательное напряжение смещения на сетке лампы L_2 . В результате анодный ток этой лампы уменьшается, равенство напряжений, действующих между ее корпусом и катодом, нарушается, катод по отношению к корпусу становится более отрицательным, и на сетку УПЧ подается добавочное регулирующее смещение.

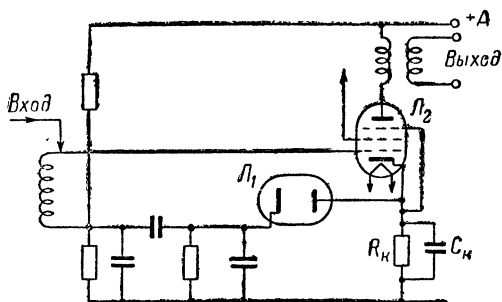


Рис. 35. Схема МАРУ за счет обратной связи через сопротивление в цепи катода

При поступлении помехи большой мощности отрицательное напряжение на катоде лампы L_2 резко увеличивается и, действуя на управляющую сетку УПЧ через сопротивление R_g , уменьшает усиление каскада пропорционально напряжению помехи. Сопротивление R_g и конденсатор связи C_g вместе с емкостью монтажа и внутриламповой емкостью увеличивают постоянную времени цепи до необходимой величины (до 30 мксек).

Для подавления импульсно-модулированных помех, превышающих длительность импульса, положительные результаты дает схема, представленная на рис. 35. Напряжение обратной связи снимается с сопротивления R_k УПЧ. Постоянная времени $\tau = R_k C_k$ подобрана так, что цепь $R_k C_k$

оказывает малое сопротивление для кратковременных (полезных) сигналов и большое — для длительных сигналов (помех). Поэтому при действии помехи с сопротивления R_k подается дополнительное смещение на управляющую сетку УПЧ, предохраняя его от перегрузки. Диод L_1 прекращает действие обратной связи через 30—50 мксек после начала действия помехи, предохраняя приемник от понижения чувствительности в дальнейшем.

Автоматическая регулировка усиления во времени

Схемы АРУ можно использовать для борьбы с монотонно убывающими помехами, которые вначале имеют большую, а затем постепенно убывающую амплитуду. Такие помехи возникают, например, вследствие отражения импульсов от морской, а иногда и земной поверхности. Известно, что при постоянстве излучаемой энергии величина принимаемой энергии, отраженной от цели, обратно пропорциональна четвертой степени расстояния. Это значит, что от цели, находящейся на расстоянии 15 км от приемника, принимается в 625 раз больше энергии, чем от цели, удаленной на расстояние 75 км, и в 10 000 раз больше, чем от цели, находящейся на расстоянии 150 км. Поэтому по мере распространения импульса вдоль морской поверхности вначале поступают отраженные от нее мощные импульсы, создавая большие помехи, а затем амплитуда помех постепенно убывает.

Как будут наблюдаться импульсы, отраженные от целей, находящихся на различных расстояниях от станции, при наличии отражения от морской поверхности?

Если усиление приемника установлено достаточно большим для наблюдения удаленных целей, то для ближних целей, находящихся в районе отражений от морской поверхности, приемник окажется значительно перегруженным, в результате чего разделение сигналов станет невозможным. Если усиление приемника отрегулировано для наблюдения целей, находящихся в зоне отражения от морской поверхности, то отдаленные цели могут вообще быть неразличимы.

Чтобы устранить указанные недостатки, применяют схемы автоматической регулировки усиления во времени (РУВ). Обычно схемы РУВ регулируют усиление приемника так, что цели с одинаковой эффективной поверхностью на экране трубки кругового обзора изображаются с одной и той же интенсивностью независимо от расстояния.

жается до напряжения E_c (рис. 37, а) или E'_c (рис. 37, б). Величина напряжения E_c или E'_c зависит от положения движка сопротивления R_1 . При этом на управляющую сетку лампы L_2 подается отрицательное напряжение смещения, которое в зависимости от положения движка сопротивления R_1 может полностью или частично запереть лампу L_2 . Анодный ток через лампу L_2 , а значит, и через сопротивление R_k уменьшается (до нуля), с сопротивлений R_k и R_7 на сетки регулируемых ламп подается большее отрицательное напряжение смещения, резко уменьшая их коэффициент усиления до величины, достаточной для приема относительно сильных импульсов, отраженных от близких целей.

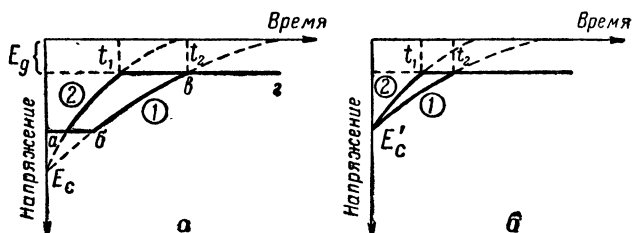


Рис. 37. Графики, иллюстрирующие работу схемы РУВ

Затем конденсатор C начинает разряжаться через сопротивление $R_4 + R_6$, отрицательное напряжение на управляющей сетке L_2 уменьшается по экспоненциальному закону. Однако если напряжение E_c велико и лампа L_2 работает с отсечкой анодного тока, то кривая регулирующего напряжения до отпирания лампы L_2 имеет плоскую часть ab (рис. 37, а), длина которой зависит от установки R_1 , а также от постоянной времени восстановления.

При достижении E_c напряжения отсечки и дальнейшем уменьшении отрицательного напряжения на сетке лампы L_2 ток через лампу L_2 возрастет, отрицательное регулирующее напряжение, снимаемое с сопротивлений R_k и R_7 , уменьшается по экспоненциальному закону (кривая 1, участок $бв$) до E_g (участок $вг$), постепенно увеличивая коэффициент усиления регулируемых ламп до нормального значения.

Чтобы изменить время восстановления нормального усиления, параллельно сопротивлению R_4 (см. рис. 36) подключается сопротивление R_3 , при этом сопротивление раз-

рядной цепи уменьшается, конденсатор C разряжается быстрее (рис. 37, кривая 2), время восстановления нормального усиления уменьшается.

Если величину сопротивления R_1 установить так, что напряжение на конденсаторе C не будет достигать напряжения отсечки, то восстановление нормального усиления начнется сразу после прекращения запускающего импульса (рис. 37, б).

АРУ или РРУ?

Итак, мы выяснили, что в приемниках могут быть применены ручная и автоматическая регулировки усиления. Исключают ли они одна другую и какая из них предпочтительнее?

Автоматическая регулировка усиления лучше защищает приемник от перегрузки. Без нее невозможно обойтись, если радиолокационная станция имеет, например, систему автоматического сопровождения цели. АРУ поддерживает напряжение на выходе приемника постоянным, но не позволяет оператору регулировать по мере надобности величину выходного напряжения. А это бывает необходимо почти в каждом приемнике. Поэтому, кроме АРУ, каждый приемник имеет ручную регулировку усиления. Если у приемника нет АРУ, то ручную регулировку предусматривают в каскадах ближе к входу приемника, чтобы предотвратить его перегрузку. В приемнике с АРУ нет смысла делать ручную регулировку на входе приемника (до АРУ), так как изменение сигнала, вносимое ручной регулировкой, будет в известной степени компенсироваться автоматической регулировкой и работа ручной регулировки будет неэффективна. В этом случае РРУ делают в детекторном каскаде или в последних каскадах промежуточной частоты, а иногда и в каскадах видеочастоты.

Обычно РРУ и АРУ работают совместно. С помощью РРУ устанавливается необходимая величина выходного напряжения, а автоматическая регулировка поддерживает это напряжение в процессе работы постоянным, значительно облегчая труд оператора и улучшая работу всей станции.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ

Причины, нарушающие стабильность частоты

В радиолокационных станциях обычно используются приемники супергетеродинного типа. Отличительной особенностью супергетеродинов является преобразование сверхвысокой частоты принятого отраженного сигнала в более низкую, так называемую промежуточную частоту, на которой ламповые усилители приемника работают вполне удовлетворительно.

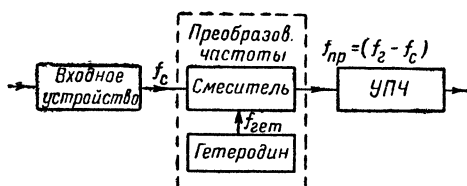


Рис. 38. Принцип получения промежуточной частоты

Промежуточная частота в приемнике получается в результате работы преобразователя частоты (рис. 38). На вход смесителя подаются два напряжения различной частоты: частоты принятого сигнала (f_c) и частоты гетеродина ($f_{гет}$). (Для радиолокационного приемника, принимающего отраженные сигналы своего передатчика, частота сигнала равна частоте передатчика, например, магнетрона: $f_c = f_{пер} = f_{м.}$) В результате совместного действия двух напряжений и детектирования полученных биений на выходе смесителя образуется напряжение промежуточной частоты.

Если частота передатчика больше частоты гетеродина,

то промежуточная частота равна разности между частотой сигнала и частотой гетеродина:

$$f_{\text{пр}} = f_{\text{с}} - f_{\text{г}}.$$

Если же частота гетеродина больше частоты передатчика, то промежуточная частота равна разности между частотой гетеродина и частотой сигнала:

$$f_{\text{пр}} = f_{\text{г}} - f_{\text{с}}.$$

Основное усиление в приемнике осуществляется на промежуточной частоте. Контуры каскадов УПЧ настраиваются в резонанс на промежуточную частоту и в процессе эксплуатации не перестраиваются. Следовательно, весь усилитель промежуточной частоты работает с максимальным усилением только тогда, когда на его вход подается напряжение, частота которого $f_{\text{пр}}$ строго совпадает с частотой настройки контуров $f_{\text{пр0}}$. Но промежуточная частота $f_{\text{пр}}$ может иметь постоянную величину только в том случае, если генератор в передатчике, а гетеродин в приемнике дают стабильные, т. е. не изменяющиеся во времени, частоты. Достаточно одной из них по каким-либо причинам измениться, как изменится их разность ($f_{\text{пр}} = f_{\text{с}} - f_{\text{г}}$), и промежуточная, или иногда ее будем называть разностная, частота не будет совпадать с частотой настройки контуров. В результате усилитель промежуточной частоты, весь приемник, а значит, и его рабочие каналы (нагрузки) будут работать неудовлетворительно.

Основные причины нарушения стабильности частоты генератора в передатчике и гетеродина в приемнике следующие:

- частота генератора и гетеродина может в значительной степени изменяться при изменении величин питающих напряжений, температуры, давления (на самолетах), влажности и т. д.;

- частота колебаний, генерируемых магнетроном 10-сантиметрового диапазона, из-за разогрева самого магнетрона, ламп и деталей в первые минуты включения изменяется приблизительно на 3 Мгц, в то же время частота колебаний гетеродина во время разогрева может изменяться на 5 Мгц и более;

- частота колебаний передатчика может существенно изменяться в результате изменения его нагрузки, которое происходит, например, при вращении антенны (вследствие асимметрии во вращающихся соединениях фидерной системы и т. п.).

Необходимость автоматической подстройки частоты

Чтобы сохранить наиболее выгодные условия приема и поддержать постоянным значение промежуточной частоты, необходимо по мере отклонения частоты от установленной подстраивать или регулировать ее так, чтобы разность частот (например, $f_0 - f_r$) не изменялась. Принципиально подстройка частоты возможна за счет изменения частоты генератора f_0 или частоты гетеродина f_r . Но по конструктивным и эксплуатационным соображениям частоту обычно подстраивают, автоматически воздействуя на гетеродин, работающий в условиях отдачи малой мощности.

Необходимость автоматической (АПЧ), а не ручной подстройки частоты вызывается следующими обстоятельствами.

При длительной работе станции напряжение источников питания, температура в отдельных блоках, влажность, атмосферное давление и т. д. непрерывно изменяются, вызывая «уход» частоты передатчика и гетеродина. Оператор, наблюдающий за работой станции, не может немедленно по отраженным сигналам заметить даже сильные отклонения частоты и своевременно вручную подстроить ее.

При нестабильности частоты передатчика из-за изменения его нагрузки (при вращении антенны) ручная подстройка частоты оказывается слишком медленной по сравнению со скоростью вращения антенны и поэтому неэффективной.

Автоматическая подстройка является необходимым элементом в приемниках тех станций, в которых для борьбы с помехами предусмотрена работа на нескольких фиксированных частотах, так как при переходе с одной частоты на другую может иметь место неточность механической установки настраиваемых элементов.

АПЧ гетеродина обычно предусматривается в приемниках, предназначенных для приема сигналов маяка, так как за короткое время действия сигнала в этом случае ручная подстройка невозможна, а приемник должен быть постоянно готов к работе.

Следует отметить, что автоматическая подстройка частоты преимущественно применяется в радиолокационных приемниках сантиметрового диапазона (от 3 000 до 24 000 Мгц). Это обусловлено двумя причинами:

— на частотах ниже 3 000 Мгц влияние вращения антенны на частоту триодных передатчиков сравнительно невелико;

— на частотах ниже 3 000 Мгц допустим большой относительный уход частоты передатчика и гетеродина, так как отношение полосы пропускания приемника к частоте сигнала обычно больше, чем на частотах выше 3 000 Мгц.

Поэтому схемы АПЧ и их элементы в дальнейшем рассматриваются применительно к радиолокационным станциям сантиметрового диапазона.

Принцип действия АПЧ

Схемы АПЧ — это схемы автоматического регулирования. С одной из таких схем мы уже познакомились при рассмотрении автоматической регулировки усиления. Принцип действия любой схемы автоматического регулирования заключается в обратном воздействии последующего элемента на один из предыдущих.

В приемниках с АПЧ обратное воздействие осуществляется с одного из каскадов УПЧ на гетеродин через специальную схему АПЧ (рис. 39). Задача схемы АПЧ — поддерживать постоянство установленного значения промежуточной частоты в приемнике. Для выполнения этой задачи схема АПЧ имеет в своем составе чувствительный элемент, подключаемый к одному из каскадов промежуточной частоты. Чувствительный элемент должен «чувствовать» (различать) любое отклонение промежуточной частоты от заданного значения и создавать на своей нагрузке напряже-

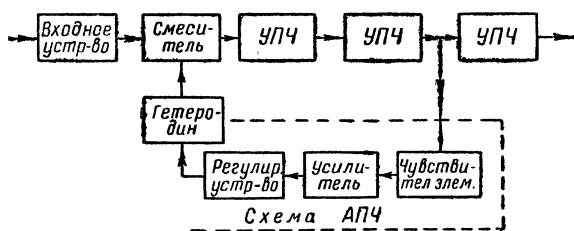


Рис. 39. Блок-схема высокочастотных каскадов приемника с АПЧ

ние рассогласования, величина и полярность которого зависят от величины и знака отклонения промежуточной частоты. Это напряжение обычно усиливается усилителем канала АПЧ и подается на регулирующее устройство (иногда его называют управляющим устройством). В последнем происходит преобразование усиленного напряжения в регу-

лирующее, величина и форма которого удобны для воздействия на исполнительный элемент (гетеродин) схемы. Под действием регулирующего напряжения частота гетеродина изменяется так, что разность $f_0 - f_T$ сохраняет постоянное значение $f_{пр}$ независимо от отклонений частоты магнетрона или частоты гетеродина.

Схема АПЧ должна все время следить за изменениями промежуточной частоты и своевременно устранять любые ее отклонения. Для этого схема должна быть безынерционной, т. е. ее составные элементы должны быть электронными. Обычно в качестве чувствительного элемента применяется дискриминатор (различитель), в качестве исполнительного элемента используется отражательный клистрон, а схемы регулирующих и усилительных устройств могут быть различными и будут рассмотрены нами ниже.

Классификация схем АПЧ

Схемы автоматической подстройки частоты разнообразны. Особенно широкое распространение они получили в связи с развитием радиолокационной техники сантиметрового диапазона.

По своему назначению схемы АПЧ делятся на два вида: разностной частоты и абсолютной частоты. В схемах разностной частоты поддерживается постоянная разность частот $f_0 - f_T$. Эти схемы имеют наибольшее распространение и делятся в свою очередь на одноканальные и двухканальные.

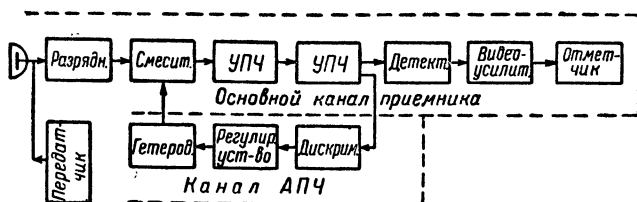


Рис. 40. Блок-схема приемника с одноканальной схемой АПЧ

Одноканальная схема АПЧ, или схема с совмещенными каналами, представлена на рис. 40. В ней для автоматической подстройки частоты используется мощность просачивающихся через разрядник приемника зондирующих импульсов магнетрона. Напряжение, созданное этими импульсами,

с одного из каскадов УПЧ подается на дискриминатор АПЧ и используется в дальнейшем для регулирования.

Двухканальная схема АПЧ, или схема с отдельными каналами, приведена на рис. 41. В этой схеме для АПЧ используется небольшая часть мощности зондирующих импульсов, подаваемая непосредственно от передатчика через делитель мощности. Эта схема имеет отдельный смеситель и усилитель для канала АПЧ. В остальном ее устройство и работа аналогичны устройству и работе одноканальной схемы АПЧ. Более совершенными являются двухканальные схемы, поэтому они нашли наибольшее распространение.

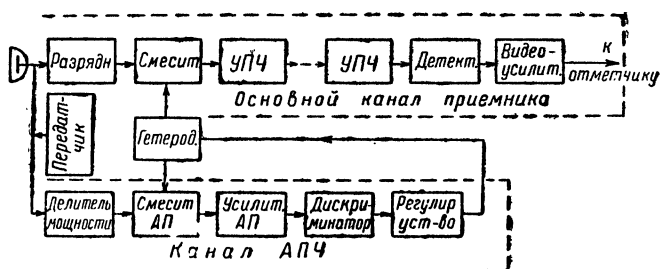


Рис. 41. Блок-схема приемника с двухканальной схемой АПЧ

В схемах абсолютной частоты настройка приемника автоматически поддерживается на одной частоте независимо от несущей частоты принимаемых сигналов. Эти схемы предъявляют жесткие требования к постоянству частот передатчика и приемника. Применяются они там, где по условиям работы нет времени даже для автоматической подстройки частоты (например, в приемниках, предназначенных для приема сигналов маяков), так как все устройства в рабочих каналах должны сработать от первого полученного сигнала.

По типу регулирующего устройства схемы АПЧ делятся на электронные, электромеханические и термические.

В электронных схемах в качестве регулирующего устройства используются усилители постоянного тока, тиратронные схемы и схемы на вакуумных лампах.

В электромеханических схемах в качестве регулирующего устройства применяются маломощные электродвигатели или реле, механически изменяющие частоту гетеродина на необходимую величину.

В схемах АПЧ с термической настройкой изменение частоты гетеродина осуществляется под влиянием изменения температуры.

По характеру работы схемы АПЧ делятся на поисковые и беспойсковые.

Поисковые схемы обеспечивают подстройку частоты при ее быстрых и значительных отклонениях. Если, например, отклонение частоты передатчика происходит со скоростью, превышающей скорость срабатывания регулирующего устройства, то прием будет временно прекращен. Регулирующая схема при этом периодически изменяет частоту гетеродина в широких пределах (режим поиска) до тех пор, пока не настроит гетеродин вновь на прием сигналов своего передатчика.

Беспойсковые схемы характеризуются тем, что если скорость ухода частоты передатчика или гетеродина меньше скорости срабатывания регулирующего устройства АПЧ, то схема обеспечивает подстройку при уходе частоты в широких пределах. Если же скорость ухода частоты больше скорости срабатывания регулирующего устройства, то схема обеспечивает подстройку частоты лишь при уходе последней в относительно узких пределах.

Чувствительные элементы схемы АПЧ

Назначение чувствительного элемента схемы АПЧ — «уловить» отклонение промежуточной частоты от заданного значения и выработать напряжение рассогласования (ошибки), зависящее от величины и знака этого отклонения.

В качестве чувствительных элементов в схемах АПЧ применяют дискриминаторы, которые часто называют различителями или распознавателями.

В приемниках с АПЧ дискриминатор подключается к каскаду, имеющему на выходе напряжение промежуточной частоты (УПЧ). При уменьшении промежуточной частоты $f_{\text{пр}}$ относительно частоты настройки контуров УПЧ дискриминатор создает на своем выходе напряжение одной полярности, при увеличении $f_{\text{пр}}$ — напряжение другой полярности. Величина создаваемого напряжения определяется степенью отклонения промежуточной частоты от заданного значения.

Основные требования к дискриминатору следующие:

— высокая чувствительность, т. е. способность работать при малых напряжениях;

- высокое выходное напряжение;
- малые частотные и нелинейные искажения;
- простота конструкции и надежность в эксплуатации.

По устройству и принципу действия схемы дискриминаторов подразделяют на одноконтурные и двухконтурные. Одноконтурные схемы из-за ряда недостатков (например, наличие частотных и нелинейных искажений) почти не применяются. Двухконтурные дискриминаторы могут быть выполнены с двумя расстроенными или с двумя настроенными контурами (фазовый детектор).

Дискриминатор с двумя расстроенными контурами

В этом случае на лампе Π (рис. 42) собран каскад УПЧ основного канала приемника или канала АПЧ. Нагрузкой каскада служит контур LC , настроенный на промежуточную частоту $f_{пр} = 30$ МГц, которую в дальнейшем будем называть переходной частотой. С этим контуром индуктивно связаны контуры L_1C_1 (I) и L_2C_2 (II), имеющие симметричную расстройку относительно контура LC : если контур L_1C_1 настроен на частоту несколько выше промежуточной частоты $f_{пр}$ (например, $f_1 = 30,5$ МГц), то контур L_2C_2 настроен на частоту несколько ниже промежуточной частоты $f_{пр}$ (например, $f_2 = 29,5$ МГц).

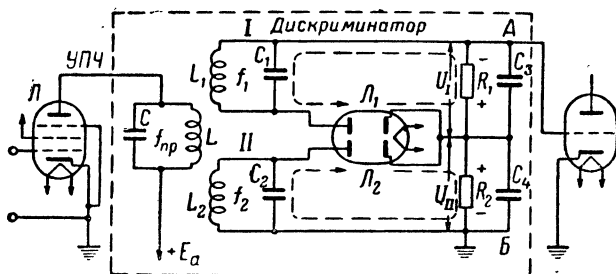


Рис. 42. Дискриминатор с двумя расстроенными контурами

Напряжения с контуров I и II действуют на диодные детекторы Π_1 и Π_2 . Нагрузкой детекторов служат одинаковые сопротивления R_1 и R_2 , параллельно которым подключены блокировочные конденсаторы C_3 и C_4 . Выходные напряжения детекторов, падающие на сопротивлениях R_1 и R_2 , включены встречно, поэтому напряжение рассогласования на выходе

дискриминатора (в точках А и Б) равно разности этих напряжений.

Если магнетрон и гетеродин генерируют колебания, частота которых равна номинальной, то на выходе смесителя создается напряжение промежуточной частоты $f_{пр} = 30 \text{ МГц}$. В этом случае контуры I и II имеют одинаковую расстройку (на $\pm 0,5 \text{ МГц}$, рис. 43, а). Напряжения промежуточной частоты, подаваемые на оба детектора, окажутся одинаковыми, а значит, и постоянные составляющие анодных токов диодов будут равны. На нагрузках детекторов R_1 и R_2 (см. рис. 42) создаются равные падения напряжений ($U_I = U_{II}$). Так как на сетку следующего каскада действует разностное напряжение ($U_I - U_{II}$), то напряжение рассогласования при отсутствии расстройки ($\Delta f = 0$) равно нулю (рис. 43, б, точка 1).

Если частота магнетрона или гетеродина изменилась, то на выходе смесителя может быть разностная частота больше (положительная расстройка $+\Delta f$) или меньше (отрицательная расстройка $-\Delta f$) переходной (30 МГц) частоты.

При увеличении частоты ($f_{пр} + \Delta f$) расстройка I и II контуров будет неодинакова, так как промежуточная ча-

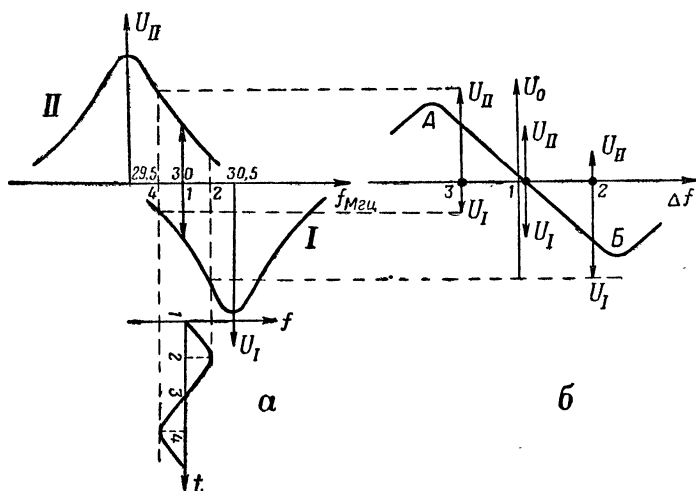


Рис. 43. Графики, иллюстрирующие работу схемы с двумя расстроенными контурами:

а — график, поясняющий работу дискриминатора; б — характеристика дискриминатора

стота будет «приближаться» к резонансу с собственной частотой I контура и «удаляться» от резонанса с собственной частотой II контура. На элементах I контура напряжение увеличится, а на элементах II контура — уменьшится. В результате через диод L_1 пойдет больший ток, чем через диод L_2 , и на сопротивлении R_1 создается большее падение напряжения, чем на сопротивлении R_2 . Выходное напряжение дискриминатора станет отрицательным и по мере увеличения расстройки Δf будет возрастать (рис. 43, точка 2).

При отрицательной расстройке промежуточной частоты ($f_{\text{пр}}$ меньше 30 МГц) увеличивается напряжение на II контуре и уменьшается на I. Следовательно, на сопротивлении R_2 напряжение увеличивается, а на сопротивлении R_1 — уменьшается. Напряжение рассогласования на выходе дискриминатора по мере увеличения расстройки возрастает, а его полярность будет положительной (рис. 43, точка 3).

Из сказанного следует, что величина и знак напряжения рассогласования обусловлены величиной и знаком отклонения промежуточной частоты от переходной, т. е. от частоты настройки контуров УПЧ.

График, показывающий зависимость напряжения на выходе дискриминатора от отклонения промежуточной частоты, называют характеристикой дискриминатора (рис. 43, б). На участке AB характеристика прямолинейна (рабочий участок). При больших отклонениях частоты от переходной характеристика имеет падающие искривленные участки. Их появление объясняется уменьшением напряжения на контурах вследствие значительного ухода промежуточной частоты от резонансной.

Схема АПЧ работает тем лучше, чем большее регулирующее напряжение создает дискриминатор при отклонении разностной частоты от переходной на небольшую величину. Значит, чем круче характеристика дискриминатора, тем лучше. Исходя из этого, каждый дискриминатор оценивают крутизной его частотной характеристики:

$$S_{\pi} = \frac{U_0}{\Delta f} \left[\frac{a}{\text{МГц}} \right],$$

Вариант схемы дискриминатора с двумя расстроенными контурами представлен на рис. 44. Конденсаторы C_2 и C_3 вместе с индуктивностью L составляют два последовательных контура. Величины емкостей C_2 и C_3 разные. Этим определяется различие собственных резонансных частот конту-

ров от переходной частоты. Сопротивление R_3 — нагрузка для верхнего, а R_4 — для нижнего диодов. Величины R_1 и R_2 подбираются так, чтобы получить необходимую полосу пропускания. Катоды диодов соединяются с сопротивлением нагрузки дискриминатора R_5 . Напряжения на сопротивлениях R_3 и R_4 так же, как и в предыдущем случае, включаются навстречу друг другу, и их разностная величина выделяется на сопротивлении R_5 .

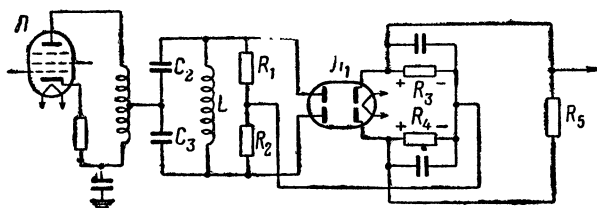


Рис. 44. Вариант схемы дискриминатора с двумя расстроенными контурами

Если промежуточная частота равна переходной, то оба контура имеют одинаковую расстройку. На аноды диодов действуют одинаковые напряжения, давая равные выпрямленные токи. Напряжения на сопротивлениях R_3 и R_4 взаимно компенсируются, и напряжение рассогласования равно нулю. Для частот выше или ниже переходной на сопротивлении R_5 создается результирующее напряжение в соответствии с характеристикой дискриминатора, которая аналогична характеристике, представленной на рис. 43, б.

Дискриминаторы с двумя расстроенными контурами, обладая хорошими показателями в работе, сложны в изготовлении и наладивании: три контура приходится настраивать на различные частоты. Несимметричная расстройка I и II контуров приводит к появлению напряжения ошибки на переходной частоте, а значит, к неточной работе схемы АПЧ и к искажениям. Более удобен в эксплуатации дискриминатор с двумя настроенными контурами.

Дискриминатор с двумя настроенными контурами

Принципиальная схема дискриминатора с двумя настроенными контурами представлена на рис. 45. В ней имеются два контура, настроенных на промежуточную частоту. Первый контур L_1C_1 служит нагрузкой последнего каскада УПЧ. Второй контур L_2C_2 связан с первым двумя

видами связи: индуктивно (связь между L_1 и L_2) и емкостно (через конденсатор большой емкости C_0). Как и в предыдущих схемах, детектор собран на двойном диоде 6Х6С. Его нагрузкой являются два последовательно включенных и равных по величине сопротивления R_1 и R_2 . Эти сопротивления по промежуточной частоте заблокированы конденсаторами C_3 и C_4 . Дроссель $L_{др}$ препятствует замыканию токов промежуточной частоты, помимо диодов, и в то же время образует замкнутую цепь для выпрямленных токов.

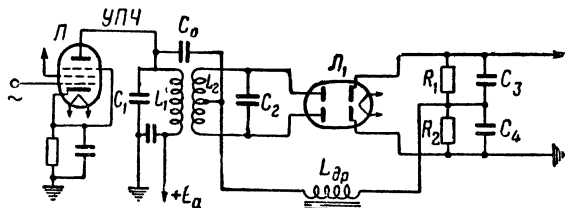


Рис. 45. Дискриминатор с двумя настроенными контурами

Обычно направление витков катушек выбирают таким, чтобы э.д.с. взаимной индукции второго контура E_2 совпадала по фазе с напряжением U_1 , создаваемым на первом контуре

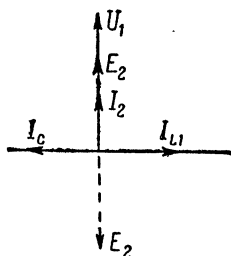


Рис. 46. Векторная диаграмма, поясняющая работу индуктивно связанной цепи

(рис. 46). При работе приемника на нагрузке УПЧ создается напряжение промежуточной частоты U_1 . Под влиянием этого напряжения в контуре протекает переменный ток: в индуктивной ветви он отстает от приложенного напряжения на 90° , а в емкостной — опережает его на ту же величину. Ток I_{L1} , протекая через катушку L_1 , создает переменный магнитный поток, который наводит в катушке L_2 э.д.с. взаимной индукции E_2 . Эта э.д.с. в зависимости от направления витков может опережать вызвавший ее ток I_{L1} или отставать (пунктир) от него на 90° .

Вследствие двойной связи первого и второго контуров на аноды диодов детектора одновременно действуют два напряжения:

- через емкостную связь — переменное напряжение U_1 , снимаемое с первого контура;
- через индуктивную связь — напряжение $\frac{U_2}{2}$.

Появление напряжения $\frac{U_2}{2}$ можно объяснить так. Э.д.с. взаимной индукции E_2 вызывает ток I_2 во втором контуре. Благодаря резонансу напряжений этот ток достигает большой величины и, протекая по элементам контура, создает на конденсаторе C_2 и на катушке индуктивности L_2 значительное падение напряжения U_2 . Средняя точка катушки L_2 делит напряжение U_2 на два равных напряжения $\frac{U_2}{2}$. Эта точка через контур L_1C_1 соединена с корпусом, а значит, и с катодами обоих диодов. Половины напряжения U_2 , снимаемые с верхней и нижней половин катушки L_2 , приложены к анодам верхнего и нижнего диодов. Если в данный момент к верхнему диоду приложено положительное напряжение $+\frac{U_2}{2}$, то к нижнему диоду приложено отрицательное напряжение $-\frac{U_2}{2}$ (рис. 47).

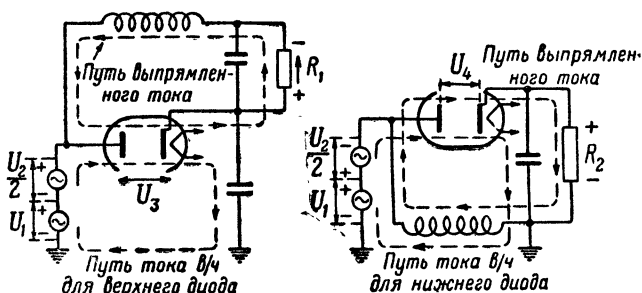


Рис. 47. Токпрохождение в цепях дискриминатора

Результирующее напряжение на анодах диодов определяется суммой составляющих:

$$\begin{aligned}\bar{U}_3 &= \bar{U}_1 + \frac{\bar{U}_2}{2}, \\ \bar{U}_4 &= \bar{U}_1 - \frac{\bar{U}_2}{2}.\end{aligned}$$

Так как напряжения U_1 и U_2 не совпадают по фазе, то складывать их следует геометрически.

Рассмотрим, как получается напряжение расогласования на выходе этого дискриминатора для трех случаев:

- расстройка отсутствует ($\Delta f_{\text{пр}} = 0$);
- расстройка положительная ($\Delta f_{\text{пр}} > 0$);
- расстройка отрицательная ($\Delta f_{\text{пр}} < 0$).

Если расстройки нет, то разность между частотами сигнала и гетеродина равна частоте настройки контуров и оба контура дискриминатора настроены в резонанс. Сопротивление второго контура имеет активный характер. Поэтому ток I_2 совпадает по фазе с э.д.с. взаимной индукции E_2 (рис. 48, а).

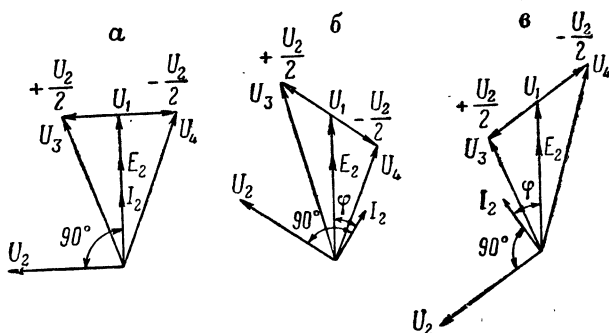


Рис. 48. Векторные диаграммы напряжений дискриминатора:

а — расстройка отсутствует; б — расстройка положительная;
в — расстройка отрицательная

Этот ток, протекая через катушку индуктивности L_2 , создает на ее зажимах напряжение U_2 , опережающее по фазе ток I_2 на 90° . Разделив вектор U_2 пополам и сложив геометрически векторы $+\frac{U_2}{2}$ и $-\frac{U_2}{2}$ с вектором U_1 , созданным на первом контуре, получим равные результирующие напряжения

U_3 и U_4 , приложенные к анодам диодов. Следовательно, через сопротивления нагрузки R_1 и R_2 будут протекать равные токи, создающие на них равные, компенсирующие друг друга напряжения. Выходное напряжение дискриминатора при отсутствии расстройки окажется равным нулю.

При положительной расстройке, когда $f_{\text{разн}} = f_{\text{пр}} + \Delta f$, второй контур имеет сопротивление индуктивного характера. Поэтому э.д.с. взаимной индукции E_2 , совпадающая по фазе с напряжением U_1 , вызывает во втором контуре ток I_2 , отстающий по фазе от E_2 на угол φ . Этот ток, протекая по катушке L_2 , создаст на ней напряжение U_2 , опережающее

по фазе I_2 на 90° (рис. 48, б). Сложив геометрически векторы $+\frac{U_2}{2}$ и $-\frac{U_2}{2}$ с вектором U_1 , убедимся, что к анодам диодов приложены неравные напряжения ($U_3 > U_4$). Значит, выпрямленный ток на сопротивлении R_1 создаст большее напряжение, чем на R_2 . На выходе дискриминатора результирующее напряжение будет отрицательным.

Аналогично рассуждая, можно показать, что при отрицательной расстройке, когда $f_{\text{разн}} = f_{\text{пр}} - \Delta f$, на выходе дискриминатора результирующее напряжение будет положительным (рис. 48, в).

Характеристика дискриминатора с двумя настроенными контурами подобна характеристике, изображенной на рис. 43, б.

При подсчете постоянной времени выходной цепи этого дискриминатора следует иметь в виду, что конденсатор C_0 подключен параллельно конденсатору C_4 , и потому емкость C_4 должна быть меньше емкости C_3 на величину C_0 .

Постоянная времени выходной цепи дискриминатора

Выходная цепь дискриминатора (C_3R_1 и C_4R_2 на рис. 45) может иметь большую или малую постоянную времени в зависимости от скорости, с которой необходимо подстраивать частоту.

Если при работе станции не ожидается быстрых и резких изменений частоты и подстройку можно вести медленно, то выходная цепь дискриминатора имеет большую постоянную времени, превышающую интервал между импульсами. В этом случае выходное напряжение будет почти «постоянным», причем уровень постоянного напряжения зависит от изменения промежуточной частоты. Характеристика такого дискриминатора представлена на рис. 49, а.

Если при работе станции ожидаются быстрые изменения частоты, например, вследствие нарушения согласования в фидерной линии, идущей от передатчика к антенне (при вращении антенны), где частота может изменяться от импульса к импульсу в течение малой доли секунды, то выходная цепь дискриминатора должна иметь очень малую постоянную времени по сравнению с интервалами между импульсами. В этом случае выходное напряжение дискриминатора должно действовать только в интервалах между

зондирующими импульсами. Так как постоянная времени τ мала, то дискриминатор вырабатывает регулирующий импульс для каждого импульса передатчика, причем амплитуда и знак регулирующего импульса зависят от величины и на-

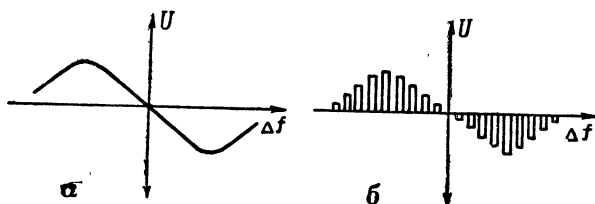


Рис. 49. Характеристика дискриминатора:
а — с большой постоянной времени выходной цепи; б — с малой постоянной времени выходной цепи

правления отклонения промежуточной частоты (рис. 49, б). Получаемая в результате огибающая импульсов на выходе дискриминатора подобна рассмотренным выше статическим характеристикам.

Отражательный клистрон

Исполнительным элементом схемы АПЧ, т. е. элементом, поддерживающим постоянную разность частот $f_c - f_r = f_{пр}$ в приемнике, служит гетеродин. В приемниках сантиметрового диапазона в качестве гетеродина используется отражательный клистрон.

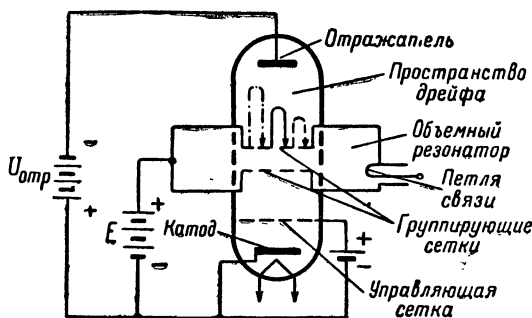


Рис. 50. Схема включения отражательного клистрона

Подогревный катод клистрона (рис. 50) является источником электронов, ускоряемых положительным напряжением 100—300 в, приложенным между объемным резонатором и катодом. Управляющая сетка между катодом и

объемным резонатором регулирует число электронов, пролетающих через резонатор. Отражатель имеет относительно катода отрицательный потенциал более -100 в, поэтому общая разность потенциалов между отражателем и объемным резонатором может быть до 200 в и более.

Вследствие отрицательного потенциала отражателя электроны, пролетев сетку резонатора, замедляют свое движение, останавливаются, не достигнув отражателя, и затем возвращаются обратно. В пространстве дрейфа электроны группируются в плотные группы и отдают резонатору свою энергию на поддержание колебаний.

Частота колебаний, генерируемых отражательным клистроном, зависит от напряжений на отражателе. Если отрицательное напряжение на отражателе увеличивать, то электроны в пространстве дрейфа пролетают меньшие расстояния, время возвращения их к сеткам резонатора уменьшается, частота колебаний увеличивается. Если отрицательное напряжение на отражателе уменьшать, то электроны пролетают в пространстве дрейфа большие расстояния, время возвращения их в область резонатора увеличивается, частота колебаний, генерируемых клистроном, уменьшается. Изменение частоты при изменении напряжения $U_{отр}$ клистрона графически представлено на отражателе рис. 51.

Величина

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{+\Delta f}{-U_{отр}} = -S_p \left[\frac{\text{Мгц}}{\text{в}} \right]$$

называется характеристикой регулирующего устройства; S_p показывает, на какую величину изменится частота гетеродина (отражательного клистрона), если напряжение на его отражателе изменится на 1 в; чем больше S_p , тем «чувствительнее» схема АПЧ. Знак минус перед S_p показывает, что крутизна характеристики регулирующего устройства имеет обратный знак по отношению к крутизне характеристики дискриминатора S_d .

Следовательно, чтобы изменять частоту колебаний, ге-

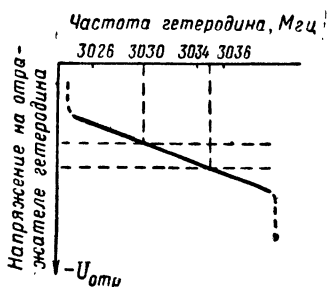


Рис. 51. Частотная характеристика клистрона

нерируемых клистроном, необходимо тем или иным способом изменять напряжение на его отражателе.

Если отражательный клистрон работает с постоянным напряжением на резонаторе и фиксированной напрузкой, то, изменяя напряжение на отражателе и измеряя мощность на выходе и рабочие частоты, можно получить ряд кривых, представленных на рис. 52 (сплошная линия — для мощности и пунктир — для частоты). Из рис. 52 видно, что имеются такие области напряжения на отражателе, в которых лампа совсем не генерирует. В отличие от них области, в которых лампа работает, называют областями генерации (возбуждения).

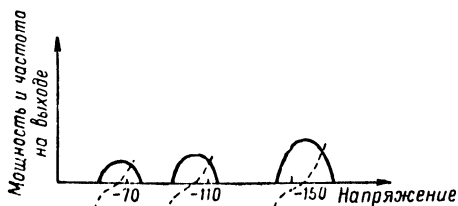


Рис. 52. Области генерации отражательного клистрона

Из приведенных кривых выводят несколько важных для работы схемы АПЧ параметров.

Первый из них — ширина области генерации между точками, соответствующими половине мощности. Этот параметр указывает полосу частот между точками данной области генерации, в которых мощность на выходе падает до половины максимальной. Он обычно принимается за меру диапазона частот, на протяжении которого лампа дает достаточную мощность на выходе при наличии электронной настройки.

Второй параметр — коэффициент электронной настройки. Он представляет собой наклон кривой зависимости частоты от напряжения на отражателе и выражается в мегагерцах на вольт.

Третий параметр — ширина области между нулевыми точками. Этот параметр играет большую роль при работе схемы АПЧ, так как определяет, может или не может приемник настраиваться на неправильные боковые полосы, и вследствие этого ограничивает диапазон изменения напряжения на отражателе, особенно при работе в режиме поиска.

Принципиально напряжение рассогласования, выработанное дискриминатором, можно подать непосредственно на отражательный электрод клистрона. Однако для изменения частоты отражательного клистрона 10-см диапазона, например, на 1 Мгц, необходимо напряжение 2—5 в, а для клистрона 3-см диапазона — около 1 в. Получить такое напряжение непосредственно на выходе дискриминатора обычно не удастся, поэтому между дискриминатором (с большой постоянной времени выходной цепи) и гетеродином включают усилитель постоянного тока.

В схемах с малой постоянной времени выходной цепи дискриминатора непосредственное действие отдельных импульсов на отражатель клистрона вызвало бы вообще неустойчивую работу приемника: после каждого импульса передатчика клистрон быстро изменял бы свою частоту, создавая на выходе дискриминатора увеличивающиеся импульсы рассогласования и расстраивая все больше и больше приемник. Таким образом, и в этом случае между дискриминатором и отражательным клистроном необходим промежуточный элемент, которым обычно бывает тиратронная схема или схема на вакуумных лампах.

Элементы, находящиеся в схемах АПЧ между дискриминатором (или усилителем видеочастоты после дискриминатора) и отражательным клистроном, обычно называют регулирующими или управляющими устройствами.

Регулирующие устройства схемы АПЧ

Задача регулирующего устройства схемы АПЧ — изменять напряжение на отражателе клистрона в зависимости от напряжения рассогласования, выработанного дискриминатором. Если дискриминатор вырабатывает напряжение рассогласования в зависимости от величины и знака отклонения промежуточной частоты от переходной, то регулирующее устройство изменяет частоту гетеродина так, чтобы промежуточная частота стремилась к переходной, а напряжение рассогласования — к нулю.

Регулирующее устройство в схеме АПЧ должно обеспечить:

- постоянство регулирующего напряжения в интервале между импульсами, излучаемыми передатчиком;
- необходимую скорость автоматической подстройки;

- достаточный диапазон управления частотой;
- невозможность подстройки схемы в ложной точке.

Первое требование становится понятным, если учесть, что большинство радиолокационных станций работает импульсным методом, при котором отраженные сигналы принимаются в интервале между импульсами передатчика. Следовательно, именно в этом интервале для максимального усиления принятого отраженного сигнала необходима автоподстройка.

В схемах АПЧ с малой постоянной времени выходной цепи дискриминатора последний вырабатывает напряжение рассогласования лишь во время излучения передатчиком импульса, а в период между импульсами напряжение рассогласования отсутствует. Поэтому регулирующее устройство должно создавать регулирующее напряжение на отражателе клистрона главным образом не во время излучения импульсов, а в интервалах между ними. Это осуществляется обычно при помощи конденсатора, подключенного параллельно отражателю клистрона.

Чтобы напряжение на конденсаторе не изменялось в больших пределах (за счет глубокого разряда), а промежуточная частота не выходила за пределы полосы пропускания, конденсатор должен иметь достаточно большую емкость.

Подключение конденсатора накладывает ограничения на выполнение второго требования — поддержание необходимой скорости автоподстройки. С одной стороны, регулирующее устройство должно быть быстродействующим, чтобы успеть осуществить подстройку при любой скорости изменения частоты магнетрона, с другой стороны, подключение конденсатора большой емкости параллельно отражателю клистрона требует определенного времени на его заряд или разряд, чем ограничивается скорость изменения регулирующего напряжения, а значит, и скорость автоподстройки.

Для выполнения третьего требования применяются беспойсковые и поисковые схемы АПЧ.

Беспойсковые схемы осуществляют автоподстройку в более или менее широких пределах только в том случае, когда скорость изменения промежуточной частоты сравнительно мала (меньше скорости срабатывания схемы АПЧ). При быстрых же изменениях частоты такая схема осуществляет подстройку лишь в узких пределах, в пределах втягивания. Пример беспойсковой схемы — рассматриваемая ниже схема с усилителем постоянного тока.

Поисковые схемы дают возможность подстраивать частоту при отклонениях, происходящих с большой скоростью и на большую величину. При таких отклонениях частоты регулирующая схема сначала переходит в режим поиска, периодически изменяя частоту гетеродина в широких пределах. Это изменение, осуществляемое путем подачи пилообразного напряжения на отражатель клистрона, продолжается до тех пор, пока гетеродин не настроится на прием сигналов своего передатчика. Затем регулирующая схема переходит в режим слежения, подстраивая гетеродин в небольших пределах в соответствии с отклонением частоты. Пример поисковых схем — рассматриваемые ниже схемы с тиратронами и на вакуумных лампах.

Выполнение четвертого требования — невозможности подстройки схемы в ложной точке — относится главным образом к схемам с широким пределом изменения частоты гетеродина. Промежуточная частота может быть получена не только в том случае, если частота гетеродина выше частоты магнетрона, но и тогда, когда частота гетеродина на ту же величину ниже частоты магнетрона. Если одну из частот гетеродина назвать «правильной» точкой, то другая будет «ложной» точкой. Как мы увидим дальше, в «правильной» точке схема АПЧ дает нормальную подстройку, в «ложной» же точке она расстраивает приемник.

Схема с усилителем постоянного тока

Мы уже отмечали, что в тех станциях, где не ожидается быстрых изменений частоты магнетрона или гетеродина, в качестве регулирующего устройства применяют усилитель постоянного тока, собранный на лампе L_3 (рис. 53).

В этой схеме плюс источника анодного напряжения и катод гетеродина L_4 (отражательный клистрон) соединяются с корпусом. Усилительная лампа L_3 и клистрон L_4 подключаются к делителю напряжения P , R_2 и R_3 так, что анод лампы L_3 имеет положительный потенциал по отношению к своему катоду, а отражатель гетеродина L_4 — отрицательный по отношению к своему катоду. Движком потенциометра P устанавливают такое напряжение, чтобы при отсутствии расстройки частоты напряжение на отражателе гетеродина обеспечивало необходимую промежуточную частоту в приемнике. При работе напряжение рассогласования U_0 , создаваемое дискриминатором, действует на отра-

жатель клистрона через регулирующее устройство — усилитель постоянного тока.

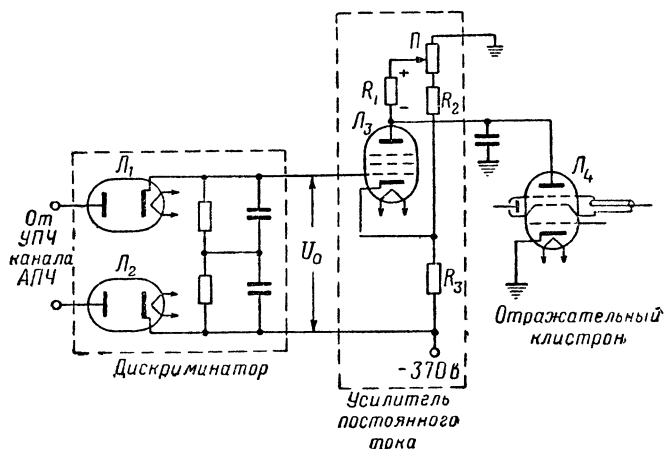


Рис. 53. Схема с усилителем постоянного тока

На рис. 54 изображены характеристики дискриминатора и гетеродина. Физические процессы, происходящие в схеме, легче понять, если совместить характеристики регулирующего устройства и гетеродина на одном графике. При совмещении следует учесть, что усилитель постоянного тока,

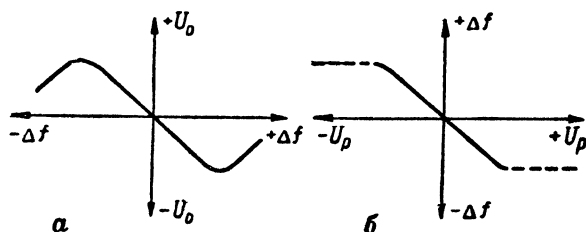


Рис. 54. Частотные характеристики:

- а — дискриминатора (U_0 — напряжение рассогласования);
 б — отражательного клистрона (U_p — регулирующее напряжение)

кроме усиления, «опрокидывает» на 180° фазу напряжения, выработанного дискриминатором. Поэтому характеристика регулирующего устройства (усилителя) будет подобна характеристике дискриминатора и отличаться от нее увеличе-

нием координат в соответствующее число раз и изменением фазы на 180° . Кроме того, оси координат характеристики гетеродина необходимо повернуть так, чтобы каждая из них совпадала с соответствующими осями характеристики регулирующего устройства. Совмещенные характеристики при отсутствии в схеме расстройки представлены на рис. 55.

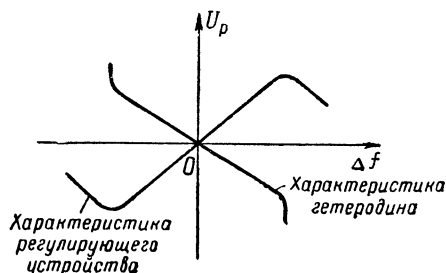


Рис. 55. Совмещенные частотные характеристики регулирующего устройства и гетеродина

Для примера рассмотрим случай, когда частота магнетрона равна 3000 Мгц , а частота гетеродина 3030 Мгц . Промежуточная частота приемника $f_{\text{пр}} = f_{\text{г}} - f_{\text{с}} = 30 \text{ Мгц}$ и на рис. 56 обозначена точкой O .

Допустим, что по какой-то причине, которую иногда называют возмущающей силой, частота магнетрона $f_{\text{с}}$ уменьшилась на $0,5 \text{ Мгц}$, при этом в схеме произошла расстройка, промежуточная частота увеличилась на величину $\Delta f_1 = 0,5 \text{ Мгц}$ ($f_{\text{пр}} = f_{\text{г}} - f_{\text{с}} = 3030 - 2999,5 = 30,5 \text{ Мгц}$). На совмещенных характеристиках такое отклонение частоты можно представить как смещение одной характеристики относительно другой на Of_1 (рис. 56).

При увеличении промежуточной частоты на выходе дискриминатора согласно его характеристике (см. рис. 49) образуется отрицательное напряжение, которое, действуя на сетку усилителя постоянного тока, будет несколько запирать лампу L_3 (см. рис. 53). Сопротивление лампы увеличится, а анодный ток уменьшится, уменьшая отрицательное напряжение на отражателе клистрона. Это уменьшение отрицательного напряжения можно рассматривать как появление в схеме АПЧ регулирующего напряжения U_p , изображенного на рис. 56 отрезком U_p^I . Как видно из графика, напряжению U_p^I согласно характеристике клистрона

соответствует меньшая частота f_n , следовательно, регулирующее напряжение U_p^I будет уменьшать частоту гетеродина так, чтобы разница между частотами гетеродина и магнетрона приближалась к 30 Мгц, т. е. в направлении $a^I b^I$. Но как только частота клистрона, а значит, и промежуточная частота изменится, например, с f_1 до f_2 , регулирующее напряжение снизится до U_p^{II} и будет продолжать уменьшать расстройку в направлении $a^{II} b^{II}$, но уже на меньшую величину и т. д.

Время между появлением напряжений U_p^I и U_p^{II} ни-

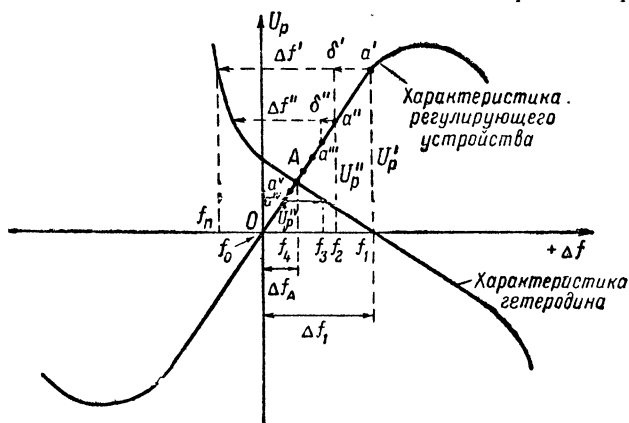


Рис. 56. График, иллюстрирующий работу схемы АПЧ с усилителем постоянного тока

чтожно мало, уменьшение расстройки с величины f_1 до f_2 также незначительно, поэтому можно считать, что под действием АПЧ рабочая точка перемещается в направлении уменьшения расстройки не по ступеньке $a^I b^I a^{II}$, а непосредственно по характеристике дискриминатора, последовательно проходя точки a^I , a^{II} , a^{III} , и т. д. В каждой из этих точек регулирующее напряжение, уменьшаясь по величине и действуя на отражатель клистрона, будет уменьшать расстройку. Так продолжается до точки A пересечения совмещенных характеристик. Дальнейшее уменьшение расстройки, например, до величины f_4 вызовет появление регулирующего напряжения U_p^{IV} . Из характеристики гетеродина видно, что это напряжение мало и поэтому не может удерживать частоту гетеродина такой, чтобы она продолжала

уменьшать расстройку в схеме. Напряжению U_p^{IV} согласно характеристике гетеродина соответствует частота f_3 , следовательно, U_p^{IV} вызывает увеличение расстройки, и рабочая точка так же, как и в предыдущем случае, перемещается по характеристике дискриминатора, последовательно проходя точки a^{IV} , a^V и т. д., пока не возвратится в точку А.

Таким образом, точка А пересечения характеристик — положение нового устойчивого равновесия схемы для данного отклонения частоты магнетрона. Под действием АПЧ довольно значительная расстройка (Δf_1) уменьшилась до величины Δf_A , называемой остаточной расстройкой о й схемы АПЧ. Остаточную расстройку можно уменьшить повышением чувствительности схемы, но совершенно освободиться от нее нельзя. Если бы нам удалось свести ее к нулю, то напряжение на выходе дискриминатора, а значит, и регулирующее напряжение были бы также равны нулю. Следовательно, гетеродин вырабатывал бы первоначально установленную частоту, а отклонение частоты магнетрона неизбежно вызвало бы отклонение промежуточной частоты, а значит, и появление регулирующего напряжения. Величина остаточной расстройки пропорциональна первоначальной расстройке. Чем больше первоначальная расстройка в схеме, тем больше остаточная расстройка, и наоборот. Такой случай регулирования обычно называют пропорциональным регулированием.

Качество работы схемы АПЧ оценивается коэффициентом автоподстройки K , представляющим собой отношение первоначальной расстройки $\Delta f_1 = f_1 - f_0$ к остаточной $\Delta f_A = f_A - f_0$:

$$K = \frac{f_1 - f_0}{f_A - f_0} = \frac{\Delta f_1}{\Delta f_A}.$$

Чем больше коэффициент K , тем лучше действует схема АПЧ.

Так происходит подстройка частоты, если в схеме АПЧ правильно сделаны все соединения. Но достаточно во время ремонта поменять местами точки подключения выхода дискриминатора, как схема АПЧ начнет не уменьшать, а увеличивать расстройку. В этом случае, например, при уменьшении частоты магнетрона и увеличении промежуточной частоты на сетку лампы L_3 будет подаваться положительное напряжение, в результате чего увеличится отрицательное

напряжение на отражателе клистрона, возрастет частота гетеродина, промежуточная частота и т. д., т. е. схема АПЧ будет не уменьшать, а увеличивать расстройку.

Мы рассмотрели случай, когда $f_r > f_o$ на 30 Мгц, но ту же промежуточную частоту можно получить, когда $f_o > f_r$ на 30 Мгц (рис. 57). Это часто используется в многоканальных радиолокационных станциях, где на некоторых каналах

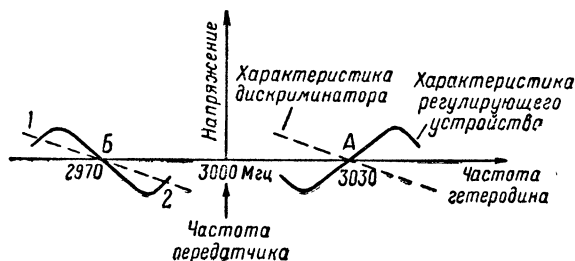


Рис. 57. Настройка гетеродина в «правильной» (А) и «ложной» (Б) точках

гетеродин имеет большую частоту, чем магнетрон ($f_r - f_o = f_{пр}$), и схема АПЧ работает, как в рассмотренном выше случае. При переходе на другие каналы частота гетеродина становится меньше частоты магнетрона ($f_o - f_r = f_{пр}$). В последнем случае при уменьшении частоты магнетрона промежуточная частота не увеличивается, а уменьшается, на выходе дискриминатора создается положительное напряжение, регулирующее напряжение становится более отрицательным и увеличивает частоту гетеродина. Тем самым еще больше уменьшается промежуточная частота и нарушается нормальная работа приемника. Такой случай называется подстройкой в ложной точке (точка Б). Для предотвращения такого режима работы в схеме АПЧ многоканальных станций введен переключатель, который при смене рабочего канала может переключить выходную цепь дискриминатора так, чтобы полярность его выходного напряжения изменилась на 180° .

На основании приведенных примеров можно вывести условие правильной работы схемы АПЧ: при изменении, например, частоты гетеродина изменение напряжения на выходе дискриминатора должно быть таким, чтобы оно, действуя через регулирующее устройство, вызывало противоположное изменение частоты гетеродина. Очевидно, для этого крутизна характеристики регулирующего устройства в точке

перехода и вблизи нее должна быть противоположна по знаку крутизне частотной характеристики гетеродина. Из рис. 57 видно, что на частоте гетеродина $f_x = 3\,030\text{ МГц}$ (точка A) это условие соблюдается и получается правильная подстройка. Если же частота гетеродина равна 2970 МГц , то около точки перехода B обе кривые имеют один и тот же знак и частота гетеродина под действием схемы АПЧ уходит из точки B в точку 1 (или 2), за пределами которой крутизны кривых имеют противоположные знаки. Достаточно изменить полярность характеристики регулирующего устройства (поменять местами точки подключения его выхода), и схема АПЧ начнет правильно работать в точке B .

Выясним теперь пределы отклонения разностной частоты, в которых система АПЧ нормально работает, и введем понятия областей «втягивания» и «удерживания» схемы.

Мы уже установили, что для нормальной автоматической подстройки следует прежде всего вручную настроить гетеродин и магнетрон так, чтобы работа происходила в «правильной», а не в «ложной» точке. Кроме того, необходимо, чтобы регулирующее напряжение при своем изменении не переводило частоту гетеродина из одной области генерации в другую (см. рис. 52). Обычно настройкой гетеродина вручную выбирается такая область, при которой гетеродин дает наибольшую мощность.

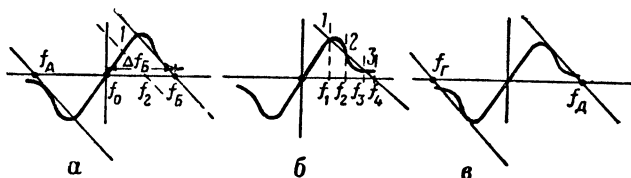


Рис. 58. Графическое определение областей «втягивания» и «удерживания» схемы АПЧ

Схема с усилителем постоянного тока не может работать нормально, если разностная частота отклонилась настолько, что регулирующее напряжение стало меньше напряжения, требуемого для соответствующего изменения частоты гетеродина.

Ограничения, вводимые в работу схемы АПЧ последним фактором, поясним на графиках рис. 58.

Допустим, что в схеме произошла расстройка и разностная частота отклонилась, например, до величины f_2 (рис. 58, а). При этом происходит рассмотренная выше автоподстройка и устанавливается новое равновесие, соответствующее точке 1. При отклонении разностной частоты на величину больше f_2 остаточная расстройка увеличивается пропорционально величине начального отклонения.

Автоподстройка происходит до тех пор, пока отклонение разностной частоты не достигнет величины f_B или f_A , т. е. пока характеристика гетеродина не станет внутренней касательной к характеристике регулирующего устройства. В интервале частот от f_A до f_B , как принято говорить, схема АПЧ «втягивается» в работу. Соответственно этому область частот от f_A до f_B называют областью втягивания. В области втягивания схема АПЧ при всех условиях устанавливает правильную промежуточную частоту.

При еще большей расстройке, например, на величину f_4 (рис. 58, б), характеристика гетеродина пересекает характеристику регулирующего устройства в трех точках — 1, 2 и 3. При этом точки 1 и 3 будут точками устойчивого равновесия, так как в пределах $f_1 - f_2$ и $f_3 - f_4$ регулирующее напряжение достаточно велико для подстройки гетеродина. В пределах частот $f_2 - f_3$ напряжение регулирующего устройства мало и при работе не может удержать частоту в указанных значениях. Точка 2 будет точкой неустойчивого равновесия. Если, например, вручную установили систему в точку 2, то, пока разностная частота не изменяется, схема удерживается в этом состоянии. Достаточно небольшого отклонения разностной частоты, как система перейдет в точку 1 или 3. В этом случае говорят, что система не втягивается в работу, а лишь «удерживается».

Область удерживания определяется отклонением разностной частоты относительно переходной на величины f_T и f_D , при которых характеристика гетеродина становится внешней касательной к характеристике регулирующего устройства (рис. 58, в). Частоты в пределах $f_T - f_D$ входят в область удерживания. Таким образом, область удерживания называют областью частот между наибольшими отклонениями разностной частоты от переходной, при которых система АПЧ удерживает разностную частоту, близкую к промежуточной, при условии, что приемник предварительно был точно настроен на передат-

чик, а скорость изменения разностной частоты была меньше скорости срабатывания системы АПЧ.

Если расстройка выходит за пределы $f_{г} - f_{д}$, то система с усилителем постоянного тока не даст правильной автоматической подстройки.

В схемах с усилителем постоянного тока область втягивания всегда меньше области удерживания. Пределы втягивания ограничены небольшим диапазоном частот, и естественно, что такие схемы не могут успешно работать в станциях, где разностная частота отклоняется на большую величину.

Тиратронная схема

Для автоподстройки при больших и быстрых отклонениях промежуточной частоты от переходной применяют тиратронную схему (рис. 59). Она относится к электронным

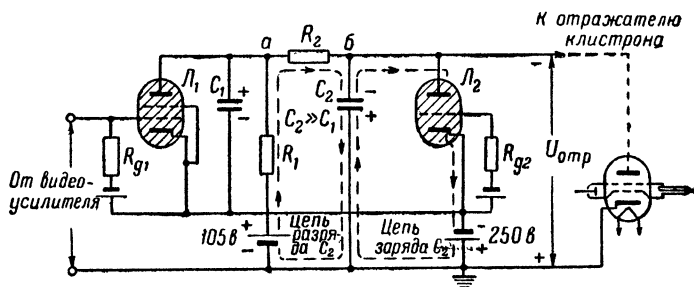


Рис. 59. Тиратронная схема регулирующего устройства

поисковым схемам и состоит из двух каскадов: каскада поиска, собранного на трехэлектродном тиратроне L_2 , и каскада слежения, собранного на четырехэлектродном тиратроне L_1 . Перед тиратронной схемой (за дискриминатором) включается видеоусилитель для усиления видеоимпульсов, поступающих от дискриминатора.

Задача каскада поиска — изменять частоту гетеродина в широких пределах. Этот каскад включается при больших отклонениях промежуточной частоты от переходной, а также сразу после включения приемника, пока передатчик еще не работает.

Задача каскада слежения — прерывать работу каскада поиска, когда промежуточная частота достигает установленного (переходного) значения, а также создавать необ-

ходимое регулирующее напряжение для отражательного электрода клистрона при автоподстройке, чтобы корректировать небольшие отклонения промежуточной частоты.

Для выбора определенного режима работы на управляющие сетки тиратронов подаются отрицательные напряжения смещения, которые обычно снимаются с делителя напряжения, включенного в цепь источника.

Рассмотрим работу тиратронной схемы в режиме поиска. Допустим, что передатчик выключен, а на схему приемника подано напряжение питания. При включении приемника напряжение источника прикладывается к двум последовательно включенным конденсаторам C_2 и $C_{ак}$ (рассматриваем участок анод — катод тиратрона L_2 как конденсатор $C_{ак}$). Так как емкость $C_{ак}$ во много раз меньше емкости C_2 , то можно считать, что $C_{ак}$ мгновенно заряжается до напряжения около 250 в (рис. 60, точка a), а напряжение

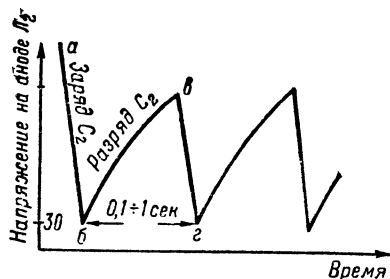


Рис. 60. График, иллюстрирующий работу каскада поиска

на конденсаторе C_2 за это время не успевает существенно возрасти. В результате тиратрон L_2 зажигается, напряжение на его аноде резко падает (участок $a, б$). Конденсатор C_2 быстро заряжается (плюс на нижней, минус на верхней обкладке) по цепи (см. рис. 59): $+250 \text{ в}, C_2$, проводящий участок анод — катод тиратрона L_2 , -250 в .

Когда напряжение на аноде тиратрона L_2 достигает 30—40 в (по отношению к катоду), тиратрон гаснет. Цепь заряда конденсатора C_2 прерывается, и он начинает медленно разряжаться через высокоомные сопротивления R_1 и R_2 по цепи: $+C_2, R_1, R_2, -C_2$. По мере разряда конденсатора C_2 напряжение на его обкладках уменьшается, а на участке анод — катод тиратрона L_2 — увеличивается (участок $б, в$) и, когда оно достигает примерно -170 в , тиратрон повторно зажигается. В результате напряжение на его аноде опять быстро падает, а конденсатор C_2 заряжается и т. д.

Таким образом, в режиме поиска конденсатор C_2 периодически быстро заряжается и медленно разряжается, образуя на выходе схемы и подавая на отражатель кли-

строна пилообразное напряжение. Период повторения пилообразного напряжения зависит главным образом от постоянной времени цепи разряда конденсатора C_2 :

$$\tau_p = C_2 (R_1 + R_2)$$

и обычно берется равным 0,1 — 1 сек.

Амплитуда пилообразного напряжения подбирается так, чтобы получить небольшой уход частоты клистрона за интервал его электронной настройки. Среднее значение пилообразного напряжения должно соответствовать середине рабочей области генерации клистрона. Механическая настройка частоты клистрона плунжерами осуществляется с таким расчетом, чтобы разность номинальных значений частот передатчика и гетеродина была равна переходной частоте при среднем значении пилообразного напряжения.

Так работает каскад поиска при выключенном передатчике. Так он будет работать и при включенном передатчике, если частота последнего значительно отличается от номинала и на выходе дискриминатора получаются видеоимпульсы такой малой амплитуды, что даже после усиления каскадом видеоусилителя они не могут изменить режима работы тиратронной схемы.

Тиратрон слежения L_1 в режиме поиска заперт. При этом конденсатор C_1 заряжен до напряжения 250 в по цепи (см. рис. 59) $+250$ в, R_1 , C_1 , -250 в. При зажигании тиратрона поиска L_2 конденсатор C_1 разряжается по цепи: $+C_1$, R_2 , L_2 , $-C_1$. Но так как сопротивление R_2 очень велико, то ток разряда конденсатора C_1 оказывается очень малым, поэтому можно считать, что напряжение на конденсаторе C_1 при поиске остается почти постоянным.

Таким образом, в режиме поиска каскад слежения не работает, а каскад поиска вырабатывает пилообразное напряжение, которое, поступая на отражатель клистрона, изменяет частоту колебаний последнего в широких пределах.

Рассмотрим переход от режима поиска к режиму слежения, а также работу тиратронной схемы в режиме слежения. На рис. 61 участок А кривых представляет собой изменение соответствующих величин в режиме поиска, участки Б, В и Г — в режиме слежения.

Допустим, что в момент t_1 включили передатчик, частота которого равна номинальной, а частота клистрона в этот момент оказалась максимальной. При $f_0 > f_r$ разностная частота в этом случае будет меньше переходной. На выходе дискриминатора образуются положительные, а на

выходе видеоусилителя — отрицательные видеоимпульсы, которые лишь увеличат отрицательное смещение на сетке тиратрона L_1 (см. рис. 59) и не внесут никаких изменений в работу схемы. Поэтому режим поиска сохранится. Конденса-

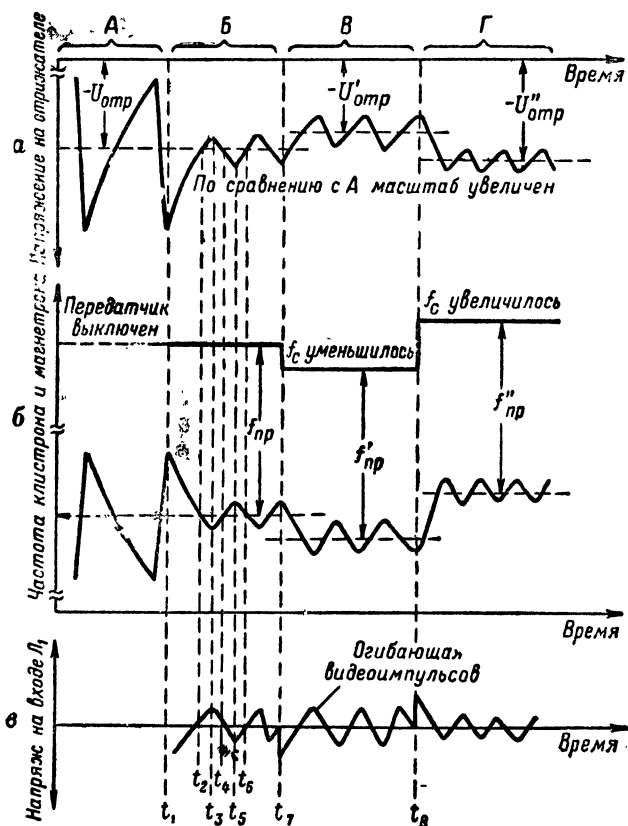


Рис. 61. Графики, иллюстрирующие работу тиратронной схемы при автоподстройке:

а — изменение напряжения на отражателе клистрона; б — изменение частоты отражательного клистрона и частоты магнетрона при работе станции; в — огибающая видеоимпульсов на входе тиратронной схемы

тор C_2 будет продолжать очередной разряд через сопротивления R_1 и R_2 . Отрицательное напряжение на отражателе клистрона и частота колебаний клистрона будут уменьшаться, а разностная частота — увеличиваться.

В момент t_2 разностная частота достигнет переходного значения и как только несколько превысит его, на входе тиратрона L_1 появятся положительные видеоимпульсы такой амплитуды, что в момент t_3 тиратрон L_1 зажжется. При этом схема перейдет в режим слежения. Конденсатор C_1 будет быстро разряжаться по цепи: $+C_1, L_1, -C_1$ до тех пор, пока напряжение на аноде тиратрона L_1 , а значит, и на конденсаторе C_1 не достигнет напряжения погасания тиратрона L_1 , т. е. примерно 15 в. При таком напряжении тиратрон L_1 погаснет и конденсатор C_1 начнет заряжаться по цепи: $+250 \text{ в}, R_1, C_1, -250 \text{ в}$.

С момента t_3 прекратится и разряд конденсатора C_2 , так как при зажигании тиратрона L_1 и разряде конденсатора C_1 потенциал точки a станет ниже потенциала точки b . В результате ток через сопротивление R_2 изменит направление и потечет от точки b к точке a . Это значит, что с момента t_3 конденсатор C_2 подзаряжается по цепи: $+250 \text{ в}, C_2, C_1, -250 \text{ в}$. Одновременно это будет и второй цепью заряда конденсатора C_1 . Конденсатор C_2 подзаряжается до тех пор, пока потенциалы точек a и b не станут равными. При подзарядке конденсатора C_2 напряжение на отражателе клистрона становится более отрицательным, частота колебаний клистрона повышается, а разностная частота уменьшается.

С момента t_4 разностная частота будет ниже переходной, на вход тиратрона L_1 начнут поступать отрицательные импульсы и он останется запертым. С момента t_5 , когда потенциалы точек a и b сравняются, конденсатор C_1 будет продолжать заряжаться по первой цепи: $+250 \text{ в}, R_1, C_1, -250 \text{ в}$, потенциал точки a станет выше потенциала точки b и конденсатор C_2 начнет разряжаться через сопротивления R_1 и R_2 .

Таким образом, с момента t_5 конденсатор C_2 , переключившись на разряд, уменьшает частоту клистрона, увеличивая разностную частоту. В момент t_6 разностная частота достигнет переходного значения и немного превысит его. При этом на вход тиратрона L_1 начнут поступать положительные видеоимпульсы, тиратрон L_1 зажжется, конденсатор C_1 быстро разрядится, а затем начнет заряжаться при одновременном подзаряде конденсатора C_2 . Далее процессы будут повторяться.

Следовательно, в режиме слежения в отдельные моменты разностная частота превышает переходную, затем при помощи напряжения, выработанного дискриминатором, разностная частота несколько понижается, потом она снова

повышается и т. д. При этом напряжение на отражателе клистрона изменяется в небольших пределах около среднего значения — $U_{\text{отр}}$, частота колебаний клистрона изменяется около среднего значения $f_{\text{г}}$, а разностная частота — около переходного значения $f_{\text{пр}}$.

Если в момент t_7 по каким-то причинам уменьшилась частота магнетрона, то разностная частота, уменьшаясь, окажется ниже переходной. При этом на сетку тиратрона L_1 начнут поступать отрицательные видеоимпульсы, предотвращающие его зажигание. Конденсатор C_2 получит более глубокий разряд. Отрицательное напряжение на отражателе клистрона понизится, уменьшая частоту генерируемых колебаний. Разностная частота будет возрастать до значения несколько большего, чем значение переходной частоты, пока на входе тиратрона L_1 положительные импульсы не достигнут величины, достаточной для его зажигания. Далее процессы повторяются. В промежутке времени от t_7 до t_8 напряжение на отражателе клистрона изменяется около меньшего среднего значения $U'_{\text{отр}}$, а частота колебаний клистрона — около меньшего среднего значения f_2 . Разностная частота будет отличаться от промежуточной лишь на величину остаточной погрешности.

Если в момент t_8 частота колебаний магнетрона несколько увеличится, то увеличится и разностная частота. На сетку тиратрона L_1 сразу поступят положительные видеоимпульсы, зажигающие тиратрон L_1 . Конденсатор C_1 , разряжаясь через тиратрон, резко понизит потенциал точки a , который станет ниже потенциала точки b . Конденсатор C_2 будет подзаряжаться, пока не сравняются потенциалы точек a и b . При этом отрицательное напряжение на отражателе клистрона и частота генерируемых им колебаний будут увеличиваться. После того как потенциалы точек a и b сравняются, подзаряд конденсатора C_2 прекратится и начнется разряд его до нового зажигания тиратрона L_1 и т. д. При этом напряжение на отражателе клистрона будет изменяться около нового среднего значения — $U_{\text{отр}}$, а разностная частота — около промежуточной, отличаясь от нее на величину новой остаточной погрешности.

Схема на вакуумных лампах

Эта схема также поисковая. В ее состав входят усилитель видеочастоты L (рис. 62), включенный после дискриминатора, диодный выпрямитель L_1 и регулирующий каскад, собранный на пентоде L_2 .

Регулирующий каскад может работать как в режиме генерации пилообразного напряжения с самопуском (при поиске), так и в режиме усилителя постоянного тока (при автоподстройке). Перевод регулирующего каскада из генераторного режима в усилительный осуществляется диодным выпрямителем Λ_1 .

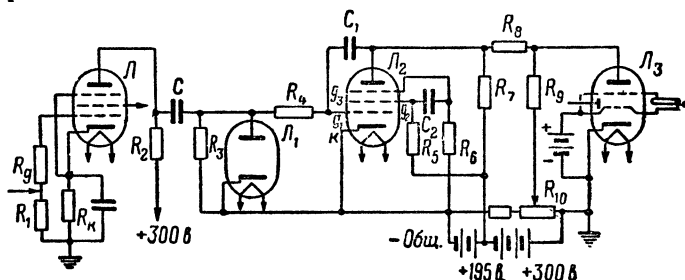


Рис. 62. Схема регулирующего устройства на вакуумных лампах

Усилитель видеочастоты усиливает напряжение,работанное дискриминатором, и, изменив фазу на 180° , передает это напряжение на регулируемую схему.

Диодный выпрямитель вследствие своей односторонней проводимости при поступлении положительного импульса «привязывает» верхний уровень сигнала (напряжение на сетке) к нулевому уровню, в результате чего в период между положительными импульсами на управляющую сетку лампы Λ_2 действует отрицательное напряжение, величина которого определяется амплитудой видеоимпульсов, поступающих с видеоусилителя (рис. 63).

Регулирующая лампа Λ_2 (см. рис. 62) имеет обратную связь между анодом и управляющей сеткой через конденсатор C_1 . Экранирующая сетка g_2 этой лампы через конденсатор C_2 связана с защитной сеткой g_3 . Выходное напряжение регулирующего каскада подается на отражатель клистрона Λ_3 .

Для нормальной работы схемы необходимо, чтобы напряжение, подаваемое на отражатель клистрона, было отри-

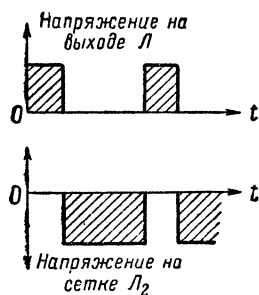


Рис. 63. График, иллюстрирующий работу выпрямительного диода

кательным по отношению к катоду клистрона. При указанном на схеме подключении источника анод и экранирующая сетка регулирующей лампы имеют положительный потенциал по отношению к своему катоду и регулирующая схема работает нормально. В то же время это напряжение отрицательно по отношению к катоду клистрона, что также обеспечивает нормальную работу последнего.

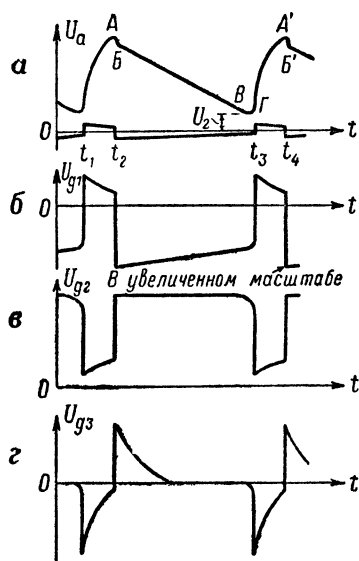


Рис. 64. Эпюры напряжений в различных цепях схемы на вакуумных лампах

Рассмотрим физические процессы, происходящие при работе схемы в режиме поиска.

При включении источника питания по цепи $+195 \text{ в}$, R_7 , C_1 , R_4 , R_3 , — Общ. заряжается конденсатор C_1 . Напряжение на его обкладках увеличивается, соответственно увеличивается и напряжение на участке анод — катод регулирующей лампы L_2 .

Допустим, что в момент t_2 (рис. 64) лампа L_2 , запертая по анодному току, начинает отпираться. При этом конденсатор C_1 начинает разряжаться через лампу L_2 и сопротивления R_3 и R_4 . Вследствие обратной связи этот разряд происходит сравнительно медленно

и почти по линейному закону (участок BB'). Действительно, любое уменьшение разрядного тока сопровождается уменьшением падения напряжения на сопротивлениях R_3 и R_4 , отрицательное напряжение смещения между управляющей сеткой g_1 и катодом k при этом уменьшается и противодействует уменьшению анодного тока. И наоборот, любое увеличение разрядного тока приводит к увеличению отрицательного напряжения смещения между управляющей сеткой g_1 и катодом k , что противодействует увеличению анодного тока.

Разряд конденсатора C_1 продолжается до тех пор, пока напряжение на аноде L_2 не упадет до значения $U_{a_{мин}} = U_2$, действие которого на электронный поток делается одинако-

вым с действием напряжения экранирующей сетки. При этом начинается перераспределение электронов (катодного тока). Экранирующая сетка g_2 «перехватывает» значительную часть электронов, уменьшая анодный ток. В результате с момента t_3 напряжение на аноде растет, а напряжение на экранирующей сетке g_2 , бывшее до этого постоянным, уменьшается.

Уменьшение напряжения на экранирующей сетке передается через конденсатор C_2 на защитную сетку, что приводит к еще большему падению анодного тока и к росту анодного напряжения. Увеличение напряжения U_a через конденсатор C_1 передается на управляющую сетку, вследствие чего катодный ток еще больше возрастает, а ток экранирующей сетки еще больше увеличивается. Напряжение U_{g_2} соответственно уменьшается (рис. 64, в), уменьшая напряжение на защитной сетке, и т. д.

Такое лавинообразное изменение напряжения заканчивается (точка $г$ на рис. 64, а), когда напряжение на защитной сетке становится отрицательным по отношению к катоду (рис. 64, г), лампа оказывается полностью запертой по анодному току, а управляющая сетка приобретает положительный потенциал (рис. 64, б).

Как только лампа L_2 (см. рис. 62) запирается по анодному току, конденсатор C_1 начинает заряжаться через сопротивление R_7 и проводящий участок g_1 — к лампы L_2 , а конденсатор C_2 — разряжаться через проводящий участок g_2 — к лампы и сопротивление R_6 . По мере разряда конденсатора C_2 напряжение на защитной сетке лампы стремится к потенциалу катода. Емкость конденсатора C_2 выбрана достаточно большой, чтобы потенциал на сетке g_3 не смог восстановиться и лампа L_2 оставалась запертой до тех пор, пока конденсатор C_1 не зарядится до напряжения, близкого к E_a (точка A' на рис. 64, а).

К моменту t_4 напряжение на защитной сетке достигает такой величины, при которой через лампу L_2 начинает протекать анодный ток. Появление анодного тока приводит к падению анодного напряжения (участок $A'B'$) вследствие увеличения падения напряжения на сопротивлении R_7 . Этот перепад напряжения через конденсатор C_1 передается на управляющую сетку лампы L_2 , вызывая уменьшение катодного тока. Ток экранирующей сетки уменьшается, ее потенциал повышается, вызывая рост потенциала защитной сетки и еще большее отпирание лампы по анодному току, а значит, и уменьшение U_a и U_g .

Этот второй лавинообразный процесс происходит до тех пор, пока отрицательное напряжение на управляющей сетке не достигнет величины, близкой к напряжению отсечки (участок $A'B'$). Уменьшение напряжения на аноде лампы приводит к тому, что конденсатор C_1 начинает разряжаться через участок анод — катод лампы L_2 и сопротивления R_3, R_4 . Далее процесс повторяется.

Таким образом, в режиме поиска, например, при выключенном передатчике или при сильной расстройке, регулирующая схема вырабатывает пилообразное напряжение, необходимая амплитуда которого устанавливается потенциометром R_{10} . Это напряжение подается на отражатель клистрона и при указанном способе подключения источников питания является отрицательным по отношению к катоду гетеродина.

Дальнейший процесс работы схемы пояснен на рис. 65. Допустим, что в момент t_5 включили передатчик. Отрицательное напряжение на отражателе клистрона в этот момент мало (рис. 65, a), частота гетеродина также мала (рис. 65, b). Разностная частота намного меньше переходной, и видеоимпульсы на входе регулирующей схемы (рис. 65, $в$) отсутствуют; эта схема пока продолжает поиск.

Дальнейшее увеличение отрицательного напряжения на отражателе увеличивает частоту гетеродина настолько, что в момент t_6 разностная частота входит в полосу пропускания усилителя промежуточной частоты системы АПЧ. При этом на выходе дискриминатора появляются импульсы положительной, а на выходе видеоусилителя — отрицательной полярности, которые не оказывают существенного влияния на работу регулирующей схемы, и конденсатор C_1 (см. рис. 62) продолжает разряжаться, увеличивая отрицательное напряжение на отражателе.

В момент t_7 разностная частота достигает переходного значения и затем несколько превышает его. При этом на выходе дискриминатора появляются отрицательные, а на выходе видеоусилителя — положительные видеоимпульсы, которые подаются на сопротивление R_3 диодного выпрямителя. На сопротивлении R_3 во время действия видеоимпульса создаются два напряжения: первое от разрядного тока конденсатора C_1 и второе от действия положительных видеоимпульсов. Эти напряжения имеют встречное направление. Амплитуда второго напряжения нарастает в соответствии с характеристикой дискриминатора. В момент t_8 , когда эти два встречнодействующих напряжения равны, ток

через сопротивление R_3 не протекает. Ток разряда конденсатора C_2 становится равным нулю, т. е. разряд его прекращается. Следовательно, с этого момента схема АПЧ из режима поиска переходит в режим слежения, а регулирующий каскад начинает работать как усилитель постоянного тока.

Если во время действия видеопульса напряжение на аноде выпрямительного диода становится положительным, то диод отпирается и управляющая сетка приобретает по-

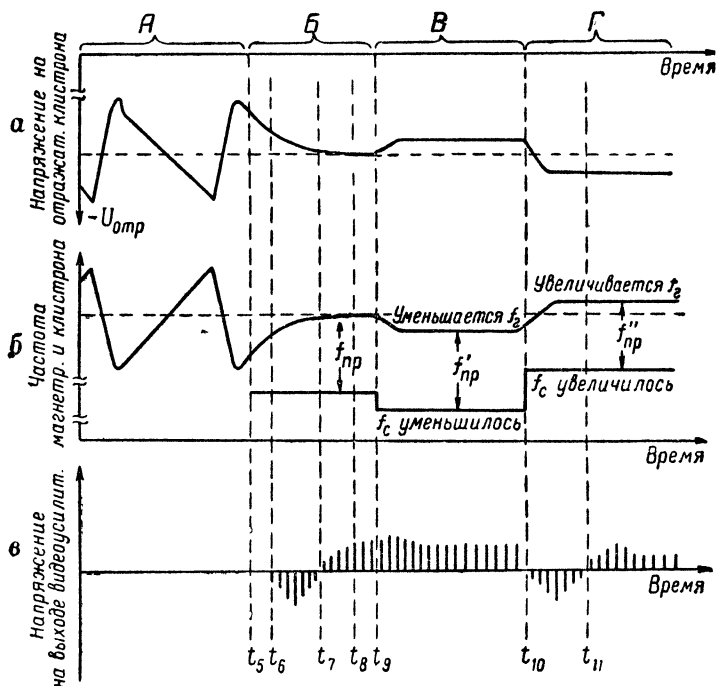


Рис. 65. График, иллюстрирующий работу схемы на вакуумных лампах при автоподстройке

тенциал катода. В интервалах между импульсами на управляющую сетку действует отрицательное напряжение, которое после усиления (и опрокидывания фазы) действует на отражатель клистрона так, что генерируемая частота уменьшается и разностная частота стремится к переходной.

Пусть в какой-то момент t_9 частота магнетрона уменьшилась до величины f'_c (участок В кривых рис. 65). При этом разностная частота f'_c увеличивается. На выходе ди-

скриминатора амплитуда отрицательных видеоимпульсов возрастает, соответственно возрастает и амплитуда положительных видеоимпульсов на выходе усилителя Л (см. рис. 62 и 65). Отрицательное напряжение на отражателе клистрона несколько падает, уменьшая частоту гетеродина, и разностная частота приближается к переходной.

Если по каким-то причинам в момент t_{10} частота магнетрона увеличивается до значения f_c'' (участок Г кривых рис. 65), то разностная частота становится ниже переходной. При этом на выходе дискриминатора образуются положительные, а на выходе видеоусилителя — отрицательные видеоимпульсы. Отрицательные импульсы, действуя на вход регулирующей лампы, не прерывают разряда конденсатора C_1 , и последний разряжается более глубоко. Отрицательное напряжение на отражателе клистрона возрастает, увеличивая частоту клистрона до тех пор, пока в момент t_{11} разностная частота не достигнет переходного значения. Как только разностная частота станет несколько больше переходной, на выходе видеоусилителя появятся положительные импульсы, которые прерывают разряд конденсатора C_1 . Далее процесс автоподстройки продолжается, как и в предыдущем случае.

Сравнительная характеристика схем АПЧ

Выбор схемы АПЧ определяется главным образом назначением станции (наземная или самолетная), диапазоном ее рабочих частот и общей схемой приемника.

Преимущество схемы с усилителем постоянного тока — простота ее устройства и надежность в эксплуатации. Недостатки этой схемы — малые пределы втягивания и малая скорость автоподстройки.

Пределы втягивания в этой схеме ограничиваются сравнительно небольшим диапазоном частот, крайние значения которого определяются внутренней касательной характеристики клистрона к характеристике регулирующего устройства. Малые пределы втягивания приводят еще и к тому, что такая схема требует более точной ручной настройки гетеродина в начале работы станции.

«Замедленное» действие схемы объясняется тем, что дискриминатор должен подавать на вход усилителя постоянного тока «постоянное» напряжение, т. е. должен иметь большую постоянную времени выходной цепи. Для получения ее применяются выходные конденсаторы большой емко-

сти, так как они не успевают зарядиться за время прохождения одного импульса, то выходное напряжение дискриминатора, а значит, и регулирующего устройства зависит не только от расстройки в данный момент, но и от расстроек за предшествующее время. Следовательно, изменения напряжения регулирующего устройства всегда запаздывают относительно изменений разностной частоты и схема вводит коррекцию частоты всегда с некоторым запаздыванием относительно момента ее изменения.

Увеличение емкости нагрузочных конденсаторов дискриминатора приводит также к уменьшению эффективности диодного детектирования. Чтобы напряжение сигнала было не слишком мало, в таких схемах необходимо большее усиление по промежуточной частоте.

Малые пределы вытягивания и значительная «инерционность» схемы с усилителем постоянного тока ограничили их применение только станциями, в которых не ожидаются быстрые и большие отклонения рабочей частоты.

Недостатки схемы с усилителем постоянного тока устраняются в тиратронной схеме. Применение каскада поиска в этой схеме значительно расширяет пределы автоматической подстройки. Область вытягивания получается почти равной области удерживания. Поэтому такие схемы не требуют тщательной предварительной ручной настройки.

Для нормальной работы тиратронной схемы на ее вход подается напряжение в виде импульсов, изменение которых может почти мгновенно следовать за изменением разностной частоты. Следовательно, такие схемы могут корректировать изменения частоты, происходящие с большой скоростью, поэтому они широко применяются в станциях сантиметрового диапазона.

Диодное детектирование в тиратронных схемах более эффективно, и заботиться о повышенном усилении по промежуточной частоте не приходится.

Однако и в тиратронной схеме скорость автоподстройки ограничена. Отличие работы этой схемы от работы схемы с усилителем постоянного тока заключается в том, что если в последней во время автоподстройки все цепи АПЧ и частота гетеродина находятся в устойчивом «равновесии», то в тиратронной схеме напряжение на отражателе гетеродина все время изменяется между двумя крайними значениями, вызывая при этом качание как частоты гетеродина, так и разностной частоты. Необходимо, чтобы качания разностной частоты в режиме слежения не выходили за пределы полосы

пропускания приемника. Следовательно, пульсации пилообразного напряжения не должны быть глубокими. Для этого конденсатор C_2 (см. рис. 59) должен иметь достаточно большую емкость. Но увеличение емкости C_2 неизбежно приводит к уменьшению скорости автоподстройки. Таким образом, ограниченная ширина полосы пропускания приемника накладывает ограничения на скорость автоподстройки тиратронной схемы.

К недостаткам тиратронных схем относится также нестабильная работа их при изменении внешних условий. Напряжение зажигания тиратронов в значительной степени зависит от окружающей температуры, давления, влажности, разброса параметров ламп. Напряжение же, подаваемое с дискриминатора (через видеоусилитель) и зажигающее тиратрон, от указанных факторов не зависит и является функцией только отклонения разностной частоты. Следовательно, при одних условиях тиратрон слежения может зажигаться, например, от каждого положительного импульса, а при других условиях — от каждого третьего или четвертого положительного импульса. Изменение частоты зажигания тиратрона ведет к изменению напряжения на отражателе клистрона, а значит, и к изменению его частоты в зависимости от внешних условий. Поэтому применение тиратронной схемы, например, в самолетных радиолокационных станциях ограничено.

Трудности, вызванные изменением потенциала зажигания в тиратронной схеме, привели к разработке другой поисковой схемы, использующей вакуумные лампы. В режиме поиска эта схема работает аналогично тиратронной, а в режиме слежения — как усилитель постоянного тока. Преимущество схемы на вакуумных лампах заключается в широких пределах автоподстройки. Область втягивания равна области удерживания. В отличие от тиратронной схемы пульсации в режиме слежения почти не ограничивают скорости автоподстройки, а применение вакуумных ламп (с обратной связью) делает работу схемы независимой ни от характеристик ламп, ни от разброса их параметров.

Недостатком схемы следует считать то, что схема работает в различных режимах, которые при эксплуатации трудно поддаются контролю, поэтому настройка их усложняется.

Все три рассмотренные схемы основаны на принципе электронной настройки. Но ширина области электронной

настройки обычных клистронов ограничена из-за того, что при слишком большом изменении напряжения на отражателе выходная мощность клистрона резко падает, а шумы очень сильно возрастают. Однако по мере повышения рабочей частоты радиолокационных станций диапазон электронной настройки может оказаться малым даже для компенсации ухода частоты самого гетеродина, поэтому требуются устройства с более широким диапазоном настройки.

Для расширения диапазона автоматической подстройки частоты были сконструированы специальные клистроны с термической настройкой, в которых более широкий диапазон регулирования частоты достигается перестройкой объемного резонатора. Например, в одной из таких конструкций резонатор механически связывается с небольшим стержнем. Стержень под действием тепла деформируется и изменяет форму резонатора, изменяя тем самым его резонансную частоту. Большой недостаток таких схем — малая скорость автоподстройки, обусловленная тепловой инерцией регулирующих устройств. Кроме того, схема реагирует на всякие температурные изменения окружающей среды, поэтому температурная стабильность схемы низка. Ввиду таких существенных недостатков схемы с термической настройкой не нашли широкого применения.

Лучшие результаты дают механические способы расширения диапазона автоматической подстройки частоты — использование электродвигателей для изменения объема резонатора («индуктивная» настройка) или расстояния между сетками резонатора («емкостная» настройка). Однако люфт и механическая инерционность подвижных частей ограничивают применение чисто механических систем для компенсации быстрых изменений частоты, связанных, например, с вращением антенны. Поэтому наиболее перспективными следует считать комбинированные электронно-механические системы. В них поиск в широких пределах осуществляется при помощи электродвигателя настройки, но как только обнаруживается полезный сигнал, электродвигатель выключается и подстройку ведет электронная схема.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение	3
Общие вопросы регулировки усиления	4
Коэффициент усиления приемника	—
Необходимость регулировки усиления	6
Принцип действия регулятора усиления	7
Сеточная характеристика лампы	—
Коэффициент усиления усилительного каскада	9
Способы регулировки усиления	11
Требования к регуляторам усиления	13
Ручная регулировка усиления	19
Регулировка усиления изменением смещения на управляющей сетке	—
Регулировка усиления изменением напряжения на экранирующей сетке	23
Регулировка усиления изменением анодного напряжения	24
Регулировка усиления изменением напряжения на защитной сетке	—
Регулировка усиления в каскадах видеочастоты	25
Автоматическая регулировка усиления	27
Необходимость автоматической регулировки усиления	—
Принцип действия схемы АРУ	28
Простая схема АРУ	30
Схема задержанной АРУ	32
Схемы усиленно-задержанной АРУ	33
Схемы АРУ с цепями временной селекции	36
Назначение фильтра и постоянная времени схемы АРУ	37
Мгновенная автоматическая регулировка усиления	39
Автоматическая регулировка усиления во времени	45
АРУ или РРУ?	48

	<i>Стр.</i>
Автоматическая подстройка частоты	49
Причины, нарушающие стабильность частоты	—
Необходимость автоматической подстройки частоты	51
Принцип действия АПЧ	52
Классификация схем АПЧ	53
Чувствительные элементы схемы АПЧ	55
Постоянная времени выходной цепи дискриминатора	63
Отражательный клистрон	64
Регулирующие устройства схемы АПЧ	67
Сравнительная характеристика схем АПЧ	88

Иван Александрович Моторичев
РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ И АПЧ

Редактор инженер-подполковник *Врублевский А. В.*
Технический редактор *Аникина Р. Ф.*
Корректор *Мирошниченко Е. В.*

Сдано в набор 10.8.57 г.
Подписано к печати 26.3.58 г.
Формат бумаги $84 \times 103 \frac{1}{2}$
3 печ. л. = 4,92 усл. печ. л. 4,630 уч.-изд. л.
Г-41433.

Военное издательство
Министерства обороны Союза ССР
Москва, К-9, Тверской бульвар, 18.
Изд. № 5/8099. Зак. 638.

1-я типография имени С. К. Тимошенко
Военного издательства
Министерства обороны Союза ССР
Москва, К-6, проезд Скворцова-Степанова, дом 3.
Цена 1 р. 65 к.

ТОВАРИЩИ ЧИТАТЕЛИ!

С заказами на библиотеку „Радиолокационная техника“ обращайтесь в магазины военторгов „Военная книга“.

Свои отзывы и пожелания по библиотеке „Радиолокационная техника“ просьба направлять по адресу: Москва К-9, Тверской бульвар, 18, Военное издательство.

БИБЛИОТЕКА „РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ТЕХНИКА“

В помощь офицерам, связанным с эксплуатацией радиотехнических средств, Военное издательство выпускает библиотеку «Радиолокационная техника». Эта библиотека может быть также использована широким кругом читателей, желающих подробно ознакомиться с работой отдельных узлов и элементов радиолокационных станций.

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ:

- | | |
|--|--|
| К. Н. ТРОФИМОВ. Радиолокация | М. А. СОКОЛОВ. Преобразователи частоты |
| С. И. БЫЧКОВ. Магнетрон | Г. Д. ЗАВАРИН. Усилители |
| З. Э. АШ. Реле | И. А. ЛЫКОВ. Координаты, определяемые радиолокатором |
| В. И. БЕКЕТОВ. Антенны сверхвысоких частот | А. П. КАРУСЬ. Антенные переключатели |
| В. С. НЕЛЕПЕЦ. Антенны метровых волн | А. В. ВРУБЛЕВСКИЙ. Развертки индикаторов |
| Б. Ш. ГОРИН. Индикаторы дальности | |

НАМЕЧЕНЫ К ИЗДАНИЮ:

- | | |
|---|--|
| 1. Радиолокационные цели. | 15. Импульсные передатчики УКВ. |
| 2. Линии передачи. | 16. К्लитрон. |
| 3. Волноводы. | 17. Лампы обратной и бегущей волны. |
| 4. Объемные резонаторы. | 18. Стабилизаторы напряжения. |
| 5. Кристаллические детекторы высокочастотного тракта. | 19. Усилители. |
| 6. Синхронизирующие устройства. | 20. Синхронно-следящие устройства. |
| 7. Мощные импульсные модуляторные лампы. | 21. Электронно-лучевая трубка. |
| 8. Управление диаграммами направленности. | 22. Конденсаторы и сопротивления. |
| 9. Распространение радиоволн. | 23. Индикаторы направления. |
| 10. Электронные лампы. | 24. Помехи радиолокации и борьба с ними. |
| 11. Газоразрядные приборы. | 25. Технические данные радиолокационной станции. |
| 12. Выпрямительные устройства. | 26. Электротехнические измерения. |
| 13. Формирование импульсов. | 27. Электронный осциллограф. |
| 14. Генераторы несинусоидальных колебаний. | |

Цена 1 р. 65 к.