

## Автоматическая регулировка усиления в СКТ

*Песков С.Н., зам.директора по науке ГК "Полюс-С", к.т.н.*

**Виды и назначение регулировок.** Любой, даже начинающий оператор СКТ знает, что без регулировок ни одну сеть не построить. Максимальное число регулировок приходится на период инсталляции СКТ, а максимальное число разновидностей регулировок – на головное оборудование. При этом из всех разновидностей регулировок (частота, полоса канала, наклон АЧХ, уровень сигнала, скорость цифрового потока и др.) наиболее часто встречаемой является регулировка уровней сигналов.

Подавляющее большинство регулировок уровней сигналов, не вдаваясь в технические аспекты принципа регулирования, жаргонно именуют регулировками усиления, что вполне и оправдано, т.к. любую СКТ в первом приближении можно рассматривать как радиоприемное устройство специального назначения с большим числом усилительных каскадов. Именно рассмотрению данного вида регулировок (регулировка усиления) и посвящена настоящая статья.

Регулировки усиления можно разделить на два класса: ручная регулировка усиления (РРУ) и автоматическая регулировка усиления (АРУ).

**Ручная регулировка усиления** может быть выполнена на пассивных (в подавляющем большинстве - резистивных) или активных (электронных) компонентах. В простейшем случае РРУ выполняется в виде П-образного или Т-образного согласованного аттенюатора с характеристическим сопротивлением  $R_0$ . Элементы схем находятся через требуемый коэффициент ослабления по мощности  $\alpha$  по формулам:

Для Т-образного аттенюатора:

$$R_1 = R_0 \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}; \quad R_2 = 2R_0 \frac{\alpha}{\alpha^2 - 1}; \quad (1)$$

для П-образного аттенюатора:

$$R_1 = R_0 \frac{\alpha + 1}{\alpha - 1}; \quad R_2 = 2R_0 \frac{\alpha^2 - 1}{2\alpha}. \quad (2)$$

В регулируемых аттенюаторах все три сопротивления (см. рис.1) регулируются одновременно, по законам, описываемым (1) и (2). Регулируемые аттенюаторы, выполненные по такому принципу, часто именуются резистивными столбиками (см. рис.2). Очевидно, что использование переменных аттенюаторов значительно более удобно в эксплуатации. Тем не менее, им присущ целый ряд недостатков:

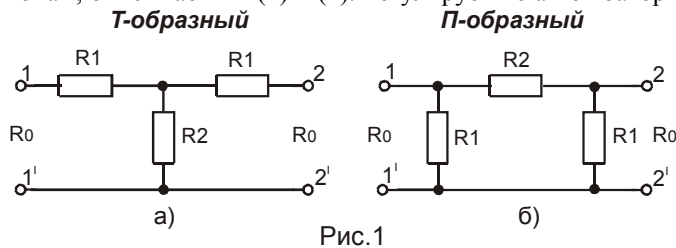


Рис.1

⇒ Возможность броска ослабления (до 1 dB) при механических воздействиях. Данное утверждение объясняется сложностью механического контакта, скользящего одновременно по трем пластинам, на которых методом толстопленочной технологии нанесен неоднородный по толщине резистивный слой разного удельного сопротивления.



Рис.2  
Регулируемый аттенюатор

⇒ Низкая надежность и повышенная чувствительность к влаге, в связи с чем регулируемые аттенюаторы допустимо использовать только в условно герметичных корпусах (с классом защиты не ниже IP54).

⇒ При регулировании изменяется неравномерность АЧХ и коэффициент возвратных потерь. Данный факт также обязан особенностям конструктивного исполнения аттенюаторов. Даже подгонка изготавливаемых резистивных пластин (осуществляется лазерным прожигом) не позволяет добиться идеальности согласования с законами изменения резисторов от требуемой величины ослабления (см. формулы 1 и 2).

Напомним читателям, что коэффициент возвратных потерь  $R$  связан с коэффициентом отражения  $|\Gamma|$ , коэффициентом стоячей волны по напряжению  $K_{cm.U}$  и коэффициентом бегущей волны  $R_{бв}$  зависимостями:

$$R_{[dB]} = 20 \lg |\Gamma|^{-1} = 20 \lg \left( \frac{K_{cm.U} - 1}{K_{cm.U} + 1} \right) = 20 \lg \left( \frac{1 - K_{бв}}{1 + K_{бв}} \right). \quad (3)$$

Сравнительные характеристики различных коэффициентов согласования представлены в табл. 1. Там же представлена и величина вносимых потерь  $\alpha_n$ , обязанная рассогласованию только на одних (например, на входе) зажимах четырехполосника (к которому можно отнести и аттенюатор).

Таблица 1

$R_s$ , dB	6	10	14	18	22	26
$[G]$ , ед.	0,50	0,32	0,20	0,13	0,08	0,05
$K_{см.У}$ , ед.	3,01	1,93	1,50	1,29	1,17	1,11
$K_{бв}$ , ед.	0,33	0,52	0,67	0,78	0,85	0,91
$\alpha_n$ , dB	1,26	0,46	0,18	0,07	0,03	0,01

Фиксированные аттенюаторы выполняются с использованием высокоточных ЧИП-резисторов по SMD технологии (технология поверхностного монтажа), в связи с чем достигается высокая точность ослабления при малой неравномерности АЧХ и отличном согласовании в очень широком диапазоне частот.

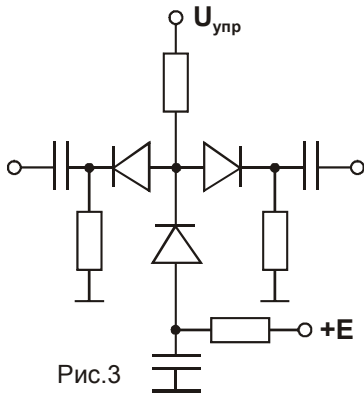
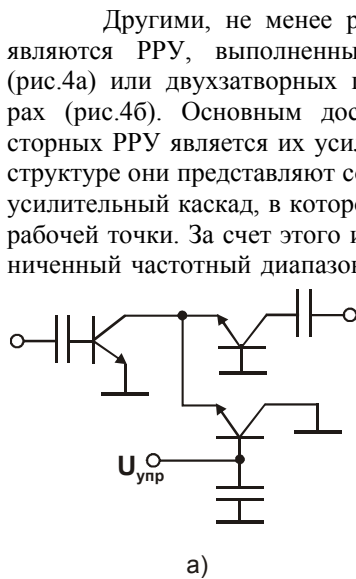
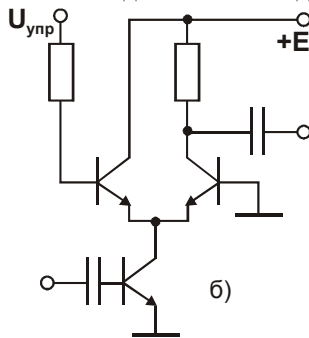


Рис.3

Другими, не менее распространенными, являются РПУ, выполненные на биполярных (рис.4а) или двухзатворных полевых транзисторах (рис.4б). Основным достоинством транзисторных РПУ является их усиление, т.к. по своей структуре они представляют собой традиционный усилительный каскад, в котором изменение коэффициента передачи достигается за счет изменения положения рабочей точки. За счет этого и проявляются недостатки таких РПУ: искажения АЧХ при регулировании, ограниченный частотный диапазон, пониженный динамический диапазон и изменение входного/выходного импедансов<sup>2</sup>, за счет чего нарушается режим согласования. За счет выше отмеченных недостатков, транзисторные регуляторы большей частью находят применение в канальных усилительных устройствах, например, в составе канальных модулей головных станций (ГС). Для устранения отмеченных недостатков транзисторных регуляторов (обобщенный термин, к которому можно отнести как РПУ, так и АРУ), используются специальные схемотехнические ухищрения, например, в виде использования каскодных или дифференциальных каскадов (рис.5).



а)



б)

Рис.5

РПУ на активных электронных компонентах максимально приближена к АРУ. Принцип работы основан на изменении коэффициента передачи под воздействием управляющего напряжения  $U_{упр}$ . Наиболее широкое применение нашли диодные и транзисторные регуляторы. Диодные регуляторы (см. рис.3), в сравнении с транзисторными, обладают более широким диапазоном рабочих частот<sup>1</sup>, хорошим согласованием во всем диапазоне регулирования, высокой температурной стабильностью, большой глубиной регулирования (до 40...60 dB), малыми начальными потерями и малой неравномерностью АЧХ. Основной особенностью диодных РПУ является отсутствие положительного коэффициента передачи (усиления). Тем не менее, благодаря своим достоинствам, они находят широкое применение в самых разнообразных схемотехнических решениях.

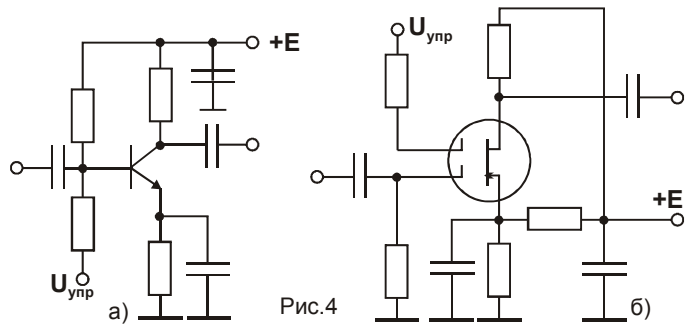


Рис.4

(рис.5).

**Основные положения по АРУ.** Работа практически любого усилительного устройства (домовой или магистральный усилитель, оптический узел, приемный модуль ГС и т.п.) связана с тем, что на его входе присутствуют сигналы с изменяющейся амплитудой. Для СКТ большей частью характерно медленное изменение уровня входного (в основном, это погодные, суточные и сезонные изменения). Пожалуй, единственным исключением является головная станция кабельных модемов (CMTS – Cable Modem Termination System), на входе

<sup>1</sup> В рабочем диапазоне частот должен выдерживаться заявленный коэффициент возвратных потерь – R (см. табл.3) при любой величине вводимого ослабления

<sup>2</sup> Импеданс (impedans) – или импеданс (impedans) – полное сопротивление, или адмитанс (admitans) – полная проводимость.

приемников которой уровни сигналов временами могут изменяться на десятки децибел. В составе таких систем используются специальные импульсные быстродействующие АРУ. Всякое изменение уровня входного (следовательно, и выходного) сигнала вызывает его искажение. Так, снижение уровня входного сигнала приводит к снижению отношения сигнал/шум ( $S/N$ ), а его увеличение - к увеличению интермодуляционных составляющих второго и третьего порядков (CSO и СТВ соответственно). Более того, конечное устройство потребления (например, абонентский телевизионный приемник или кабельный модем - СМ) имеет вполне конечный ограниченный диапазон входных сигналов.

Все это вызывает необходимость использования встроенных систем автоматической регулировки усиления, позволяющих поддерживать относительно стабильный выходной уровень в заданном диапазоне входных сигналов. Важным моментом является тот факт, что при использовании АРУ, номинальный коэффициент передачи усилительного устройства будет понижен, как минимум, на половинную величину диапазона регулирования АРУ (см. рис.6). Например, если максимальный коэффициент передачи магистрального усилителя без АРУ составляет 35 dB, то его номинальный коэффициент усиления (в нормальных климатических условиях) при установке АРУ с начальными потерями в 1 dB и глубиной регулирования в  $\pm 5$  dB составит 29 dB ( $35-1-5=29$ ).

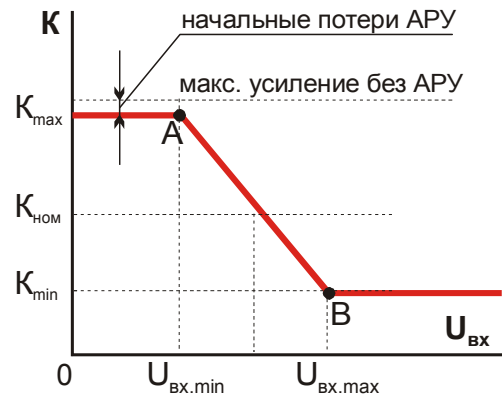


Рис.6

Управляющее напряжение  $U_{упр}$  снимается с части тракта передачи за счет включения направленного ответвителя, детектируется, усиливается и подается на регулируемое устройство (РУ). Поскольку действие АРУ зависит от напряжения сигнала ( $U_{упр}$ ), то наиболее простой способ формирования управляющего напряжения состоит в использовании выпрямленного напряжения принимаемого сигнала. Как правило, амплитуды изменяющегося выпрямленного напряжения недостаточно, и в цепь регулирования вводят усилитель постоянного тока (УПТ). Требования к детектору, служащему для формирования управляющего напряжения, отличаются от требований, предъявляемых при приеме амплитудно-модулированных (АМ) сигналов, когда детектор воспроизводит огибающую колебаний. Если бы напряжение от детектора с такими свойствами было подано на РУ, то при возрастании амплитуды сигнала в такт с модуляцией, уменьшался бы коэффициент усиления, а при убывании возрастал; в результате выходное напряжение имело бы практически постоянную амплитуду, т.е. цепь АРУ подавляла бы модуляцию принимаемого сигнала, что недопустимо, т.к. именно в ней заключена полезная информация.

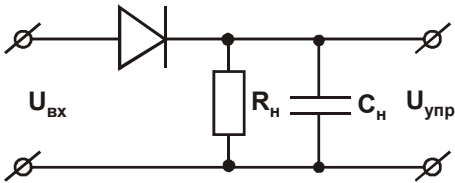


Рис.7

Чтобы не было подавления модуляции, регулирующее напряжение не должно содержать переменной составляющей, соответствующей модуляции. Это можно обеспечить несколькими путями. Наибольшее распространение нашел следующий путь.

Постоянная времени  $R_n C_n$  на выходе детектора (см. рис.7) увеличивается так, чтобы напряжение на конденсаторе  $C_n$  оставалось примерно равным максимальным амплитудам детектируемого напряжения. Этот процесс характеризуется очень медленным разрядом конденсатора. Выходное напряжение обеспечивает максимумы (пики) амплитуды сигнала, не воспроизводя огибающей амплитуд. Такой детектор называется *пиковым*. Физически это означает, что время реакции АРУ много больше периода сигнала, несущего полезную информацию.

Существует несколько схем АРУ, отличающихся по своему структурному построению. Основные из них рассмотрены ниже.

**Схема обратной АРУ.** В этой схеме (рис.8) управляющее напряжение ( $U_{упр}$ ) подается со стороны выхода в направлении входа РУ, что и обусловило название этого вида АРУ. Детектор АРУ (ДЕТ) с учетом его коэффициента передачи  $K_d$  обеспечивает управляющее напряжение, пропорциональное уровню выходного сигнала:  $U_{упр} = K_d \cdot K_{упр} \cdot U_{вых}$ . Фильтр АРУ (ФНЧ) отфильтровывает составляющие частот модуляции и пропускает медленно меняющиеся составляющие напряжения  $U_{упр}$ .

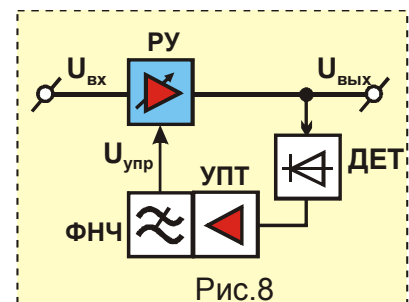


Рис.8

Цепь АРУ, состоящую только из детектора и фильтра, называют *простой АРУ*. В цепь АРУ может включаться усилитель, устанавливаемый после детектора (УПТ). В высоко-качественных АРУ (например, приемных модулях профессиональных ГС) усилитель иногда включают и до и после детектора. В широкополосных усилителях СКТ из-за низких требований, предъявляемых к стабильности уровня выходного сигнала (обычно 0,3...0,5 dB) и малого диапазона изменения уровня входного сигнала (обычно не более  $\pm 5$  dB), с целью минимизации стоимости усилителя в целом, усилитель до детектора практически никогда не устанавливают, а используют только УПТ.

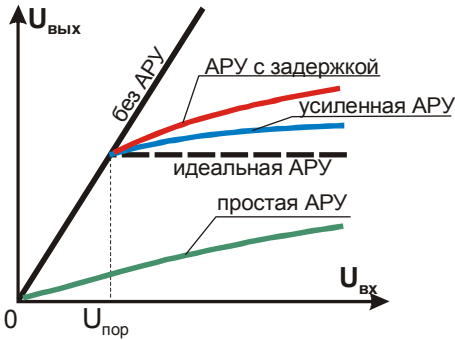


Рис.9

мого на заводе-изготовителе или самим оператором СКТ. С этой целью используется диодный или транзисторный (обладает большей чувствительностью и коэффициентом передачи) детектор, “подзапертый” постоянным напряжением (рис.10а). Детектор не будет действовать, пока  $U < U_з$ , т.е. управляющее напряжение  $U_{упр}$ , подаваемое на РУ, будет отсутствовать (рис.10б).

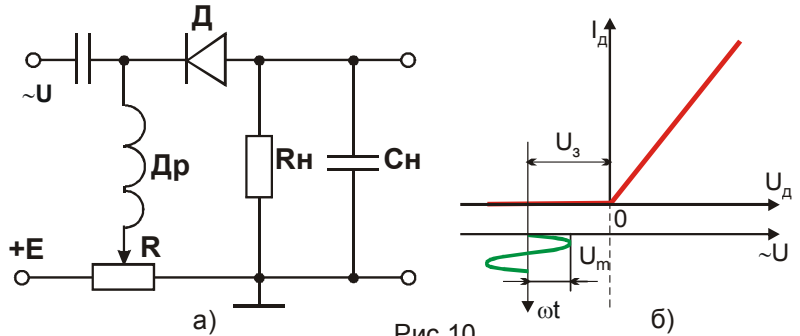


Рис.10

При идеальной работе цепи АРУ с задержкой для  $U_{вх} \geq U_{пор}$  (рис.9) напряжение на выходе РУ постоянно (пунктирная линия рис.9). По мере увеличения коэффициента усиления УПТ, характеристика АРУ все в большей степени приближается к идеальной. Особенностью обратной регулировки является тот факт, что она принципиально не позволяет реализовать идеальную характеристику АРУ. Для обратной АРУ необходимо приращение выходного напряжения  $\Delta U_{вых}$ . Если

допустить, что АРУ идеальна, то  $\Delta U_{вых} = 0$ , при этом  $U_{упр} = const$ ,  $K_o = const$ , регулировка отсутствует, а следовательно,  $U_{вых}$  должно возрасть.

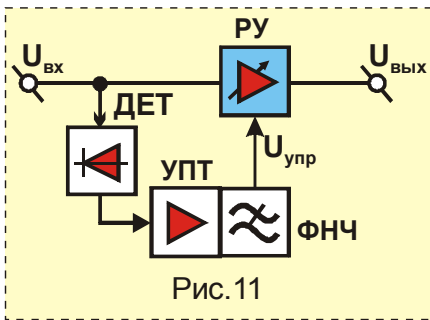


Рис.11

**Схема прямой АРУ** представлена на рис.11. Управляющее напряжение  $U_{упр}$  формируется за счет детектирования входного напряжения  $U_{вх}$ . Выходное напряжение  $U_{вых} = K_o U_{вх}$ . При увеличении  $U_{вх}$  уменьшается  $K_o$ ; при этом их произведение может оставаться постоянным, что в принципе позволяет реализовать идеальную характеристику АРУ (рис.12), но практически добиться этого не удается.

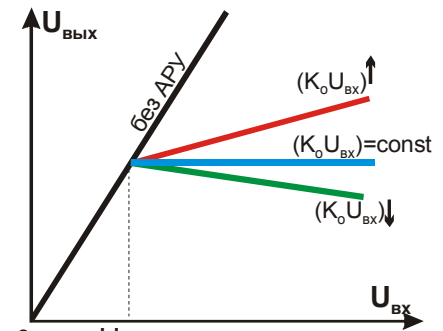


Рис.12

ся.

Прямой АРУ свойствен ряд недостатков, основной из которых состоит в необходимости включать перед детектором в цепи АРУ дополнительный высокочастотный (ВЧ) усилитель с большим коэффициентом усиления. Применительно к широкополосным усилителям СКТ такой вариант вообще является неприемлемым. Более того, прямая АРУ также и нестабильна, т.е. подвержена воздействию различных дестабилизирующих факторов. В связи с этим она нашла ограниченное применение.

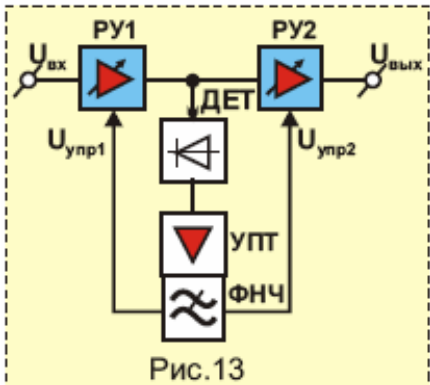


Рис.13

**Схема комбинированной АРУ** (рис.13) рационально использует преимущества обеих схем АРУ: стабильность обратной АРУ и возможность получения идеальной характеристики в прямой АРУ. Для первого РУ это обратная, а для второго – прямая АРУ. Как правило, основная регулировка происходит в первом РУ. Иногда ее называют смешанной АРУ.

**АРУ приемников импульсных сигналов** (рис.14) обладает следующими особенностями:

- ✓ Импульсный сигнал детектируется дважды: вначале детектором радиоимпульсов (ДЕТ<sub>ри</sub>), а затем пиковым детектором (ДЕТ<sub>пик</sub>). Детекторы необходимы как для нормальной работы АРУ, так и для детектирова-

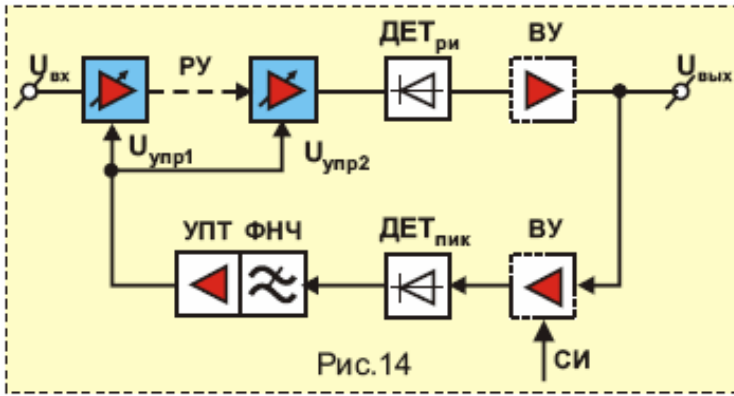


Рис.14

(обычно видеоусилитель) делают стробируемым, который открывается стробирующим (синхронизирующим) импульсом (СИ) на время действия полезного сигнала.

**Основные показатели АРУ.** Из изложенного выше материала следуют следующие основные показатели систем АРУ:

- ❖ Диапазон изменения уровней входных сигналов  $\Delta U_{вх} = U_{вх.мах} - U_{вх.мин}$ . Это значение равно изменению коэффициента передачи РУ от  $K_{мах}$  до  $K_{мин}$  (выражается в децибелах).
- ❖ Диапазон изменения уровней выходных сигналов  $\Delta U_{вых} = U_{вых.мах} - U_{вых.мин}$ . Данный параметр всегда желателен минимального значения, вне зависимости от типа устройства, куда устанавливается АРУ (также выражается в децибелах).
- ❖ Стабильность уровня выходного сигнала при воздействии дестабилизирующих факторов. Зависит от схемотехнических особенностей исполнения системы АРУ.
- ❖ Эффективность АРУ. Определяется как отношение допустимого изменения уровня сигнала на входе  $\Delta U_{вх}$  к диапазону изменения уровня сигнала на выходе  $\Delta U_{вых}$ . Данный параметр характеризует степень приближения реальной регулировочной характеристики АРУ к ее идеальной форме (рис.9).

**Особенности использования АРУ в широкополосных усилителях СКТ.** На основании выше изложенного материала отметим некоторые особенности использования АРУ в широкополосных усилителях. Основным назначением таких АРУ является компенсация изменений уровней входных сигналов (приводящих к его тем или иным искажениям, см. выше), неизбежно наблюдающихся за счет изменения затухания магистрального кабеля при температурных воздействиях.

*Температурный диапазон АРУ.* Одним из важнейших параметров таких АРУ является их собственный температурный диапазон функционирования. Выше (или ниже) определенной температуры, эффективность работы АРУ резко снижается. Она перестает справляться со своими функциями. Так, АРУ, предназначенная для работы в составе усилителя в температурном диапазоне  $-20...+45^{\circ}\text{C}$  с диапазоном регулирования  $\pm 5$  dB будет менее эффективна аналогичной АРУ с диапазоном регулирования  $\pm 3$  dB, но работающей в диапазоне температур  $-40...+60^{\circ}\text{C}$ . Такой немаловажный факт следует учитывать при выборе типа усилителя с АРУ с учетом реального диапазона рабочих температур. Нельзя выбирать и усилители, на который заявлен "температурный диапазон функционирования". Данная фраза свидетельствует только о том, что усилитель будет работоспособен без гарантии заявленных параметров.

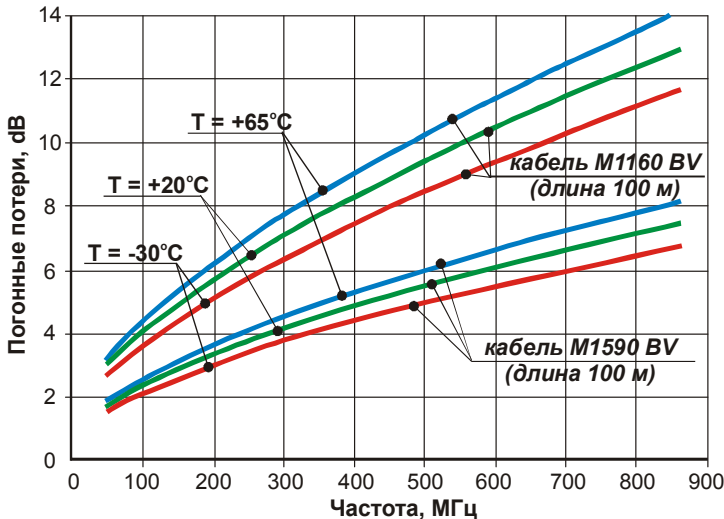


Рис.15

ния сигнала в самом приемнике. Чтобы не ставить два детектора (в цепь сигнала и в цепь АРУ), часто детектор радиоимпульсов и видеоусилитель (ВУ) делают общими.

✓ В интервалах между полезными импульсами могут возникнуть различные помехи (включая импульсы других каналов при многоканальной связи). В этом случае АРУ реагирует на все импульсы, а не только на те, которые должны быть выделены. Для устранения этого недостатка, цепь АРУ открывают только на время действия полезных импульсов, т.е. применяют стробирование. Для этого один из каскадов цепи АРУ

*АРУ с наклоном АЧХ.* Важно отметить, что температурные изменения затухания коаксиального кабеля различны по своей величине на верхней и нижней частотах (см. рис.15). Из этого следует, что уровни сигналов на выходе усилителя будут иметь различные амплитуды на нижней и верхней частотах рабочего диапазона частот при перепаде температур (см. рис.16, сплошные кривые). При использовании стандартной АРУ уровни сигналов будут увеличиваться или уменьшаться (см. рис.17), но перекося АЧХ будет сохраняться.

Стандартная АРУ работает по пилот-сигналу или одной из видео несущих группового сигнала (на входе детектора АРУ устанавливается полосовой фильтр). Для примера, приведенного на рис.16, эта частота составляет 500 МГц. В данной точке уровень выходного сигнала будет жестко зафиксирован, но по краям диапазона уровни выходных сигналов усилителя будут “расползаться”.

Для устранения такого неприятного явления используют АРУ с дополнительным электронно регулируемым эквалайзером. Такая система часто именуется АРУ с регулируемым наклоном (АРУН). В этом случае используют два пилот-сигнала с разными частотами,  $f_1$  и  $f_2$ . По частоте  $f_1$  работает электронный эквалайзер, а по частоте  $f_2$  – электронный аттенюатор (рис.17). Такая АРУН эффективнее стандартной АРУ

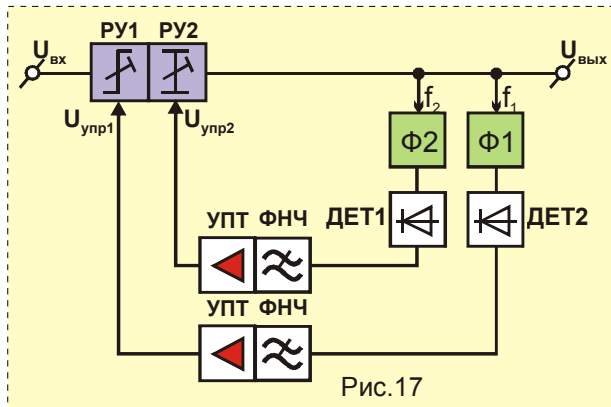


Рис.17

АРУ (следовательно, обладает меньшей стоимостью) и обладает своими особенностями вследствие ее реакции на изменение суммарной мощности.

Отличительной особенностью групповой АРУ является тот факт, что при изменении числа транслируемых каналов она поддерживает неизменными CSO и СТВ, а сам каналный уровень сигналов будет изменяться. Так, при уменьшении числа транслируемых каналов в 2 раза (например, в ночное время, за счет исключения эфирного вещания), каналные уровни сигналов на выходе групповой АРУ увеличатся на 3 dB, но реализуемые значения интермодуляционных искажений (CSO и СТВ) останутся неизменными. При использовании же стандартной АРУ, уровни сигналов сохранились бы прежними, а СТВ улучшилось бы на 3 dB.

Групповые АРУ часто именуют автоматическими регулировками мощности – АРМ. Именно АРМ используются на входах модуляторов оптических сигналов, что позволяет поддерживать стабильным индекс оптической модуляции.

И, в заключение, несколько слов о зарубежной аббревиатуре. Существует две наиболее часто используемые аббревиатуры: AGC – Automatic Gain Control (автоматическое регулирование усиления) и ALC – Automatic Level Control (автоматическое управление уровнем). Разные фирмы-производители одни и те же устройства именуют по разному. Чем это вызвано, авторам выяснить не удалось. Однако, из проведенных рассуждений следует, что для традиционных АРУ приемлема как та, так и другая аббревиатуры, а вот для АРМ – больше подходит аббревиатура ALC, т.к. именно суммарная мощность сигналов является критерием контролируемого уровня.

Для АРУН в аббревиатуру добавляют букву S (Slope - наклон).

Май 2009г.

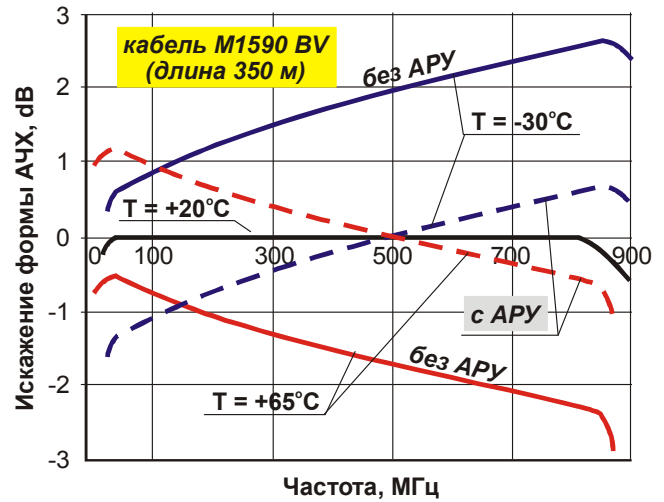


Рис.16

в части поддержания малой неравномерности АЧХ, но значительно дороже. АРУН может быть рекомендована на протяженных участках магистралей. Место установки усилителя с АРУН легко рассчитывается исходя из системных расчетов допустимых перекосов АЧХ.

*Групповая АРУ.* В стандартной АРУ амплитуда управляющего напряжения  $U_{упр}$  пропорциональна уровню пилот-сигнала и не зависит от числа транслируемых каналов и амплитуд других сигналов, отстроенных по частоте. Если перед детектором АРУ не устанавливать полосовой фильтр, то детектирование будет осуществляться по всем сигналам одновременно, т.е. по групповому сигналу. Такая АРУ несколько проще стандартной