Глава 15

СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ

15.1. Система АРУ и ее назначение

Известно, (см. гл. 9), что частотная характеристика затухания линейного тракта имеет две составляющие: постоянную, зависящую от частоты, и переменную, изменяющуюся во времени в процессе эксплуатации в зависимости от окружающих линию условий и, прежде всего, температуры. С учетом разброса длин усилительных участков (это особенно присуще полевым кабельным линиям) и временных изменений затухания цепей линии при изменении температуры от t_{min} до t_{max} общие пределы регулирования усиления ΔS для компенсации этих изменений оказываются достаточно большими.

Составляющие затухания, зависящие только от разброса длин усилительных участков и частоты (регулярные и нерегулярные) компенсируются на всех усилительных пунктах вручную во время настроечных работ с помощью постоянных и переменных корректоров, добиваясь равенства $S=\alpha l_{уу}$. Это равенство должно постоянно соблюдаться в процессе эксплуатации с требуемой точностью, так как нехватка усиления ($S < \alpha l_{уу}$)) приведет к увеличению собственных шумов в каналах передачи, а избыток усиления ($S > \alpha l_{уу}$) – к увеличению нелинейных шумов.

Поэтому устройства АРУ каждого из пунктов линии передачи (ОП, ОУП, НУП, ТП) должны компенсировать временные изменения затухания цепей предшествующих усилительных участков линии.

Совокупность устройств АРУ линейных усилителей всех пунктов линии образует *систему АРУ линейного тракта (АРУ ЛТ),* которая предназначена для обеспечения изменения усиления ЛУС в рабочем диапазоне частот (в линейном спектре) в строгом соответствии с изменением затухания линии на каждом усилительном участке и поддерживать постоянство уровней сигнала на выходе ЛТ.

Как известно, в сетях связи широко используются составные сетевые групповые тракты и образованные на их основе широкополосные каналы передачи. В связи с этим повысились требования к стабильности затухания (усиления) групповых трактов всех систем передачи, что не может быть обеспечено только за счет АРУ ЛТ. Поэтому в многоканальных стационарных и полевых системах передачи появился дополнительный вид автоматической регулировки – АРУ групповых трактов (АРУ ГТ).

Таким образом, *система АРУ* многоканальной линии передачи, состоящая из АРУ ЛТ и АРУ ГТ, *предназначена* для поддержания основных электрических параметров каналов передачи (остаточного затухания и его частотной характеристики, шумовой защищенности) в пределах установленных норм.

15.2. Требования к системе и устройствам АРУ

Основными требованиями к устройствам АРУ и системе АРУ в целом являются следующие: чувствительность, пределы регулирования, погрешность регулирования, скорость регулирования, нечувствительность к относительно большим скачкам уровней передачи.

Чувствительность устройств АРУ характеризуется *порогом чувствительности* – это минимальная величина изменения уровня сигнала Δp, при которой начинается регулирование. Естественно, надо стремиться, чтобы эта величина была по возможности меньшей. В современных системах АРУ удается добиваться величины Δp = 0,04 дБ.

Для всей линии *пределы изменения затухания* $\Delta a_л$ достигают значительных величин (см. гл.9, параграф 9.4). Поэтому для компенсации такого большого временного изменения $\Delta a_л$ устройства АРУ должны равномерно размещаться по всему линейному тракту, то есть изменение усиления $\Delta S = \Delta a_л$ должно распределяться по всем линейным усилителям ЛТ. Это важное требование к системе АРУ.

Необходимые *пределы регулирования* отдельного ЛУС определяются протяженностью и пределами временного изменения затухания прилегающего участка регулирования при изменении температуры от до от t_{min} до $t_{max.}$

От пределов регулирования зависят условия реализуемости конкретных регуляторов: полностью автоматические или частично ручные и частично автоматические.

Погрешность регулирования одиночного регулятора (на одном усилительном пункте) представляет собой отклонение относительных уровней передачи на разных участках группового линейного спектра сигнала от номинального значения в результате регулирования. Эта погрешность зависит от порога чувствительности и неточности регулирования автоматического регулятора, что приводит к расхождению частотной характеристики затухания участка регулирования и усиления усилительного пункта. Величина погрешности является свойством выбранной схемы автоматического регулятора.

Погрешность регулирования всей системы АРУ линейного тракта вызывает отклонение от номинальных значений остаточного затухания (усиления) каналов передачи. Возможное максимальное отклонение остаточного затухания $\Delta a_г$, зависящее от погрешности корректирования на выходе ЛТ не должна превышать норм на допустимое отклонение остаточного затухания, то есть $\Delta a_г = \Delta a_л \leq \Delta a_{гдоп}$.

Допустимая *скорость регулирования* должна учитывать ряд факторов. С одной стороны она должна быть достаточной, чтобы успевать следить за возможными временными изменениями затухания линии. С другой стороны она не

должна быть очень большой, чтобы не вызывать искажений передаваемых сигналов.

При больших скачках уровней передачи в линейном тракте АРУ должна выключаться (блокироваться) и поддерживать усиление всех усилителей в состоянии, предшествующем моменту возмущения.

15.3. Задача АРУ и методы ее решения

Для компенсации изменяющегося во времени затухания *i*-го усилительного участка аналогично должно изменяться и усиление следующего за ним j-го линейного усилителя, а в целом для линейного тракта должно выполняться равенство $\sum_i a_i(f,t) = \sum_j S_i(f,t)$.

Усиление отдельного ЛУС (рис. 15.1) определяется разностью уровней сигнала на его выходе p_2 и входе p_1

$$S = p_2 - p_1 \tag{15.1}$$

Усилитель должен обеспечить точную компенсацию затухания линии, так чтобы $p_2 = p_0$. В практике данное условие можно выполнить с некоторой погрешностью $\Delta p_2 = p_2 - p_0$.

Считая функцию (15.1) линейной, можно записать

$$\Delta S = \Delta p_2 - \Delta p_1, \tag{15.2}$$

где ΔS – регулируемая часть усиления ЛУС; $\Delta p_1 = \Delta a_{уу}$ –ожидаемое изменение уровня входного сигнала, равное изменению затухания усилительного участка $\Delta a_{уу} = \Delta a l_{уу}$; Δp_2 – погрешность регулирования.

Задача АРУ заключается в минимизации Δp_2 на выходе ЛУС при заданной временной нестабильности $\Delta a_{уу}$

$$\Delta p_2 = (\Delta p_1 + \Delta S) \to min, \tag{15.3}$$

то есть добиваться равенства $\Delta p_1 = -\Delta S$: изменение усиления усилителя должно равняться изменению затухания усилительного участка $\Delta S = \Delta a l_{уу}$.

По способу реализации этой задачи различают два метода построения одиночного автоматического регулятора усиления: разомкнутый (косвенный) и замкнутый (прямой).

При разомкнутом или следящем методе АРУ регулирование осуществляется косвенно по входной величине Δp_1, а выходная величина Δp_2 не контролируется. В такой схеме

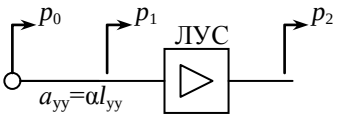

Рис.15.1

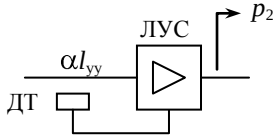

Рис. 15.2

АРУ отсутствует обратная связь, и контур регулирования получается разомкнутым. Примером этого метода является температурная или грунтовая АРУ (рис.15.2). Датчик температуры ДТ размещается в грунте вблизи кабеля на некотором удалении от помещения усилительного пункта и следит за изменением температуры окружающего кабель грунта. Обычно в качестве ДТ используется терморезистор, включенный в качестве управляющего сопротивления в схему амплитудного корректора, а последний – в цепь обратной связи ЛУС. При изменении температуры грунта изменяется сопротивление терморезистора, а, следовательно, и усиление усилителя, приблизительно компенсируя температурное изменение затухания кабеля.

Грунтовая АРУ (термо-АРУ) применяется только на кабельных линиях. Она отличается простотой и дешевизной, однако не обеспечивает желаемой точности регулирования. Одной из причин погрешности регулирования является неизбежное различие между температурой грунта в точке измерения и температурой кабеля на всей протяженности усилительного участка. Другой важной причиной является отсутствие обратной связи в контуре регулирования усиления усилителя, изменения выходного уровня Δp_2 не контролируются и не компенсируются. Поэтому величина погрешности сильно зависит, в силу разных причин, от нестабильности усиления самого ЛУС. Общая погрешность регулирования при косвенном методе может достигать 3…4 дБ, поэтому грунтовая АРУ используется как вспомогательное средство регулирования только на НУП, несколько стабилизируя диаграмму уровней линейного тракта и облегчая работу более точной АРУ, построенной по замкнутому (прямому) методу.

При замкнутом (прямом) методе АРУ регулирование усиления ЛУС производится непосредственно по погрешности выходной величины уровня Δp_2 независимо от того, чем она вызвана – отклонением входного уровня Δp_1, изменением параметров самого ЛУС или устройств регулирования предыдущих регуляторов АРУ, то есть обеспечивается прямая компенсация любых нестабильностей выходного уровня. К замкнутым системам относятся АРУ по контрольным частотам (КЧ). Они, хотя и достаточно сложные по устройству, не имеют перечисленных недостатков разомкнутой системы и применяются как в линейном, так и в групповых трактах всех многоканальных аналоговых систем передачи.

АРУ каждого ЛУС выполняется в виде замкнутой системы с обратной связью, обеспечивающей минимизацию погрешности выходного уровня Δp_2 по погрешности сигнала КЧ, так как номинальный уровень КЧ изменится на такую же величину Δp_2, как и передаваемые сигналы линейного спектра частот

(вблизи размещения КЧ) $\Delta p_{\text{кч}} = \Delta p_2$. Следовательно, при минимизации с помощью АРУ погрешности $\Delta p_{\text{кч}}$ одновременно будет точно минимизирована погрешность линейного спектра частот вблизи КЧ и с некоторой погрешностью между КЧ.

Следует еще раз подчеркнуть, что важнейшее достоинство такой системы АРУ заключается в том, что погрешность регулировки выходного уровня Δp_2 на выходе каждого ЛУС практически не зависит от погрешности АРУ предыдущих ЛУС, поэтому диаграмма уровней передачи ЛТ будет выдержана с максимальной точностью, а стабильность затухания (усиления) линейного тракта будет определяться в основном точностью АРУ последнего ЛУС (в приемном тракте линейного оборудования оконечной станции).

Отметим также некоторые недостатки системы АРУ по КЧ:

на оконечных станциях системы передачи требуются источники КЧ, а на всех усилительных пунктах и в линейном оборудовании оконечных станций – специальные приемники КЧ, что несколько усложняет и удорожает аппаратуру;

цепочечное включение устройств АРУ от одного источника тока КЧ имеет сложный переходный процесс регулирования диаграммы уровней при изменениях уровня в любых местах ЛТ и одновременной работе практически всех регуляторов цепочки АРУ;

всякий перерыв или большой скачок уровня КЧ (случайные или вызванные аварией на линии) требует прекращения работы АРУ и сохранения диаграммы уровней передачи до выяснения и устранения причин изменения уровня, поэтому во всех устройствах АРУ должна предусматриваться блокировка (выключение) регулирования и сохранение (память) состояния регуляторов и усиления в положениях, в которых они находились перед обрывом или резким изменением уровня тока КЧ.

Устройства блокировки также усложняют аппаратуру. Если же не предусмотреть блокировки АРУ, то при перерыве (скачкообразном уменьшении) уровня КЧ все АРУ будут реагировать на это увеличением усиления всех ЛУС, и после восстановления линии (устранения неисправности) на выходе усилителей окажутся большие уровни передачи, что может привести к самовозбуждению, как самих усилителей, так и всего линейного тракта, то есть к потере связи по всем каналам системы передачи. Для восстановления связи потребовалось бы заново настраивать диаграмму уровней ЛТ.

Следует также иметь ввиду, что передача по многоканальному тракту контрольных частот увеличивает его загрузку, что может повлечь за собой ухудшение линейности тракта, увеличение помех нелинейного происхождения. Чтобы избежать этих негативных последствий, уровни передачи КЧ устанавливаются значительно ниже номинальных уровней передачи сигнала (примерно на 17…30 дБ).

15.4. Устройства АРУ по контрольным частотам

15.4.1. Типовая структура АРУ по КЧ

Типовая структура АРУ по КЧ линейного или группового усилителя представлена на рис. 15.3. Схема содержит замкнутый контур регулирования – петлю обратной связи, в которую входит приемник контрольного канала ПКК и объект регулирования ОР (в данном случае ЛУС). ПКК обеспечивает выделение из тракта передачи контрольной частоты, оценку ее уровня и управление регулировкой усиления ЛУС через автоматический регулятор АР и корректирующий четырехполюсник с одним регулирующим (управляющим) элементом в его схеме (см. гл.14). В качестве регулирующего элемента применяется терморезистор (термистор) Т. Рассмотрим назначение и особенности свойств основных элементов ПКК.

Полосовой фильтр ФКЧ служит для непосредственного выделения КЧ из группового спектра, и к его параметрам предъявляются довольно жесткие требования: ФКЧ должен быть узкополосным, чтобы на вход ПКК не могли попасть значительно более высокие по уровню (на 10…20 дБ выше уровней КЧ) канальные сигналы, поэтому разность затухании фильтра в полосе задерживания и полосе пропускания должна быть не менее 60…70 дБ; ФКЧ должна иметь высокое входно сопротивление, чтобы избежать шунтирования составляющих линейного спектра, в том числе и выделяемого сигнала КЧ; так как ФКЧ подключается параллельно групповому тракту на выходе ЛУС, то есть в точке с высоким уровнем сигналов, то элементы фильтра не должны вносить нелинейные искажения. Перечисленные требования можно выполнить, если строить такие фильтры при частотах свыше 200 кГц на кварцевых резонаторах, а в диапазоне 50…200 кГц применять электромеханические фильтры.

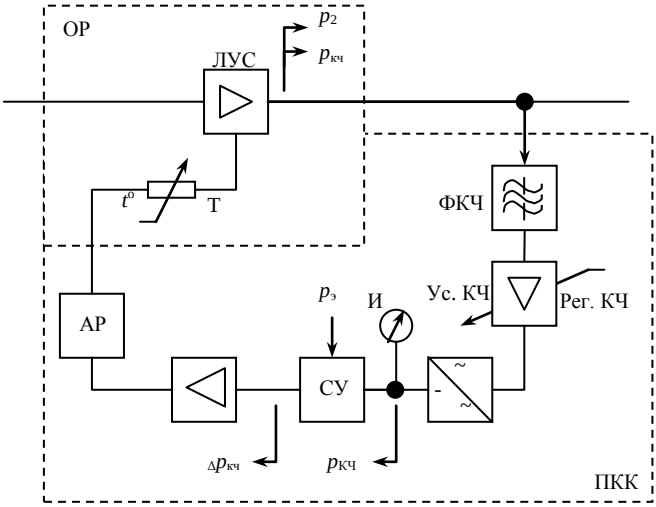

Рис. 15.3

Регулируемый усилитель (Ус. КЧ) увеличивает уровень выделенной контрольной частоты до значения, необходимого для нормальной работы последующих узлов. Так как в сравнивающем устройстве СУ определяется погреш-

ность $\Delta p_{кч}$ по постоянному току, то усиленный ток КЧ выпрямляется, и его уровень $p_{кч}$ сравнивается с эталонным значением уровня постоянного тока $p_э$.

При номинальном уровне $p_{кч}$ на выходе ЛУС на СУ должен подаваться такой уровень, чтобы на его выходе $\Delta p_{кч} = p_э - p_{кч} = 0$. Это достигается регулировкой усиления Ус. КЧ (на передней панели блока ПКК имеется шлиц Рег.КЧ). Выпрямленное значение $p_{кч}$ контролируется стрелочным индикатором И.

При отклонении уровня передачи на выходе ЛУС от номинального на небольшую величину Δp_2 на такую же величину отклонится и уровень КЧ ($\Delta p_{кч} = \Delta p_2$). Эта погрешность появится на выходе СУ и после усиления усилителем постоянного тока УПТ воздействует на автоматический регулятор АР, который в зависимости от знака $\Delta p_{кч}$ уменьшает или увеличивает усиление усилителя путем изменения сопротивления управляющего термистора Т схемы корректирующего четырехполюсника ЛУС, сводя погрешность Δp_2 до минимума. Амплитудный корректор является частью АР, который находится в схеме регулируемого усилителя – на его входе, в межкаскадной цепи или в цепи отрицательной обратной связи.

АРУ по КЧ, имея рассмотренную типовую структуру, различаются по числу применяемых контрольных частот. АРУ может быть одночастотная, 2-х или 3-х частотная (иногда 4-частотная). Одночастотные АРУ применяются в групповых трактах и малоканальных линейных трактах. АРУ с двумя и более контрольными частотами используют многоканальные линейные тракты. Для групповых трактов номиналы КЧ стандартизированы рекомендациями МСЭ: для первичного тракта – 84,14 кГц, вторичного – 411, 86 кГц и третичного –1552 кГц. Для одинаковых по числу каналов линейных многоканальных трактов число и номиналы КЧ устанавливаются требованиями ЕСЭ. Так, линейные тракты 60-канальных СП (К-60П, П-306, линейный спектр 12…252 кГц) имеют три КЧ: для плоской АРУ 248кГц, наклонной – 16 кГц и криволинейной – 112 кГц. Системы передачи П-306 и П-330-60, кроме указанных, используют четвертую КЧ (32 кГц) для дополнительной криволинейной регулировки, а также контрольную частоту 266 кГц для одночастотной АРУ НУП.

Как отмечалось в гл. 9, наиболее точная компенсация амплитудно-частотных искажений в тракте осуществляется вблизи расположения КЧ. Поэтому, чем более многочастотная АРУ, тем точнее корректируется АЧХ линейного тракта.

15.4.2. Регуляторы АРУ

По характеру процесса регулирования или типу регулятора находят применение АРУ с пропорциональным регулятором (П-регулятором), АРУ с интегральным регулятором (И-регулятором) и комбинированная АРУ с ПИ-регулятором.

АРУ с пропорциональным регулированием. В исходной формуле (15.2) считаем входящие величины мгновенными значениями усиления и уровней, тогда изменения усиления будут пропорциональными изменению погрешности Δp_2

$$\Delta S = -k\Delta p_2 , \qquad (15.4)$$

где k – коэффициент пропорциональности.. Знак минус учитывает, что при повышении уровня p_2 усиление должно уменьшаться, а при понижении (Δp_2 с отрицательным знаком) – повышаться.

По физическому смыслу усиление не может изменяться мгновенно из-за неизбежной инерционности всего замкнутого контура автоматического регулирования и особенно самого автоматического регулятора (терморезистора). Реакцию регулятора на скачок входного уровня (см. рис.15.4)

$$\Delta p_2 = \begin{cases} 0 \text{ при } t < 0 \\ \Delta p_1 \text{при } t \geq 0 \end{cases}$$

можно учесть, если принять в (15.4)

$$k = k_{\text{П}}(1 - e^{-t/\tau}), \qquad (15.5)$$

где $k_{\text{П}}$ – статический коэффициент усиления по петле регулирования, τ – постоянная времени регулятора (время нагрева терморезистора). Подставляя в (15.2) значения ΔS из (15.4) и k из (15.5), получим выражение для процесса минимизации Δp_2.

$$\Delta p_2 = \frac{\Delta p_1}{1 + k_{\text{П}}(1 - e^{-t/\tau})} . \qquad (15.6)$$

Из формулы и графика рис.15.4 видно, что в момент скачка входного уровня (t=0) такой же скачок будет и на выходе ЛУС ($\Delta p_2 = \Delta p_1$), а к концу процесса регулирования ($t \to \infty$) погрешность регулирования стремится к величине $\Delta p_2 = \Delta p_1 / (1 + k_{\text{п}})$.

Таким образом, АРУ с П-регулятором присуще свойство регулирования со статической погрешностью. Поэтому АРУ с пропорциональным регулятором называется *статической АРУ.* Приемлемая погрешность Δp_2 обеспечивается выбором коэффициента усиления петли обратной связи $k_{\text{П}}$.

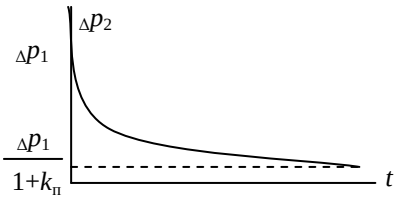

Рис.15.4

Достоинством статической АРУ является простота регулятора – это терморезистор с прямым или косвенным подогревом в схеме четырехполюсника с одним управляющим сопротивлением

(см. гл.14). Однако точность регулирования оказывается недостаточной, а самый большой недостаток – отсутствие памяти, поэтому П-регулятор применяется в качестве вспомогательного в двухскоростных АРУ.

Сопротивление терморезистора $R_{\text{Т}}$ связанно с током подогрева формулой $R_{\text{т}} = R_{min} e^{b/I_п^2}$, где R_{min} – минимальное сопротивление $R_{\text{Т}}$ при токе подогрева $I_{\text{П}} \to \infty$, b – коэффициент пропорциональности. График этой зависимости приведен на рис.15.5.

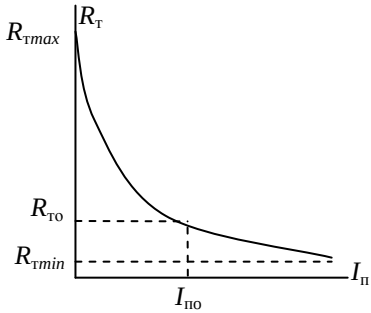

Рис.15. 5

На нем обозначено значение $R_{\text{т}} = R_{\text{т}0}$ при номинальном уровне на выходе ЛУС $p_{\text{вых}} = p_0$ и ток подогрева в этом состоянии АРУ $I_{\text{п}} = I_{\text{п}0}$.

АРУ с интегральным регулированием. И-регулятор обеспечивает пропорциональность между скоростью изменения усиления и величиной Δp_2 $\frac{d}{dt}\Delta S = -k_И \Delta p_2$. Отсюда

$$\Delta S = k_u \int_0^t \Delta p_2 dt \qquad (15.7)$$

Выражение (15.7) определяет название И-регулятора. Подставляя (15.7) в (15.2), получим интегро-дифференциальное уравнение $\Delta p_2 + k_u \int_0^t \Delta p_2 dt =$ $= \Delta p_1$,решение которого дает зависимость изменения выходного уровня Δp_2 от изменения входного Δp_1.

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 e^{-k_u t}. \qquad (15.8)$$

Временной график минимизации Δp_2 по этой формуле показан на рис.15.6 (график а). В момент скачка уровня (t = =0) на входе такой же скачок будет и на выходе $\Delta p_2 = \Delta p_1$. К концу процесса регулирования ($t \to \infty$) $\Delta p_2 \to 0$, то есть в принципе может быть точная регулировка без статической погрешности, поэтому такая АРУ называется также *астатической.*

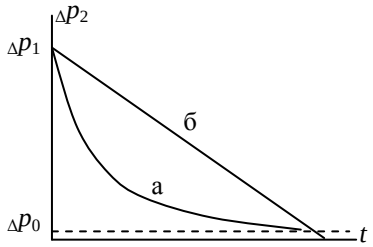

Рис.15. 6

Однако за счет трения все И-регуляторы имеют зону нечувствительности с пороговым значением Δp_0, после которого начинается регулирование.

На практике в И-регуляторах применяется постоянная скорость регулирования $\frac{d}{dt}\Delta S = V = \text{const}$, при которой

$$\Delta S = \int_0^t V dt = Vt \qquad (15.9)$$

Это, например, регулятор с двигателем, который включается в работу с помощью порогового устройства (реле) при $\Delta p_2 > \Delta p_0$ и выключается при $\Delta p_2 = \Delta p_0$. С учетом (15.2) и (15.9) выходная погрешность будет изменяться по закону $\Delta p_2 = \Delta p_1 - Vt$ (график б рис.15.6).

Важнейшим достоинством И-регулятора является наличие памяти, поэтому он применяется практически во всех устройствах АРУ аналоговых систем передачи.

15.5. Динамика АРУ линейного тракта

15.5.1. Особенности переходного процесса в линейном тракте с АРУ

Естественные изменения затухания усилительных участков при изменении окружающих условий эксплуатации протекают медленно и плавно, не вызывая каких-либо осложнений в работе АРУ. Чтобы АРУ успевала компенсировать эти изменения, скорость регулирования выбирается несколько выше ожидаемой максимальной скорости изменения затухания.

Наряду с этим в эксплуатации неизбежны скачкообразные изменения уровня токов контрольных частот с относительно малой амплитудой 1…2 дБ из-за коммутаций в цепях питания, генераторного оборудования, подключения измерительных приборов и т.п.

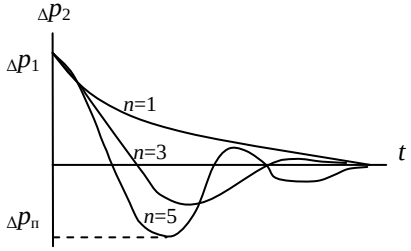

Рис.15. 7

Скачки уровня приводят к сложному переходному процессу установления уровня на выходе последнего усилителя линейного тракта, так как в работе участвуют все усилители с АРУ по КЧ, находящиеся за точкой возмущения. Действительно (рис.15.7), если скачок уровня Δp_1 будет на входе ЛУС-1, то

этот скачок одновременно воспримется всеми последующими ЛУС, на их выходе появится изменение уровня $\Delta p_2 = \Delta p_1$, что заставит работать все регуляторы АРУ. При этом работа каждого регулятора зависит от работы всех предыдущих. Очевидно, что чем больше регуляторов в ЛТ, тем сложнее будет переходный процесс. Примерный график изменения уровня на выходе ЛТ при скачке уровня в его начале на Δp_1 показан на рис. 15.7 для различного числа n регуляторов в цепочке. Такой процесс одинаков для П-регуляторов и И-регуляторов, отличия будут лишь в масштабе времени и в погрешности регулирования на выходе последнего ЛУС.

Отметим особенности переходного процесса в цепочке из n усилителей с АРУ по КЧ: 1. Процесс имеет колебательный затухающий характер. Важно, что в этом случае практически исключается опасность незатухающих колебаний уровня Δp_2 на выходе ЛТ. Это объясняется тем, что цепочка АРУ (см. рис.9.7 в гл. 9) является разомкнутой системой, и при устойчивости каждого отдельного регулятора она также будет устойчивой. Каждый отдельный регулятор (пропорциональный и интегральный) по принципу действия является устойчивым, что видно по переходному процессу из рис.15.4, 15.6 и 15.7 при n=1. Следовательно, отклонения уровня на выходе ЛТ будут убывать. 2. Число волн колебания, их амплитуда и время установления возрастают с увеличением первоначального скачка Δp_1 и числа регуляторов n в цепочке. 3. Начальная скорость изменения уровня на выходе ЛТ $(d/dt)\Delta p_2$ пропорциональна числу регуляторов, то есть $V_{max} = nV_p$, , где V_p – скорость регулировки каждого из n регуляторов. 4. Возникает перерегулировка, то есть выбросы уровня Δp_2 противоположного знака, причем первые из них Δp_n соизмеримы с амплитудой первоначального скачка $\Delta p_2 = \Delta p_1$.

Особенности переходных процессов в цепочке АРУ в конечном счете сказываются на нестабильности остаточного затухания (усиления) в каналах передачи (ТЧ и ШК), поэтому в современных многоканальных АСП используются различные способы и меры, значительно улучшающие динамику АРУ, а значит и качество каналов передачи.

15.5.2. Пути улучшения динамики АРУ линейного тракта

1. Для улучшения переходных процессов каждого регулятора применяется двухскоростное регулирование с помощью двух самостоятельных регуляторов: первый – пропорциональный с небольшим пределом регулирования (около 2 дБ), он должен быстро реагировать на скачок уровня и отрегулировать его с определенной статической ошибкой; второй – интегральный, медленно работающий, с более широкими пределами регулирования (около 5 дБ), высокоточный с блокировкой и памятью предназначен для компенсации медленных изменений затухания и исправления статической ошибки быстрого регулятора при небольших скачках уровня. Такие регуляторы применяются в АРУ линейных трактов систем передачи П-300, 301, 302.

2. Исключение применения в НУП температурных (грунтовых) АРУ и введение локальной АРУ по КЧ НУП (обычно одночастотной).
3. Уменьшение числа автоматических регуляторов цепочки АРУ, работающих от одного источника тока КЧ. Этому способствуют организуемые на линиях транзитные пункты по ТЧ и по групповым трактам, в которых подавляются токи КЧ с предыдущего транзитного участка и вводятся заново на последующий участок от других источников тока КЧ. На уменьшение числа регуляторов, работающих от одного источника тока КЧ, направлена и локализация АРУ НУП, когда в линейном тракте для АРУ ОУП между транзитными пунктами применяются одни ЛКЧ, а для работы АРУ НУП на участках ОП (ОУП) – ОУП (ОП) передаются отдельные КЧ.
4. При значительных скачках уровня (более 3 дБ) применяется блокировка (выключение) работы всех регуляторов АРУ, следующих за местом возмущения и запоминание состояния регуляторов и усиления каждого усилителя и тракта в целом на момент возмущения. После устранения причин возмущения система АРУ восстанавливается без каких-либо усилий.

15.6. Применяемые схемы АРУ

Различные схемы АРУ, применяемые на практике, отличаются особенностями построения исполнительного устройства – автоматического регулятора. Поэтому по типу автоматического регулятора именуются и системы АРУ. Как наиболее используемые на практике ниже рассмотрены системы АРУ: электромеханическая, магнитоэлектрическая, электронная, электронная на трансфлюксорах, электрохимическая.

Электромеханическая АРУ применяется в сочетании с электротермической, использующей усиленный ток сигнала погрешности $\Delta p_{\text{кч}}$ для подогрева термистора, управляющего затуханием регулирующего четырехполюсника в схеме ЛУС. Однако недостатками электротермической АРУ являются небольшие пределы регулирования, сложность блокировки и отсутствие памяти. В электромеханической АРУ регулировка обеспечивается за счет вращения оси регулятора тока подогрева термистора при помощи миниатюрного индукционного двигателя переменного тока частотой 400 Гц, снабженного редуктором с низким передаточным числом. Электродвигатель включается на вращение в ту или иную сторону в зависимости от изменения уровня тока КЧ (уменьшение или увеличение относительно номинального уровня). Вариант схемы электромеханической АРУ приведен на рис. 15.8. Здесь управление двигателем осуществляется при помощи моста переменного тока. За счет разбалансировки моста при изменении нелинейного сопротивления $Z_{\text{н}}$ в зависимости от изменения тока КЧ в ту или иную сторону от номинального значения на двигатель подается частота 400 Гц, который, вращаясь в ту или иную сторону, изменяет подогрев тер-

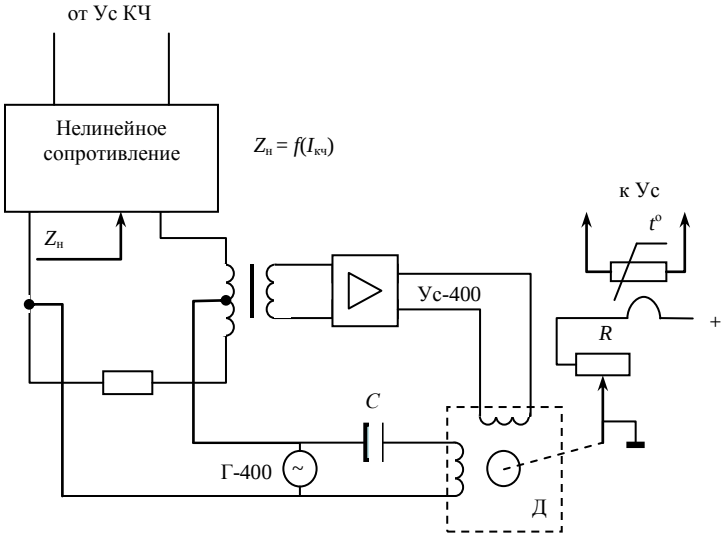

Рис. 15.8

мистора и усиление усилителя. В системе передачи К-60П для управления двигателем используются реле.

В электромеханической АРУ сравнительно просто реализуется блокировка и память, обеспечивается высокая точность интегрального регулирования при значительных пределах изменения затухания линии. Однако имеются и недостатки: громоздкость элементной базы, наличие движущихся и трущихся механических частей.

Магнитоэлектрическая АРУ обеспечивает двухскоростное пропорциональное и интегральное регулирование. Особенностью этой АРУ является двигатель постоянного тока, называемый магнитоэлектрическим регулирующим устройством (МРУ). Упрощенная схема магнитоэлектрической АРУ приведена на рис. 15.9. МРУ заполнено вязкой жидкостью. Якорь двигателя постоянного тока может поворачиваться в одну и другую сторону в пределах 180°. Трение в вязкой среде обеспечивает небольшую скорость вращения, что позволяет избавиться от редуктора. С осью якоря жестко связан переменный конденсатор, который управляет током подогрева термистора от отдельного генератора переменного тока частотой 10 кГц через выпрямитель и усилитель постоянного тока (УПТ). При пропадании тока КЧ МРУ остается в предшествующем положении, что просто решает вопрос блокировки с памятью. При скачкообразном измене-

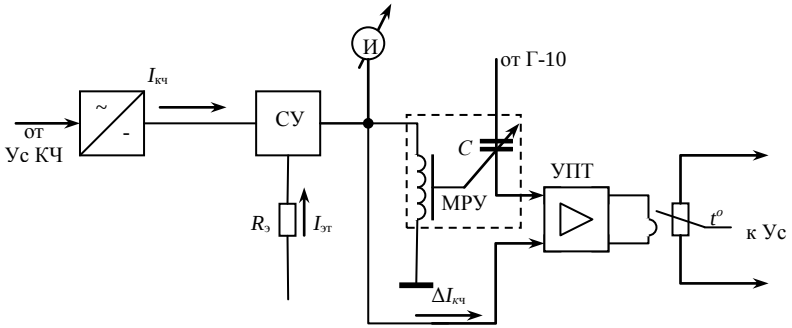

Рис. 15.9

нии уровня КЧ (не более 3 дБ) обеспечивается быстрая пропорциональная регулировка: сигнал погрешности $\Delta p_{кч}$ (на схеме $\Delta I_{кч}$) с выхода сравнивающего устройства СУ поступает непосредственно на вход УПТ, усиливается и изменяет температуру термистора до начала действия МРУ. А затем МРУ, обеспечивая интегральную регулировку, уточняет регулирование. При скачке уровня $\Delta p_{кч} >$ ± 3 дБ с выхода СУ предусмотрена цепь блокировки АРУ, в которой срабатывает реле блокировки, выключающее АРУ и включающее сигнал аварии (на схеме не показано). Магнитоэлектрическая АРУ при отсутствии трущихся контактов, высокой экономичности и простоте по сравнению с электромеханической АРУ за счет двухскоростного регулирования обеспечивает улучшенные динамические характеристики. Однако остались движущиеся механические части, громоздкость, что ограничивает возможности миниатюризации. Применяется в полевых системах передачи комплекса “Топаз”.

Электронная АРУ в своей основе имеет реверсивный счетчик импульсов на триггерах и работает следующим образом. Появление погрешности уровня $\Delta p_{кч} > p_0$ на выходе сравнивающего устройства запускает датчик импульсов, число которых пропорционально времени существования погрешности. Импульсы регистрируются счетчиком, и суммарный ток триггеров, находящихся в определенном положении, используется для подогрева управляющего термистора. Эта АРУ имеет блокировку и память (при пропадании тока КЧ триггеры остаются в том же положении), все элементы схемы выполняются на цифровой интегральной элементной базе, отсутствуют механически вращающиеся и трущиеся части. Единственным недостатком электронной АРУ является то, что после перерыва электропитания триггеры счетчика оказываются в случайных положениях (разрушается память), и потребуется определенное время для восстановления прежнего состояния системы АРУ и линейного тракта в целом. По этой причине электронные АРУ непригодны для военно-полевых систем передачи и находят применение в стационарных СП (например, в П-306).

Электронная АРУ на трансфлюксорах – это модификация электронной АРУ, отличающаяся тем, что вместо реверсивного счетчика на триггерах применен трансфлюксор, который представляет собой магнитный элемент с множеством устойчивых состояний и выполняет роль регулирующего и запоминающего устройства (РЗУ). Помимо высокой точности, малых габаритов, требуемых механических и климатических свойств трансфлюксор обеспечивает хранение информации об уровне тока КЧ без потребления энергии и считывание информации без ее разрушения.

Принцип работы АРУ на трансфлюксорах поясним упрощенной схемой, применяемой в СП комплекса “АЗУР” (рис.15.10). После выделения фильтром, усиления и выпрямления КЧ подается на пороговое устройство сравнения (ПУС), к которому подведен эталонный ток противоположной полярности. На выходе ПУС формируется ток погрешности уровня $\Delta p_{кч} = \Delta p_2$, который запускает формирователь импульсов записи-считывания (ФИЗС), откуда в зависимости от знака погрешности $\Delta p_{кч}$ на РЗУ подаются импульсы положительной или отрицательной полярности, соответственно намагничивая магнитный элемент. Одновременно с РЗУ считывается записанная информация в виде двухполярной последовательности импульсов с амплитудой, пропорциональной алгебраической сумме числа записанных в памяти положительных и отрицательных импульсов. Эти импульсы выпрямляются, усиливаются в УПТ и поступают в цепь подогрева термистора. Процесс записи-считывания производится до тех пор, пока сигнал ошибки $\Delta p_{кч}$ не будет снижен до уровня чувствительности

дБ (это И- регулятор). При этом ПУС закрывается и выключает ФИЗС, однако считывание информации с РЗУ продолжается, обеспечивая для термистора ток подогрева, соответствующий номинальному значению выходного уровня усилителя. Сигнал погрешности $\Delta p_{кч}$ кроме ПУС поступает также на пороговое устройство блокировки ПУБ, которое при изменении уровня КЧ $\Delta p_{кч} > \pm 3{,}5$ дБ блокирует РЗУ. Управляется работа всей схемы цифровой АРУ от импульсного генератора Г. Система АРУ на трансфлюксоре имеет все положительные качества электронной АРУ и в дополнение важное преимущество –

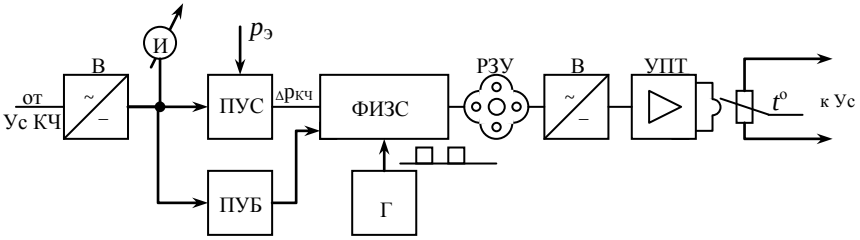

Рис. 15.10

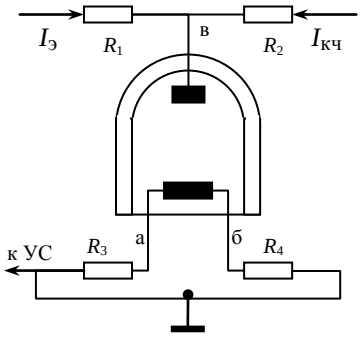

Рис. 15.11

обеспечивает сохранение памяти при выключении электропитания аппаратуры.

Электрохимическая АРУ использует в качестве автоматического интегрального регулятора электрохимический элемент мемистор (рис.15.11). В миниатюрном баллоне, заполненном пастообразным электролитом, помещается электрод считывания аб и электрод управления в. К электроду управления подключается сравнивающее устройство $R1$-$R2$, на один вход которого подается выпрямленный ток КЧ, а на другой – эталонный ток. Ток погрешности уровня $\Delta p_{кч}$, протекающий между электродами в и аб, управляет работой мемистора. В зависимости от его полярности происходит либо гальваническое осаждение металла на электроде аб, либо его анодное растворение, что приводит, соответственно, к уменьшению или увеличению сопротивления электрода считывания. Если включить этот электрод в схему корректирующего четырехполюсника усилителя, то он может служить одновременно управляющим сопротивлением и элементом памяти, так как при отключении электропитания сопротивление электрода сохраняется неограниченно долго. Электрохимическая АРУ – малогабаритное и простое устройство, однако, пока не отвечает требованиям по стабильности памяти и температурному диапазону (пределам регулирования). Находит применение в многоканальных системах передачи коаксиальных кабельных линий К-3600, К-10800.