

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиотехнических систем (РТС)



Якушевич Г.Н.

Исследование системы автоматической регулировки усиления

Учебное методическое пособие по лабораторной работе,
практическим занятиям и самостоятельной работе
для студентов направления

«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

по дисциплине

«Радиоавтоматика»

2019

Якушевич Г.Н.

«Исследование системы автоматической регулировки усиления»: Учебное методическое пособие по лабораторной работе, практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Радиоавтоматика». Томск: ТУСУР. Научно-образовательный портал, 2019. – 30 с.

Учебное методическое пособие содержит описание компьютерной лабораторной работы, выполняемой в ходе изучения дисциплины «Радиоавтоматика» в среде Electronics Workbench (EWB) (Multisim, Qucs). Пособие содержит так же краткую вводную теоретическую часть, расчетные соотношения, расчетное задание, контрольные вопросы, требования по оформлению отчета.

© Якушевич Г.Н. 2019 г.

© ТУСУР, РТФ, каф. РТС, 2019 г.

Содержание

1 Исследование системы автоматической регулировки усиления	4
1.1. Цель работы	4
1.2. Краткие теоретические сведения	4
1.3 Описание лабораторного макета	22
1.4 Краткое описание программы Electronics Workbench (EWB)	25
1.5 Расчетное задание	28
1.6 Экспериментальное задание	29
1.7 Указания по выполнению работы	30
1.8. Указания по выполнению отчета	30
1.9 Контрольные вопросы	30

Лабораторная работа № 3

1 Исследование системы автоматической регулировки усиления

1.1 Цель работы

Исследование статических и динамических характеристик системы автоматической регулировки усиления (АРУ).

1.2 Краткие теоретические сведения

В системах радиоавтоматики бытовой радиоаппаратуры напряжение сигнала на входе может изменяться в $10^2 - 10^3$ раз (40-60 дБ), в системах радиосвязи - в $10^3 - 10^4$ раз (60-80 дБ), а радиолокации - в 10^6 раз (120 дБ). Выходное напряжение при этом не должно изменяться более чем в 1.2-3 раза (1.6-9.6 дБ).

Регулировочные характеристики системы АРУ

Система АРУ предназначена для поддержания уровня выходного сигнала систем радиоавтоматики в заданных пределах при изменении уровня входного сигнала. Необходимость поддержания уровня выходного сигнала вблизи номинального значения $U_{ВЫХ\ НОМ}$ обусловлено большими пределами изменения уровня входного сигнала для различных систем. Динамический диапазон по входу $D_{ВХ}$ и выходу $D_{ВЫХ}$ определяются следующими выражениями

$$D_{ВХ} = \frac{U_{ВХ\ МАК}}{U_{ВХ\ МИН}}, \quad (1.1)$$

$$D_{ВЫХ} = \frac{U_{ВЫХ\ МАК}}{U_{ВЫХ\ МИН}} \quad (1.2)$$

или в децибелах

$$DD_{ВХ} = 20 \lg \left(\frac{U_{ВХ\ МАК}}{U_{ВХ\ МИН}} \right), \quad (1.3)$$

$$DD_{ВЫХ} = 20 \lg \left(\frac{U_{ВЫХ\ МАК}}{U_{ВЫХ\ МИН}} \right), \quad (1.4)$$

где $U_{ВХ\ МАК}$, $U_{ВХ\ МИН}$ - максимальное и минимальное напряжение входного сигнала,

$U_{ВЫХ\ МАК}$, $U_{ВЫХ\ МИН}$ - максимальное и минимальное напряжение выходного сигнала.

На рис. 1.1 приведены регулировочные характеристики простой АРУ, АРУ с задержкой, АРУ с задержкой и усилением, наряду с ними для сравнения приведена амплитудная характеристика системы без АРУ.

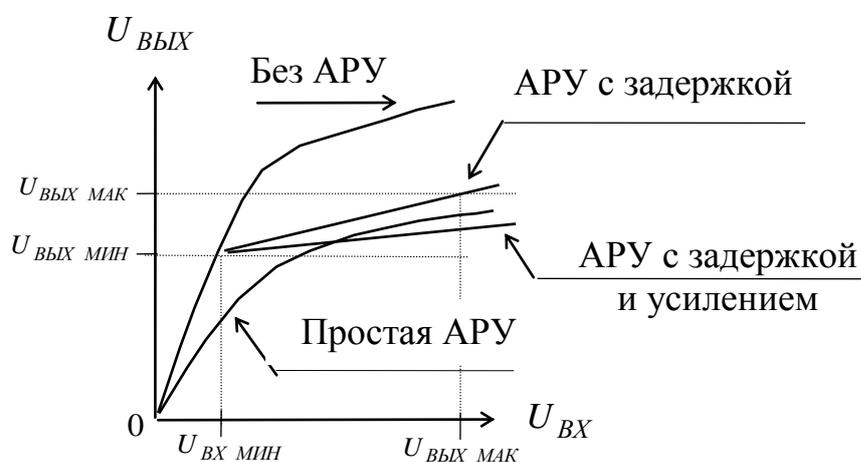


Рис. 1.1 - Регулировочные характеристики системы АРУ

В простой схеме АРУ действует, начиная с самых слабых сигналов и снижая тем самым чувствительность системы. Этот недостаток можно устранить, используя АРУ с задержкой. В такой системе регулировка начинается тогда, когда напряжение на входе достигнет некоторого порогового значения, равного $E_{ВХ\ МИН}$ соответствующего обычно чувствительности системы или когда напряжение с амплитудного детектора превысит напряжение задержки. Таким образом, регулирование коэффициента передачи в случае применения схемы АРУ с задержкой осуществляется при больших уровнях сигнала, превышающих чувствительность системы. Для повышения эффективности систем АРУ в цепь регулирования усилением вводят дополнительные усилительные

каскады. Такие системы получили название АРУ с задержкой и усилением (см. рис. 1.1).

Эффективность АРУ оценивается отношением динамического диапазона по входу $D_{ВХ}$ к динамическому диапазону по выходу $D_{ВЫХ}$ и запишется

$$N = \frac{D_{ВХ}}{D_{ВЫХ}} = \frac{U_{ВХ\ МАК}}{U_{ВХ\ МИН}} \bigg/ \frac{U_{ВЫХ\ МАК}}{U_{ВЫХ\ МИН}} = K_0 / K_{МИН}, \quad (1.5)$$

$$\text{где } K_0 = \frac{U_{ВЫХ\ МИН}}{U_{ВХ\ МИН}}, \quad K_{МИН} = \frac{U_{ВЫХ\ МАК}}{U_{ВХ\ МАК}}.$$

Чем больше коэффициент эффективности N , тем лучше эффективность АРУ. При фиксированном динамическом диапазоне по выходу эффективность АРУ лучше той системы, у которой динамический диапазон по входу больше. При фиксированном динамическом диапазоне по входу эффективность АРУ лучше той системы, у которой динамический диапазон по выходу меньше.

Таким образом, из рис. 1.1 видно, что эффективность системы АРУ с задержкой и усилением лучше эффективности системы АРУ с задержкой.

Классификация систем АРУ

По принципу действия различают системы АРУ без обратной связи, с обратной связью и комбинированные, функциональные схемы которых, содержащие регулируемый усилитель (РУ), амплитудный детектор (АД) и ФНЧ, и регулировочные характеристики приведены на рис. 1.2 – 1.4.

В системе без обратной связи (АРУ ``вперед``) управляющее напряжение определяется уровнем напряжения на входе регулируемого каскада, которое детектируется и через ФНЧ поступает ``вперед`` на регулирующий вход регулируемого каскада, уменьшая выходное напряжение. При этом напряжение на выходе может возрастать, быть постоянным или уменьшаться при перерегулировке в соответствии с регулировочными характеристиками 1, 2 и 3, приведенными на рис. 1.2б.

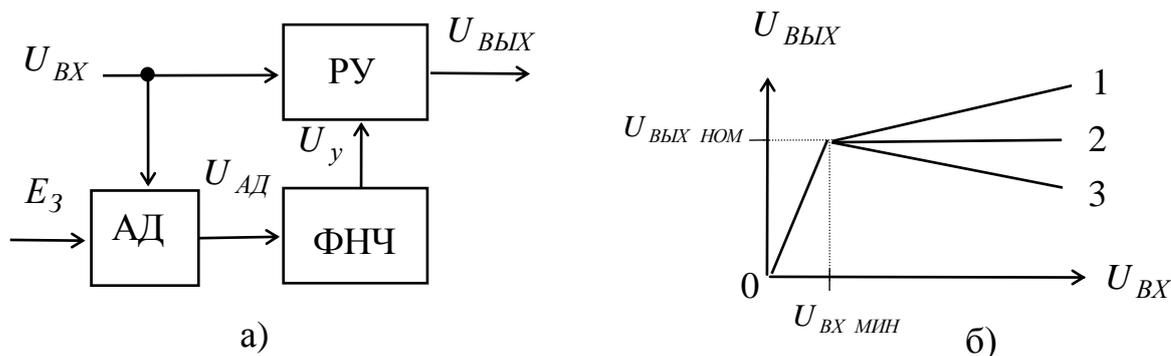


Рис. 1.2 - АРУ без обратной связи - АРУ ``вперед``: функциональная схема (а); регулировочная характеристика (б).

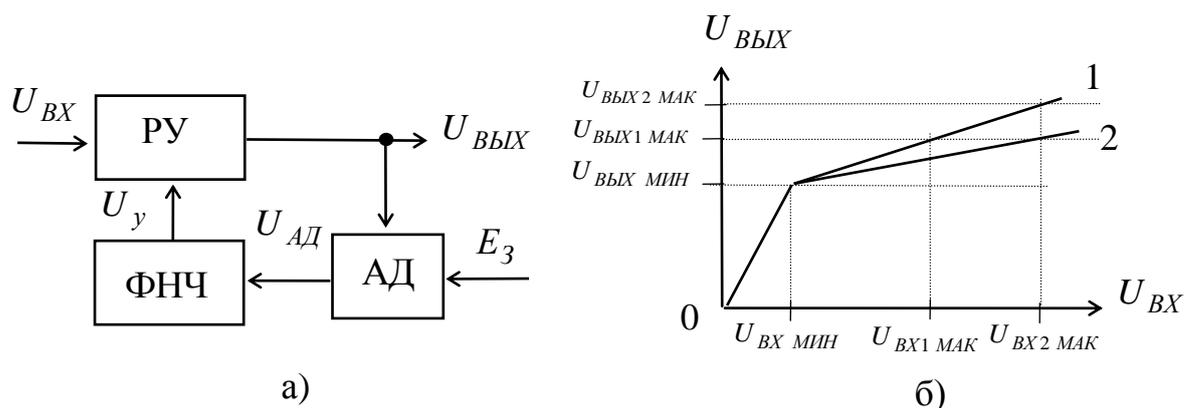


Рис. 1.3 - АРУ с обратной связью - АРУ ``назад``: функциональная схема (а); регулировочная характеристика (б).

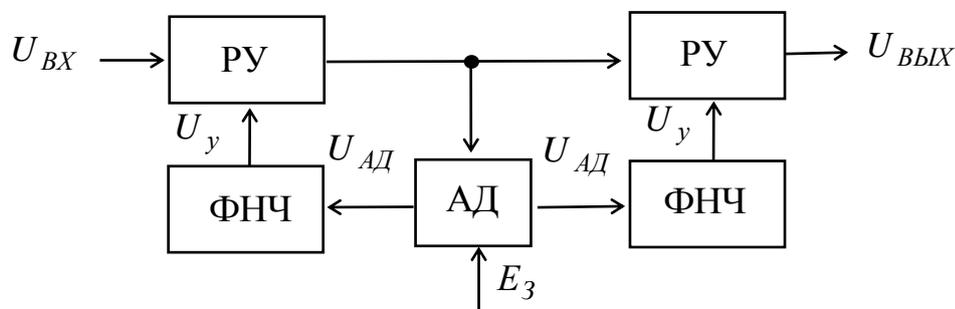


Рис.1. 4 - Функциональная схема комбинированной системы АРУ

Недостаток такой системы, как и любой системы без обратной связи, регулирующее напряжение не зависит от истинного уровня выходного напряжения и требует высокой точности и стабильности параметров системы.

В системе с обратной связью (АРУ ``назад``) управляющее напряжение определяется уровнем напряжения на выходе регулируемого каскада, которое детектируется и через ФНЧ поступает ``назад`` на регулирующий вход регулируемого каскада, уменьшая выходное напряжение. Такая система

АРУ является наиболее простой и универсальной. Регулировочные характеристики 1 и 2 двух систем АРУ с обратной связью приведены на рис. 1.3б. При этом эффективность системы АРУ ``назад`` с регулировочной характеристикой 2, приведенной на рис. 1.3б, лучше, чем системы АРУ ``назад`` с регулировочной характеристикой 1.

По скорости срабатывания различают следующие системы АРУ:

- а) **инерционные** - степень инерционности зависит от скорости изменения уровня сигнала на входе системы, а также от вида и частоты модуляции;
- б) **быстродействующие** – срабатывают в течение длительности импульса;
- в) **мгновенные** - срабатывают практически в течение фронта импульса;
- г) **временные** - используются, если заранее известен закон изменения уровня сигнала на входе системы.

Структурная схема системы АРУ с обратной связью

Функциональная схема системы АРУ с обратной связью содержит функциональные звенья РУ, АД и ФНЧ (см. рис. 1.3а). Поэтому необходимо смоделировать структурные схемы РУ, АД и ФНЧ.

Структурная схема регулируемого усилителя

РУ называется усилитель, коэффициент усиления которого изменяется в зависимости от управляющего напряжения, приложенного к входу управления.

Моделирование РУ

1) Математическое описание функциональной зависимости между входными и выходной величинами $U_{ВЫХ} = F(U_{ВХ}, U_y)$ функционального звена РУ, представленного на рис. 1.5а, запишется $U_{ВЫХ} = K_y U_{ВХ}$. На основе линеаризации реальной (сплошной линии) регулировочной характеристики, зависимости коэффициента усиления K_y от управляющего напряжения U_y , приведенной на рис. 1.5б, получим $K_y = K_0 - S_y U_y$, где K_0 - максимальный коэффициент усиления.

Математическое описание для функционального звена РУ запишется

$$U_{ВЫХ} = (K_0 - S_y U_y) U_{ВХ} = (K_0 - \Delta K) U_{ВХ}. \quad (1.6)$$

2. Структурная схема РУ для математического описания на основе соотношения (1.6) приведена на рис. 1.5в и состоит из сумматора, звена направленного действия с коэффициентом передачи $-S_y$, звена с передаточной функцией $U_{ВХ}$.

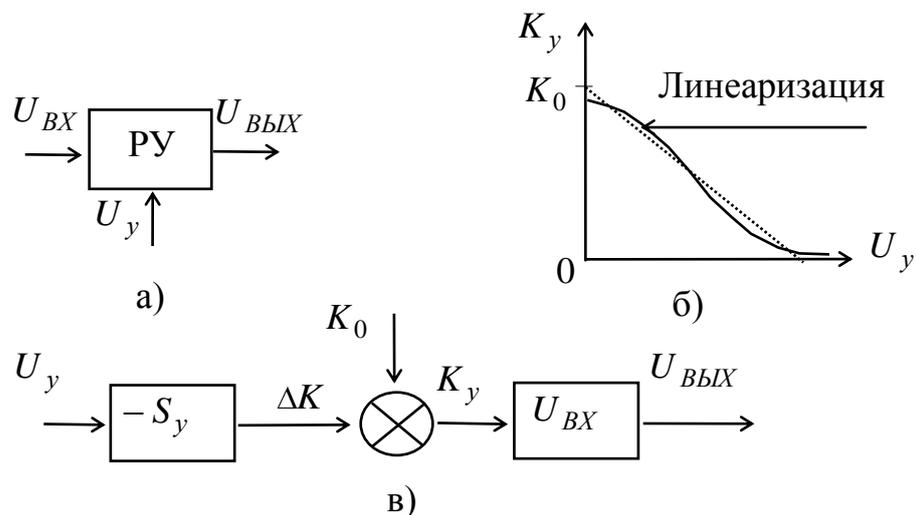


Рис. 1.5 - Регулируемый усилитель: функциональная схема (а); регулировочная характеристика (б); структурная схема (в).

Способы регулировки усиления

Регулировку усиления можно осуществить одним из следующих способов:

изменением режима регулируемого каскада по постоянному току (режимная регулировка);

изменением глубины ООС по переменному току в регулируемом каскаде;

изменением коэффициента передачи межкаскадных цепей (электрически управляемых аттенюаторов).

Схемотехника режимной регулировки

Коэффициент усиления РУ на биполярном транзисторе (см. рис. 1.6а) запишется

$$K_P = K_0 e^{\frac{U_y}{\varphi_T}}, \quad (1.7)$$

где φ_T — температурный потенциал равный при комнатной температуре 26мВ,

$K_0 = S_0 R_{H \approx}$ — коэффициент усиления РУ при напряжении управления равном нулю ($U_y = 0$),

$S_0 \approx \frac{1}{r_{\mathcal{E}} + r_{\Delta}}$ — крутизна транзистора в начальной рабочей точке,

$R_{H \approx}$ — сопротивление нагрузки по переменному току,

$r_{\mathcal{E}} = \frac{\varphi_T [\text{мВ}]}{I_{\mathcal{E}} [\text{мА}]}$ — сопротивление эмиттера при токе $I_{\mathcal{E}}$,

r_{Δ} — контактное сопротивление эмиттера равное примерно 0.5-5.0 Ом,

Из выражения (3.7) видно, что при уменьшении тока эмиттера коэффициент усиления уменьшается, но при этом будут увеличиваться нелинейные искажения. Поэтому были разработаны специальные транзисторы типов ГТ328 и ГТ346. Усиление каскадов, выполненных на этих биполярных транзисторах, уменьшается при увеличении тока эмиттера. Диапазон регулировки усиления каскада в селекторе каналов телевизионных приемников достигает 40-46 дБ.

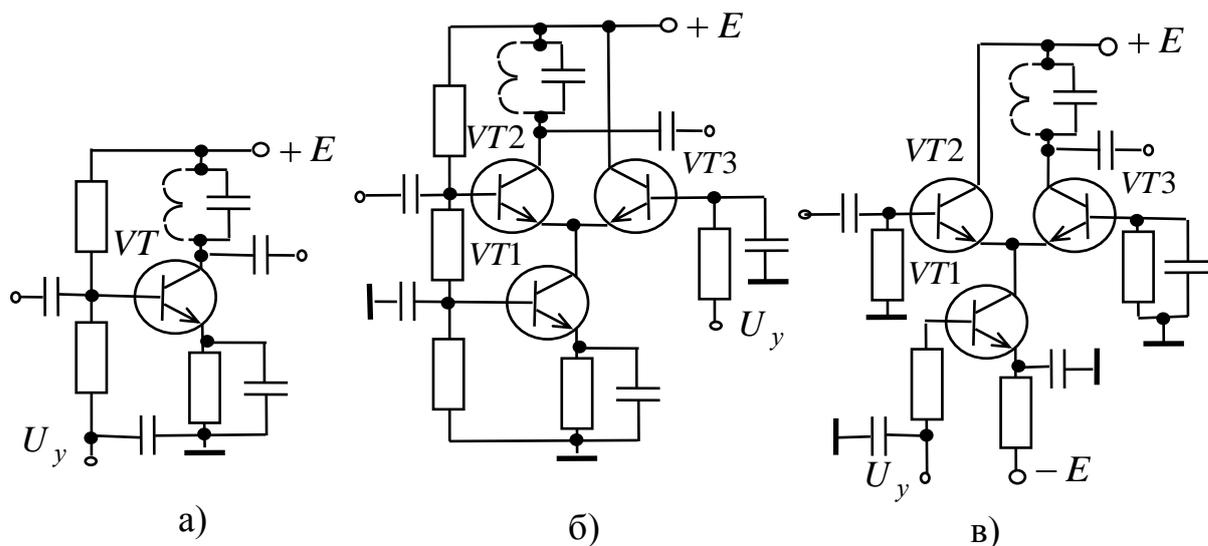


Рис. 1.6 - Принципиальные схемы РУ на биполярных транзисторах

В схеме РУ, приведенной на рис. 1.6б, для регулировки усиления служит дополнительный транзистор VT_3 . При подаче положительного

управляющего напряжения U_y ток этого транзистора растет, а ток транзистора $VT2$ и, следовательно, усиление каскада уменьшаются.

Коэффициент усиления РУ на биполярных транзисторах (см. рис. 1.6б) запишется

$$K_P = K_0 \frac{U_y}{2 - e^{\frac{U_y}{U_T}}} e^{\frac{U_y}{U_T}}, \quad (1.7a)$$

где $K_0 = \frac{S_0}{2} R_{H \approx}$.

В схеме РУ, приведенной на рисунке бв, нагрузкой эмиттерного повторителя на транзисторе $VT2$ является цепь коллектора транзистора $VT1$ и входная проводимость каскада на транзисторе $VT3$, включенного по схеме с общей базой. Усиление регулируется изменением тока коллектора транзистора $VT1$ под действием управляющего напряжения U_y , подаваемого на его базу.

Коэффициент усиления РУ на биполярных транзисторах (см. рис. 1.6в) запишется

$$K_P = K_0 e^{\frac{U_y}{U_T}}, \quad (1.7b)$$

где $K_0 = \frac{S_0}{2} R_{H \approx}$.

На рис. 1.7а приведена принципиальная схема РУ на однозатворном полевом транзисторе. Для регулировки усиления используют зависимость крутизны стоко-затворной характеристики полевого транзистора от напряжения на затворе. Эта зависимость близка к линейной зависимости, что позволяет в процессе регулировки усиления значительно уменьшить нелинейные искажения РУ.

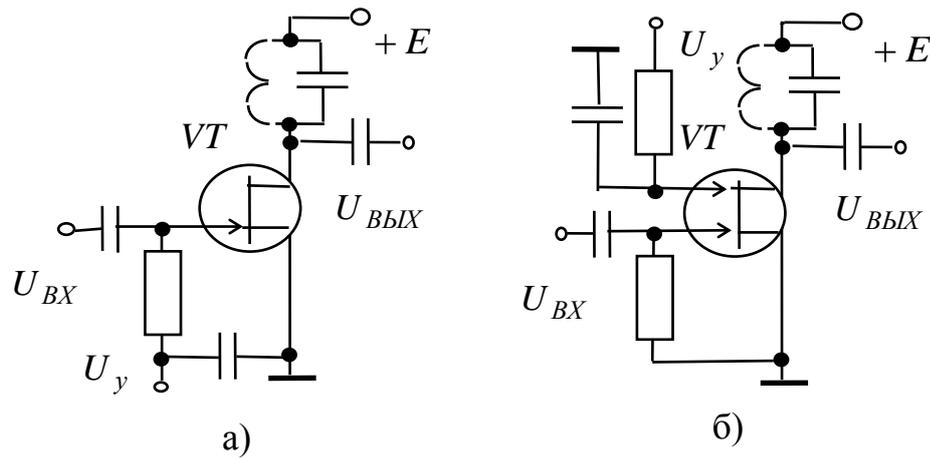


Рис. 1.7 - Схемы регулировки усиления с использованием полевых транзисторов

Для исключения влияния цепей управления на частотные характеристики РУ применяют схему на двухзатворном полевом транзисторе, приведенную на рис. 1.7б, в которой управляющего напряжения U_y подается на второй затвор полевого транзистора.

Регулировка усиления изменением глубины ООС

На рис. 1.8 приведены схемы регулировки усиления в РУ на биполярном транзисторе и операционном усилителе путем изменения глубины ООС, где в качестве управляемого резистора применен канал сток-исток полевого транзистора, сопротивление которого при малой амплитуде переменного напряжения является линейным.

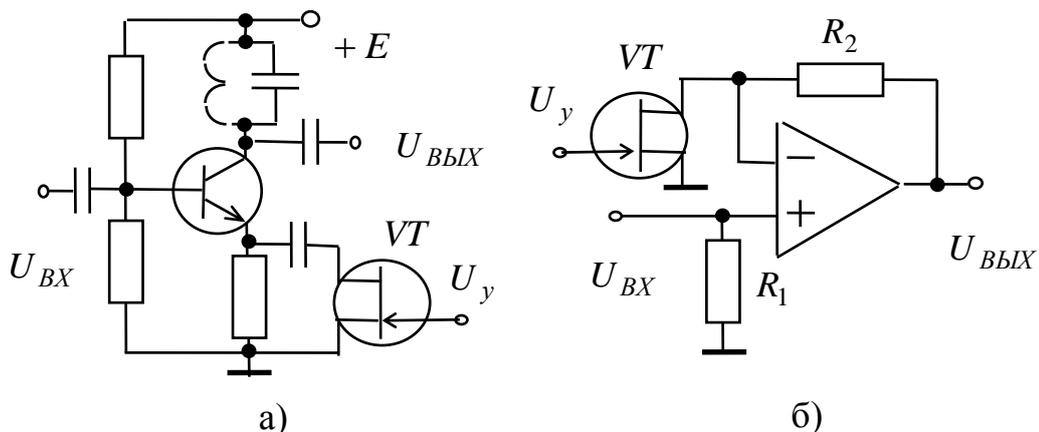


Рис. 1.8 - Схемы регулировки усиления изменением глубины ОС

Коэффициент усиления РУ с ООС, для схемы приведенной на рис. 1.8а запишется

$$K_{OC} = \frac{S_0 R_H}{1 + S_0 R_{OC}} \stackrel{R_{OC} S_0 \gg 1}{=} \frac{R_H}{R_{OC}}, \quad (1.8)$$

где R_{OC} – сопротивление канала сток-исток полевого транзистора VT .

Коэффициент усиления РУ с ООС, для схемы приведенной на рис. 1.8б запишется

$$K_{OC} = 1 + \frac{R_2}{R_{VT}}, \quad (1.9)$$

где $R_{VT} = \frac{R_0}{1 - \frac{U_Y}{\varphi_T}}$ сопротивление канала сток-исток полевого транзистора VT ,

R_0 сопротивление канала сток-исток полевого транзистора при $U_Y = 0$.

Изменение напряжения на затворе полевого транзистора VT приводит к изменению сопротивления канала сток - исток, изменению глубины ООС и изменению усиления РУ.

Регулировка коэффициента передачи межкаскадных цепей (электрически управляемых аттенуаторов)

На рис. 1.9 приведены схемы регулируемых делителей напряжения.

Γ – образный делитель напряжения, приведенный на рис. 1.9а, является простейшим. При увеличении сопротивления R_1 и уменьшении сопротивления R_2 коэффициент передачи уменьшается, но при этом изменяются входное и выходное сопротивления Γ – образного делителя.

Π – образный делитель напряжения, приведенный на рис. 1.9б, применяется в тех случаях, когда предъявляются повышенные требования к стабильности АЧХ и ФЧХ, так как входное и выходное сопротивления остаются постоянными в процессе регулировки коэффициента передачи.

На рис. 1.9в- 1.9г приведены, соответственно, принципиальные схемы реализации Π – образного делителя напряжения на $p-i-n$ диодах и на полевых транзисторах, используемых в качестве электрически управляемых сопротивлений.

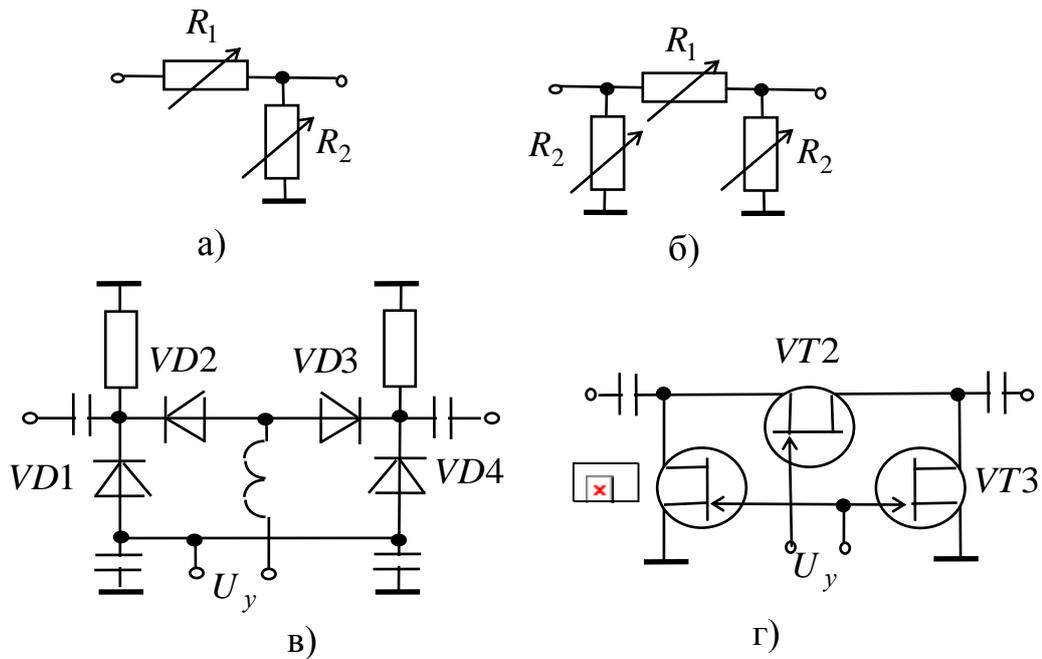


Рис. 1.9 - Схемы регулируемых делителей напряжения

Структурная схема функционального звена АД

АД предназначен для получения на выходе АД напряжения $U_{АД}$, пропорционального значению того параметра входного сигнала АД, которое в процессе регулирования должно быть постоянным.

Моделирование звена амплитудного детектора

1) Математическое описание функциональной зависимости между выходным напряжением АД $U_{АД}$, напряжением задержки E_3 и выходным напряжением $U_{ВЫХ}$ РУ $U_{АД} = F(U_{ВЫХ}, E_3)$ функционального звена АД, представленного на рис. 10а, найдем на основе регулировочной характеристики, зависимости выходного напряжения АД $U_{АД}$ от выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ РУ, приведенной на рис. 1.10б.

Из регулировочной характеристики напряжение на выходе АД запишется в следующем виде

$$U_{АД} = \begin{cases} K_{АД}(U_{ВЫХ} - E_3), & \text{при } U_{ВЫХ} > E_3 \\ 0, & \text{при } U_{ВЫХ} < E_3 \end{cases}, \quad (1.10)$$

где $K_{АД}$ - коэффициент передачи АД.

2) Структурная схема РУ для математического описания на основе соотношения (1.10) состоит из сумматора, функционального звена с коэффициентом передачи $F(U_{ВЫХ}) = \begin{cases} 1, & \text{при } U_{ВЫХ} > E_3 \\ 0, & \text{при } U_{ВЫХ} < E_3 \end{cases}$ и звена направленного действия с коэффициентом передачи $K_{АД}$, приведена на рис. 1.10в.

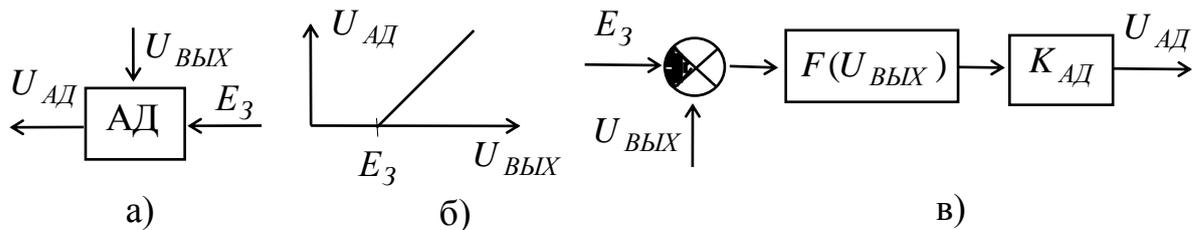


Рис. 1.10 - Амплитудный дискриминатор: функциональная схема (а); регулировочная характеристика (б); структурная схема (в).

На рис. 1.11 приведена принципиальная схема совмещенного диодного АД для системы АРУ.

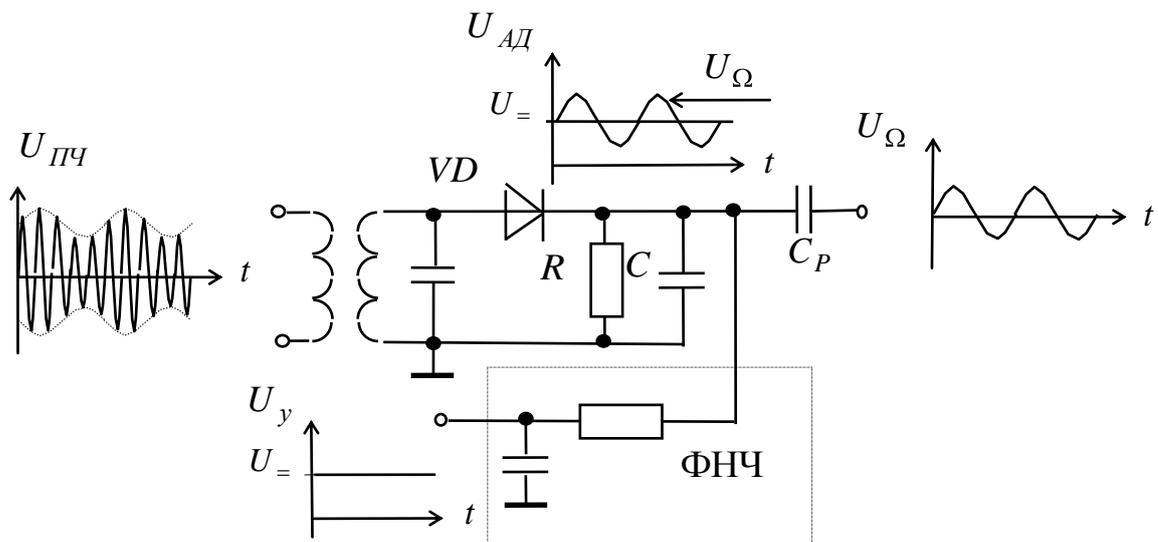


Рис. 1.11 - Принципиальная схема с совмещенным диодным АД сигнала и системы АРУ

На вход совмещенного диодного АД приходит амплитудно-модулированное напряжение ПЧ $U_{ПЧ}$, на нагрузке дискриминатора выделяется напряжение АД $U_{АД}$, состоящее из напряжения модулирующей частоты U_{Ω} , которое через разделительный конденсатор поступает на вход

УНЧ, и постоянного напряжения $U_{=}$, которое проходит через ФНЧ и используется в виде управляющего напряжения U_y в системе АРУ. Напряжение задержки в диодной схеме АД получается за счет напряжения отсечки диода, которое для кремниевых диодов составляет $+ 0.6 \div 0.8$ В некоторых схемах постоянное запирающее напряжение задержки E_3 подается на один из регулируемых каскадов.

Моделирование ФНЧ

1) Математическое описание функциональной зависимости между входной и выходной величинами $U_y = F(U_{\text{чд}})$ функционального звена ФНЧ, представленного на рисунке 12а, запишется в следующем виде

$$U_y = W_{\phi}(p) \cdot U_{\text{чд}} .$$

2) Структурная схема ФНЧ для математического описания $U_y = W_{\phi}(p) \cdot U_{\text{чд}}$ состоит из звена направленного действия, коэффициент передачи которого равен $W_{\phi}(p)$. Структурная схема ФНЧ приведена на рисунке 12б.

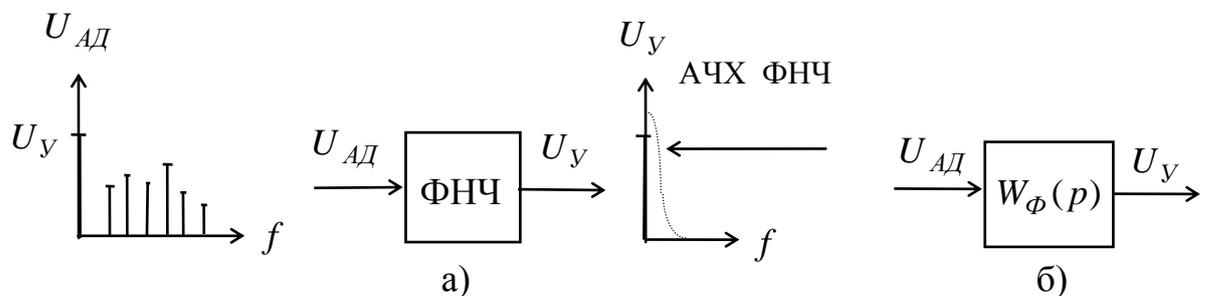


Рис. 1.12 Схемы ФНЧ: а) функциональная, б) структурная

На рис. 1.13а-1.13б приведены принципиальные схемы ФНЧ, реализованные на основе RC -звена и на основе операционного усилителя (ОУ), соответственно.

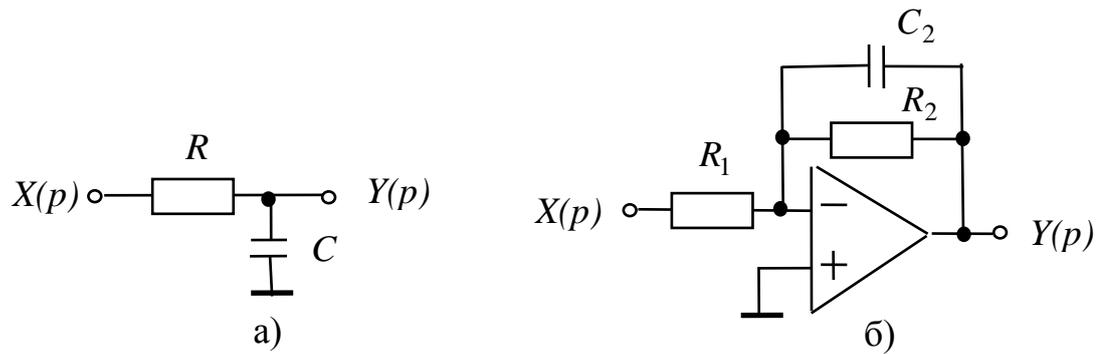


Рис. 1.13 - Принципиальные схемы ФНЧ:
а) на основе RC -звена, б) на основе ОУ

Операторный коэффициент передачи для схемы ФНЧ на основе RC -звена запишется в следующем виде

$$W_{\Phi}(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1/pC}{R + 1/pC} = \frac{1}{1 + pT}, \quad (1.11)$$

где $T = RC$ – постоянная времени.

Недостатком схемы ФНЧ на основе RC -звена является то, что коэффициент передачи не может быть больше 1 и необходимость введения буферных каскадов при последовательном соединении. Последнее обусловлено тем, что данная реализация ФНЧ не является однонаправленной.

Операторный коэффициент передачи для схемы ФНЧ на основе ОУ запишется в следующем виде

$$W_{\Phi}(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)} = \frac{K}{1 + pT}, \quad (1.12)$$

где $K = -R_2/R_1$, $T = R_2 C_2$.

Таким образом, коэффициент передачи ФНЧ на основе ОУ определяется отношением R_2 к R_1 , а верхняя граничная частота $\omega = 1/T$.

Структурная схема системы АРУ

На основе структурных схем РУ, АД и ФНЧ смоделирована структурная схема системы АРУ, приведенная на рис. 1.13. Из-за нелинейного звена с передаточной функцией $F(U_{\text{ВЫХ}})$ система АРУ является нелинейной системой. Зависимость коэффициента усиления

системы АРУ от времени за счет наличия звена с передаточной функцией U_{BX} делает ее нестационарной.

Таким образом, в отличие от систем ЧАПЧ и ФАПЧ система АРУ является нелинейной и нестационарной системами радиоавтоматики.

Проведем анализ системы АРУ для входного напряжения $U_{BX} = const$ в стационарном режиме при $F(U_{ВЫХ}) = 1$ и $U_{ВЫХ} > E_3$.

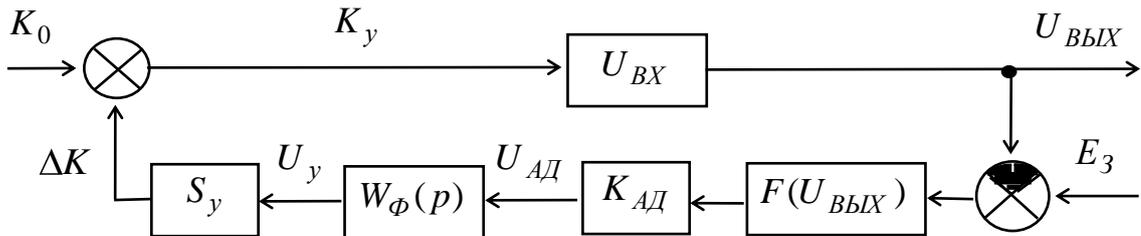


Рис. 1.13 - Структурная схема системы АРУ

Математическая связь между входным и выходным напряжениями для структурной схемы системы АРУ (см. рисунок 13) определится в виде

$$U_{ВЫХ} = K_y U_{BX} \quad (1.13)$$

На основе принципа суперпозиции для коэффициента передачи РУ запишем

$$K_y = W_{E_3 \rightarrow K_y} E_3 + W_{K_0 \rightarrow K_y} K_0 \quad (1.14)$$

где $W_{E_3 \rightarrow K_y}$ и $W_{K_0 \rightarrow K_y}$ – передаточные функции от точки приложения воздействия до точки, где ищем реакцию на это воздействие.

В выражении (1.14) первое слагаемое определяет вклад в коэффициент передачи K_y от напряжения задержки E_3 , второе слагаемое определяет вклад за счет максимального коэффициента передачи K_0 .

В статическом стационарном режиме $W_{\Phi}(0) = K_{\Phi}$ и тогда выражения для передаточных функций $W_{E_3 \rightarrow K_y}$ и $W_{K_0 \rightarrow K_y}$ из структурной схемы системы АРУ запишутся

$$\boxed{\quad \quad \quad}, \quad (1.15)$$

$$W_{K_0 \rightarrow K_y} = \frac{1}{1 + K_{AD} K_{\Phi} S_y U_{BX}}. \quad (1.16)$$

С учетом соотношений (1.15) и (1.16) выражение (3.14) для коэффициента передачи РУ запишем

$$K_y = \frac{K_{AD} K_{\Phi} S_y E_3 + K_0}{1 + K_{AD} K_{\Phi} S_y U_{BX}}. \quad (1.17)$$

Тогда для регулировочной характеристики системы АРУ для статического стационарного режима с учетом соотношений (1.14) и (1.17) получим следующие соотношения

$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} \frac{K_{AD} K_{\Phi} S_y E_3 + K_0}{1 + K_{AD} K_{\Phi} S_y U_{BX}} U_{BX}, & \text{при } \frac{E_3}{K_0} + \frac{1}{K_{AD} K_{\Phi} S_y} > U_{BX} > \frac{E_3}{K_0}. \\ K_0 U_{BX} & , \text{при } U_{BX} < \frac{E_3}{K_0}. \end{cases} \quad (1.18)$$

Для расчета регулировочной характеристики системы АРУ можно использовать другие соотношения, полученные из соотношения (1.18)

$$U_{BX} = \begin{cases} \frac{U_{ВЫХ}}{K_0 + K_{AD} K_{\Phi} S_y (E_3 - U_{ВЫХ})}, & \text{при } E_3 + \frac{K_0}{K_{AD} K_{\Phi} S_y} > U_{ВЫХ} > E_3. \\ \frac{U_{ВЫХ}}{K_0} & , \text{при } U_{ВЫХ} < E_3. \end{cases} \quad (1.19)$$

Выражения (1.18) и (1.19) определяют регулировочную характеристику системы АРУ с обратной связью (см. кривая 1 или 2 на рис. 1.3б).

Определим условие устойчивости системы АРУ. Для этого запишем передаточную функцию системы АРУ (18) в следующем виде

$$W_y(p) = \frac{W_{AD}(p) W_{\Phi}(p) W_{S_y}(p) E_3 + K_0}{1 + W_{AD}(p) W_{\Phi}(p) W_{S_y}(p) U_{BX}}, \quad (1.20)$$

где $W_{AD}(p) = \frac{K_{AD}}{1 + pT_{AD}}$, $W_{\Phi}(p) = \frac{K_{\Phi}}{1 + pT_{\Phi}}$, $W_{S_y}(p) = \frac{S_y}{1 + pT_y}$ - передаточные функции АД, ФНЧ и РУ.

Подставив передаточные функции звеньев, получим

$$W_y(p) = \frac{\frac{K_{AD}}{1+pT_{AD}} \frac{K_{\Phi}}{1+pT_{\Phi}} \frac{S_y}{1+pT_y} E_3 + K_0}{1 + \frac{K_{AD}}{1+pT_{AD}} \frac{K_{\Phi}}{1+pT_{\Phi}} \frac{S_y}{1+pT_y} U_{BX}} \quad (1.21)$$

или

$$W_y(p) = \frac{K_0 (1+pT_{AD}) (1+pT_{\Phi}) (1+pT_y) + K_{AD} K_{\Phi} S_y E_3}{p^3 T_{AD} T_{\Phi} T_y + p^2 (T_{AD} T_{\Phi} + T_{AD} T_y + T_{\Phi} T_y) + p (T_{AD} + T_{\Phi} + T_y) + K_{AD} K_{\Phi} K_y U_{BX} + 1}. \quad (1.22)$$

Характеристическое уравнение для замкнутой системы АРУ из выражения передаточной функции (22) запишется в следующем виде

$$A(p) = p^3 T_{AD} T_{\Phi} T_y + p^2 (T_{AD} T_{\Phi} + T_{AD} T_y + T_{\Phi} T_y) + p (T_{AD} + T_{\Phi} + T_y) + K_{AD} K_{\Phi} K_y U_{BX} + 1. \quad (1.23)$$

На основе характеристического уравнения (1.23) для замкнутой системы при выполнении условий положительности коэффициентов

$$\left. \begin{aligned} a_3 &= T_{AD} T_{\Phi} T_y > 0, \\ a_2 &= (T_{AD} T_{\Phi} + T_{AD} T_y + T_{\Phi} T_y) > 0, \\ a_1 &= (T_{AD} + T_{\Phi} + T_y) > 0, \\ a_0 &= (K_{AD} K_{\Phi} K_y U_{BX} + 1) > 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

запишем определитель Гурвица в следующем виде

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} T_{AD} T_{\Phi} + T_{AD} T_y + T_{\Phi} T_y & K_{AD} K_{\Phi} K_y U_{BX} + 1 & 0 \\ T_{AD} T_{\Phi} T_y & T_{AD} + T_{\Phi} + T_y & 0 \\ 0 & T_{AD} T_{\Phi} + T_{AD} T_y + T_{\Phi} T_y & K_{AD} K_{\Phi} K_y U_{BX} + 1 \end{vmatrix}. \quad (1.25)$$

Из определителя Гурвица (1.25) для устойчивости системы необходимо выполнение следующих условий

$$\Delta_1 = (T_{AD} T_{\Phi} + T_{AD} T_y + T_{\Phi} T_y) > 0, \quad (1.26)$$

$$\Delta_2 = (T_{AD} T_{\Phi} + T_{AD} T_y + T_{\Phi} T_y)(T_{AD} + T_{\Phi} + T_y) - T_{AD} T_{\Phi} T_y (K_{AD} K_{\Phi} K_y U_{BX} + 1) > 0. \quad (1.27)$$

Первое условие (1.26) выполняется при любых значениях параметров, второе условие (1.27) - в том случае, когда

$$\left(\frac{1}{T_{AD}} + \frac{1}{T_{\Phi}} + \frac{1}{T_y} \right) (T_{AD} + T_{\Phi} + T_y) > (1 + K_{AD} K_{\Phi} K_y U_{BX}). \quad (1.28)$$

На рис. 1.14а приведен спектр напряжения на выходе АД при подаче на его вход большого уровня амплитудно-модулированного сигнала. Это напряжение с выхода АД через ФНЧ подается на вход управления РУ.

На рис. 1.14б-1.14г приведены спектры управляющих сигналов для различных постоянных времени ФНЧ.

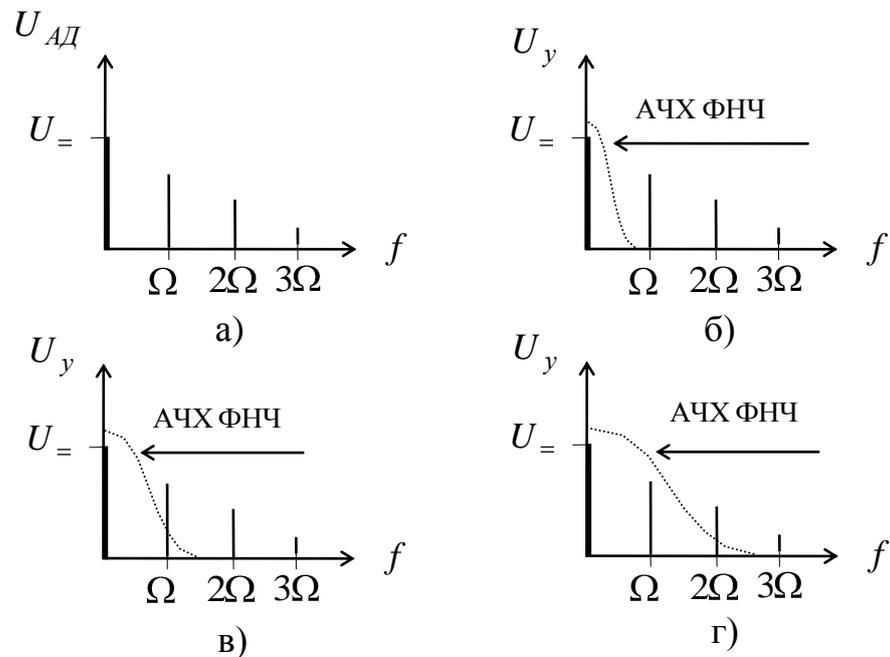


Рис. 1.14 - Спектр сигнала: а) на выходе АД; б) на выходе ФНЧ при T_1 ; в) на выходе ФНЧ при $T_2 \langle T_1$; г) на выходе ФНЧ при $T_3 \langle T_2$.

При постоянной времени ФНЧ $T_1 \gg \frac{1}{2\pi \Omega}$ на вход управления РУ подается только управляющее напряжение в виде постоянного напряжения $U_ =$. При уменьшении постоянной времени фильтра $T_2 \langle T_1$ в спектре управляющего напряжения появляется модулирующая частота (см. рис.1.14в) и наблюдается, приведенная на рис. 1.15а, демодуляция амплитудно-модулированного сигнала (изменение глубины модуляции).

При этом, полагая $T_\Phi \gg T_{АД}, T_y$, величину демодуляции приближенно можно оценить из выражения

$$M_{ВЫХ} / M_{ВХ} = 2\pi F_M T_\Phi / (K_{АД} K_\Phi K_y U_{ВХМ}) . \quad (1.29)$$

где $M_{ВЫХ}, M_{ВХ}$ — соответственно выходной и входной индексы модуляции,

F_M — частота модулирующего сигнала,

U_{BXM} — максимальная амплитуда сигнала.

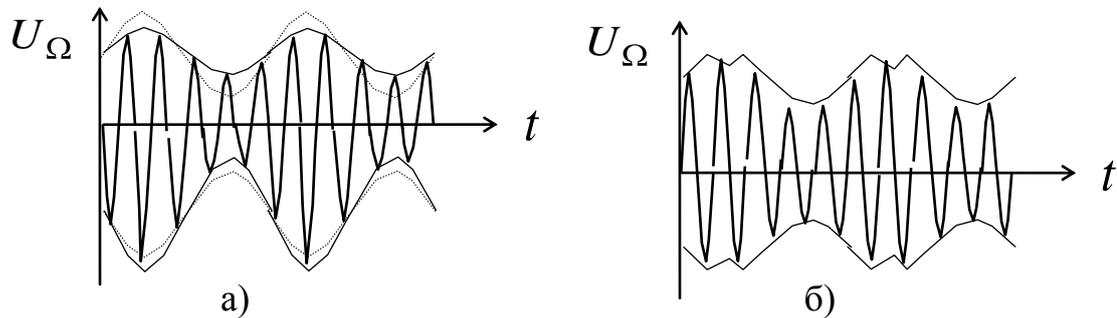


Рис. 1.15 - Демодуляция амплитудно-модулированного сигнала (а), искажение формы модулирующего сигнала (б).

При дальнейшем уменьшении постоянной времени ФНЧ $T_3 \langle T_2$ в спектре управляющего напряжения появляется вторая гармоника модулирующей частоты (см. рис. 1.14г) и начинается искажение формы модулирующего сигнала, приведенного на рис. 1.15б, что приводит к потере устойчивости при увеличении уровня входного сигнала.

1.3 Описание лабораторного макета

На рис. 1.16 приведена схема лабораторного макета для исследований статических и динамических характеристик системы АРУ.

Схема макета содержит регулируемый усилитель (РУ), усилитель напряжения (У), амплитудный детектор (АД), фильтр нижних частот (ФНЧ) и контрольно-измерительные приборы: осциллограф, источник немодулированного и источник амплитудно-модулированного сигналов, источник постоянного напряжения и вольтметр постоянного напряжения. Схема макета содержит три тумблера: тумблер 1 подключает к входу системы АРУ источник немодулированного или источник амплитудно-модулированного сигналов, тумблеры 2 и 3 - замыкают или размыкают цепь обратной связи, а также при разомкнутой системе подключают к входам управления РУ источники постоянного напряжения.

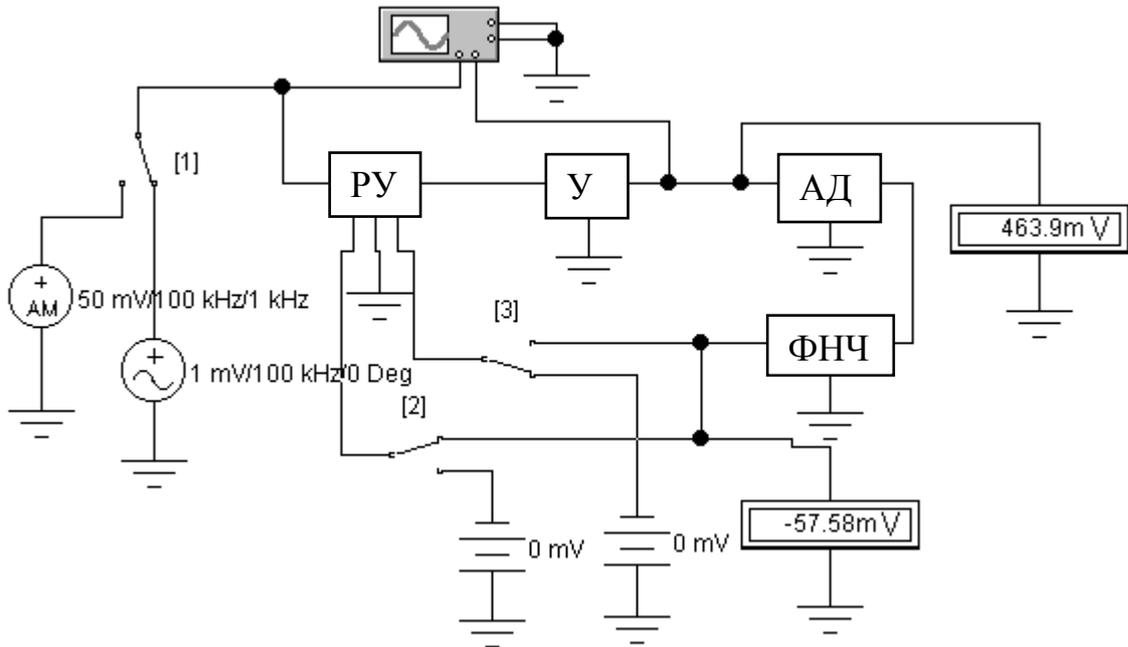


Рис. 1.16 – Схема лабораторного макета

На рис. 1.17 приведена принципиальная схема РУ, в котором используется режимная регулировка усиления. Регулируемый усилитель с двумя входами управления E_{y1} и E_{y2} содержит дифференциальный каскад на транзисторах $VT1$ и $VT3$ и регулируемый источник тока на транзисторе $VT2$ управляемый напряжением.

У – инвертированный усилитель на основе операционного усилителя, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.18а.

АД – диодный амплитудный детектор, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.18б.

ФНЧ, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.19, содержит инвертированный усилитель на основе операционного усилителя с дискретным (тумблер 4) коэффициентом усиления и фильтра нижних частот на основе RC – звена с дискретными (тумблер 5-8) постоянными времени.

1.4 Краткое описание программы Electronics Workbench (EWB)

Electronics Workbench (EWB) – разработка фирмы Interactive Image Technologies (www.interactive.com). Особенностью программы EWB является наличие контрольно измерительных приборов, по внешнему виду, органам управления и характеристикам максимально приближенных к их промышленным аналогам, что способствует приобретению практических навыков работы с наиболее распространёнными приборами. Программа легко усваивается и достаточно удобна в работе.

Запуск программы EWB

После вызова EWB из среды WINDOWS на экране появляется чистое окно. Для загрузки лабораторной работы надо выбрать команду Open из меню, а затем открыть папку “APY” в которой находится файл лабораторного макета для исследований статических и динамических характеристик системы автоматической регулировки усиления. Запуск программы анализа производится кнопкой “Пуск”.

Контрольно-измерительные приборы

Осциллограф (Oscilloscope)



Лицевая панель осциллографа показана на рисунке 6. Осциллограф имеет два канала (CHANNEL) А и В с отдельной регулировкой чувствительности в диапазоне от 10 мкВ/дел (mV/Div) до 5кВ/дел (kV/Div) и регулировкой смещения по вертикали (Y POS). Выбор режима по входу осуществляется нажатием кнопок .

Режим AC предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока (его ещё называют режим “закрытого входа”, поскольку в этом режиме на входе усилителя включается разделительный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую). В режиме 0 входной зажим замыкается на землю. В режиме DC (включен по умолчанию) можно

проводить осциллографические измерения как постоянного, так и переменного тока. Этот режим ещё называют режим “открытого входа”, поскольку входной сигнал поступает на вертикальный вход непосредственно. С правой стороны от кнопки DC расположен входной зажим.

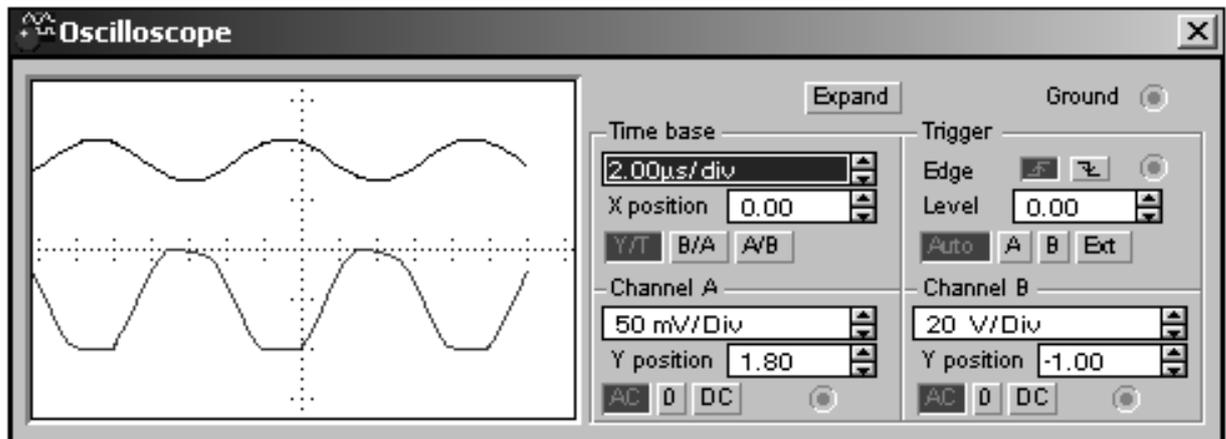


Рис. 1.20 - Лицевая панель осциллографа

Режим развертки выбирается кнопками **Y/T B/A A/B**. В режиме Y/T (обычный режим) реализуются следующие режимы развертки: по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали – время; в режиме B/A: по вертикали – сигнал канала B, по горизонтали – сигнал канала A; в режиме A/B: по вертикали – сигнал канала A, по горизонтали – сигнал канала B.

В режиме Y/T длительность развертки (TIME BASE) может быть задана в диапазоне от 0,1 нс/дел (ns/div) до 1 с/дел (s/div) с возможностью установки смещения в тех же единицах по горизонтали, т. е. по оси X (X POS).

В режиме Y/T предусмотрен также ждущий режим (TRIGGER) с запуском развертки (EDGE) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала (выбирается нажатием кнопок **↕ ↖**), при регулируемом уровне (LEVEL) запуска, а также в режиме AUTO (от канала A, от канала B или от внешнего источника (EXT), подключаемого к зажиму в блоке

управления TRIGGER. Названные режимы работы выбираются кнопками



Заземление осциллографа осуществляется с помощью клеммы GROUND в правом верхнем углу прибора.

При нажатии кнопки ZOOM лицевая панель осциллографа существенно меняется (рис. 1.21) – увеличивается размер экрана, появляется возможность прокрутки изображения по горизонтали и его сканирования с помощью вертикальных визирных линий (синего и красного цвета), которые за треугольные ушки (они обозначены цифрами 1 и 2) могут быть курсором установлены в любом месте экрана. При этом в индикаторных окошках под экраном приводятся результаты измерения напряжения, временных интервалов и их приращений (между визирными линиями).

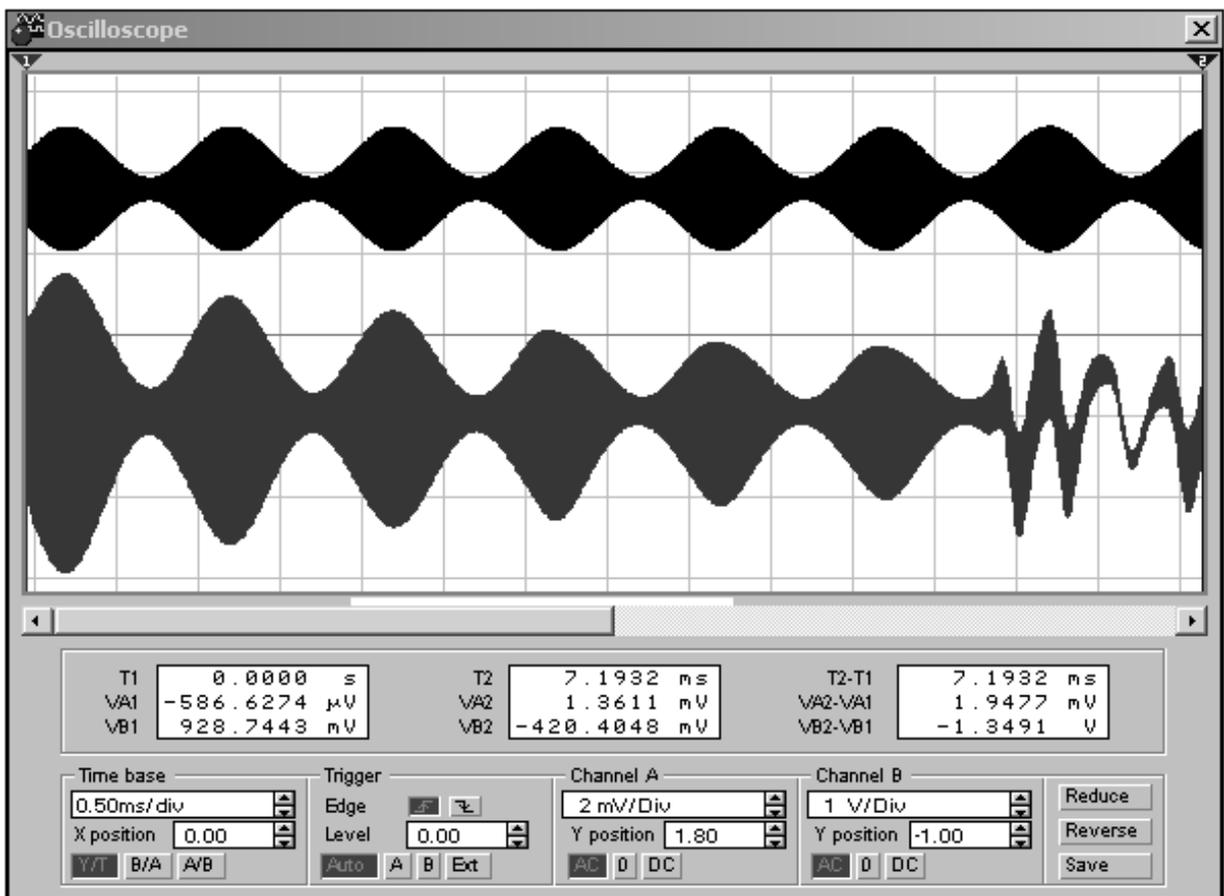
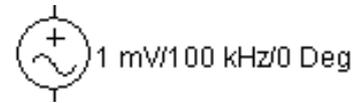


Рис. 1.21 - Лицевая панель осциллографа в режиме ZOOM

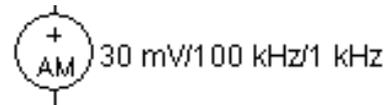
Изображения можно инвертировать нажатием кнопки REVERSE и записать данные в файл нажатием кнопки SAVE. Возврат к исходному состоянию осциллографа производится нажатием кнопки REDUCE.

Источник немодулированного сигнала



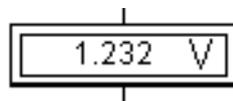
Для источника немодулированного переменного напряжения с помощью диалогового окна задаются: напряжение (Voltage), частота (Frequency) и начальная фаза (Phase) синусоидального сигнала.

Источник модулированного сигнала



Для источника амплитудно-модулированного напряжения с помощью диалогового окна задаются: амплитуда несущей (Carrier Amplitude), частота несущей (Carrier Frequency), коэффициент модуляции (Modulation Index) и частота модулирующего колебания (Modulation Frequency).

Вольтметр



Для вольтметра с помощью диалогового окна задаются: внутреннее сопротивление, режим измерения постоянного или переменного напряжения.

1.5 Расчетное задание

1. Рассчитать и построить регулировочные характеристики РУ, приведенного на рис. 1.17, при подаче управляющего напряжения на вход E_{y1} , на вход E_{y2} и одновременно на входы E_{y1} и E_{y2} для тока в рабочей точке $I_{K0} = 3 \text{ mA}$.
2. Найти максимальное входное напряжение РУ, если напряжение источника питания усилителя напряжения равно 15В.
3. Рассчитать и построить регулировочную характеристику системы АРУ при подаче управляющего напряжения на вход E_{y1} , на вход E_{y2} и одновременно на входы E_{y1} и E_{y2} для двух значений коэффициента

передачи усилителя ФНЧ и $E_3 = 0.5B$. На основе регулировочных характеристик системы АРУ рассчитать эффективности работы системы АРУ.

4. Для трех значений T_{Φ} оценить устойчивость и определить допустимую амплитуду напряжения $U_{ВХД}$, при которой система находится на границе устойчивости.

5. Для емкости тумблера 6, найденном значении $U_{ВХД}$ и $F_M = 1000 \text{Гц}$ рассчитать коэффициент демодуляции АМ - сигнала.

1.6 Экспериментальное задание

1. Измерить регулировочные характеристики разомкнутой системы АРУ для немодулированного сигнала, подавая управляющее напряжение с помощью источника постоянного напряжения на вход E_{y1} , на вход E_{y2} и одновременно на входы E_{y1} и E_{y2} .

2. Измерить амплитудную характеристику разомкнутой системы АРУ, задавая входное напряжение с помощью генератора немодулированного сигнала. Определить с помощью осциллографа максимально допустимое входное напряжение, при котором появляются искажения выходного сигнала.

3. Измерить регулировочные характеристики системы АРУ при подаче управляющего напряжения на вход E_{y1} , на вход E_{y2} и одновременно на входы E_{y1} и E_{y2} для двух значений коэффициента передачи усилителя ФНЧ (тумблеры 6-8 отключены).

4. Исследовать нелинейные искажения в замкнутой системе АРУ при амплитудно-модулированном сигнале на входе для различных постоянных времени ФНЧ. Определить быстродействие системы АРУ и коэффициент демодуляции АМ - сигнала.

1.7 Указания по выполнению работы

При измерении АХ и регулировочных характеристик фиксируются показания генератора немодулированного сигнала, источника постоянного напряжения и вольтметра, включенного на выходе системы АРУ.

При исследовании искажений немодулированного и амплитудно-модулированного сигналов устанавливается соответствующая развертка осциллографа.

1.8 Указания по оформлению отчета

Выводы должны быть сделаны по каждому пункту исследований и должны содержать: ссылки на рисунки, характер зависимостей, физическое и теоретическое объяснение зависимостей, сравнительный анализ.

1.9 Контрольные вопросы

1. Какая АРУ называется инерционной? Усиленной? Задержанной?
2. Каким параметром регулировочной характеристики оценивается эффективность АРУ, от чего он зависит?
3. Объясните причины демодуляции АМ – сигнала на выходе замкнутой системы АРУ.
4. Объясните причины потери устойчивости замкнутой системы АРУ.
5. Каковы функции ФНЧ в системе АРУ?
6. Из каких соображений выбирается постоянная времени ФНЧ?