

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

Кафедра радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ)

РАДИОАВТОМАТИКА

Руководство к лабораторным работам

**для студентов специальности 210302 "Радиотехника",
210201 "Проектирование и технология РЭС"**

2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой РЗИ

_____ А.С. Задорин

_____ 2012 г.

РАДИОАВТОМАТИКА

Руководство к лабораторным работам

**для студентов специальности 210302 "Радиотехника",
210201 "Проектирование и технология РЭС"**

Разработчики

Д.т.н., профессор
О.В. Стукач

Д.т.н., профессор
В.И. Туев

Оглавление

1 Введение	4
2 Требования к выполнению лабораторных работ	4
и оформлению отчета	4
3 Описание лабораторных макетов	5
3.1. Лабораторный макет 1.....	5
3.1.1. Общие сведения.....	5
3.1.2. Модели звеньев	5
3.1.3 Подключение измерительных приборов к звеньям	7
3.2 Лабораторный макет 2.....	11
4 Исследование характеристик типовых линейных звеньев систем радиоавтоматики	16
4.1 Цель работы.....	16
4.2 Краткие теоретические сведения.....	16
4.3 Расчетное задание	16
4.4 Экспериментальное задание.....	16
4.5 Указания по выполнению работы.....	16
5 Исследование качественных показателей систем РА.....	18
5.1 Цель работы.....	18
5.2 Описание исследуемых систем.....	18
5.3 Краткие теоретические сведения.....	18
5.4 Расчетное и экспериментальное задание	21
5.5 Указания по выполнению работы.....	21
6 Исследование системы автоматической регулировки усиления	22
6.1 Цель работы	22
6.2 Краткие теоретические сведения	22
6.3 Расчетное задание	26
6.4 Экспериментальное задание.....	27
6.5 Контрольные вопросы.....	28
7 Исследование системы фазовой автоподстройки частоты.....	28
7.1 Цель работы.....	28
7.2 Краткие теоретические сведения.....	28
7.3 Расчетное задание.....	32
7.4 Экспериментальное задание	32
7.5 Контрольные вопросы.....	33
8 Исследование коррекции характеристик систем РА	33
8.1 Цель работы.....	33
8.2 Описание исследуемых систем.....	33
8.3 Расчетное задание	34
8.3.1. Последовательная коррекция	34
8.3.2 Параллельная коррекция.....	35
8.4 Экспериментальное задание	35
8.5 Указания по выполнению работы.....	36
Список рекомендуемой литературы.....	37

1 Введение

Широкое использование в современной технике систем радиоавтоматики (РА) требует глубокого изучения дисциплины «Радиоавтоматика». Важным фактором, существенно способствующим успешному изучению принципов работы систем РА, является лабораторный практикум.

Настоящее руководство к лабораторным работам представляет исправленный и дополненный вариант издания 1996 года, переиздание проведено доцентом Покровским М.Ю., составлено в соответствии программой дисциплины «Радиоавтоматика» для студентов радиотехнического факультета специальности «Радиотехника» и предусматривает выполнение пяти работ.

2 Требования к выполнению лабораторных работ и оформлению отчета

Цель лабораторного практикума – закрепление знаний теории и приобретение практических навыков расчета и измерения характеристик звеньев и систем РА.

Каждая работа содержит расчетное задание и экспериментальную часть.

Для выполнения расчетного задания необходимо изучить требуемый раздел курса по рекомендуемому списку литературы [1-6] и конспекту лекций.

К выполнению экспериментальной части допускаются студенты, выполнившие расчетное задание и защитившие отчет по предыдущей работе.

Отчет по работе должен содержать цель работы, структурные схемы исследуемых систем, результаты расчета и эксперимента, выводы по работе, объясняющие все полученные характеристики на основе физики работы систем. Допускается предоставление одного отчета на бригаду.

3 Описание лабораторных макетов

3.1. Лабораторный макет 1

3.1.1. Общие сведения

Системы РА в лабораторном макете, лицевая панель которого изображена на рис. 3.1, состояются из звеньев, собранных на интегральных операционных усилителях (ОУ). В макете смонтировано 11 типовых звеньев: четыре пропорциональных (1,5-7), три апериодических первого порядка (2-4), звено второго порядка (8), интегрирующее (9), дифференцирующее (10) и пропорционально-интегро-дифференцирующее (ПИД) (11), С помощью тумблеров S2-S11 осуществляется изменение параметров звеньев. Макет содержит также формирователь прямоугольных импульсов, подключаемый тумблером S1, и два регулируемых источника постоянного напряжения, используемых в качестве задающего и возмущающего воздействий.

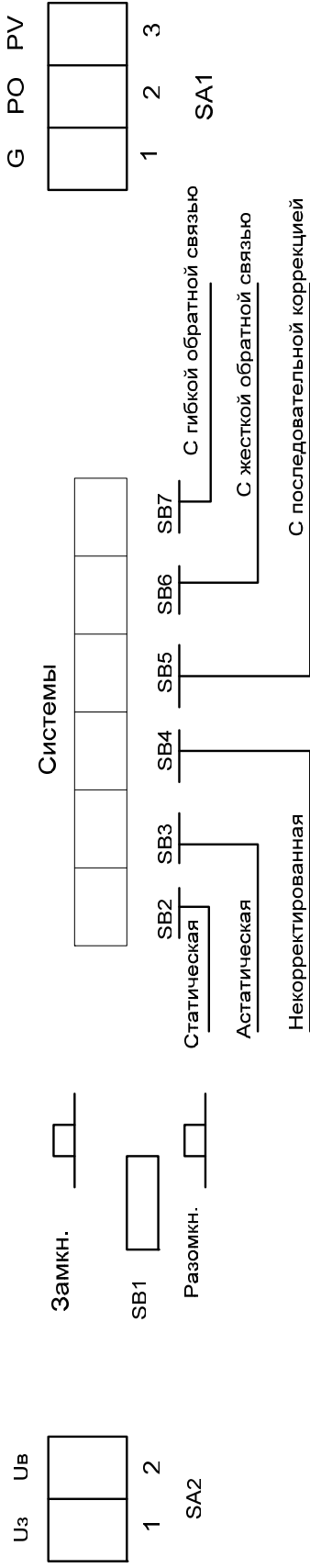
С помощью переключателей SB2-SB7 в макете предусмотрено соединение звеньев в шесть систем: статическую, астатическую, некорректированную, с последовательной коррекцией, с корректирующей жесткой обратной связью (ОС), с корректирующей гибкой ОС. Переключателем SB1 выход каждой из этих систем замыкается со входом единичной ОС.

Для исследования звеньев и систем в работах используются генератор Г4-11 (G), осциллограф С1-72 (PO), вольтметр ВЗ-1 (PV). Генератор требуется для измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и для формирования прямоугольного импульса, необходимого для измерения переходной характеристики (ПХ). Осциллограф необходим для визуального контроля сигналов в различных точках систем, для исследования АЧХ, ПХ, при измерении уровней сигналов с нулевой частотой. С помощью вольтметра производится измерение уровней входных и выходных сигналов при измерении АЧХ. Каждый из приборов подключается к макету через отдельный разъем, а подключение к звеньям и различным точкам систем осуществляется с помощью переключателя S2.

3.1.2. Модели звеньев

Все звенья систем РА в макете реализованы на ОУ. Большой коэффициент усиления, малое выходное и большое входное сопротивление ОУ позволяют реализовать звенья с характеристиками, близкими к идеальным. В табл. 3.1 приведены эквивалентные схемы всех типовых звеньев, их передаточные функции, логарифмические и переходные характеристики, значения коэффициентов в уравнениях моделей звеньев. Вторые входы звеньев используются при объединении звеньев в системы. В интегрирующее и дифференцирующее звенья добавлены большие сопротивления, так как без них схемы неработоспособны.

РАДИОАВТОМАТИКА



ЗВЕНЬЯ

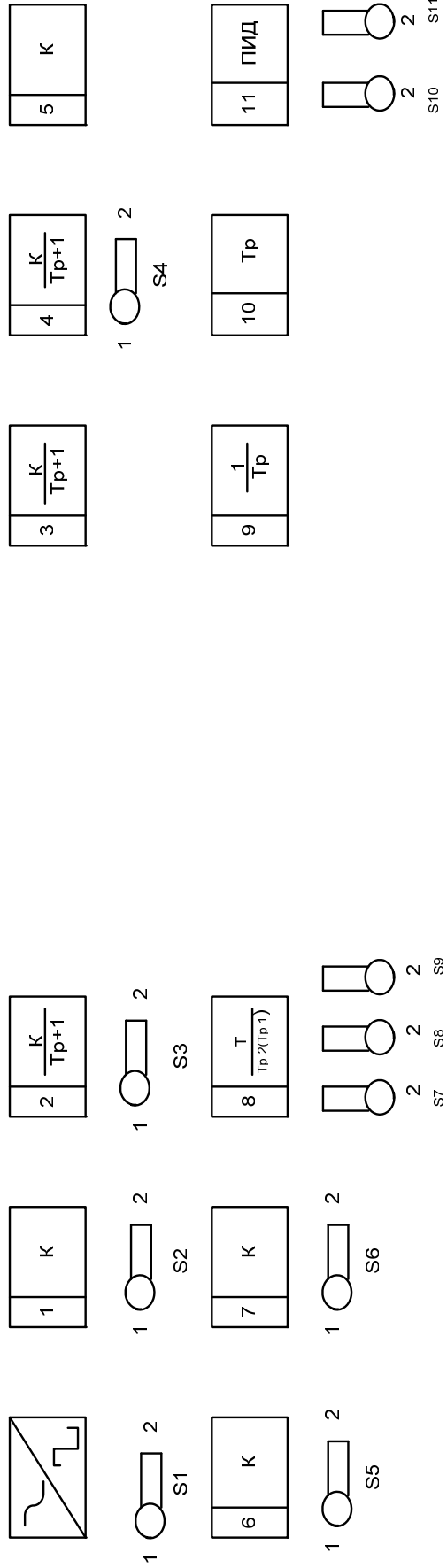


Рисунок 3.1 – Лицевая панель лабораторного макета 1

3.1.3 Подключение измерительных приборов к звеньям

В отключенном положении переключателей SB2-SB7 звенья не связаны друг с другом. В табл. 3.2 приведены положения переключателя SA2, в которых G соединяется со входом, а PO, PV - с выходом звена.

ВНИМАНИЕ! Начиная с шестого звена нумерация звеньев не совпадает с нумерацией положений переключателя SA2.

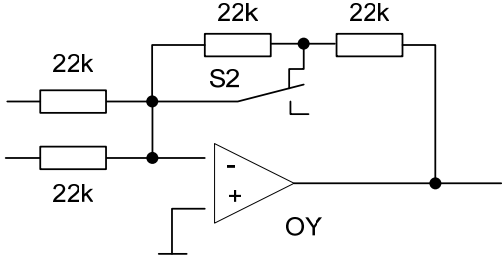
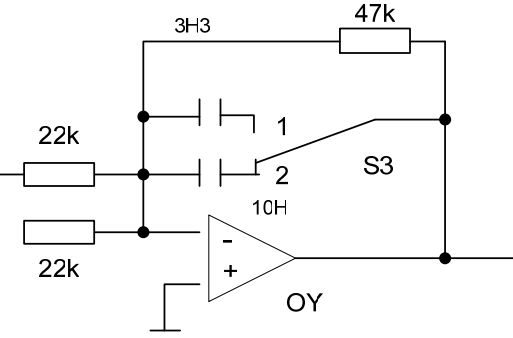
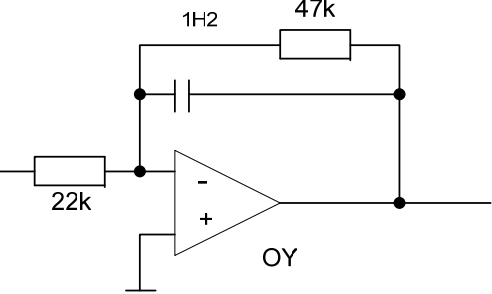
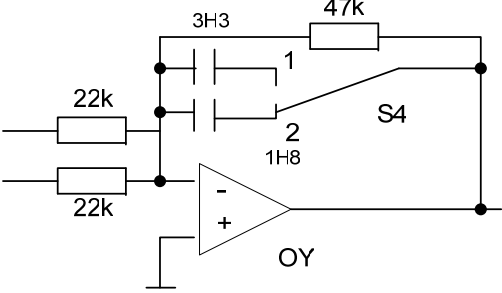
Таблица 3.1 – Положения переключателя SA2

Номер звена	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
G SA2-1	1	2	3	4	-	5	-	6	7	8	9
PO SA2-2	1	2	3	4	-	5	-	6	7	8	9
PV SA2-3	1	2	3	4	-	5	-	6	7	8	9

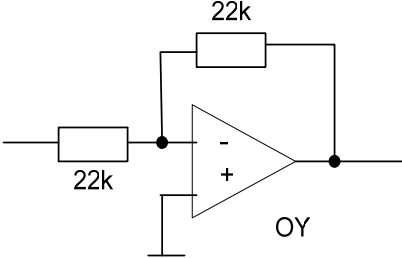
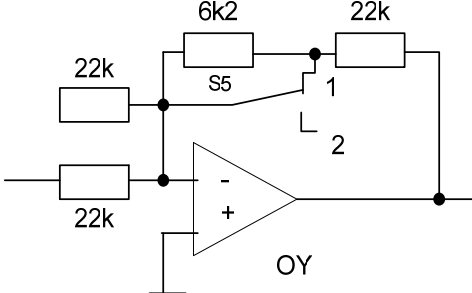
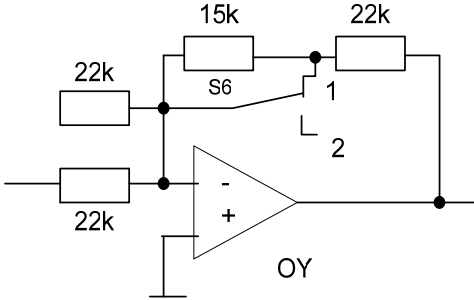
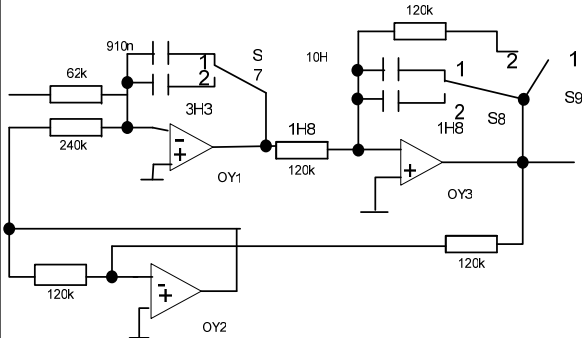
При включении формирователя импульсов G подсоединяется к звеньям через него. К пятому и седьмому звеньям G, PO и PV не подсоединяются.

ВНИМАНИЕ! Для исследования частотных характеристик амплитуда сигнала генератора не должна превышать 1 В, так как при большой амплитуде воздействия ОУ работают в режиме ограничения и могут выйти из строя. Для эффективного формирования прямоугольных импульсов амплитуда сигнала генератора не должна быть меньше 3 В, а частота - не более 100 Гц.

Таблица 3.1 – Схемы, характеристики и коэффициенты уравнений моделей звеньев

1	<p>пропорциональное</p> 	$W(p)=-k$ $k=1 \text{ (тумблер } S2 \text{ в первом положении- } S2/1)$ $k=2 \text{ (} S2/2)$ $L(w)=20lgk$ $\varphi(w)=0$ $h(t)=k$
2	<p>апериодическое</p> 	$W(p)=-k / (Tp+1)$ $k=2$ $T=0.155 \text{ мс (} S3/1)$ $T=0.47 \text{ мс (} S3/2)$ $L(w)=20lgk-20lg\sqrt{1+(wT)^2}$ $\varphi(w)=-arctg(wT)$ $h(t)=k\{1-\exp(-t/T)\}$
3	<p>апериодическое</p> 	$k=2$ $T=0.0564 \text{ мс}$
4	<p>апериодическое</p> 	$k=2$ $T=0.155 \text{ мс (} S4/1)$ $T=0.0611 \text{ мс (} S4/2)$

Продолжение таблицы 3.1

Номер звена	ЗВЕНО	Уравнения и коэффициенты
5	<p style="text-align: center;">пропорциональное</p> 	$k=1$
6	<p style="text-align: center;">пропорциональное</p> 	$k=1 (S5/1)$ $k=1.28 (S5/2)$
7	<p style="text-align: center;">пропорциональное</p> 	$k=1 (S6/1)$ $k=1.68 (S6/2)$
8	<p style="text-align: center;">Звено второго порядка</p> 	$W(p) = -k / (1 + 2\xi T_p p + T_p^2 p^2)$ $L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{1 - (T\omega)^2 + (2\xi T\omega)^2}$ $\varphi(\omega) = \arctg [2\xi T\omega / (1 - (T\omega)^2)]$ $T = 0.0511 \text{ мс } \xi = 0.4 \quad (S7/1, S8/1, S9/2)$ $T = 0.018 \text{ мс } \xi = 0.59 \quad (S7/1, S8/2, S9/2)$ $T = 0.035 \text{ мс } \xi = 1.18 \quad (S7/2, S8/2, S9/2)$ $\xi = 0 \quad (S7/2, S8/2, S9/1)$

3.2 Лабораторный макет 2

Конструктивно системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и автоматической регулировки усиления (АРУ) объединены в одном лабораторном макете, лицевая панель которого изображена на рис. 3.2.

Систему АРУ образуют усилители с регулируемым усилением (У1) и (У2), усилитель (У3), амплитудный детектор (АД) со схемой задержки, усилители постоянного тока (У4) и (У5) и фильтр нижних частот (ФНЧ) Ф1.

Тумблеры S1 и S2 позволяют отключать управляющие входы регулируемых усилителей У1 и У2 от цепи управления. Тумблер S3 переключает регулируемые усилители в режимы ручного и автоматического управления, а S4 изменяет постоянную времени фильтра Ф1. Переключатель S8 подает питающее напряжение поочередно на систему АРУ или систему ФАПЧ.

В состав системы ФАПЧ входят фазовый дискриминатор (ФД), усилитель постоянного тока (У6), ФНЧ Ф2, подстраиваемый генератор (ПГ) с цепью управления (ЦУ).

Тумблер S5 меняет постоянную времени фильтра (Ф2), переключатель S6 переводит ПГ из режима автоматического изменения частоты в ручной.

В режиме ручного управления изменение параметров регулируемых усилителей У1, У2 и подстраиваемого генератора осуществляется источником постоянного напряжения У_у. Выходное напряжение источника У_у ступенчато изменяется переключателем SA1. Численные значения напряжения приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Значения управляющего напряжения

SA1:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
У _у , В	0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2	2.25

Генератор сигналов, осциллограф и вольтметр подключаются к соответствующим гнездам “G”, “PO” и “PV” на задней стенке корпуса макета. Подключение измерительных приборов к контрольным точкам исследуемых систем осуществляется переключателем SA2.

Принципиальная электрическая схема системы АРУ приведена на рис. 3.3. Регулировка усиления в У1 на полевом тетроде VT1 (см. рис.3.3) осуществляется изменением напряжения смещения на втором затворе. Управляющее напряжение снимается с выхода УПТ на операционном усилителе DA1. Исходное максимальное смещение задается делителем R3, R5.

В электрически управляемом аттенюаторе У2 на полевых транзисторах VT2, VT5 регулирование коэффициента передачи основано на изменении сопротивления канала при варьировании напряжения затвор-исток.

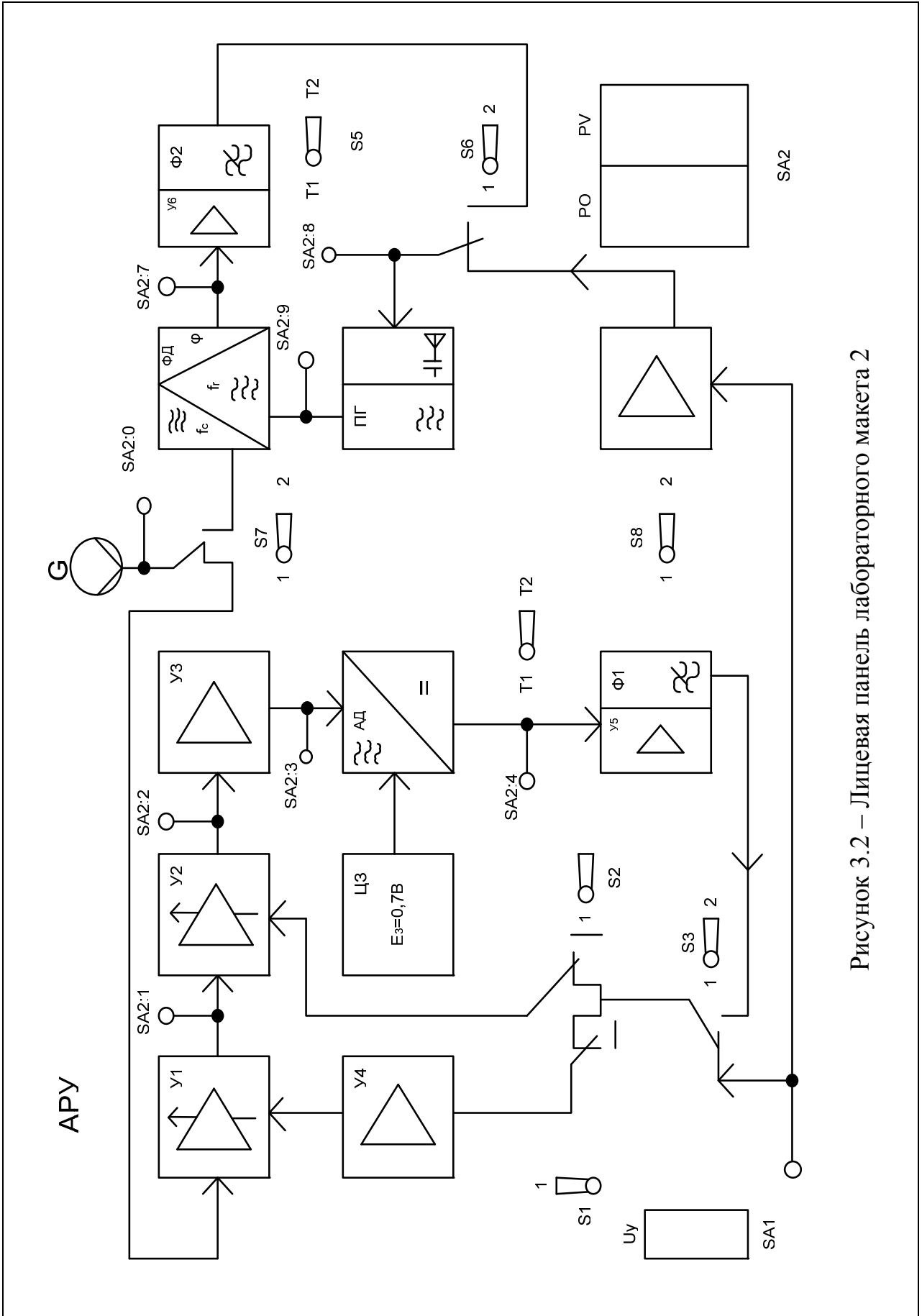


Рисунок 3.2 – Лицевая панель лабораторного макета 2

Двухкаскадный усилитель УЗ собран на биполярных транзисторах VT3, VT4. Цепь задержки АРУ образована делителем напряжения R27, R29, подключенным к диоду УШ. На операционной усилителе DA2 выполнен активный ФНЧ, постоянная времени которого задается резистором R21 и конденсаторами C9, C10.

Принципиальная электрическая схема системы ФАПЧ приведена на рис. 3.4. Подстраиваемый генератор собран на транзисторах VT2, VT4 с фазосдвигающей RC-цепью R13, R15, R17, C7, C9, C11, VT3. Перестройка частоты генератора осуществляется изменением напряжения смещения на затворе VT3, определяющем сопротивление канала сток-исток транзистора.

Фазовый дискриминатор собран на полевом транзисторе VT1, со стока которого снимается напряжение рассогласования, получаемое в результате перемножения сигналов с частотами f_c и f_r , первый из которых подается на исток, а второй на затвор VT1.

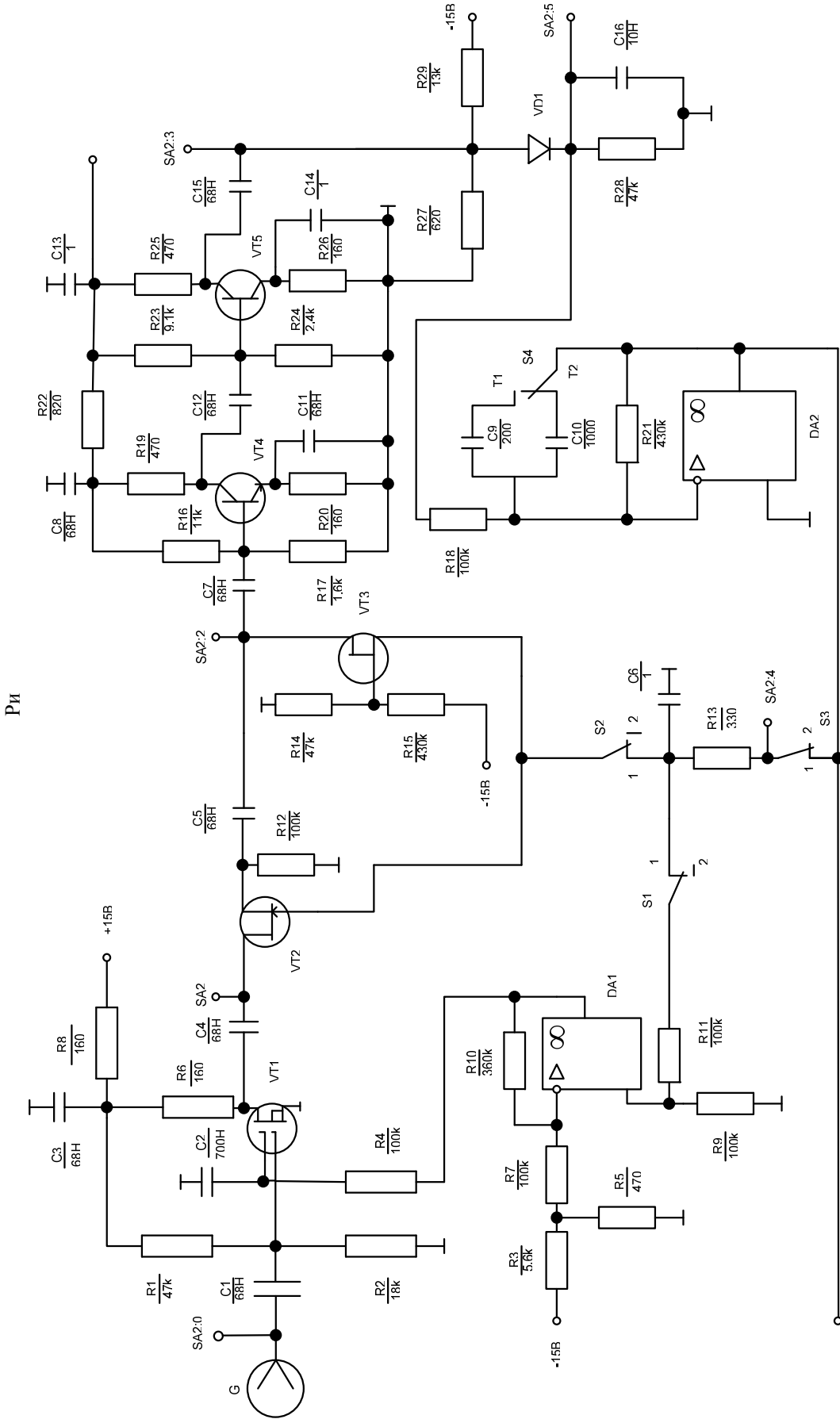


Рисунок 3.3 – Принципиальная электрическая схема системы АРУ

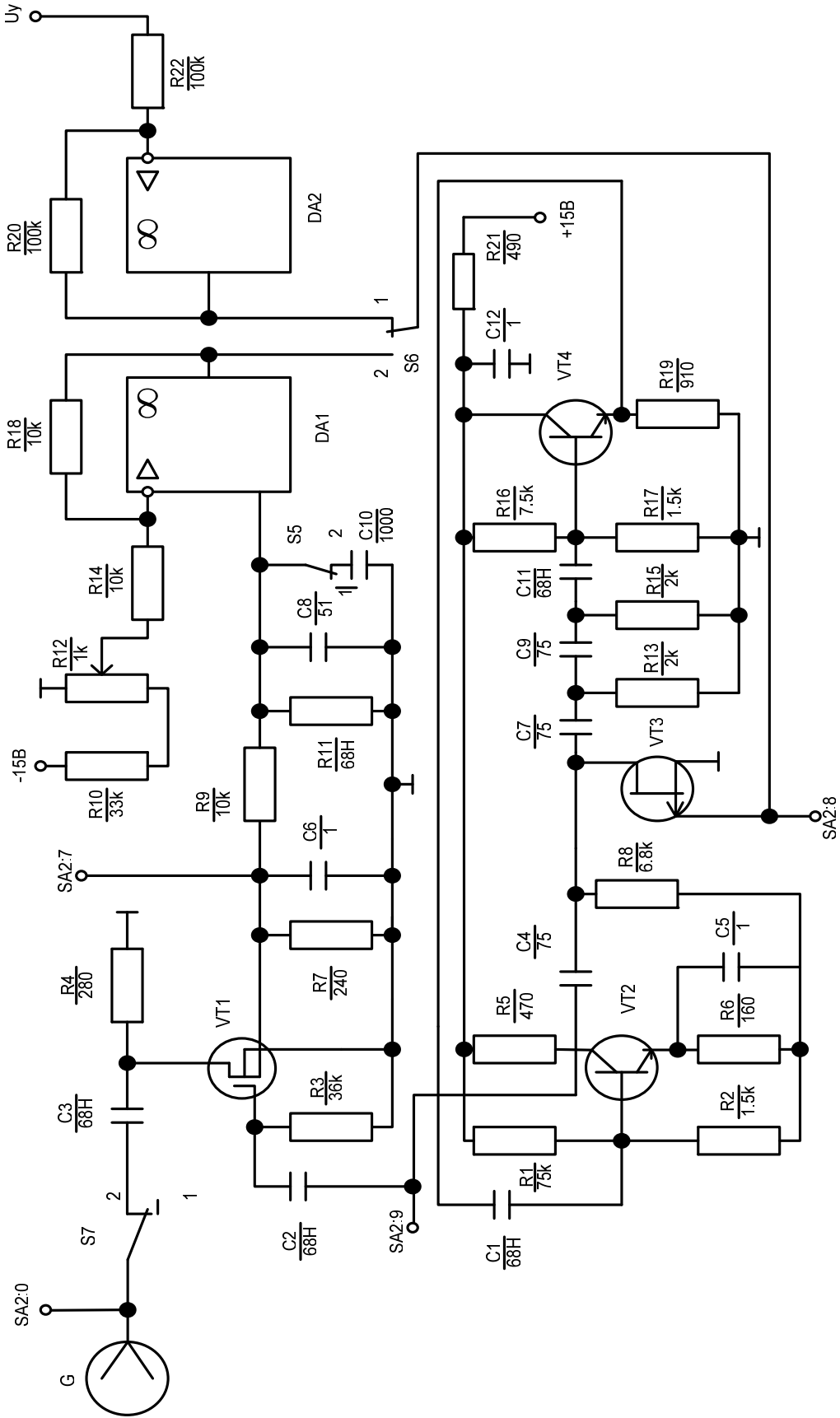


Рисунок 3.4 – Принципиальная электрическая схема системы ФАПЧ

4 Исследование характеристик типовых линейных звеньев систем радиоавтоматики

4.1 Цель работы

Целью работы является исследование АЧХ и ПХ типовых линейных звеньев систем РА: пропорционального, апериодического первого порядка, звена второго порядка, интегрирующего и дифференцирующего.

4.2 Краткие теоретические сведения

Эквивалентные схемы звеньев систем РА, их передаточные функции, характеристики, значения коэффициентов в уравнениях моделей звеньев приведены в табл.3.1.

4.3 Расчетное задание

Рассчитать и построить асимптотические логарифмические и переходные характеристики следующих звеньев: апериодического первого порядка (2), интегрирующего (9), дифференцирующего (10). звена второго порядка (8) для апериодического и колебательного режимов. Расчет провести для всех указанных (см. табл. 3.1) значений параметров k, T, λ (то есть для всех указанных положений тумблеров S3, S7, S8, S9). Определить сопрягающие частоты, частоты среза.

4.4 Экспериментальное задание

Измерить и построить АЧХ и ПХ следующих звеньев: пропорционального (1), апериодического первого порядка (2), интегрирующего (9), дифференцирующего (10). звена второго порядка (8) для апериодического, колебательного и консервативного режимов. Измерение провести для всех указанных (см. табл.3.1) положений тумблеров S3, S7, S8, S9). Для каждого звена измеренные характеристики построить на одном графике с рассчитанными. Сравнить расчетные и экспериментальные результаты.

По экспериментальным характеристикам определить диапазон частот, в которых звенья сохраняют свои свойства, коэффициенты передачи, частоты среза, сопрягающие частоты, а по ним – постоянные времени T , параметры переходного процесса: перерегулирование, колебательность, временные параметры.

4.5 Указания по выполнению работы

При выполнении данной работы переключатели SB1 - SB7 должны быть выключены, положение переключателей SA1-1,2 - нулевое.

При выборе диапазона частот для измерений АЧХ необходимо

ориентироваться на величины постоянных времени звеньев, а также на рассчитанные сопрягающие частоты и частоты среза. Эти параметры будут необходимы для выполнения второй лабораторной работы.

При измерении ПХ важно помнить, что длительность импульсов формирователя должна превышать длительность переходных процессов в звене. Измеренная ПХ интегрирующего звена будет отличаться от монотонной из-за ограничения по напряжению питания ОУ.

В отчете экспериментальные и расчетные характеристики строятся совместно. Масштаб по оси частот - логарифмический.

5 Исследование качественных показателей систем РА

5.1 Цель работы

Исследование влияния параметров звеньев на устойчивость, ошибку регулирования и качество переходных процессов статических и астатических систем РА.

5.2 Описание исследуемых систем

Структурная схема замкнутой статической системы приведена на рис. 5.1. Она состоит из двух пропорциональных и трех апериодических звеньев. Астатическая замкнутая система (рис. 5.2) собрана из одного интегрирующего, двух пропорциональных и двух апериодических звеньев.

Переключателями SB1-SB3 звенья соединяются в системы: SB1 размыкает и замыкает системы, SB2 и SB3 включают статическую, и астатическую системы соответственно. Изменение параметров звеньев осуществляется тумблерами S2 - S4.

Задающее $x(t)$ и возмущающее $f(t)$ воздействия могут быть поданы не только от внешнего генератора G и формирователя импульсов, но и посредством встроенных в макет регулируемых источников постоянного напряжения U_3 и U_B . Эти напряжения меняются дискретно с помощью переключателя SA1. Положения SA1 и соответствующие им значения U_3 и U_B приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Значения U_3 и U_B для положений переключателя SA1

SA1-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
- U_3 , В	0	1.2	2.2	3	4	4.9	5.8	6.6	7.4	8.2
SA1-2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
- U_B , В	0	1.2	2.2	3	4	5	6	6.8	7.8	8.8

5.3 Краткие теоретические сведения

Система является замкнутой, если в ней имеется обратная связь с выхода на вход. К астатическим относятся системы, содержащие интеграторы, к статическим системы без интеграторов.

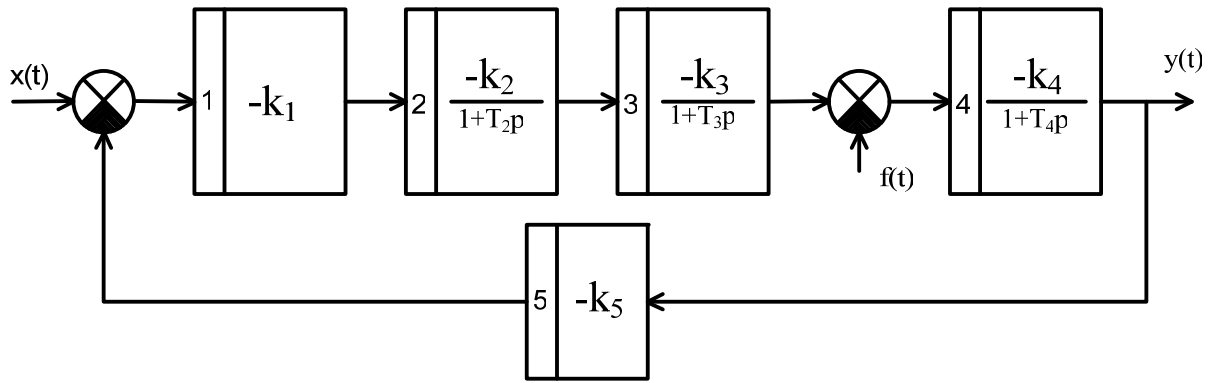


Рисунок 5.1 - Структурная схема статической системы.

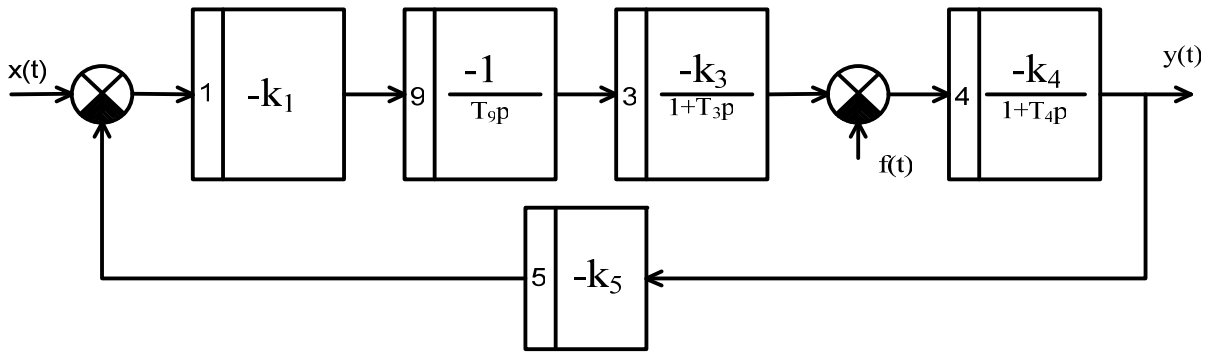


Рисунок 5.2 - Структурная схема астатической системы

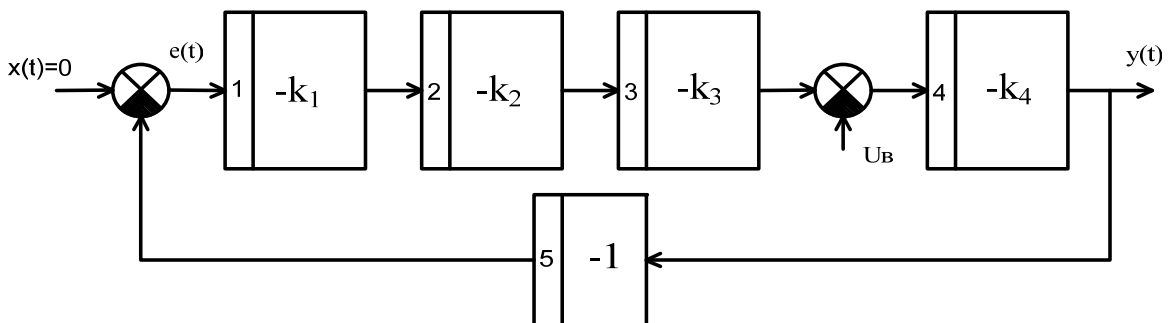


Рисунок 5.3 - Структурная схема статической системы в стационарном режиме

Устойчивость, ошибка регулирования и качество переходных процессов являются основными характеристиками систем РА. Все эти характеристики можно

определить из уравнения системы, связывающего ее отклик $y(t)$ с воздействием $x(t)$. Для статической системы при $k_5 = 1$

$$Y(p) = \frac{X(p)k_c}{(k_c + (1+T_2p) \cdot (1+T_3p) \cdot (1+T_4p))} - \frac{F(p)k_4(1+T_2p)(1+T_3p)}{(k_c + (1+T_2p) \cdot (1+T_3p) \cdot (1+T_4p))}, \quad (5.1)$$

где $k_c = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4$ – коэффициент передачи статической системы, $Y(p)$, $X(p)$, $F(p)$ – изображения по Лапласу отклика, входного и возмущающего воздействий соответственно. Для астатической системы при $k_5 = 1$

$$Y(p) = \frac{X(p) \cdot k_a}{(k_a + T_9 p \cdot (1+T_3p) \cdot (1+T_4p))} - \frac{F(p) \cdot k_4 \cdot T_9 \cdot p \cdot (1+T_3p)}{(k_a + T_9 p \cdot (1+T_3p) \cdot (1+T_4p))}, \quad (5.2)$$

где $k_a = k_1 \cdot k_3 \cdot k_4$ – коэффициент передачи астатической системы.

Для анализа устойчивости в работе применяется критерий, основанный на использовании логарифмических характеристик разомкнутых систем. В соответствии с этим критерием замкнутая система будет устойчивой, если ее логарифмическая АЧХ (ЛАХ) $L(\omega)$ при разомкнутой ОС пересекает ось абсцисс раньше, чем фазочастотная характеристика $\varphi(\omega)$ перейдет за значение минус π . По известным логарифмическим характеристикам легко получить величины запасов по амплитуде ΔL и

фазе $\Delta \varphi$:

$$\Delta L = -L(\omega_{кр});$$

$$\Delta \varphi = \pi + \varphi(\omega_{кр}),$$

где $\omega_{кр}$ – частота среза, $\omega_{кр}$ – критическая частота.

Ошибка регулирования оценивается в стационарном режиме по статической характеристике $e(U_B)$, получаемой из операторного уравнения при $p=0$. Для статической системы из (5.1)

$$Y(0) = X(0)k_c / (k_c + 1) - F(0)k_4 / (k_c + 1),$$

откуда

$$e(U_B) = (1 + k_4 F(0) / X(0)) / (k_c + 1).$$

Для астатической системы $e(U_B) = 0$.

Качественные показатели систем РА оценивают непосредственно по ПХ или косвенно по ЛАХ.

5.4 Расчетное и экспериментальное задание

5.4.1. При $U_3=U_B=0$ И включенном формирователе импульсов (тумблер S1 во втором положении - S1/2) получить импульс на экране осциллографа.

5.4.2. Для статической замкнутой системы (SA2-1/1, SA2-2/4, SA2-3/4; SB1/замкн., SB2/стат.), изменяя параметры звеньев этой системы тумблерами S2-S4, получить две переходных характеристики. Первую (ее желательно получить для S2/1) назовем допустимой, имеющей малое перерегулирование и колебательность. Вторую (ее желательно получить для S2/2) назовем недопустимой, имеющей большое перерегулирование и колебательность. Запомнить положение тумблеров S2-S4 для указанных характеристик. Измерить параметры ПХ (время фронта, длительность переходного процесса, перерегулирование и колебательность).

5.4.3. Разомкнуть систему (SB1/разомкн.) и измерить АЧХ для обоих случаев, соответствующих измеренным ПХ. Измерить и рассчитать коэффициент усиления системы и частоты среза. На частотах среза рассчитать запасы устойчивости по фазе. Сравнить экспериментальные результаты с расчетными. Сделать выводы о влиянии запаса устойчивости по фазе на качество переходных процессов систем.

5.4.4. Прodelать пункты 5.4.1-5.4.3 для астатической системы (SB2/астатич.). Сравнить характеристики обеих систем. Указать, в какой из систем выше качество переходных процессов, больше запас устойчивости по фазе, меньше ошибка регулирования и объяснить причину этого.

5.4.5. Исследовать влияние возмущающего воздействия на ошибку регулирования статической системы. Структурная схема системы для статического режима изображена на рис. 5.3. Из схемы следует очевидное равенство

$$e(t \rightarrow \infty) = y(t \rightarrow \infty) = U_{вк4} / (k_c - 1).$$

Измерить и рассчитать статическую характеристику $e(U_B)$ при $U_3=0$ и изменяющемся U_B (SA1-1/0. SA1-2/0-9) для двух коэффициентов усиления системы (S2/1,2). Сделать выводы о влиянии коэффициента усиления системы на ошибку регулирования. Как соотносятся между собой требования по устойчивости и ошибке регулирования?

5.4.6. Прodelать пункт 5 для астатической системы. Сравнить обе системы по величине ошибки регулирования. Связаны ли между собой ошибки регулирования и быстродействие систем?

5.5 Указания по выполнению работы

При выполнении экспериментов необходимо руководствоваться требованиями пункта 3.1.3.

Выводы по работе должны содержать объяснение всех полученных характеристик на основе физики работы систем. Делать выводы после каждого эксперимента, располагая объяснение полученных зависимостей

непосредственно в тексте экспериментальной части работы.

6 Исследование системы автоматической регулировки усиления

6.1 Цель работы

Целью работы является исследование статических и динамических характеристик инерционной усиленной системы АРУ с задержкой.

6.2 Краткие теоретические сведения

Система АРУ (рис. 6.1) включает регулируемые усилители У1 и У2, усилитель с фиксированным усилением У3, амплитудный детектор АД с цепью задержки E_3 на 0.7 В, усилитель постоянного тока (УПТ) У4 и совмещенный с ФНЧ УПТ У5. Постоянная времени фильтра переключается тумблером S4: $T_1=80$ мс, $T_2=0.4$ мс.

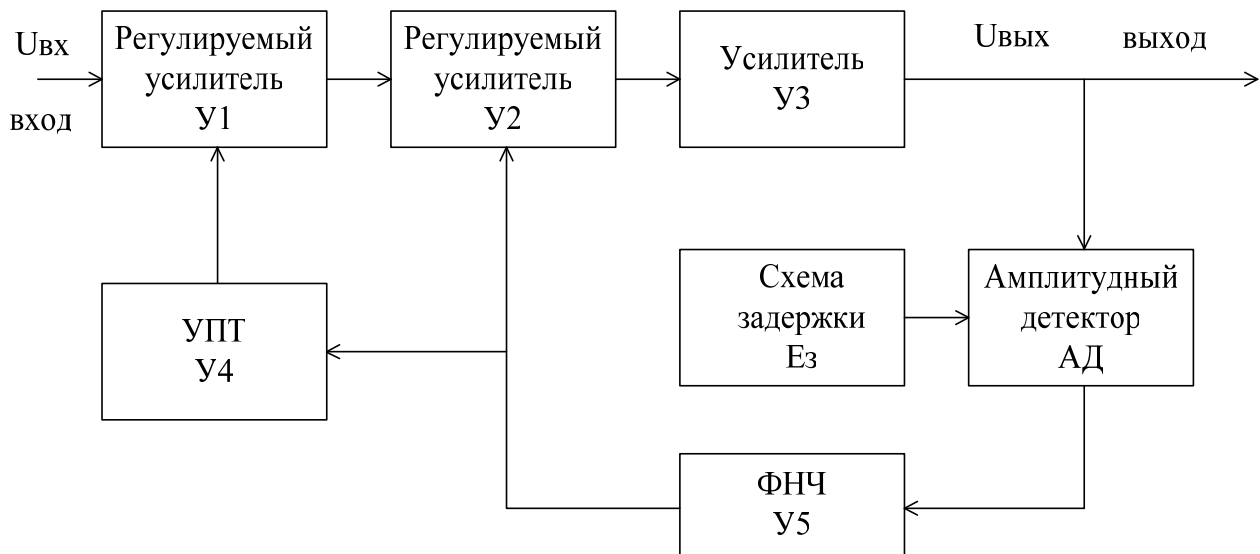


Рисунок 6.1 – Функциональная схема системы АРУ

Регулируемые усилители У1 и У2 имеют регулировочные характеристики, аналогичные показанным на рис. 6.2.

Аналитически линеаризованная (1) регулировочная характеристика может быть описана выражением:

$$K = K_0 - S_y \cdot U_y \quad (6.1)$$

где K_0 - максимальное значение коэффициента передачи, соответствующее нулевому управляющему напряжению; S_y - крутизна регулировочной характеристики; U_y - управляющее напряжение.

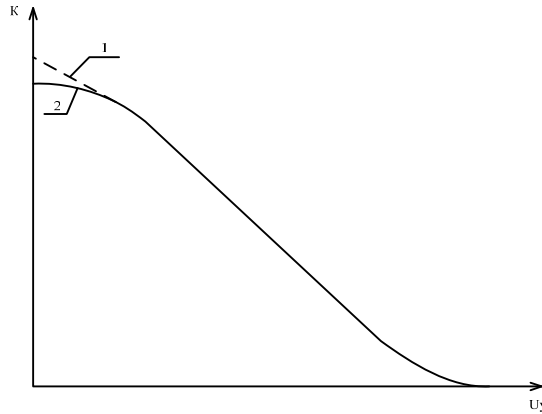


Рисунок 6.2 - Регулировочная характеристика усилителя с регулируемым усилением.

Параметры S_y и K_0 для используемых в настоящей работе усилителей определяются следующими соотношениями. Для усилителя У1 на полевом тетраде:

$$K_0 = S_{31} \cdot R_H$$

$$S_y = K_0 \cdot K_4 \cdot (U_{32} - U_0)^3 / (U_{31} - U_0)^4 \cdot \exp(-(U_{32} - U_0)^2 / (U_{31} - U_0)^2),$$

где U_{31} U_{32} , - напряжения смещения на первом и втором затворах соответственно; S_{31} - крутизна вольт-амперной характеристики по первому затвору; U_0 - напряжение отсечки тока стока; K_4 - коэффициент передачи УПТ У4.

Для электрически управляемого аттенюатора У2 $K_0=1$; $S_y=1/U_0$. Графическое представление регулируемого усилителя как элемента системы автоматического регулирования осуществляется в соответствии с (6.1) в виде структурной схемы, показанной на рисунке 6.3.

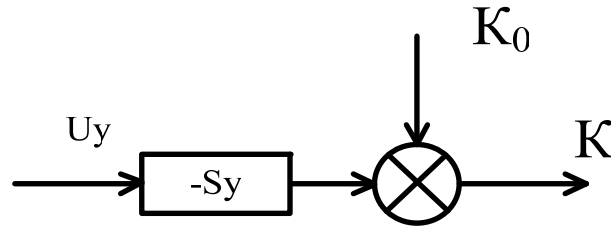
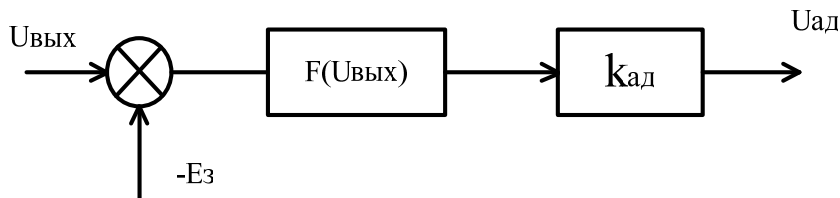


Рисунок 6.3 - Структурная схема регулируемого усилителя

Амплитудный детектор выполнен на диоде VD1 (см. рисунок 3.3), элементы R28, C16 образуют нагрузку детектора, а дополнительное запирающее напряжение-задержка подводится к диоду резистивным делителем R27, R29. Наличие задержки E_3 приводит к тому, что напряжение $U_{АД}$ на выходе детектора появляется только в случае превышения амплитуды сигнала напряжения задержки:

$$U_{АД} = \begin{cases} 0, & U_{вых} \leq E_3 \\ k_{АД} \cdot (U_{вых} - E_3), & U_{вых} > E_3 \end{cases}$$

где $k_{АД}$ -коэффициент передачи амплитудного детектора. Структурная схема детектора приведена на рисунке 6.4.



$$F(U_{вых}) = \begin{cases} 1, & \text{при } U_{вых} > E_3 \\ 0, & \text{при } U_{вых} \leq E_3 \end{cases}$$

Рисунок 6.4 - Структурная схема амплитудного детектора

Моделирование ФНЧ осуществляется в виде звена направленного действия с передаточной функцией $W_{\Phi}(p)$.

Структурная схема системы АРУ образуется соединением моделей функциональных блоков (рис. 6.5).

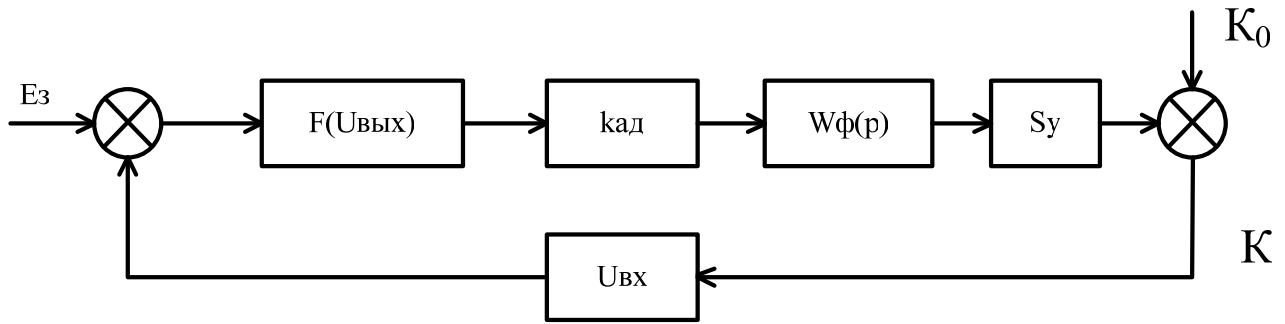


Рисунок 6.5 - Структурная схема системы АРУ

На рисунке 6.5

$$F(U_{\text{вых}}) = \begin{cases} 1, & \text{при } U_{\text{вых}} > E_3 \\ 0, & \text{при } U_{\text{вых}} \leq E_3 \end{cases}$$

$W_{\text{ф}}(p)$ -передаточная функция фильтра;

S_y - крутизна регулировочной характеристики;

$U_{\text{вх}}$ - амплитуда входного сигнала.

Рассматриваемая система автоматического регулирования является нестационарной (звено с передаточной функцией « $U_{\text{вх}}$ ») системой стабилизации (задающее воздействие $E_3 = \text{const}$), реализующей принцип обратной связи.

Характеристикой регулирования системы АРУ в статическом стационарном режиме является зависимость амплитуды выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{вх}}$ (рисунок 6.6.).

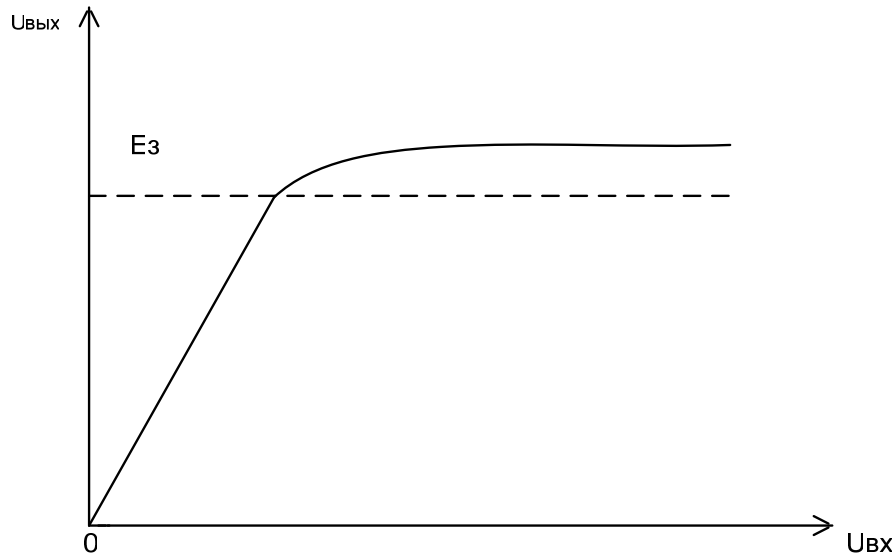


Рисунок 6.6 - Характеристика регулирования системы АРУ

Методами теории линейных систем автоматического регулирования анализ системы может быть произведен только в статическом стационарном режиме (при фиксированных $U_{вх}$):

$$U_{вых} = \begin{cases} K_0 \cdot U_{вх}, & \text{при } U_{вх} \leq E_3 \\ \frac{k_{АД} \cdot k_{\phi} \cdot S_y + K_0}{1 + k_{АД} \cdot k_{\phi} \cdot S_y \cdot E_3} \cdot U_{вх}, & \text{при } U_{вх} > E_3 \end{cases}$$

где k_{ϕ} – коэффициент передачи фильтра.

Инерционность системы АРУ определяется детектором ФНЧ и цепью R13,C6. В соответствии с критерием Гурвица система устойчива при выполнении неравенства:

$$\left(\frac{1}{T_{БЛ}} + \frac{1}{T_{\phi}} + \frac{1}{T_{АД}} \right) (T_{БЛ} + T_{\phi} + T_{АД}) > 1 + k_{\phi} k_{АД} S_y U_{вх}$$

где T_{ϕ} ,

$T_{АД}$ и $T_{БЛ}$ - постоянные времени соответственно фильтра, детектора и цепи R13.C6.

6.3 Расчетное задание

Исходные данные: $K_4=4$, $k_{АД}=0.85$, $k_{\phi}=3.5$ В, $T_{АД}=0.5$ мс, $T_{БЛ}=0,3$ мс,

постоянные времени фильтра $T_1=80$ мс, $T_2=0.4$ мс.

Рассчитать и построить регулировочные характеристики:

- 1) усилителя U_1 на полевом тетроде КП350 при $U_0=0.8$ В, $S_{31}=5$ мА/В, $U_{31}=3,5$ В, $U_{32}=5,5$ В, $R_H=160$ Ом;
- 2) электрически управляемого аттенюатора U_2 на полевых транзисторах КП307 с $U_0=1.6$ В;
- 3) последовательно включенных U_1 и U_2 .

Рассчитать и построить АХ:

- 1) при включении в цепь АРУ усилителя U_1 ;
- 2) при включении в цепь АРУ двух усилителей U_1 и U_2 .

При двух значениях постоянной времени фильтра определить допустимую амплитуду входного сигнала U_{max} , при которой система находится на границе устойчивости.

6.4 Экспериментальное задание

Измерить и построить регулировочные характеристики, определяя амплитуду сигнала на выходе усилителя U_3 :

- 1) усилителя U_1 на полевом тетроде;
- 2) аттенюатора U_2 на полевых транзисторах;
- 3) последовательно включенных U_1 и U_2 .

По экспериментальным данным для всех трех случаев рассчитать крутизну регулировочной характеристики S_V , сопоставить с расчетом.

Частоту сигнала генератора G выбрать в пределах 300-400 Гц, в амплитуду - в интервале 5-10 мВ.

При постоянной времени фильтра T_1 измерить и построить амплитудные характеристики:

- 1) разомкнутой системы АРУ;
- 2) при охвате АРУ одного каскада U_1 ;
- 3) при охвате АРУ двух каскадов U_1 и U_2 .

При измерении АХ разомкнутой системы увеличение амплитуды входного сигнала производить до появления заметных на глаз нелинейных искажений на выходе системы (SA2/3).

При постоянной времени фильтра T_2 для замкнутой системы определить максимальную амплитуду входного сигнала, при которой система теряет устойчивость. Эксперимент проводить при использовании амплитудно-модулированного (АМ) сигнала с частотой модулирующего сигнала 400 Гц и глубиной модуляции 0,6-0,8. Визуально потеря устойчивости системы

наблюдается на экране осциллографа но существенному искажению формы огибающей АМ-сигнала на выходе системы АРУ Объяснить причины потери устойчивости системы АРУ

6.5 Контрольные вопросы

6.5.1. Дать определение регулировочной характеристики, сформулировать требования к ней.

6.5.2 Как изменяется регулировочная характеристика при последовательном включении двух регулируемых усилителей?

6.5.3. Какая система АРУ называется инерционной? Усиленной? Задержанной?

6.5.4. Объяснить причины потери устойчивости системы АРУ.

6.5.5. Сформулировать назначение фильтра и соображения по выбору его постоянной времени.

7 Исследование системы фазовой автоподстройки частоты

7.1 Цель работы

Целью работы является исследование зависимости полосы удержания и полосы захвата системы ФАПЧ от параметров звеньев.

7.2 Краткие теоретические сведения

Функциональная схема системы приведена на рисунке 7.1.

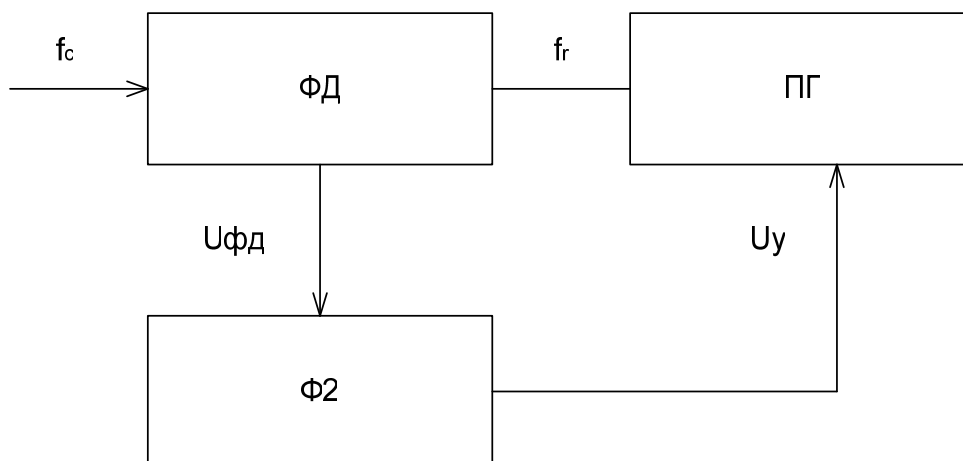


Рисунок 7.1 - Функциональная схема системы ФАПЧ

В состав системы входят фазовый дискриминатор (ФД), подстраиваемый генератор (ПГ) с цепью управления и ФНЧ (Ф2) с переключаемой тумблером S5 постоянной времени: $T_1=5$ мкс, $T_2=0,25$ мкс.

Фазовый дискриминатор представляет собой устройство, величина и знак напряжения на выходе которого однозначно определяются разностью фаз двух колебаний, подаваемых на его входы. Дискриминационная характеристика является периодической функцией, вид которой показан на рис. 7.2.

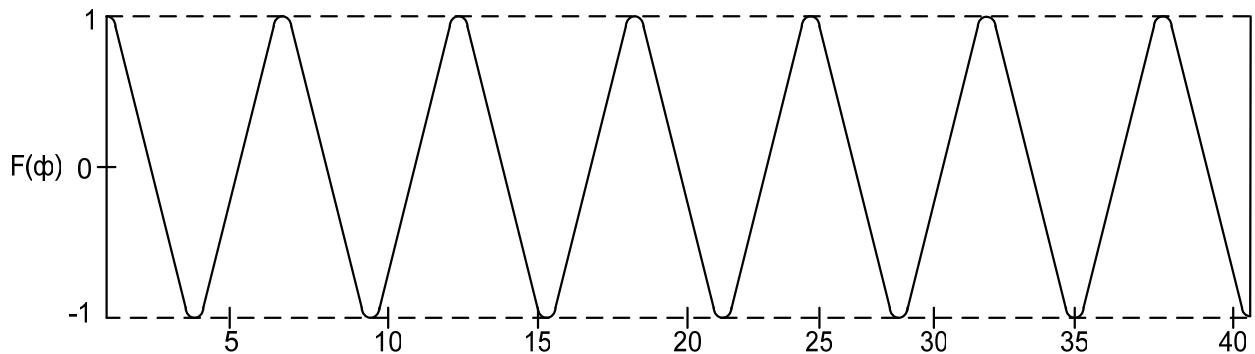


Рисунок 7.2 - Дискриминационная характеристика фазового дискриминатора

При работе системы в следящем режиме разность фаз сигналов постоянна. Для линейного моделирования дискриминационную характеристику ФД линеаризуют в окрестности остаточной разности фаз. Численное значение коэффициента передачи ФД k_{φ} рассчитывается по формуле:

$$k_{\varphi} = \frac{U_r U_c}{2U_0}$$

где U_r , U_c - амплитуды сигнала и ПГ; отсечки тока стока транзистора ФД.

Структурная схема ФД с учетом интегрального соотношения разности фаз сигналов с их частотами и постоянной времени нагрузки $T_{\text{фд}}$ изображена на рисунке 7.3.

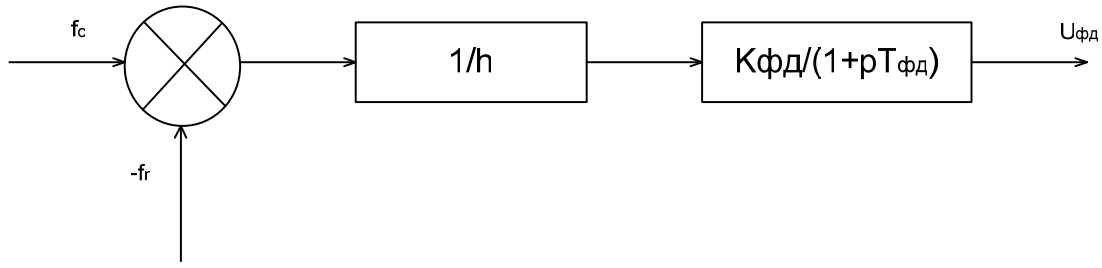


Рисунок 7.3 - Структурная схема фазового дискриминатора

Регулировочная характеристика (РХ) ПГ - это зависимость частоты генерации от управляющего напряжения (рис. 7.4).

Аналитически РХ ПГ записывается в виде:

$$f_r = f_0 + S_v \cdot U_v;$$

$$S_v = 2.5 f_{\max} K_{y7} / [U_0 (5 + R/R_{\min})];$$

$$f_{\max} = 1 / [2\pi RC (1 + 5R_{\min}/R)^{0.5}];$$

$$R_{\min} = 1 / [(AU_0)];$$

где R, C - сопротивление резисторов и емкость конденсаторов фазосдвигающей цепи ПГ, A - коэффициент пропорциональности в зависимости тока стока от напряжения затвор-сток, K_{y7} - коэффициент передачи УПТ У7.

Структурная схема ПГ приведена на рисунке 7.5

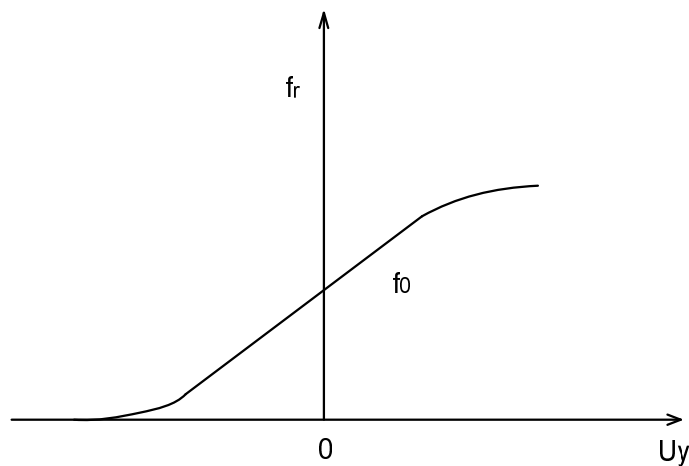


Рисунок 7.4 - Регулировочная характеристика подстраиваемого генератора

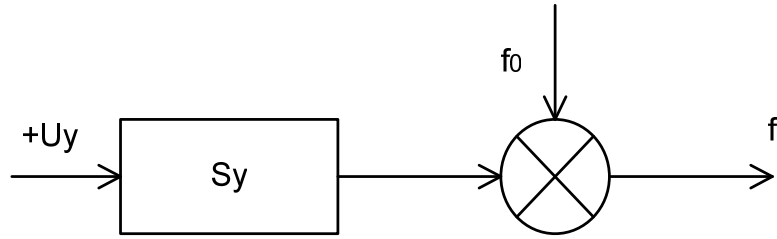


Рисунок 7.5 - Структурная схема подстраиваемого генератора

Однозвенный активный ФНЧ Ф2 моделируется звеном направленного действия с передаточной функцией:

$$W_{\phi}(p) \cong \frac{k_{\phi}}{1 + pT_{\phi}},$$

где k_{ϕ} - коэффициент передачи УПГ У2, T_{ϕ} - постоянная времени фильтра.

Структурная схема системы ФАПЧ образуется соединением структурных схем элементов в соответствии с их расположением на функциональной схеме и показана на рисунке 7.6.

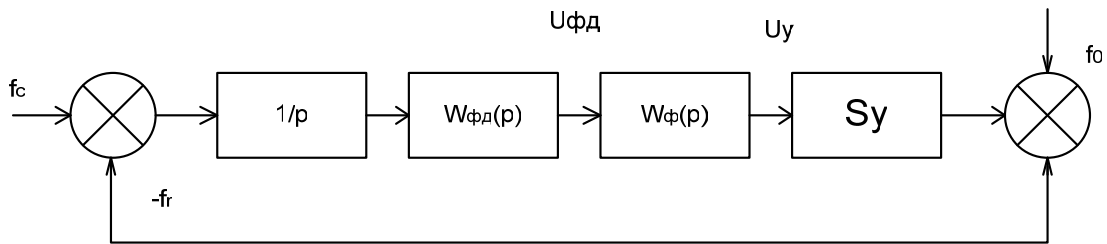


Рисунок 7.6 - Структурная схема системы ФАПЧ

Уравнение системы, связывающее частоту ПГ f_r с частотой задающего колебания f_c в операторной форме имеет вид:

$$f_r(p) = \frac{K_{\text{ФАПЧ}}}{p(1+pT_{\text{ФД}})(1+pT_{\phi}) + K_{\text{ФАПЧ}}} \cdot f_c(p)$$

В соответствии с критерием Гурвица система устойчива при выполнении

двух условий:

$$K_{\Phi АП} > 0$$

$$(1/T_{\Phi Д} + 1/T_{\Phi}) > K_{\Phi АП} \quad (7.2)$$

В установившемся режиме, как следует из (7.1), при $p=0$ частоты f_f и f_c равны. Режим работы, при котором изменения частоты внешнего генератора компенсируются системой ФАПЧ, называется режимом удержания. Диапазон частот f_c , в котором подстраиваемый генератор осуществляет слежение с нулевой ошибкой, называется полосой удержания Δf_y , равной

$$\Delta f_y = 2 * S_y * U_{\Phi Д \max} * k_{\Phi},$$

где $U_{\Phi Д \max}$ – максимальное напряжение на выходе ФД.

Если отклонение частоты f_c выходит за пределы Δf_y , то система переходит из режима удержания в режим биений (на выходе ФД наблюдаются колебания с частотой биений $f_c - f_0$). Возвращение в режим удержания происходит при меньшей разности частот сигнала и ПГ. Диапазон частот f_c в котором система переходит в режим слежения, носит название полосы захвата Δf_z . Полоса захвата реальных систем меньше полосы удержания, что связано с наличием инерционных звеньев - нагрузки ФД и фильтра.

7.3 Расчетное задание

7.3.1. Рассчитать и построить, регулировочную характеристику ПГ при $R=2\text{кОм}$, $C=>75\text{ пФ}$, $K_{y7}=0,4$, $f_0=370\text{ кГц}$ и параметрах транзистора КП103 $U_0=1,2\text{ В}$, $A=0,8*10\text{ См/В}$

7.3.2. Для двух значений постоянной времени фильтра $T_1=5\text{мс}$ и $T_2=0,25\text{ мс}$ и двух амплитуд $U_c=0,2\text{ В}$ и $0,6\text{ В}$ оценить устойчивость системы ФАПЧ. В расчетах принять $k_{\Phi}=4$, напряжение отсечки полевого транзистора ФД $U_0=1\text{ В}$, $U_r=0.6\text{ В}$, $T_{\Phi Д}=100\text{ мс}$.

7.3.3. Рассчитать полосу удержания Δf_y при условиях, указанных в пункте 7.3.2.

7.4 Экспериментальное задание

7.4.1 Для исследования системы ФАПЧ необходимо тумблеры S7 и S8 на передней панели макета перевести в положение "2" (см. рис. 3.2). Переключение постоянного времени фильтра Ф2 осуществляется тумблером S5.

7.4.2 Измерить и построить регулировочную характеристику подстраиваемого генератора.

7.4.3 При максимальной амплитуде сигнала $U_c=0,8 \dots 1$ В определить постоянную времени фильтра, при которой система ФАПЧ устойчива.

Выход системы из режима удержания (срыв слежения) сопровождается скачкообразным изменением частоты ПГ и возникновением биений на выходе ФД. Вход в режим слежения (захват частоты) характеризуется исчезновением биений на выходе ФД.

7.4.4. Измерить полосы удержания и захвата для устойчивого режима работы системы ФАПЧ.

7.4.5. Уменьшив амплитуду входного сигнала в 2 раза, измерить полосы удержания и захвата. Объяснить физическую сущность явлений, протекающих в системе ФАПЧ в режиме захвата.

7.5 Контрольные вопросы

7.5.1. Дать определения полосы удержания и полосы захвата

7.5.2. От каких параметров системы зависит полоса удержания?

7.5.3. Почему полоса захвата меньше полосы удержания? В каком случае они будут равны?

7.5.4. Из каких соображений выбирается постоянная времени ФНЧ?

7.5.5. Объяснить причины потери устойчивости системы ФАПЧ.

8 Исследование коррекции характеристик систем РА

8.1 Цель работы

Исследование характеристик систем РА при последовательной и параллельной коррекции

8.2 Описание исследуемых систем

В работе исследуются четыре системы:

1) скорректированная, состоящая из трех пропорциональных и двух апериодических звеньев (рисунок 8.1).

2) система с последовательной коррекцией, получаемая из предыдущей заменой одного пропорционального звена корректирующим ПИД звеном (рисунок 8.2);

3) система с параллельной коррекцией жесткой ОС, состоящая из четырех пропорциональных и трех апериодических звеньев (рисунок 8.3);

4) система с параллельной коррекцией гибкой ОС, получаемая из

предыдущей заменой пропорционального корректирующего звена дифференцирующим (рисунок 8.4).

Системы состояются из звеньев с помощью переключателей SB4-SB7 (рисунок 3.1). Переключателем SB1 выход каждой из этих систем замыкается со входом единичной ОС. С помощью тумблеров S2-S11 осуществляется изменение параметров звеньев.

8.3 Расчетное задание

8.3.1. Последовательная коррекция

Исходные данные: рис. 8.1, рис. 8.2, табл. 3.1. Тумблеры S2, S3 находятся во втором положении, S5 - в первом (S2/2, S3/2, S5/1).

Рассчитать:

- 1) ЛАХ скорректированной системы (см, рис. 8.1) при разомкнутой ОС;
Структурная схема некорректированной системы

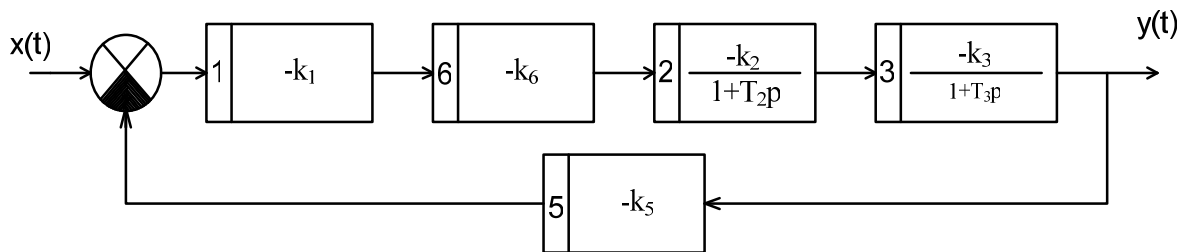


Рисунок 8.1 - Структурная схема системы с последовательной коррекцией ПИД звеном

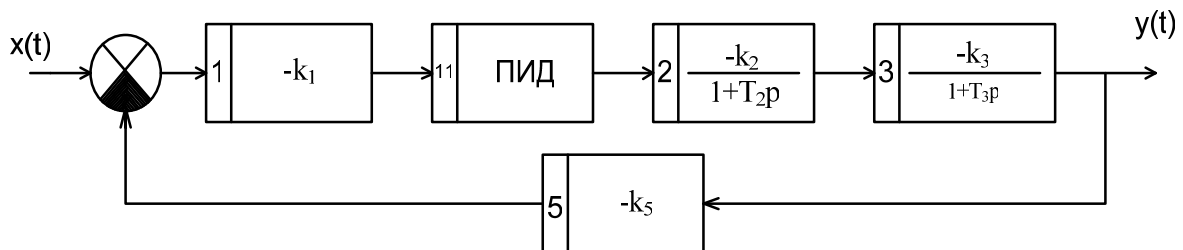


Рисунок 8.2 - Структурная схема системы с параллельной коррекцией жесткой ОС

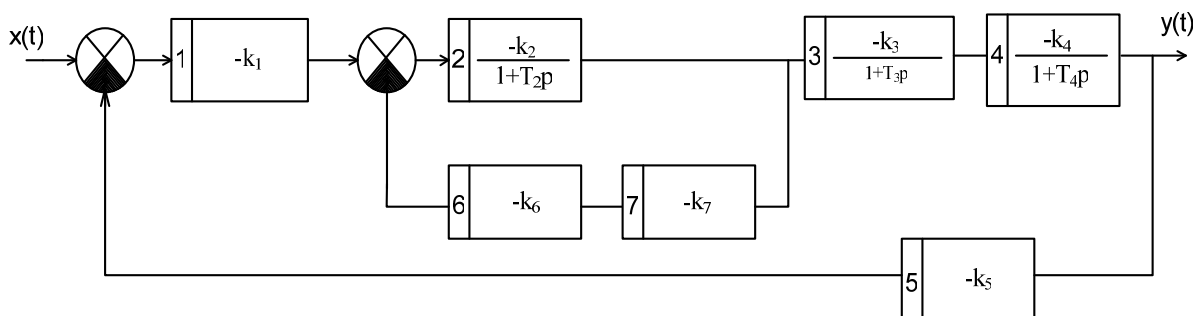


Рисунок 8.3 - Структурная схема системы с параллельной коррекцией гибкой ОС

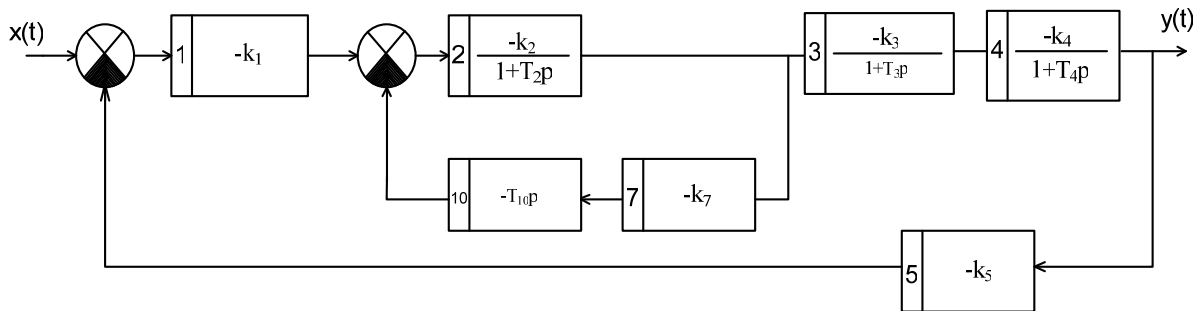


Рисунок 8.2

2) ЛАХ системы с последовательной коррекцией (см. рис. 8.2) при разомкнутой ОС, предварительно рассчитав ЛАХ ПИД звена для всех положений тумблеров S10, S11 (см. табл. 3.1).

Определить ЛАХ, при которой достигаются наилучшие показатели скорректированной системы в переходном режиме и по устойчивости.

8.3.2 Параллельная коррекция

Исходные данные: рис. 8.3, рис. 8.4, табл. 3.1. Тумблеры S2-S4 находятся во втором Положении, Рассчитать:

1) коэффициент передачи k_c и по критерию Гурвица его граничное значение замкнутой системы без коррекции;

2) коэффициент передачи k_c и по критерию Гурвица его граничное значение замкнутой системы с параллельной коррекцией жесткой ОС (см. рис. 8.3) для всех положений тумблеров S5, S6 (см. табл. 3.1);

3) коэффициенты передачи k_c и по критерию Гурвица его граничное значение замкнутой системы с параллельной коррекцией гибкой ОС (см. рис. 8.4) для обоих положений тумблера S6 (см. табл. 3.1);

Определить ЛАХ, при которой достигается наибольший запас устойчивости в системах с параллельной коррекцией жесткой и гибкой ОС.

8.4 Экспериментальное задание

8.4.1. Для некорректированной системы при разомкнутой ОС (см. рис. 8.1) положения тумблеров S2/2, S3/2, S5/1) измерить АЧХ и сопоставить с расчетом.

8.4.2. Исследовать качество переходных процессов в замкнутой системе, определив длительность переходного процесса, перерегулирование и колебательность переходной характеристики.

8.4.3. Для системы с последовательной коррекцией при разомкнутой ОС (см. рис. 8.2, положения тумблеров S2/2, S3/2) и выбранного при расчете вари-

анта положения тумблеров S10, S11 ПИД звена измерить АЧХ и сопоставить с расчетом.

8.4.4. Замкнув ОС, исследовать качество переходных процессов.

8.4.5. Для различных положений тумблеров S10, S11 исследовать связь качества переходных процессов с длиной участка ЛАХ, имеющим наклон минус 20 дБ/дек, с частотой среза, используя для этого результаты расчета.

8.4.6. Для системы с параллельной коррекцией жесткой ОС (см. рис. 8.3, положения тумблеров S2/2, S3/2, S4/2) и для всех положений тумблеров S5, S6 исследовать качество переходных процессов в замкнутой системе, сопоставить с результатами расчета по устойчивости данной системы, а также с результатами расчета некорректированной системы.

8.4.7. Для системы с параллельной коррекцией гибкой ОС (см. рис. 8.4, положения тумблеров S2/2, S3/2, S4/2) и для обоих положений тумблеров S6 исследовать качество переходных процессов в замкнутой системе, сопоставить с результатами расчета по устойчивости данной системы, а также с результатами расчета системы с параллельной коррекцией жесткой ОС, некорректированной системы.

8.5 Указания по выполнению работы

Для выполнения экспериментальной части предварительно необходимо выполнить расчетное задание.

При выполнении экспериментов следует руководствоваться требованиями пункта 3.1.3.

Выводы по работе должны содержать сравнение действия гибкой и жесткой ОС в установившемся и переходном режимах. Объяснение всех полученных характеристик на основе физики работы систем.

Список рекомендуемой литературы

1. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика. Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.
2. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 464 с.
3. Жаркой А.Г., Туев В.И. Радиоавтоматика. Руководство к лабораторным работам для студентов специальности 2301. Часть 2. – Томск: Ротапринт ТИАСУРа, 1988. – 27 с.
4. Радиоавтоматика /Под ред. В.А. Бесекерского. – М.: Высшая школа, 1985. – 271 с.
5. Бернгардт А.С. Радиоавтоматика: учеб. пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2006. – 188 с.
6. Лебедев Ю.М. Теория автоматического управления: учебное методическое пособие. – Томск: ТУСУР, 2000. – 141 с.
7. Теория автоматического управления. Учебник для ВУЗов по спец. «Автоматика и телемеханика» / А.А. Воронов, Д.П. Ким, В.М. Лохин и др.; Под ред. В.А. Воронова. – М.: Высш. Шк., 1986. – 504 с.