

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ПСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

О.Ю. Тимошевская

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ
УПРАВЛЕНИЯ**

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов очной формы обучения специальностей
230101 «Вычислительные машины, комплексы,
системы и сети»,
230201 «Информационные системы и технологии»*

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
Псковского государственного политехнического института*

Псков ППИ
2011

УДК 681.5
ББК 32.965
Т 41

Рецензенты: С.Н. Ильин, к.т.н. Козырев И.Н.

Тимошевская О.Ю.
Основы теории управления: методические указания к лабораторным работам.
ППИ, 2011 – 103 с.: ил.

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Основы теории управления» (ОПД.Р.01) предназначено для студентов Псковского государственного политехнического института специальностей 230101 «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети» и 230201 «Информационные системы и технологии» очной и очно-заочной форм обучения.

Данное методическое пособие позволяет на практике познакомиться с основными типовыми звеньями, использующимися в управлении процессами. В пособии выделены три больших раздела. В первом разделе «**Аналоговый персональный компьютер АВК-6**» рассматривается структура аналогово-вычислительного комплекса АВК-6, с помощью которого решаются задачи по управлению процессами. Во втором разделе «**Приемы работы с АВК-6**» описаны приемы работы с комплексом. Приводится подробное описание исследования статических и динамических характеристик типовых звеньев. Третий раздел включает описание лабораторных работ с использованием данного комплекса по изучению основных законов управления.

Данные методические указания позволяют студентам овладеть на практике навыками работы с аналоговой техникой, моделировать различные процессы, используя типовые звенья, производить исследования их статических и динамических характеристик.

Методические указания могут использоваться студентами родственных специальностей и специализаций других форм обучения.

УДК 681.5
ББК 32.965
Т 41

© Псковский государственный
политехнический институт, 2011.
© Тимошевская О.Ю., 2011.

СОДЕРЖАНИЕ

1. АНАЛОГОВЫЙ ПЕРСОНАЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

АВК-6.....	6
1.1 ОБЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ АВК-6	6
1.2. ИНДИКАЦИОННО – ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА АВК-6	8
1.2.1. Электронно-лучевой индикатор	8
1.2.2. Генератор системы синхронных сигналов ГСС-6... ..	9
1.2.3. Электронный коммутатор сигналов	12
1.3. СЛУЖЕБНЫЙ БЛОК.....	13
1.3.1. Назначение и состав	13
1.3.2. Сумматоры.....	15
1.3.3. Источники эталонных напряжений.....	16
1.3.4. Делители	17
1.3.5. Пульт управления индикатором	18
1.3.6. Вольтметр.....	19
1.3.7. Измеритель длительности.....	20
1.4. БЛОК ПИТАНИЯ.....	22
1.5. СМЕННЫЕ БЛОКИ АВК-6.....	23
1.5.1. Назначение и состав	23
1.5.2. Линейный блок.....	24
1.5.3. Нелинейный блок	26
1.5.4. Блок умножения-деления	28
1.5.5. Блок умножения.....	31
1.5.6. Импульсный блок.....	32
1.5.7. Блок преобразования координат.....	34
1.5.8. Блок спектрального анализа.....	36
1.5.9. Блок управляемой задержки	39
1.5.10. Блок случайных сигналов	42
2. ПРИЕМЫ РАБОТЫ С АВК-6	45
2.1. Знакомство с АВК-6.....	45
3. УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ.....	53
3.1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.....	53
ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	
НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	53
3.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.....	63

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ	63
3.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3	75
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ САУ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА.....	75
3.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4	80
ИССЛЕДОВАНИЕ ТИПОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ	80
3.5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.....	85
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ.....	85
3.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.....	92
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНОЙ САУ МЕТОДОМ D-РАЗБИЕНИЯ	92
3.7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.....	97
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО АЛГЕБРАИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ	97
3.8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8.....	101
ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ	101

1. Аналоговый персональный компьютер АВК-6

1.1 Общая организация АВК-6

Общий вид персонального аналогового компьютера АВК-6 показан на рис.1. Он выполнен в виде настольного прибора, объединяющего в одном корпусе мини-АВМ, индикационно - измерительную систему и источник питания. Слева расположены блоки индикационно - измерительной системы (ИИС) – электронно-лучевой индикатор 1, генератор системы синхронных сигналов и электронный коммутатор 2, и служебный модуль 3. Центральная часть АВК-6 - это сборочная панель 4, рассчитанная на установку шести сменных решающих модулей, из которых по структурной математической модели формируется аналоговый процессор – мини-АВМ. Справа расположен блок питания 5.

Главной особенностью АВК-6 является возможность программирования непосредственно по структурной математической модели динамического процесса. Такая возможность обеспечена выполнением коммутационных панелей блоков АВК-6 в виде развернутых мнемосхем с обозначениями элементов структурных моделей и связей между ними в символической, принятой в учебной и научно-технической литературе по теории динамических процессов. Соответствие преобразований электрических сигналов (напряжений) между гнездами, совмещенными с элементами мнемонической схемы, обозначениям последней обеспечено жестким предварительным объединением элементарных аналоговых вычислительных операций в микропрограммы решающих блоков.

Сменные решающие блоки АВК-6 выполнены в едином конструктиве, что позволяет устанавливать их на любую позицию монтажного поля - 4 в зависимости от вида структурной модели. Функциональная организация АВК-6 подсказывает пользователю оптимальный способ коммутации преобразователей при наборе модели.

Состав и характеристики элементов ИИС обеспечивают получение результатов моделирования в традиционных для инженерной практики графических формах: в виде семейств переходных процессов, фазовых траекторий, статических характеристик, частотных характеристик и годографов. Цифровые измеритель длительности и вольтметр, расположенные в служебном модуле, обеспечивают возможность измерения параметров модели, машинных переменных, временных интервалов и фаз сигналов в цифровом виде.

Мнемоника блоков ИИС дает пользователю исчерпывающую информацию об их функциональных возможностях. Расположение блоков ИИС слева от АВМ обеспечивает разделение зон оперативной

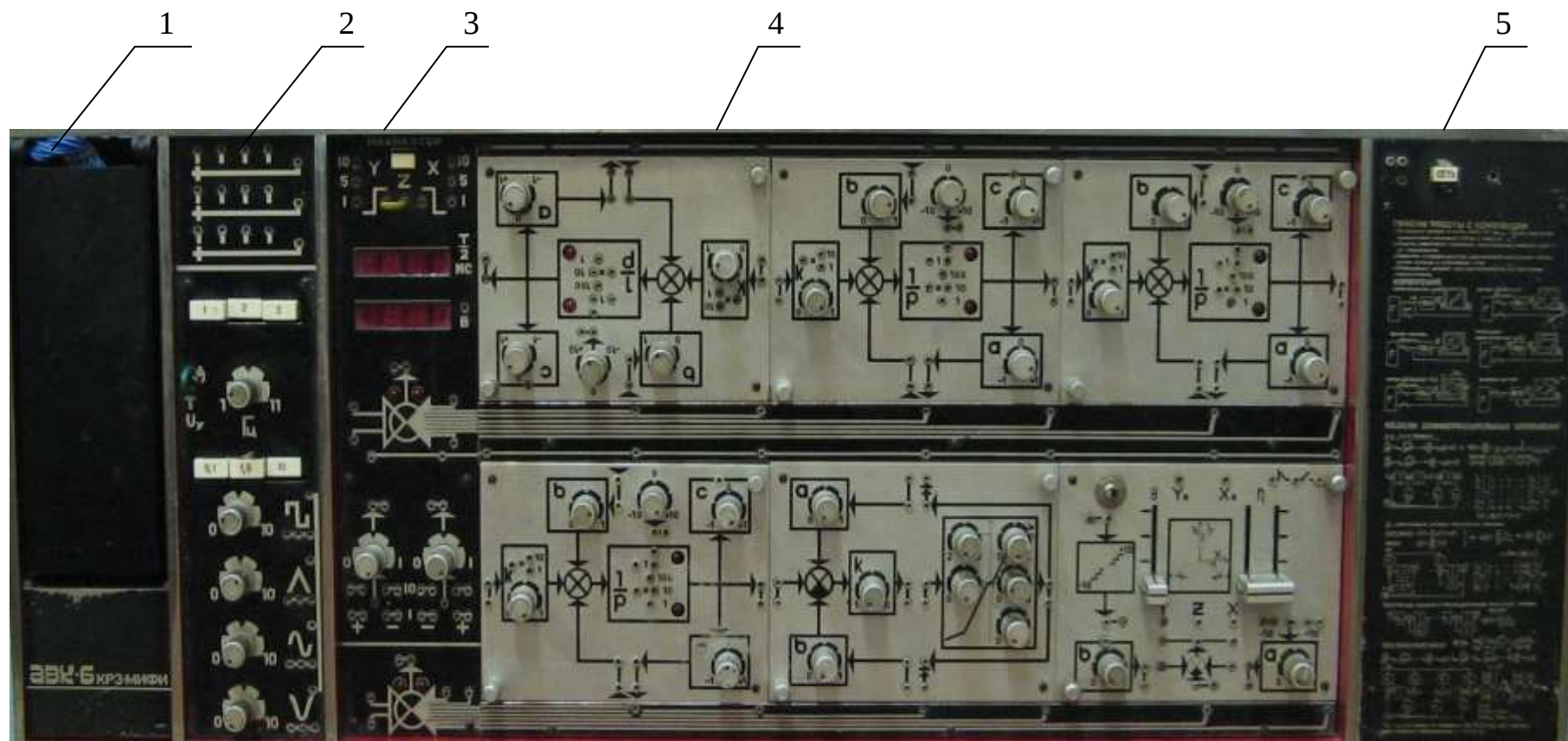


Рис.1. Персональный аналоговый компьютер (аналоговый интегрирующий компьютер) АВК-6
 1- индикатор; 2 - генератор и коммутатор; 3 - служебный модуль; 4 – сборочная панель; 5 – блок питания.

работы с моделью и средствами ее исследования, а также дает возможность подавать внешние воздействия на модель слева, т.е. в соответствии с принятой в научно-технической литературе традицией.

Блоки компьютера снабжены ручками и шкалами для оперативной настройки параметров, а линейные преобразователи – световыми индикаторами выхода из линейного режима работы. Индикаторы расположены рядом с мнемоническими изображениями преобразователей. Размеры передних панелей решающих блоков обеспечивают свободное прочтение мнемосхем и удобство работы с ручками настройки и коммутационными гнездами блоков при наборе, настройке и исследовании моделей.

Шарнирное крепление электронно-лучевого индикатора АВК-6 к корпусу позволяет установить экран в удобное положение.

Габаритные размеры АВК-6 – 660х240х80 мм, масса – 9 кг, мощность, потребляемая от сети 220 В, 50 Гц, до 40 ВА.

1.2. Индикационно – измерительная система АВК-6

1.2.1. Электронно-лучевой индикатор

Электронно-лучевой индикатор - 1 (рис. 1) предназначен для наблюдения и измерения электрических сигналов – напряжением до 10 В в частотном диапазоне от 0 до 50 кГц. Конструктивно он представляет собой законченный узел, состоящий из кожуха с электронно-лучевой трубкой внутри и электронного блока, оформленного в виде подставки. Кожух и подставка связаны шарниром, который позволяет приподнять экран индикатора и зафиксировать его в удобном для работы положении. Такая конструкция одновременно обеспечивает защиту электронных элементов от высокой температуры цоколя трубки при минимальном расстоянии между ними и трубкой.

Индикатор имеет два независимых канала вертикального - Y и горизонтального - X отклонения луча и канал управления яркостью луча - Z. Входные гнезда X, Y и Z расположены на мнемосхеме в верхней части служебного модуля – 3 (рис.1). Размеры рабочей части экрана 30х30 мм.

Усилители отклонения преобразуют входные однофазные сигналы, изменяющиеся в диапазоне ± 5 В, в пары противофазных напряжений, изменяющихся относительно постоянного уровня +50 В на ± 40 В.

Усилители отклонения выполнены по схеме дифференциального каскада на высоковольтных транзисторах типа КТ605Б по каналу Y и каналу X. Транзисторы охвачены отрицательной обратной связью (ОС). Она расширяет полосу пропускания и стабилизирует коэффици-

ент усиления и рабочую точку усилителя. Подстроечные резисторы позволяют смещать луч по вертикали и горизонтали и вывести его в центр экрана при отсутствии входных сигналов.

Питание усилителей отклонения осуществляется от двух стабилизированных источников напряжения 100 В и -15 В. Общий ток, потребляемый усилителями отклонения от каждого из источников, - 10 мА.

1.2.2. Генератор системы синхронных сигналов ГСС-6

На рис.1.2. представлена общая фальшпанель электронного коммутатора - 1 и генератора системы синхронных сигналов - 2.

Генератор ГСС-6 является источником системы синхронных сигналов прямоугольной, треугольной, синусоидальной и косинусоидальной форм. Эти сигналы используются для формирования воздействий на объект или модель и одновременно для формирования изображений на экране электронно-лучевого индикатора, чем достигается устойчивость изображений. Выбор режимов исследования моделей осуществляется при помощи переключателя – 3: клавиша 1 – непрерывное интегрирование, 2 – периодическое интегрирование, 3 – ввод начальных условий.

В режиме периодического интегрирования ГСС-6 управляет работой интеграторов.

Амплитуду каждого из четырех синхронных сигналов можно регулировать независимо от остальных в пределах 0 – 10 В. Диапазон частот от 0,1 до 1100 Гц при регулировании вручную (включена перемычка 4) разбит на четыре диапазона 0,1 – 1,1 Гц, 1,0 – 11 Гц, 10 – 100 Гц и 100 – 1100 Гц. Последний получается при отключенном состоянии всех клавиш переключателя диапазонов - 5. В каждом из поддиапазонов частоту колебаний можно регулировать плавно вручную ручкой 6 в отношении 1:11. Для управления частотой от внешнего сигнала, перемычку - 4 надо удалить и подать на вход U_y постоянное напряжение, изменяющееся в пределах 0,1 – 10 В. Это обеспечит безынерционное управление частотой всей системы синхронных сигналов в пределах двух декад на любом из четырех поддиапазонов: 0,01 – 1,0 Гц, 0,1 – 10 Гц, 1,0 – 100 Гц и 100 – 1000 Гц.

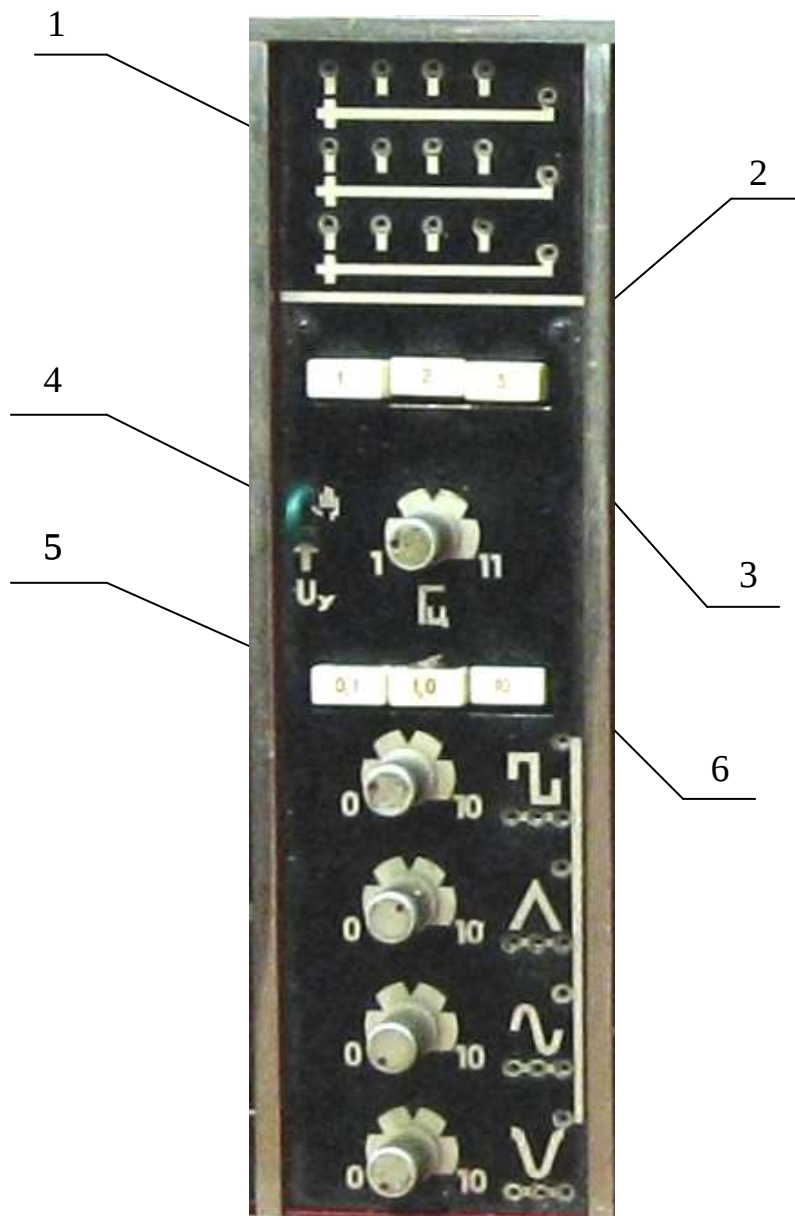


Рис.1.2. Фальшпанель электронного коммутатора и генератора АВК- 6

1 – электронный коммутатор; 2 – блок генератора; 3 – переключатель режимов исследования; 4 – переключатель режимов управления частотой генератора; 5 – переключатель поддиапазонов частоты генератора; 6 – ручка управления частоты генератора.

Структурная схема генератора показана на рис. 1.3. Релаксационный генератор, образованный нелинейным преобразователем - 1, усилителем - 2 и интегратором - 3 формирует прямоугольные $\Pi(t)$ и

треугольные $\Delta(t)$ импульсы с частотой $f = \frac{kU_m}{4\Delta}$, где U_m – амплитуда прямоугольных импульсов на выходе нелинейности с гистерезисной характеристикой - 1; Δ – полуширина петли гистерезиса и $k=k_1k_{II1}$ – общий коэффициент дополнительного усилителя - 2 и первого интегратора - 3. Нелинейность - 4 формирует из треугольного сигнала сигнал косинусоидальной формы $k(t)$. На выходе интегратора - 6 из косинусоидального сигнала формируется синусоидальный сигнал $c(t)$. Для поддержания нулевого среднего значения последнего введена вторая обратная связь с выхода интегратора - 6 на второй интегрирующий вход сумматора - 7.

Амплитуда треугольного сигнала $\Delta(t)$ определяется полушириной петли гистерезиса Δ . Поэтому при изменении коэффициента усиления k_1 изменяется частота, а амплитуда треугольного сигнала остается постоянной. Для того, чтобы при изменении частоты оставалась неизменной и амплитуда синусоиды $c(t)$, коэффициент k_2 необходимо изменять синхронно с коэффициентом k_1 . Синхронное плавное управление коэффициентами k_1 и k_2 вручную проще всего реализовать при помощи сдвоенного потенциометра. Используя в качестве k_1 и k_2 аналоговые перемножители, ручное управление частотой генератора легко дополнить автоматическим. Коэффициенты усиления интеграторов k_{II1} и k_{II2} удобно использовать для дискретного переключения диапазонов.

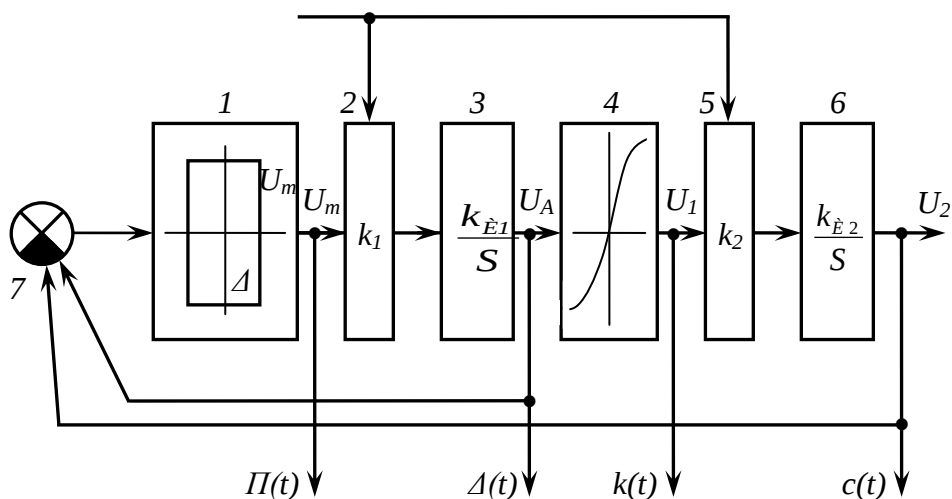


Рис. 1.3 Структурная схема генератора:

1,4 – нелинейные преобразователи; 2,5 – усилители; 3,6 – интеграторы

1.2.3. Электронный коммутатор сигналов

Электронный коммутатор (ЭК-6) предназначен для наблюдения на экране электронно-лучевого индикатора одновременно нескольких электрических сигналов – напряжений амплитудой до 10 В. Функционально коммутатор аналогичен переключателю на четыре положения и три направления, что отражает мнемосхема его передней панели (рис.1.2 - 1). Коммутатор состоит из трех каналов, имеет три выхода – по одному на каждый канал и двенадцать входов – по четыре входа на каждый канал. Коммутатор работает на четыре такта, синхронно подключая на каждый такт три входа к трем выходам. Коммутация осуществляется или с фиксированной частотой 5 кГц от внутреннего генератора ЭК-6, или с частотой генератора системы синхронных сигналов ГСС-6 всего комплекса. Возможность выбора частоты коммутации и регистрации результатов исследований позволяет использовать как электронно-лучевые индикаторы, так и электромеханические самописцы, не меняя при переходе от одного регистрирующего прибора к другому схему формирования исследуемых изображений.

Принцип работы коммутатора поясняет схема, показанная на рис.1.4. Временные диаграммы работы показаны на рис.1.5.

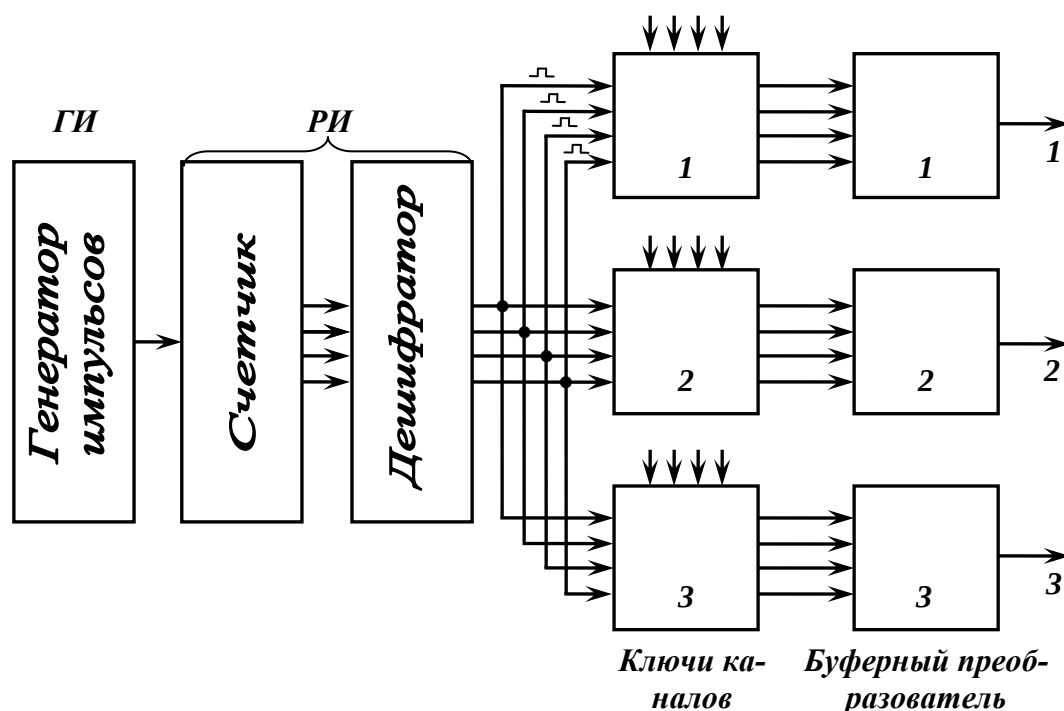


Рис.1.4. Организация функциональной схемы коммутатора ЭК

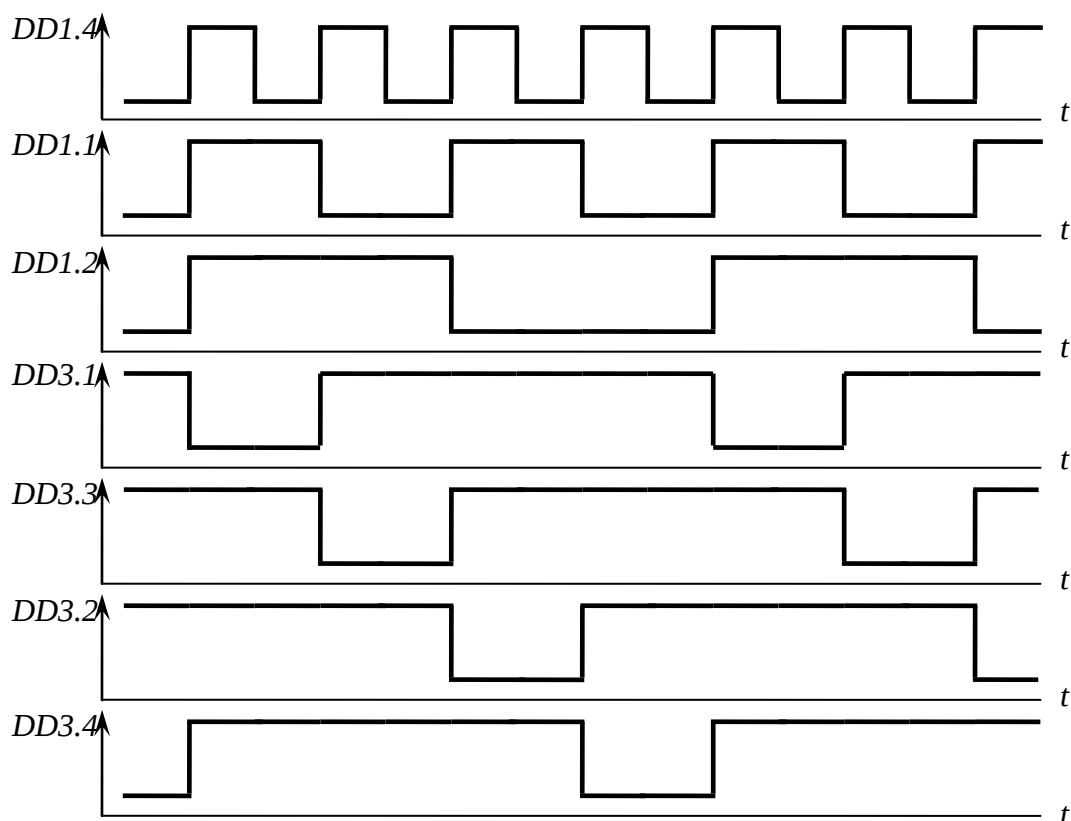


Рис.1.5. Временные диаграммы работы коммутатора ЭК

Прямоугольные импульсы с генератора (ГИ) поступают на распределитель импульсов (РИ), состоящий из счетчика и дешифратора. На четырех выходах РИ образуются импульсы, сдвинутые по времени друг относительно друга. Каждый из четырех выходов РИ связан с цепями управления трех ключей в каналах коммутатора. При поступлении импульса происходит синхронное отпирание этих ключей, и соответствующие входные сигналы поступают на входы буферных построителей. С выходов повторителей сигналы подаются на индикаторы или схему моделирования.

1.3. Служебный блок

1.3.1. Назначение и состав

Служебный блок предназначен для объединения частей структурных моделей, реализованных на сменных блоках МЭМ-6 в общую структуру, для выполнения вспомогательных вычислительных операций при моделировании, для настройки и измерений коэффициентов модели, управления индикатором АВК-6 и внешними регистрирующими приборами (например, двухкоординатным самописцем).

Передняя панель блока показана на рис.1.6.

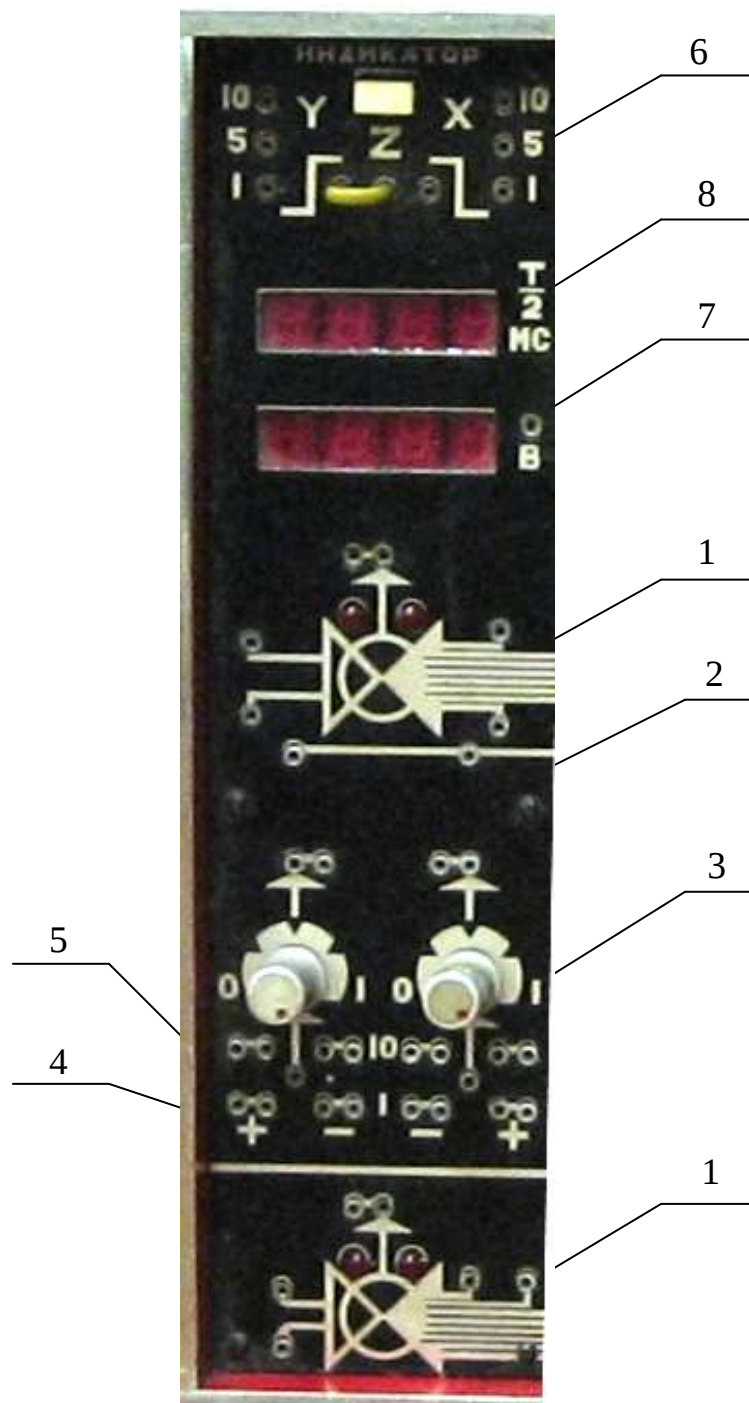


Рис.1.6. Передняя панель служебного блока:

1 – многовходовые сумматоры; 2 – размножители сигналов; 3 – делители; 4 – источники «+1 В» и «-1 В»; 5 – источники «+10 В» и «-10 В»; 6 – пульт управления индикатором; 7 – вольтметр; 8 – измеритель длительности.

В состав служебного блока входят два многовходовых сумматора 1, два размножителя сигналов 2, два делителя 3 и источники эта-

лонных напряжений +1 В (4) и +10 В (5). Эти устройства могут использоваться при реализации модели, настройке коэффициентов и нелинейных преобразователей, а также при измерениях переменных средствами ИИС АВК-6.

В блок вынесены также пульт управления индикатором и коммутатором 6, цифровые вольтметр и измеритель длительности 8.

Соответствие действительных значений параметров элементов служебного блока значениям, указанным на его передней панели, в пределах 1%.

Конструктивно служебный блок представляет законченный модуль из двух печатных плат, расположенных одна над другой и закрытых сверху общей передней панелью с мнемоническими изображениями входящих в него элементов. Измеритель длительности расположен на нижней печатной плате, остальные элементы блока - на верхней.

1.3.2. Сумматоры

Многовходовые сумматоры (2 шт.) предназначены для суммирования сигналов при моделировании и для выполнения вспомогательных операций при измерениях. Каждый сумматор имеет восемь инвертирующих и два неинвертирующих входа. Мнемосхема сумматора показана на рис. 1.7. Сумматор реализован на операционном усилителе (ОУ) типа КР544УД2 стандартным образом.



Рис.1.7. Мнемосхема сумматора

Коэффициенты усиления по всем инвертирующим входам равны 1. По неинвертирующему входу коэффициент усиления равен 1 при отключенных от источников сигналов инвертирующих входах. При подаче сигналов на инвертирующие входы (или их «заземлении»), коэффициент усиления k_t по неинвертирующему входу увеличивается по соотношению $k_t = 1 + n \frac{R_1}{R_1 + R_2}$, где n – число инвертирующих входов, подключенных к источникам сигналов или к «земле».

1.3.3. Источники эталонных напряжений

Мнемосхема источников эталонных напряжений показана на рис 1.8.



Рис. 1.8. Мнемосхема источников эталонных напряжений

Настройка эталонных источников заключается в установке точного значения эталонного напряжения «+1 В», которое равно +1,00 В и точного значения эталонного напряжения «+10 В», которое равно +10,00 В. Значения эталонных напряжений «-1 В» и «-10 В» должны находиться в пределах $(-1,00 \pm 0,01)$ В и $(-10,00 \pm 0,01)$ В.

Принципиальные схемы источников +1В и +10В приведены на рис. 1.9 и рис. 1.10 соответственно. В них использованы микросхемы типа КР1408УД2, представляющие два ОУ в одном корпусе.

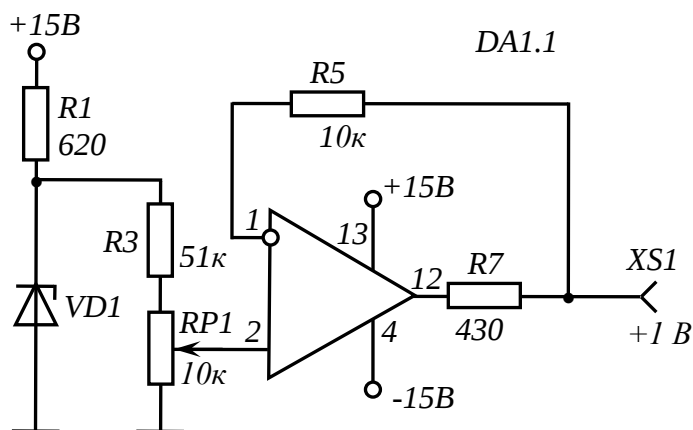


Рис. 1.9. Принципиальная схема источника «+1В»

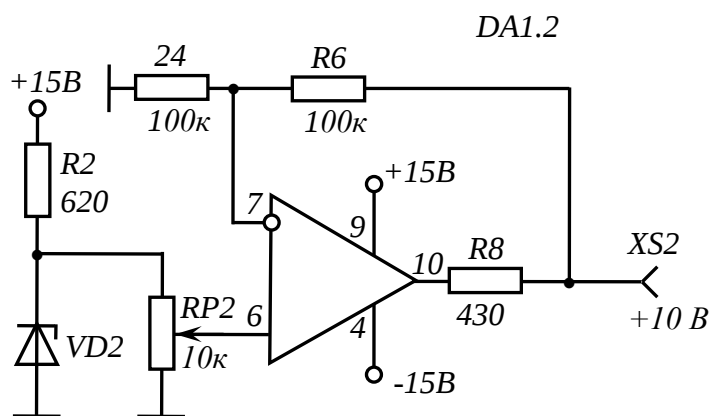


Рис. 1.10. Принципиальная схема источника «+10В»

Источник «+1В» реализован на операционном усилителе *DA1.1*, а источник «+10В» - на операционном усилителе *DA1.2* стандартным образом. Эталонные напряжения «-1В» и «-10В» формируются из этих напряжений с помощью инверторов на двух операционных усилителях, объединённых в одном корпусе микросхемы КР1408УД2.

1.3.4. Делители

Делители (2 шт.), мнемосхема которых показана на рис.1.11, воспроизводят входной сигнал с коэффициентом передачи, регулируемым в пределах от 0 до 1. Делители используются при настройке коэффициентов модели, при измерениях нелинейных искажений, при формировании регулируемых напряжений из постоянных эталонных напряжений, для компенсации постоянной составляющей при точных измерениях и т.д.



Рис. 1.11. Мнемосхема делителей

Оба делителя выполнены по схеме неинвертирующего повторителя, как это показано на рис. 1.12. Для этого использованы два ОУ, находящиеся в одном корпусе микросхемы КР1408УД2. Делители настройки не требуют.

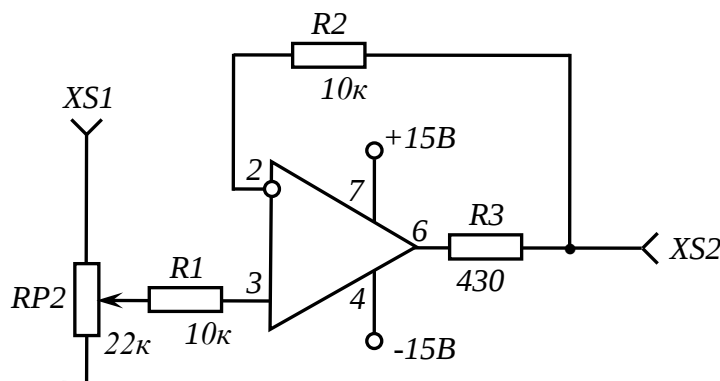


Рис. 1.12. Принципиальная схема делителя

1.3.5. Пульт управления индикатором

Пульт предназначен для управления индикатором АВК-6 и внешними регистрирующими приборами.

На переднюю панель пульта (рис. 1.13), которая является частью передней панели служебного блока, выведены входы усилителей нормализаторов каналов X и Y индикатора, вход Z , предназначенный для управления яркостью луча ЭЛТ и записью регистратора, а также кнопка выбора режима индикации (регистрации) исследуемых сигналов.



Рис. 1.13. Мнемосхема пульта управления индикатором

Выходы усилителей-нормализаторов подключены ко входам X и Y усилителей отклонения луча индикатора комплекса, а вход Z — к схеме гашения луча. Изменение напряжения на входе Z от -15 В до

+15 В приводят к изменению яркости луча от максимальной до полного гашения луча, включению и выключению самописца.

На гнезда справа и слева от входа Z подаются противофазные прямоугольные импульсы, амплитудой 15В, синхронные с прямоугольными импульсами генератора АВК-6. Установка переключки между входом Z и одним из этих гнезд гасит луч в один из полупериодов прямоугольных импульсов ГСС. Подача напряжения на вход Z от других источников позволяет модулировать яркость луча.

Усилители – нормализаторы выполнены на быстродействующих ОУ типа 544УД2А для получения широкой полосы пропускания (до 100 кГц) и передачи сигналов с выхода электронного коммутатора на вход усилителей отклонения луча ЭЛТ без искажений.

1.3.6. Вольтметр

Вольтметр предназначен для измерений постоянных напряжений в диапазоне от -19,99 В до 19,99 В с погрешностью не более 0,1% и индикации результата измерения в цифровом виде. Передняя панель вольтметра показана на рис. 1.14.



Рис. 1.14. Передняя панель вольтметра.

При подключении двух внешних резисторов $R4$ и $R5$, четырех конденсаторов $C1$, $C2$, $C3$, $C4$ и кварцевого резонатора $ZQ1$ ($f = 100$ кГц), микросхема $DD1$ выполняет функцию АЦП, работающего по принципу двойного интегрирования с автоматической коррекцией нуля, автоматическим определением полярности входного сигнала и цифровой индикацией результата на 3,5 – декадном индикаторе ($HG1$ - $HG4$ на рис. 1.15). В связи с тем, что диапазон входного сигнала для К572ПВ2А равен $\pm 1,999$ В, на входе микросхем предусмотрено 10-кратное деление входного сигнала. Для обеспечения требуемой точности измерения необходимо выполнить соотношение $R1 = 9R2$ с погрешностью не более 0,05%.

Настройки вольтметр не требует. Проверка его работы осуществляется путем сравнения показаний вольтметра АВК-6 с показаниями вольтметра соответствующего класса точности. Для проверки работы сегментов цифровых индикаторов на вход вольтметра подают

напряжение +18,88 В и смотрят, все ли сегменты индикаторов светятся.

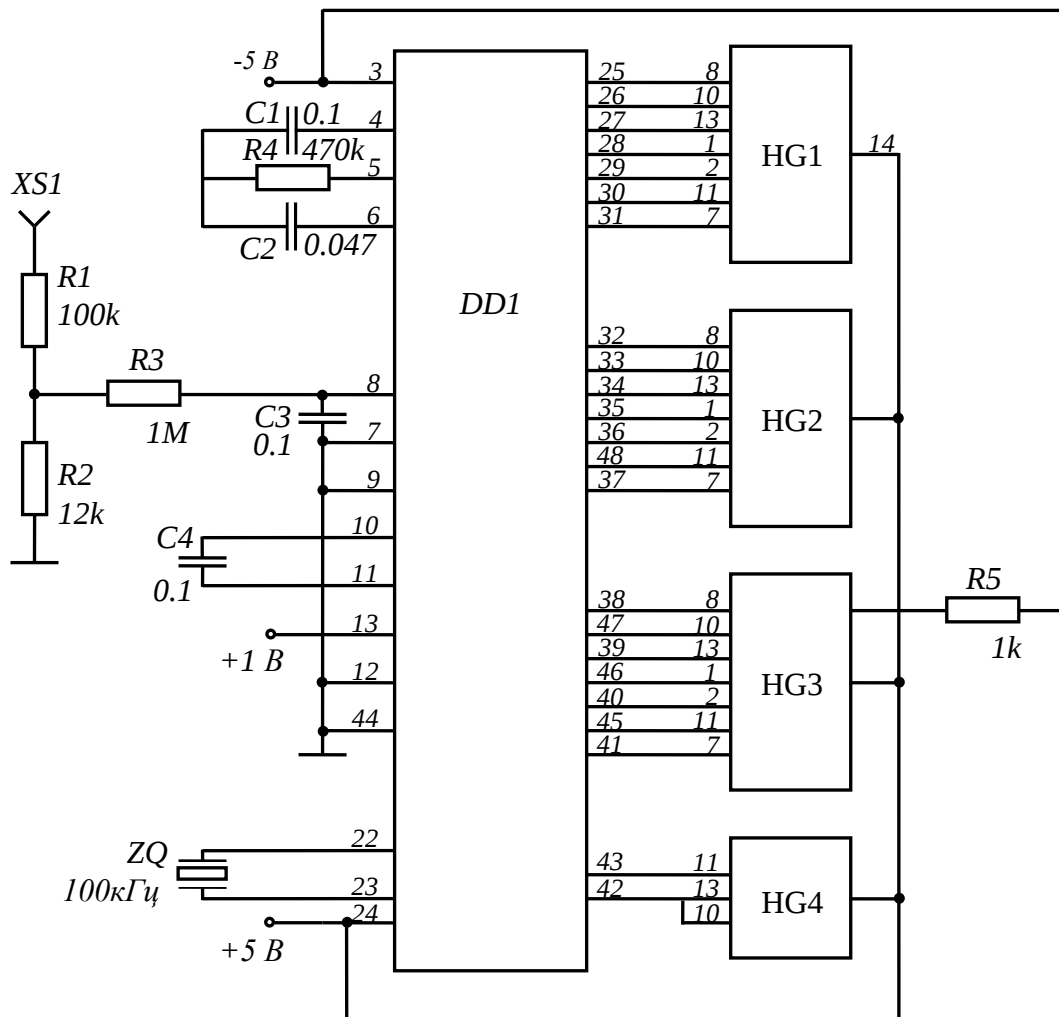


Рис. 1.15. Принципиальная схема вольтметра

1.3.7. Измеритель длительности

Измеритель длительности (ИД) предназначен для измерения периода колебаний генератора АВК-6, временных интервалов и фаз сигналов. Результаты измерений представляются в цифровом виде. Диапазон измерения длительности от 0,5 мс до 5000 мс, погрешность измерения – 1%. Передняя панель ИД показана на рис. 1.16.

При наблюдении на индикаторе комплекса большинства осциллограмм время наблюдения составляет половину периода колебаний генератора АВК-6. Именно это время ($T/2$) измеряет ИД.



Рис. 1.16. Передняя панель ИД

Блок-схема ИД показана на рис. 1.17. Принцип его работы основан на подсчете числа импульсов от высокостабильного генератора за измеряемый промежуток времени $T/2$. Сигнал разрешения счета импульсов, равный по времени длительности измеряемого сигнала, а также сигналы записи и сброса формирует из прямоугольного сигнала генератора АВК-6 блок формирования управляющих сигналов (ФУС). Ошибке преобразования 1% соответствует потеря одного импульса при подсчете их 4-декадным счетчиком. Так как длительность полупериода генератора АВК-6 изменяется в пределах от 0,5 мс до 5000 мс, то для индикации всего этого интервала на 4-декадном счетчике применено автоматическое переключение поддиапазонов.

Частоты тактового генератора выбраны 100 и 1 кГц для поддиапазонов измерения 0,5 – 99,99 мс и 100 – 5000 мс соответственно. Импульсы тактового генератора частотой 1 мГц подаются на делитель, который управляется сигналом разрешения. На выходе делителя формируются три импульсные последовательности, связанные со входной тактовой частотой f_T соотношениями $f_T/10$, $f_T/1000$ и $f_T/2000$. Две из этих последовательностей $f_T/10$ и $f_T/1000$ подаются на коммутатор, который в зависимости от поддиапазона пропускает одну из них на 4-декадный счетчик, подсчитывающий количество импульсов за время действия сигнала разрешения.

Управляющий сигнал для коммутатора вырабатывает автомат переключения диапазонов (АПД). Для обеспечения работы схемы во всем диапазоне 0,5 – 5000 мс на АПД подаются импульсы частотой $f_T/2000$. АПД определяет границу диапазонов, переключая коммутатор и позицию запятой на индикаторах результата измерения.

По окончании импульса разрешения число, накопленное в счетчике, переписывается по стробирующему импульсу в регистр дешифратора, который хранит его до окончания следующего цикла преобразования. После дешифрирования число высвечивается на индикаторах. Перед началом следующего цикла преобразования счетчики об-

нуляются сигналом «Сброс», который вырабатывает ФУС. В это время на индикаторе высвечивается результат предыдущего измерения, который хранится в регистре дешифратора. После окончания очередного измерения происходит смена информации в регистре дешифратора.

Измеритель длительности размещен на нижней печатной плате служебного блока. Индикаторы ИД расположены на одной плате с индикаторами вольтметра и соединены с платой ИД плоским жгутом.

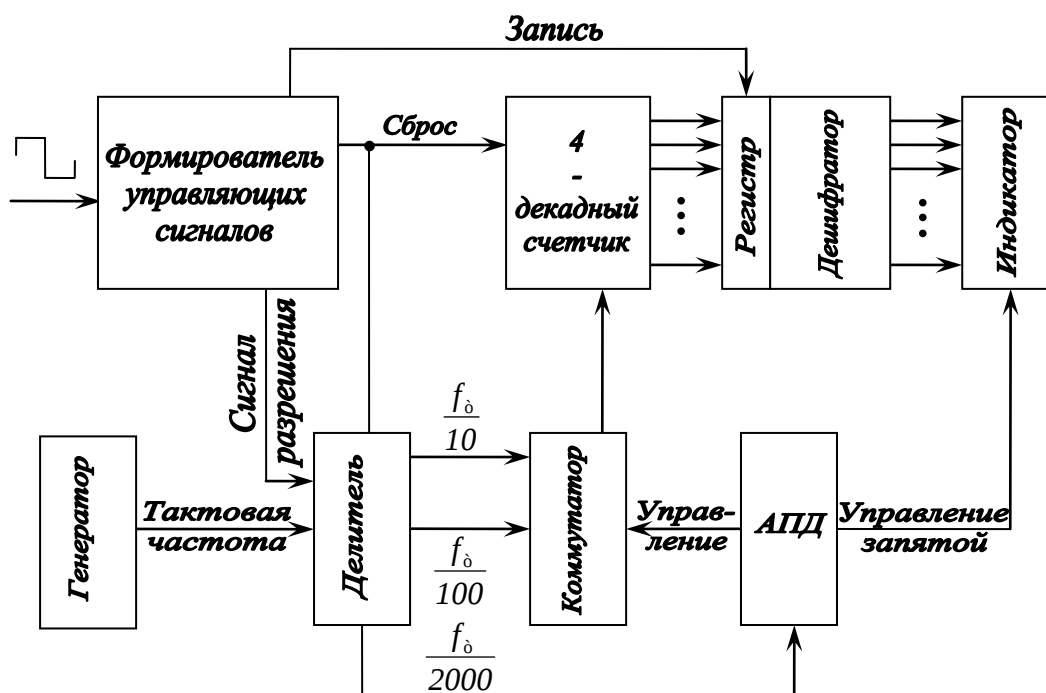


Рис. 1.17. Функциональная схема измерителя длительности

1.4. Блок питания

Блок питания 5 установлен в правом отсеке корпуса АВК-6 (рис.1). Он обеспечивает все блоки АВК-6 необходимыми напряжениями. Конструктивно он выполнен в виде законченного модуля, закрытого передней панелью, на которую выведены кнопка и световой индикатор включения. На передней панели модуля приведена краткая таблица - справка об основных приемах работы с компьютером.

Питание осуществляется от сети переменного тока напряжением $220\text{В} \pm 10\text{ В}$, частотой 50-60 Гц. Значение выходных напряжений блока питания и их параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Обозначение выхода	Напряжение		Максимальный ток нагрузки, мА	Амплитуда пульсаций, мВ
	Вид	Значение, В		
+15 В	Постоянное стабилизированное	+15±0,01, амплитудное	500	5
-15 В		-15±0,01	500	5
-500 В		-500±10	2	1000
+ 100 В		+100±3	10	100
+8,5 В	Постоянное нестабилизированное	+8,5±0,2	400	-
-8,5 В		-8,5±0,2	400	-
6,3 В	Переменное	6,3 +0,2, действующее -0,5	600	-

1.5. Сменные блоки АВК-6

1.5.1. Назначение и состав

Сменные блоки служат для реализации структурных моделей исследуемых динамических процессов. В основной комплект сменных блоков входят следующие блоки:

- линейный - 6 шт,
- нелинейный - 2 шт,
- умножения-деления - 2 шт,
- умножения - 1 шт.

Функциональный состав этих блоков позволяет проводить на АВК-6 исследование широкого круга динамических процессов и алгоритмов обработки информации.

В число дополнительных входят импульсный блок для моделирования импульсных и цифровых систем и изучения динамики алгоритмов численного моделирования динамических процессов и блок управляемой задержки (чистого запаздывания).

Блоки преобразования координат (проектор) и спектрального анализа соединяют в себе в законченном виде определенные алгоритмы обработки сигналов. Блок генераторов случайных и детерминированных сигналов обеспечивает модельное изучение теории вероятности и случайных процессов.

Все блоки выполнены в едином конструктиве, каждый из них может быть установлен в любую из шести позиций монтажного поля в соответствии с конфигурацией конкретной структурой модели исследуемого процесса, что делает схему набора подобной структурной модели процесса, изображенной на листе бумаги.

Модульный принцип организации АВК-6 позволяет расширять состав сменных решающих блоков, это обеспечивает наращивание возможностей аналогового компьютера.

1.5.2. Линейный блок

Общий вид линейного блока показан на фото рис. 1.18.

Он предназначен для интегрирования во времени входных сигналов - напряжений амплитудой до 10 В. На фальшпанели блока воспроизведен структурный инвариант линейных моделей.

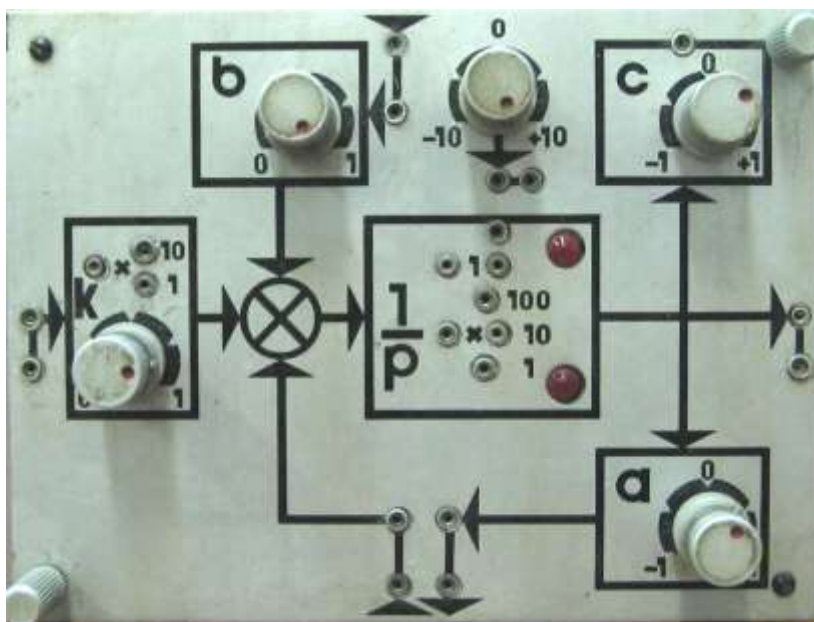


Рис. 1.18. Общий вид линейного блока

Предусмотрены три режима работы блока — ввод начальных условий, непрерывное интегрирование и периодическое интегрирование с установкой начальных условий.

Диапазон изменения начальных условий: от -10 В до +10 В, диапазон времени интегрирования: от 10^{-3} с до 100 с. Коэффициент передачи интегратора (величина, обратная постоянной интегрирования) может быть выбран равным 1 с^{-1} , 10 с^{-1} или 100 с^{-1} в зависимости от положения соответствующей переключки. Диапазон изменения коэффициентов a и c от -1 до +1, коэффициента k - от 0 до 1 или от 0 до 10. Интегрирование не сопровождается паразитной инверсией выходного сигнала интегратора.

Соответствие действительных значений коэффициентов делениям шкал на передней панели в крайних положениях ручек настройки - в пределах погрешности 1 %.

Точная настройка коэффициентов осуществляется при помощи ИИС АВК-6. После настройки отклонения коэффициентов от установленных значений не превышают 0,5 % при нормальных условиях эксплуатации.

Блок снабжен световыми индикаторами выхода преобразователей из линейного диапазона работы.

Соответствие преобразований электрических сигналов (напряжений) обозначениям на фальшпанели (рис. 1.2) достигнуто жестким микропрограммированием таких элементарных для аналоговой техники операций, как интегрирование суммы с инверсией, инвертирование, умножение сигнала на регулируемый коэффициент.

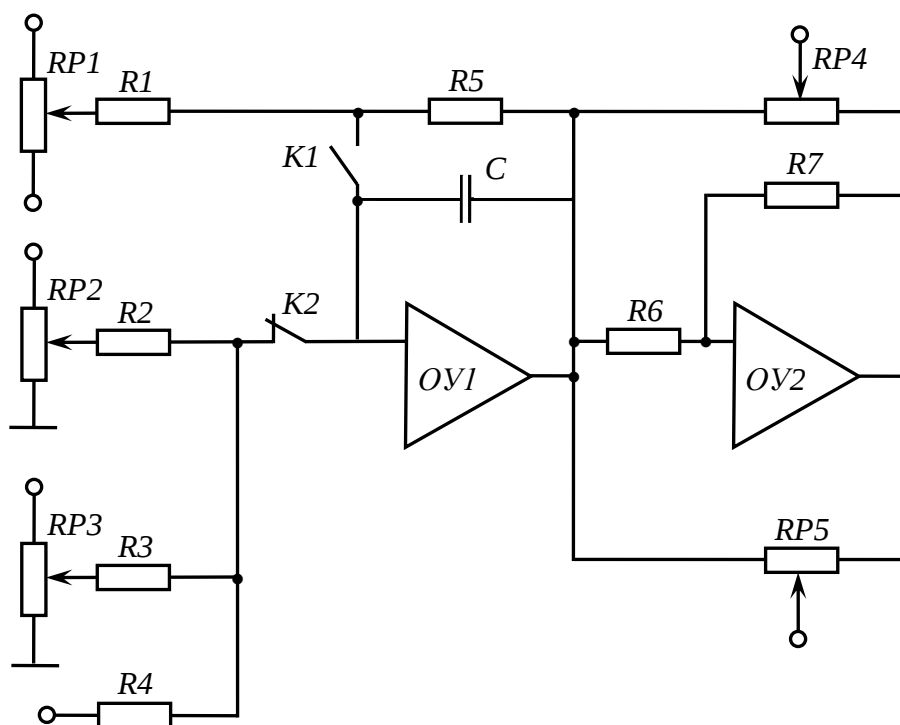


Рис. 1.19. Схема аналоговой микропрограммы линейного блока

Общая схема аналоговой микропрограммы блока показана на рис. 1.19. Интегрирование суммы трех сигналов реализована на $OY1$. Чтобы исключить паразитную инверсию выходного сигнала интегрирующего преобразователя, к выходу $OY1$ подключен инвертор на $OY2$. Включение потенциометров $RP4$ и $RP5$ между выходами $OY1$ и $OY2$ обеспечивает плавную регулировку коэффициентов a и c в диапазоне от -1 до $+1$. Выходной сигнал преобразователей a и c получают с движков этих потенциометров.

ИИС комплекса АВК-6 позволяет проводить измерение параметров процессов в исследуемой модели без их прерывания, что очень удобно при моделировании. Возможность проведения неразрушающего контроля модели средствами ИИС АВК-6 позволяет из четырех традиционных режимов работы блоков интегрирования: ввод начальных условий, интегрирование, останов и разрыв связей отказаться от двух последних, назначение которых — настройки и измерения при использовании традиционных мини-АВМ и средств измерения.

Сокращение числа режимов работы интегратора позволяет использовать простейшую апериодическую схему задания начальных условий с минимальным числом ключевых элементов (ключи $K1$ и $K2$ на рис. 1.19). Это уменьшает погрешности интегрирования, вызванные неидеальностью ключей. Синхронизация времен интегрирования и установки начальных условий в интеграторах при периодическом режиме работы от генератора системы синхронных сигналов ИИС гарантирует точность заданий начальных условий и получение устойчивых графиков переходных процессов и других изображений на экране индикатора.

1.5.3. Нелинейный блок

Общий вид нелинейного блока показан на рис. 1.20. Блок предназначен для моделирования нелинейных функций одной переменной - однозначных монотонных и немонотонных, многозначных и петлевых.

В состав блока входят трехходовой сумматор с регулируемыми коэффициентами передачи a и b по двум входам, усилитель k , нелинейный преобразователь (НП) и два диода, подключенных к его выходу.

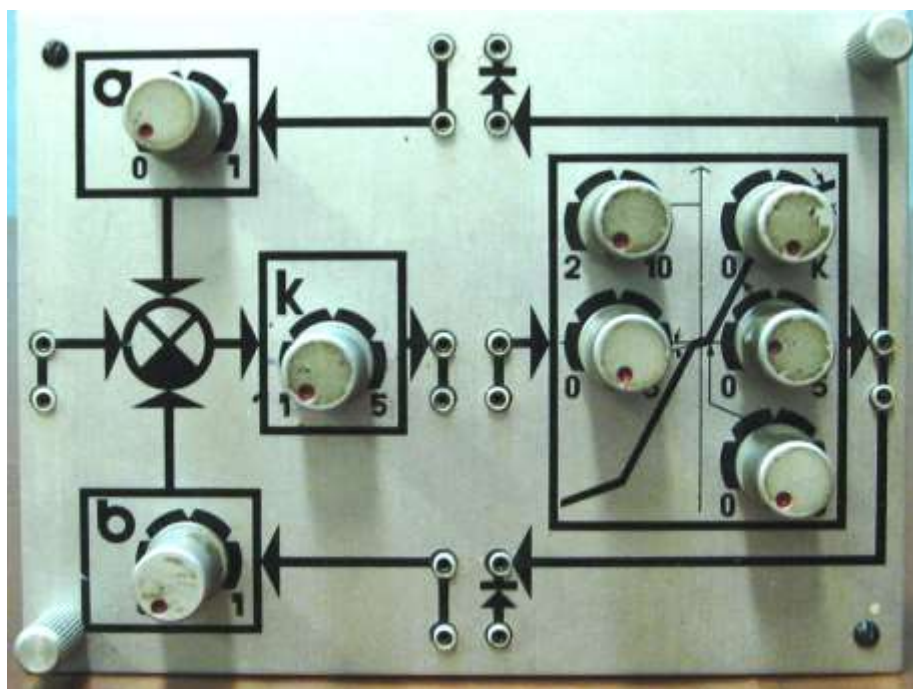


Рис. 1.20. Общий вид нелинейного блока

Нелинейный преобразователь обеспечивает формирование симметричной нелинейной характеристики, показанной на рис. 1.21. Он построен на основе нелинейного элемента (НЭ), схема которого показана на рис. 1.22.*a*. и состоит из параллельного соединения двух эмиттерных повторителей на взаимно дополнительных транзисторах, на базы которых подается регулируемое запирающее напряжение смещения.

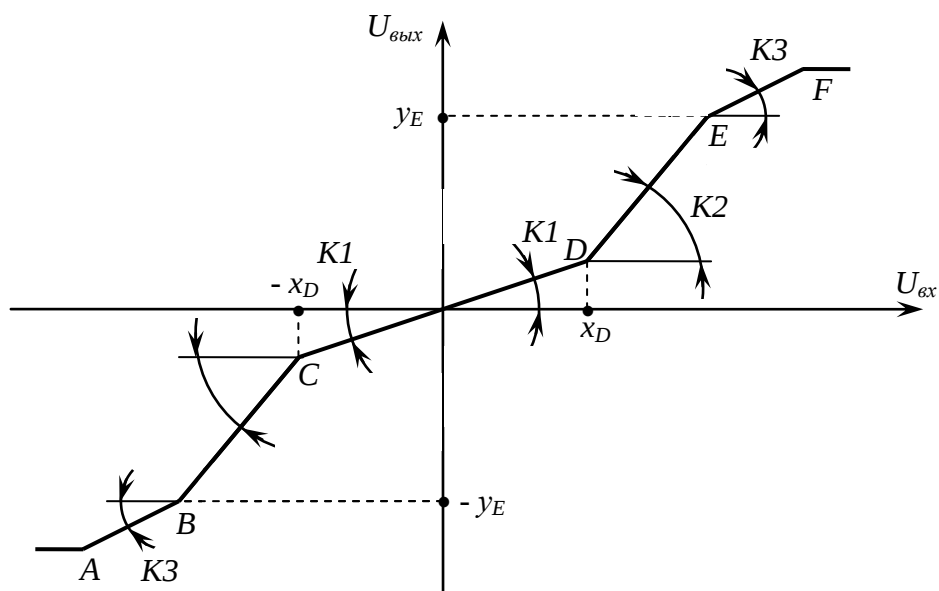


Рис. 1.21. Статическая характеристика универсального нелинейного преобразователя

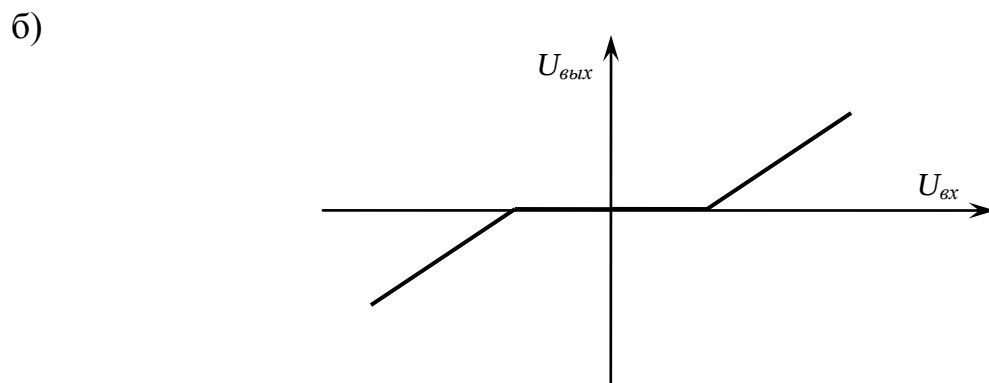
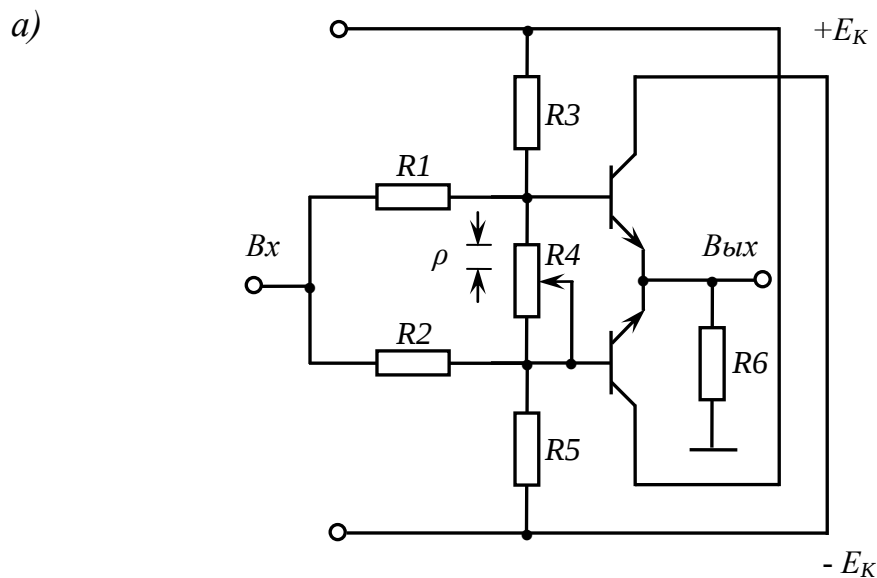


Рис. 1.22. Нелинейный элемент типа «Плавная зона нечувствительности»:

а – принципиальная схема; б – статическая характеристика

1.5.4. Блок умножения-деления

Общий вид блока умножения-деления показан на рис. 1.23. Блок целесообразно использовать при моделировании на АВК-6 систем с

переменными параметрами, оптимальных систем, поверхностей в трехмерном пространстве, алгоритмов обработки сигналов.

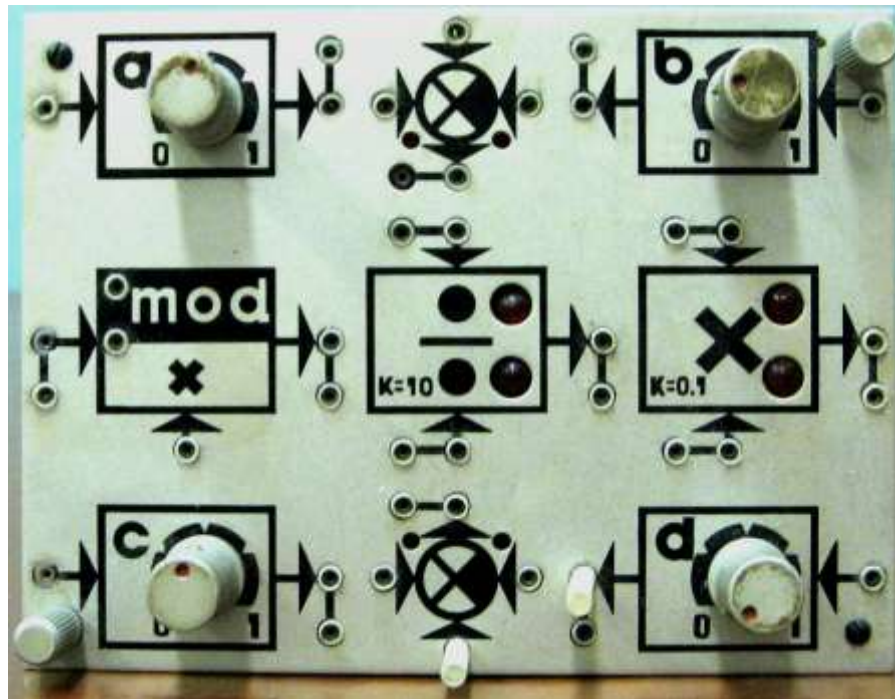


Рис. 1.23. Общий вид блока умножения - деления

Функциональный состав блока представлен на его передней панели. В блоке объединены четыре пассивных делителя сигналов a , b , c , d ; преобразователь умножение-деление $\frac{\text{mod}}{x}$, позволяющий выполнять - либо перемножение, либо формирование модуля входного сигнала, два сумматора, каждый из которых имеет два неинвертирующих входа и один инвертирующий; преобразователь «деление» $\div$, обеспечивающий деление одного аналогового сигнала на другой во всех четырех квадратах и преобразователь «умножение» $\times$, обеспечивающий перемножение двух аналоговых сигналов. Диапазон изменения коэффициентов делителей a , b , c и d - от 0 до 1. Масштабный коэффициент преобразователя «умножение» равен 0,1, а преобразователя «деление» - 10.

Организация блока, взаимное расположение функциональных преобразователей, их входных и выходных гнезд на передней панели обеспечивают удобный набор нелинейных функциональных зависи-

мостей, наиболее часто встречающихся в структурных моделях нелинейных динамических процессов и систем автоматического управления.

Преобразователь «умножение» реализован на микросхеме типа 525ПС2А, представляющей собой интегральный перемножитель двух аналоговых сигналов и включенной стандартным способом в режиме перемножения.

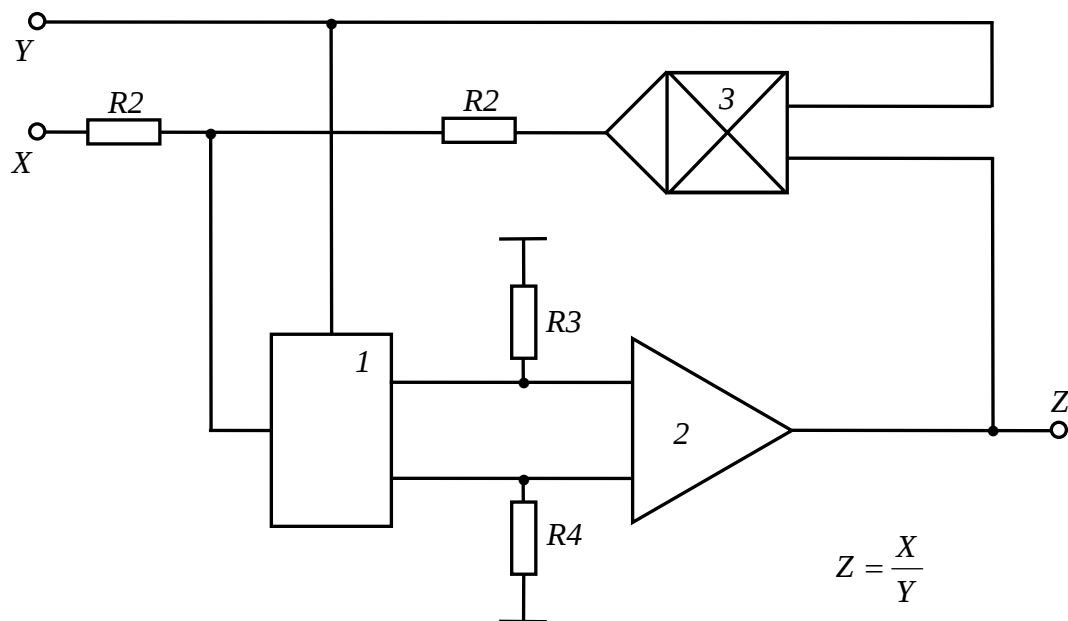
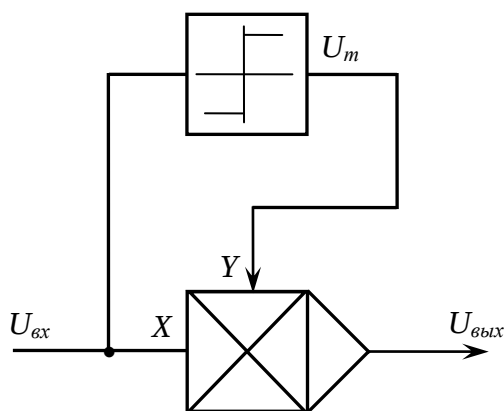


Рис. 1.24. Упрощенная схема преобразователя «деление»

Для преобразователя «деление» предложено оригинальное схемотехническое решение, обеспечивающее выполнение операции деления во всех 4-х квадрантах (рис. 1.24).

а)



б)

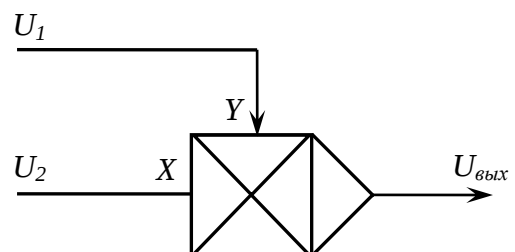


Рис. 1.25. Функциональная организация преобразователя
«умножение-модуль»:

а – реализация операции «модуль»; б – реализация операции
«умножение»

1.5.5. Блок умножения

Общий вид блока умножения показан на рис. 1.26.

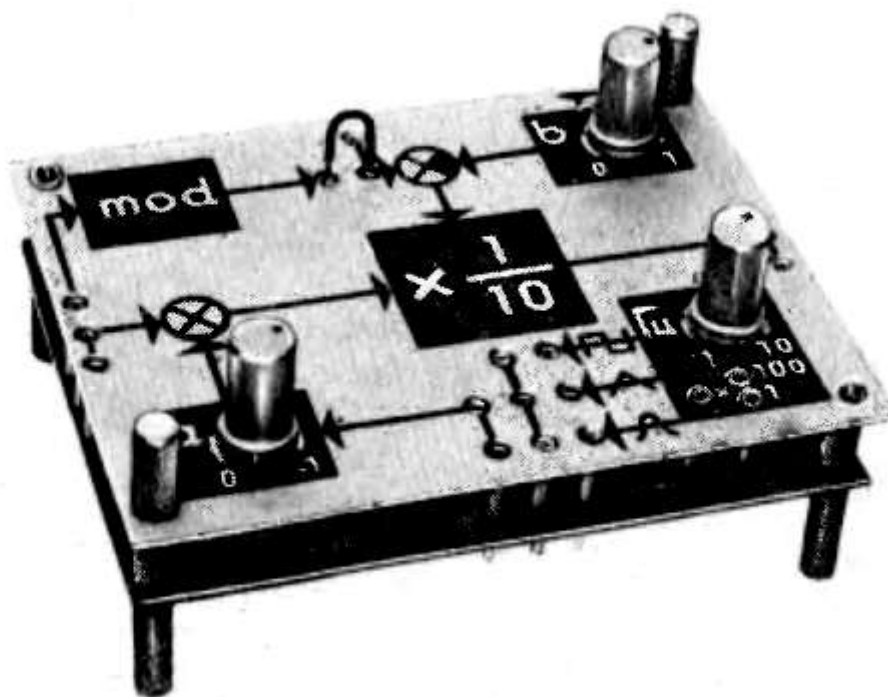


Рис. 1.26. Общий вид блока умножения

Данный блок целесообразно использовать при моделировании нелинейных динамических процессов и при исследованиях оптимальных и экстремальных САУ.

В состав блока входят преобразователь «модуль», двухвходовые сумматоры с регулируемыми от 0 до 1 коэффициентами передачи a и b по одному из входов, преобразователь «умножение» ($\times$), а также генератор трех синхронных сигналов прямоугольной, треугольной и синусоидальной формы амплитудой до 10 В; диапазоны изменения частоты от 1 до 10 Гц и от 100 Гц до 1,0 кГц.

Соответствие действительных значений параметров блока делениям шкал на передней панели - в пределах погрешности $\pm 5\%$. Точ-

ная настройка коэффициентов осуществляется средствами ИИС АВК-6.

Схемотехнические решения, использованные при построении сумматоров, преобразователей «модуль» и «перемножение», такие же что и в блоке «умножение-деление».

1.5.6. Импульсный блок

Импульсный блок, рис. 1.27, предназначен для аналогового моделирования процессов в импульсных и цифровых системах. Он позволяет моделировать импульсные и цифровые системы 1-го порядка. Для моделирования систем 2-го порядка и выше предусмотрена синхронная работа нескольких (до шести) импульсных блоков, а также совместная работа этих блоков с другими решающими блоками АВК-6. Реализация цифровых и импульсных систем и вычислительных алгоритмов производится по их структурным моделям путем внешней коммутации преобразователей блока при помощи перемычек и проводов и установкой необходимых коэффициентов.

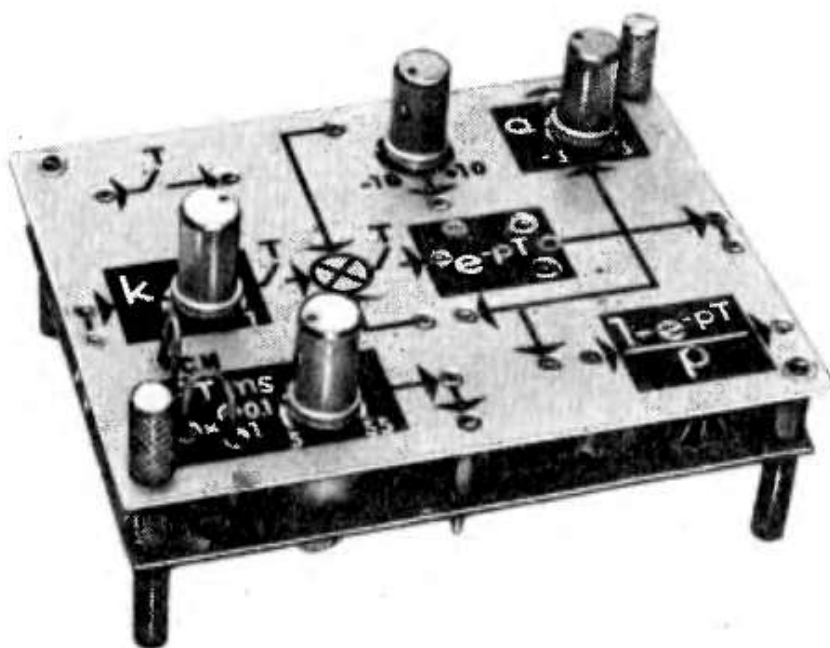


Рис. 1.27. Общий вид импульсного блока.

Функциональный состав блока отражает его передняя панель. В блок входят: квантователи T , усилители k и a , сумматор, звено им-

пульсной задержки e^{-pT} , экстраполятор $\frac{1-p^{-pT}}{p}$ и генератор тактовых импульсов (ГТИ).

Диапазон изменения коэффициента k от 0 до 1, коэффициента a от -3 до +3, диапазоны изменения периода тактовых импульсов от 0,5 до 5,5 мс и от 5 до 55 мс. Соответствие действительных значений делениям шкал на передней панели — в пределах 5 %, Точная настройка коэффициентов осуществляется с помощью ИИС АВК-6. После настройки отклонения коэффициентов от установленных значений не превышают 1 %.

Блок работает в режимах, аналогичных режимам линейного блока. Это задание начального значения выходного сигнала звена импульсной задержки e^{-pT} (нажата клавиша 3 генератора АВК-6), режим непрерывной работы, когда звено осуществляет импульсную задержку входного сигнала на один такт ГТИ (нажата клавиша 1) и режим периодической работы (нажата клавиша 2), в котором при отрицательном полупериоде прямоугольных импульсов генератора АВК-6 осуществляется ввод начального значения выходного сигнала звена, а при положительном — задержка входного сигнала на один такт ГТИ.

Звено снабжено световой индикацией выхода сигнала из рабочего диапазона. Схема индикации идентична схеме индикации в линейном блоке.

В звене присутствует экстраполятор нулевого порядка, который построен по обычной схеме выборки-хранения, рис. 1.28. Выборка производится в течение положительного импульса последовательности U_{p1} с помощью ключа на транзисторе VT1.

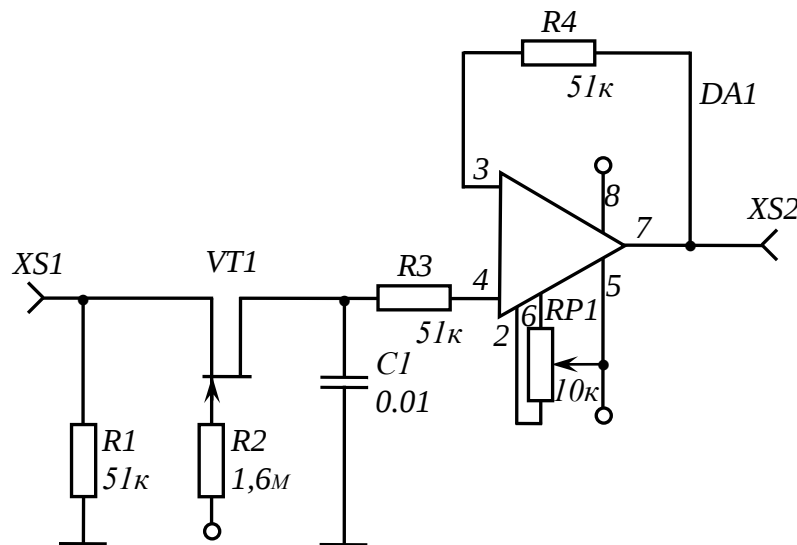


Рис. 1.28. Принципиальная схема экстраполятора нулевого порядка

Возможность регулировки коэффициента a блока от -3 до $+3$ обеспечивает схема усилителя с регулируемым коэффициентом передачи, рис. 1.29.

Сумматор, входящий в состав блока, реализован на ОУ стандартным образом.

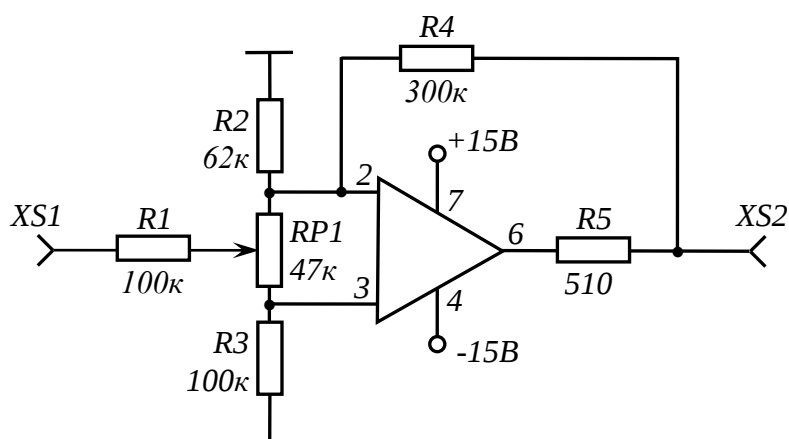


Рис. 1.29. Принципиальная схема усилителя с регулируемым коэффициентом передачи.

1.5.7. Блок преобразования координат

Блок преобразования координат предназначен для наблюдения проекций трехмерных изображений на экране индикатора АВК-6 и их регистрации при помощи дополнительных регистрирующих приборов. Общий вид блока показан на рис. 1.30.

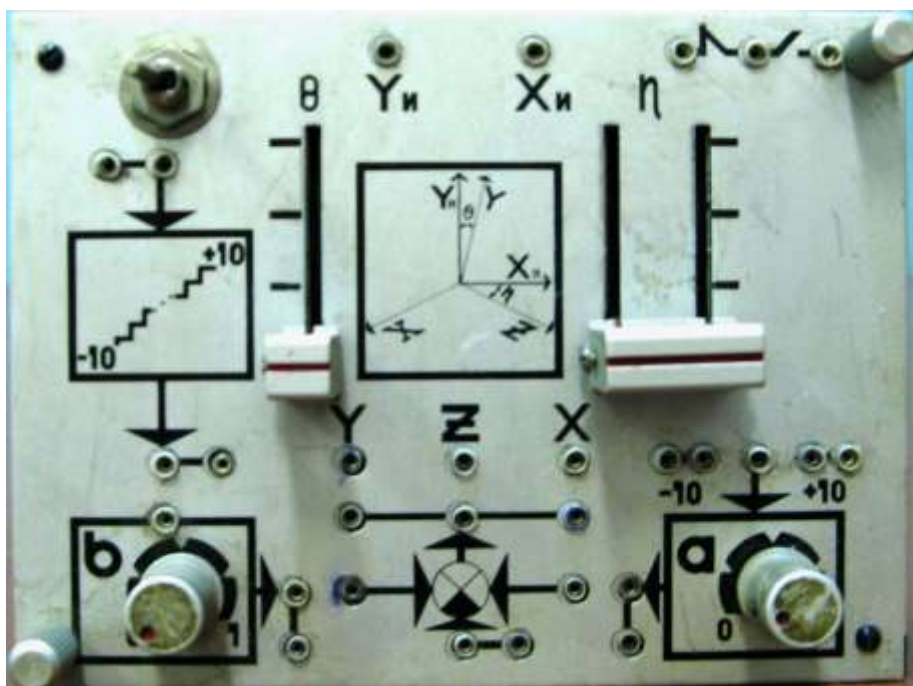


Рис. 1.30. Общий вид блока преобразования координат

В него входят электронный проектор трехмерного изображения на плоскость индикатора X_n , Y_n , позволяющий вращать изображение вокруг оси абсцисс X_n (угол θ) и ординат Y_n (угол η) системы координат плоскости индикатора независимо друг от друга в пределах от 0 до $\pi/2$; генератор лестничной функции с изменением выходного напряжения от -10 до +10 В ступеньками величиной 1 В; два делителя a и b , сумматор с двумя неинвертирующими и одним инвертирующим входом; источники эталонных напряжений +10 и -10 В и контактная группа (один контакт — нормально замкнутый, второй — нормально разомкнутый).

Функциональный состав блока позволяет наблюдать трехмерные изображения в виде проекции на плоскости экрана индикатора и регистрировать их на двухкоординатном самописце.

Проектор осуществляет преобразование координат $X, Y, Z \rightarrow X_n, Y_n$ в соответствии с формулами:

$$\begin{cases} X_n = Z \cos \eta - X \sin \eta \\ Y_n = Y \cos \theta - \sin \theta \{ X \cos \eta + Z \sin \eta \} \end{cases} \quad (1.1)$$

Выходные напряжения схем, показанных на рис. 1.31, 1.32 зависят от углов поворота движков α_1 и α_2 потенциометров следующим образом:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}1} = U_{\hat{a}\hat{o}1} \frac{R_0}{2R} (2\alpha_1 - \alpha_1^2);$$

$$U_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}2} = U_{\hat{a}\hat{o}2} \frac{R_0}{2R} (1 - \alpha_2^2) \quad (1.2)$$

Первая зависимость аппроксимирует функцию $U_1 = U \cdot \sin \alpha_1$, а вторая - функцию $U_2 = U \cdot \cos \alpha_2$ с достаточной для целей индикации точностью при α_1 и α_2 , меняющихся в пределах от 0 до $\pi/2$.

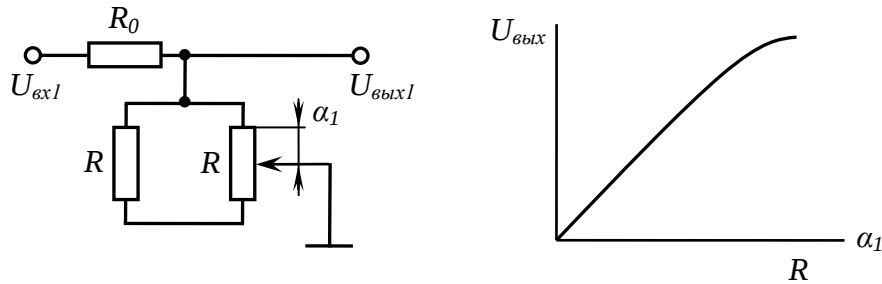


Рис. 1.31. Схема реализации тригонометрической функции - синуса

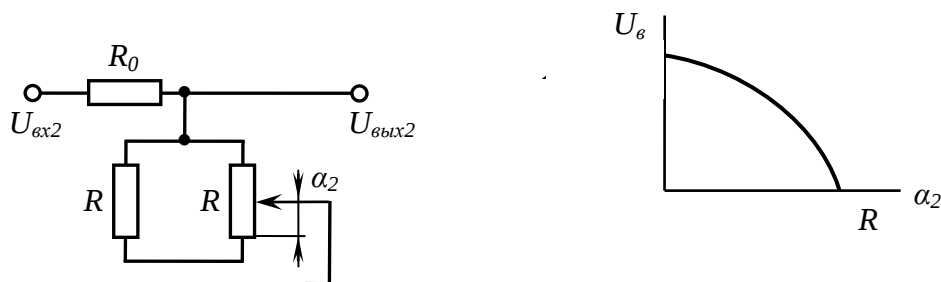


Рис. 1.32. Схема реализации тригонометрической функции - косинуса.

1.5.8. Блок спектрального анализа

Блок спектрального анализа, рис. 1.33, предназначен для исследования спектрального состава сигналов и частотных характеристик систем, а также для изучения алгоритмов спектрального анализа.

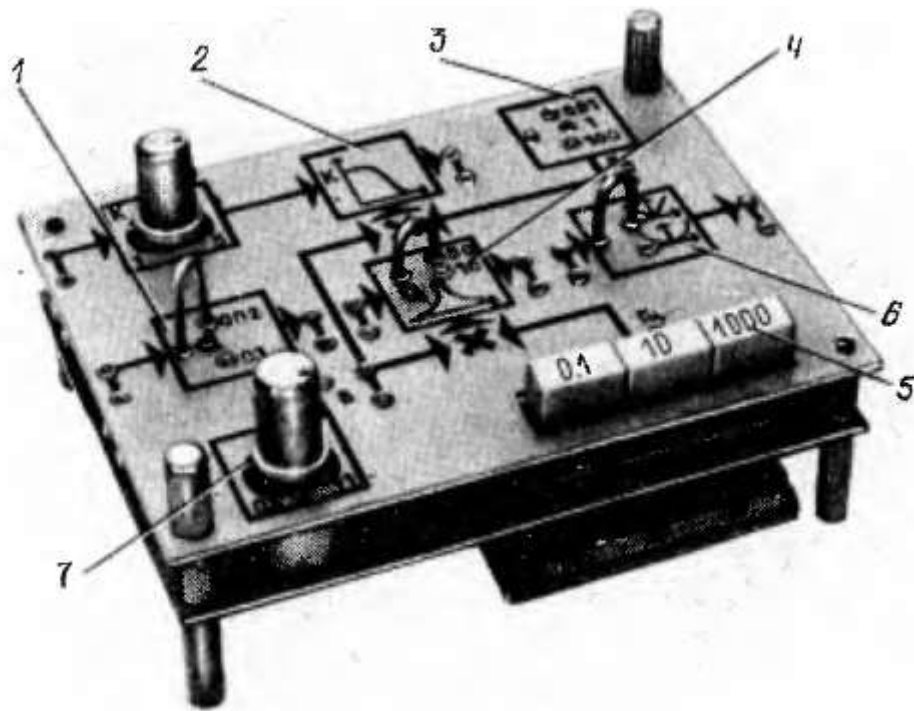


Рис. 1.33. Общий вид блока спектрального анализа:

1 - ступенчатый аттенюатор; 2 - фильтр нижних частот ФНЧ; 3 - переключатель диапазонов ФНЧ; 4 - резонансный фильтр (РФ); 5 - переключатель диапазонов РФ; 6 - детектор

Он объединяет ступенчатый аттенюатор 1; фильтр нижних частот ФНЧ 2 с регулируемым вручную коэффициентом усиления k и сопрягающей частотой f_c , плавно перестраиваемой напряжением от встроенного источника 7 или от внешнего генератора в пределах диапазонов, устанавливаемых переключателем 3; резонансный фильтр 4, перестраиваемый в пределах 10^{-2} - 10^4 Гц плавно - напряжением и ступенчато - переключателем диапазонов 5; детектор 6 с квадратичной или модульной характеристикой.

Резонансный фильтр построен по структуре, показанной на рис. 1.34. Его передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{I_p}{T^2 p^2 + 2\xi T_p + 1} \quad T = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}} \quad \xi = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \quad (1.3)$$

Добротность такого фильтра Q равна коэффициенту усиления k_{max} на частоте резонанса $\omega_p = 1/T$, причем:

$$Q = k_{\max} = \frac{1}{2\xi} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \quad (1.4)$$

Чтобы менять частоту резонанса, сохраняя при этом добротность неизменной, необходимо синхронно менять коэффициенты k_1 и k_2 .

Интеграторы фильтра построены на ОУ типа К140УД6 стандартным образом. Дискретное переключение поддиапазонов осуществляется переключателем 5, плавное управление резонансной частотой фильтра - с помощью синхронного изменения коэффициентов передачи на аналоговых перемножителях типа 525ПС2А. Сигнал управления резонансной частотой фильтра подается на гнезда, выведенные на переднюю панель блока. Для ручного управления резонансной частотой фильтра предусмотрен регулируемый источник постоянного напряжения.

ФНЧ построен по структуре, показанной на рис. 1.35. Его передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{k_-}{k} \frac{1}{T_p + 1} \quad T = \frac{1}{k_- k_+} \quad (1.5)$$

Из этих соотношений видно, что для управления сопрягающей частотой фильтра $\omega_c = 1/T$ следует изменять коэффициент K . Коэффициент передачи на нижних частотах $k_0 = k_- / k_+$, при этом изменяться не будет.

Сумматор и интегратор ФНЧ реализованы на ОУ типа К140УД6 стандартным образом. Дискретное управление граничной частотой ФНЧ осуществляется установкой переключки между гнездами 3 на передней панели блока (рис. 1.33), плавное изменение - схемой на аналоговом перемножителе типа 525ПС2А. Сигнал управления при этом тот же, что и для управления резонансной частотой фильтра 4.

Детектор 6 осуществляет над входным сигналом одну из двух операций $y = \text{mod} x$ или $y = x^2$.

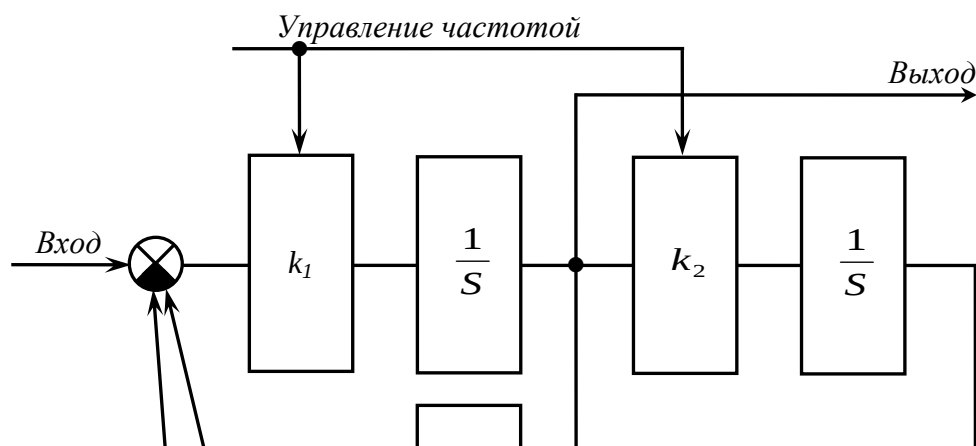


Рис. 1.34. Функциональная схема резонансного фильтра

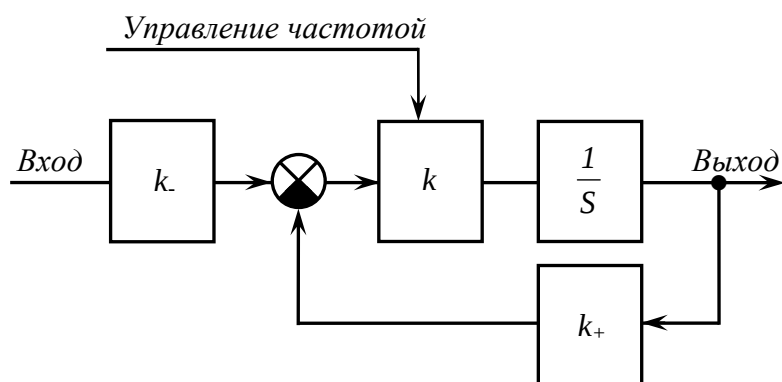


Рис. 1.35. Функциональная схема фильтра низких частот

1.5.9. Блок управляемой задержки

Передняя панель блока управляемой задержки показана на рис. 1.36. Функционально блок объединяет управляемую линию задержки 1, перемножитель аналоговых сигналов 2 и регулируемый источник 3 опорных напряжений «+1 В» и «+10 В».

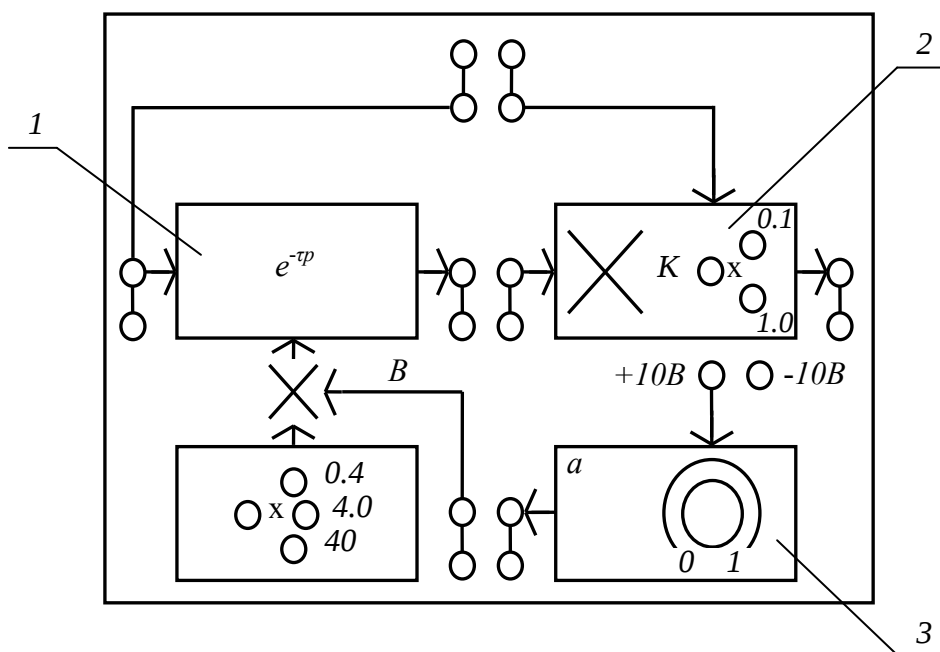


Рис. 1.36. Передняя панель блока управляемой задержки:
1 – управляемая линия задержки; 2 – перемножитель аналоговых сигналов; 3 – источник опорных напряжений

Амплитуда входных сигналов управляемой линии задержки от 0 до 10 В, частота - от 0 до 100 Гц. Диапазон управляемой задержки от 0 до 40 с, разбит на три поддиапазона: 0 - 0,4; 0 - 4; 0 - 40 с. Погрешность преобразования входного сигнала в выходной, задержанный - $u(t - \tau)$, не более 3 %.

Плавная регулировка задержки сигнала в каждом поддиапазоне осуществляется с помощью напряжения от 0 до 10 В. Дискретность времени задержки для диапазона 0 - 0,4 с составляет 100 мкс, для диапазона 0 - 4 с - 1 мс и для диапазона 0 - 40 с - 10 мс.

Принцип действия линии задержки, рис. 1.37, а, основан на аналого-цифровом преобразовании исходного сигнала, бесконечной кольцевой записи выборок в память с последующим их считыванием по адресу, формируемому из адреса записи и адреса установки, определяемого необходимой задержкой сигнала, и формирования выходного сигнала цифро-аналоговым преобразователем.

Входной аналоговый сигнал преобразуется АЦП в 8-разрядный параллельный код. После записи данных в ячейку с адресом A_n происходит возврат к ячейке с адресом A_0 . Вслед за записью осуществляется считывание из памяти по адресу, отличающемуся от адреса записи на K номеров. Величина K определяется по значению необходимой задержки входного сигнала. Считанный код записывается в регистр и преобразуется ЦАП в аналоговый сигнал.

Полная блок-схема линии задержки показана на рис. 1.37, б. АЦП1 работает в стартстопном режиме, преобразуя входной сигнал в параллельный цифровой код. После каждого преобразования АЦП1 выдает импульс ГД в блок управления, который формирует сигналы, синхронизирующие работу памяти и адресной части схемы. По сигналу «Такт» происходит прибавление единицы к содержимому счетчика адреса записи. Сигналом «Переключение адреса зп/чт» буфер адреса зп/чт подключает к адресным входам памяти выходы счетчика адреса записи. Сигналами «зп/чт» и «вых.мс'» происходит запись кода с шины данных АЦП1 в выбранную ячейку памяти. Для задания адреса считывания в схему введены АЦП2 и сумматор адреса считывания.

Адрес считывания формируется на выходах сумматора из кода адреса записи и кода времени задержки, сформированного АЦП2 из напряжения управления задержкой u_τ .

Цикл чтения происходит после цикла записи. Буфер адреса зп/чт подключает к адресным входам памяти выходы сумматора адреса считывания и осуществляется выборка из памяти. Считанные данные записываются в регистр ЦАП, который хранит их до следующего чтения из памяти. ЦАП преобразует данные, записанные в регистр, в аналоговую величину.

Данный способ построения линии задержки аналогового сигнала позволяет плавно изменять время задержки внешним управляющим сигналом u_τ , сохраняя постоянную ошибку преобразования $u(t)$ в $u(t-\tau)$.

В блоке использованы АЦП типа К1113ПВ1, ЦАП типа К591ПА1, требуемый объем памяти 4 кбайт реализован на двух микросхемах КР537РУ10.

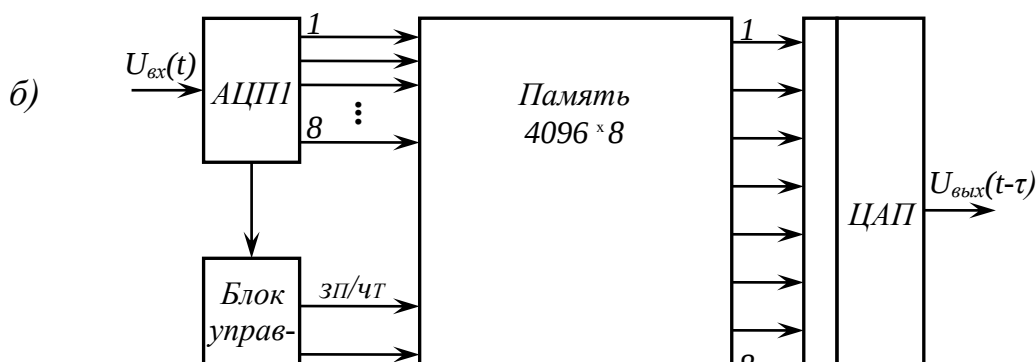
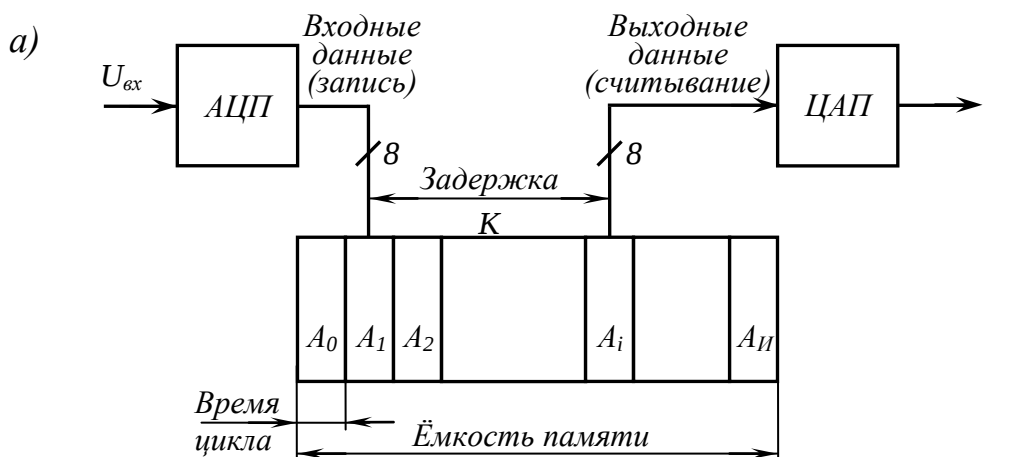


Рис. 1.37. Принцип работы линии задержки:
а – упрощенная схема; б – полная схема линии задержки

1.5.10. Блок случайных сигналов

Этот блок предназначен для формирования комбинаций случайных и детерминированных сигналов при использовании моделирования для изучения теории вероятностей и случайных процессов и исследований реальных объектов и систем. Передняя панель блока, выполненного в едином конструктиве сменных блоков АВК-6, показана на рис. 1.38. В состав блока входят два независимых генератора квазислучайных сигналов и генератор системы синхронных детерминированных сигналов.

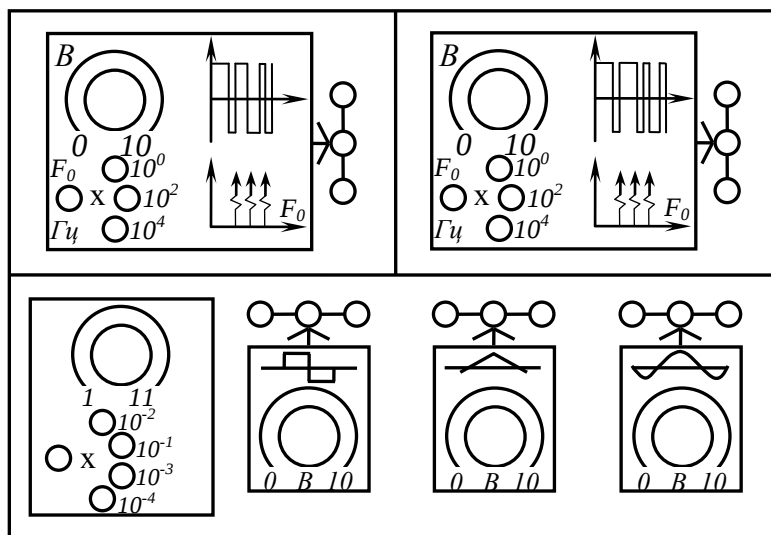


Рис. 1.38. Передняя панель блока генераторов случайных и детерминированных сигналов:
1 – генераторы квазислучайных сигналов; 2 – генератор системы синхронных сигналов

Каждый из двух генераторов квазислучайных сигналов генерирует прямоугольные импульсы амплитудой 10,0 В с нулевым математическим ожиданием и квазислучайной длительностью. Такой сигнал имеет линейчатый спектр с высокой плотностью спектральных линий, что позволяет использовать его при моделировании в качестве источника белого шума. Переключкой можно выбрать один из трех диапазонов, в каждом из которых сигнал имеет равномерный с точностью 1 % линейчатый спектр: от 0 до 1,0 Гц с расстоянием между спектральными линиями $1,2 \times 10^{-5}$ Гц; от 0 до 100 Гц; с расстоянием между спектральными линиями $1,2 \times 10^{-3}$ Гц и от 0 до 10 кГц - с расстоянием между спектральными линиями $1,2 \times 10^{-1}$ Гц.

Генератор квазислучайного сигнала построен по известному принципу формирования двоичной последовательности при помощи сдвигового n -разрядного регистра, замкнутого в кольцо через сумматор по модулю 2, рис. 1.39.

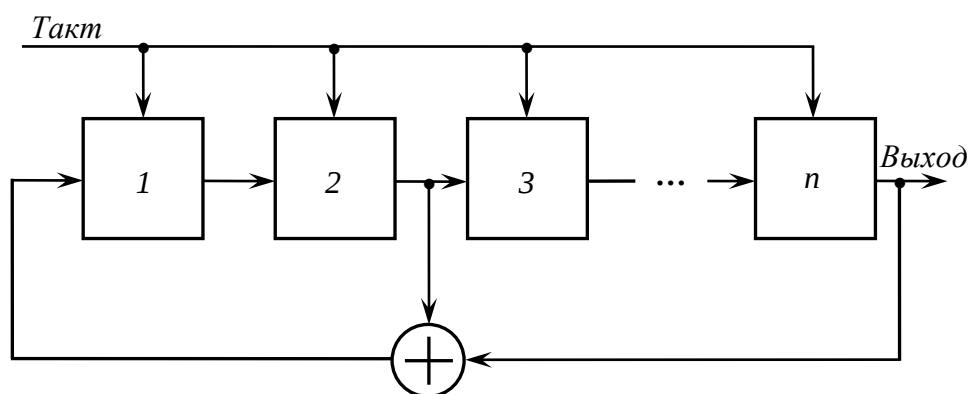


Рис. 1.39. Функциональная схема генератора квазислучайных сигналов

Выходной сигнал регистра, рис. 1.40,а, имеет период $T_n = T_0 (2^n - 1)$ и математическое ожидание $m = a/2^{n-1}$. Корреляционная функция такого сигнала, рис. 1.40,б, описывается соотношением:

$$R_x(\tau) = a^2 \begin{cases} \left[1 + \frac{1}{2^n - 1} \right] \left[1 - \left| \frac{T}{T_0} \right| - \frac{1}{2^n - 1} \right] & \text{при } \left| \frac{\tau}{T_0} \right| < 1 \\ -\frac{1}{2^n - 1} & \text{при } 1 \leq \left| \frac{\tau}{T_0} \right| \leq \frac{2^n - 1}{2} \end{cases} \quad (1.6)$$

а его спектральная плотность, рис. 1.40, в, соотношением:

$$S_x(\omega) = \frac{\pi a^2}{2^n - 1} \left\{ \left(1 + \frac{1}{2^n - 1} \right) \left(\sin \left(\frac{\omega T_0}{2} \right) / \frac{\omega T_0}{2} \right)^2 1^*(\omega) - \left(1 - \frac{1}{2^n - 1} \right) \delta(\omega) \right\}$$

$$\text{где } 1^*(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - k\omega_n), \quad \omega_n = \frac{2\pi}{T_0(2^n - 1)} \quad (1.7)$$

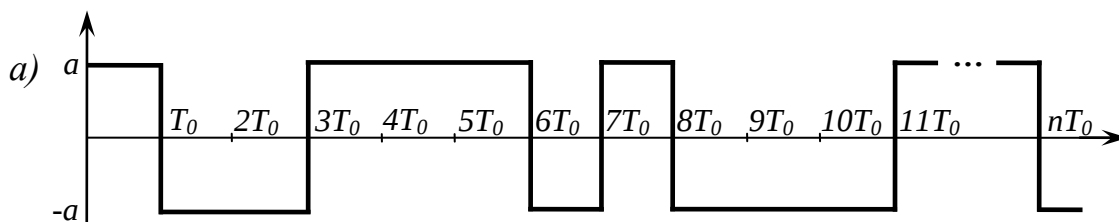
Если $(2^n - 1) \gg 1$, то можно воспользоваться упрощенным выражением для спектральной плотности:

$$S_x(\omega) = \frac{\pi a^2}{2^n - 1} \left\{ \left(\sin \left(\frac{\omega T_0}{2} \right) / \frac{\omega T_0}{2} \right)^2 1^*(\omega) - \delta(\omega) \right\}, \quad (1.8)$$

где a - амплитуда выходного сигнала регистра; T_0 - период сигнала, подаваемого на регистр сдвига; n - разрядность регистра.

Как следует из приведенных соотношений, с ростом n резко возрастает период выходного сигнала регистра, а его математическое ожидание стремится к нулю. Корреляционная функция и спектральная плотность сигнала при времени измерения, сравнимом с периодом сигнала, близки к характеристикам белого шума.

Регистр с $n = 20$ построен на пяти микросхемах К176ИР2, сумматор по модулю два - на микросхеме К176ЛП2, генератор тактовой частоты - на интегральном таймере КР1006ВИ1. Генератор системы синхронных: прямоугольного, треугольного и синусоидального сигналов, полностью аналогичен генератору в блоке умножения.



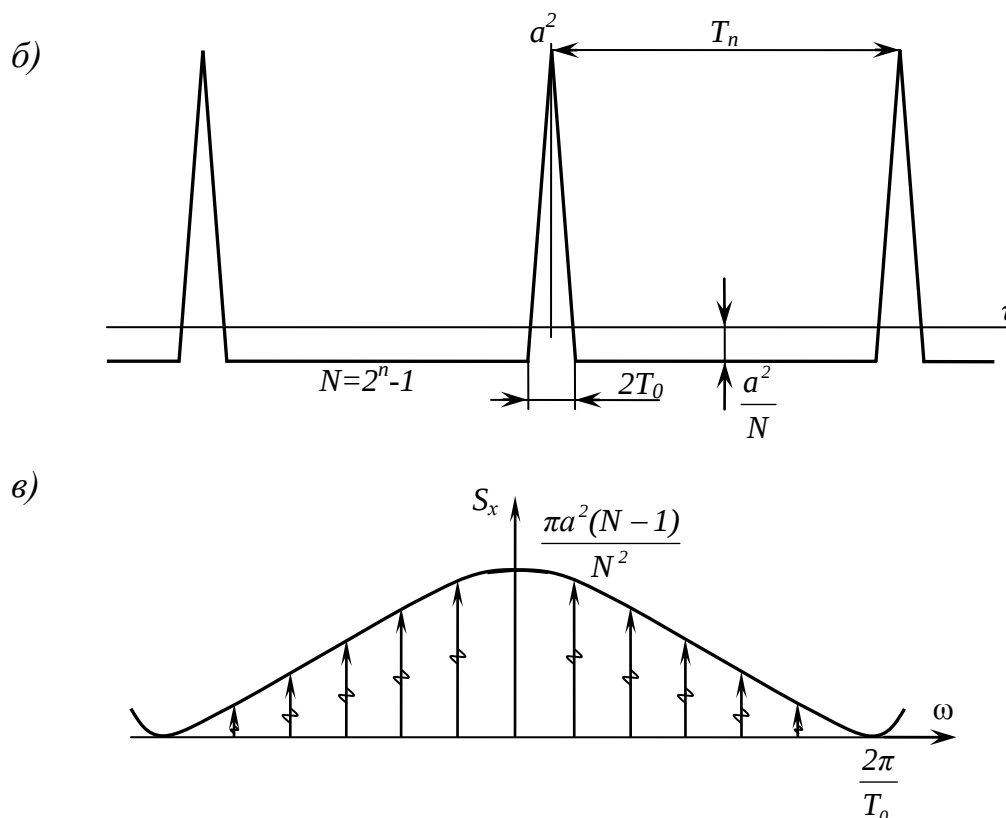


Рис. 1.40. Характеристики квазислучайного сигнала:
 а – вид сигнала; б – корреляционная функция; в – спектральная плотность

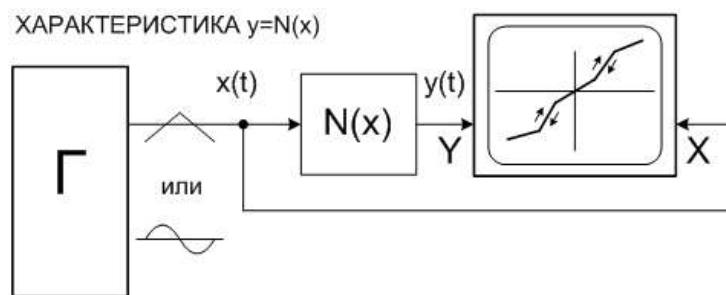
2. Приемы работы с АВК-6

2.1. Знакомство с АВК-6

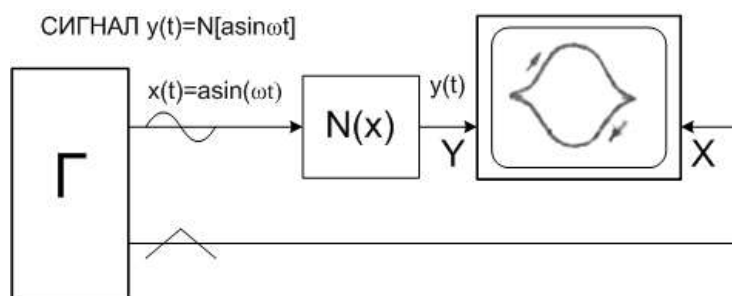
Знакомство с персональным аналоговым компьютером АВК-6, рис.1, начинают с его осмотра. Необходимо найти сам электронно-лучевой индикатор и блок "индикатор" в верхней части служебного модуля с гнездами для сигналов отклонения по X и Y и гашения луча Z , генератор системы сигналов с коммутатором, монтажное поле со сменными блоками, рассмотреть таблицу-справку ("шпаргалку") на крышке блока питания, рис.2. Если мнемоника знакома, можно сразу начинать экспериментировать с компьютером. Он защищен от таких ошибок пользователя, как: замыкание выходов на "землю" и друг на друга, подача внешних сигналов на "внутренние" гнезда преобразователей в блоках и других неправильных соединений.

С самых первых шагов полезно предварять действия с АВК-6 схемами экспериментов и прогнозами их результатов в виде графиков, рис.2.

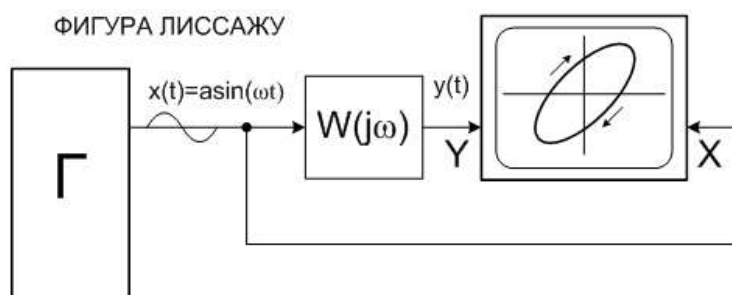
1.



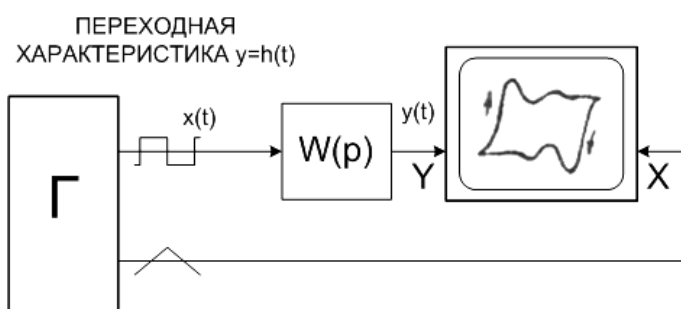
2.



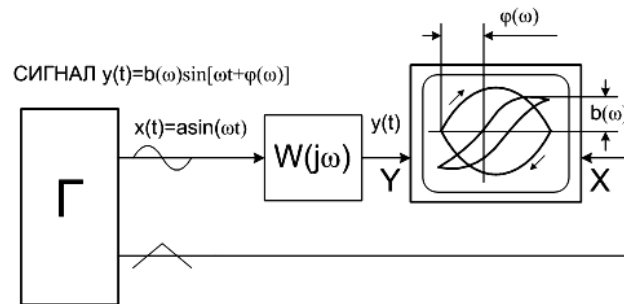
3.



4.



5.



6.

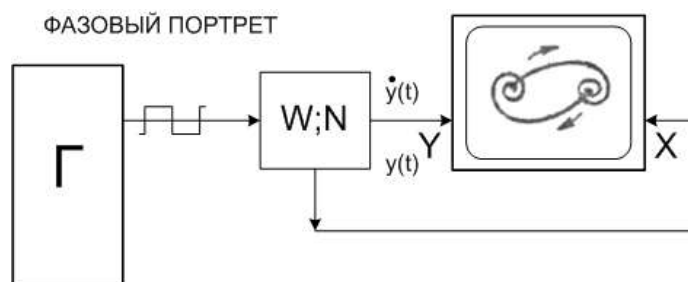


Рис. 2. Таблица-справка на передней панели блока питания

Для подготовки АВК-6 к работе необходимо включить вилку питания в розетку сети 220В, 50-60Гц, приподнять в удобное положение индикатор и нажать кнопку включения, расположенную вверху таблицы-справки на крышке блока питания. Индикатор рядом с кнопкой сигнализирует, что прибор включен. После прогрева накала ЭЛТ в центре экрана появляется светящаяся точка - прибор готов к работе. Чтобы уберечь ЭЛТ от выгорания люминофора в центре экрана, на вход X,10 следует подать от ГСС непрерывный сигнал, например, треугольный - луч начнет двигаться по горизонтали. Перемычка "ручное регулирование" в ГСС должна быть включена.

Далее следует рассмотреть и зафиксировать в рабочем журнале систему синхронных сигналов. Настроив самую низкую частоту, можно убедиться, что треугольный сигнал заставляет луч двигаться по экрану влево и вправо с одинаковой постоянной скоростью. После этого на вход индикатора Y,10 надо поочередно подавать сигналы с других выходов генератора и, регулируя амплитуду, рассмотреть движение луча по экрану. Соединяя переключкой гнездо Z с гнездами $\sqcap$ и $\sqcup$, разберитесь с гашением луча. Увеличив частоту генератора, получите устойчивые неподвижные осциллограммы и уточните форму сигналов ГСС.

Коммутатор, рис. 2.1, позволяет одновременно наблюдать на экране индикатора четыре осциллограммы. Для этого вход Y индикатора соединяют с выходом одного из каналов коммутатора, а исследуемые сигналы подают на входы 1-4 этого канала. При отжатой кнопке в блоке "индикатор" коммутатор работает с частотой 5 кГц от встроенного генератора, а при нажатой - переключается положительными перепадами прямоугольных импульсов ГСС. Особенности получающихся при этом изображений можно рассмотреть, варьируя частоту ГСС. Верхнему диапазону частот от 100 до 1100 Гц соответствует верхнее (выключенное) положение всех клавиш переключателя диапазонов.

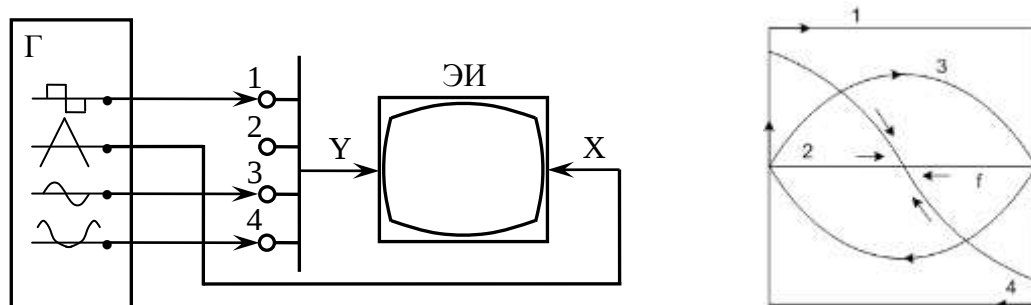


Рис. 2.1. Структурная схема использования коммутатора для наблюдения нескольких процессов

Варьируя частоту ГСС, обратите внимание на показания измерителя длительности (ИД) в служебном блоке - он измеряет длительность "прямого хода" треугольного сигнала (луч движется слева направо). Полезно сопоставить показания ИД с ориентировочной оценкой частоты по шкале ГСС.

На рис. 2.2, такт 4 коммутатора использован для формирования измерительной линейки 4. Выход эталонного источника $\mathcal{E}$ подключен ко входу делителя $\mathcal{D}$, с помощью которого можно смещать по вертикали горизонтальный отрезок 4, например, до совмещения его с верхушкой синусоиды 3. Если выставленное таким образом постоянное напряжение делителя u_y подать одновременно на вход цифрового вольтметра ЦВ, то будет измерена амплитуда синусоиды. Точно так же, совместив контрольный отрезок 4 с вершиной прямоугольного импульса 1, измеряют амплитуду прямоугольного (или любого другого) сигнала.

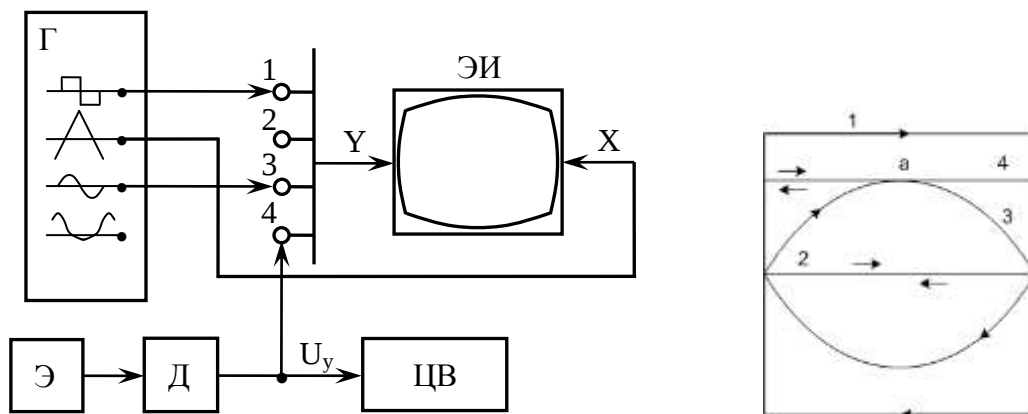
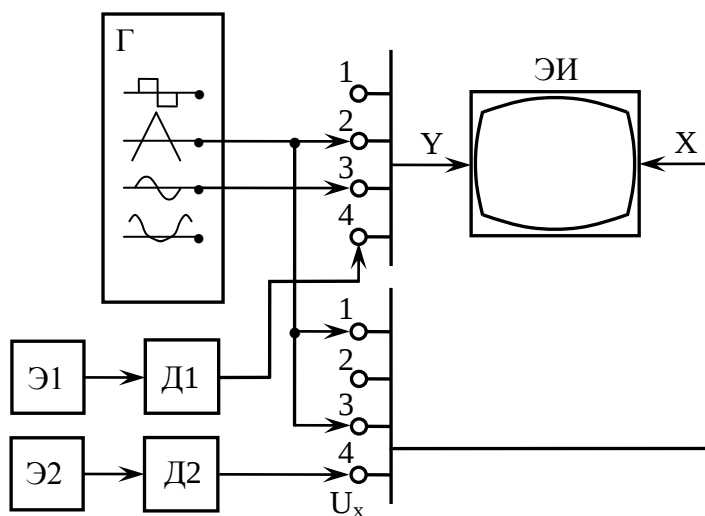


Рис. 2.2. Структурная схема использования коммутатора для измерения амплитуды сигналов

На рис. 2 и далее ГСС для краткости обозначен как "генератор" Г. Начиная с рис. 2.1, ГСС обозначен специальным символом, мнемонически отражающим систему синхронных сигналов.

Два канала коммутатора, рис. 2.3, позволяют сформировать на экране изображения осей x (1) и y (2), синусоиды 3 или другого графика и контрольной точки (КТ) 4. Последнюю можно перемещать по полю экрана делителями Д1 по вертикали и Д2 по горизонтали до совмещения с заинтересовавшей Вас точкой графика 3. Измерение при помощи ЦВ напряжений u_y и u_x с выходов делителей дает координаты КТ. Если же напряжение u_x подать на вход измерителя длительности ИД, то последний покажет длительность временного интервала cf от начала движения луча из точки c до точки f - проекции КТ на ось времени x . Напомним, что если вход ИД свободен (никуда не подключен), то ИД измеряет длительность интервала cd .



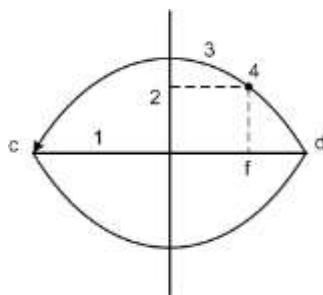


Рис. 2.3. Структурная схема использования коммутатора для формирования координатных осей

На рис. 2.4 показана схема для формирования изображений осей координат x (1) и y (2) и наклонных отрезков $y=kx$ (3) и $y=kx+b$ (4). Полезно, однако, начать с более простой схемы на рис. 2.5 без коммутатора. Получите изображение отрезка $y=kx$ с наклоном k , регулируемым при помощи делителя Д1; познакомьтесь с работой сумматора - соедините его выход со входом Y индикатора и подайте сигнал $y=kx$ поочередно на прямой и инвертирующий входы, наконец, сместите полученный график по вертикали при помощи эталона Э и делителя Д2 и только после этого украсьте полученный график осями координат при помощи коммутатора.

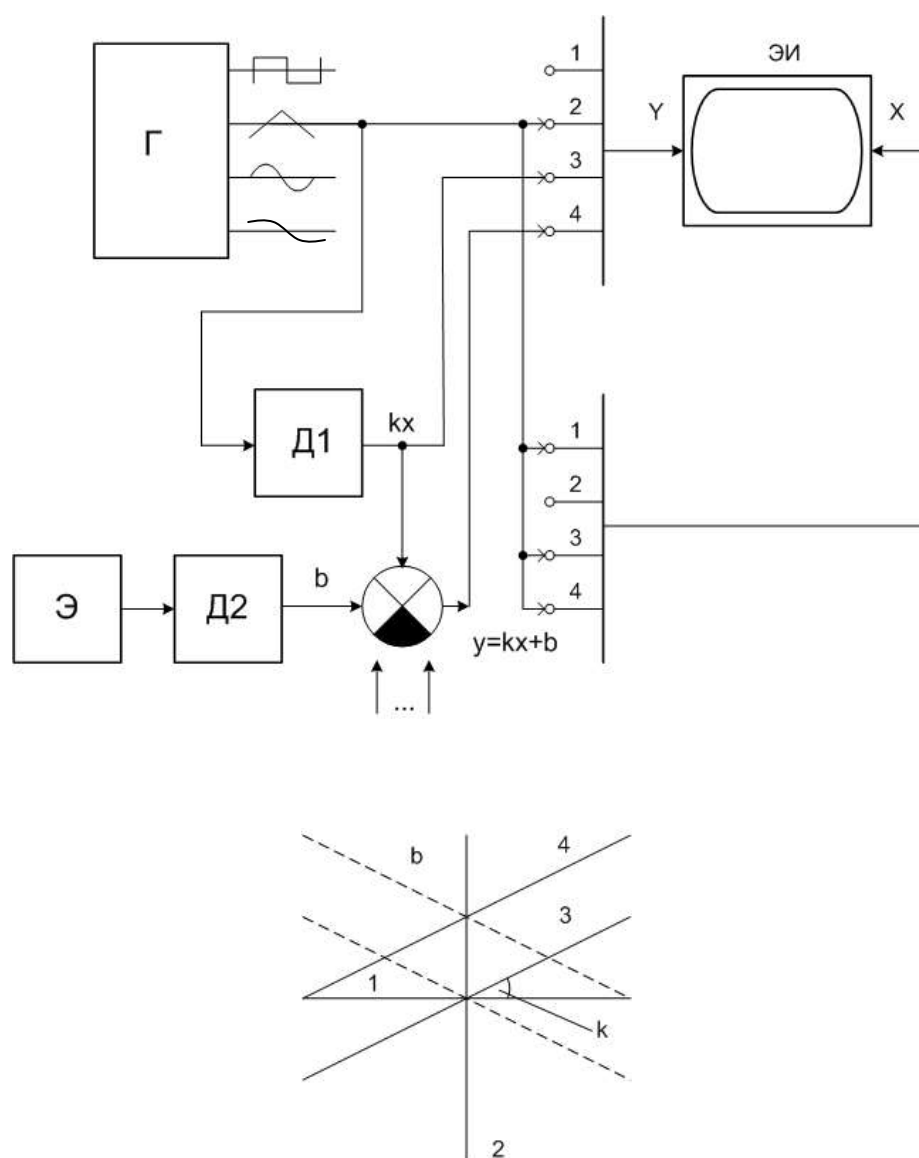


Рис.2.4. Структурная схема формирования изображения отрезков с помощью коммутаторов

Прямолинейный отрезок с регулируемым наклоном и смещением пригодится в качестве "электронной линейки". Возврат же от сложных схем к более простым с последовательной их проверкой и наращиванием - прием, который ведет к конечной цели быстрее, чем попытки "сразу" получить окончательный результат.

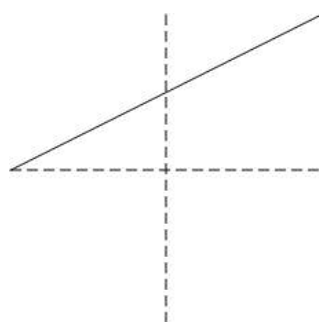
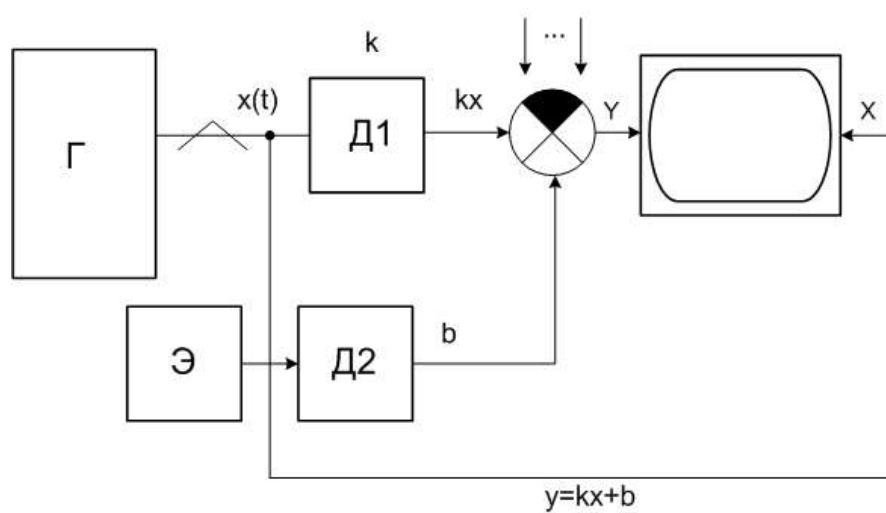


Рис.2.5. Структурная схема формирования изображения отрезков без коммутатора

3. Указания к лабораторным работам

3.1. Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Краткие теоретические сведения и практические рекомендации

Для наблюдения на экране индикатора статических характеристик используется структурная схема 1 таблицы-справки, рис. 2. Данная схема воспроизведена на рис.3. Непрерывный сигнал ГСС - $x(t)$, например треугольный, подают одновременно на входы X индикатора и исследуемого нелинейного преобразователя, а выход последнего $y(t)=N[x(t)]$ - на вход Y индикатора. В качестве нелинейного преобразователя удобно использовать сменный блок "нелинейность", рис. 3.1. Его динамические характеристики в диапазоне частот ГСС приближены к "безынерционной нелинейности", и поэтому, выбором частоты ГСС на экране индикатора можно получить стационарный график статической характеристики без динамических погрешностей.

Сигнал $x(t)$ подают на вход 1, переключкой соединяют выход 2 усилителя "к" с входом 3 нелинейности N , сигнал $y(t)=N[x(t)]$ снимают с выхода 4. Переключки между парами гнезд 5-8 для начала следует выключить (удалить). Собрав схему рис. 3 и, получив график нелинейности рис. 3.1, следует еще раз разобраться по мнемосхеме блока в назначении ручек и, наблюдая характеристику на экране индикатора, изучить, как влияет каждая из них на форму графика. Предскажите, как изменят форму графика диоды Д1 и Д2 и проверьте этот прогноз.

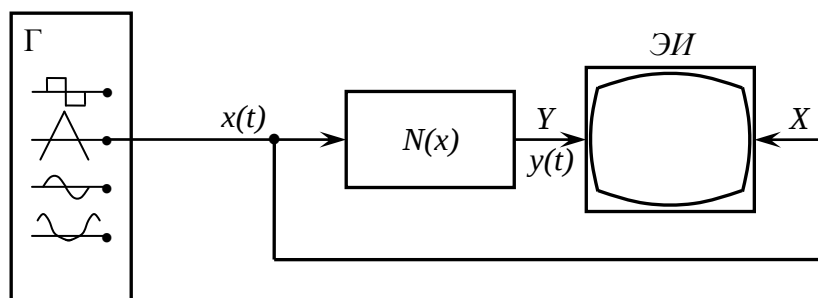


Рис. 3. Структурная схема для воспроизведения статических характеристик

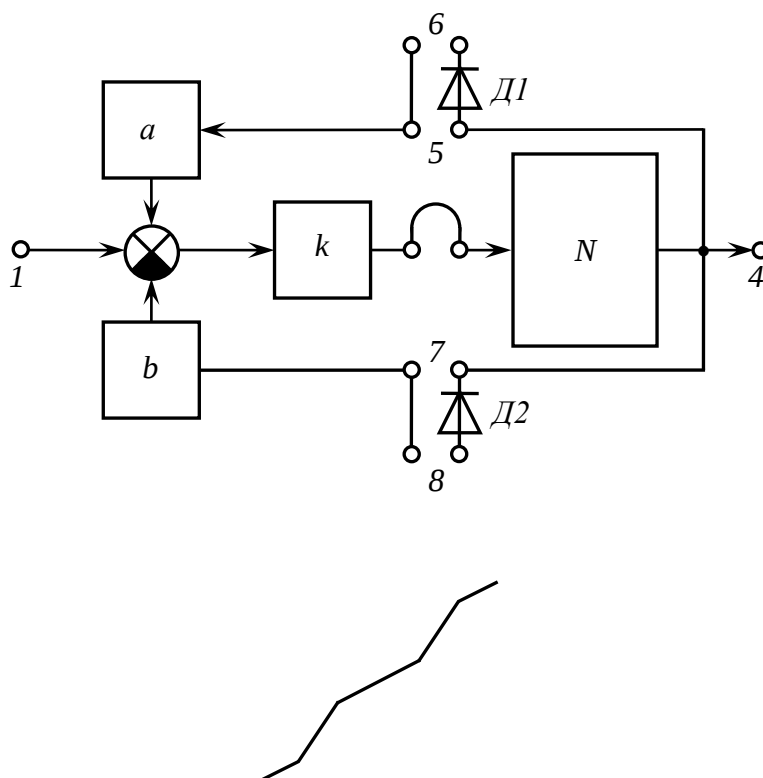


Рис. 3.1. Схема сменного блока «нелинейность» и его характеристика

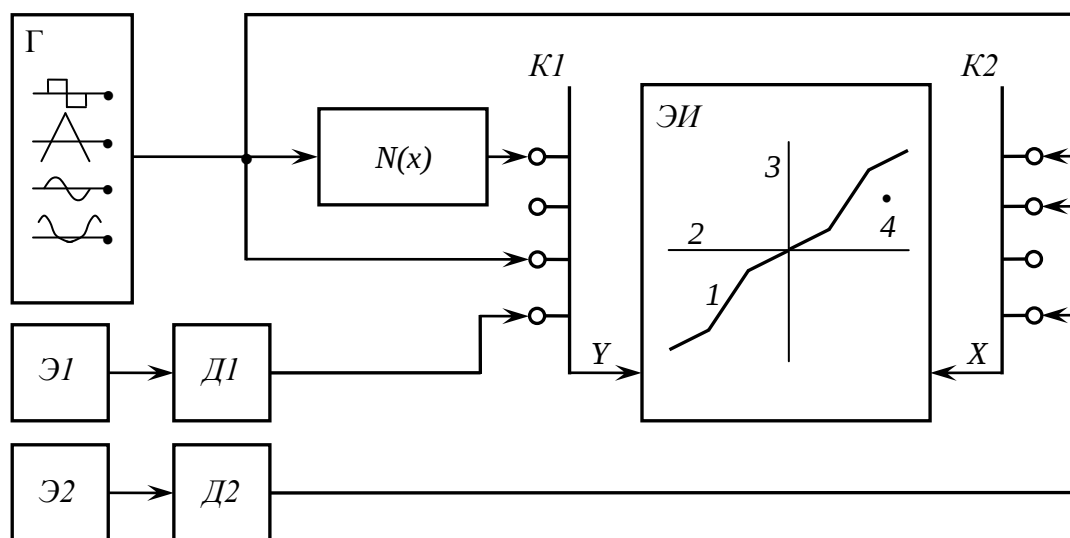


Рис.3.2. Структурная схема коммутации блока «нелинейность» для получения его характеристики в осях координат

График нелинейности полезно дополнить осями координат и контрольной точкой. Структурная схема, обеспечивающая такую комбинацию изображений, показана на рис. 3.2. Её поясняет расположен-

ная ниже таблица коммутации, табл.3. В ней каждому каналу коммутатора отведена своя строка. В первых четырех столбцах, соответствующих входам каналов и одновременно тактам коммутатора, записывают, какие сигналы подают на эти входы. В пятом столбце указывают, куда подключены выходы каналов, а в нижней строке описывают изображение, формируемое в данном такте на экране индикатора. Таблицу 3, можно прочесть следующим образом:

Таблица 3.

Таблица коммутации

Входы (такты) коммутатора				Выходы
1	2	3	4	
$\Delta(t)$	$\Delta(t)$	-	E_x	X
$y(t)$	-	$\Delta(t)$	E_y	Y
$N(x)$	ось x	ось y	КТ	экран

1. Первый такт: на вход X индикатора подан сигнал $\Delta(t)$, на вход Y - сигнал $y(t)=N[x(t)]$ выхода нелинейности - на экране формируется график $y=N(x)$;

2. Второй такт: на X-вход индикатора подан сигнал развертки $\Delta(t)$, на Y-входе внешний сигнал отсутствует, $Y(t)=0$ - на экране формируется горизонтальная ось x;

3. Третий такт: на X-входе внешний сигнал отсутствует, $x(t)=0$, на Y-вход подан сигнал развертки $\Delta(t)$ - на экране формируется вертикальная ось y;

4. Четвертый такт: на X-вход индикатора подано постоянное напряжение E_x , на Y-вход - постоянное напряжение E_y на экран выводится изображение контрольной точки с координатами E_x, E_y .

Программирование коммутатора позволяет варьировать содержание информации, выводимой на экран индикатора в соответствии с целями конкретного исследования. Так, вместо координатных осей на экран можно вывести еще две измерительные точки, что позволит, например, "запоминать" на экране координаты характерных точек графика и настраивать нелинейность, "проводя" ее характеристику через определенные точки.

Измерительная линейка - простейший электронный шаблон, который может оказаться удобным инструментом при измерениях. Схемы формирования измерительных линеек сведены в таблицу № 3.1. Для вывода каждой из них на экран индикатора совместно с другими изображениями надо затратить один такт коммутатора.

В первой строке таблицы приведена схема формирования вертикальной линейки. На Y-вход индикатора подан треугольный сигнал $\Delta(t)$ ГСС, на X-вход - регулируемое постоянное напряжение E_x , изме-

няя которое можно смещать линейку вправо-влево. Вертикальную линейку удобно применять для определения абсцисс характерных точек.

Во второй строке приведена уже знакомая схема формирования горизонтальной линейки, а в третьей - наклонной, проходящей через начало координат, причем ее угол наклона регулируется изменением коэффициента k . Если угол наклона α между осью абсцисс и линейкой недостаточен, можно поменять местами сигналы, поступающие на X - и Y -входы индикатора (четвертая строка). Тогда $\operatorname{tg} \alpha = 1/k$, и при малых k линейка направлена круто вверх. Использование сумматора, эталона и делителя позволяет смещать линейку вверх-вниз (пятая строка) или вправо-влево (шестая строка).

Применение этих схем помогает измерить на графиках координаты характерных точек, строить асимптоты, касательные, хорды и медианы, проверять симметричность графиков относительно заданных точек или прямых, определять расстояние между точками в заданном направлении и т.д.

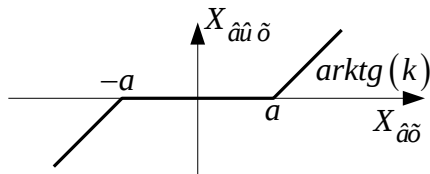
Таблица № 3.1.

Таблица схем формирования измерительных линеек.

№	Вид линейки	Схема формирования
1.	Вертикальная	
2.	Горизонтальная	
3.	Наклонная, проходящая через начало координат $\operatorname{tg} \alpha = K$	
4.	- // - $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{K}$	
5.	Смещение по Y – оси	
6.	Смещение по X - оси	

Типичными характеристиками сменного блока «нелинейность» могут являться следующие характеристики:

1. Характеристика зоны нечувствительности, рис.3.3:

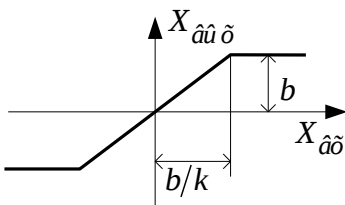


$$\begin{aligned} X_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} &= 0, \quad |X_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}| < a \\ X_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} &= -ka + kX_{\hat{a}\hat{o}}, \quad X_{\hat{a}\hat{o}} < -a \\ X_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} &= ka + kX_{\hat{a}\hat{o}}, \quad a < X_{\hat{a}\hat{o}} \end{aligned}$$

Рис. 3.3. Характеристика зоны нечувствительности

Примером такой характеристики является люфт механической системы.

2. Характеристика с ограничением, рис.3.4:

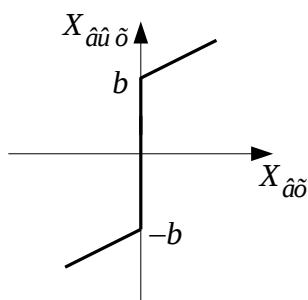


$$\begin{aligned} X_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} &= kX_{\hat{a}\hat{o}}, & |X_{\hat{a}\hat{o}}| < b/k \\ X_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} &= b, & X_{\hat{a}\hat{o}} > b/k \\ X_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} &= -b, & X_{\hat{a}\hat{o}} < -b/k \end{aligned}$$

Рис. 3.4. Характеристика с ограничением

Примером такой характеристики может служить электронный ограничитель.

3. Характеристика форсированного элемента, рис.3.5:



Выходная величина изменяется скачком при незначительном изменении $X_{\hat{a}\hat{o}}$.

$$X_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} = b + kX_{\hat{a}\hat{o}}, \quad X_{\hat{a}\hat{o}} > 0$$

$$X_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}} = -b + kX_{\hat{a}\hat{o}}, \quad X_{\hat{a}\hat{o}} < 0$$

Примером являются струйные гидравлические усилители, если $X_{\hat{a}\hat{u}\hat{o}}$ есть скорость,

$X_{\hat{a}\hat{o}}$ – перемещение исполнительного гидравлического механизма.

Рис. 3.5. Характеристика форсированного элемента

4. Характеристика форсированного элемента с ограничением:

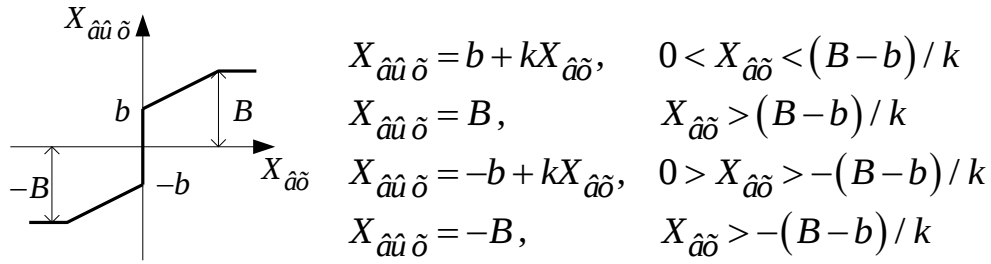


Рис. 3.6. Характеристика форсированного элемента с ограничением

Частным случаем элемента с форсировкой являются релейные элементы.

5. Идеальное двухпозиционное реле, рис. 3.7:

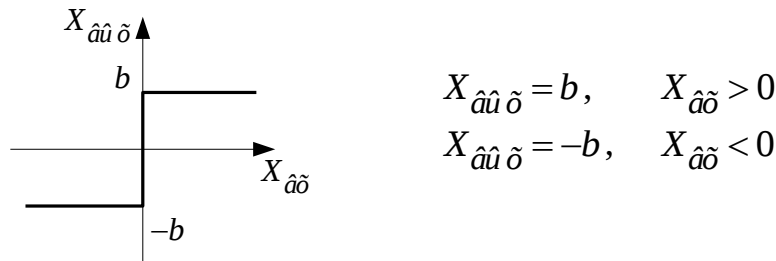


Рис.3.7. Характеристика идеального реле

6. Трёхпозиционное реле с зоной нечувствительности, рис.3.8:

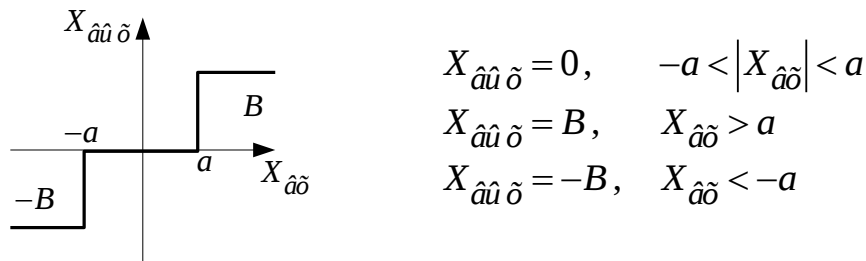


Рис.3.8. Характеристика трёхпозиционного реле с зоной нечувствительности

7. Характеристика АЦП (гистерезисная), рис. 3.9. :

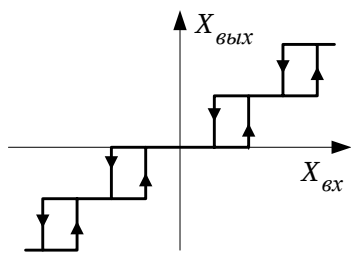


Рис. 3.9. Характеристика АЦП (гистерезисная)

8. Кусочно-ломаная характеристика, рис.3.10:

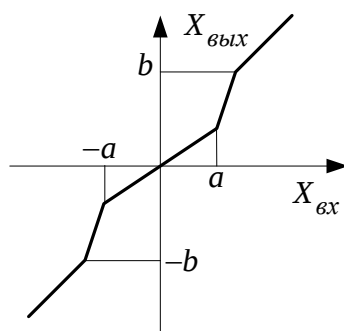


Рис.3.10. Кусочно-ломаная характеристика

Методика проведения эксперимента

Необходимое оборудование:

- АВК-6;
- блок «нелинейность»;
- делители (Д1 и Д2) и источники эталонных напряжений (Э1 и Э2);
- коммутаторы (К1 и К2).

Порядок выполнения работы:

1. Собрать схему исследования преобразователя блока «нелинейность», рис. 3.2 для наблюдения на экране индикатора статических характеристик и для получения на экране осей координат. Оси координат отстроить по центру экрана с помощью делителей Д1 и Д2.

Для получения статической характеристики преобразователя блока «нелинейность» непрерывный сигнал ГСС $X(t)$, треугольной формы, подать одновременно на входы X индикатора и исследуемого нелинейного преобразователя, а выход последнего $Y(t) = N[X(t)]$, на вход Y индикатора. В качестве нелинейного преобразователя исполь-

зовать сменный блок «нелинейность», рис.3.1. Сигнал $X(t)$ подать на вход 1, переключкой соединить выход 2 усилителя k со входом 3 нелинейности N , сигнал $Y(t) = N[X(t)]$ снимать с выхода 4.

Переключки между парами гнезд 5-8 для начала необходимо выключить (удалить).

Собрав схему, рис.3.1 и получив график нелинейности, следует разобраться в назначении ручек в блоке нелинейности и, наблюдая характеристику на экране индикатора, изучить, как влияет каждая из них на форму графика.

2. Блок «нелинейность» удобно использовать для изучения статических характеристик при последовательном соединении усилителя с нелинейным преобразователем без ОС и при охвате их положительной и отрицательной ОС.

Исследовать влияние коэффициента усиления k на характер графика нелинейности при последовательном соединении усилителя с нелинейным преобразователем. Зафиксировать полученные характеристики для различных значений коэффициентов k .

Собрать схему исследования блока нелинейности с положительной двуполярной обратной связью, рис.3.11. В данной схеме замкнуть переключку 5. Исследовать влияние коэффициента усиления k и параметра a в контуре положительной обратной связи (ПОС) на вид статической характеристики. Зафиксировать полученные характеристики для различных значений коэффициентов k и a .

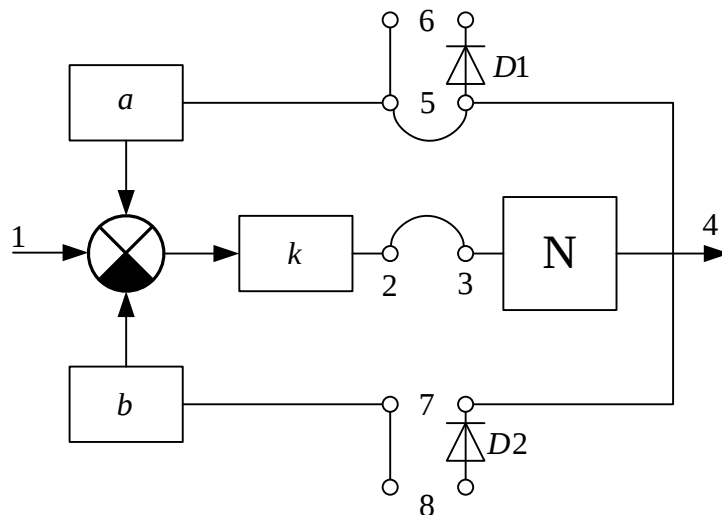


Рис. 3.11. Схема преобразователя «нелинейность» с положительной двуполярной обратной связью

Собрать схему исследования блока нелинейности с положительной однополярной обратной связью, рис. 3.12. В данной схеме за-

мкнуть переключку 6. Исследовать влияние коэффициента усиления k и параметра a в контуре положительной обратной связи на вид статической характеристики. Зафиксировать полученные характеристики для различных значений коэффициентов k и a . Показать влияние диода $D1$ на форму графика.

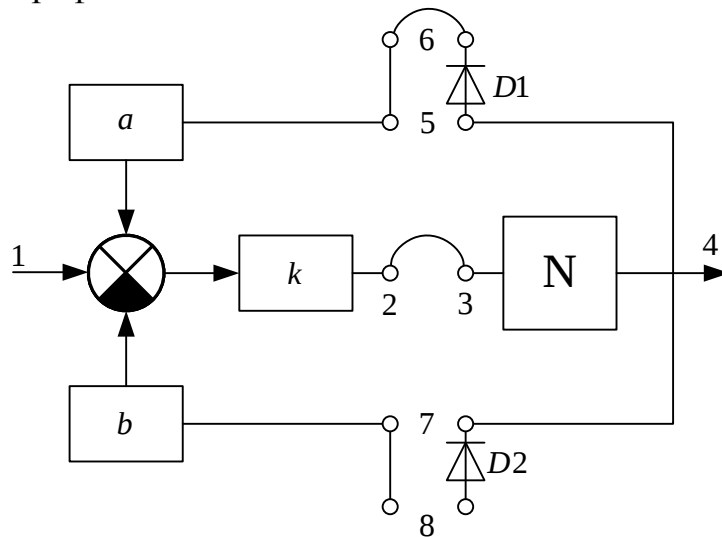


Рис. 3.12. Схема преобразователя «нелинейность» с положительной однополярной обратной связью

Собрать схему исследования блока нелинейности с отрицательной двуполярной обратной связью, рис.3.13. В данной схеме замкнуть переключку 7. Исследовать влияние коэффициента усиления k и параметра b в контуре отрицательной обратной связи (ООС) на вид статической характеристики. Зафиксировать полученные характеристики для различных значений коэффициентов k и b .

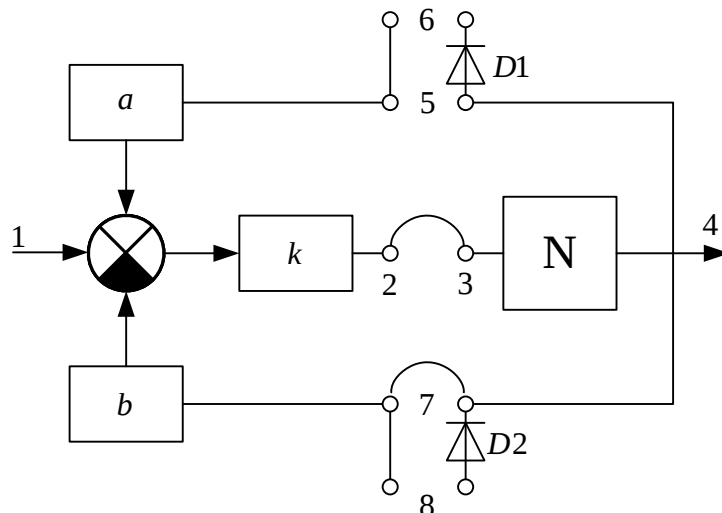


Рис. 3.13. Схема преобразователя «нелинейность» с отрицательной двуполярной обратной связью

Собрать схему исследования блока нелинейности с отрицательной обратной связью, рис.3.14. Перемычку 2 соединить со входом индикатора Y . Зафиксировать график статической характеристики и объяснить полученный результат.

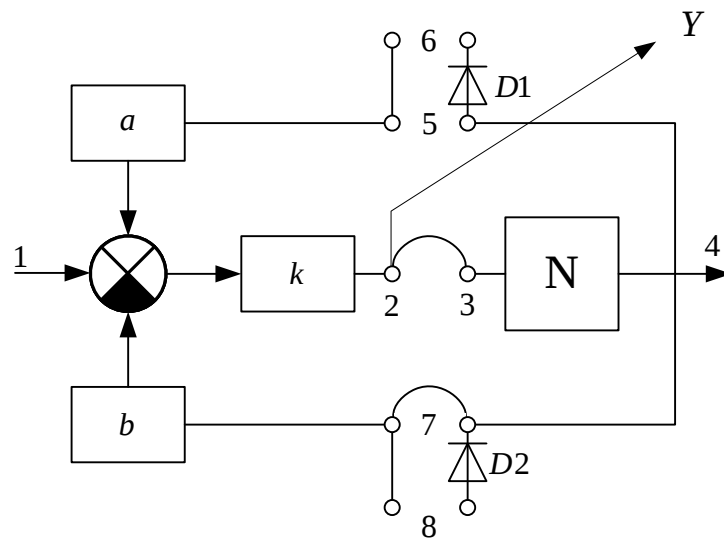


Рис. 3.14. . Схема преобразователя «нелинейность» с отрицательной двуполярной обратной связью

Содержание отчета:

1. Представить структурные схемы исследования преобразователя «нелинейность» при различных способах его включения.
2. Представить графики статических характеристик с комментариями к ним (при каком включении нелинейности получен данный график, каков физический смысл такой нелинейности) и выводами.
3. Сделать вывод при использовании какой структурной схемы с ПОС или с ООС уменьшается статическая ошибка в звене.

3.2. Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ

Краткие теоретические сведения и практические рекомендации

Знакомство с приёмами исследования временных характеристик типовых звеньев удобно начать, используя в качестве объекта исследования сменный блок "интегратор", рис. 3.15. Мнемосхема его передней панели показана на рис. 3.16.

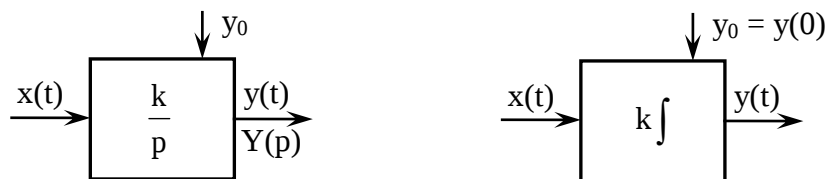


Рис.3.15. Варианты обозначения преобразователя интегрирования

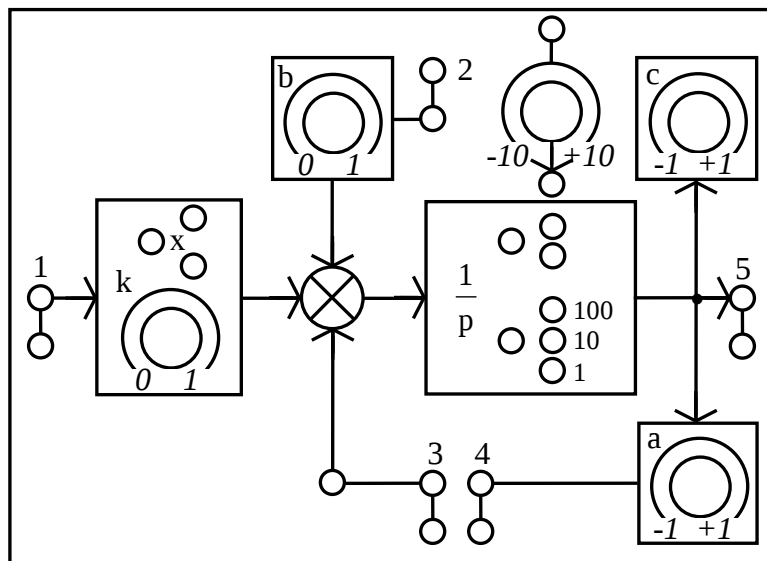


Рис.3.16. Передняя панель сменного блока «интегратор»

Блок **k** позволяет регулировать коэффициент передачи сигнала от 0 до 1 или от 0 до 10 в зависимости от установки переключки между левым и одним из двух правых гнезд "1" или "10". Выходной сигнал блока **k** можно суммировать с сигналами, подаваемыми на входы **2** и **3**. Коэффициент **b** можно плавно регулировать от 0 до 1. Выход сумматора соединен с входом преобразователя "интегратор".

Преобразователь "интегратор" обозначен символом $\int$ или соответствующим ему оператором Лапласа $1/p$. Установка переключки

Варианты упрощенного обозначения преобразователей одного входного сигнала $x(t)$ в один выходной $y(t)$, реализуемых на сменном блоке "интегратор", показаны на рис. 3.17. Если необходимо показать суммирование двух входных сигналов, ОС, замыкаемую перемычкой 3-4, или "ветвление" с применением коэффициентов a и c для масштабирования или инвертирования сигналов, используют более подробные схемы.

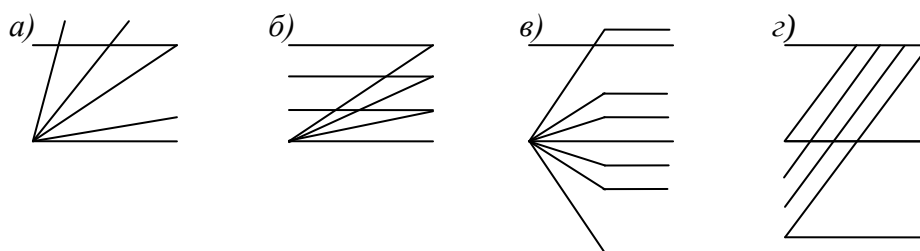
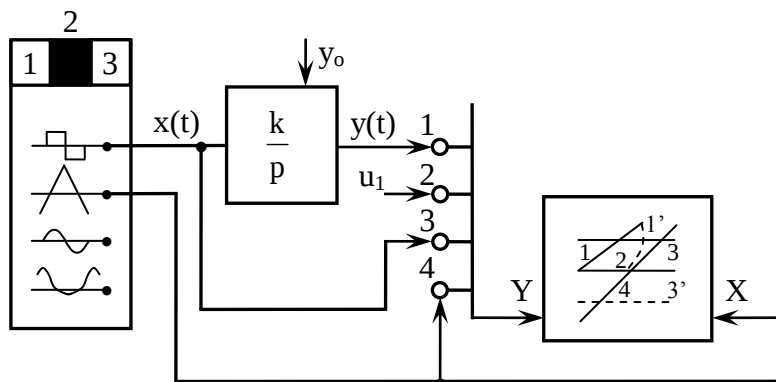


Схема 4 таблицы-справки, рис.2, для исследования переходных характеристик дополнена на рис. 3.18 коммутатором; объектом иссле-

дования является сменный блок "интегратор". На его вход поданы прямоугольные импульсы, развертка по горизонтали осуществляется треугольным сигналом. В первом такте на экране представлен выходной сигнал интегратора 1, во втором - горизонтальная линейка 2, в третьем - сигнал 3 на входе интегратора. В четвертом такте чуть позже можно сформировать измерительную линейку $y=x$ (4).

Переходные характеристики исследуют в режиме периодического интегрирования - нажата клавиша 2 переключателя режимов в ГСС. При этом в течение положительной полуволны прямоугольных импульсов происходит интегрирование, а во время второго полупериода - ввод начальных условий. Если гнездо для ввода начального условия в блоке $1/p$ свободно, то вводится $y_0=0$. Пунктиром на графиках рис. 3.180, показаны участки осциллограмм для второго полупериода - отрицательный полупериод прямоугольников 3 и процесс установки начального условия 1. Их гасят установкой переключки между левым $\perp$ и центральным Z гнездами блока "индикатор" в служебном модуле.

Интегратор преобразует входной сигнал $x(t)$ в выходной $y(t)$ в соответствии с соотношением:

$$y(t) = y_0 + \int_0^t x(\tau) d\tau \quad (3.0)$$

Если $x(t)=ku_m 1[t]$, то:

$$y(t) = y_0 + \int_0^t ku_m d\tau = y_0 + ku_m t \quad (3.1)$$

и на экране появится наклонный отрезок. При $y_0=0$ он начинается из начала координат ($t=0, y=0$). Наклон зависит от амплитуды входной ступеньки u_m , коэффициента k и скорости развертки по горизонтали. В конце такта интегрирования при $t=t_k=T/2$, где T - период колебаний ГСС, $y(t_k)=ku_m(T/2)$. Рис. 3.18,а иллюстрирует деформации графика при $u_m=const$, вариациях k и T . Скорость интегрирования имеет смысл выбрать максимальной, установив в блоке $1/p$ масштаб $k_n=100$. Тогда для "ступеньки" на входе $x_m=10B$ (1 отн.ед.) в конце такта интегрирования $y(t_k)=10B$ (1 отн.ед.) при $t_k=1/100c$, что соответствует частоте ГСС $f=1/T=50$ Гц, поскольку $T=2t_k$. При такой частоте изображение на экране не мелькает, и, варьируя коэффициент k , удобно наблюдать, как зависит от k (левый блок на рис. 3.17) наклон переходной характеристики $h(t)$ интегратора (рис. 3.18,а). Совместив правый конец отрезка $y(t_k)$ с концом графика $+u_m$ и варьируя величину u_m , удобно наблюдать деформацию график $y(t)$ в зависимости от u_m (рис. 3.18,б). Выставив максимальные значения k и u_m , следует познать

миться с возможностями коэффициентов a и c (рис. 3.18,в). Горизонтальные участки графиков $y_a(t)=ay(t)$ и $y_c(t)=cy(t)$ соответствуют насыщению ОУ интегратора, о чем можно судить также по свечению светодиодов. Перемычка между выходным гнездом задатчика начального условия и верхним гнездом в блоке $1/p$ позволит варьировать начальное условие $y_0=y(0)$ (рис. 3.18,г). Сформировав в четвертом такте график $y=x$, можно использовать его для измерения коэффициента k . При помощи начального условия начало осциллограммы $y(t)$ совмещают с левым концом отрезка $y=x$, а затем совмещают оба эти отрезка, варьируя частоту ГСС. Если амплитуды треугольников и входной ступеньки составляют 10В, то $k=10/t_k$, где $t_k=T/2$ - показания измерителя длительности, мс.

Освоившись с интегрированием ступеньки, интересно проинтегрировать синусоиду, косинусоиду и треугольники, проверяя в каждом случае экспериментальный график аналитическим расчетом. Вернувшись к ступеньке на входе, полезно изучить, как деформируют переходную характеристику интегратора с ОС вариации коэффициента a и убедиться аналитически, что вращение этой ручки перемещает корень характеристического уравнения $\lambda \neq a=0$ или полюс передаточной функции $W(p)=1/(p+a)$ по отрезку $(-1;+1)$ действительной оси комплексной плоскости $(\sigma; j\omega)$.

Механическим аналогом может быть одномерное движение материальной точки массы $m=1/k$ под действием сил тяги $f(t)=u(t)$ и трения $f_{TP}(t)=av(t)$, причем трение может быть как "обычным" - $(-1 \leq a \leq 0)$, так и "отрицательным" $(0 \leq a \leq 1)$.

Далее к выходу первого интегратора надо подключить второй и подготовиться к одновременному наблюдению осциллограмм их выходных сигналов (рис.3.19). В первом такте на экране индикатора представлена сила $u(t)$, действующая на точку массы m и создающая ускорение $\omega(t) = ku(t) = \frac{1}{m}u(t)$.

Во втором - положение точки $y(t) = y_0 + \int_0^t \dot{y}(\tau) d\tau$, в четвертом - ее скорость $v(t) = \dot{y}(t) = \dot{y}_0 + \int_0^t \omega(\tau) d\tau$. Третий такт использован для формирования оси $x=t$ или горизонтальной измерительной линейки $y=E_y$. Осциллограммы соответствуют равноускоренному движению точки ($a=0$ и $b=0$) при отрицательной начальной скорости $v(0) = \dot{y}(0) < 0$ и начальному положению $s(0)=y(0)=0$. Варьируя a при $b=0$ и наблюдая деформации осциллограмм, полезно сопоставлять их с понятными особенностями движения при наличии трения.

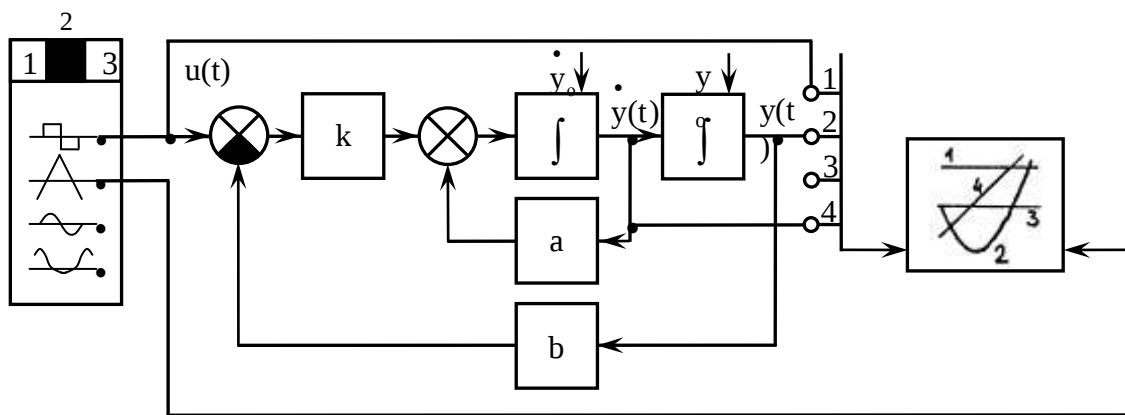


Рис. 3.19. Структурная схема исследования системы второго порядка

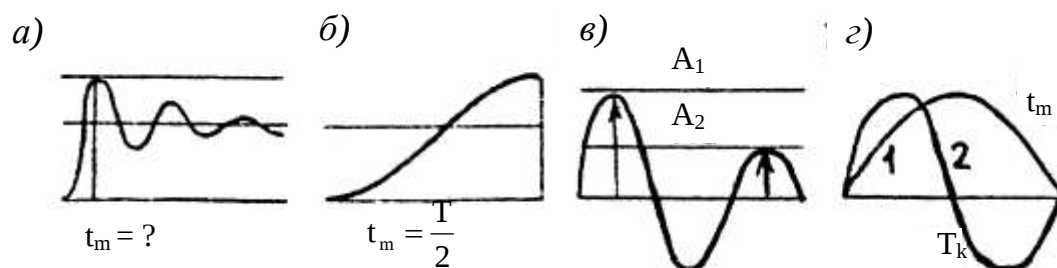


Рис. 3.20. Исследование временных характеристик системы второго порядка:

а - измерение амплитуды первого выброса; б - измерение времени, в - измерение затухания; г - "растяжка" осциллограммы

Если два интегратора охватить общей ОС ($b \neq 0$), то получится модель маятника. При отрицательной ОС модель представляет обычный маятник, при положительной - перевернутый. Эти наглядные аналоги удобно использовать для интерпретации осциллограмм, наблюдаемых на экране индикатора.

Для измерения амплитуды колебаний используют горизонтальную линейку, рис. 3.20,а. Чтобы измерить поточнее время максимума t_m , осциллограмму полезно "растянуть" изменением частоты ГСС, как показано на рис. 3.20,б. Более точно можно измерить затухание и период колебаний, пользуясь осциллограммой скорости, рис.3.20,в. Выбором частоты ГСС эту осциллограмму можно растягивать, как показано на рис. 3.20,г. Для осциллограммы 1 измеритель длительности покажет время t_m , для осциллограммы 2 - период колебаний T_k . Точность измерений позволяет обнаружить отличие соб-

ственной частоты колебаний в переходном процессе $\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ от частоты $\omega_M = \omega_0 \sqrt{1 - 2\xi^2}$ максимума амплитудно-частотной характеристики, где $\xi = \beta / \omega_0$, и $\beta = \frac{1}{T_k} \ln \frac{A_1}{A_2} = \frac{a}{2}$.

Режим 2 периодического интегрирования с заданием начальных условий обеспечивает тождественность модельного математического эксперимента аналитическому расчету. Вместо прямоугольных импульсов можно использовать в качестве входного сигнала постоянное напряжение или любые другие сигналы, сформировав их средствами АВК-6.

В режиме непрерывного интегрирования (нажата кнопка 1 ГСС) на экране индикатора видна реакция модели на последовательность прямоугольных импульсов. При движении луча индикатора слева направо разворачивается реакция на положительный перепад входного сигнала, при движении луча справа налево - на отрицательный. Пример изображения на экране индикатора показан на рис. 3.21,а. Если представляет интерес лишь одна из половин осциллограммы, то вторую часть можно погасить, установив переключку между Z - входом индикатора и одним из гнезд $\sqcap$ или $\sqsupset$, рис. 3.21,б и в.

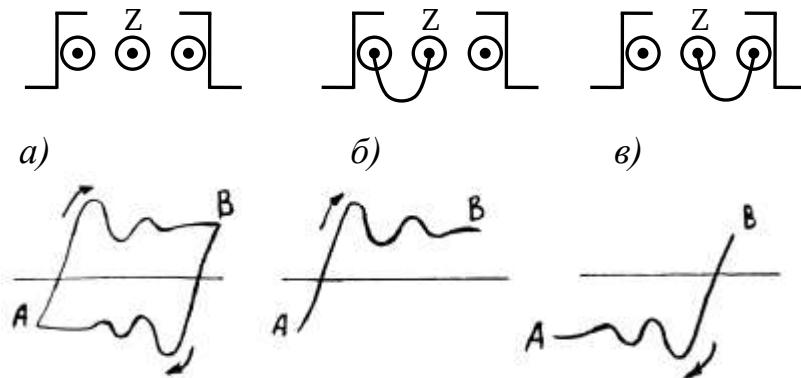


Рис. 3.21. Отображение управления яркостью луча:
а - гашение отсутствует; б - погашен обратный ход луча; в - погашен прямой ход луча

Режим 1 моделирует ситуацию, возникающую при исследовании средствами ИИС АВК-6 реальных объектов и систем. Они "сами" "описывают себя" дифференциальными уравнениями и "сами" их "решают" в режиме "непрерывного интегрирования". Поэтому, используя АВК-6 для уподобления реальному объекту его теоретиче-

ской модели, последнюю необходимо ставить в те же условия, которые свойственны самому объекту.

Графики переходных и импульсных переходных функций называются временными характеристиками.

В общем случае переходная характеристика отображается переходной функцией звена и представляет собой реакцию звена на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях. Обозначают ее - $h(t)$.

Импульсная переходная функция описывает реакцию звена на единичное импульсное воздействие при нулевых начальных условиях.

Импульсную переходную функцию еще называют весовой функцией. Обозначают ее - $w(t)$ или - $g(t)$.

Единичное импульсное воздействие или единичный импульс есть дельта-функция. Обозначают - $\delta(t)$.

Между переходной и весовой функциями существует однозначная связь:

$$w(t) = \frac{dh(t)}{dt} \quad (3.2)$$

$$h(t) = \int_0^t w(t)dt \quad (3.3)$$

Переходная и весовая функции, как и передаточная функция, являются исчерпывающими характеристиками звена или системы при нулевых начальных условиях. По ним можно однозначно определить выходную величину при произвольном входном воздействии с помощью теоремы о свертке.

$$y(t) = \int_0^t w(t - \tau)x(\tau)d\tau = \int_0^t w(\tau)x(t - \tau)d\tau \quad (3.4)$$

Переходная и весовая функции связаны с передаточной функцией звена $w(p)$ с помощью прямого преобразования Лапласа:

$$L[h(t)] = w(p) / p \quad (3.5)$$

$$L[w(t)] = w(p) \quad (3.6)$$

Для типовых динамических звеньев переходную и весовую функцию легко определить по таблице соответствий функций оригиналов и изображений (см. табл. №3.2).

Таблица соответствий функций оригиналов и изображений

Вид звена	Передаточная функция	Переходная функция	Весовая функция
Апериодическое	$W(p) = \frac{k}{Tp+1} = \frac{ka}{(p+a)}$ где $a=1/T$	$h(t) = k(1 - e^{-\alpha t})$	$w(t) = kae^{-\alpha t}$
Колебательное	$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}$	$h(t) = k[1 - \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\beta} \cdot e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi_0)]$ Где: $\alpha = \xi/T$ $\beta = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}$ $\varphi_0 = \arctg \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}$	$w(t) = \frac{k(\alpha^2 + \beta^2)}{\beta} \cdot e^{-\alpha t} \sin(\beta t)$
Интегрирующее	$W(p) = k/p$	$h(t) = kt$	$w(t) = k$
Идеальное дифференцирующее	$W(p) = kp$	$h(t) = k\delta(t)$	$w(t) = k\delta(t)$
Реальное дифференцирующее	$W(p) = \frac{T_1 p}{T_2 p + 1}$	$h(t) = \frac{T_1}{T_2} \exp(-\frac{t}{T_2})$	$w(t) = \frac{T_1^2}{T_2^2} \exp(-\frac{t}{T_2})$

Под элементарным динамическим звеном понимают такое звено, переходный процесс в котором описывается линейным дифференциальным уравнением не выше 2-го порядка.

Среди элементарных звеньев выделяют следующие: апериодическое, колебательное, дифференцирующее и интегрирующее.

Методика проведения эксперимента

Необходимое оборудование:

- АВК-6:
- два линейных блока
- внешний сумматор

Порядок выполнения работы:

С помощью одного интегрирующего (линейного) блока можно исследовать временные характеристики:

- самого интегрирующего звена
- апериодического звена
- реального дифференцирующего звена

Общая схема исследования представлена на рис.3.22.

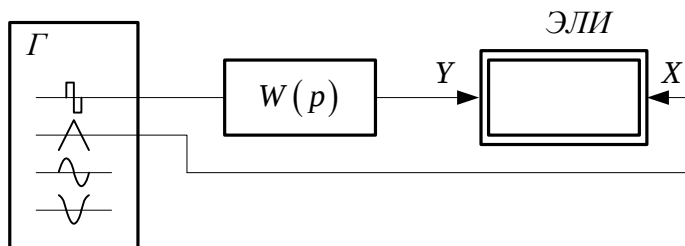


Рис.3.22. Структурная схема исследования типового звена

1. Исследование интегрирующего звена

Структурная схема интегрирующего звена представлена на рис.3.23.

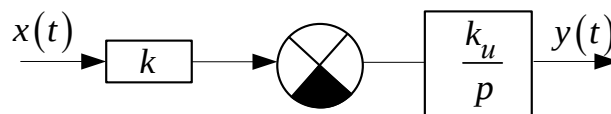


Рис. 3.23. Структурная схема интегрирующего звена

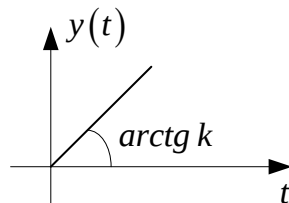


Рис.3. 24. Примерный вид временной характеристики

Для данного звена, исследовать влияние коэффициентов настройки k и $k_{и}$ на характер переходного процесса. В первоначальном положении все ручки регулировки коэффициентов выводятся в нулевое положение. Затем, плавно увеличивая коэффициенты, зафиксировать несколько временных характеристик. Зарисовать полученные характеристики для различных значений коэффициентов k и $k_{и} = 1/T$. Рассчитать углы наклона характеристик. Сделать вывод.

2. Исследование апериодического звена

Структурная схема апериодического звена представлена на рис.3.25.

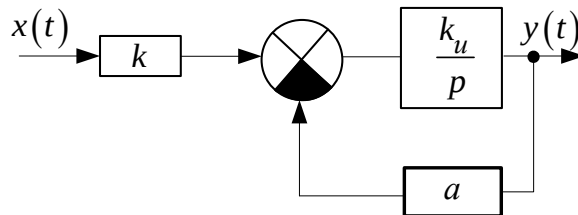


Рис.3.25. Структурная схема апериодического звена

Исследовать влияние коэффициентов k и $k_{и}$, и полярности обратной связи на вид переходного процесса. Определить, при каких условиях апериодическое звено будет работать как интегрирующее.

Рассчитать углы наклона полученных характеристик. Определить из графиков передаточный коэффициент k и постоянную времени T , рис. 3.26. Сделать вывод.

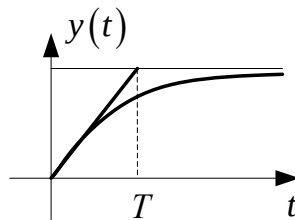


Рис.3.26. Примерный вид характеристики апериодического звена

3. Исследование реального дифференцирующего звена

Для моделирования реального дифференцирующего звена следует включить линейное звено в цепь обратной связи относительно внешнего сумматора. Структурная схема данного звена представлена на рис.3.27. В отчете необходимо теоретически доказать справедливость такого включения.

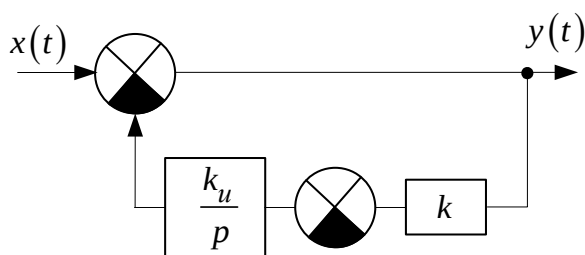


Рис. 3.27. Структурная схема реально-дифференцирующего звена

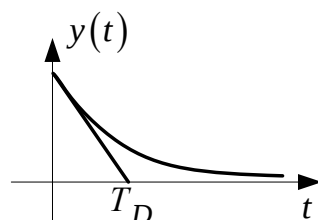


Рис.3.28. Примерный вид характеристики реально-дифференцирующего звена

Изменяя коэффициенты k и k_u , получить временные характеристики звена. Исследовать влияние коэффициентов k и k_u на вид переходного процесса. Для полученных характеристик данного звена определить значение постоянной времени дифференцирования по известным параметрам настройки и по кривой переходного процесса. К известным параметрам настройки относятся: частота задающего генератора (Γ) и значение коэффициента k .

4. Исследование колебательного звена.

Для моделирования колебательного звена необходимо использовать два апериодических звена, включенных последовательно с внешним сумматором, рис.3.29.

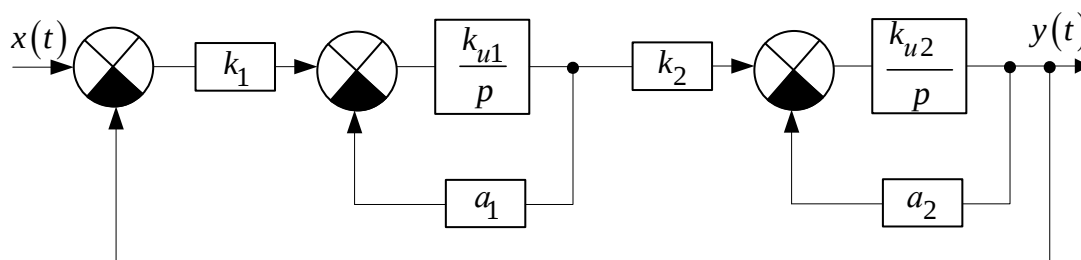


Рис. 3.29. Структурная схема колебательного звена

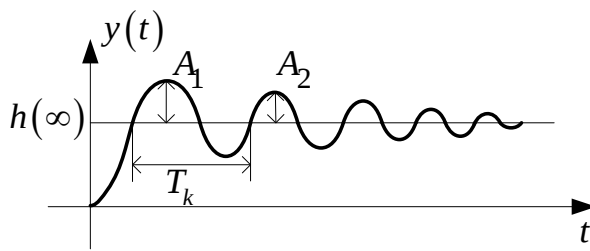


Рис. 3.30. Примерный вид характеристики переходного процесса колебательного звена

При исследовании колебательного звена необходимо предварительно определить путем теоретического расчета, какие значения должны принимать коэффициенты данной модели, чтобы переходный процесс имел затухающий колебательный характер.

По полученному графику переходного процесса определить параметры колебательного звена: передаточный коэффициент k , постоянную времени T и коэффициент демпфирования.

Для вычисления этих параметров можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\beta = \frac{2\pi}{T_k} \quad \alpha = \frac{1}{T} \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (3.7)$$

где T_k – период колебаний, A_1 и A_2 – амплитуды двух соседних колебаний относительно установившегося значения, рис. 3.30.

Уравнения, связывающие коэффициенты α и β с параметрами звена, представлены в табл. №.

Содержание отчета:

1. Краткая теоретическая часть.
2. Структурные модели исследуемых звеньев.
3. Графики кривых переходных процессов.
4. Оценки полученных результатов и их теоретическое обоснование.

3.3. Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ САУ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Краткие теоретические сведения и практические рекомендации

Простейшее понятие устойчивости системы связано со способностью ее возвращаться (с определенной точностью) в состояние равновесия после всякого выхода из него в результате какого-либо внешнего воздействия. Любую линейную систему можно представить математической моделью, по которой можно определить характеристическое уравнение. Условием устойчивости линейной системы является расположение всех корней характеристического уравнения в левой полуплоскости комплексной плоскости корней.

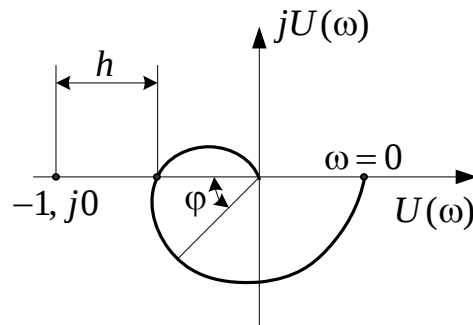


Рис.3.31. Комплексная плоскость корней характеристического уравнения

В тех случаях, когда непосредственное вычисление корней встречается трудности, используют косвенные признаки, которые называют критериями устойчивости. Например, с помощью критерия устойчивости Найквиста можно исследовать не только на устойчивость замкнутую систему, но и найти критический коэффициент усиления разомкнутой системы, при котором система будет находиться на границе устойчивости, и определить запас устойчивости по модулю и фазе. Критерий Найквиста относится к частотным критериям и основывается на анализе амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы.

Замкнутая система автоматического управления будет устойчива, если амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы $W(j\omega)$ не охватывает точку с координатами $(-1, j0)$.

Запас устойчивости по фазе определяют как величину угла φ .

$\varphi = \pi - |\psi(\omega_c)|$ для частоты ω_c , при которой $|W(\omega_c)| = 1$. Запас устойчивости по амплитуде – как величину отрезка оси абсцисс h , заключенного между критической точкой $(-1, j0)$ и амплитудно-фазовой характеристикой, рис.3.31.

С ростом коэффициента усиления разомкнутой системы модуль АФХ также растет и при некотором значении $K = K_{кр}$, называемом критическим коэффициентом усиления, АФХ пройдет через точку $(-1, j0)$, т.е. система будет находиться на границе устойчивости.

Методика проведения эксперимента

Необходимое оборудование:

- три сменных линейных блока,
- внешнее суммирующее устройство,
- источник эталонного напряжения с делителем.
- цифровой вольтметр.

Порядок выполнения работы:

Для выполнения данной лабораторной работы необходимо собрать схему, представленную на рис. 3.32. Электронный коммутатор **К** - используется для одновременного отображения на экране ЭЛИ осциллограмм нескольких сигналов: графика переходного процесса-1, входного прямоугольного сигнала-3 и измерительной линейки-4.

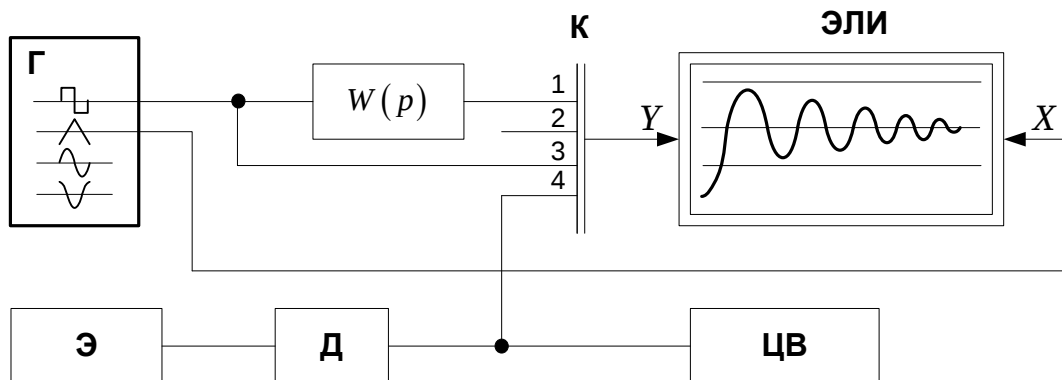


Рис. 3.32. Структурная схема исследования линейной системы на устойчивость

Исследование устойчивости проводится на примере замкнутой линейной системы 3-го порядка, рис.3.33

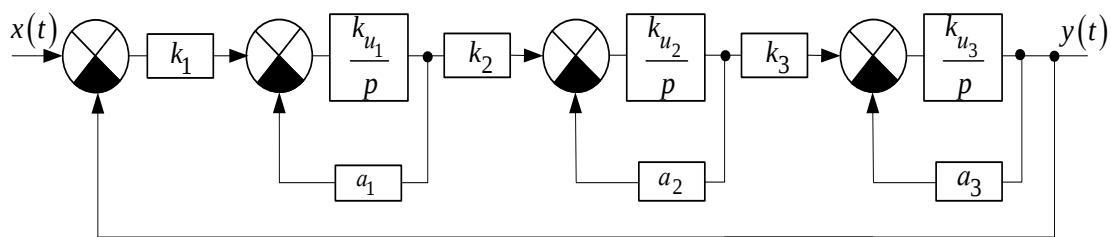


Рис. 3. 33. Структурная схема линейной системы третьего порядка

В ходе выполнения данной работы, АВК-6 должен работать в режиме периодического интегрирования, т. е. нажата клавиша 2 переключателя режимов.

Коэффициенты обратной связи a_1, a_2, a_3 у всех линейных звеньев должны находиться в положение «-1». Перемычки для коэффициентов усиления линейных блоков устанавливаются в положение «1» — для k_1 и k_2 , «10» — для k_3 . Постоянные времени интегрирования для всех блоков — 0.01 (перемычки в блоках $1/p$ устанавливаются в положение «1- 100»).

На устойчивость системы большое влияние оказывает коэффициент усиления разомкнутой системы:

$$K = k_1 k_2 k_3 \quad (3.8)$$

Приблизительно его можно оценить по положению ручек регуляторов блоков усиления k_i . Для точного определения значения коэффициента K , устанавливают амплитуду входного прямоугольного сигнала равной ---10 В. В этом случае коэффициент усиления разомкнутой системы будет определяться величиной установившегося значения выходного сигнала при разомкнутой главной обратной связи.

В первоначальном положении все ручки регулировки коэффициентов k_1, k_2, k_3 выводятся в нулевое положение. Затем, плавно увеличивая коэффициенты, зафиксировать момент, когда замкнутая система переходит из апериодического режима в затухающий колебательный режим. Разомкнув ГОС, определить коэффициент усиления разомкнутой системы K .

Последующие измерения этого коэффициента провести для моментов, когда замкнутая система переходит в режим гармонических колебаний, а потом и в неустойчивый режим (критический коэффициент усиления).

Если амплитуда входного сигнала равна 1 В, то амплитуда переходной характеристики достаточно мала, поэтому для удобства

наблюдения и измерений необходимо увеличить масштаб по оси Y , т. е. подать выходной сигнал с коммутатора на вход $Y-5$ или $Y-1$ ЭЛИ.

Когда система находится в устойчивом состоянии, большое практическое значение имеет вид переходной характеристики. По ее графику можно определить так называемые прямые оценки качества системы, рис. 3.34.

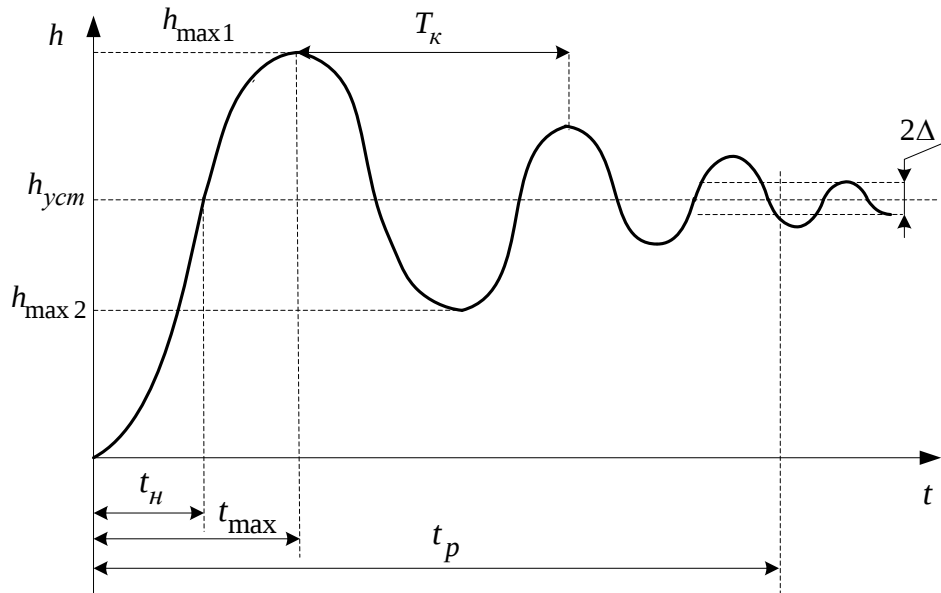


Рис.3.34. Вид переходной характеристики затухающего колебательного процесса.

К прямым оценкам качества относят:

1. Время регулирования t_p — время, по истечении которого выходная величина будет оставаться близкой к установившемуся значению с заданной точностью.

2. Перерегулирование $\sigma = \frac{h_{\max 1} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100$. (3.9)

3. Частота колебаний $\omega = 2\pi / T$, где T — период колебаний.

4. Время достижения первого максимума $t_{\max}$.

5. Время нарастания переходного процесса t_H — абсцисса первой точки пересечения кривой переходного процесса с уровнем установившегося значения $h_{\text{уст}}$.

6. Декремент затухания α , равный отношению модулей

$$\alpha = \frac{|h_{\max 1} - h_{\text{уст}}|}{|h_{\max 2} - h_{\text{уст}}|} \quad (3.10)$$

При проведении измерений удобно пользоваться электронной измерительной линейкой на экране ЭЛИ и цифровым вольтметром для измерения амплитуд. Также удобно пользоваться цифровым измерителем длительности для измерения временных интервалов.

Порядок выполнения работы заключается в нахождении границы устойчивости линейной системы при изменении коэффициента «К» в различных режимах.

1. Изменяя коэффициент «К», найти границу устойчивости исследуемой системы:
 - а) между апериодическим и колебательным переходным процессом;
 - б) между затухающим и незатухающим колебательным процессом;
 - в) определить критический коэффициент усиления.
2. По графику затухающего переходного процесса определить прямые оценки качества переходного процесса.
3. С помощью критерия Найквиста теоретическим путем определить запас устойчивости по модулю и фазе, критический коэффициент усиления для исследуемой модели и сравнить его со значением, полученным в результате эксперимента.

Содержание отчета:

1. Краткая теоретическая часть.
2. Схема структурной модели.
3. Полученные графики переходных процессов.
4. Теоретические расчеты и выводы по работе.

3.4. Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИПОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Краткие теоретические сведения и практические рекомендации

Одним из фундаментальных принципов управления является принцип обратной связи. На этом принципе базируется один из видов автоматического управления – управление по отклонению (или регулирование). В наиболее общем виде система автоматического регулирования состоит из регулятора и объекта управления, объединённых в замкнутую систему путем охвата их общей обратной связью (называемой также главной - ОС), рис. 3.35.

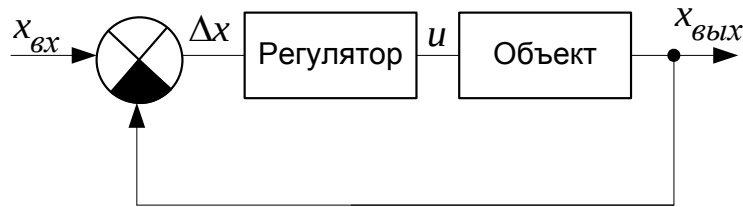


Рис. 3.35. Структурная схема системы автоматического регулирования

Наиболее распространенными законами регулирования являются следующие основные законы:

- пропорциональный;
- пропорционально-интегральный;
- пропорционально-интегрально-дифференциальный.

Соответственно этим законам выделяют следующие типы регуляторов: пропорциональный (П-регулятор), пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-регулятор).

Законы функционирования этих регуляторов можно отобразить в следующем виде:

П-регулятор:
$$u = k_{\delta} \cdot \Delta x \quad (3.11)$$

ПИ-регулятор:
$$u = k_{\delta} \Delta x + \frac{1}{T_{\int}} \int_0^t \Delta x dt \quad (3.12)$$

$$\text{ПИД-регулятор: } u = k_{\delta} \Delta x + \frac{1}{T_{\dot{e}}} \int_0^t \Delta x dt + T_{\ddot{a}} \frac{d\Delta x}{dt} \quad (3.13)$$

где: k_{δ} – коэффициент передачи регулятора,

$T_{\dot{e}}$ и $T_{\ddot{a}}$ – соответственно постоянные времени интегрирования и дифференцирования,

$\Delta x = x_{\hat{a}\hat{o}} - x_{\hat{a}\hat{u}} \hat{o}$ – отклонение выходной величины от задающего воздействия.

Методика проведения эксперимента

Необходимое оборудование:

- АВК-6
- три линейных блока,
- внешний сумматор.

В данной лабораторной работе проводится исследование системы автоматического регулирования с регуляторами двух типов – пропорциональным и пропорционально-интегральным, рис.3.36.

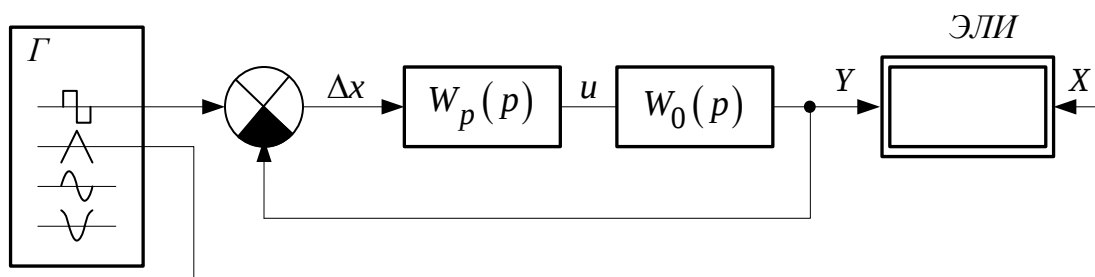


Рис.3.36. Структурная схема регулирования объекта

Пропорциональный регулятор (рис.3.37), описываемый выражением (3.11), может быть представлен обычным линейным блоком, в котором отключена интегрирующая часть (установлена перемычка между гнездами «1» в блоке $1/p$). Коэффициент передачи или передаточная функция пропорционального регулятора будет определяться коэффициентом усиления k линейного блока - $w_{\delta}(p) = k_p$.

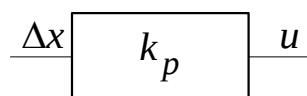


Рис. 3.37. Структурная схема пропорционального регулятора

Пропорционально-интегральный регулятор (рис.3.38) получается путем параллельного включения двух линейных блоков, один из которых работает в интегрирующем режиме (разомкнута обратная связь), а другой – в режиме усиления (как пропорциональный регулятор) -

$$w_{\delta}(p) = k_{\delta} + \frac{k_{\int}}{p}.$$

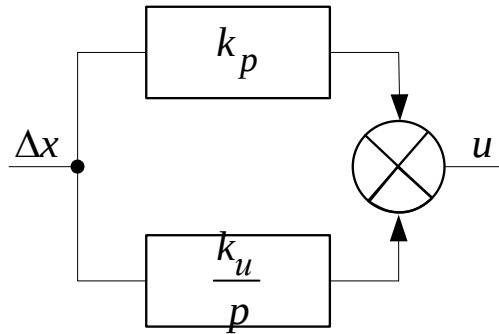


Рис.3.38. Структурная схема пропорционально-интегрального регулятора

В качестве объекта управления используется апериодическое звено 1-го порядка, где коэффициент обратной связи $a = -1$.

Перед началом исследования работы регуляторов необходимо смоделировать объект управления (см. лабораторную работу №2. рис.3.25) и получить для него устойчивую кривую переходного процесса. Зафиксировать параметры объекта (k_{δ} , $T_{\hat{f}}$) и в ходе дальнейших исследований не изменять ни настройку коэффициентов объекта, ни параметры входного прямоугольного сигнала.

После этого собирают схему по рис. 3.36, где на место регулятора поочередно подключают пропорциональный (рис. 3.37) и пропорционально-интегральный (рис. 3.38) регуляторы. Для каждого случая снимают осциллограммы переходных процессов и определяют время регулирования t_{δ} , т.е. время достижения установившегося значения,

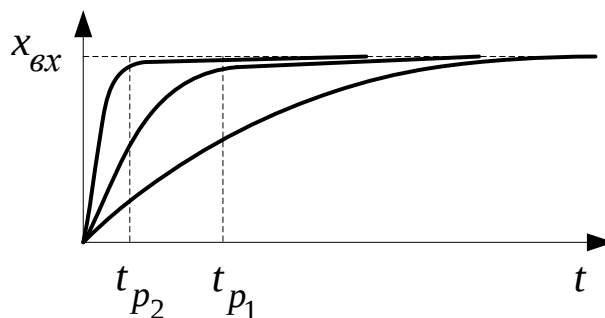


Рис. 3.39. Основные характеристики переходных процессов

Для каждого из исследуемых видов регуляторов необходимо подобрать такие параметры их настройки, при которых время регулирования будет минимально.

Параметры регулятора для заданного объекта можно определить теоретическим путем. Для этого задают желаемый вид передаточной функции замкнутой системы регулирования, например:

$$\Phi_{\text{æ}}(p) = \frac{1}{T_c \cdot p + 1} \quad (3.14)$$

где: T_c – постоянная времени для замкнутой системы.

T_c обычно выбирают много меньше постоянной времени объекта T_l .

С другой стороны, передаточная функция замкнутой системы по определению равна:

$$\Phi_{\text{çàì}}(p) = \frac{w_p(p)w_0(p)}{1 + w_p(p)w_0(p)} \quad (3.15)$$

Подставляя в (3.15) известные выражения для $w_p(p)$ и $w_0(p)$ и приравнявая полученное выражение к (3.14), можно определить параметры регулятора, необходимые для получения желательной передаточной функции.

Порядок выполнения работы:

1. Смоделировать заданный объект в виде апериодического звена, рис. 3.25 и получить характеристику его переходного процесса, как ответную реакцию на входной прямоугольный сигнал. Зафиксировать его параметры в виде коэффициента усиления k_0 и постоянной времени регулирования t_{δ} .

2. Смоделировать систему регулирования объектом с пропорциональным регулятором, рис. 3.37. Произвести исследование системы: при изменении коэффициента усиления пропорционального регулятора - k_p получить несколько характеристик переходного процесса, по одной из них определить минимальное время регулирования – t_p и зафиксировать его.

3. Смоделировать систему регулирования объектом с пропорционально-интегральным регулятором, рис. 3.38. Произвести исследование системы: при изменении коэффициента усиления пропорционального регулятора - k_p и постоянной интегрирования - k/p равной

1:100 (замкнуть перемычку), получить несколько характеристик переходного процесса, по одной из них определить минимальное время регулирования – $t_{ри}$ и зафиксировать его. Далее, также при изменении коэффициента усиления пропорционального регулятора и изменении постоянной интегрирования - k/p равной 1:10 получить несколько характеристик переходного процесса, по одной из них определить минимальное время регулирования – $t_{ри}$.

4. Проанализировать результаты измерений и сделать вывод, какой из регуляторов обладает минимальным временем регулирования по отношению к объекту и почему. Какой из регуляторов обладает более точным регулированием.

5. Для заданного объекта теоретически определить параметры настройки ПИ-регулятора.

Содержание отчета:

1. Показать краткую теоретическую часть.
2. Привести структурные схемы исследования.
3. Показать полученные осциллограммы, результаты измерений.
4. Произвести необходимые теоретические расчеты.

3.5. Лабораторная работа № 5

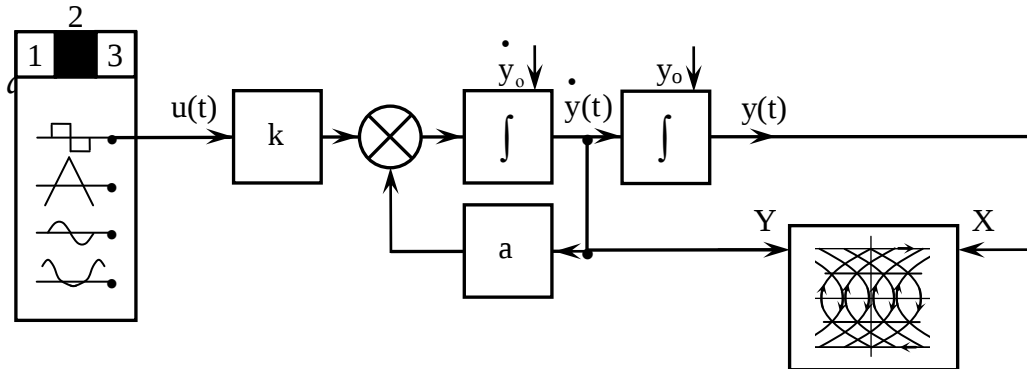
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ

Краткие теоретические сведения и практические рекомендации

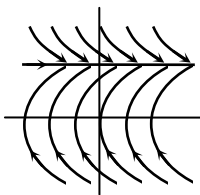
Чтобы получить на экране индикатора фазовую траекторию, выходной сигнал объекта или модели необходимо подать на вход X индикатора, а его производную - на вход Y (схема 6 таблицы-справки на рис. 2.0). На рис. 3.40,а показана схема для изучения метода фазовой плоскости применительно к анализу движения материальной точки. Выходная переменная $y(t)$ - положение точки; $y'(t) = v(t)$ - ее скорость. Чтобы иметь возможность задавать произвольные начальные условия $y'(0) = y'_0$ и $y(0) = y_0$ используют режим периодического интегрирования - нажата кнопка 2 ГСС. При отсутствии трения $a=0$. Коэффициент $k=1/m$ представляет закон Ньютона, описывающий преобразование силы $u(t)$ в ускорение точки $y'(t) = \frac{1}{m}u(t)$.

Изучение фазовых траекторий удобно начать с полезных практических случаев, когда сила может принимать только значения $u(t) = +u_m$; $u(t) = -u_m$ и $u(t) = 0$.

а)



б)



в)

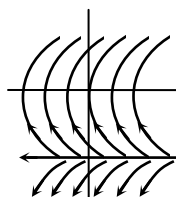


Рис. 3.40. Структурная схема исследования фазовых траекторий:
схема исследования - (а), примеры фазовых траекторий
для $a < 0$ - (б) и $a > 0$ - (в)

Значение $+u_m$ можно задавать прямоугольными импульсами ГСС, как показано на рис. 3.40. Удобно также просто поочередно по-
давать на вход модели соответствующие сигналы от эталонов.

Для $u(t) = +u_m$ ускорение $y''(t) = ku_m$, скорость:

$$y'(t) = y'_0 + \int_0^t y''(\tau) d\tau = y'_0 + ku_m t, \quad (3.16)$$

Перемещение (положение):

$$y(t) = y_0 + \int_0^t y'(\tau) d\tau = y_0 + y'_0 t + ku_m \frac{t^2}{2}. \quad (3.17)$$

Соотношения для $y'(t)$ и $y(t)$ задают на плоскости $(y; y')$ кривую $y' = f(y)$ параметрически, через параметр t . Для этого случая легко исключить параметр t и получить аналитическое выражение для фазовой траектории. Это полезно делать, рассматривая осциллограммы фазовых координат $y'(t)$ и $y(t)$ при помощи схемы на рис. 3.41 и "сворачивая" их в фазовые траектории при помощи схемы на рис. 3.40,а. Для получения устойчивых изображений используют ускоренный временной масштаб ($k_n = 100$), чтобы при этом наблюдать, как разворачивается фазовая траектория во времени, варьируя частоту периодизации, задаваемую ГСС. На графиках в обозначении индикатора на рис. 3.40,а, направления движения изображающей точки по фазовой траектории показаны стрелками.

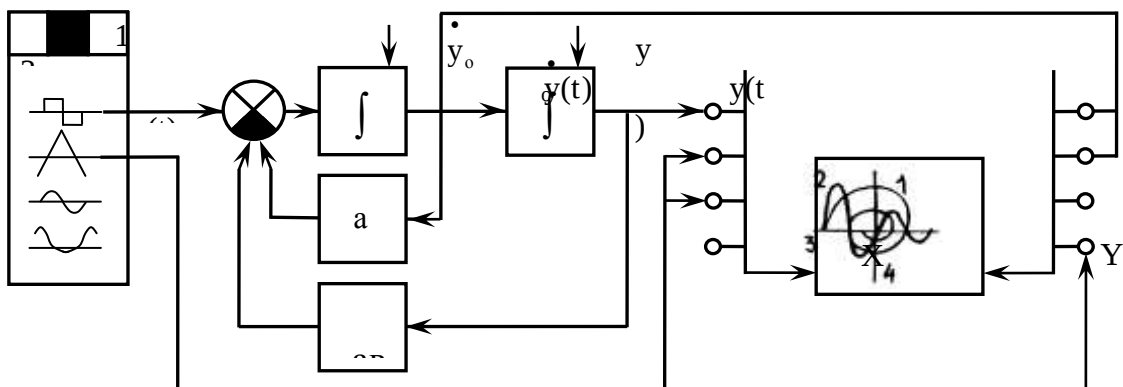


Рис. 3.41. Структурная схема использования коммутатора для совмещения изображений фазовых и временных траекторий

Варьируя коэффициент a , интересно наблюдать, как изменяются фазовые траектории в зависимости от характера трения ("нормального" или "отрицательного") и от величины коэффициента трения. Траектории для $u(t)=+u_m$ при $a<0$ показаны на рис. 3.40,б, при $a>0$ - на рис. 3.40,в.

В схеме на рис. 3.41, коммутатор использован для совмещения изображений фазовой траектории 1 с осциллограммой одной из фазовых координат 2 и осями координат 3 и 4, которые при подаче напряжений E_x и E_y на соответствующие входы можно использовать в качестве вертикальной и горизонтальной измерительных линеек. Объектом исследования является модель системы второго порядка в общем случае. Варьируя коэффициенты a и b и начальные условия, можно полюбоваться фазовыми траекториями для всех типов особых точек для свободного ($u(t)=0$) и вынужденного движения. Особенно интересно наблюдать переходы фазовых траекторий одного типа в другой при плавном изменении знака коэффициентов a и b .

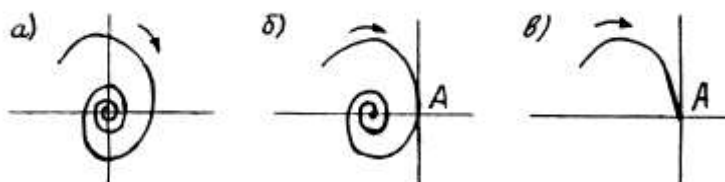
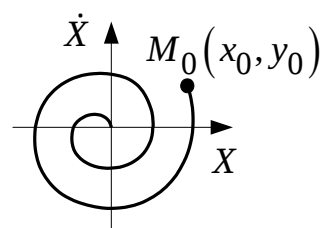


Рис. 3.42. Исследование особой точки типа "устойчивый фокус":
а - фазовая траектория; б - измерение координат точки А;
в - измерение времени

На рис. 3.42,а показан вид фазовой траектории для особой точки типа "устойчивый фокус". Рисунок 3.42,б иллюстрирует измерения координат точки $A(x_A, y_A)$ этой фазовой траектории. Чтобы измерить еще и время t_A от начала движения до точки A , нужно, не меняя настроек E_x и E_y , уменьшать время решения (увеличивать частоту ГСС) до тех пор, пока фазовая траектория не будет оканчиваться точно в точке A (рис. 3.42,в). В этом случае измеритель длительности покажет время t_A .

Метод фазовых траекторий обладает наглядностью и широко используется для исследования систем 2-ого порядка.

При построении фазовой траектории по оси абсцисс откладывается отклонение регулируемой величины, а по оси ординат – скорость этого отклонения. Данный метод предполагает переход от обычного дифференциального



уравнения к уравнению в фазовых координатах. Пусть динамический процесс описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = f\left[x, \frac{dx}{dt}\right] \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = f(x, y) \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f(x, y)}{y} \quad (3.20)$$

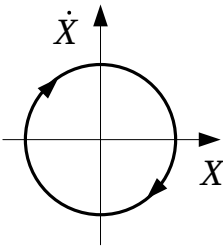
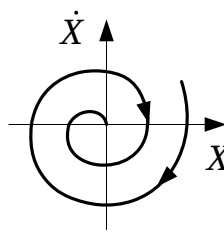
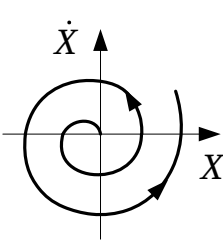
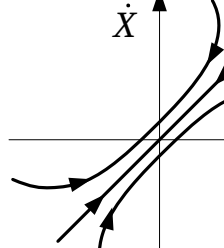
Разделив уравнение (3.20) на (3.19), получим:

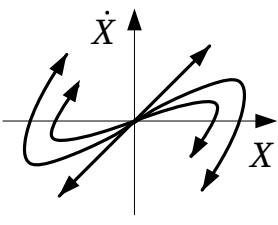
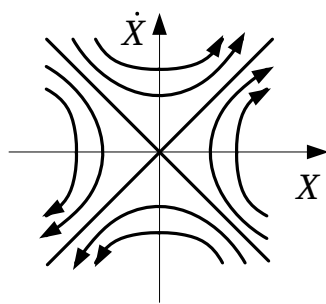
$$\frac{dy}{dx} = \frac{f(x, y)}{y} \quad (3.21)$$

Это – дифференциальное уравнение в фазовых координатах.

Если линеаризовать уравнение (3.18) в особой точке, то можно получить шесть типов особых точек, таб. № 3.3 :

Таблица № 3.3

	
1. Точка типа «центр» $S_{1,2} = \pm j\omega$	2. Устойчивый фокус $S_{1,2} = -\alpha \pm j\omega$
	

3. Неустойчивый фокус $S_{1,2} = \alpha \pm j\omega$	4. Устойчивый узел $S_1 = -\alpha_1 \quad S_2 = -\alpha_2$
	
5. Неустойчивый узел $S_1 = \alpha_1 \quad S_2 = \alpha_2$	6. Седло $S_1 = -\alpha_1 \quad S_2 = \alpha_2$

Методика проведения эксперимента

Необходимое оборудование:

- два линейных блока;
- внешнее суммирующее устройство;
- электронный коммутатор.

Порядок выполнения работы:

Чтобы получить на экране индикатора фазовую траекторию, выходной сигнал объекта или его модели необходимо подать на вход X индикатора, а его производную – на вход Y, рис. 3.43:

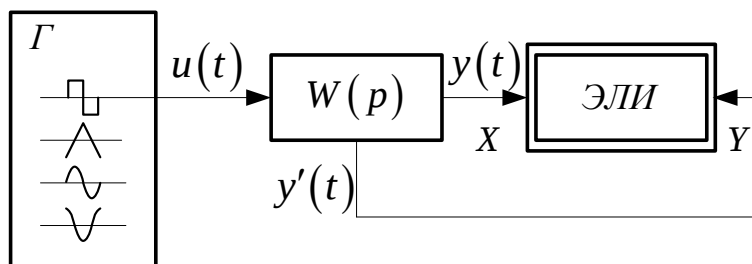


Рис. 3.43 Структурная схема для отображения фазовой траектории объекта или его модели

Объектом исследования в данной работе является система второго порядка, состоящая из двух линейных блоков. Для совместного наблюдения фазовой траектории графика переходного процесса и осей координат используется электронный коммутатор сигналов АВК-6. При коммутации сигналов по схеме, представленной на рис.3,44 в такте 1 разворачивается фазовая траектория. В такте 2 разворачивается осциллограмма одной из фазовых координат (либо $y(t)$, что соответствует графику переходного процесса, либо производной $y'(t)$ – в этом случае имеем график изменения производной во времени), в тактах 3 и 4 разворачиваются соответственно горизонтальная и вертикальная оси координат.

1. Собрать структурную модель по схеме на рис. 3.44.

Варьируя коэффициенты настройки необходимо добиться, чтобы исследуемая модель работала в затухающем колебательном режиме. Для этого режима снять осциллограммы фазовой траектории, переходного процесса и изменения производной во времени. С помощью источников эталонного напряжения и электронного коммутатора определить величину установившегося значения выходной величины (по осциллограмме переходного процесса) и координаты особой точки типа «устойчивый фокус» (по осциллограмме фазовой траектории).

2. Затем необходимо вывести модель поочередно в апериодический и в автоколебательный режим (это можно сделать, изменяя коэффициенты усиления линейных блоков и коэффициенты обратной связи a и b). Для каждого из этих режимов снять все вышеперечисленные осциллограммы и измерить их основные параметры (величину установившегося значения $y(t)$, амплитуду колебаний, координаты особых точек фазовых траекторий).

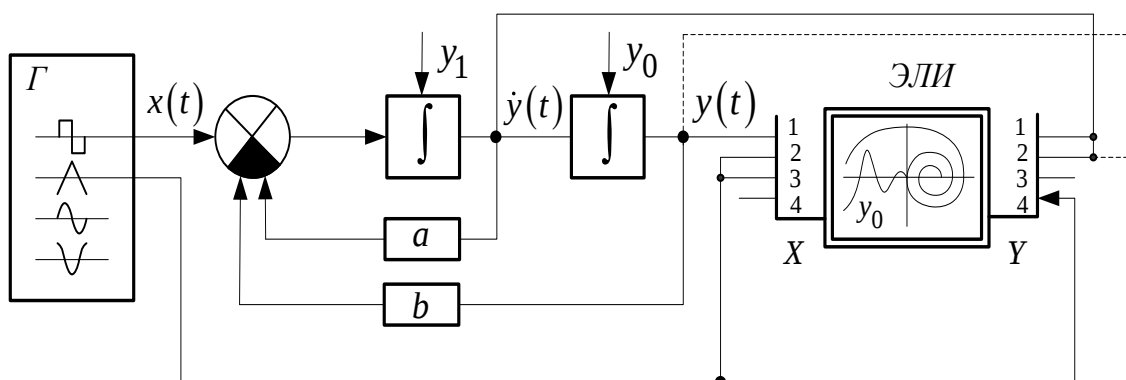


Рис.3.44. Структурная модель системы второго порядка

Содержание отчета:

1. Краткая теоретическая часть.
2. Схема структурной модели системы.
3. Полученные графики и результаты измерений.
4. Теоретическое обоснование полученных результатов.

3.6. Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНОЙ САУ МЕТОДОМ D-РАЗБИЕНИЯ

Краткие теоретические сведения и практические рекомендации

При исследовании устойчивости систем управления большое практическое значение имеет построение областей устойчивости в плоскости одного или каких-либо двух параметров, влияние которых на устойчивость необходимо исследовать. Уравнения границ областей устойчивости можно находить, пользуясь любым критерием устойчивости. Однако использование известных критериев связано с большими вычислениями. Поэтому на практике чаще всего применяют наиболее общий метод построения областей устойчивости, называемый методом D-разбиения.

а) D-разбиение по одному параметру.

Рассмотрим характеристическое уравнение замкнутой системы n -го порядка:

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (3.22)$$

Предположим, что нас интересует влияние какого-либо параметра, обозначим его через δ , на устойчивость системы. Тогда характеристическое уравнение (3.22) можно привести к виду:

$$D(p, \delta) = M(p) + \delta \cdot N(p) = 0 \quad (3.23)$$

где $M(p)$ – полином, не зависящий от δ ,

$N(p)$ – полином, содержащий δ - множитель.

Граница D-разбиения определяется из уравнения:

$$D(jw, \delta) = M(jw) + \delta \cdot N(jw) = 0, \quad (3.24)$$

$$\text{откуда} \quad \delta = -\frac{M(jw)}{N(jw)} = X(w) + jY(w) \quad (3.25)$$

Задавая значения w от $-\infty$ до $+\infty$, можно вычислить $Y(w)$ и $X(w)$ и построить на комплексной плоскости границу D-разбиения.

При движении по границе D-разбиения в направлении, соответствующем изменению w от $-\infty$ к $+\infty$, эта граница штрихуется слева по

обходу. Область с наибольшей штриховкой будет возможной областью устойчивости, рис.3.45.

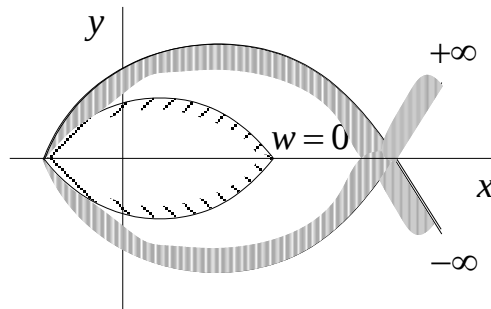


Рис. 3.45. Граница D - разбиения

б) D-разбиение по двум параметрам.

Характеристическое уравнение (3.22) для исследования влияния на устойчивость двух параметров δ и μ принимает вид:

$$D(p, \delta, \mu) = \delta \cdot N(p) + \mu \cdot M(p) + L(p) = 0 \quad (3.26)$$

Подставляя в (3.26) $p = jw$, получают выражение для границы D-разбиения:

$$D(jw, \delta, \mu) = \delta \cdot N(jw) + \mu \cdot M(jw) + L(jw) = 0 \quad (3.27)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} N(jw) &= N_1(w) + jN_2(w) \\ M(jw) &= M_1(w) + jM_2(w) \\ L(jw) &= L_1(w) + jL_2(w) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Подставляя (3.28) в (3.27) и приравняв отдельно вещественную и мнимую части нулю, получим:

$$\delta \cdot N_1(w) + \mu M_1(w) + L_1(w) = 0 \quad (3.29)$$

$$\delta \cdot N_2(w) + \mu M_2(w) + L_2(w) = 0 \quad (3.30)$$

Решение системы уравнений (3.29) и (3.30) относительно δ и μ :

$$\delta = \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad \text{и} \quad \mu = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad (3.31)$$

где:

$$\Delta = \begin{vmatrix} N_1(w) & M_1(w) \\ N_2(w) & M_2(w) \end{vmatrix}; \Delta_1 = \begin{vmatrix} -L_1(w) & M_1(w) \\ -L_2(w) & M_2(w) \end{vmatrix}; \Delta_2 = \begin{vmatrix} N_1(w) & -L_1(w) \\ N_2(w) & -L_2(w) \end{vmatrix}$$

Подставляя в выражения (3.31) значения w от $-\infty$ до $+\infty$, получаем значения δ и μ и строим границу D-разбиения в плоскости этих параметров.

Возможен случай, когда при некотором значении $w = w_k$ все определители $\Delta, \Delta_1, \Delta_2$ равны нулю одновременно. Тогда для фиксированного значения w_k в плоскости параметров δ и μ получается так называемая особая прямая, уравнение которой имеет вид:

$$\delta \cdot N_1(w_k) + \mu M_1(w_k) + L_1(w_k) = 0 \quad (3.32)$$

В большинстве практических задач особые прямые получаются при значениях $w = 0$ и $w = \infty$. Особая прямая при $w = 0$ получается приравниванием нулю коэффициента a_n в уравнении (3.22), а особая прямая при $w = \infty$ получается приравниванием нулю коэффициента a_0 . Если a_0 и a_n не зависят от δ и μ , то эти особые прямые отсутствуют.

Правило штрихования:

При изменении w от $-\infty$ до $+\infty$ граница D-разбиения штрихуется слева, если $\Delta > 0$ и, справа, если $\Delta < 0$. Поскольку δ и μ являются четными функциями от w , то граница D-разбиения при положительных и отрицательных значениях частоты совпадает. При изменении w от $-\infty$ до $+\infty$, мы обходим полученную кривую два раза и, поэтому, она штрихуется всегда двойной штриховкой.

Штриховка особых прямых производится так, чтобы вблизи точки сопряжения особой прямой и кривой D-разбиения заштрихованные и не заштрихованные стороны прямой и кривой были направлены друг к другу (рис. 3.46.а).

В тех сравнительно редких случаях, когда особая прямая имеет место при некотором конечном значении частоты $w = w_k \neq 0$ и при этом Δ , проходя через ноль, меняет знак, особая прямая штрихуется двойной штриховкой (рис. 3.46.б).

Если же особая прямая имеет место при $w = w_k \neq 0$ и при этом Δ , проходя через ноль, не меняет знака, то особая прямая не штрихуется и исключается из рассмотрения (рис. 3.46.в).

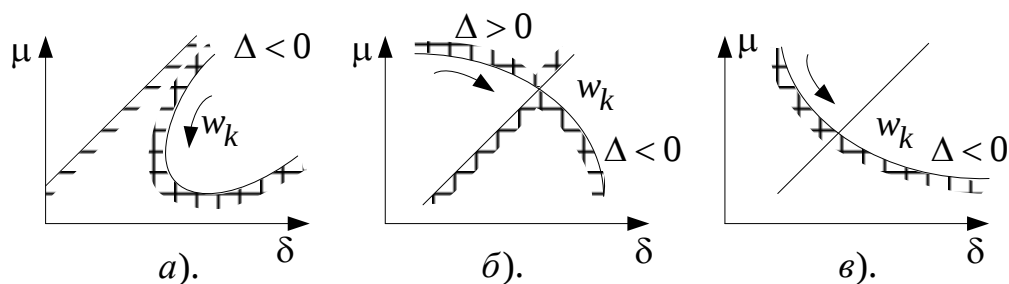


Рис. 3.46. Примеры штриховки особой прямой

После нанесения штриховки определяют область, претендующую на область устойчивости, т.е. область, внутрь которой направлена штриховка. Для того, чтобы убедиться действительно ли будет устойчивой система в этой области, необходимо подставить в характеристическое уравнение любые значения параметров δ и μ , лежащие в исследуемой области, и с помощью любого из известных критериев проверить систему на устойчивость. Если система окажется неустойчивой, то в плоскости выбранных параметров области устойчивости нет.

Методика проведения эксперимента

Необходимое оборудование:

- три линейных блока;
- внешнее суммирующее устройство;
- электронно-лучевой осциллограф;
- задающий блок генераторов

Порядок выполнения работы

Для САУ, структурная схема которой изображена на рис.3.47, **построить** методом D-разбиения область устойчивости в плоскости двух параметров k_1 и N_1 .

Предварительно вычислить характеристическое уравнение системы, которое приводится к виду (3.27). Составить систему уравнений (3.29 и 3.30). Решить данную систему программным способом и построить кривую D-разбиения с особыми прямыми, нанести штриховку по вышеизложенным правилам.

Теоретически проверить, является ли полученная область областью устойчивости.

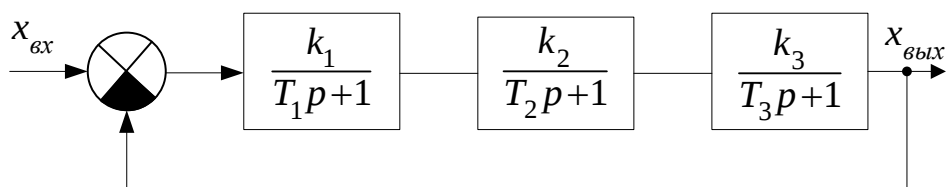


Рис.3.47. Структурная схема САУ

Варианты заданий различных параметров САУ приведены в таблице №3.4

Таблица №3.4

Варианты заданий для САУ

Вариант	K2	K3	T2	T3
1	2	3	0,2	0,5
2	3	2	0,1	0,4
3	4	2	0,3	0,6
4	3	3	0,4	0,2
5	5	2	0,5	0,1
6	6	3	0,1	0,2
7	5	6	0,3	0,2
8	4	5	0,4	0,3

Содержание отчета:

1. Вариант задания и структурная схема САУ.
2. Необходимые предварительные расчеты.
3. Блок-схема алгоритма и текст программы.
4. Полученный график в плоскости параметров k_1 и T_1 .
5. Проверка результатов и выводы.

3.7. Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО АЛГЕБРАИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

Краткие теоретические сведения и практические рекомендации

Одним из основных требований, предъявляемых к качеству функционирования системы автоматического управления, является требование устойчивости. Система автоматического управления считается устойчивой, если она, будучи выведена из состояния установившегося движения некоторой причиной (внешним воздействием или изменением начального состояния), возвращается в исходное состояние после прекращения действия этой причины.

Вынести суждение об устойчивости САУ позволяет анализ расположения корней характеристического уравнения, минуя вычисление самих корней, на основе так называемых критериев устойчивости.

В настоящее время в теории автоматического управления критерии устойчивости делятся на две большие группы: алгебраические и частотные. Алгебраические критерии основаны на анализе непосредственно характеристического уравнения системы. Такими критериями являются, например, широко известные критерии Рауса и Гурвица. Частотные критерии позволяют определить устойчивость САУ с помощью аналитического или экспериментального исследования частотных характеристик элементов этой системы. Популярными в технических приложениях критериями этой группы являются критерии Михайлова и Найквиста.

Все критерии устойчивости в той или иной мере базируются на априорном знании характеристического уравнения системы:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0, \quad (3.33)$$

Данное уравнение, при изложении всех последующих алгоритмов, считается заданным.

1. Оценка устойчивости по критерию Гурвица

Алгоритм Гурвица основан на построении из коэффициентов характеристического уравнения специальной матрицы – матрицы Гурвица:

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_n \end{vmatrix} \quad (3.34)$$

Матрица Гурвица составляется по следующему принципу: в **первую** строку матрицы записываются коэффициенты характеристического уравнения с нечетными индексами, во **вторую** – с четными; **последующие пары** строк получают из первых двух, смещая их элементы на 1, 2, 3,... столбца. Образующиеся свободные места слева, а также те элементы, которые находятся в строке справа от a_{n-1} , a_n , заполняются нулями. Таким образом, матрица Гурвица имеет n строк и n столбцов.

По главной диагонали располагаются коэффициенты характеристического уравнения, начиная с a_1 до a_n . Диагональные миноры Δ_k ($k=n-1, \dots, 1$) получаются из определителя матрицы Гурвица путем вычеркивания справа и снизу последовательно по одной строке и одному столбцу, по две строки и два столбца и т. д.

В соответствии с критерием Гурвица система будет устойчивой, если при $a_0 > 0$ определитель матрицы Гурвица и определители всех ее диагональных миноров положительные:

$$\Delta_1 = a_1 > 0, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0, \dots, \quad \Delta_n = a_n \Delta_{n-1} > 0 \quad (3.35)$$

Таким образом, алгоритм Гурвица состоит из следующих основных этапов:

1. Составление определителя Гурвица.
2. Вычисление определителей $\Delta_1, \dots, \Delta_n$.
3. Анализ условия положительности коэффициентов a_0 и определителей.

2. Оценка устойчивости по критерию Рауса

На практике при анализе устойчивости систем с заданным характеристическим уравнением часто пользуются критерием Рауса. Алгоритм Рауса, как и алгоритм Гурвица, строится на основе анализа специальной таблицы (матрицы):

$$\begin{vmatrix} c_{11}=a_0 & c_{21}=a_2 & \dots \\ c_{12}=a_1 & c_{22}=a_3 & \dots \\ c_{13} & c_{23} & \dots \\ c_{14} & c_{24} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} \quad (3.36)$$

Она составляется из коэффициентов характеристического уравнения системы. В первую строку записываются коэффициенты с четными индексами, во вторую – с нечетными. В остальных строках элементы $c_{k,i}$ ($i > 2$) вычисляются с помощью рекуррентных соотношений:

$$c_{k,2} = c_{k+1,i-2} - d_i \cdot c_{k+1,i-1}$$

$$\text{Здесь } d_i = c_{1,i-2} / c_{1,i-1},$$

$$d_4 = c_{12} / c_{13}$$

например,

$$c_{14} = c_{22} - d_4 c_{23}$$

Эти формулы и определяют, по существу, алгоритм Рауса. Проверка устойчивости системы осуществляется в ходе заполнения таблицы Рауса. В соответствии с критерием Рауса для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы выполнялось неравенство:

$$d_i > 0 \quad (i = 3, \dots, n+2) \quad \text{при } a_0 > 0$$

или, что эквивалентно

$$a_0 > 0, a_1 > 0, c_{13} > 0, \dots, c_{1,i} > 0.$$

Если какой-нибудь из коэффициентов отрицательный, то система неустойчива. Более того, число перемен знаков у коэффициентов первого столбца таблицы Рауса дает число корней характеристического уравнения системы, которые расположены в правой полуплоскости.

Методика проведения эксперимента

Необходимое оборудование:

- линейные блоки;
- внешнее суммирующее устройство;
- электронно-лучевой осциллограф;
- задающий блок генераторов

Порядок выполнения работы

Построить САУ, согласно заданному характеристическому уравнению, рис.3.48. Варьируя коэффициентами k , добиться устойчивого состояния системы. Зафиксировать данные коэффициенты и полученную характеристику.

Используя один из вышеизложенных критериев, программным методом определить, будет ли устойчивой система автоматического управления.

При использовании критерия Рауса определить количество корней, расположенных в правой полуплоскости (если система неустойчива).

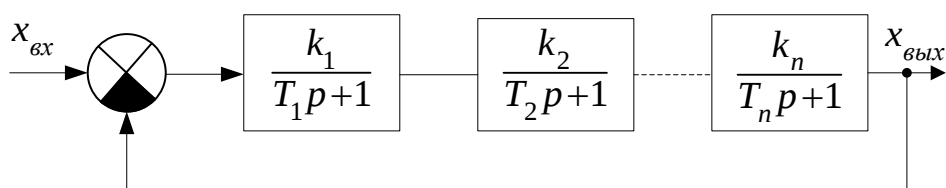


Рис.3.48. Структурная схема САУ

Содержание отчета:

1. Вариант задания.
2. Экспериментальные данные.
3. Блок-схема и программа вычислений.
4. Выводы.

Варианты задания:

1. $p^3 + 1,48p^2 + 4,6p + 4 = 0$
2. $p^3 + 1,52p^2 + 2,38p + 5,9 = 0$
3. $p^4 + 2,43p^3 + 3,86p^2 + 1,66p + 3,5 = 0$
4. $p^4 + 3,78p^3 + 4,16p^2 + 1,07p + 17 = 0$
5. $p^5 + 1,3p^4 + 5,8p^3 + 0,64p^2 + 3,67p + 11 = 0$
6. $p^6 + 6p^5 + 21p^4 + 44p^3 + 62p^2 + 52p + 100 = 0$

3.8. Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ

Краткие теоретические сведения и практические рекомендации

При исследовании системы автоматического регулирования приходится решать задачу обеспечения требуемых показателей качества переходного процесса: быстродействия, колебательности, перерегулирования и точности. Показатели работоспособности системы обобщаются в понятие качества процесса регулирования. Существуют два метода оценки качества регулирования:

1. **Прямая оценка**, при которой находят кривую переходного процесса с помощью решения дифференциального уравнения.
2. **Косвенная оценка** с помощью методов:
 - а) частотного
 - б) метода корневого годографа
 - в) метода интегральных оценок.

В данной лабораторной работе оценку качества регулирования необходимо сделать с помощью частотного метода.

Частотный метод оценки качества регулирования

Частотный метод основан на анализе графического изображения динамических и частотных характеристик системы.

Определим аналитическую зависимость между переходной характеристикой и частотными характеристиками системы. Для обратного преобразования Фурье можно записать:

$$X_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X_{\text{вых}}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3.37)$$

Подставляя в (3.37) значение $X_{\text{вых}}(j\omega) = X_{\text{ex}}(j\omega)\Phi(j\omega)$, получим:

$$X_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(j\omega) X_{\text{ex}}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (3.38)$$

где $\Phi(j\omega)$ – частотная передаточная функция замкнутой системы;
 $X_{\text{ex}}(j\omega)$ – изображение входного сигнала.

Частотную передаточную функцию системы можно получить из передаточной функции при подстановке $p = j\omega$. Функцию $\Phi(j\omega)$ можно представить в виде:

$$\Phi(jw) = P(w) + jQ(w), \quad (3.39)$$

где $P(w)$ – вещественная частотная характеристика замкнутой системы;

$Q(w)$ – мнимая частотная характеристика замкнутой системы.

При воздействии на систему единичной ступенчатой функции выходная величина, являющаяся переходной характеристикой системы $h(t)$, определяется через вещественную или мнимую частотную характеристику.

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(w)}{w} \sin(wt) dw \quad (3.40)$$

или

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(w)}{w} \cos(wt) dw + P(0) \quad (3.41)$$

Применяя численные методы нахождения интегралов с помощью ЭВМ можно построить переходную характеристику системы по уравнениям (3.40) или (3.41). По этой характеристике и оценивают качество регулирования.

Основным достоинством частотного метода является то, что он позволяет оценить качество регулирования и без построения переходной характеристики, только по графику вещественной частотной характеристики.

Если характеристика $P(w)$ является положительной непрерывной функцией частоты с отрицательной, убывающей по модулю производной (рис. 3.49.а), то переходной процесс носит монотонный аperiodический характер (рис. 3.49.б), причем, установившееся значение равно $P(0)$.

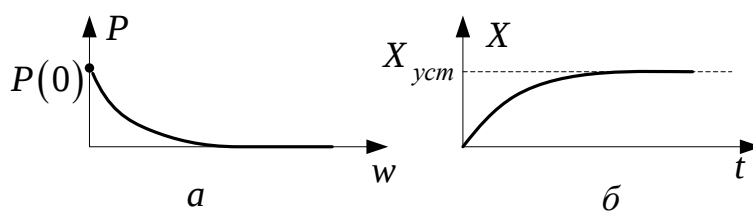


Рис. 3.49 Переходные характеристики

Если характеристику $P(w)$ имеет пики и меняет знак, пересекаясь с осью абсцисс (рис. 3.50.а), то это соответствует затухающим колебаниям. Величину перерегулирования можно определить по следующей формуле:

$$h_{\max} = [1,18P_{\max} - P(0)] / P(0) \quad (3.42)$$

Если характеристику $P(w)$ можно аппроксимировать трапецией, как показано на рис. 3.50.б, то время регулирования переходного процесса системы заключено в пределах $\pi / w_2 < t_p < 4\pi / w$.

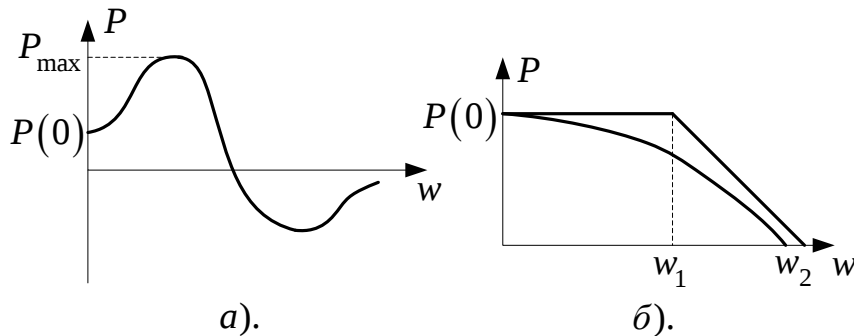


Рис. 3.50. Переходные характеристики

Методика проведения эксперимента

Необходимое оборудование:

- три линейных блока;
- внешнее суммирующее устройство;
- электронно-лучевой осциллограф;
- задающий блок генераторов

Порядок выполнения работы

Для САУ, структурная схема которой приведена на рис. 3.51, вычислить вещественную частотную характеристику. Программным методом определить:

1. переходную характеристику системы по вещественной частотной характеристике с использованием численных методов интегрирования (прямоугольников, трапеций или Симпсона);
2. график вещественной частотной характеристики.

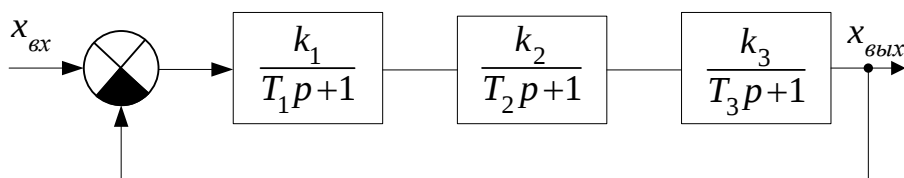


Рис. 3.51. Структурная схема САУ

Вариантов заданий для САУ

Вариант	K1	K2	K3	T1	T2	T3
1	2	3	1	0.3	0.2	0.4
2	1.5	2	0.5	0.6	0.3	0.1
3	1.2	2.3	4.1	0.15	0.21	0.32
4	2	1.5	3	0.45	0.3	0.1
5	2.6	1.7	2.8	0.32	0.42	0.2
6	1.8	1.2	3.1	0.25	0.1	0.42
7	2.1	1.3	1.7	0.2	0.25	0.35
8	2.5	2.4	1.8	0.1	0.28	0.61

Содержание отчета

1. Вариант задания и структурная схема САУ.
2. Необходимые предварительные расчеты.
3. Блок-схема алгоритма и тест программы.
4. Полученные графики.
5. Вычисленные значения показателей качества.

