

## Лабораторная работа 1

### Исследование временных характеристик интегрирующего звена

#### Теоретические положения

Примерами интегрирующего звена могут служить серводвигатель и операционный усилитель, во входной цепи которого включен резистор, а в цепи обратной связи - конденсатор.

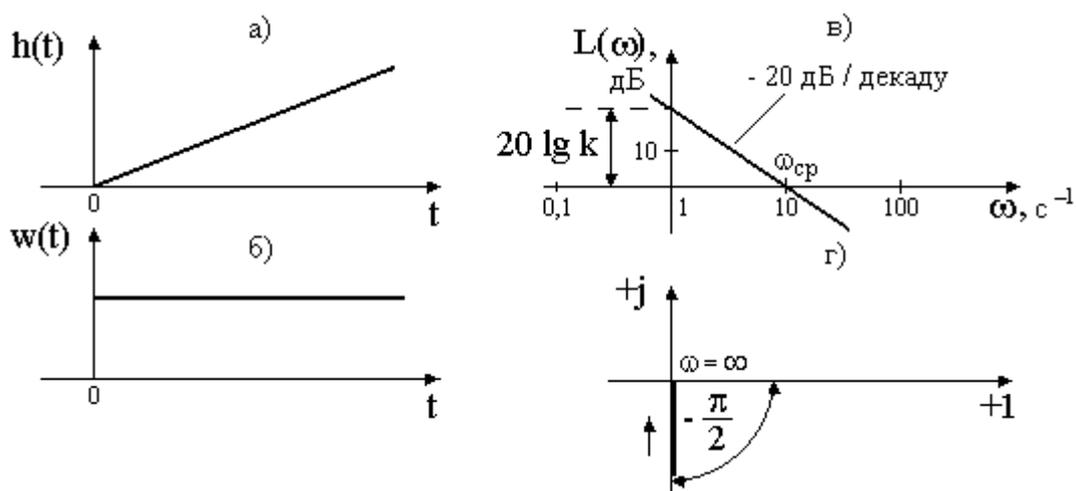


Рис. 2.7. Характеристики интегрирующего звена: а) переходная, б) импульсная переходная, в) логарифмическая амплитудно-частотная, г) годограф комплексного коэффициента передачи

Дифференциальное уравнение звена -  $y(t) = \int kx(t) dt$ ; дифференциальное уравнение в символической форме -  $y(p) = \frac{k}{p} x(p)$ ; передаточная функция -  $W(s) = k/s$ ; комплексный коэффициент передачи -  $W(j\omega) = k/j\omega$ ; амплитудно-частотная характеристика -  $W(\omega) = k/\omega$ ; фазо-частотная характеристика -  $\varphi(\omega) = -p/2$ ; логарифмическая амплитудно-частотная характеристика -  $L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \omega$  (рис.2.7).

Интегрирующее звено образуется при включении в усилительное звено в цепь обратной связи конденсатора С вместо резистора R2 (рис.2).

В этом случае передаточная функция интегрирующего звена определяется выражением:

$$W(s) = 1/(R1 * C * s) = -K / s, \quad (3)$$

где,  $K = 1/(R1 * C)$  (4) - коэффициент передачи интегрирующего звена.

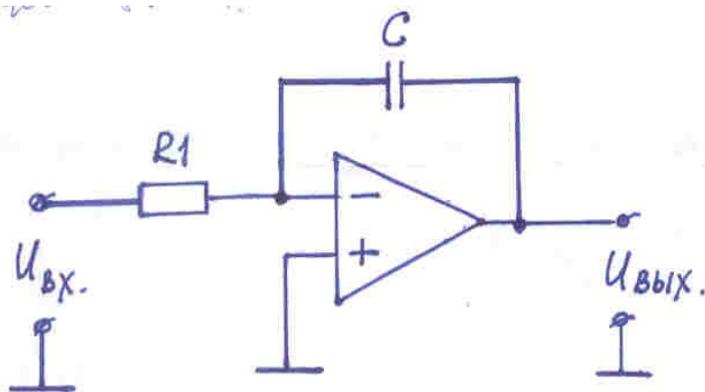


Рис.2

Выходная величина связана с входным воздействием выражением

$$U_{\text{вых}} = -(1/R_1 * C) * \int (\text{от } 0 \text{ до } t) U_{\text{вх}} * dt + \text{const.} \quad (5)$$

Недостаток этой простой схемы (рис.2) – дрейф выходной величины, обусловленный напряжением смещения и входными токами ОУ. Для ослабления этих явлений подключают к конденсатору С резистор R2 с большим сопротивлением (рис. 3). В этом случае, при подаче на вход звена скачка напряжения, выходная величина описывается выражением:

$$U_{\text{вых}} = - U_{\text{вх}} * (R_2 / R_1) * [1 - \exp(-t/R_2 * C)]. \quad (6)$$

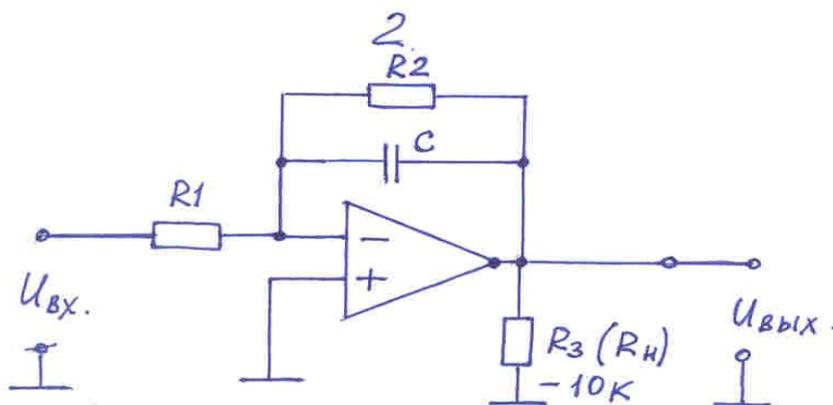


Рис. 3 Схема интегрирующего звена для эксперимента

Теперь следует выбрать из таблицы 2 по последней цифре шифра значения сопротивлений резисторов и конденсатора, а также частоту входного скачкообразного воздействия.

**Таблица 2**

Последняя цифра шифра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
R1, кОм	10	10	10	10	10	5	5	5	5	5
R2, кОм	100	80	60	120	150	100	80	60	120	150
C3, мкф	0,01	0,01	0,01	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01
Частота входного воздействия f, кГц	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	2,0	,5	3,0	3,5	4,0

Рассчитать по формуле (4) значение коэффициента передачи интегрирующего звена. Записать в отчет.

Экспериментальные исследования.

- a. Сверните данный файл.
- b. Откройте программу EWB512rusAv, в появившемся меню открыть файл int.ewb.
- c. Установить на схеме интегрирующего звена значения R1, R2 и C.
- d. Установить на функциональном генераторе генерацию прямоугольных импульсов со скважностью (Duty Cycle) 50, амплитудой 5В и частотой f, равной выбранной вами из таблицы 2.
- e. Включить осциллограф. Включить питание схемы.
- f. Отрегулировать осциллограф так, чтобы на экране было устойчивое изображение одного - двух периодов сигналов.
- g. Зарисовать точно один период сигналов, на осциллограмме отобразить параметры сигналов: период; амплитуды; скорость изменения (которая определяется по формуле  $\Delta U_{вх}/\Delta t$ ).
- h. Уменьшить величину емкости C в 2-5 раз; повторить пункт б.
- i. Увеличить величину емкости в 2-5 раз по отношению к исходному значению; повторить пункт б.
- j. Результаты измерений свести в таблицу; сделать выводы.
- k. Выключить питание схемы; закрыть файл, не сохраняя в нем изменений.

## **Лабораторная работа 2**

### **Исследование временных характеристик активного апериодического звена**

#### **1. Основы теории**

Примером может служить инерционная RC - цепь, известная в радиотехнике под названием "интегрирующая цепочка".

Дифференциальное уравнение звена -  $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$ ; дифференциальное уравнение в символической форме -  $Try(p) + y(p) = kx(p)$ ; передаточная функция -  $W(s) = k / (Ts + 1)$ ; амплитудно-частотная характеристика -  $W(\omega) = \frac{k}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}}$ ; фазо-частотная характеристика -  $\varphi(\omega) = -\arctg \omega T$ ; комплексный коэффициент передачи -  $W(j\omega) = k / (Tj\omega + 1)$  (рис. 2.6).

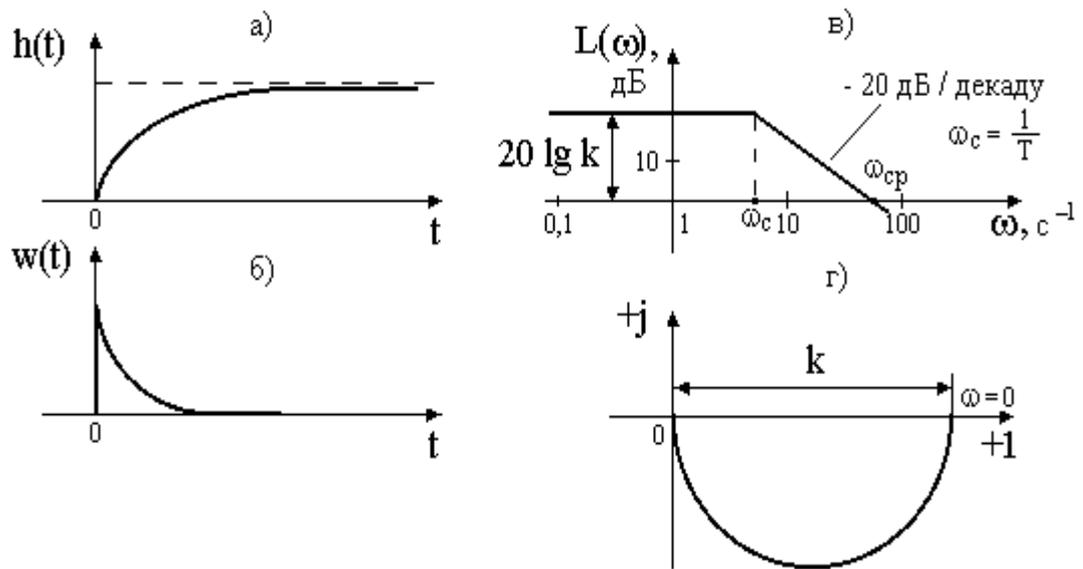


Рис. 1.1. Характеристики инерционного звена: а) переходная, б) импульсная переходная, в) логарифмическая амплитудно-частотная, г) годограф комплексного коэффициента передачи.

Как известно, аperiodическое звено первого порядка (инерционное звено) описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$T (du_{вых}/dt) + u_{вых} = -K \cdot x_{вх} \quad (1)$$

где постоянная времени  $T = R_{ос} \cdot C$ , а коэффициент передачи  $K = R_{ос} / R_{вх}$ . Разрешая уравнение (1) относительно производной, получаем уравнение:

$$du_{вых}/dt = -(K/T) \cdot x_{вх} - (1/T) \cdot u_{вых} \quad (2)$$

Этому уравнению соответствует следующая схема звена

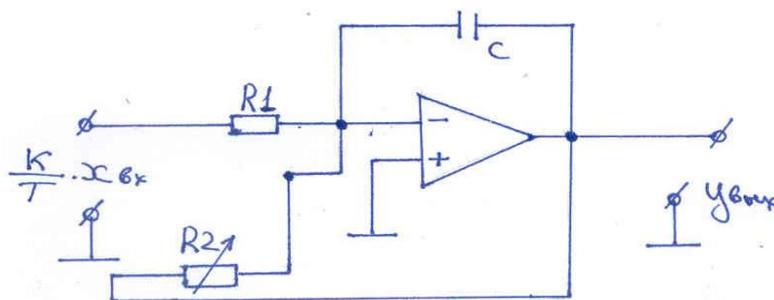


Рис.2

Где  $R1 = R_{вх}$ ,  $R2 = R_{ос}$ .

Используя символ дифференцирования «р», а затем комплексную переменную «s» из дифференциального уравнения (8) можно получить уравнение для передаточной функции звена:

$$W(S) = (Y_{вых}/X_{вх}) = - (K/1+ST). \quad (3)$$

## 2. Порядок выполнения работы

Из выражений (1)-(3) следует, что при проведении исследований апериодического звена для изменения его постоянной времени достаточно изменять величину сопротивления резистора  $R2$ , оставляя постоянной величину емкости. Но при этом будет изменяться коэффициент передачи  $K$ .

Таблица 1

Последняя цифра шифра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R2$ , кОм	10	12	14	10	12	14	10	12	14	10
$C$ , нф	10	10	10	10	10	12	12	12	12	12

1. Свернуть файл «Теория 3».
2. Откройте программу EWB512rusAv, в открывшемся меню нажать кнопку «arg.ewb», - откроется рабочий стол EWB со схемой апериодического звена.
3. Установить в схеме звена значение  $R1 = 1\text{кОм}$ , значения  $R2$  и  $C$  равным определенным по таб. 3.
4. Двойным щелчком по изображению функционального генератора открыть его окно и установить: генерацию прямоугольных импульсов; частоту генерации  $F=500$  Гц; скважность импульсов 70%; амплитуду ( $x_{вх}$ ) = 100 мВ. Закройте окно генератора.

5. Зарисовать схему аperiodического звена с использованными измерительными приборами. Указать на схеме значения величин элементов и параметры входного сигнала.

6. Двойным щелчком по изображению осциллографа раскрыть его; затем, нажав кнопку «Expand», увеличить размер осциллографа до максимального.

7. Щелкнув по выключателю, включить питание схемы. Отрегулировать режим осциллографа так, чтобы на экране отображались 1-2 периода входного и выходного сигналов; отрегулировать размеры осциллограмм.

8. Зарисовать в отчет с экрана (точно) входной сигнал и переходную характеристику звена. Используя красный и синий курсоры, определить время установления  $t_u$  (как время от начала переходного процесса до момента, когда переходная характеристика первый раз достигает нового установившегося значения).

9. Определить постоянную времени звена  $T$  и коэффициент передачи  $K$ . Записать в отчет.

10. Выключить питание схемы. Выключить осциллограф.

11. Увеличить значение сопротивления  $R_2$  в 2 раза.

12. Повторить пункты 5 - 9.

13. Установить исходное значение сопротивления  $R_2$ ; величину емкости конденсатора  $C$  увеличить в 2 раза.

14. Повторить пункт 5 - 9.

15. Открыть окно функционального генератора. Изменить форму генерируемого сигнала на пилообразную (оставив неизменными остальные параметры сигнала). Закрыть окно генератора.

16. Установить исходные значения сопротивления  $R_2$  и емкости  $C$ .

17. Повторить пункт 5 - 9.

18. Свести все результаты исследования звена в таблицу 2. Записать в отчет выводы.

Таблица 2

Эксперимент	Входной сигнал	Значение $R_2$ , кОм	Значение $C$ , нф	Пост. времени $T$ , мс	Коэффициент $K$	Время установления $t_u$ , мс
1	скачкообразный					
2	скачкообразный					
3	скачкообразный					
4	пилообразный					

### Лабораторная работа № 3

#### Исследование замкнутой системы автоматического управления (САУ) второго порядка

**Цель работы:** исследование статических и динамических свойств систем автоматического управления второго порядка с помощью прикладной программы EWB 5.12. и сравнение их с результатами теоретических расчетов.

**Задание:** выполнить анализ схемы, приведенной на рис.3.1.а., изменением номиналов резисторов обеспечить требуемые величины  $T$  и  $k$ . Для чего: найти передаточную функцию САУ, построить логарифмические частотные характеристики, определить запасы устойчивости схемы, рассчитать переходной процесс и построить переходную функцию. Результаты расчетов проверить путем моделирования при  $R_2 = R_5 = R_6 = 50$  кОм,  $C = C = 0.1$  мкф., коэффициент демпфирования  $\xi = 0,4$ . Остальные данные для моделирования приведены в табл.1.( №-последняя цифра шифра).

Таблица 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
k	2	3	4	5	4	3	2	3	4	5
T,мс	20	25	30	25	20	15	20	25	30	15

### 3.1 Основы теории

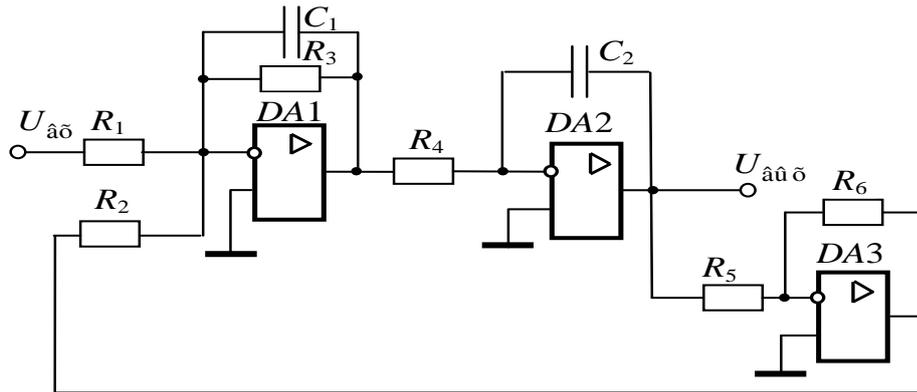
Функциональная схема САУ выполнена на операционных усилителях, реализующих инерционное ( $W = K/(1+Tp)$ ), интегрирующее ( $W = 1/Tp$ ) и пропорциональное звенья ( $W = K$ ). На выходе усилителя DA1 происходит преобразование и суммирование напряжений по каждому из его входов. Его передаточные функции относительно входного напряжения  $U_{\text{в0}}$  и напряжения обратной связи  $U_{\text{oc}}$  представляются выражениями

$$W_1(p) = -\frac{R_3}{R_1(R_3C_1p+1)}, \quad W_2(p) = -\frac{R_3}{R_2(R_3C_1p+1)}$$

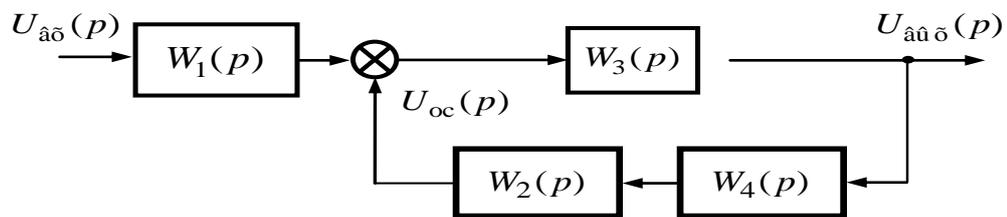
Полученный сигнал проходит через последовательно включенное инте-

грирующее звено на усилителе  $DA2$  с передаточной функцией  $W_3(p) = -\frac{1}{R_4C_2p}$ .

Выход усилителя  $DA2$  является выходом САУ и сигнал с него через усилитель  $DA3$  с передаточной функцией  $W_4(p) = -\frac{R_6}{R_5}$  поступает на второй вход усилителя  $DA1$ .



*a*



*б*

Рис. 3.1 — САУ на операционных усилителях (*a*) и ее структурная схема (*б*)

На рис. 3.1, *б* приведена структурная схема, соответствующая САУ, изображенной на рис. 3.1, *a*. Эквивалентная передаточная функция  $W_{yea}$  участка схемы, охваченного обратной связью, рассчитывается по выражению:

$$\begin{aligned} W_{yea}(p) &= \frac{W_3(p)}{1 - W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p)} = \\ &= \frac{\left(-\frac{1}{R_4C_2p}\right)}{1 - \left(-\frac{R_3}{R_2(R_3C_1p+1)}\right) \cdot \left(-\frac{1}{R_4C_2p}\right) \cdot \left(-\frac{R_6}{R_5}\right)} = \\ &= \frac{R_2R_5(R_3C_1p+1)}{R_3R_6\left(\frac{R_2R_4R_5C_1C_2}{R_6}p^2 + \frac{R_2R_4R_5C_2}{R_3R_6}p + 1\right)}. \end{aligned}$$

Таким образом, передаточная функция  $W(p)$  замкнутой САУ, изображенной на рис. 3.1, *a*, будет равна

$$\begin{aligned}
W(p) &= W_1(p) \cdot W_{y\ddot{a}\ddot{a}}(p) = \\
&= \frac{\left[ -\frac{R_3}{R_1(R_3C_1p+1)} \right] R_2R_5(R_3C_1p+1)}{R_3R_6 \left( \frac{R_2R_4R_5C_1C_2}{R_6} p^2 + \frac{R_2R_4R_5C_2}{R_3R_6} p + 1 \right)} = \\
&= \frac{R_2R_5}{R_1R_6} \cdot \frac{1}{\frac{R_2R_4R_5C_1C_2}{R_6} p^2 + \frac{R_2R_4R_5C_2}{R_3R_6} p + 1} = \frac{k}{T^2p^2 + 2\xi Tp + 1},
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Где  $k = \frac{R_2R_5}{R_1R_6}$ ,  $T = \sqrt{\frac{R_2R_4R_5C_1C_2}{R_6}}$ ,  $\xi = \frac{1}{2R_3} \sqrt{\frac{R_2R_4R_5C_1}{R_6C_2}}$ .

Поскольку  $R_2 = R_5 = R_6 = R$ ,  $C_1 = C_2 = C$ , то при известных значениях коэффициента передачи -  $k$ , постоянной времени -  $T$ , коэффициенте демпфирования -  $\xi$ , номиналы остальных элементов схемы можно определить:  $R_1 = R/k$ ,  $R_4 = T^2/RC^2$ ,  $R_3 = T/2C\xi$  (3.2)

Формулы для частотных характеристик:

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 - \omega^2 T^2 + 2j\xi\omega T} = \frac{k(1 - \omega^2 T^2 - 2j\xi\omega T)}{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T^2},$$

$$P(\omega) = k \frac{1 - \omega^2 T^2}{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T^2},$$

$$Q(\omega) = -k \frac{2\xi\omega T}{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T^2},$$

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \frac{k}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T^2}},$$

$$G(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T^2},$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} = -\text{arctg} \frac{2\xi\omega T}{1 - \omega^2 T^2}.$$

Частотные характеристики приведены на рис. 3.2. Они существенно зависят от величины коэффициента демпфирования  $\xi$ . При  $1 > \xi > 0,707$  АЧХ  $A(\omega)$  (рис. 3.2, а) монотонно уменьшается с увеличением частоты. При  $\xi < 0,707$  на ней появляется «горб», который увеличивается по мере уменьшения  $\xi$ . На ЛАЧХ (рис. 3.2, б) «горб» проявляется при  $\xi < 0,5$ , при больших значениях коэффициента демпфирования ЛАЧХ приближается к ее асимптотическому варианту (имеет нулевой наклон до частоты сопряжения  $\omega_c = \frac{1}{T}$  и наклон  $-40\text{дБ/дек}$  после этой частоты).

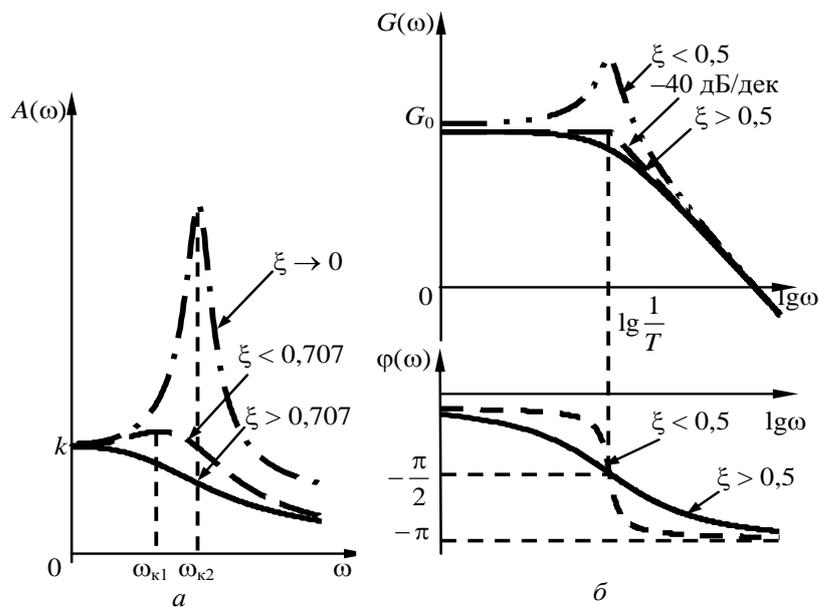


Рис. 3.2 — Частотные характеристики

Величина «горба» на частоте  $\omega_{\xi} = \frac{1}{T} \sqrt{1-2\xi}$  может быть оценена по соотношению:

$$H = 20 \lg \frac{1}{2\xi \sqrt{1-\xi^2}} \approx 20 \lg \frac{1}{2\xi}.$$

Переходная функция может быть получена по формуле  $p_{1,2} = \frac{-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1}}{T}$  при комплексных сопряженных полюсах (при  $\xi < 1$ ):

$$h(t) = k \left[ 1 - e^{-\frac{\xi t}{T}} \left( \cos \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t \right) \right]. \quad (3.3)$$

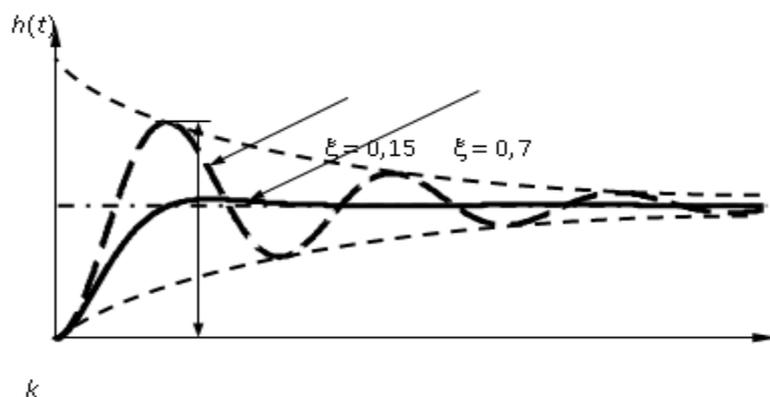


Рис. 3.3 — Переходные характеристики

На рис. 3.3 показаны переходные характеристики САУ второго порядка, рассчитанные по выражению (3.3) для различных значений коэффициента

демпфирования  $\xi$ . Частота собственных колебаний переходной характеристики оценивается по выражению  $\omega_{\xi} = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T}$ . Ее можно также определить и по АЧХ (см. рис. 3.2а, частоты  $\omega_{к1}$  и  $\omega_{к2}$ , соответствующие максимальным значениям на АЧХ). Огибающая (см. пунктир на рис. 3.3) определяется формулой  $h_{\xi}(t) = k_{\xi} e^{-\frac{\xi}{T}t}$ .  
 Время переходного процесса  $t_n$  на практике оценивается соотношением

$$t_n = 3T/\xi$$

Приняты следующие обозначения:

$W(p)$  – передаточная функция системы.

$W(j\omega)$ , АФЧХ – амплитудно-фазовая частотная характеристика.

$A(\omega)$ , АЧХ – амплитудная частотная характеристика – зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов от частоты.

ФЧХ,  $\varphi(\omega)$  – зависимость разности начальных фаз выходного и входного сигналов от частоты.

Частота среза  $\omega_{ср}$  – частота, на которой ЛАЧХ равна нулю.

Фаза среза  $\varphi_{ср}$  – разность начальных фаз входного и выходного сигналов на частоте среза.

Частота  $\omega_{\pi}$  – частота, на которой ЛФЧХ равна  $\pi$ .

Диаграмма Боде – логарифмические АЧХ и ФЧХ, построенные в логарифмических частотных осях ( $\lg\omega$ ) друг под другом,  $L(\omega)$ ,  $\varphi(\omega)$ .

$\Delta A$  – запас устойчивости по амплитуде (запас по модулю) – величина, определяемая при фазовом сдвиге  $-180^\circ$  и показывающая, во сколько раз может быть увеличен коэффициент усиления системы, прежде чем она окажется на границе устойчивости.

$\Delta L$  – логарифмический запас устойчивости по амплитуде, дБ, (определяется по диаграмме Боде).

$\Delta\varphi$  – запас устойчивости по фазе – величина, определяемая на частоте  $\omega_{ср}$ , когда  $A(\omega_{ср}) = 1$ , показывающая, какой дополнительный отрицательный фазовый сдвиг допустим в системе, прежде чем она окажется на границе устойчивости, (определяется по диаграмме Боде).

### 3.2 Порядок выполнения лабораторной работы

3.2.1. Проверить установку номиналов  $R_2 = R_5 = R_6 = 50 \text{ кОм}$ ,  $C = 0.1 \text{ мкф}$ .  
 Необходимые параметры остальных элементов схемы ( $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ) рассчитать по формулам 3.2.

3.2.2. Собрать в среде EWB схему 3.1.а. При наборе электронных моделей в среде EWB необходимо соблюдать следующие правила: входные сопротивления операционных усилителей принимать равными 50 кОм; напряжение на выходе любого операционного усилителя не должно превышать 10В; частотные характеристики снимаются с помощью генератора синусоидальных сигналов, амплитуда синусоиды не более 1-2 В, частота любая; при работе с двухканальным осциллографом необходимо изменять длительность развертки

и усиление входного канала. Операционный усилитель имеет два входа – инвертирующий (-) и не инвертирующий (+),

3.2.3 Снять логарифмические амплитудную  $L(\omega)$  и фазовую частотные  $\varphi(\omega)$  характеристики. Результаты измерений записать в таблицу 2.

Таблица 2.

$\omega$										
$L(\omega)$										
$\varphi(\omega)$										

Примечание: фазовые сдвиги измерять по осциллографу.

3.2.4. Построить логарифмические амплитудную  $L(\omega)$  и фазовую частотные  $\varphi(\omega)$  характеристики, определить частоту среза  $\omega_{CP}$ , значение фазы среза  $\varphi_{CP}$  на этой частоте, запас устойчивости по амплитуде  $\Delta L$  и фазе  $\Delta\varphi$ .

3.2.4. Подать на вход САУ сигнал типа меандра. Снять переходные характеристики САУ для  $\xi=0,3$  и  $0,4$ . Результаты измерений записать в таблицу 3. Измерения выполнять с использованием осциллографа.

Таблица 3

$tсек$										
$U(t)$										

3.2.5 Построить переходные характеристики САУ. Записать максимальное  $Um$  и установившееся  $Uy$  значения выходного сигнала. Определить время переходного процесса  $t_n$ .

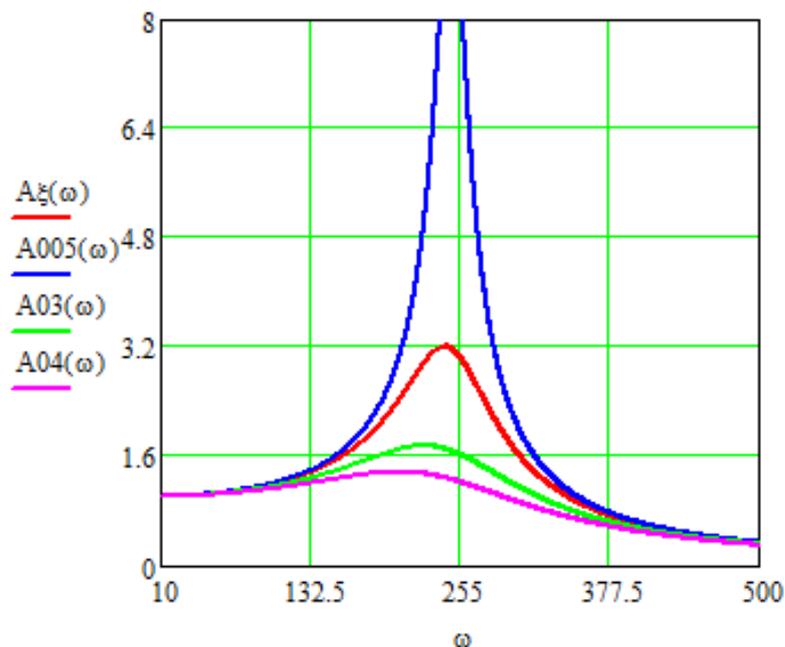
3.2.6 Сравнить расчетные и экспериментальные результаты.

3.2.7 Подать на вход САУ линейно-изменяющееся напряжение, оценить нелинейность выходного сигнала.

Амплитуда выходного сигнала подсчитывается по формуле

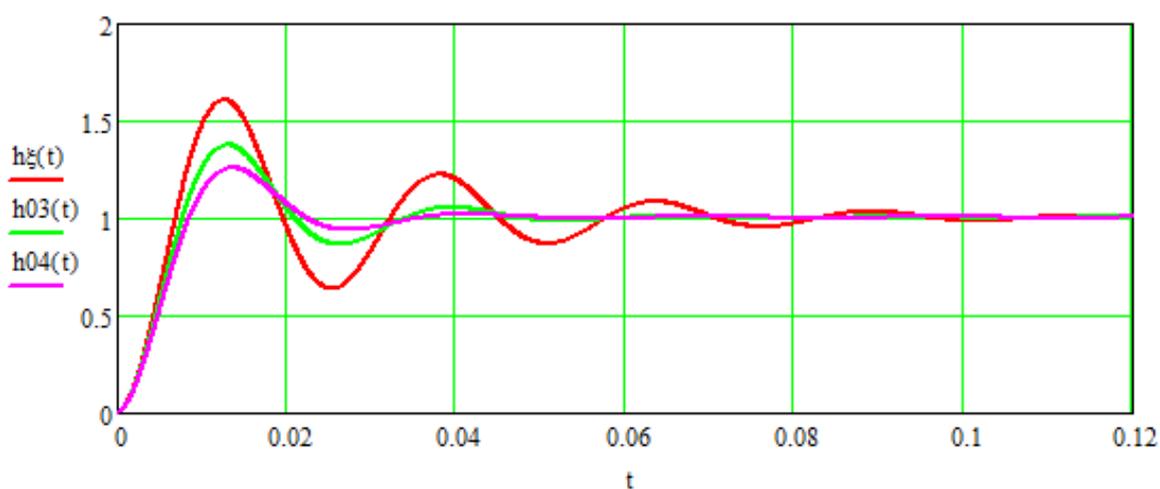
$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \frac{k}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T^2}}$$

Графики построены при  $k = 1; T = 4 \cdot 10^{-3}$  и  $\xi = 0,05$              $\xi = 0,158$   
            $\xi = 0,3$                   $\xi = 0,4$

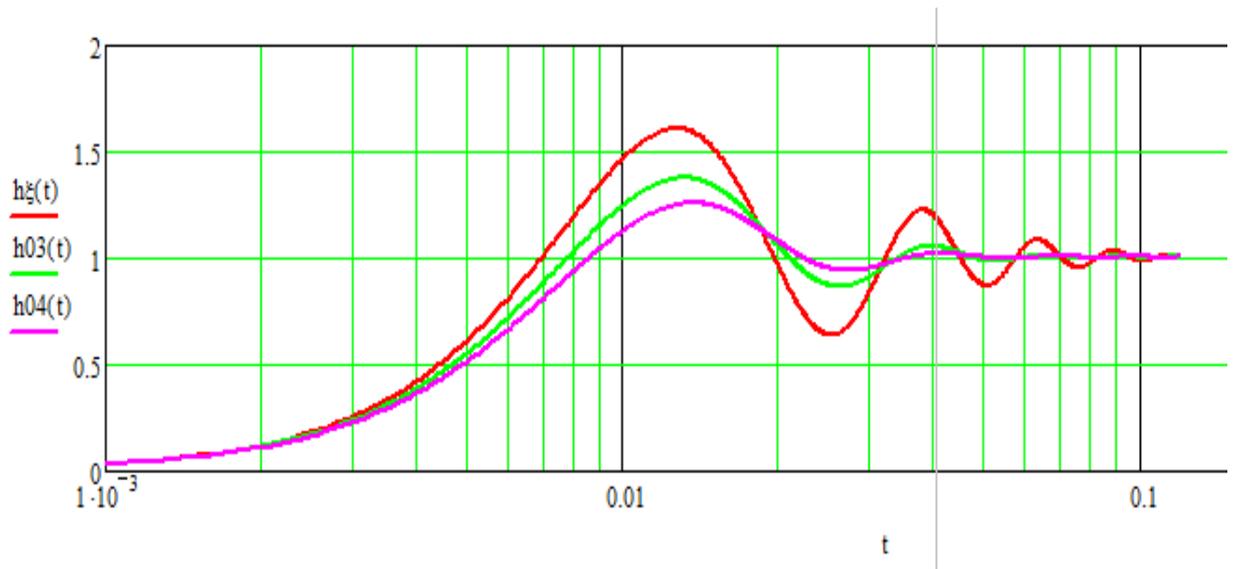


$$h(t) = k \left[ 1 - e^{-\frac{\xi t}{T}} \left( \cos \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t \right) \right]$$

$(t = 0 \div 120 \cdot 10^{-3})$

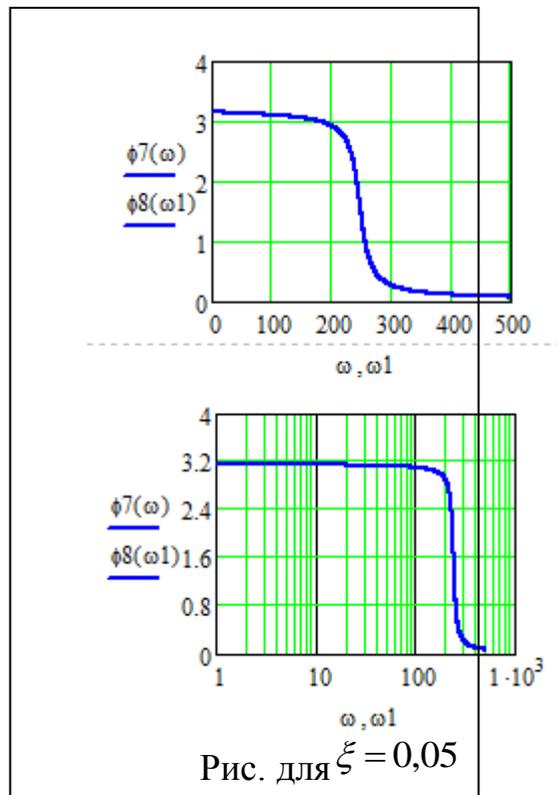
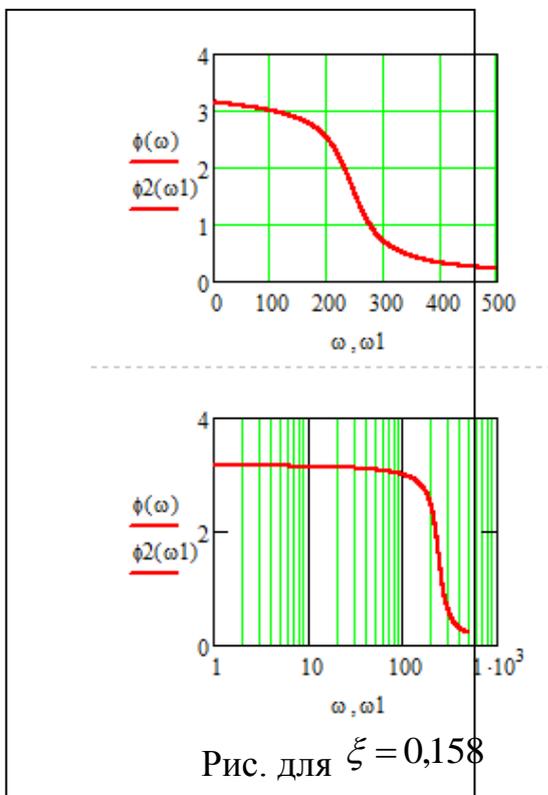


Этот же график, если горизонтальная ось имеет логарифмический масштаб.



Далее фазо-частотная характеристика:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} = -\arctg \frac{2\xi\omega T}{1 - \omega^2 T^2}$$



$\xi = 0,158$

$\xi = 0,3$

$\xi = 0,4$

## Лабораторная работа 4 Исследование импульсного радиодальномера

### 1. Цель работы.

Изучение принципа действия импульсного радиодальномера (автоселектора), временного дискриминатора, исследование оптимальных соотношений между параметрами временного дискриминатора.

### 2. Основные теоретические положения.

При активной радиолокации, сигнал, принимаемый приемником РЛС, создается в результате отражения объектом электромагнитных волн, излучаемой антенной РЛС. (см. рис.1)

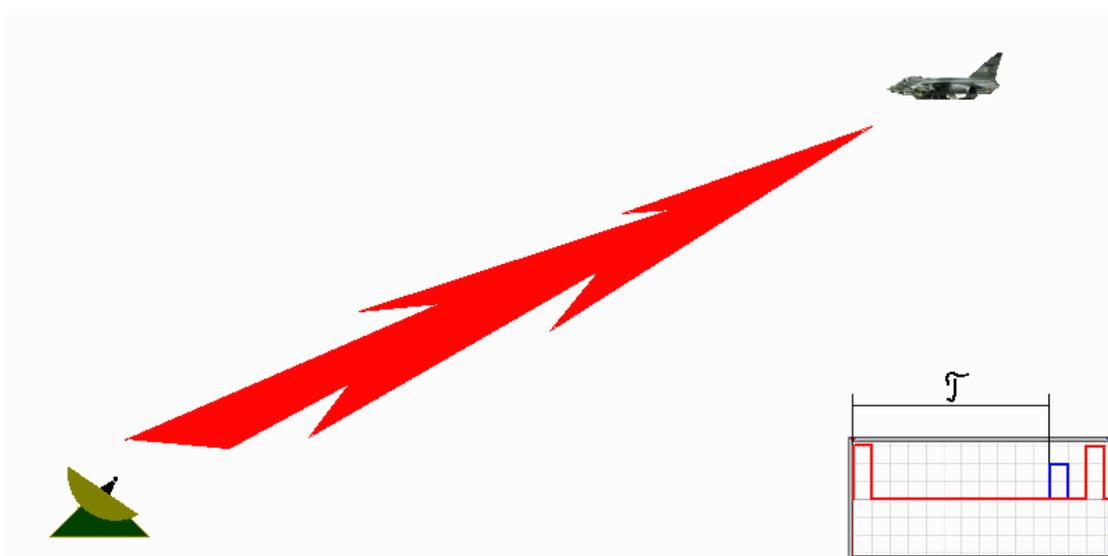


Рис.1

Сигнал, излучаемый антенной РЛС, называют зондирующим, а принимаемый сигнал - отраженным. В современных радиолокаторах принимают пачку отраженных от цели радиоимпульсов.

Факт приема сигнала устанавливает обнаружение объекта, а амплитуда, фаза, частота, вид поляризации, время задержки относительно зондирующего сигнала и направление прихода сигнала позволяют оценить координаты объекта, параметры его движения и т.д.

**Система слежения за временным положением импульсного сигнала.** Эти системы применяются для автоматического измерения дальности импульсным радиолокатором; для выделения периодически повторяющихся им-

пульсов на фоне помех в системах связи с импульсными поднесущими. Такие системы слежения носят название временных автоселекторов.

Функциональная схема системы представлена на рис. 2. Радиолокационный приемник открывается (стробируется) с помощью временного автоселектора на короткие интервалы времени ожидаемого прихода эхосигнала от избранной цели. Эта мера повышает помехоустойчивость приема.

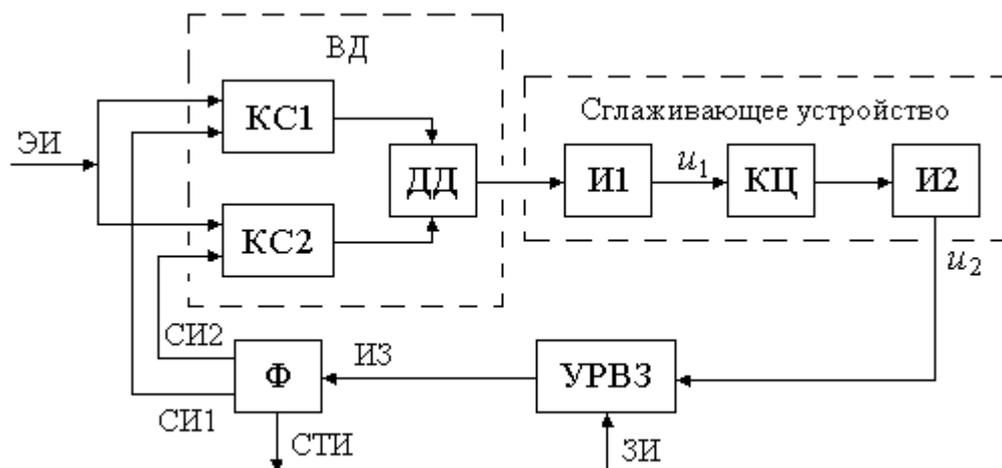


Рис. 2.. Функциональная схема временного автоселектора

Стробирующие импульсы формируются специальным формирователем ( $\Phi$ ), входящим в состав временного автоселектора. В состав временного автоселектора входят также временной дискриминатор (ВД), сглаживающее устройство (СУ) и устройство регулируемой временной задержки (УРВЗ).

Совмещение во времени стробирующих импульсов с эхосигналами цели в каждом цикле зондирования обеспечивается работой следящего автоселектора. С этой целью формирователь  $\Phi$  формирует два селекторных импульса СИ1 и СИ2. Импульсы прямоугольной формы СИ1 и СИ2 располагаются симметрично относительно середины стробирующего импульса и следуют непосредственно друг за другом (рис. 3).

Сглаживающее устройство содержит два последовательно включенных интегратора И1 и И2 и корректирующую  $RC$ -цепочку КЦ. Временной дискриминатор содержит два каскада совпадений КС1 и КС2 на два входа каждый и дифференциальный детектор ДД. Выходные напряжения каскадов совпадений ИС1 и ИС2 образуются в результате совпадения селекторных импульсов СИ1 и СИ2 и эхосигнала цели. Импульсы ИС1 и ИС2 детектируются и вычитаются в дифференциальном детекторе, образуя выходное напряжение дискриминатора.

Вырабатываемые синхронизатором радиолокатора, зондирующие импульсы ЗИ, запускают мощный импульсный генератор, формирующий радиоимпульсы, излучаемые антенной, и одновременно запускают устройство регулируемой временной задержки УРВЗ автоселектора.

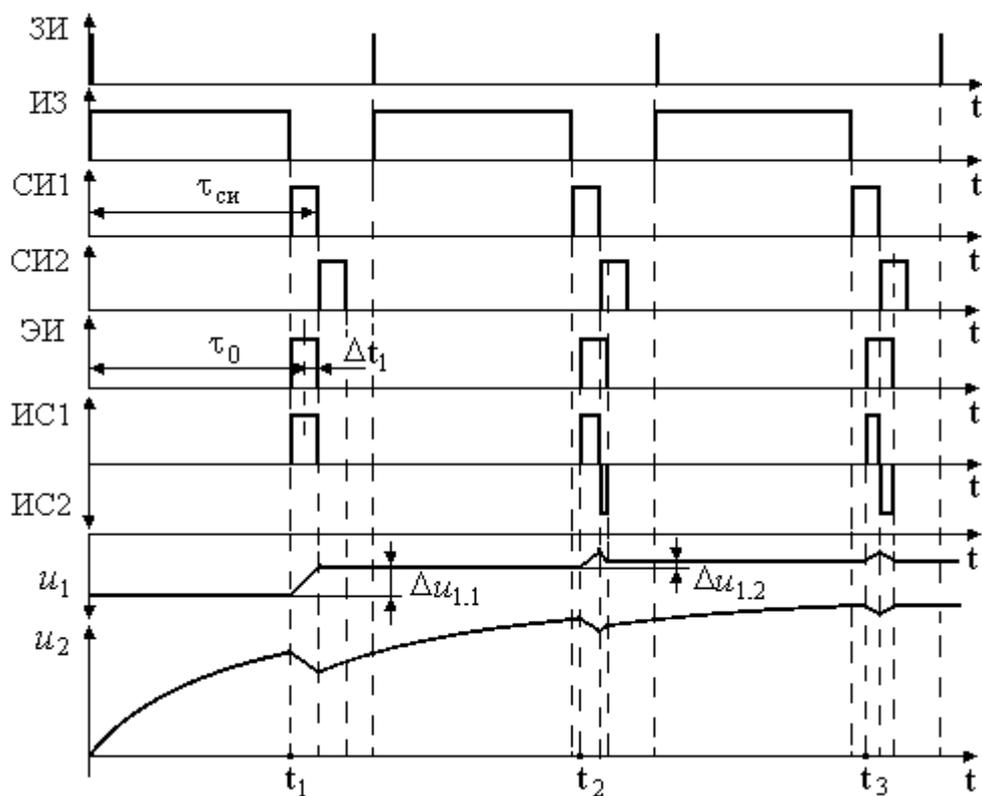


Рис. 3. Поясняющие временные диаграммы

Длительность импульса задержки  $ИЗ$ , вырабатываемого УРВЗ, зависит от величины управляющего напряжения  $u_2$ .

От среза импульса задержки запускается формирователь селекторных импульсов  $\Phi$ . При изменении управляющего напряжения  $u_2$  селекторные импульсы смещаются во времени относительно зондирующего импульса в пределах от нуля до  $0,95 T_3$ , где  $T_3$  - период повторения зондирующих импульсов.

На временных диаграммах, поясняющих функционирование автоселектора (рис. 3), эхоимпульс в момент времени  $t_1$  совпадает с первым селекторным импульсом  $СИ1$ . В результате на выходе каскада совпадений  $КС1$  возникает импульс совпадений  $ИС1$ , уменьшающий по абсолютной величине напряжение на выходе первого интегратора на величину  $\Delta u_{1.1}$ . В промежутке между импульсами напряжение на выходе первого интегратора сохраняется постоянным.

Вследствие уменьшения напряжения на выходе первого интегратора, выходное напряжение второго интегратора, хотя и продолжает увеличиваться, но с меньшей скоростью.

По мере увеличения напряжения на выходе второго интегратора уменьшается длительность импульса задержки  $ИЗ$ . Благодаря этому, в момент времени  $t_2$  селекторные импульсы  $СИ1$  и  $СИ2$  располагаются относительно очередного эхоимпульса  $ЭИ$  таким образом, что большая часть  $ЭИ$  перекрывается с импульсом  $СИ1$ , а меньшая - с импульсом  $СИ2$ . Теперь образуются два импульса совпадений -  $ИС1$  и  $ИС2$ , причем  $ИС1$  имеет большую длительность по

сравнению с ИС2. Импульс ИС1 приводит к дальнейшему уменьшению отрицательного напряжения на выходе первого интегратора, а импульс ИС2, наоборот, увеличивает это напряжение.

Так как длительность ИС1 больше длительности ИС2, то результирующее отрицательное напряжение на выходе первого интегратора уменьшается на величину  $\Delta u_{1.2}$ . Однако  $|\Delta u_{1.2}| < |\Delta u_{1.1}|$ . Напряжение на выходе второго интегратора хотя и продолжает увеличиваться, но с меньшей скоростью, чем в предыдущем периоде. Увеличение напряжения  $u_2$  приводит к дальнейшему уменьшению длительности импульса задержки ИЗ, в результате чего селекторные импульсы в момент времени  $t_3$  оказываются так расположенными относительно эхоимпульса, что граница их раздела делит эхоимпульс пополам.

В результате этого, длительности импульсов совпадений ИС1 и ИС2 оказываются равными, а приращение напряжения на выходе первого интегратора равно нулю. Следовательно, увеличение напряжения на выходе второго интегратора прекращается, также прекращается изменение длительности импульса задержки ИЗ и в системе устанавливается состояние равновесия. Величина напряжения  $u_2$  пропорциональна дальности до цели, а величина напряжения  $u_1$  на выходе первого интегратора пропорциональна скорости цели, если цель движется.

В динамике селекторные импульсы непрерывно сопровождают эхоимпульс.

При движении цели с постоянной скоростью в системе с двумя интеграторами (с астатизмом второго порядка) ошибка в определении скорости и ошибка в определении дальности цели равны нулю. Однако, если цель движется с ускорением, появляется ошибка, пропорциональная ускорению. Для улучшения качества переходных процессов между интеграторами включается корректирующая цепь КЦ (форсирующее звено). В ряде случаев для улучшения помехоустойчивости включается также фильтр нижних частот (инерционное звено).

Захват цели в начале работы автоселектора производится либо вручную оператором, наблюдающим отметку цели на экране ЭЛТ, либо специальным автоматическим устройством поиска и захвата цели.

В связи с импульсным характером сигнала информация о рассогласовании  $\Delta\tau$  (середины эхосигнала относительно стыка селекторных импульсов) образуется в автоселекторе в дискретные моменты времени, отстоящие друг от друга на период повторения зондирующих импульсов. Поэтому, строго говоря, временной автоселектор является импульсной системой радиоавтоматики. Однако, если частота повторения зондирующих импульсов велика по сравнению с высшей частотой полосы пропускания автоселектора, что часто выполняется на практике, то можно считать автоселектор непрерывной системой. В таком предположении построим структурную схему автоселектора.

Временное рассогласование равно  $\Delta\tau = \tau_c - \tau_{си}$ .

При высокой частоте повторения зондирующих импульсов пульсации выходного напряжения временного дискриминатора, обусловленные импульс-

ным характером сигнала, эффективно сглаживаются. В этом случае при анализе автоселектора достаточно рассматривать выходное напряжение дискриминатора, усредненное за период повторения импульсов:

$$u_{вд}(t) = F(\Delta\tau) + \xi(t, \Delta\tau),$$

где  $F(\Delta\tau)$  и  $\xi(t, \Delta\tau)$  - соответственно математическое ожидание и флуктуационная составляющая выходного напряжения дискриминатора.

Форма дискриминационной характеристики  $F(\Delta\tau)$  и параметры напряжения  $\xi(t, \Delta\tau)$  зависят от соотношения сигнал/шум, ширины полосы пропускания радиотракта, длительности селекторных импульсов и наличия амплитудных флуктуаций сигнала.

Преобразование напряжения, выполняемое сглаживающим устройством, определяется линейным дифференциальным оператором  $W_{\phi}(p)$ , учитывающим число интегрирующих звеньев в составе автоселектора

$$u_2(t) = W_{\phi}(p) \cdot u_{вд}(t).$$

Обычно зависимость величины задержки в схеме УРВЗ от управляющего напряжения является безынерционной. Если она, кроме того, линейна, то выполняется соотношение  $\tau_{СИ} = \tau_{СИ0} + S_{РЕГ} \cdot u_2$ , где  $S_{РЕГ}$  - крутизна характеристики УРВЗ;  $\tau_{СИ0}$  - значение задержки при отсутствии управляющего напряжения. Величина  $\tau_{СИ0}$  может обладать некоторой нестабильностью, которую необходимо учитывать при анализе селектора.

Приведенным соотношениям соответствует структурная схема на рис. 4.

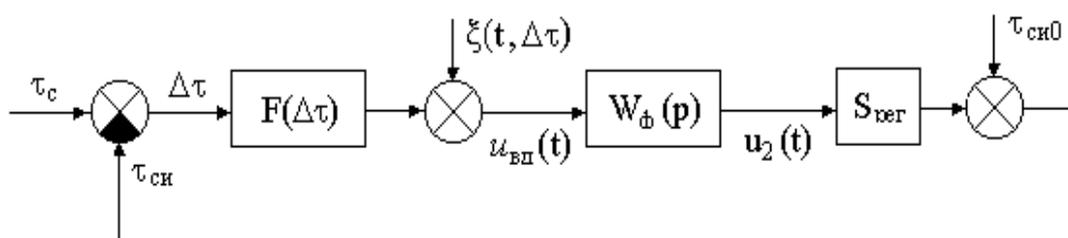


Рис. 4. Структурная схема следящей системы

Измерение времени запаздывания радиосигнала  $\tau$  производят в пределах априорного интервала, вырабатываемого устройством поиска, и рассматриваются как статистическую задачу измерения параметра  $\tau$  при определенных ограничениях на модели сигналов и помех.

При этом удобно задачу измерения времени задержки радиосигнала свести к задаче измерения времени запаздывания видеосигнала. Практически это можно реализовать с помощью когерентного демодулятора или синхронного детектора. (рис.5)

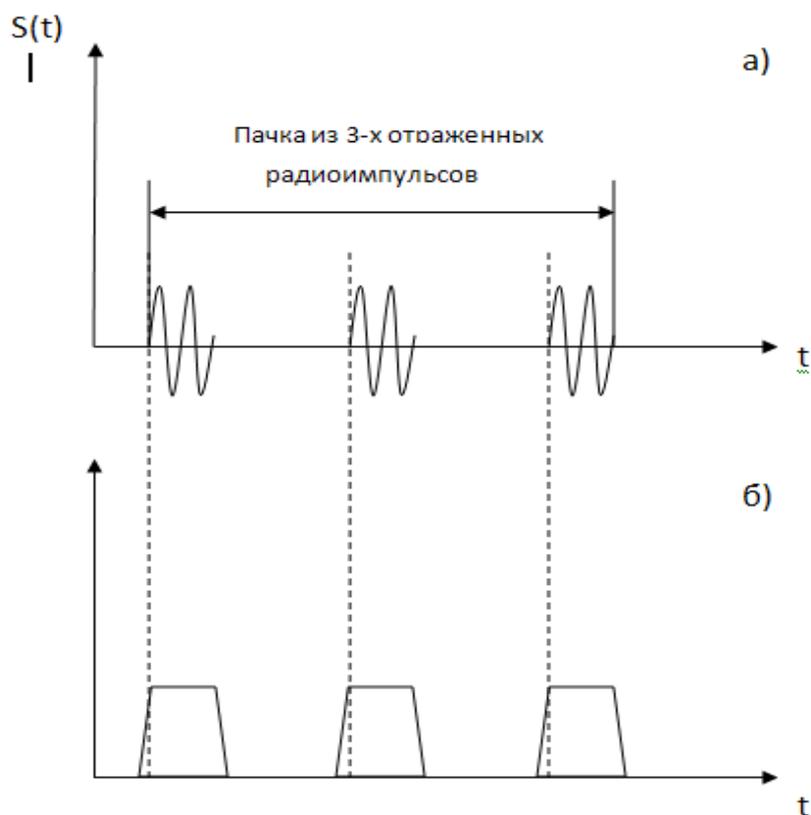


Рис. 5

Структурная схема измерения с синхронным детектором (СД) приведена на (рис.6).

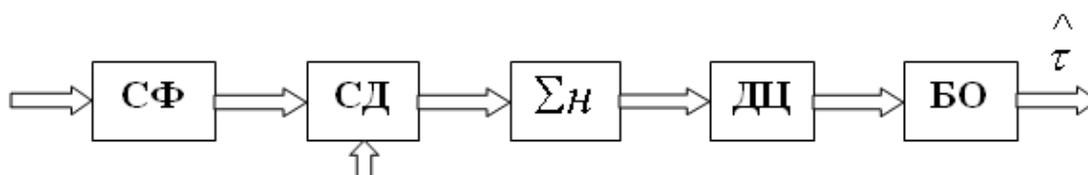


Рис. 6

На схеме обозначен (СФ) - согласованный фильтр для одиночного радиоимпульса. опорное напряжение для синхронного детектора поступает от системы ФАП. Фаза опорного напряжения совпадает с фазой поступающего на вход (СД) сигнала. Накапливающий сумматор ( $\Sigma n$ ) суммирует напряжение пачки  $n$  протектированных радиоимпульсов. Выходное напряжение поступает на дифференцирующую цепь (ДЦ) и затем на блок оценки (БО).

Операция суммирования импульсов в пачке увеличивает отношение сигнал/шум  $q_0$  на выходе фильтра, согласованного с одиночным радиоимпульсом в  $\sqrt{n}$  раз. Формула для дисперсии оптимальной оценки имеет вид:

$$D_{\tau}^{\wedge} = \frac{1}{(2\pi F\Delta)^2 q^2} \quad (2)$$

Где  $q = q_0 n^{1/2}$  - отношение сигнал/шум на выходе сумматора  $\Sigma n$

$$q_0 = \sqrt{\frac{2E}{N_0}} ; \quad E = \int_0^T S^2(t) dt - \text{энергия сигнала.}$$

Система содержит чувствительный элемент – временной дискриминатор, вырабатывающий сигнал рассогласования входного сигнала и сигнала, поступающего по цепи обратной связи. Операции, выполняемые оптимальным временным дискриминатором, сводятся к вычислению сигнала рассогласования.

Поскольку временное положение за интервал времени, равный периоду повторения зондирующих импульсов изменяется не значительно, цепи сглаживания линейны и осуществляют переход от импульсных замеров к непрерывному управляющему воздействию, то следящий измеритель можно рассматривать как непрерывную линейную систему.

С учетом этого рассмотрим временные дискриминаторы, основанные на сравнении площадей от селектированных участков сигнала и отличающихся длительностью селекторных импульсов  $T_{сел}$ . Пусть  $T_{сел} = T_0$  – длительность видеоимпульса. (рис.4). Время задержки между селекторными импульсами  $T_0$ .

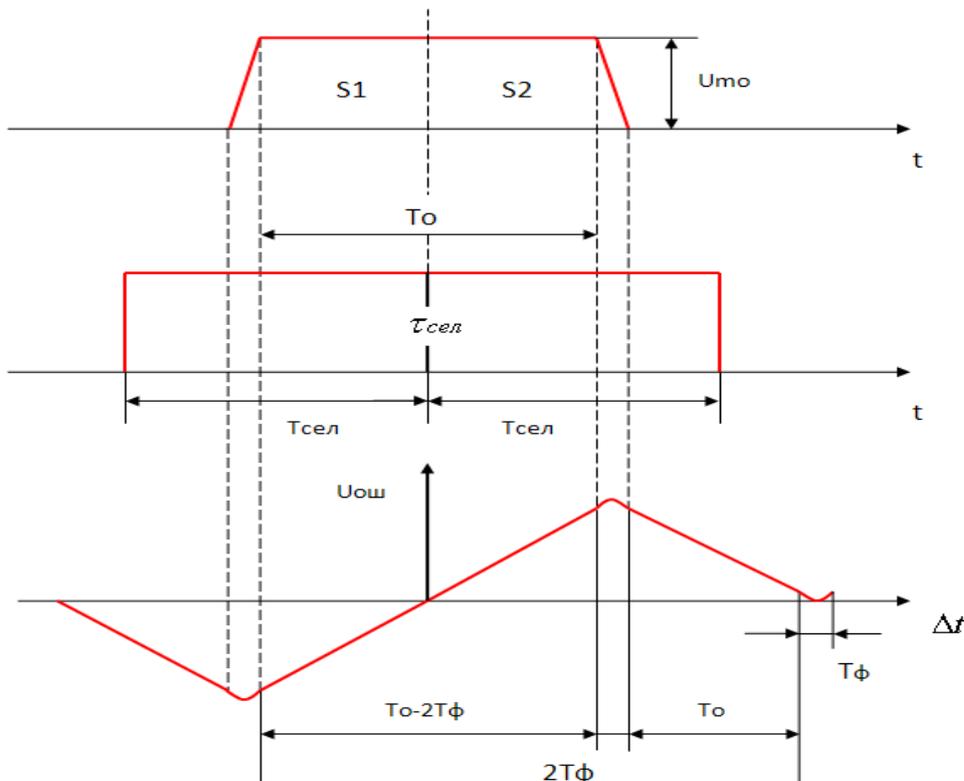


Рис.4

Сигнал ошибки можно представить в виде  $U_{ош} = k(S1 - S2)$ , где  $k$  – постоянный коэффициент.

На линейной части дискриминационной характеристики

$$U_{ouu} = 2kU_{mo}\Delta t, \quad (4)$$

Дисперсия флуктуаций на выходе временного дискриминатора прямо пропорциональна спектральной плотности шума  $N_o$  и общей длительности пары селекторных импульсов  $2T_o$  сел:

$$S_{\partial e}^2 = 2k^2 N_o T_o \quad (5)$$

Дисперсия эквивалентных временных флуктуаций определяется выражением для дисперсии оптимальной оценки запаздывания

$$S_t^2 = \frac{(S_q^2)}{(2kU_{mo})} = \frac{N_o T_o}{2U_{mo}^2} \quad (6)$$

Рассмотрим временной дискриминатор с длительностью селекторных импульсов  $T_o/2$ , и временной задержки между ними. Крутизна характеристики дискриминатора сохраняются такой же, как и в предыдущем случае. Дисперсия флуктуаций на выходе уменьшается в 2 раза. По этому в 2 раза уменьшается дисперсия эквивалентных временных флуктуаций и становится равной  $N_o T_o / 4U_{mo}^2$ . Протяженность линейной части характеристики сокращается до

$T_o$ , а апертура до  $2T_o$ . Таким образом, изменяя длительность селекторных импульсов и время задержки между ними можно изменять характеристику временного дискриминатора. А это позволяет найти оптимальное соотношение между параметрами временного дискриминатора:

- дисперсией  $S_{\tau}^2$  эквивалентных временных флуктуаций;
- протяженностью линейного участка характеристики;
- шириной апертуры.

Отметим, что среднеквадратичное отклонение  $S_{\tau}$  непосредственно сказывается на точности оценки дальности до цели:  $S_d = C S_{\tau}$ ,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с

### Порядок выполнения лабораторной работы

1.1. Запуск лабораторной работы.

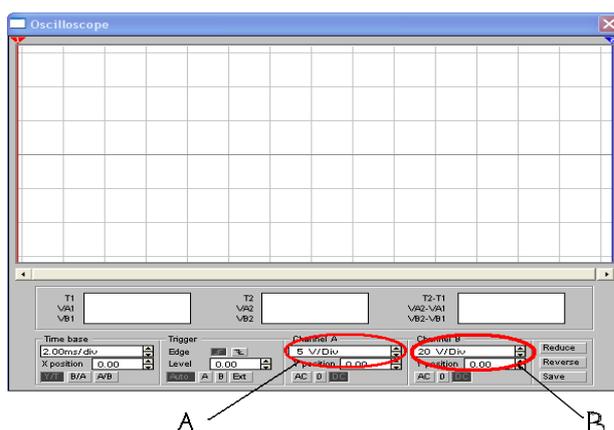
1.2. Выставить имитируемое расстояние согласно своему варианту и нажмите ПУСК. Запустится программа EWB со схемой радиодальномера и вашими параметрами схемы.

Шифр студента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Расстояние км	950	850	750	650	550	450	300	400	500	700
Задержка мсек	6.3	5.7	5	4.3	3.7	3	2	2.6	3.3	4.7
Напряжен. В.	63	57	50	43	37	30	20	26	33	47

### 1.3. Работа в программе Electronics Workbench.

Запуск схемы производится нажатием кнопки в правом верхнем углу. Графическое отображение сигналов можно просматривать с помощью двух канального осциллографа.

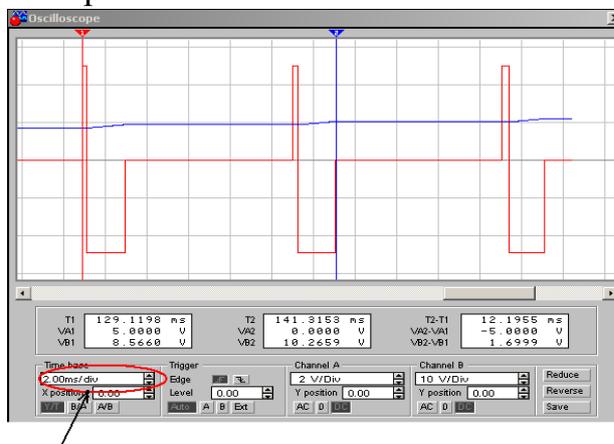
Для удобного просмотра на осциллографе можно изменять амплитуды измерительных каналов в отдельности друг от друга.



Так же можно изменять временную развертку для обоих каналов одновременно нажатием стрелочек вверх или вниз.

1.4. При установке большого времени измерения, порядка 0,05-0,1s, может возникать ошибка вычисления (усреднение измеряемого параметра).

Оптимальное время **2-5ms**.

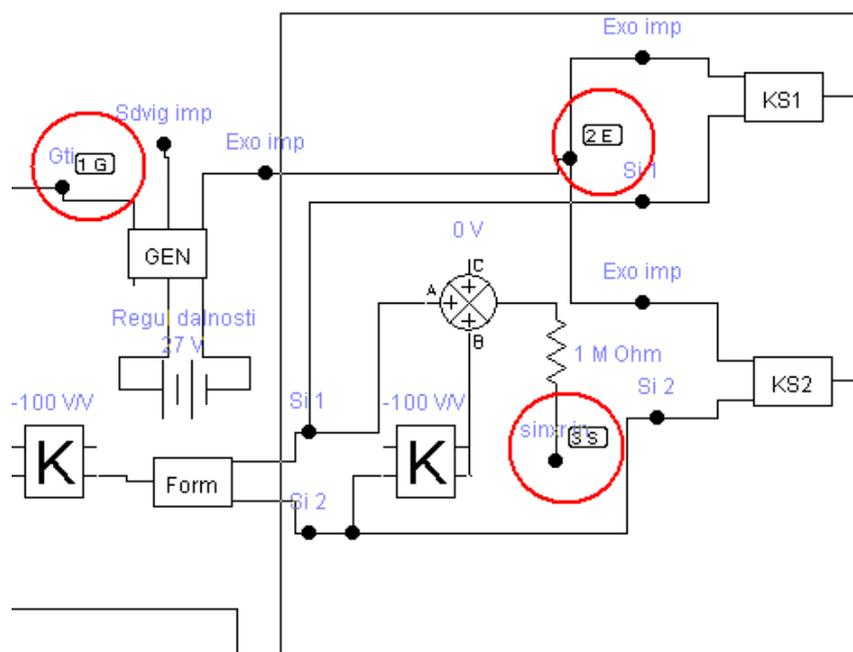


1.5 Просмотр сигналов (осциллограмм) в других точках производится простым перетаскиванием подходящего к осциллографу провода в любую точ-

ку схемы. Для удобного отображения каналов на дисплее осциллографа их можно задать разными цветами, двойным нажатием левой кнопкой мыши на подведенном к каналу осциллографу проводе и выбором любого из предложенных цветов.

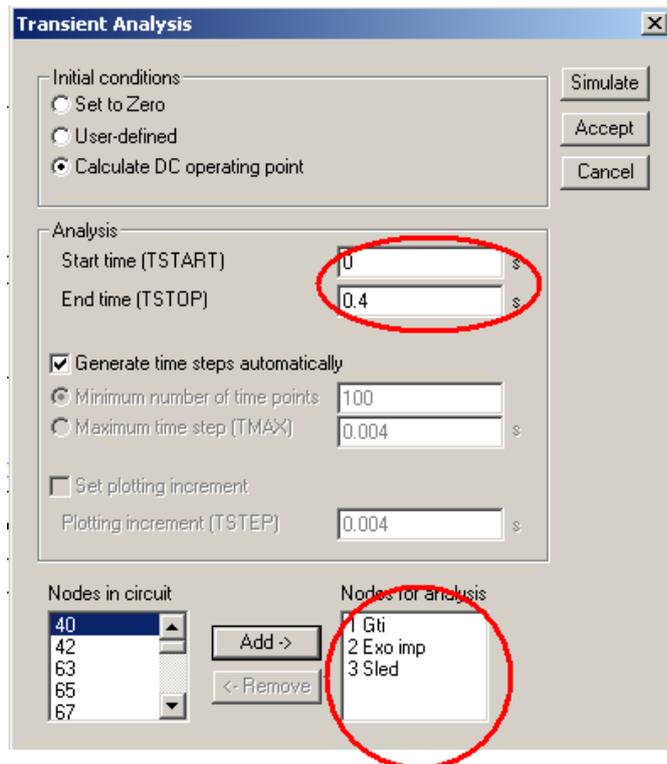
### 1.6. Временной анализ схемы по нескольким точкам одновременно.

Пример:



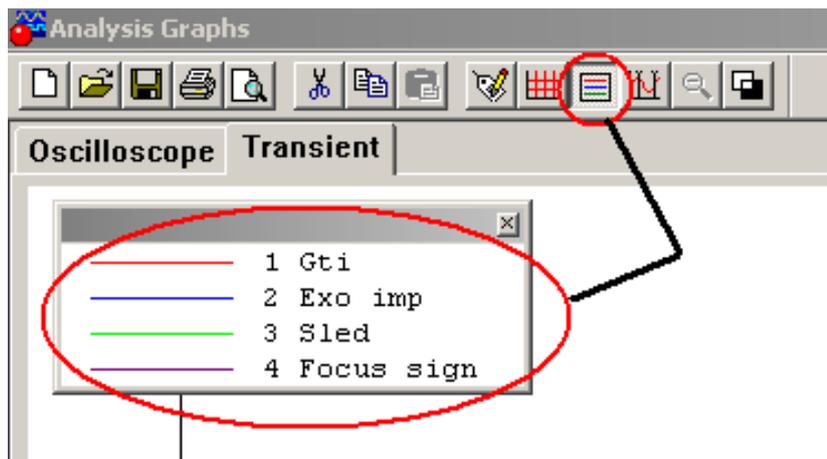
Выбираем в верхней части экрана вкладку ANALYSIS / Transient... появляется окно перед установкой параметров Transient Analysis. Где можно выставить время начала анализа Start time и окончания And time. Время начала лучше оставить нулевым, а время окончания не более 10 сек. достаточное для полной фокусировки радара на данное расстояние. Далее выбираются точки необходимые для проведения анализа с помощью кнопок Add (добавить) и Remove (удалить точку из отображаемых на графике).

На графике будут отображаться только те точки, которые выведены в правую колонку.

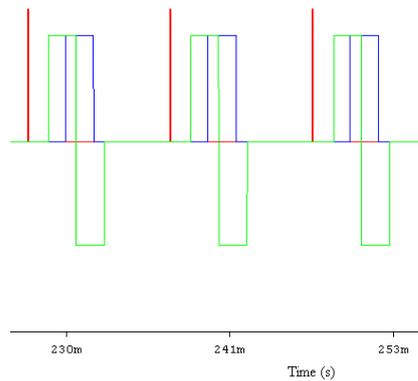
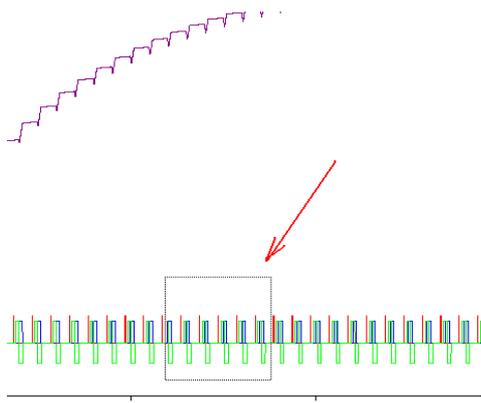


После выставления необходимых установок нажимаем **Simulate**.

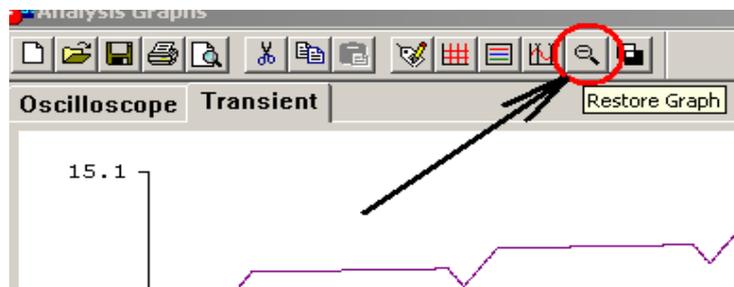
По завершении работы симулятора можно приступить к дальнейшему рассмотрению полученных графиков. Для начала включите таблицу принадлежности цветов к ранее выбранным точкам.



Для близкого рассмотрения отдельных участков графика нужно выделить этот участок, удерживая левую кнопку мыши и отпустить кнопку по достижении выделенной области нужного для вас размера.



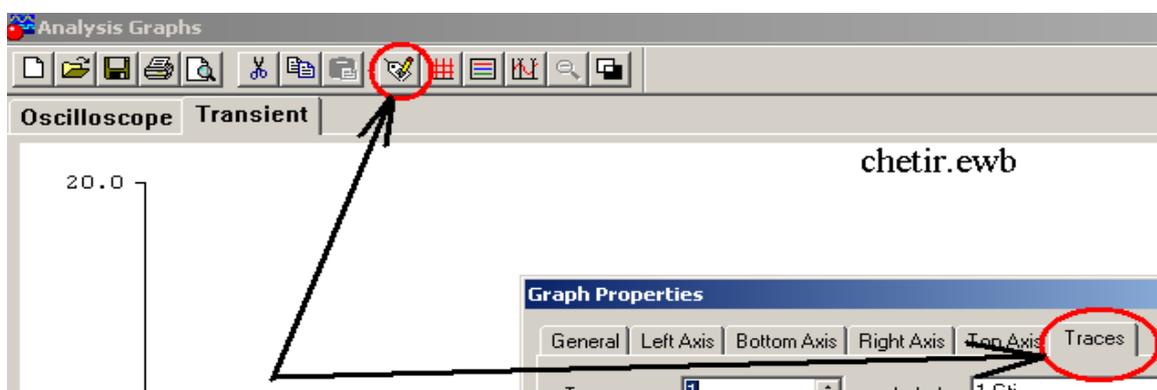
Возврат к первоначальному размеру производится нажатием кнопки.



1.7 Так же, для удобного рассмотрения некоторые сигналы можно выделить из общей массы путем разделения их по своим осям.

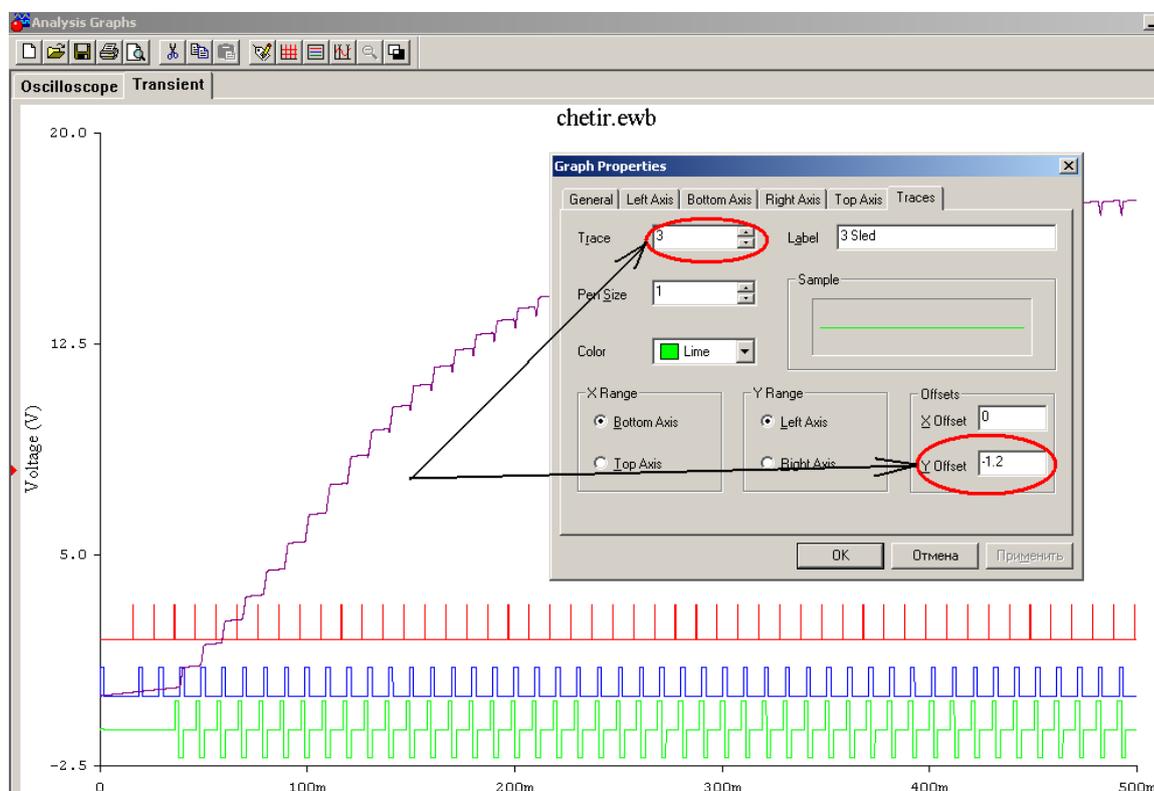
Например: Приподнять красный (эхо импульс) относительно нуля по оси Y, а зеленый (следящий) опустить в низ.

Нажатием кнопки Properties выводится окно графических настроек, в нем выбираем последнюю вкладку Traces.



В окне Graph Properties на поле trace выбираем нужный сигнал, далее на поле Y Offset набираем желаемое напряжение смещения по Y.

Аналогично поступаем со всеми сигналами, которые необходимо сдвинуть.



## 2. Наблюдение процессов в схеме дальномера без шума

2.1 Запустить схему без включенного шума, ознакомиться с принципиальной схемой и субблоками системы автоматического поиска и сопровождения импульсов (АПСИ), отраженных от зондирующей цели. Для этого подключая «Channel A» и «Channel B» к обозначенным выходам субблоков, наблюдать осциллограммы в различных блоках схемы. Для удобства просмотра, развертку луча (Time base) можно устанавливать применительно к каждому случаю подключения отдельно (см. пункт 1.3). Зарисовать осциллограммы сигналов в характерных (по Вашему мнению) точках схемы.

2.2 Наблюдать одновременно (синхронно) осциллограммы в нескольких точках одновременно с помощью Analysis Transient (см. пункт 1.5) или с помощью двухканального осциллографа.

2.2.1 После завершения построения графиков анализатором, полученные осциллограммы можно разнести по оси Y, следуя рекомендациям из (пункта 1.7).

2.2.2 Изменяя масштаб по оси времени (Time s) наблюдать процесс поиска сигнала:

- а) на начальном этапе до появления импульсов совпадения.

b) на этапе появления отдельных отрицательных импульсов совпадения (Impulse sovpaden), появившихся в результате совпадения следящих импульсов (Sled impulse) и эхо импульсов (Ехо imp).

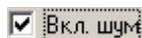
c) на этапе появления регулярных отрицательных импульсов .

d) на этапе появления вначале отдельных, а затем регулярных положительных импульсов.

e) Наблюдать осциллограмму на выходе интегратора, точка (5Focus parp), в интервале отображающем процесс автоматического поиска и слежения отраженных импульсов на оси времени.

### 3. Наблюдение процессов в схеме дальномера с шумом

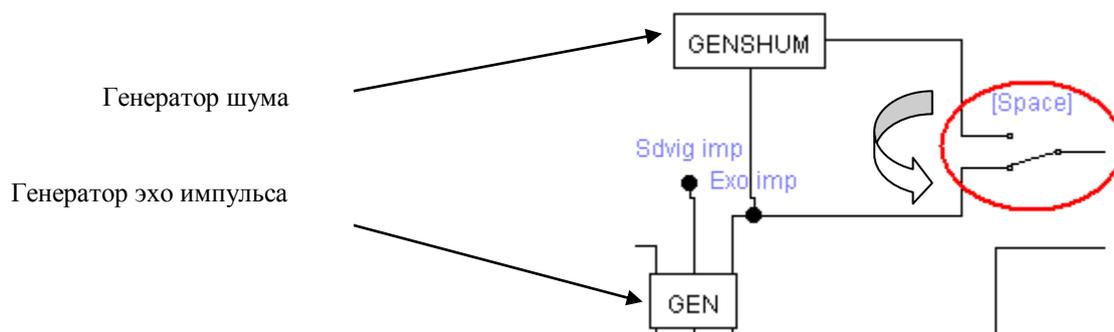
3.1 Наблюдать синхронные осциллограммы аналогично пункту 2, но уже с включенным генератором шума. Для этого закрыть схему, вкл. шум и запустить схему с шумом.



Провести сравнительный анализ осциллограмм (Ехо impuls, Impuls sovpaden) в п.п. 2.2 и 3.1 и сформулировать выводы.

3.2 Далее изменить апертуру системы.

a) Для этого отключить генератор шума от генератора эхо импульсов переключателем «Space» (пробел)



и установить на формирователе следящих импульсов длительность **0.5ms=5V**, с помощью регулятора длительности импульса (Regul dilute impulse) т.е. двойным щелчком открыть источник напряжения и выставить **5Вольт**.

b) Провести Analysis Transient (см. пункт 1.5)

3.3 Установить основные отличия осциллограммы на выходе интегратора (∫) от полученной ранее в пункте 2.

3.4 Полученные осциллограммы разнести по оси Y (см. п. 1.7) и проанализировать результаты наблюдения.

3.5 Установить экспериментальным путем предельное значение апертуры по предельному значению напряжения с точностью до сотых долей на ре-

гуляторе длительности импульса, при котором достигается стабилизация режима слежения за импульсом при данном уровне помехи. Выявить причину.

3.6 Изменить апертуру, установив напряжение на регуляторе длительности импульса  $15V=1.5ms$ . Сравнить осциллограммы на графиках.

***Указания по оформлению отчета***

Отчет должен содержать:

1. Схемы исследованных звеньев.
2. Принципиальные электрические схемы измерений характеристик.
3. Результаты теоретических расчетов и измерений, сведенные в таблицы.
4. Графики, построенные по результатам теоретических расчетов и измерений.
5. Сравнительную оценку полученных результатов и выводы.