

Министерство образования Российской Федерации

**НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

по курсу

ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Методические указания

Часть I

Для студентов дневной и вечерней
формы обучения специальности 200800

Нижний Новгород 2004

Составитель Свердлов Р.В.

УДК 681.511.2(076.5)

Основы автоматизации и системы автоматического управления: Метод. указания к лабораторным работам №№ 1, 2 /НГТУ; Сост.: Р.В. Свердлов. – Н. Новгород. 2004.- 43 с.

Приведены основные сведения из теории линейных непрерывных систем автоматического управления, необходимые для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Основы автоматизации и системы автоматического управления». Рассмотрены методы описания и анализа линейных непрерывных систем, их основные характеристики, методы их нахождения и синтеза с применением радиоэлектронных устройств, моделирование систем автоматического управления и снятие их параметров с помощью ЭВМ. Приведены требования к оформлению отчетов, даны рекомендации по выполнению работ, справочные материалы в виде приложений и указана необходимая литература.

Для студентов радиотехнических специальностей.

Рис. 29. Табл. 3. Библиогр. 7 назв.

Редактор: И. И. Морозова

Подписано к печати: --. --. 2004. Формат 60x84¹/16.

Бумага газетная. Печать офсетная.

Усл. печ. п. 2,5. Уч.-изд. л. 2. Тираж 50 экз. Заказ №

Нижегородский государственный технический университет.
Типография НГТУ. 603600, Н.Новгород, ул. Минина, 24.

© Нижегородский государственный
технический университет, 2004

1. Введение

Методические указания к лабораторным работам по курсу «Основы автоматизации и системы автоматического управления» составлены в соответствии с требованиями государственного образовательного стандарта по специальности 200800 «Конструирование и технология радиоэлектронных средств». Учитывая фундаментальность изучаемых в работах вопросов, методические указания могут быть успешно применены при подготовке студентов других радиотехнических специальностей.

В руководство включены 2 лабораторные работы, в которых рассматриваются вопросы математического описания линейных систем автоматического управления с сосредоточенными параметрами, исследования их частотных, статических, динамических и переходных характеристик и моделирования с помощью ЭВМ.

Лабораторные работы представляют единый комплекс по исследованию радиотехнической системы методами и средствами теории автоматического управления. Результаты предыдущей работы в обязательном порядке используются в последующей, что предопределяет порядок их выполнения.

Вначале представлен раздел «Краткие сведения из теории», в котором рассмотрены основные теоретические вопросы по теме. В разделе «Работа в программе» дана информация о работе программы *Electronics Workbench 5* в объеме, необходимом для выполнения работ.

Цель работ: изучение основных положений теории автоматического управления применительно к решению задач анализа и синтеза линейных систем, методов их экспериментального исследования с последующей обработкой результатов измерений, а также приобретения навыков моделирования с помощью ЭВМ.

Охрана труда. Лабораторные работы выполняются с помощью ЭВМ. Поэтому при выполнении работ необходимо руководствоваться правилами техники безопасности.

1. Включение ЭВМ, запуск программы производится только преподавателем или лаборантом.

2. Не приступать к выполнению работы, не убедившись в том, что все электронные приборы заземлены.

3. Не приступать к выполнению работы с приборами со снятыми кожухами, крышками.

4. Не опираться на приборы и не загромождать их посторонними предметами.

5. Учитывая излучение монитора, накапливаемую органами зрения усталость продолжительность работы на ЭВМ не должна превышать 4-х часов в сутки с перерывом 10 – 15 минут каждый час.

2. Краткие сведения из теории

2.1. Описание систем автоматического управления

Системы автоматического управления (САУ), применяемые в радиотехнических комплексах с целью стабилизации их характеристик, а также слежения за параметрами принимаемых радиосигналов, получили название систем радиоавтоматики (РА).

Пусть $X_1(t)$, $X_2(t)$ – выходные сигналы системы, реакции соответственно на входные сигналы $U_1(t)$, $U_2(t)$, $X(t) = AU(t)$. Если сигналу

$U(t) = c_1U_1(t) + c_2U_2(t)$, где $c_{1,2}$ – постоянные коэффициенты, соответствует сигнал $X(t) = c_1X_1(t) + c_2X_2(t)$, то система называется линейной, т.е. осуществляется принцип суперпозиции $A[c_1U_1 + c_2U_2] = c_1AU_1 + c_2AU_2$.

Линейные системы описываются линейными дифференциальными уравнениями (ДУ), в которых неизвестные и все их производные входят в первой степени и нет произведения неизвестных. Если система описывается ДУ, то она непрерывная (непрерывное изменение входного сигнала соответствует непрерывному изменению выходного).

Рассмотрим линейную непрерывную стационарную систему с сосредоточенными параметрами. Система описывается ДУ, связывающим входной и выходной сигналы:

$$a_0 X^{(n)} + a_1 X^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} X + a_n = b_0 U^{(m)} + b_1 U^{(m-1)} + \dots + b_m, \quad (1)$$

где $X^{(n)}(t) = d^n X / dt^n$. Порядок уравнения n , значения постоянных коэффициентов a_i, b_j , где $(i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m)$, полностью определяются параметрами системы.

При записи ДУ классическим способом:

$$p^n = d^n / dt^n; \quad 1/p = \int \dots dt \quad \text{Запись ДУ:}$$

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) X(t) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m) U(t).$$

Здесь p рассматривают как обычную алгебраическую величину, на которую распространяются обычные арифметические действия.

2.2. Преобразования Лапласа

$F(s)$ – прямое преобразование Лапласа от $f(t)$: $L[f(t)] = F(s)$.

Обратное преобразование Лапласа: $L^{-1}[F(s)] = f(t)$.

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt; \quad f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s) e^{st} ds. \quad (2)$$

Здесь s – переменная Лапласа: $s = c + j\omega$, где $c = \text{Re}(s)$. Преобразование Лапласа позволяет свести решение ДУ к решению обычного уравнения: операции дифференцирования и интегрирования оригиналов заменяют операциями умножения и деления изображений.

$$L[df(t)/dt] = sF(s); \quad L[f^{(n)}(t)] = s^n F(s); \quad L\left[\int_0^t f(t)dt\right] = F(s)/s.$$

Решение ДУ с помощью преобразований Лапласа:

1. Находим изображения входных воздействий:

$L[X(t)] = X(s)$, $L[U(t)] = U(s)$. Тогда ДУ запишется:

$$(a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n)X(s) = (b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_m)U(s) + R_0(s),$$

где R_0 – член, учитывающий начальные условия.

2. Находим решение данного алгебраического уравнения в виде

$$X(s) = \frac{B(s)U(s) + R_0(s)}{A(s)}.$$

3. Определяем оригинал с помощью обратного преобразования Лапласа:

$$X(t) = L^{-1}[X(s)].$$

Свойства прямого и обратного преобразования Лапласа, оригиналы и изображения необходимых для выполнения работы воздействий представлены в раздаточном материале, предоставляемом преподавателем для выполнения лабораторной работы, а также [3], П1, П2, П3. С. 205 – 223.

2.3. Динамические характеристики системы

1. Переходная характеристика: $h(t) = X(t)$ при $U(t) = 1(t)$.

Реакция системы на единичное ступенчатое воздействие $1(t)$, которое является наиболее неблагоприятным режимом работы. По переходной характеристике определяют показатели качества.

Время переходного процесса: $t_{\text{пт}}$ – минимальное время, при котором переходная функция входит в трубку точности и больше из нее не выходит. Трубка точности 2δ , где $\delta = 0.05h_{\text{уст}}$.

Перерегулирование: $\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} * 100\%$.

В установившемся режиме ДУ становится $a_n X(t) = b_m U(t)$, поэтому

$$h_{\text{уст}} = b_m / a_n.$$

2. Импульсно-переходная функция: $k(t) = X(t)$ при $U(t) = \delta(t)$. Реакция системы на импульсное воздействие (на дельта-функцию $\delta(t)$). Определяется через переходную функцию: $k(t) = dh(t) / dt$.

3. Передаточная функция (ПФ). Отношение преобразования Лапласа выходной величины к преобразованию Лапласа входной величины при нулевых начальных условиях.

$$W(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n} \quad (3)$$

Типовая структурная схема линейной непрерывной САУ

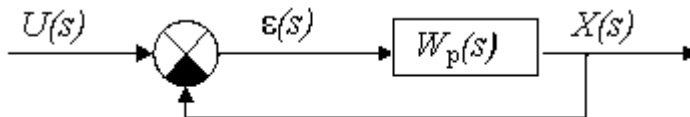


Рис 1

Связь между ПФ разомкнутой системы $W_p(s)$ и ПФ замкнутой системы $W_3(s)$ можно найти, используя систему уравнений

$$\begin{aligned} \varepsilon(s) &= U(s) - X(s), \\ X(s) &= \varepsilon(s) W_p(s). \end{aligned} \quad (4)$$

Отсюда найдем ПФ замкнутой системы:

$$W_{\text{уз}}(s) = \frac{\varepsilon(s)}{U(s)} = \frac{1}{1 + W_p(s)}, \quad W_3(s) = W_{\text{ух}}(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)}. \quad (5)$$

Представив в (5) $W_p(s)$ в виде отношения двух полиномов, ПФ замкнутой системы можно привести к виду (3).

Если переменную s в (5) заменить на $j\omega$, получим соответствующие комплексные частотные характеристики.

2.4. Частотные характеристики (ЧХ)

Подадим на вход гармонический сигнал: $U(t) = U_{\max} \cos \omega t$; на выходе $X(t) = X_{\max} \cos(\omega t - \varphi)$.

Запишем гармонический сигнал: $U(t) = U_m e^{j\omega t}$.

Решение ДУ состоит из двух частей: $X(t) = X_{\text{св}}(t) + X_{\text{вын}}(t)$.

$X_{\text{св}}(t) = \sum_n C_i e^{p_i t}$, где p_i - корни характеристического уравнения:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0.$$

$X_{\text{вын}}$ ищем в виде. $X_{\text{вын}} = X_m e^{j\omega t}$, где X_m – постоянный вектор.

Поставим $X_{\text{вын}}$ в ДУ. Решение:

$$X(t) = (b_0(j\omega)^m + \dots + b_m) U_m e^{j\omega t} / (a_0(j\omega)^n + \dots + a_n).$$

$X_{\text{вын}}$ характеризует установившееся состояние.

Это можно обозначить: $X(t) = W(j\omega)U(t)$, где $W(j\omega)$ - комплексная частотная характеристика системы (КЧХ). Получается из ПФ заменой s на $j\omega$:

$W(j\omega) = X(j\omega) / U(j\omega)$. Представим КЧХ в виде

$$W(j\omega) = A(\omega) \{ \cos\varphi(\omega) + j \sin\varphi(\omega) \} = P(\omega) + jQ(\omega), \quad (6)$$

где

$P(\omega) = \text{Re}\{W(j\omega)\} = A(\omega)\cos\varphi(\omega)$ – вещественная ЧХ (ВЧХ);

$Q(\omega) = \text{Im}\{W(j\omega)\} = A(\omega)\sin\varphi(\omega)$ – мнимая ЧХ (МЧХ);

$W(s) \rightarrow W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$, где $A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), показывающая изменение амплитуды выходного сигнала $X(t)$ при изменении частоты $U(t)$ при его постоянной амплитуде; $\varphi(\omega)$ – фазочастотная

характеристика (ФЧХ), дает зависимость сдвига фаз входного и выходного сигнала при изменении частоты входного. На практике АЧХ и ФЧХ снимают при нулевых начальных условиях и после прекращения переходных процессов.

КЧХ можно изобразить на комплексной плоскости в виде

$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$, где $P(\omega)$ – вещественная частотная характеристика (ВЧХ), $Q(\omega)$ – мнимая частотная характеристика (МЧХ).

Линия на комплексной плоскости $W(j\omega)$, образуемая точками КЧХ при изменении частоты ω от 0 до ∞ , называется годографом или амплитудно-фазовой частотной характеристикой (АФЧХ) $A(\varphi)$. Тогда

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}; \quad \varphi(\omega) = \arctg Q(\omega)/P(\omega).$$

2.5. Логарифмические частотные характеристики

Представляют собой зависимость: $20 \lg A(\omega)$ от $\lg(\omega)$ – ЛАХ, $\varphi(\omega)$ от $\lg(\omega)$ – ЛФХ.

Если мощность пропорциональна квадрату амплитуды, то:

$$10 \lg \frac{N_2}{N_1} = 10 \lg \frac{U_2^2}{U_1^2} = 20 \lg \frac{U_2}{U_1}.$$

Значениям $L < 0$ соответствуют значения $0 < A < 1$, $L = 0$ – $A = 1$, $L > 0$ – $A > 1$. Единицей измерения логарифмической величины является декада – интервал, на котором крайние значения величины отличаются друг от друга в 10 раз. Если равномерная ось частот $0 < \omega < \infty$ – полубесконечная, то логарифмическая ось $-\infty < \lg(\omega) < \infty$ – бесконечная, поэтому начальные значения ЛЧХ при $\omega = 0$ отсутствуют. Принято ось $L(\omega)$ проводить через частоту $\omega = 1$, где $\lg \omega = 0$. Единица измерения логарифмической амплитуды – бел (Б); декада по оси $L(\omega)$ равна 20 дБ.

Точка пересечения ЛАХ и оси ω называется частотой среза. В ней $20 \lg A(\omega_{cp}) = 0$.

На практике строят асимптотическую ЛАХ – отрезки прямых линий, соединенные в частотах сопряжения.

2.6. Правила построения асимптотической ЛАХ

ПФ схемы получается последовательным соединением нескольких звеньев, ПФ звеньев при этом перемножаются.

1. Откладывают на оси частот в порядке возрастания все сопрягающиеся частоты отдельных звеньев.

2. Строят НЧ асимптоту, представляющую собой прямую переходящую через точку $20 \lg K_p$ на оси $20 \lg A$, где K_p – коэффициент усиления разомкнутой системы, с наклоном $\pm 20 \lg v$, где v – число дифференцирующих (+) и интегрирующих (–) звеньев.

3. Строят отрезки асимптот между сопрягающимися частотами, наклон каждого последующего участка по сравнению с предыдущим изменяется на

± 20 дБ/дек для звеньев 1-го порядка,

± 40 дБ/дек для звеньев 2-го порядка: (+) для функций, у которых передаточные функции в числителе, (–) в знаменателе.

Для уточнения вида ЛАХ нужно рассчитать величину характеристики в точке сопряжения и при небольших отклонениях от нее:

$$L(\omega_{cp}), L(\omega_{cp} + \Delta\omega), L(\omega_{cp} - \Delta\omega).$$

2.7. Типовое динамическое звено

Типовым динамическим звеном называется звено, обладающее детектирующим свойством (т.е. его выходной сигнал не влияет на вход) и описываемое ДУ не выше 2-го порядка. Виды типовых динамических звеньев:

- безынерционный усилитель нулевого порядка с ПФ $W(s)=K$;
- дифференцирующее звено первого порядка с ПФ $W(s)=Ks$;

- форсирующее звено первого порядка с ПФ $W(s)=K(1+Ts)$;
- интегрирующее звено первого порядка с ПФ $W(s)=K/s$;
- апериодическое звено первого порядка с ПФ $W(s)=K/(1+Ts)$;
- форсирующее звено второго порядка с ПФ $W(s)=K(1+2\xi Ts+T^2s^2)$;
- колебательное звено второго порядка с ПФ $W(s)=K/(1+2\xi Ts+T^2s^2)$;
- звено чистого запаздывания с ПФ $W(s)=K e^{-\tau s}$.

Последовательность построения ЧХ типовых звеньев с ПФ $W(s)=B(s)/A(s)$ покажем на **примере** звена с $W(s)=K/(1+Ts)$:

1) получим КЧХ, сделав замену в ПФ $s \rightarrow j\omega$:

$$W(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} = \frac{P_B(\omega) + jQ_B(\omega)}{P_A(\omega) + jQ_A(\omega)} = \frac{K}{-1 + jT\omega};$$

2) получим ВЧХ и МЧХ, умножив $B(j\omega)$ и $A(j\omega)$ на комплексно-сопряженный полином $A(-j\omega)$:

$$W(j\omega) = \frac{(P_B(\omega) + jQ_B(\omega))(P_A(\omega) + jQ_A(\omega))}{P_A^2(\omega) + Q_A^2(\omega)} = P(\omega) + jQ(\omega) = \frac{-K - jKT\omega}{1 + T^2\omega^2}.$$

Построим графики ВЧХ $P(\omega)$ и МЧХ $Q(\omega)$:

$$P(\omega) = \frac{P_B(\omega)P_A(\omega) + Q_B(\omega)Q_A(\omega)}{P_A^2(\omega) + Q_A^2(\omega)} = \frac{-K}{1 + T^2\omega^2},$$

$$Q(\omega) = \frac{Q_B(\omega)P_A(\omega) - P_B(\omega)Q_A(\omega)}{P_A^2(\omega) + Q_A^2(\omega)} = \frac{-KT\omega}{1 + T^2\omega^2};$$

3) построим годограф $W(j\omega)$ как функцию $Q(P)$ при изменении ω от 0 до ∞ :

$$(P + K/2)^2 + Q^2 = (K/2)^2;$$

4) построим в равномерном масштабе графики АЧХ и ФЧХ:

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} = |K| / \sqrt{1 + T^2 \omega^2},$$

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{Q(\omega)}{P(\omega)}\right) = \begin{cases} \arctg(T\omega) & \text{при } K < 0, \\ \arctg(T\omega) - 180^\circ & \text{при } K > 0, T > 0, \\ \arctg(T\omega) + 180^\circ & \text{при } K > 0, T < 0; \end{cases}$$

5) построим асимптотические ЛАЧХ $L(\omega)$ и ЛФЧХ $\varphi(\omega)$ на интервале частот $0.1\omega_c < \omega < 10\omega_c$, где происходят основные изменения ЛЧХ.

Основные характеристики типовых динамических звеньев представлены в раздаточном материале и в литературе [3], табл. 2.2, с. 50-52.

2.8. Соединения звеньев САУ

Звенья могут быть соединены последовательно, параллельно и с обратной связью. Последняя может быть положительной и отрицательной.

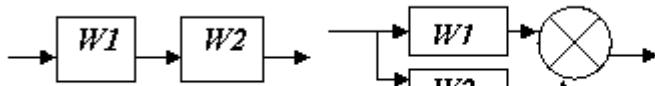


Рис 2

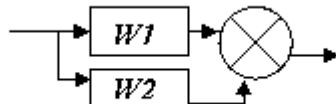


Рис 3

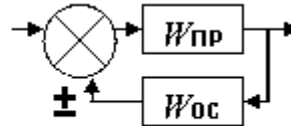


Рис 4

Последовательное соединение (рис. 2)

$$\text{ПФ: } W(s) = \prod_{i=1}^n W_i(s); \quad (7)$$

$$\text{КЧХ: } W(j\omega) = \prod_{i=1}^n W_i(j\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega) \exp(j\varphi_i(\omega));$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega); \quad \text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega);$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega).$$

Параллельное соединение (рис. 3)

$$\text{ПФ: } W(s) = \sum_{i=1}^n W_i(s); \quad (8)$$

$$\text{КЧХ: } W(j\omega) = \sum W_i(j\omega) = \sum P_i(\omega) + j \sum Q_i(\omega) = P(\omega) + jQ(\omega);$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}; \quad \text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = \arctg Q(\omega)/P(\omega);$$

$$\text{ЛАХ: } L(\omega) = 20 \lg A(\omega).$$

Соединение с обратной связью (рис. 4)

Для разомкнутой системы

$$\text{ПФ: } W_p(s) = W_{np}(s)W_{oc}(s) = P_p(s) + Q_p(s); \quad (9)$$

$$\text{КЧХ: } W_p(j\omega) = A_{np}(\omega) \exp(j\varphi_{np}(\omega)) A_{oc}(\omega) \exp(j\varphi_{oc}(\omega));$$

$$\text{АЧХ: } A_p(\omega) = A_{np}(\omega)A_{oc}(\omega); \quad \text{ФЧХ: } \varphi_p(\omega) = \varphi_{np}(\omega) + \varphi_{oc}(\omega).$$

Для замкнутой системы:

$$\text{ПФ: } W_3(s) = \frac{W_{np}(s)}{1 \mp W_{np}(s)W_{oc}(s)}; \quad (10)$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = |W(j\omega)| = \frac{|W_{np}(j\omega)|}{|1 \mp W_{np}(j\omega)W_{oc}(j\omega)|} = \frac{A_{np}(\omega)}{\sqrt{(1 \mp P_p(\omega))^2 \mp Q_p^2(\omega)}};$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = \varphi_{np}(\omega) - \arctg \frac{\pm Q_p(\omega)}{1 \pm P_p(\omega)};$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg A_{np}(\omega) - 20 \lg \sqrt{(1 \pm P_p^2(\omega))^2 \pm Q_p^2(\omega)}.$$

Для единичной ОС $W_{oc}(s) = 1$.

Преобразования структурных схем представлены в табл. 3.

2.9. Конструирование схем САУ на операционных усилителях

Операционный усилитель (ОУ) – это аналоговое устройство усиления разности $\Delta U = U - \bar{U}$ напряжений на его прямом (U) и инверсном (\bar{U}) входах:

$U_{\text{ВЫХ}} = K_y \Delta U$. Реальные ОУ имеют параметры: коэффициент усиления разностного сигнала $K = 10^4 \div 10^6$; входное сопротивление $R_{\text{ВХ}}$ K_y от 300 кОм до 10 ГОм, выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}} = 10 \div 300$ Ом. В расчетах можно считать ОУ идеальным: $K_y = \infty$, $R_{\text{ВХ}} = \infty$, $R_{\text{ВЫХ}} = 0$, $e_{\text{др}}=0$, при этом $U = \bar{U}$, $I_{\text{ВХ}} = 0$, $I_{\text{ВЫХ}} = \infty$. Это означает: потенциальное равенство напряжений входов ОУ, но не физическое их соединение; выходной ток идеального ОУ не ограничен величиной сопротивления нагрузки, токовую развязку каскадов на ОУ друг от друга.

Обозначим: x – входной сигнал ОУ, y – выходной сигнал ОУ.

Некоторые простейшие схемы на ОУ с ООС:

1. Пропорциональный неинвертирующий усилитель (рис. 5):

$y = x + R_0(x/R_1) = (1+R_0/R_1)x = Kx$, коэффициент усиления $K = 1+R_0/R_1$.

2. Пропорциональный инвертирующий усилитель (рис. 6):

$y = -R_0(x/R_1) = -(R_0/R_1)x = -Kx$,

коэффициент усиления $K = R_0/R_1$.

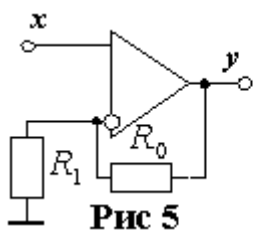


Рис 5

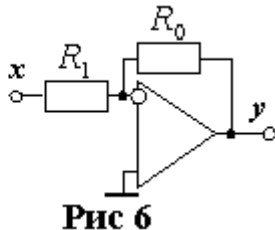


Рис 6

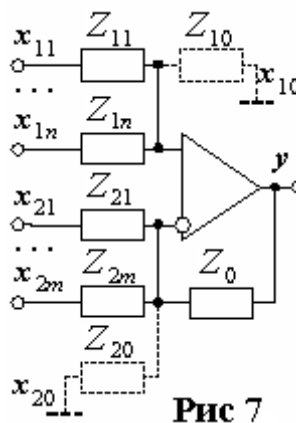


Рис 7

Рассмотрим каскад на ОУ с ООС (рис. 7).

Напряжение U , а по аналогии и \bar{U} :

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{x_{1j}}{Z_{1j}}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{Z_{1j}}}, \quad \bar{U} = \frac{\left(\sum_{j=1}^m \frac{x_{2j}}{Z_{2j}} + \frac{y}{R_0} \right)}{\left(\sum_{j=1}^m \frac{1}{Z_{2j}} + \frac{1}{Z_0} \right)}$$

Так как в идеальном ОУ $U = \bar{U}$, то из последних выражений следует:

$$y = \left(\sum_{j=1}^m \frac{Z_0}{Z_{2j}} + 1 \right) \sum_{j=1}^n \frac{x_{1j}}{Z_{1j}} / \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{Z_{1j}} - \sum_{j=1}^m \frac{Z_0}{Z_{2j}} \right) x_{2j}.$$

Рассматриваемая схема выполняет n операций сложения и m операций вычитания подаваемых на ее входы напряжений:

$$\begin{cases} y = \sum_i W_{1i}(s)x_{1i}(t) - \sum_i W_{2i}(s)x_{2i}(t), \\ W_{1i}(s) = \left(\sum_j \frac{Z_0(s)}{Z_{2j}(s)} + 1 \right) / \sum_j \frac{Z_{1i}(s)}{Z_{1j}(s)}, W_{2i}(s) = \frac{Z_0(s)}{Z_{2i}(s)}. \end{cases} \quad (11)$$

Обозначим суммы ПФ по прямым (1) и инверсным (2) входам:

$S_{1(2)}(s) = \sum W_{1(2)i}(s)$. Тогда

$$S_1 = \left(\sum_j \frac{Z_0}{Z_{2j}} + 1 \right) \sum_i \frac{1}{Z_{1i}} / \sum_j \frac{1}{Z_{1j}} = S_2 + 1. \quad (12)$$

Для синтеза схемы необходимо дополнить $S_1(s)$ и (или) $S_2(s)$ недостающими ПФ $W_{10}(s)$ и (или) $W_{20}(s)$ с положительными коэффициентами для выполнения условия $S_1(s) + W_{10}(s) = S_2(s) + 1 + W_{20}(s)$ при заземленных входах $x_{10} = 0$ и (или) $x_{20} = 0$.

$Z_{1j}(s)$ и $Z_0(s)$ независимы. Определим остальные сопротивления:

$$Z_{1i}(s) = W_{1j}(s)Z_{1j}(s)/W_{1i}(s) \forall i \neq j, Z_{2i}(s) = Z_0(s)/W_{2i}(s). \quad (13)$$

Пассивными компонентами схем на ОУ являются резисторы R , конденсаторы C , индуктивности L и их соединения. Операторные сопротивления радиоэлементов $Z(s)$: $Z_R = R$, $Z_C = 1/Cs$, $Z_L = Ls$.

Последовательное и параллельное соединения элементов Z_1 и Z_2 имеют сопротивления $Z_1 + Z_2$ и $Z_1 \parallel Z_2 = Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$.

Сопротивления $Z_{1i}(s)$, $Z_{2i}(s)$ и $Z_0(s)$ выбираются произвольно, но так, чтобы они соответствовали соединениям пассивных радиоэлементов, схема имела минимальное число навесных деталей и, желательно, не содержала индуктивностей.

Пример. Дано: $y = W_{11}(s)x_{11} + W_{12}(s)x_{12}$ с ПФ $W_{11}(s) = \frac{1+2s}{1+s}$ и $W_{12}(s) = \frac{1}{1+s}$. Тогда $S_1(s) = 2$ и $S_2(s) + 1 = 1$. Так как $S_1(s) \neq S_2(s) + 1$, то добавляем заземленный вход x_{20} с передаточной функцией $W_{20}(s) = S_1(s) - S_2(s) - 1 = 1$. Выбираем $Z_{11}(s) = 1/C_{11}s$, тогда $Z_{12}(s) = Z_{11}(s)W_{11}(s)/W_{12}(s) = (1+2s)/C_{11}s$ – последовательное соединение $R_{12} = 2/C_{11}$ и $C_{12} = C_{11}$. Выбираем $Z_0(s) = R_0$, тогда сопротивление заземленного инверсного входа равно $Z_{20}(s) = Z_0(s)/W_{20}(s) = R_0$. Получаем схему, представленную на рис. 8.

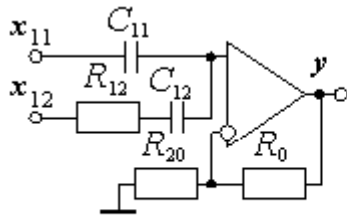


Рис 8

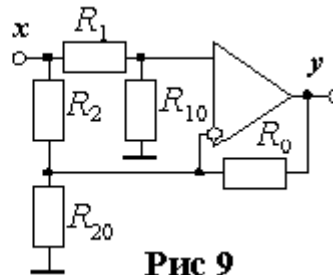


Рис 9

1. Одноходовый усилитель (рис. 9) с коэффициентом усиления

$$K = \frac{1 + R_0/R_2 + R_0/R_{20}}{1 + R_1/R_{10}} \frac{R_0}{R_2}.$$

Выбором сопротивлений получаем любое значение K в диапазоне $-R_0/R_2 \leq K \leq 1 + R_0/R_{20}$, в том числе:

- инвертирующего усилителя (рис. 10, а) $K = -R_0/R_2 < 0$;

- неинвертирующего усилителя-делителя (рис. 10, б)

$$K = (1 + R_0/R_{20}) / (1 + R_1/R_{10}) > 0;$$

- делителя напряжения (рис. 10, в) $0 < K = R_{10} / (R_1 + R_{10}) < 1$;

- усилителя напряжения (рис. 10, з) $K = 1 + R_0/R_{20} > 1$;

- повторителя напряжения (рис. 10, д) $K = 1$. Используется для развязки каскадов схемы друг от друга благодаря параметрам $R_{вх} = \infty$ и $R_{вых} = 0$.

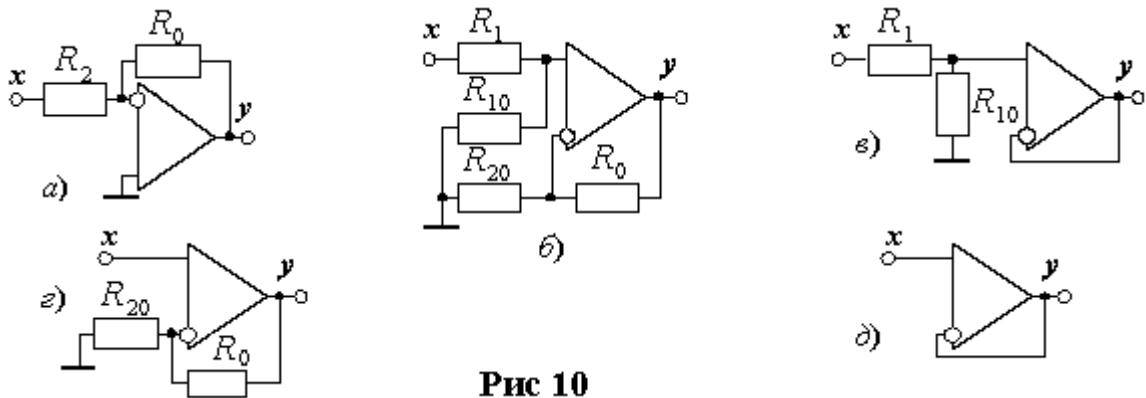


Рис 10

2. Усилитель-вычитатель (рис. 11), выполняющий операцию

$$y = K_1 x_1 - K_2 x_2 \text{ с коэффициентами } K_1 = \frac{1 + R_0/R_2}{1 + R_1/R_{10}} \text{ и } K_2 = \frac{R_0}{R_2}. \text{ При } \frac{R_0}{R_2} = \frac{R_{10}}{R_1} = K$$

он становится дифференциальным усилителем: $y = K(x_1 - x_2)$. При $R_1 = R_{10}$ и $R_2 = R_0$ получим вычитатель: $y = x_1 - x_2$.

3. Неинвертирующий усилитель-сумматор (рис. 12), выполняющий опера-

цию $y = \sum_{i=1}^n K_i x_i$ со всеми положительными коэффициентами $K_i = \frac{1 + R_0/R_{20}}{\sum_j R_i/R_j + R_i/R_{10}}$.

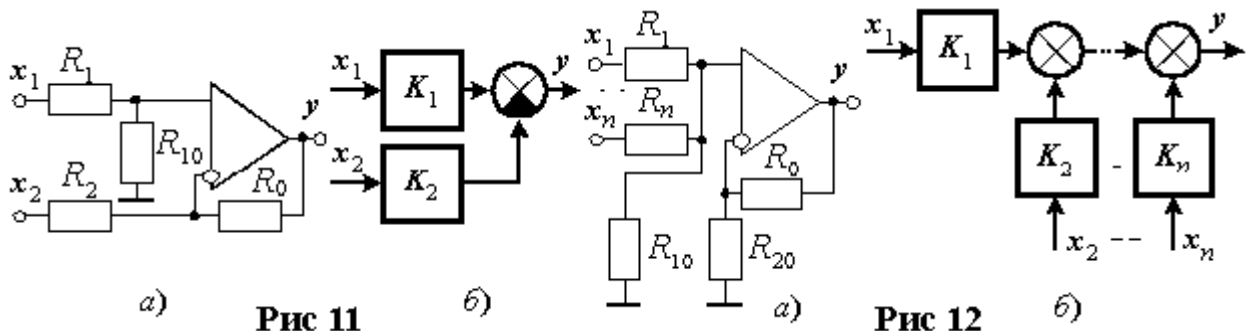


Рис 11

Рис 12

Синтез схемы по заданным K_i : $R_i = \frac{R_{10}}{K_i}$ и $R_{20} = \frac{R_0}{\sum_i K_i}$.

Выбором сопротивлений можно получить устройства усреднения $y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ (рис. 13, а) и суммирования $y = \sum x_i$ (рис. 13, б) входных напряжений.

4. Инвертирующий усилитель-сумматор (рис. 14), выполняющий операцию вычитания $y = -\sum K_i x_i$ с коэффициентами $K_i = R_0/R_i$. Синтез схемы: $R_i = R_0/K_i$.

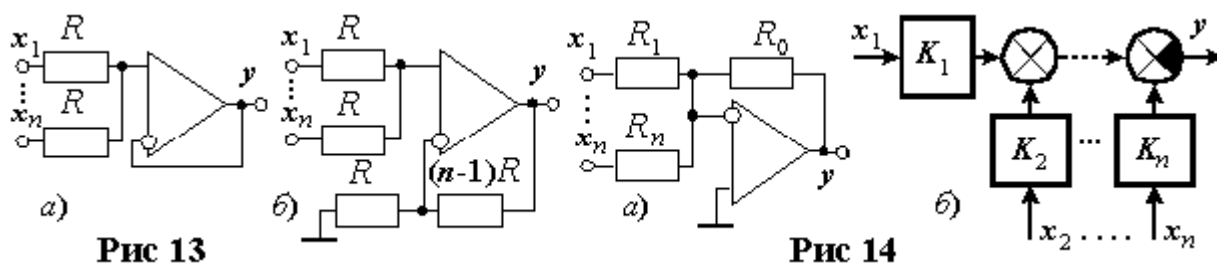


Рис 13

Рис 14

Типовые схемы каскадов на ОУ и их ПФ приведены в раздаточном материале или [3], табл. 1.3, с. 34-36. Примененные здесь условные обозначения:

$$r_{ij} = R_i/R_j, \quad c_{ij} = C_i/C_j, \quad T_{ij} = R_i C_j, \quad \tau_{ij}^2 = L_i C_j, \quad \theta_{ij} = L_i/R_j.$$

Дополнительные схемы каскадов можно получить при $r_{ij} = 0$ выбором $R_i = 0$ (провод) или $R_j = \infty$ (разрыв), при $c_{ij} = 0$ выбором $C_i = 0$ (разрыв) или $C_j = \infty$ (провод) и при $\theta_{ij} = 0$ выбором $L_i = 0$ (провод) или $R_j = \infty$ (разрыв).

Если задана сложная ПФ, для которой в табл. 1.3 нет нужной схемы, то можно соединять каскады последовательно. **Правило.** Два последовательных каскада из второго и третьего столбцов с ПФ $W_2(s)$ и $W_3(s)$ можно заменить одним каскадом с ПФ $W_2(s)W_3(s)$. Это возможно благодаря развязке входной цепи от цепи в ОС. При этом сопротивления верхнего (неинвертирующего) входа соответствуют столбцу 2, сопротивления нижнего (инвертирующего) входа – столбцу 3.

В таблице нет ни одной схемы неминимально-фазового элемента, чья ПФ имеет полином $A(s)$ с правыми корнями и отрицательными коэффициентами. Та-

кие элементы только на ОУ с ООС реализованы быть не могут и конструируются как системы с ПОС, то есть неустойчивые. В устойчивых схемах положительная обратная связь недопустима.

3. Материально-техническое обеспечение работ

Для выполнения лабораторных работ № 1 и 2 необходимо наличие компьютеров класса не ниже *Pentium-1* в количестве, соответствующем числу студентов в одной подгруппе, с установленной программой *Electronics Workbench 5*, и литературных источников.

4. Лабораторная работа № 1

Изучение характеристик каскадов САУ

Цель работы: изучение методов описания и анализа функций и характеристик типовых динамических звеньев, методов нахождения основных характеристик, установление связи между частотными и временными параметрами звеньев, методов синтеза каскадов САУ и снятия их параметров.

Задания к лабораторной работе и порядок ее выполнения

1. Получить задание у преподавателя. В задание входит: структурная схема устройства, выбираемая из табл. 1 по номеру варианта, передаточные функции звеньев устройства, выбираемая из таблицы 2, числовые значения передаточных функций звеньев, указанные в таблице 1: коэффициенты усиления K , постоянные времени T , коэффициенты затухания ξ .

Пример.

Задана структурная схема, приведенная на рис. 15:

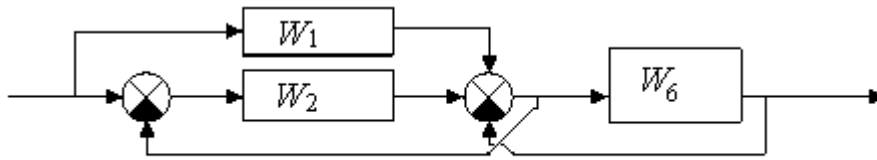


Рис 15

Указано: W_1 (10), W_2 (1), W_6 (11, 1, 0.25). Здесь

$W_1 = K = 10$ ($K = 10$), $W_2 = Ks = s$ ($K = 1$),

$$W_6 = \frac{K}{1 + 2\xi Ts + T^2 s^2} = \frac{11}{1 + 0.5s + s^2} \quad (K = 11, T = 1, \xi = 0.25)$$

2. Для каждого звена структурной схемы построить реализацию на операционных усилителях, пользуясь раздаточным материалом и правилами, указанными в п. 2.9. Для этого по указанной передаточной функции установить вид типового динамического звена, определить реализацию звена на ОУ (см. табл. 1.3 раздаточного материала). Установление требуемых параметров звена достигается изменением активного и реактивного сопротивления прямой и обратной цепей принципиальной схемы звена. Реализацию каждого звена структурной схемы необходимо выполнить однокаскадной, с применением одного ОУ. Перед переходом к дальнейшему выполнению работы результат выполнения пункта предоставить преподавателю для проверки.

Пример

Задана передаточная функция W_4 (4, 2). По таблице 2 определяем:

$K = 4$, $T = 2$,

$$W(s) = \frac{K}{1 + Ts} = \frac{4}{1 + 2s}.$$

Данная передаточная функция достигается последовательным соединением двух каскадов: $W(s) = W_1(s)W_2(s)$,

$$\text{где } W_1(s) = 4, \quad W_2(s) = \frac{1}{1 + 2s}.$$

Находим $W_2(s)$: усилительный каскад, табл. 1.3, строка 1, столбец 3.

$$W(s) = 1 + R_0/R_1.$$

Вид принципиальной схемы

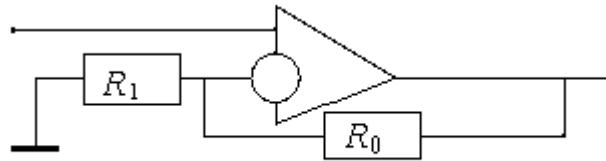


Рис 16

Подбираем сопротивления ветвей:

$$1 + R_0/R_1 = 4, \quad R_0/R_1 = 3, \quad R_0 = 3R_1.$$

Выбираем $R_0 = 3$ кОм, $R_1 = 1$ кОм.

Находим $W_1(s)$: апериодическое звено первого порядка, табл. 1.3, строка 2, столбец 2.

$$W(s) = \frac{1}{1 + T_0 s} = \frac{1}{1 + R_0 C_1 s}.$$

Вид принципиальной схемы

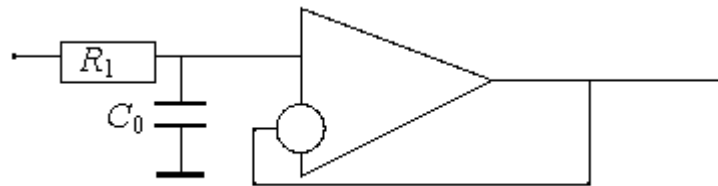


Рис 17

Подбираем сопротивления ветвей:

$$T = 2, \quad R_1 C_0 = 2. \text{ Выбираем } R_1 = 2 \text{ МОм, } C_0 = 1 \text{ мкФ.}$$

Двухкаскадная реализация схемы: последовательное соединение первой и второй схем.

$$W(s) = W_1(s) W_2(s),$$

что представлено на рис. 18.

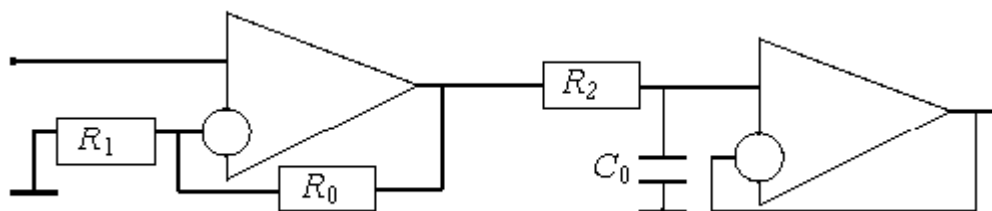


Рис 18

Для однокаскадной реализации воспользуемся правилом, указанным на стр. 18: объединим пассивные элементы схем, расположенные во входной цепи и цепи ОС (см. рис. 19).

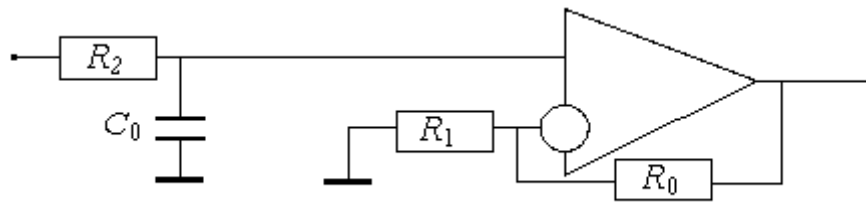


Рис 19

3. Для каждого звена заданной структурной схемы построить частотные характеристики: комплексную ЧХ (КЧХ) $W(j\omega)$, амплитудно-частотную $A(\omega)$, фазочастотную $\varphi(\omega)$, логарифмическую АЧХ $L(\omega)$. Вид ЧХ типовых динамических звеньев приведен в таблице 2.2 раздаточного материала или [3], с. 50 – 52.

3.1. Найти КЧХ $W(j\omega)$: заменить в передаточной функции каждого звена s на $j\omega$. Построить годограф КЧХ на комплексной плоскости, подставляя в выражение $W(j\omega)$ несколько (5 – 6) значений частоты в пределах от 0 до ∞ .

3.2. Определить вещественную и мнимую составляющие КЧХ: ВЧХ $P(\omega)$ и МЧХ $Q(\omega)$, $W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$. Построить графики полученных характеристик.

3.3. Найти амплитудно-частотную характеристику:

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}.$$

Построить график АЧХ.

3.4. Найти фазочастотную характеристику $\varphi(\omega)$:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}.$$

Построить график ФЧХ.

3.5. Найти логарифмическую АЧХ: $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$.

Построить график асимптотической ЛАЧХ.

С сохранением той же частотной оси построить график ЛФЧХ.

Для построения графиков частотных характеристик необходимо составить таблицу, содержащую данные: частота f (Гц), циклическая частота

$\omega = f / 2\pi$ (рад/с), АЧХ $A(\omega)$ рассчитанная, $A(\omega)$ измеренная, ЛАЧХ $L(\omega)$ (дБ) рассчитанная, $L(\omega)$ измеренная, ЛФЧХ $\varphi(\omega)$ (град) рассчитанная, $\varphi(\omega)$ измеренная. Измеренные значения поставить после выполнения п. 4.

Выборка частот должна содержать особенную для данного звена частоту: для интегрирующих и дифференцирующих звеньев это частота, при которой $L(\omega) = 0$, для апериодических и форсирующих звеньев – частота перегиба ЛАЧХ (частота сопряжения асимптот), для колебательных звеньев – частота резонанса. Обозначим ее f_0 . Другие частоты, включаемые в таблицу:

$f_{\min} = 0.1 f_0$; $f_{\max} = 10 f_0$; $f_{\text{ср}}$ – частота среза звена (если она существует). Для точности построения графиков желательно взять также несколько частот, расположенных между указанными.

После заполнения таблицы и построения графиков перед переходом к дальнейшему выполнению работы результат по п. 3 предоставить преподавателю для проверки.

4. Смоделировать полученные в п. 2 схемы звеньев на компьютере, в программе *Electronics Workbench 5.0*. (Работа в программе – см. с. 26.) Построить те же графики, что и в п. 3: АЧХ, ЛАЧХ, ФЧХ, ЛФЧХ.

4.1. Смоделировать в программе исследуемое звено. Подключить на вход звена генератор синусоидальных колебаний. Действующее значение напряжения выходного сигнала генератора (входного сигнала схемы) устанавливается 0.7 В, что соответствует амплитуде сигнала 1 В. При этом амплитуда выходного сигнала схемы соответствует величине $A(\omega)$ в вольтах. На выход схемы подключается построитель ЧХ (*Bode Plotter*). От выхода генератора необходимо провести параллельный провод, подключенный к осциллографу. Соединение с выходом генератора осуществляется через точку *In* прибора, соединение с выходом звена – через точку *Out*. Для снятия характеристик панель прибора необходимо развернуть соответствующей кнопкой. Частота сигнала в режиме построения ЧХ задается на панели прибора (п. 4.2.).

Пример

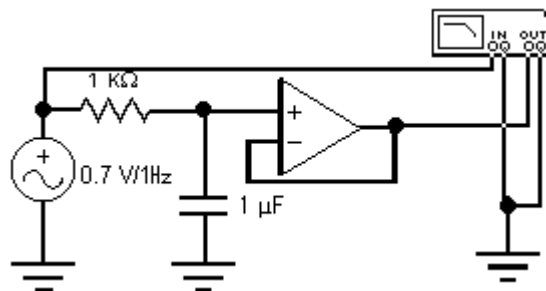


Рис 20

4.2. Произвести предварительную настройку построителя ЧХ. Для этого в пп. 3.3, 3.5 найти вид ожидаемых ЧХ и частоты, в диапазоне которых будет производиться построение f_0 , f_{min} , f_{max} . Выставить частотный интервал прибора в соответствии с этими частотами.

Пример

Дано: постоянная времени звена $T = 2$ с. Определим частоту сопряжения $f_{соп} = 1/2\pi T = 0.08$ Гц $= f_0$. $f_{min} = 0.1 f_0 = 0.008$ Гц, $f_{max} = 10 f_0 = 0.8$ Гц. Ставим на шкале прибора: верхняя граница частот 1 Гц, нижняя граница 1 мГц.

4.3. Включить схему. Прибор строит на экране обыкновенную $A(\omega)$ и логарифмическую $L(\omega)$ амплитудно-частотные характеристики, обыкновенную и логарифмическую фазочастотные характеристики. Для переключения вида снимаемых ЧХ прибор имеет соответствующие положения переключателя. Снять на бумагу графики ЧХ для включения в отчет.

4.4. Снять данные по АЧХ, ЛАЧХ, ФЧХ, ЛФЧХ на частотах f_0 , f_{min} , f_{max} , $f_{ср}$. Частота требуемой точки характеристики задается движком на шкале прибора и нажатием кнопок на панели управления. При этом на экране прибора движется линия, перпендикулярная оси частот, пересекающая график АЧХ. В соответствующем окне шкалы выводятся показания частоты и амплитуды. При достижении нужной частоты показания прибора занести в таблицу, составленную в п. 3.

5. Снять временные графики процессов звеньев.

5.1. Подключить на выход схемы осциллограф. Осциллограф является двухканальным. На один канал подается сигнал с выхода схемы, на второй канал – с выхода генератора. Необходимо изменить цвет провода, соединяющего вы-

ход генератора с осциллографом, при этом цвет графика сигнала, снимаемого с этого провода, будет соответствовать цвету провода.

5.2. Произвести настройку схемы.

А) Установить выходное действующее напряжение генератора, соответствующее амплитуде 1 В. **Внимание!** Если коэффициент усиления звена превышает 20, требуется установить напряжение генератора, соответствующее амплитуде 0.1 В, т.к. в программе заложено напряжение питания операционных усилителей 20 В, и при амплитуде 1 В результаты будут неправильными. Изменение входного напряжения следует учесть в дальнейших расчетах.

Б) Установить частоту выходного сигнала генератора, соответствующую требуемым точкам ($f_0, f_{\min}, f_{\max}, f_{\text{ср}}$). Настроить осциллограф согласно ожидаемым показаниям по времени, амплитуде, частоте. Выставить шаг по времени (горизонтальная ось), позволяющий разместить несколько периодов колебаний на экране. Экран осциллографа содержит 14 клеток (шагов) по горизонтальной оси, панель имеет кнопки для изменения шага и шкалу с его указанием.

В) Выставить шаг по амплитуде (вертикальная ось), соответствующий амплитуде входного и выходного сигналов звена. Экран содержит 6 клеток по вертикальной оси, панель имеет кнопки для изменения шага отдельно по каналам А и В и шкалы с его указанием.

Г) Выставить число временных точек на экране: в окне настроек убрать автоматическую генерацию временного шага, в окне на панели поставить число временных точек порядка 1000. Это позволяет получить более гладкий, приближенный к реальному график.

5.3. Запустить схему. Полученные графики включить в отчет. Получить результаты измерения амплитуды выходного сигнала и его фазового сдвига на выбранных частотах. Экран осциллографа имеет два движка, наведение которых на участок графика вызывает вывод результатов измерения напряжения в данной точке графика (в данный момент времени) в обоих каналах в соответствующие каналы окна. Сдвиг фазы измеряется по сдвигу графиков входного и выходного сигналов схемы, например, между максимумами синусоид. При этом $\Delta\varphi = \Delta t 2\pi f$,

где Δt – сдвиг между максимумами по времени. Измерения следует производить при достижении схемой установившегося режима, что видно по форме графика.

Результаты измерения заносятся в таблицу, составленную в п. 3.

6. Определить формулы переходной и импульсно-переходной характеристик каждого звена.

Определение переходной характеристики:

$$h(s) = W(s)L[1(t)] = W(s)/s, \quad h(t) = L^{-1}[h(s)] = L^{-1}[W(s)/s],$$

где

$h(t)$ – переходная характеристика звена,

$h(s)$ – изображение по Лапласу переходной характеристики,

$1(t)$ – единичная ступенчатая функция,

L, L^{-1} – прямое и обратное преобразование Лапласа.

Определение импульсно-переходной характеристики:

$$k(s) = W(s)L[\delta(t)] = W(s), \quad k(t) = L^{-1}[k(s)] = L^{-1}[W(s)],$$

где

$k(t)$ – импульсно-переходная характеристика звена,

$k(s)$ – изображение импульсно-переходной характеристики,

$\delta(t)$ – дельта-функция.

Для нахождения прямых и обратных преобразований Лапласа можно воспользоваться раздаточным материалом ([3], табл. П1, П2, П3, с. 205 – 223) и справочной литературой.

7. Построить на модели переходные процессы каждого звена. Для этого на вход схемы подать сигнал с импульсного источника питания, на выход поставить осциллограф. Перед включением схемы приборы настроить.

7.1. При снятии переходной характеристики сигнал с импульсного источника питания должен соответствовать единичной ступенчатой функции: установить амплитуду 1 В, скважность 100%, частоту следования импульсов, гарантирующую окончание переходного процесса и выход в установившийся режим до появления следующего импульса (например, 0.01 Гц). Настройки осциллографа должны соответствовать ожидаемому сигналу: по вертикали – согласно коэффи-

циенту усиления звена, по горизонтали – не меньше времени переходного процесса (обычно $t_{\text{пт}} \approx 3T$).

7.2. При снятии импульсно-переходной характеристики сигнал должен соответствовать дельта-функции, которую необходимо смоделировать с учетом возможностей программы и исследуемого звена. Дельта-функция обладает единичной энергией: $\Delta T A = 1$, где ΔT – длительность импульса, A – его амплитуда. ΔT должно быть много меньше постоянной времени T звена: например, $T = 2$ с, выбираем $\Delta T = 0.1$ с. Находим $A = 1/\Delta T = 10$ В. Минимально возможная скважность программы 1 % – устанавливаем ее. Частота следования импульсов: $\Delta T = 0.1$ с = 1 %, $f = 1/(\Delta T * 100) = 0.1$ Гц.

Полученные характеристики снять на бумагу и включить в отчет. По полученным характеристикам получить показатели качества звеньев: установившееся значение $h(\infty)$, время переходного процесса $t_{\text{пт}}$, перерегулирование $\sigma\%$, частота собственных колебаний f_p , число колебаний в переходном процессе. Для нахождения $t_{\text{пт}}$ необходимо определить трубку точности с помощью измерительного движка осциллографа и время, в течение которого переходной процесс достигает данного значения.

Пункты 2, 3, 6, исходные данные для подпунктов 4.2, 5.2, пункта 7 желательно выполнить дома, до выполнения остальных пунктов работы. По результатам выполнения перечисленных пунктов преподаватель принимает решение о допуске студента к дальнейшему выполнению работы.

5. Варианты заданий

Таблица 1. Структурные схемы

1		$W_6 (11,1, 0.25)$ $W_2 (K)$ $W_1 (10)$ >0 $(0, 0.51) - (19.45, \infty)$
2		$W_6 (11,1, 0.25)$ $W_2 (K)$ $W_1 (10)$ >0 $(0, 0.51) - (19.45, \infty)$
3		$W_1 (K)$ $W_2 (10)$ $W_6 (1, 1, 0.5)$ $-\infty, +\infty$ $(-2, 21.1)$
4		$W_6 (10, 1, 0.05)$ $W_2 (K)$ $W_1 (1)$ >0 $(0, 0.01) - (99.89, +\infty)$
5		$W_6 (K, 10, 0.1)$ $W_5 (10, 1)$ $W_1 (10)$ $-\infty, +\infty$ $(-11, 24.28)$
6		$W_4 (10, 10)$ $W_5 (K, 1)$ $W_3 (1)$ $(0, 1.11)$ $(-\infty, -1) - (0, +\infty)$
7		$W_1 (10)$ $W_6 (1, 1, 0.1)$ $W_5 (K, 10)$ $(-\infty, -4.41) - (8, +\infty)$ $(-\infty, -1) - (0, +\infty)$

Продолжение табл. 1

8		$W_{4-1} (10, 1)$ $W_5 (K, 1)$ $W_{4-2} (1, 10)$ $(-\infty, -0.498) - (8, +\infty)$ $(-\infty, -1) - (0, +\infty)$
9		$W_6 (1, 10, 0.1)$ $W_1 (10)$ $W_5 (1, 10)$ $(-\infty, -13.07) - (0, +\infty)$ $(-\infty, -1) - (0, +\infty)$
10		$W_6 (10, 10, 0.2)$ $W_1 (10)$ $W_5 (K, 10)$ $(-\infty, -1/11) - (0, +\infty)$ $(-\infty, -0.09) - (0.000447) -$ $- (0.066, +\infty)$
11		$W_4 (4, T)$ $W_2 (10)$ $W_5 (0.1, 10)$ $(0, +\infty)$ $(-\infty, -9.352) - (-0.648, 0)$
12		$W_6 (10, 10, 0.1)$ $W_2 (1)$ $W_1 (K)$ $(-1, +\infty)$ $(-1, 0.2846)$

Окончание табл. 1

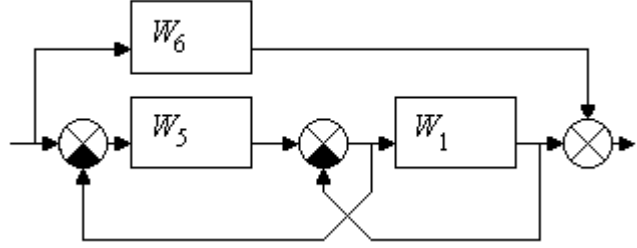
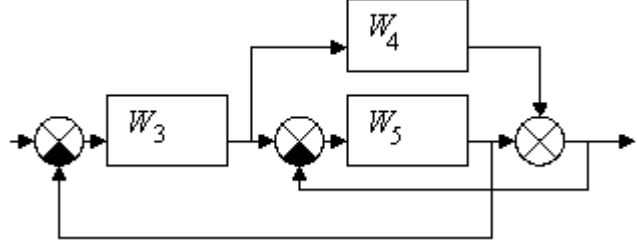
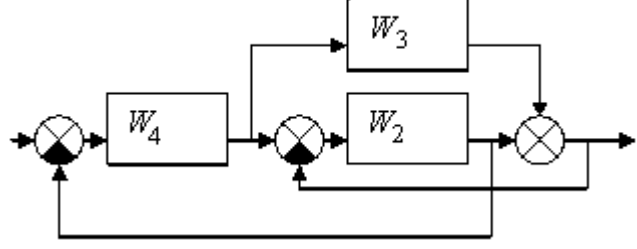
13		$W_6 (K, 5, 0.1)$ $W_5 (1, 1)$ $W_1 (10)$ $(-\infty, +\infty)$ $(-1.83, 4.55)$
14		$W_4 (3, 1)$ $W_3 (10)$ $W_5 (1, T)$ Отсутствует $(0, 2.109)$
15		$W_3 (K)$ $W_4 (10, 14)$ $W_2 (2)$ $(-\infty, 0.09)$ $(0, 0.04)$

Таблица 2. Передаточные функции звеньев

$W_1(s) = K$	$W_2(s) = Ks$	$W_3(s) = K/s$
$W_4(s) = \frac{K}{1+Ts}$	$W_5(s) = K(1+Ts)$	$W_6(s) = \frac{K}{1+2\xi Ts + T^2 s^2}$

6. Вопросы для подготовки к работе № 1

1. Приведите классификацию систем автоматического управления и поясните различия замкнутого и разомкнутого принципов управления.
2. Дайте определение структурной схемы и типового динамического звена.
3. Приведите классификацию типовых динамических звеньев. Запишите их передаточные функции.
4. Назовите свойства преобразования Лапласа, применяемые в ТАУ.
5. Дайте определение передаточной функции, перечислите ее основные свойства.
6. Как определить передаточную функцию системы, если задано ее дифференциальное уравнение.
7. В чем заключается принцип суперпозиции для линейных систем?
8. Как определить передаточную функцию системы с несколькими входами и выходами?
9. Дайте определение переходной функции, назовите основные показатели качества системы. Как они связаны?
10. Дайте определение импульсно - переходной функции. Как ее найти?
11. Назовите виды частотных характеристик систем. Как они связаны?
12. Как найти частотную характеристику системы по ее передаточной функции?

7. Лабораторная работа № 2

Анализ и синтез линейных систем автоматического управления

Цель работы: научиться находить передаточную функцию САУ по заданным звеньям, проводить анализ характеристик САУ теоретическими и практическими методами, синтезировать САУ с заданными свойствами на базе радиоэлементов, изучить влияние изменения параметров элементов на свойства системы.

Задания к лабораторной работе и порядок ее выполнения

1. Получить задание у преподавателя. В задание входит: структурная схема устройства, выбираемая из табл. 1 по номеру варианта, передаточные функции звеньев устройства, выбираемая из табл. 2, числовые значения передаточных функций звеньев, указанные в табл. 1: коэффициенты усиления K , постоянные времени T , коэффициенты затухания ξ . Один из параметров схемы задан буквой. В левой колонке таблицы указаны пределы изменения этого параметра, в которых данная система является устойчивой. Студенту необходимо выбрать данный параметр в указанных пределах. В качестве структурной схемы желательно использовать ту же схему, что и в предыдущей работе, для возможности воспользоваться при выполнении ее результатами.

Пример

Задана структурная схема

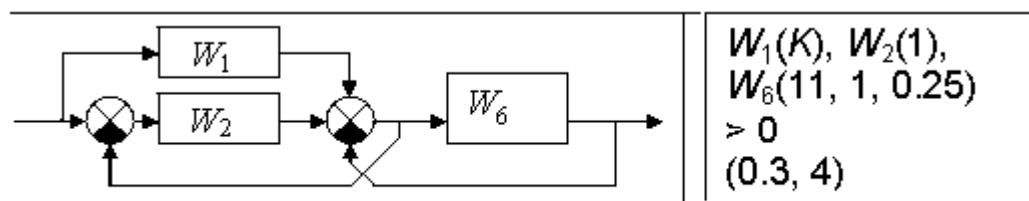


Рис 21

Здесь

$$W_1 = K_1 \text{ (переменный параметр)}, W_2 = K_2 s = s \quad (K_2 = 1),$$

$$W_6 = \frac{K}{1 + 2\xi Ts + T^2 s^2} = \frac{11}{1 + 0.5s + s^2} \quad (K_3 = 11, T = 1, \xi = 0.25)$$

Пределы изменения K_1 : разомкнутая система устойчива при $K_1 > 0$, замкнутая система устойчива при $0.3 \leq K_1 \leq 4$.

2. Найти передаточную функцию схемы, используя передаточные функции звеньев и правила преобразования структурных схем (табл. 3). Обозначить найденную функцию $W_p(s)$ – передаточная функция разомкнутой системы.

3. Замкнуть схему единичной отрицательной обратной связью. Найти передаточную функцию замкнутой системы $W_3(s)$.

Пример

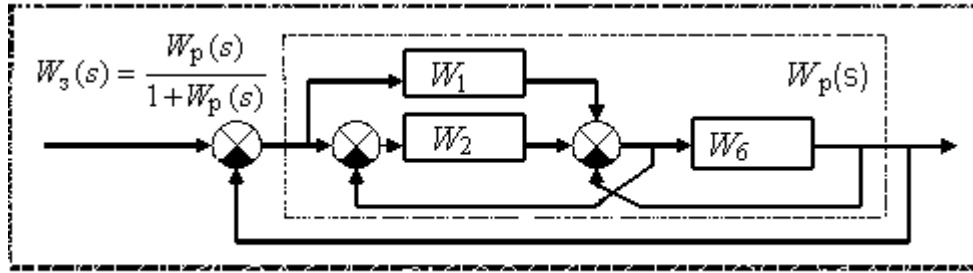


Рис 22

4. Построить реализацию схемы на операционных усилителях, для чего можно использовать реализации звеньев, полученные в предыдущей работе. Для сумматоров, указанных в задании, необходимо построить реализации на ОУ (см. п. 2.9.).

5. Выполнить для разомкнутой и замкнутой систем пункты 3 – 7 предыдущей работы. При этом особыми частотами являются частоты сопряжения асимптот звеньев схемы, частота среза схемы, а также крайние частоты:

$f_{\min} = 0.1 f_{\text{соп min}}, f_{\max} = 10 f_{\text{соп max}}$, где $f_{\text{соп min}}, f_{\text{соп max}}$ – минимальная и максимальная частоты сопряжения асимптот ЛАЧХ исследуемой схемы.

8. Вопросы для подготовки к работе № 2

1. Назовите основные виды соединений звеньев. Запишите формулы для вычисления результирующих передаточных функций.
2. Запишите частотные характеристики соединений звеньев.
3. Объясните основные правила структурных преобразований.
4. Как по передаточной функции системы синтезировать ее структурную схему? Приведите пример.
5. Как по передаточной функции системы построить ее асимптотическую ЛАЧХ? Приведите пример.
6. Дайте характеристику установившегося и переходного режимов работы САУ. Как найти установившийся режим для данной системы?

7. Дайте определение установившейся ошибки, статической и динамической точности системы.

8. Дайте определение статического коэффициента передачи. Как связаны передаточная функция системы и статический коэффициент передачи?

9. В чем отличие статических и астатических систем?

10. Как найти порядок астатизма?

11. Как оценить точность системы при действии гармонического сигнала?

9. Содержание отчетов

Отчеты по лабораторным работам 1 и 2 должны содержать: номер варианта, задание; расшифровку передаточных функций каскадов; передаточную функцию системы и ее расчет (работа № 2); частотные характеристики каскадов и системы и их вывод; расчетные графики ЧХ; определение особых частот; таблицу (см. п. 3.5 описания работы №1), включающую данные: особые частоты, величины ЧХ расчетные, величины ЧХ измеренные с помощью построителя ЧХ, величины ЧХ измеренные с помощью осциллографа; расчет переходной и импульсно-переходной характеристик каскадов (работа № 1); графики ЧХ, переходных процессов, вынужденных колебаний, снятые в программе.

Лабораторные работы принимаются при представлении отчетов, моделей в программе и защите результатов.

10. Приложения

10.1. Работа в программе

Сокращения: ЛКМ – левая кнопка мыши, ПКМ – правая кнопка мыши.

Для моделирования систем автоматического управления на операционных усилителях использована программа *Electronics Workbench 5.0*. Главное меню программы:

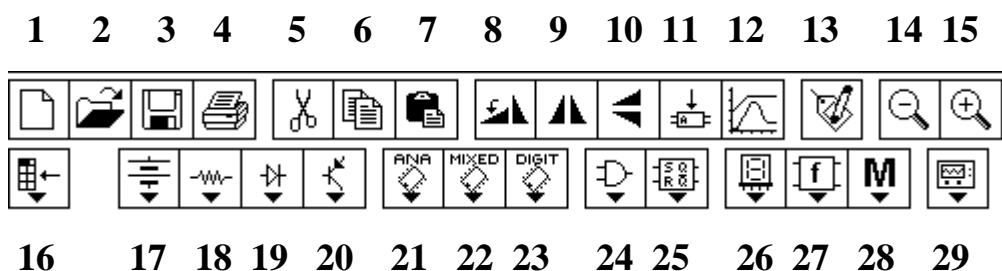


Рис 23

Выбор нужного элемента: развернуть данный пункт меню, щелкнув ЛКМ на соответствующей картинке, найти требуемый элемент, навести на него курсор, нажать ЛКМ и, удерживая ее, подвести элемент в нужную точку чертежа. **Перемещение элемента:** навести курсор на элемент, нажать ЛКМ и, удерживая ее, переместить элемент. Элемент можно повернуть, для чего используется значок 8 (*Rotate*). Для этого нужно отметить данный элемент, щелкнув на нем ЛКМ, подвести курсор к значку 8, и щелчками ЛКМ на нем добиться требуемого расположения элемента. Отмеченный щелчком элемент изменит свой цвет на красный. При достижении элементом нужного положения требуется щелкнуть ЛКМ на свободном поле чертежа, при этом элемент закрепляется и становится черным. Можно также применить горизонтальный (значок 9, *Flip Horizontal*) и вертикальный (значок 10, *Flip Vertical*) перевороты элемента. **Удаление элемента:** отметить элемент щелчком ЛКМ, нажать кнопку 5 или клавишу *Del* с подтверждением в появившемся окне.

Для построения схемы необходимо: выбрать нужные элементы в соответствующих отделах меню, расставить их на рабочем поле в соответствии с прин-

ципиальной схемой, соединить элементы проводами, выставить номиналы элементов. Основные применяемые в работе элементы выбираются вызовом пункта меню 16 (*Favorites*).

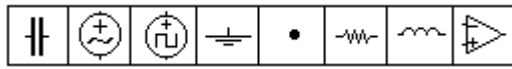


Рис 24

Его содержание: конденсатор, источник переменного синусоидального напряжения, импульсный источник питания, заземление, точка соединения проводников (узел), резистор, индуктивность, операционный усилитель. Источники питания также содержатся в пункте 17 (*Sources*), пассивные элементы – в пункте 18 (*Basic*), операционные усилители – в пункте 21 (*Analog ICs*).

Для **соединения элементов** нужно: навести курсор на контакт вновь поставленного элемента до появления на контакте точки, нажать ЛКМ и, удерживая ее, вести курсор к месту соединения. ЛКМ отпустить при появлении точки на месте соединения. Появившийся провод сам займет оптимальное положение. Если точка на месте соединения не появилась, требуется поставить на провод узел, взяв его из меню *Favorites*. **Удаление соединения**: навести курсор на провод, щелкнуть ПКМ, выбрать в окне графу *Delete* (выбор производится щелчком ЛКМ на выбираемой кнопке в окне). **Окраска провода**: навести курсор на провод, щелкнуть ПКМ, выбрать в окне графу *Wire Properties*, выбрать в новом окне *Schematic Options*, выбрать *Wire Color*, выбрать цвет, подтвердить (выбрать *OK*). **Выставление номинала элемента**: навести курсор на элемент, щелкнуть ПКМ, в появившемся окне выбрать графу *Component Properties*. Тот же эффект дает двойной щелчок ЛКМ на двойной щелчок ЛКМ на элементе. Затем: выбрать кнопку *Value*. В окошке, соответствующем основному параметру элемента, набрать его номинал. В соседнем окошке нажатием кнопок выставить единицу измерения.

Установка источников сигнала: перенести источник из соответствующего окна на рабочее поле, подключить верхний контакт к исследуемой схеме, нижний контакт подключить к заземлению. **Настройка источника синусоидального напряжения**: навести курсор на источник, вызвать панель настроек

аналогично предыдущей (см. «Выставление номинала элемента»). Затем выбрать кнопку *Value*. В окошке *Voltage* набрать значение действующего напряжения сходного сигнала схемы. Так, при амплитуде сигнала $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$ действующее напряжение $U_{\text{д}} = U_{\text{вх}} / \sqrt{2} = 1/\sqrt{2} \cong 0.7 \text{ В}$. В соседнем окошке нажатием кнопок выставить единицу измерения (*kV*, *V*, *mV*, μV). В окошке *Frequency* так же выставить частоту сигнала. **Настройка источника импульсного напряжения:** панель настроек вызывается аналогично предыдущей; настраиваемые параметры: *Frequency* (частота следования импульсов), *Duty Cycle* (скважность импульсов), *Voltage* (амплитуда напряжения импульсов). Единичному ступенчатому сигналу соответствует скважность 100 %, дельта-функции соответствует 1 % (минимально возможное значение в программе).

Установка измерительных приборов. Измерительные приборы находятся в пункте меню 29 (*Instruments*). Его вид представлен на рис. 25.

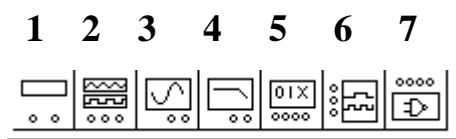


Рис 25



Рис 26

Требуемые в работе приборы: 3 (*Oscilloscope*) – осциллограф, 4 (*Bode Plotter*) – построитель частотных характеристик. Вид приборов при постановке на рабочее поле показан на рис. 27 и рис. 28. **Подключение осциллографа:** две нижние точки подключения соответствуют двум сигнальным входам каналов *A* и *B*, две левые верхние точки – заземлениям этих каналов. **Подключение построителя ЧХ:** правая точка подключения входа *In* соответствует сигнальному входу, подключаемому к выходу источника сигнала, правая точка подключения входа *Out* соответствует сигнальному входу, подключаемому к выходу схемы, левые точки подключения входов – заземлениям каналов. При включении прибора в схему на сигнальные входы следует подключить выходной сигнал схемы и выходной сигнал источника сигнала (параллельным идущему на схему проводу), на заземляющие входы подключить заземление.

При снятии характеристик панель прибора следует развернуть, для чего нужно навести курсор на изображение прибора и произвести двойной щелчок ЛКМ. **Активация схемы:** в правом верхнем углу экрана находится кнопка, которую необходимо поставить в положение 1 щелчком ЛКМ на ней. Для снятия характеристик требуется нажать кнопку *Pause*. Перед активацией схемы требуется произвести настройку прибора.

Настройка измерительных приборов. В верхнем меню программы выбрать пункт *Analysis*, в нем подпункт *Analysis Options*. В открывшемся окне нажать кнопку *Instruments*. Произвести настройки. Для осциллографа (пункт *Oscilloscope*): в графе *Pause after each screen* убрать галочку для предотвращения останковки снятия показаний после заполнения экрана прибора; в графе *Generate time steps automatically* убрать галочку, иначе программа будет генерировать временной шаг между точками графика сама, и график будет ломаным; в графе *Minimum number of time points* в круглом окошке поставить точку щелчком ЛКМ, затем в прямоугольном окошке набрать требуемое минимальное число временных точек на поле экрана прибора (для гладкости графика требуется порядка 1000). Для построителя ЧХ (пункт *Bode Plotter*) в графе *Points per cycle* в прямоугольном окошке набрать требуемое минимальное число точек изменения частоты в установленных пределах измерения (для гладкости графика требуется порядка 1000). Дальнейшие настройки производятся на панели прибора.

Панель осциллографа представлена на рис. 27.

В окне *T1* указано время от начала графика (от момента активации схемы), соответствующее положению движка 1 на экране. В окнах *VA1*, *VB1* указано напряжение в каналах *A* и *B* соответственно в указанный момент времени. В окнах *T2*, *VA2*, *VB2* – те же данные для движка 2.

В окне *Time base* устанавливается шаг по времени, соответствующий одной клетке по горизонтали. В окне *X position* - положение графика относительно начала координат по горизонтали (установить 0). Кнопка *Y/T* должна быть нажатой, т.к. в положении *B/A* или *A/B* прибор строит фигуры Лиссажу.

В окне *Channel A* устанавливается шаг по напряжению, соответствующий одной клетке по вертикали. В окне *Y position* – положение графика сигнала канала *A* относительно начала координат по вертикали (установить 0). В окне *Channel B* – те же данные для канала *B*.

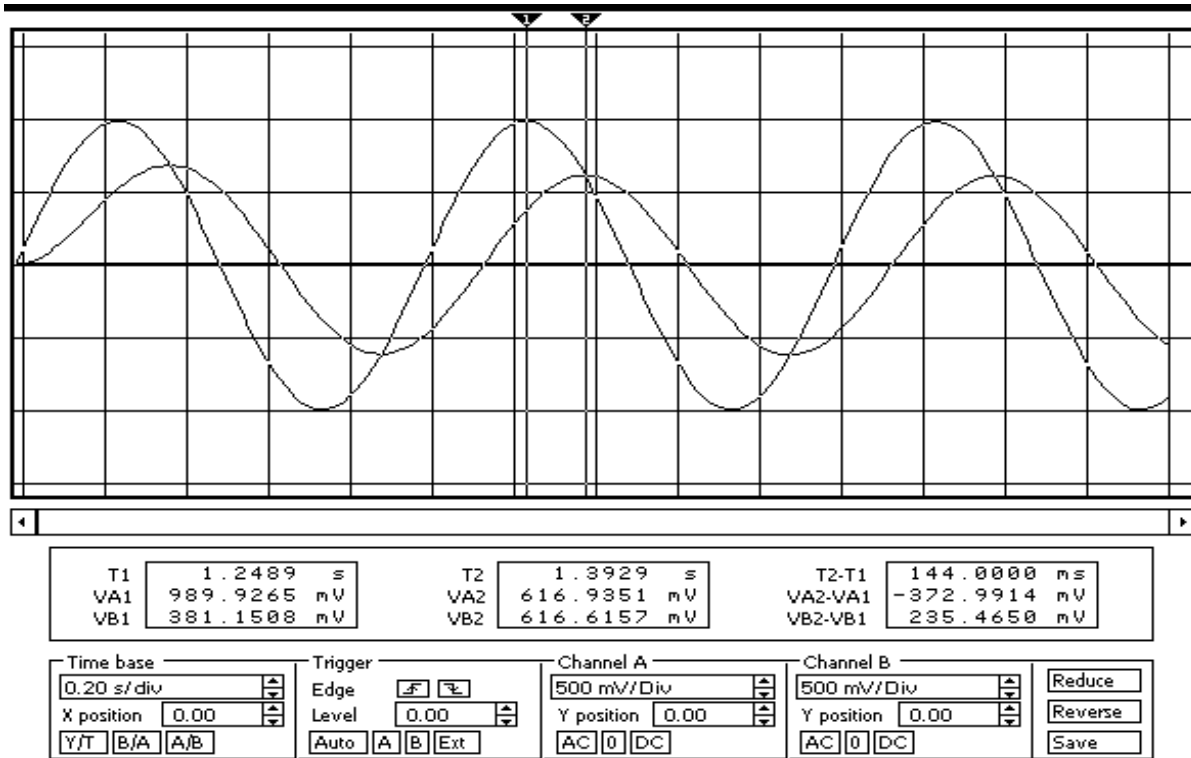


Рис 27

Панель построителя ЧХ представлена на рис. 28.

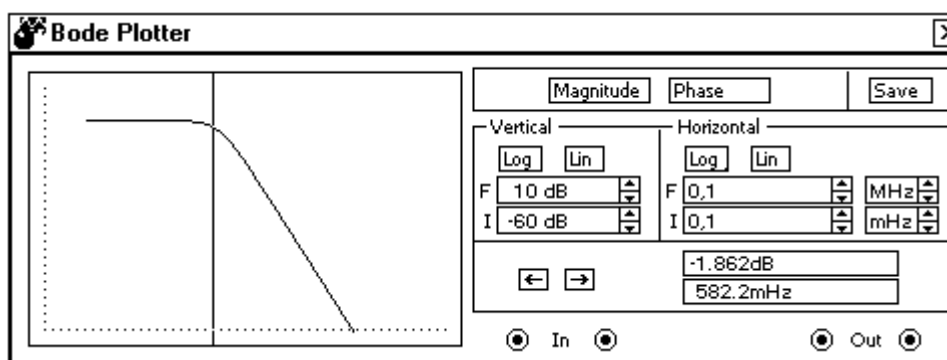


Рис 28

Кнопки *Magnitude*, *Phase* переводят прибор в положение снятия АЧХ или ФЧХ соответственно. Кнопки *Log* и *Lin* в частях панели *Vertical* и *Horizontal* переводят прибор в логарифмические или линейные единицы измерения по осям частоты (горизонтальной) и амплитуды (вертикальной). Окна *F* и *I* устанавливают верхний (*F*) и нижний (*I*) пределы снятия характеристик по амплитуде или

сдвигу фазы (в зависимости от положения кнопок *Magnitude* и *Phase*) в части *Vertical* и по частоте в части *Horizontal*. Два окна в нижней части панели выводят результат измерения амплитуды или сдвига фазы (верхнее окно) и частоты (нижнее окно) в точке характеристики, отмеченной движком на экране. Для грубого управления движком служит мышь, для точного – кнопки панели ← и →.

Для снятия в отчет АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ, ЛФЧХ воспользоваться кнопкой 12 главного меню. Ее нажатие вызывает появление окна, представленного на рис. 29, для вывода обыкновенных или логарифмических ЧХ, в зависимости от положения кнопок *Log* и *Lin* на панели прибора.

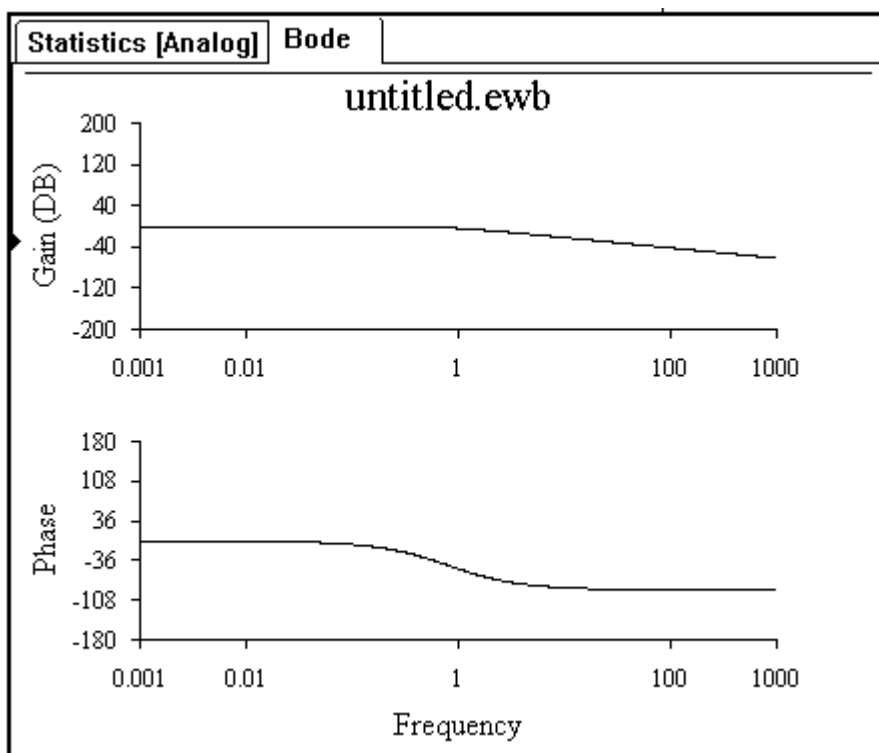


Рис 29

При завершении работы сохранить данные для использования в следующих работах и представления преподавателю. Для этого необходимо воспользоваться кнопкой *File* верхнего меню, выбрать пункт *Save As*, в графу названия файла вписать свою фамилию и номер лабораторной работы. После этого можно закрывать программу.

10.2. Преобразования структурных схем

Таблица 3

Преобразование	Исходная схема	Эквивалент
Перестановка точек разветвления		
Перестановка сумматоров		
Перенос узла через звено вперед		
Перенос узла через звено назад		
Перенос сумматора через звено вперед		
Перенос сумматора через звено назад		
Перенос узла через сумматор вперед		
Перенос узла через сумматор назад		

11. Библиографический список

1. Алексеев А.Г., Войшвилло Г.В. Операционные усилители и их применение. – М.: Радио и связь, 1989.
2. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика: Учеб. для вузов по специальности «Радиотехника». – М.: Высш. шк., 1990.
3. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза./ НГТУ. Н. Новгород, 2000.
4. Первачев С.В. Радиоавтоматика. – М.: Радио и связь, 1982.
5. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1989.
6. Радиоавтоматика/ Под ред. В.А.Бесекерского. – М.: Высш. шк., 1985.
7. Соломенцев Е.Д. Функции комплексного переменного и их применение. – М.: Высш. шк., 1988.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Краткие сведения из теории	4
2.1. Описание систем автоматического управления	4
2.2. Преобразования Лапласа	5
2.3. Динамические характеристики систем	6
2.4. Частотные характеристики	8
2.5. Логарифмические частотные характеристики	9
2.6. Правила построения асимптотической ЛАХ	10
2.7. Типовое динамическое звено	10
2.8. Соединения звеньев САУ	12
2.9. Конструирование схем САУ на операционных усилителях	14
3. Материально – техническое обеспечение работ	19
4. Лабораторная работа № 1. Изучение характеристик каскадов САУ	19
5. Варианты заданий	28
6. Вопросы для подготовки к работе № 1	31
7. Лабораторная работа № 2. Анализ и синтез линейных систем автоматического управления	31
8. Вопросы для подготовки к работе № 2	33
9. Содержание отчетов	34
10. Приложения	35
10.1. Работа в программе	35
10.2. Преобразования структурных схем	41
11. Библиографический список	42