

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра электронной техники и технологии

**С. В. Грушецкий, Д. В. Зайцев, О. Л. Кайдов**

## ***ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ***

по дисциплинам

«Управление в биологических и технических системах»  
и «Системы автоматического управления, микропроцессоры и микроЭВМ  
в электронно-оптическом аппаратостроении»

для студентов специальностей «Медицинская электроника»

и «Электронно-оптическое аппаратостроение»

дневной формы обучения

Минск 2008

УДК 681.5.01+612 (075.8)

ББК 32.965 + 58 я 73

Г 91

**Грушецкий, С. В.**

Г 91      Лабораторный практикум по дисц. «Управление в биологических и технических системах» и «Системы автоматического управления, микропроцессоры и микроЭВМ в электронно-оптическом аппаратостроении» для студ. спец. «Медицинская электроника» и «Электронно-оптическое аппаратостроение» днев. формы обуч. / С. В. Грушецкий, Д. В. Зайцев, О. Л. Кайдов. – Минск : БГУИР, 2008. – 54 с. : ил.

ISBN 978-985-488-255-0

Лабораторный практикум составлен в соответствии с рабочей программой дисциплин «Управление в биологических и технических системах» и «Системы автоматического управления, микропроцессоры и микроЭВМ в электронно-оптическом аппаратостроении» и включает исследования характеристик звеньев и систем автоматического управления (САУ), устойчивости и качественных показателей систем, применения микропроцессоров в системах управления измерениями. Предназначен для закрепления и углубления теоретических знаний студентов, приобретения навыков в области применения персональных ЭВМ для анализа и расчета САУ.

**УДК 681.5.01+612 (075.8)**  
**ББК 32.965 + 58 я 73**

**ISBN 978-985-488-255-0**

© Грушецкий С. В., Зайцев Д. В., Кайдов О. Л., 2008  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1 «Типовые звенья систем автоматического управления и их соединения» .....	4
Лабораторная работа №2 «Преобразование структурных схем и определение устойчивости систем управления с помощью ЭВМ» .....	19
Лабораторная работа №3 «Функционирование управляющих систем измерительной РЭА» .....	34
Лабораторная работа №4 «Исследование динамических свойств линейных систем автоматического управления».....	44
Литература.....	50
Приложение 1 .....	51
Приложение 2.....	52
Приложение 3.....	55

Библиотека БГУИР

## ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ИХ СОЕДИНЕНИЯ

### Цель работы

Изучение временных и частотных характеристик типовых звеньев систем автоматического регулирования и управления на ЭВМ, влияния обратной связи на динамические и частотные характеристики систем.

### Краткие теоретические сведения

Существует мнение, что при управлении функциями живого организма математический подход невозможен, поскольку биологические процессы не поддаются точному математическому описанию. Это мнение ошибочно. Конечно, при решении конкретных задач могут возникать те или иные трудности, подчас непреодолимые на сегодняшнем уровне. Однако в принципе недостаточное знание структуры объекта и трудность точного математического выражения всех его функций не исключают возможности математического анализа системы управления. С подобного рода ситуацией теория управления встречается не только при работе с биологическими объектами, но и при разработке сложных систем управления в технике.

Приведем несколько примеров из области моделирования физиологических функций и управления ими. В качестве первого примера рассмотрим модель, основанную на законе Старлинга – энергия сокращения прямо пропорциональна конечному диастолическому объему:

$$E = kV_{kg}. \quad (1.1)$$

В то же время энергия сокращения равна работе изгнания крови, определяемой произведением ударного объема на среднее артериальное давление:

$$E = V_{уд} P_A. \quad (1.2)$$

Конечный диастолический объем образуется сложением остаточного объема  $V_0$  с объемом, поступающим в желудочек во время диастолы  $V_E$ . Сопоставляя приведенные формулы, получаем:

$$V_{уд} = \frac{k(V_0 + V_E)}{P_A}. \quad (1.3)$$

Считаем, что  $k$ ,  $V_0$ ,  $V_E$  – постоянные параметры. Желудочек во время диастолы рассматривается как эластичный резервуар, наполняемый под действием разности давлений в предсердии  $P_{\Pi}$  и желудочке  $P_{\text{Ж}}$ . Тогда скорость наполнения желудочка, т. е. производная от объема  $V_E$ , равна указанной разности давлений, деленной на гидродинамическое сопротивление клапана  $R$ :

$$\frac{dV_E}{dt} = \frac{P_{\Pi} - P_{\text{Ж}}}{P_A}. \quad (1.4)$$

Давление в предсердии  $P_{\Pi}$  рассматривается как входная величина, а ударный объем  $V_{\text{уд}}$  – как выходная. Но  $P_{\text{Ж}} = \frac{V_E}{C}$ , где  $C$  – эластичность желудочка. Окончательно получаем для процесса наполнения желудочка следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dV_E}{dt} + \frac{V_E}{RC} = \frac{P_{\Pi}}{R}. \quad (1.5)$$

Соответствующее характеристическое уравнение будет

$$pV_E^* + \frac{V_E^*}{RC} = \frac{P_E^*}{R}, \quad (1.6)$$

и передаточная функция

$$W_1 = \frac{V_E^*}{P_{\Pi}^*} = \frac{C}{Tp + 1}, \quad (1.7)$$

где  $Tp = RC$ .

Так как  $k$ ,  $P_A$ ,  $R$  и  $V_0$  – постоянные, полная передаточная функция всего процесса будет

$$W(p) = \frac{k}{P_A} \left( V_0 + \frac{C}{Tp + 1} \right) = \frac{kV_0}{P_A} + \frac{kC}{P_A + (Tp + 1)}. \quad (1.8)$$

Видно, что модель можно построить из двух параллельных звеньев с передаточными функциями: пропорционального с коэффициентом передачи  $\frac{kV_0}{P_A}$  и инерционного с постоянной времени  $T$  (рис. 1.1).

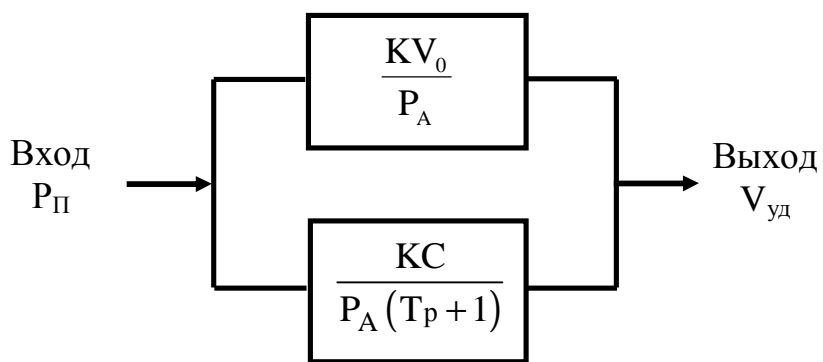


Рис. 1.1. Модель сердца по Ф. Гродинзу, 1996

Другим примером может служить модель регуляции минутного объема кровотока  $Q$  при физической нагрузке. Структурная схема модели приведена на рис.1.2.

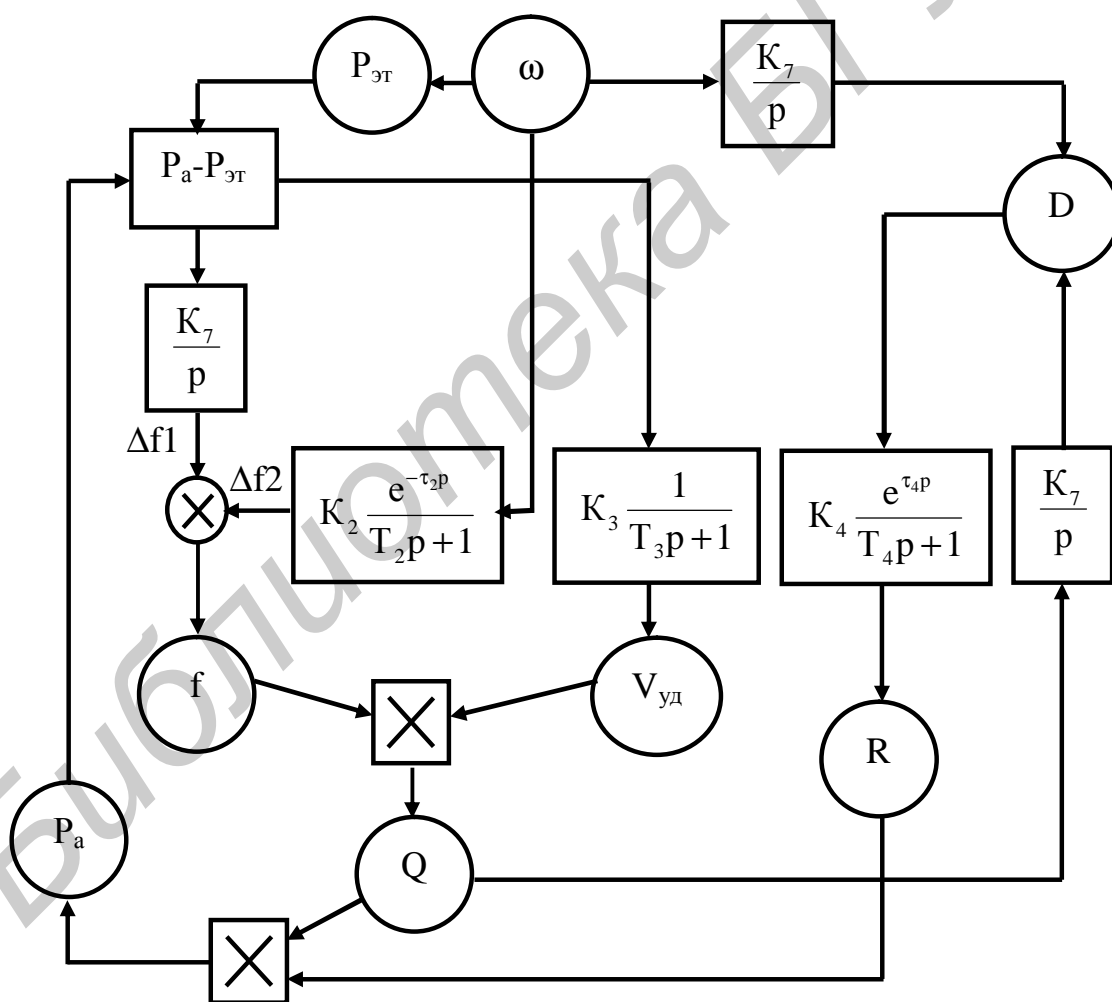


Рис. 1.2. Модель реакции системы кровообращения на физическую нагрузку

На данном рисунке изображены: кружки – моделируемые физиологические показатели:  $\omega$  – физическая нагрузка;  $D$  – кислородный долг тканей;  $f$  – частота пульса;  $V_{уд}$  – ударный объем;  $Q$  – скорость кровотока;  $R$  – периферическое сопротивление;  $P_a$  – артериальное давление;  $P_{эп}$  – «уставка» артериального давления, вырабатываемая организмом в соответствии с физической нагрузкой. Прямоугольники – функциональные звенья модели с их передаточными функциями, кружок с крестом – сумматор, квадраты с крестом – мультипликаторы (блоки, осуществляющие умножение).

Минутный объем равен произведению ударного объема на частоту пульса  $f$ . Каждый из множителей регулируется в зависимости от мощности нагрузки  $\omega$ . Частота пульса равна

$$f = f_0 + \Delta f_1 + \Delta f_2 \quad (1.9)$$

(здесь и далее индекс «0» обозначает соответствующие величины в покое, т.е. без нагрузки). Изменение частоты пульса  $\Delta f_1$ , связанное с изменением артериального давления, определяется уравнением

$$\Delta f_1 = k_1 \int_0^t (P_a - P_{эп}) dt. \quad (1.10)$$

В модели соответствующая зависимость должна быть выражена интегрирующим звеном с передаточной функцией  $W_1 = \frac{k_1}{p}$ . Второй член  $\Delta f_2$  соответствует изменению частоты пульса вследствие прогнозирования будущей потребности в кислороде, пропорциональной нагрузке  $\omega$ . Однако, как показывают физиологические эксперименты, это изменение пульса происходит не мгновенно: оно начинается с задержкой на время  $\tau_2$  и нарастает постепенно с постоянной времени  $T_2$ . Обращаясь к рассмотренным ниже типовым звеньям, можно видеть, что такая зависимость соответствует сочетанию запаздывающего и инерционного звеньев. Передаточные функции этих звеньев есть соответственно  $k_2 e^{-\tau_2 p}$  и  $\frac{1}{T_2 p + 1}$ , а общая передаточная функция равна их произведению, поэтому

$$W_2 = k_2 \frac{e^{-\tau_2 p}}{T_2 p + 1}. \quad (1.11)$$

Ударный объем при нагрузке возрастает с постоянной времени  $T_3$  – это моделируется  $W_3 = \frac{k_3}{T_3 p + 1}$ .

Гидродинамическое сопротивление при нагрузке уменьшается. Полагают, что основную роль в этом играют эффекты местной регуляции, возникающие вследствие образования эффективного долга по кислороду  $D$ , который определяется выражением

$$D = \int_0^t (r_0 + k_6 \omega - q) dt, \quad (1.12)$$

где  $r_0$  – потребность в кислороде в покое;  $k_6 \omega$  – дополнительная потребность, возникающая под влиянием нагрузки;  $q$  – поступление кислорода с кровью, пропорциональное  $Q$ . Эта зависимость, очевидно, моделируется интегрирующим звеном. Зная передаточные функции, можно связи, изображенные на рис. 1.2, реализовать теми или иными техническими (например электронными) устройствами. При этом изменение сопротивления начинается с задержкой на время  $\tau_4$  и нарастает с инерционным звеном с соответствующей постоянной времени. Это можно смоделировать сочетанием запаздывающего и инерционного звеньев с передаточной

функцией  $W_4 = \frac{k_4 e^{-\tau_4 p}}{T_4 p + 1}$ .

Эта модель имеет смешанный характер: часть зависимостей выведена из рассмотрения структуры схемы и представлений о механизме соответствующих процессов (например, формула для вычисления  $D$ ), другие же зависимости получены чисто эмпирическим путем, т.е. по принципу «черного ящика». В целом удалось добиться высокой степени согласия с данными эксперимента.

Примером математического описания, целиком основанного на принципе «черного ящика», может служить модель вазоплегии. Переписав найденную зависимость снижения давления от величины воздействия в виде

$$\Delta P = K_{\Pi} f_{\Pi} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - K_{\Pi} f_{\Pi} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + K_{\text{H}} f_{\text{H}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{H}}}} \right), \quad (1.13)$$

легко заметить, что эта зависимость может быть представлена как параллельное соединение трех инерционных звеньев; передаточная функция такой системы равна

$$W(p) = \frac{K_{\Pi}}{T_2 p + 1} - \frac{K_{\Pi}}{T_1 p + 1} + \frac{K_{\text{H}}}{T_{\text{H}} p + 1}. \quad (1.14)$$



При разработке автомата для регулирования артериального давления исходили из этой передаточной функции.

Следует заметить, что рассмотренные ниже типовые звенья и характеризующие их передаточные функции являются идеальными. В реальных устройствах всегда наблюдаются те или иные отклонения от этих идеальных случаев, которые, в частности, влияют на качество управления.

В САУ используется большое количество элементов, различных по своей физической природе, принципу действия, конструкции и т.д. Динамические свойства элементов, т.е. изменение их состояния во времени, описываются дифференциальными уравнениями. Процесс составления уравнения элемента системы и всей системы является ответственным и сложным, так как результаты динамических исследований системы зависят от точности представления физических процессов, протекающих в системе, и от правильности их математического отображения. Для упрощения этого этапа всю систему разбивают на отдельные звенья. Звено – часть системы, на работу которой не влияет следующий за ней в направлении распространения сигнала участок, а само звено не влияет на работу предшествующего ему участка. Уравнения, описывающие работу звеньев системы, составляют по следующему принципу. Считая, что все переменные являются входными по отношению к рассматриваемому звену и отклонены в положительном направлении их отсчета, тогда на основании законов механики, электротехники, термодинамики или других законов связывают эти входные переменные с вызываемыми ими отклонениями выходной переменной рассматриваемого звена. Аналитическое выражение, характеризующее связь, будет являться уравнением рассматриваемого звена.

Под типовыми динамическими звеньями понимают звенья, поведение которых описывается линейными дифференциальными уравнениями не выше второго порядка с положительными коэффициентами. Примерами таких звеньев могут служить звенья механические, гидравлические, электрические и пневматические.

С целью упрощения методов расчета и проектирования САУ и САР уравнения динамики объектов или устройств (звеньев) записываются не через оригиналы функций, а в виде изображений, полученных с помощью прямого преобразования Лапласа:  $x(t) \longrightarrow x(p)$ ,

$$x(p) = \int x(t)e^{-pt} dt = \alpha [ x(t) ] = L [ x(t) ]. \quad (1.15)$$

Для определения оригинала функции по ее изображению используют обратное преобразование Лапласа:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} x(p)e^{pt} dt = L^{-1} [ x(p) ]. \quad (1.16)$$

В теории автоматического регулирования пользуются не уравнениями объектов и устройств автоматического регулирования, записанными через изображение функций, а их передаточными функциями. Под передаточной функцией понимают отношение изображения выходной величины для объекта или устройства (звена) системы к изображению функции входной величины, полученной при нулевых начальных условиях. Например, дифференциальное уравнение (1.17) преобразуется с помощью оператора Лапласа «р» к алгебраическому уравнению (1.18):

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dy}{dt} + y(t) = kx(t), \quad (1.17)$$

$$[T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1] y(p) = kx(p). \quad (1.18)$$

Тогда передаточная функция (1.19) просто получается из уравнения (1.18):

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{k}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1}. \quad (1.19)$$

Формально передаточную функцию легко получить из дифференциального уравнения заменой производных символом «р» в соответствующей степени.

По передаточной функции звена и изображению входного воздействия можно найти изображение входной величины:

$$Y(p) = X(p)W(p). \quad (1.20)$$

Переход от изображения к оригиналу осуществляется с помощью обратного преобразования Лапласа или таблиц соответствий.

Решения дифференциальных уравнений при некоторых стандартных типовых воздействиях, характеризующих изменение выходного сигнала, называются временными характеристиками звеньев. При анализе и синтезе САУ наиболее широко используются переходная и импульсная характеристики. Переходная характеристика  $h(t)$  определяет изменение входной переменной  $x(t)$  на величину  $[1(t)]$  при нулевых начальных условиях  $t$ :

$$y(t) = h_0 x(t) + \int_0^t n(t) x(t-\tau) d\tau, \quad (1.21)$$

т.е. это реакция звена на входной сигнал, являющийся единичной ступенчатой функцией времени.

Импульсная характеристика, или функция веса  $k(t)$ , показывает изменение импульса ( $\sigma$ -функции) в начальных нулевых условиях:

$$y(t) = \int_0^t k(t-\tau)x(\tau)d\tau. \quad (1.22)$$

Такие характеристики описывают поведение звеньев и систем в переходных режимах. Для оценки установившихся режимов следует рассматривать поведение элементов (звеньев) и систем при гармоническом воздействии  $A \sin(\omega t + \varphi)$ .

Амплитудно-фазочастотная характеристика (АФЧХ) звена – это функция, определяющая изменение амплитуды и фазы выходного сигнала в установившемся режиме при подаче на вход звена гармонического воздействия:

$$K(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = U(\omega) + jV(\omega). \quad (1.23)$$

Ее можно представить в декартовых координатах на комплексной плоскости ( $U, jV$ ) или в полярных координатах  $K(\omega), \varphi(\omega)$ . Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) звена показывает, во сколько раз изменяется амплитуда колебаний на выходе звена по сравнению с входом при изменении частоты:

$$K(\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}, \quad (1.24)$$

$$U(\omega) = K(\omega) \cos \varphi(\omega), \quad (1.25)$$

$$V(\omega) = K(\omega) \sin \varphi(\omega). \quad (1.26)$$

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) показывает, на сколько градусов изменяется фазовый сдвиг между входными и выходными сигналами при изменении частоты  $\omega$  на входе звена:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{U(\omega)}{V(\omega)}. \quad (1.27)$$

При исследовании САУ чаще всего используют логарифмические частотные характеристики: амплитудно-частотную (ЛАЧХ) и фазочастотную (ФЧХ). Логарифмической амплитудно-частотной характеристикой называется кривая, соответствующая 20 десятичным логарифмам (децибелам) амплитудно-частотной характеристики, построенной в десятичном (логарифмическом) масштабе частот:  $L(\omega) = 20 \lg K(\omega)$ .

Отрезок шкалы, соответствующий изменению частоты в 10 раз, называется декадой, а в 2 раза – октавой.

Значительные участки ЛАЧХ с большой точностью (до 3 дБ) могут быть заменены прямой линией – асимптотой. Они имеют отрицательный или положительный наклон, кратный 20 дБ/дек.

Частотные характеристики звеньев представлены в табл. 1.1, техническая реализация звеньев с помощью усилителей постоянного тока – в табл. 1.2.

Системы автоматического регулирования или управления представляются как соединения нескольких типовых, как правило, динамических звеньев. Существуют три типа соединений звеньев: последовательное, параллельное и последовательно-параллельное. При последовательном соединении передаточные функции звеньев перемножаются, при параллельном – складываются. Последовательно-параллельное соединение – это охват звена или нескольких звеньев обратной связью (со звеном или без него в цепи обратной связи).

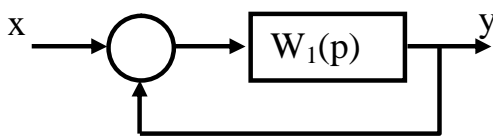
Различные соединения звеньев позволяют изменить свойства типовых звеньев в необходимом направлении. Например, при параллельном соединении апериодического звена с интегрирующим или идеально интегрирующего с инерционным проявляются дифференцирующие свойства этого соединения звеньев.

Обратная связь также изменяет свойства звена. Обратная связь может быть отрицательной (рис. 1.3) и положительной. Если какой-либо выходной сигнал имеет тот же знак, что и входной, и этот выходной сигнал затем суммируется со входным, то имеет место положительная жесткая обратная связь.

Положительная обратная связь приводит к неустойчивости звеньев и применяется редко. В основном используется отрицательная обратная связь, когда с входным сигналом суммируется выходной сигнал, но со знаком, противоположным знаку входного сигнала.

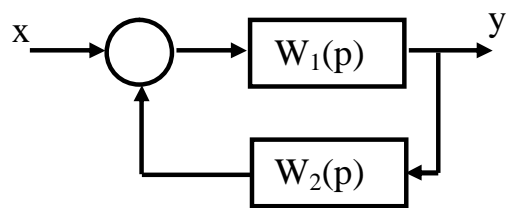
Если в цепи обратной связи не стоит никакого звена, то имеет место жесткая единичная обратная связь; если стоит усилительное звено, то жесткая связь с глубиной обратной связи; если же в цепи стоит звено (звенья), содержащее различные элементы, то имеет место гибкая обратная связь.

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)}$$



а

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}$$



б

Рис. 1.3. Структурные схемы регулирования с обратной связью:  
а – с жесткой ОС; б – с гибкой ОС

Наибольшее применение в практических схемах для изменения динамических свойств систем (звеньев) находят параллельные контуры, осуществляющие отрицательную обратную связь; возможно и использование положительной обратной связи; применяются также и прямые параллельные связи, используемые для компенсации ошибок по скорости и ускорению. Одним из преимуществ отрицательной обратной связи является ее способность компенсировать влияние нелинейностей и неустойчивости характеристик основных звеньев на динамические свойства системы.

Библиотека БГУИР

Таблица 1.1

Частотные характеристики звеньев САУ

Передаточная функция	Звенья		
	АЧХ	АФЧХ	ФЧХ
1	2	3	4
$W(p) = \frac{K}{T_p p + 1}$ <p>Апериодическое звено</p>			
$W(p) = K(T_p p + 1)$ <p>Дифференцирующее звено</p>			
$W(p) = \frac{K}{p}$ <p>Интегрирующее звено</p>			
$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 1}$ <p>Вырожденное колебательное звено</p>			

Окончание табл. 1.1

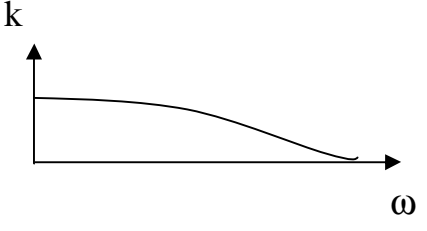
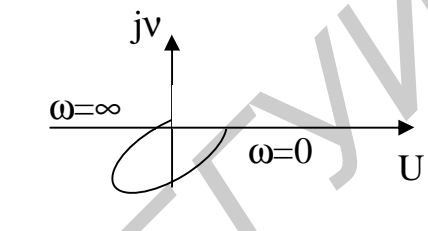
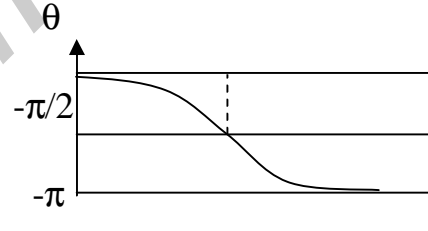
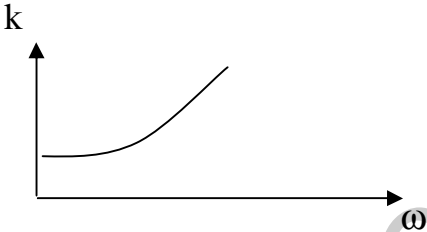
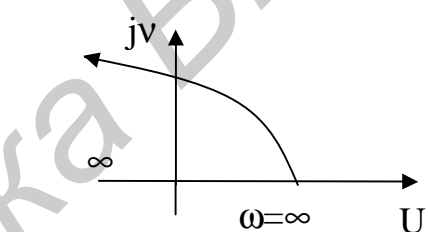
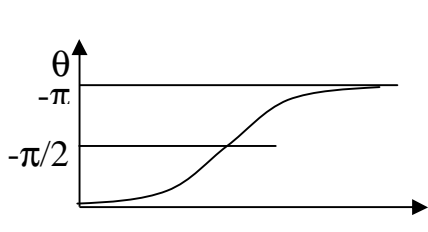

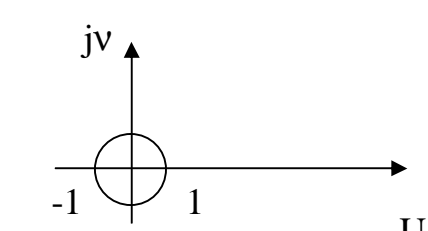
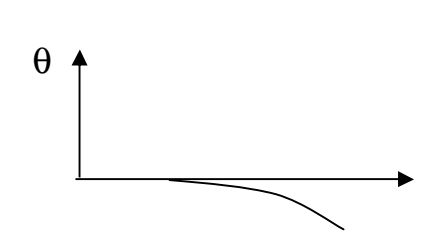
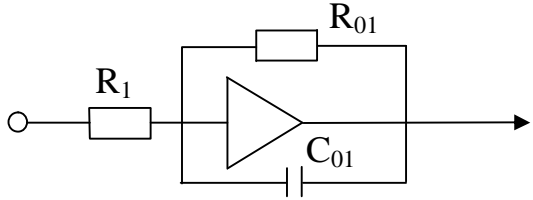
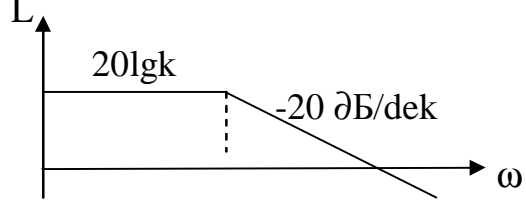
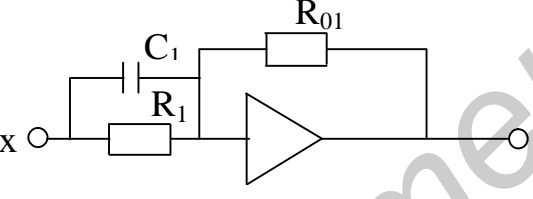
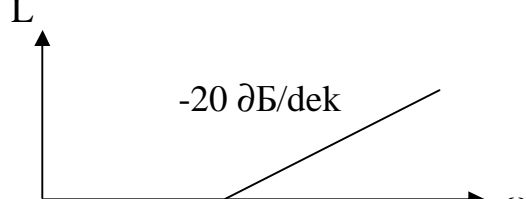
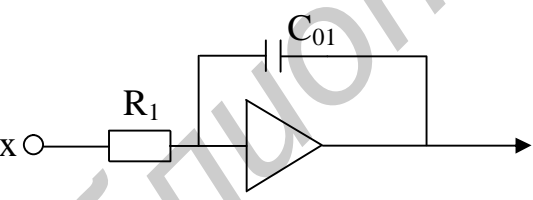
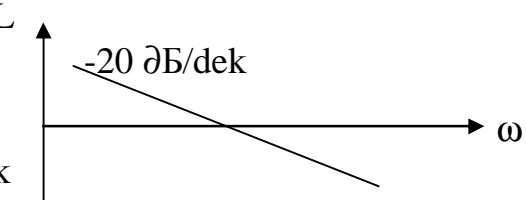
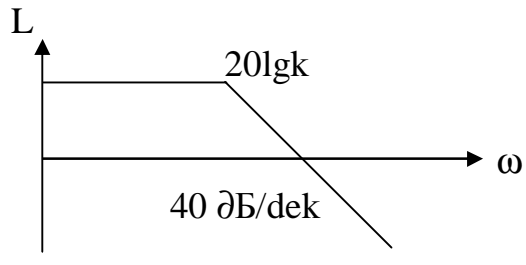
1	2	3	4
$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$ <p>Колебательное звено</p>			
$W(p) = T^2 p^2 + 2\xi T p + 1$ <p>Дифференцирующее звено 2-го порядка</p>			
$W(p) = e^{-\tau p}$ <p>Звено запаздывания</p>			
$W(p) = \frac{K(T_2 p + 1)}{p}$ <p>Издромное звено</p>	—	—	—

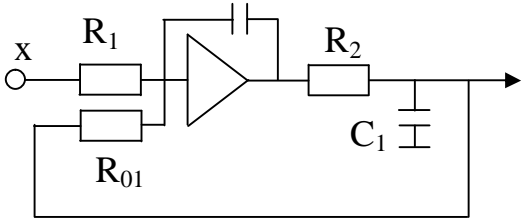
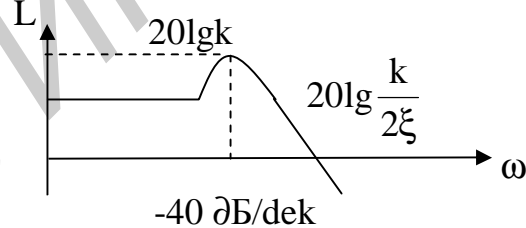
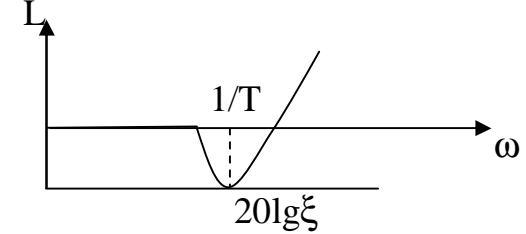

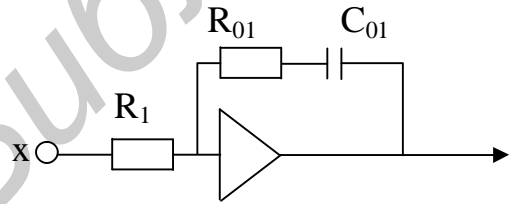
Таблица 1.2

## Моделирование динамических звеньев САУ

Передаточная функция	Модель звеньев на ОУ	Параметры звена	ЛАЧХ
1	2	3	4
$W(p) = \frac{K}{T_p + 1}$ <p>Апериодическое звено</p>		$K = -\frac{R_{01}}{R_1}$ $T = R_{01}C_{01}$	
$W(p) = K(Tp + 1)$ <p>Дифференцирующее звено</p>		$K = -\frac{R_{01}}{R_1}$ $C_1 = T_1 R_1$	
$W(p) = \frac{K}{p}$ <p>Интегрирующее звено</p>		$K = -\frac{1}{R_1 C_0}$	
$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 1}$ <p>Вырожденное колебательное звено</p>	<p>Два апериодических звена с постоянными времени <math>T_1 T_2 \geq 1</math> и <math>(-K_1 K_2)</math> и инвертирующего усилителя</p>	—	



Окончание табл. 1.2

1	2	3	4
$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\xi T p}$ <p>Колебательное звено</p>		$2\xi T = R_{01} C_{01}$ $T^2 = R_{01} R_2 C_1 C_0$	
$W(p) = T^2 p^2 + 2\xi T p + 1$ <p>Дифференцирующее звено 2-го порядка</p>	<p>Два последовательно соединенных дифференцирующих звена первого рода и инвертора</p>	$T_1 T_2 = 2$ $T_1 + T_2 = 2\xi T$	
$W(p) = e^{-Tp}$ <p>Звено запаздывания</p>		—	
$W(p) = \frac{K(T_2 p + 1)}{p}$ <p>Изодромное звено</p>		$T_2 = R_{01} C_{01}$ $K = \frac{1}{R_1 C_{01}}$	—

Библиотека БГУИР

Кроме того, она удобна тем, что в качестве входного сигнала используют мощный выходной сигнал, так как в выходных звеньях имеется уже усиленный сигнал, которого достаточно для питания корректирующей связи.

Входными сигналами последовательных и прямых параллельных корректирующих звеньев обычно являются маломощные входные сигналы и сигналы ошибки, что создает неблагоприятные условия для их применения. Смысл корректирующих цепей состоит в том, что с их помощью в закон управления вводятся дополнительно к основному сигналу его производная и интеграл от него. Введение производных позволяет скомпенсировать большие постоянные времени, уменьшить инерционность системы. Появление сигнала по производной предваряет появление основного сигнала и форсирует его действие. Введение первой и второй производной создает форсировку не только по скорости, но и по ускорению. Включение в главную цепь интегрирующего звена изменяет порядок астатизма системы. В этом случае увеличивается точность системы, но вместе с тем снижается устойчивость.

Рассмотрим на примере типовых звеньев влияние обратных связей на их характеристики и динамические свойства. Если в установившемся состоянии обратная связь не действует и сигнал обратной связи равен нулю, то такая связь называется гибкой (см. рис.1.3, б). Она регулируется, если в цепи обратной связи устанавливаются динамические звенья. Если же обратная связь действует как в переходном, так и в установившемся режиме, то она называется жесткой (см. рис. 1.3, а).

Если интегрирующее звено охватить жесткой обратной связью, то оно приобретает свойства инерционного звена, т.е. превращается в инерционное, а его коэффициент усиления и постоянная времени уменьшаются, дифференцирующее звено тоже приобретает инерционные свойства, колебательное звено свойства почти не изменяет, уменьшается только коэффициент усиления.

Очень эффективным средством улучшения качества системы является включение дифференцирующей цепи как в цепь обратной связи, так и в прямую цепь. Если инерционное звено охватывается гибкой обратной связью дифференцирующим звеном, характер звена не меняется, но коэффициент усиления уменьшается, а постоянная времени может быть уменьшена или увеличена в зависимости от соотношения постоянных времени ( $T_1/T_2$ ).

Если интегрирующее звено охватить дифференцирующим звеном в обратной связи, то интегрирующее звено превращается в инерционное, а дифференцирующее звено приобретает свойства колебательного, если в цепи обратной связи будет дифференцирующее звено. При охвате инерционного звена интегрирующим звеном оно превращается в колебательное с дифференцирующими свойствами, а усилительное звено превращается в инерционное. При введении параллельной связи эти звенья (система из двух-трех звеньев) приобретают дифференцирующие свойства.

## Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя вариант задания по прил. 1.
2. Рассчитать ФЧХ и АЧХ заданных звеньев.
3. Получить модель звена на операционном усилителе и рассчитать параметры операционных усилителей.
4. Проанализировать поведение звеньев с отрицательной обратной связью, изменяя коэффициент обратной связи в диапазоне 0,1 – 10, построить зависимость (АЧХ и ФЧХ) замкнутой системы  $K_{OC}$  ( $K_{OC} = 0,1 - 10$ ).
5. Получить модель звена обратной связи на операционном усилителе, а также передаточную функцию замкнутой системы и определить влияние звена в обратной связи на изменение характера системы в целом.
6. С помощью ЭВМ получить переходную характеристику звеньев и оценить влияние  $K_{OC}$  и постоянных времени  $T_{OC}$  на переходную характеристику системы.
7. Ознакомиться с электрической схемой типовых звеньев.
8. Собрать схему исследуемого звена (усилительного, аperiodического устойчивого, дифференцирующе-устойчивого 1-го рода).
9. Подать на вход звена импульсное напряжение от генератора, установить частоту следования импульсов 500 Гц, амплитуду 1 В. Этот же сигнал подать на вход А осциллографа, выход звена подключить к каналу Б, сравнить входной и выходной сигналы и зарисовать форму сигналов.
10. На вход звена и канал А осциллографа подать синусоидальное напряжение, выход остается подключенным к каналу Б. Изменяя частоту входного сигнала от 100 Гц до 10 кГц, получить АЧХ и ФЧХ исследуемых звеньев и построить графики.

## Содержание отчета

1. Краткие теоретические сведения о типовых динамических звеньях.
2. АЧХ и ФЧХ заданных звеньев (графики и соответствующие арифметические выражения).
3. Зависимость коэффициентов усиления и постоянного времени звена от параметров обратной связи.
4. Передаточные характеристики звеньев.
5. Схема моделей звеньев на усилителях постоянного тока.

## Контрольные вопросы

1. Виды динамических звеньев.
2. Передаточная функция и характеристики звена.
3. Частотные характеристики системы.
4. Влияние обратной связи на характеристики звеньев.

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

### Цель работы

Изучить основные законы преобразования структурных схем линейных систем управления, получение передаточной функции системы, основные способы определения устойчивости.

### Краткие теоретические сведения

Система автоматического управления представляет собой совокупность устройств, основные функции которых заключаются в измерении регулируемой величины и выявлении отклонения ее от заданного значения, преобразовании сигнала ошибки, формировании управляющего воздействия с целью устранения рассогласования. Структура системы графически отображает ее состав, входящие в систему элементы, связи между ними, точки приложения воздействия, пути распространения сигналов и в наиболее наглядной форме показывает математическую сторону преобразования сигналов, изменяющихся во времени. Методы структурных преобразований охватывают правила начертания структурных схем системы по заданным исходным данным, способы эквивалентных преобразований заданных структур для выявления передаточных свойств системы между характерными точками схемы при ее анализе и, наконец, рекомендации по целенаправленному изменению структуры системы при ее синтезе.

При анализе устойчивости, точности и переходных процессов системы управления классифицируются не по конструктивному оформлению, а по их динамическим свойствам, месту и роли в преобразовании сигналов, осуществляющих взаимодействие между составными частями системы автоматического управления. Поэтому одним из основных элементов структурных схем систем является динамический элемент, осуществляющий некоторую функциональную или операторную связь между входными и выходными сигналами. Обычно эта функциональная связь математически описывается при помощи дифференциальных или дифференциально-разностных уравнений, теории автоматического управления. Наряду с таким классическим способом описания математических моделей широко применяются способы математического описания, основанные на введении понятий передаточной функции.

Передаточной функцией  $W(p)$  линейной динамической системы называется отношение преобразования Лапласа  $Y(p)$  величины сигнала  $y(t)$  на выходе системы к преобразованию Лапласа  $X(p)$  воздействия  $x(t)$  на ее входе при нулевых начальных условиях.

Передаточная функция обладает следующими основными свойствами:

1. Передаточная функция  $W(p)$  для систем с сосредоточенными параметрами представляет собой дробно-рациональную функцию вида (2.1),

причем порядок  $m$  числителя не превышает порядка  $n$  знаменателя:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \mathbf{K} + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \mathbf{K} + a_1 p + a_0}. \quad (2.1)$$

2. Все коэффициенты  $b, b_0, \dots, b_n; a, a_0, \dots, a_m$  передаточной функции вещественные, поскольку они представляют собой функции от параметров системы, которые могут быть только вещественными.

3. Невещественные нули (корни числителя) и полюсы (корни знаменателя) передаточной функции могут быть лишь комплексно-сопряженными.

4. Все полюсы передаточной функции  $W(p)$  устойчивой системы расположены в левой полуплоскости комплексной плоскости « $p$ » (условие устойчивости).

Структурная схема системы может быть задана как во временной области, в которой условия преобразования сигналов описываются дифференциальными уравнениями, так и в области преобразований по Лапласу, где справедливы алгебраические соотношения. В связи с тем, что проводить алгебраические преобразования проще, чем оперировать с дифференциальными уравнениями, метод описания структурных схем в области преобразований получил более широкое распространение.

Структурные схемы состоят из следующих структурных элементов, которые показаны на рис. 2.1:

- динамических, осуществляющих некоторую функциональную или операторную связь между входным и выходным сигналами [ $Y(p) = X_p W(p)$ ];
- сравнения, в которых происходят сложение [ $X_3(p) = x_1(p) + x_2(p)$ ] и вычитание [ $X_3(p) = x_1(p) - x_2(p)$ ] сигналов;
- точек разветвления на несколько путей, ведущих к различным точкам системы;
- связей (стрелок) и линий структурной схемы, указывающих точки приложения и направления сигналов.

Для нахождения общей передаточной функции системы, вообще говоря, нужно составить соответствующую систему дифференциальных уравнений, применить к ней преобразования Лапласа и решить полученную систему алгебраических уравнений относительно интересующей переменной. Однако более удобным для указанной цели является способ преобразования структурной схемы, который позволяет заменить громоздкое решение совместных уравнений наглядными преобразованиями, имеющими хорошую геометрическую интерпретацию.

Основные правила преобразования структурных схем приведены в табл. 2.1.

Автоматические системы при нормальной эксплуатации должны поддерживать определенный режим работы объекта регулирования при действии на них многих возмущающих факторов. Такое поведение может быть достигнуто лишь в системах автоматического регулирования, обладающих устойчивостью

по отношению к этим воздействиям. Устойчивость системы означает, что силы изменения входного сигнала или какого-либо возмущения, начальных условий или параметров не приведут к значительным изменениям выходного сигнала.

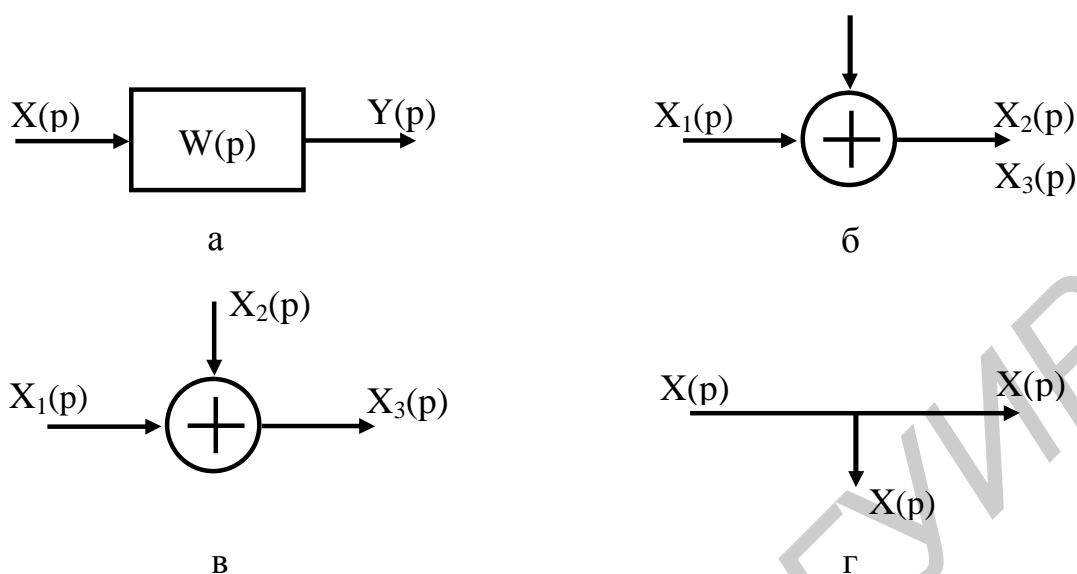


Рис. 2.1. Графические обозначения элементов структурных схем:  
 а – динамического; б – сравнения со знаком плюс;  
 в – сравнения со знаком минус; г – разветвления

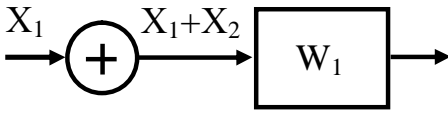
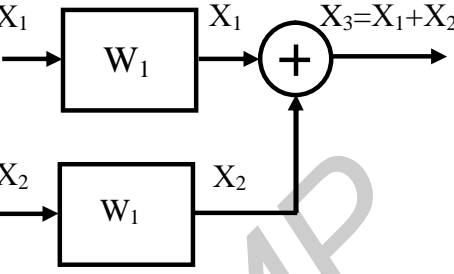
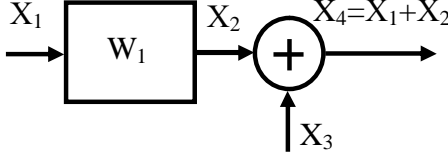
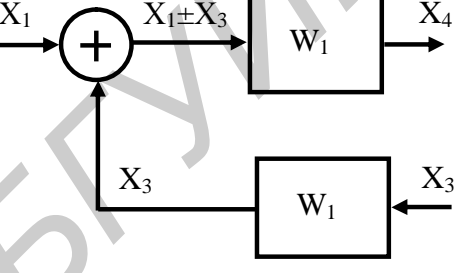
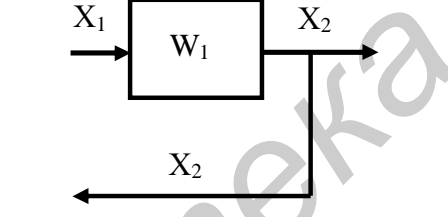
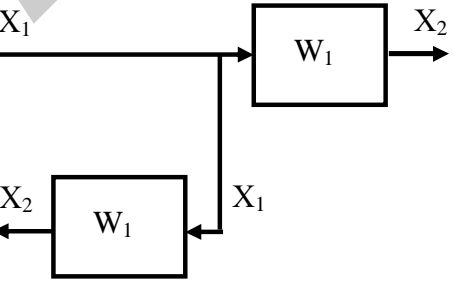
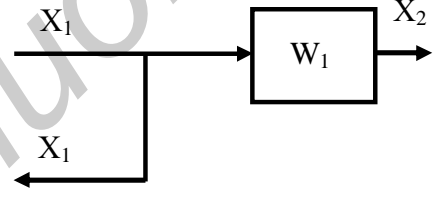
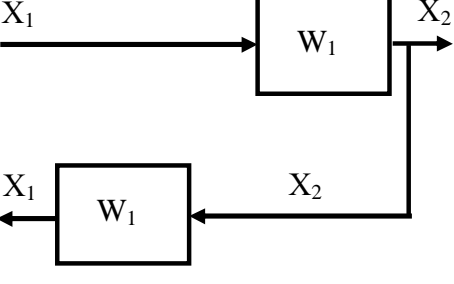
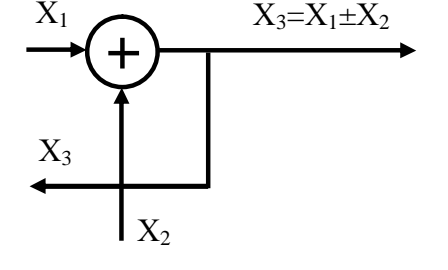
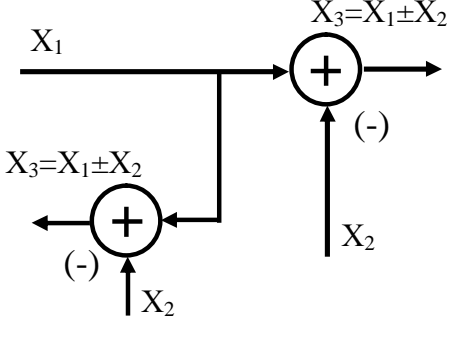
Важнейшая заслуга русского ученого А. М. Ляпунова заключается в том, что он указал подход к определению свойства устойчивости, не связанный с решением дифференциальных уравнений. Этот подход основан на простой идее, известной из механики: в положении равновесия система имеет минимум потенциальной энергии. Известно, что минимум потенциальной энергии всегда можно считать равным нулю. Тогда в любой окрестности положения равновесия потенциальная энергия будет положительной. Применение функций, которые положительны всюду, за исключением положения равновесия, к анализу устойчивости и лежит в основе метода, разработанного А. М. Ляпуновым. Он доказал следующую теорему: если вещественные части всех корней характеристического уравнения системы первого приближения отрицательны, то нулевое решение системы асимптотически устойчиво независимо от членов разложения выше первого порядка.

Исходную систему в общем случае нелинейных уравнений в окрестности какой-либо точки можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_1 + \mathbf{K} + a_{1n}x_n + R_1(x_1, x_2, \mathbf{K}, x_n); \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_1 + \mathbf{K} + a_{2n}x_n + R_2(x_1, x_2, \mathbf{K}, x_n); \\ &\mathbf{KKKKKKKKKKKKKKKKKKKK} \\ \frac{dx_n}{dt} &= a_{n1}x_1 + \mathbf{K} + a_{nn}x_n + R_n(x_1, x_2, \mathbf{K}, x_n), \end{aligned} \quad (2.2)$$

где  $R_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – остаточные члены.

## Преобразование структурных схем

Вид преобразования	Первоначальная схема	Эквивалентная схема
1	2	3
1. Передвижение сумматора с входа элемента на его выход		
2. Передвижение сумматора с выхода элемента на его вход		
3. Передвижение узла с выхода на вход элемента		
4. Передвижение узла со входа на вход элемента		
5. Передвижение узла с выхода на вход сумматора		



1	2	3
<p>6. Передвижение точки съема с выхода на вход сумматора</p>	<p><math>X_3 = X_1 + X_2</math></p>	<p><math>X_3 = X_1 + X_2</math></p> <p><math>X_1 = X_3 + X_2</math></p>
<p>7. Объединение последовательно соединенных элементов</p>		
<p>8. Удаление прямой связи</p>	<p><math>X_4 = X_2 + X_3</math></p>	
<p>9. Удаление элемента из обратной связи</p>		
<p>10. Удаление обратной связи</p>		<p><math>\frac{W_1}{1 \pm W_1 W_2}</math></p>

Система уравнений

$$\frac{dx_1}{dt} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \mathbf{K} + a_{1n}x_n;$$

$$\frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \mathbf{K} + a_{2n}x_n; \quad (2.3)$$

КККККККККККККК.;

$$\frac{dx_n}{dt} = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \mathbf{K} + a_{nn}x_n$$

называется системой первого приближения.

Если среди корней характеристического уравнения системы первого приближения имеется хотя бы один с положительной вещественной частью, то нулевое решение системы неустойчиво независимо от членов разложения выше первого порядка. Однако определение корней в системах выше третьего порядка затруднительно, хотя сейчас в связи с развитием вычислительной техники, появлением персональных компьютеров нахождение корней характеристических уравнений до 6-7 порядка не представляет особых трудностей.

В связи с этим можно анализировать устойчивость достаточно сложных систем, находя корни характеристического уравнения. Разработаны косвенные методы, позволяющие оценивать устойчивость системы без вычисления ее корней. Эти методы принято называть критериями устойчивости. Известны алгебраические критерии устойчивости Гурвица, Рауса и Льенара Шипара и частотные критерии Михайлова–Найквиста. Наиболее широкое применение для анализа устойчивости находят критерии Гурвица и Михайлова–Найквиста.

По критерию Гурвица система автоматического регулирования или управления будет устойчивой, если все угловые миноры определителя Гурвица, составленного из «т» коэффициентов характеристического уравнения, положительны. Например, для характеристического уравнения

$$D(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0 \quad (2.4)$$

определитель Гурвица имеет вид

$$\begin{vmatrix} a_{n-1} & a_n & 0 & 0 \\ a_{n-3} & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n \\ a_{n-5} & a_{n-4} & a_{n-3} & a_{n-2} \\ a_{n-7} & a_{n-6} & a_{n-5} & a_{n-4} \end{vmatrix} \quad (2.5)$$

а угловой минор образуется путем очерчивания  $x$  строк и столбцов.

Вычисление определителей Гурвица для характеристических уравнений высокого порядка представляет немалые трудности, поскольку необходимо найти  $n$  определителей для уравнения  $n$ -го порядка.

Анализ матрицы Гурвица позволяет сделать некоторые упрощения, поскольку

$$\Delta_1 = a_{n-1}\Delta_n = \Delta_{n-1}a_n.$$

Однако непосредственное вычисление каждого из оставшихся определителей достаточно трудоемко.

Существует последовательность преобразований, которая позволяет вычислить все определители Гурвица до  $n-1$  включительно. Частотные критерии устойчивости получили наиболее широкое практическое применение, так как, во-первых, они позволяют судить об устойчивости замкнутой системы по более простой передаточной функции разомкнутой системы  $W(p)$ , во-вторых, анализ устойчивости можно выполнить и по экспериментально определенным частотным характеристикам, в-третьих, с помощью частотных характеристик можно судить и о качестве переходных процессов в системах.

Критерий Михайлова–Найквиста позволяет судить об устойчивости замкнутой системы. В нем говорится: замкнутая система автоматического регулирования будет устойчива, если годограф  $W(j\omega)$  разомкнутой системы, имеющий « $m$ » полюсов в первой полуплоскости, при увеличении от 0 до  $\infty$  охватывает точку  $(-1, j0)$   $m/2$  раз в положительном направлении. Для практического применения более удобен следующий критерий устойчивости: система автоматического регулирования, имеющая в разомкнутом состоянии  $m$  полюсов в первой полуплоскости, будет устойчива в замкнутом состоянии, если разность между числом положительных и отрицательных переходов годографа разомкнутой системы через отрезок действительной оси  $(-1, -j\omega)$  равна  $m/2$ .

При анализе систем автоматического регулирования чаще всего используются логарифмические частотные характеристики. По характеру поведения этих характеристик можно судить об устойчивости замкнутой системы. Рассмотрим **первую** формулировку критерия устойчивости, основанного на логарифмических частотных характеристиках. Система автоматического регулирования, имеющая передаточную функцию с устойчивыми звеньями, будет устойчива в замкнутом состоянии, если на частоте среза  $\omega_c$  логарифмическая фазовая характеристика имеет положительный запас устойчивости, а ее амплитудная характеристика при этом обеспечивает запасы устойчивости по модулю.

Сформулируем **второй** критерий устойчивости: для того чтобы система автоматического регулирования, разомкнутая передаточная функция которой состоит из передаточных функций устойчивых звеньев, была устойчивой в замкнутом состоянии, необходимо и достаточно, чтобы разность между числом положительных (сверху вниз) и отрицательных (снизу вверх) переходов (разовой характеристики линии) равнялась нулю при значении частот, для которых ЛАЧХ неотрицательна.

**Третий критерий** формулируется следующим образом: для того чтобы система автоматического регулирования, разомкнутая передаточная функция которой имеет  $m$  неустойчивых звеньев, была устойчивой в замкнутом состоянии, необходимо и достаточно иметь разность между числом положительных и отрицательных переходов фазовой характеристики линии –  $\pi$ , равную  $m/2$ , при значении частот, для которых ЛАХЧ положительна. Для систем автоматического регулирования можно пользоваться следующими нормами запасов устойчивости, гарантирующими нормальную работу систем: по фазе  $\gamma > 24$ , по модулю  $H_m \geq 12$  дБ.

Для определения устойчивости после преобразования структурной схемы необходимо найти передаточную функцию разомкнутой и замкнутой системы. Передаточную функцию системы при любом соединении звеньев можно представить в виде выражения

$$W(p) = \frac{\prod k_i \prod (T_i^2 p + 1) \prod (T_i^2 p^2 + 2\chi T_i p + 1)}{p^v \prod (T_j p + 1) \prod (T_j^2 p^2 + 2\xi N_j p + 1)} \quad (2.6)$$

Применим формальную замену  $p$  на  $j$  и получим частотную передаточную функцию системы  $W(jw)$ :

$W_p(jw) = U(w) + jV(w)$  – для разомкнутой системы;

$W_3(jw) = P(w) + jQ(w)$  – для замкнутой системы.

Если  $W(jw) = \frac{a + jb}{c + jd}$ , то  $U(w) = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2}$ ;  $V(w) = \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}$ .

Амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы

$$H(w) = \sqrt{U^2 + V^2} = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{c^2 + d^2}}, \quad (2.7)$$

а фазочастотная характеристика

$$\varphi(w) = \arctg \frac{U}{V} = \arctg \frac{ac + bd}{bc - ad}. \quad (2.7a)$$

Передаточную функцию замкнутой системы в общем виде можно представить следующим образом:

$$W_3(jw) = \frac{W_p(jw)}{1 + W_p(jw)W_{oc}(jw)}; \quad (2.8)$$

$$W_{oc}(jw) = m + jn, \quad (2.9)$$

тогда

$$P(w) = \frac{U[1 + Um - Vn] + V(Un + Vm)}{[1 + Um - Vn]^2 + (Un + Vm)^2}; \quad (2.10)$$

$$Q(w) = \frac{V[1 + Um - Vn] + U(Un + Vm)}{[1 + Um - Vn]^2 + (Un + Vm)^2}. \quad (2.11)$$

Построим амплитудно-фазочастотную характеристику (АФЧХ) замкнутой системы в комплексной области и найдем значение  $P(w)$ . Для разомкнутой системы определим ФЧХ и АЧХ. Фазочастотную характеристику определим по выражению (2.7а). На фазочастотной характеристике находим значение  $(w_m)$ , при котором  $\varphi(w_m) = -180^\circ$ . На этой частоте по амплитудно-частотной характеристике определим  $H(w_m)$ . В области частот, равных  $3w_c$  и  $0,3w_c$ , определим значение  $H(w)$  и оценим наклон АЧХ в этой области частот.

Эти операции по нахождению  $A(w)$  и  $\psi(w)$  проведем и для замкнутой системы регулирования и оценим, как изменятся коэффициент усиления системы и запас устойчивости по фазе и амплитуде. Полученные дискретные значения сведем в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Характеристики замкнутой системы регулирования

w	m	n	H	φ	P

В качестве примера рассмотрим следующую передаточную функцию

$$W(jw) = \frac{(jT_1w + 1)(jT_2w + 1)}{(jT_3w + 1)(jT_4w + 1)} = \frac{(1 - T_1T_2w^2) + j(T_1 + T_2)w}{(1 - T_3T_4w^2) + j(T_3 + T_4)w};$$

$$a = 1 - T_1T_2w^2; \quad b = (T_1 + T_2)w;$$

$$c = 1 - T_3T_4w^2; \quad d = (T_3 + T_4)w.$$

Подставляя эти значения для  $U(w)$ ,  $V(w)$ , получим полином в виде

$$A = \frac{a_n w^n + a_{n-1} w^{n-1} + \dots + a_0}{b_m w^m + b_{m-1} w^{m-1} + \dots + b_0}. \quad (2.12)$$

Подставляя соответствующие коэффициенты для  $w_n$ , решаем этот полином на ЭВМ для значения  $w$  от нуля до  $w = 10w_{\max}$ , где  $w_{\max} = \frac{1}{T_{\min}}$ .

Амплитудно-частотную характеристику получим по следующим выражениям.

Для приведенного примера:

$$H(w) = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{c^2 + d^2}} = \sqrt{\frac{(1 - T_1 T_2 w^2)^2 + (T_1 + T_2)w^2}{(1 - T_3 T_4 w^2)^2 + (T_3 + T_4)w^2}}; \quad (2.13)$$

$$H^2(w) = \frac{T_1^2 T_2^2 w^4 + (T_1^2 + T_2^2)w^2 + 1}{T_3^2 T_4^2 w^4 + (T_3^2 + T_4^2)w^2 + 1}.$$

Для нахождения  $w_c$   $H(w_c) = 1$ :

$$A = \frac{w^4 a_4 + w^2 a_2 + a_0}{w^4 b_4 + w^2 b_2 + b_0};$$

$$A(w_c) = 1;$$

$$(T_1^2 T_2^2 - T_3^2 T_4^2)w_c^2 = T_3^2 + T_4^2 - T_1^2 - T_2^2.$$

Отсюда находим  $w_c$ .

Таким же способом находим  $w_m$ :

$$\varphi = -180^0;$$

$$\varphi_3(w) = \arctg \frac{P(w)}{Q(w)};$$

$$\frac{P(w_k)}{Q(w_m)} = -1;$$

$$a_4 = T_1^2 T_2^2, \quad a_2 = T_1^2 + T_2^2, \quad b_4 = T_3^2 T_4^2, \quad b_2 = T_3^2 + T_4^2, \quad a_0 = 1, \quad b_0 = 1.$$

Используем программу для решения характеристического уравнения и определим значения  $H^2(w)$ , а следовательно, и  $H(w)$ , затем таким же образом решаем полином для  $\varphi(w)$ , находим фазочастотную характеристику.

Для того чтобы оценить влияние коэффициента усиления системы  $K$ , коэффициента обратной связи  $K_{oc}$  и постоянных времени  $T_i$ , все коэффициенты полинома, т.е. значения, выраженные в параметрах звеньев, должны быть скомпонованы в табл. 2.3.

**Использование MATLAB в методе частотных характеристик.** Начнём с построения диаграммы Боде, а затем обсудим связь между частотными характеристиками и требованиями к качеству системы во временной области. В завершение приведём пример, иллюстрирующий синтез системы с помощью частотных характеристик.

Здесь рассмотрим функции **MATLAB bode** и **logspace**. Функция **bode** используется для построения диаграммы Боде, а функция **logspace** задаёт необходимый для этого логарифмический масштаб частоты.

Диаграмма Боде. Рассмотрим передаточную функцию

$$W(p) = \frac{5(1 + 0,1p)}{p(1 + 0,5p)[1 + (0,6/50)p + (1/50^2)p^2]} \quad (2.14)$$

Соответствующая этой функции диаграмма Бode изображена на рис. 2.2, где представлены зависимости от частоты амплитудная и фазовая характеристики. Как и в методе корневого годографа, построение этих характеристик предпочтительнее производить с помощью **MATLAB**. Всегда пытайтесь использовать **MATLAB** как одно из средств анализа и синтеза систем управления. В то же время не забывайте, что всегда полезно вручную произвести набросок диаграммы Бode – трудно придумать лучший способ ясного понимания теоретических основ метода.

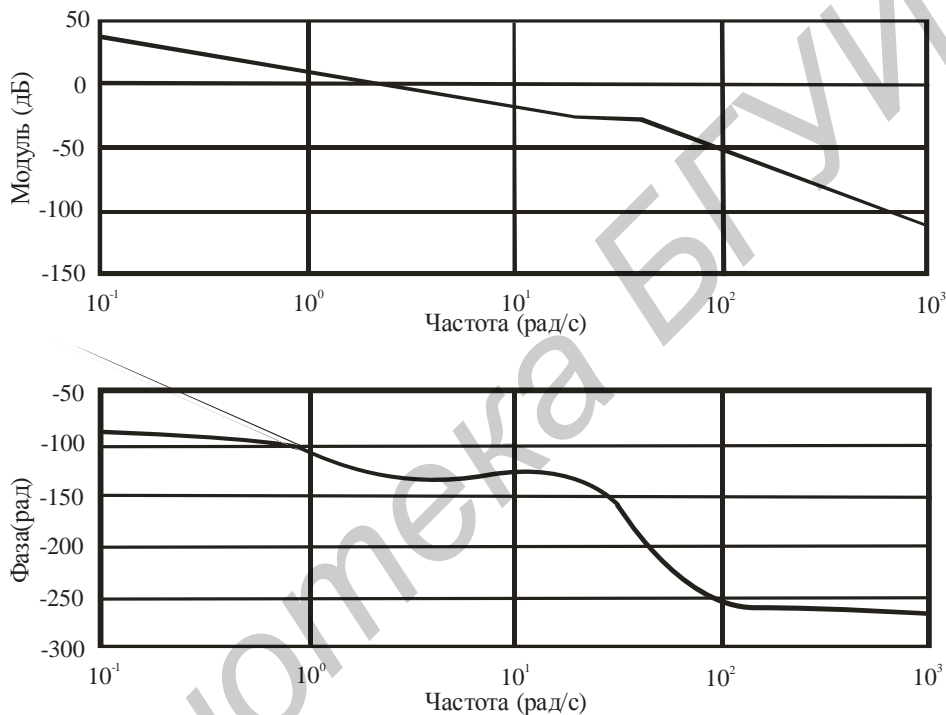


Рис. 2.2. Диаграмма Бode, соответствующая  $W(p)$  вида (2.14)

Пример изображения диаграммы Бode, полученной с помощью функции **bode**, приведён на рис. 2.3. Эта диаграмма строится автоматически, если при вызове функции **bode** не указываются её аргументы. В противном случае амплитудная и фазовая характеристики выводятся на рабочий стол заданием переменных *mag* и *phase*. Диаграмма Бode строится с помощью функций **plot** или **semilogx**, использующих значения **mag**, **phase** и  $\omega$ . Вектор  $\omega$  содержит значения частоты в рад/с, для которых должны быть вычислены кривые диаграммы Бode.

Если значения  $\omega$  не указаны, то **MATLAB** будет выбирать их автоматически, задавая больше точек в тех диапазонах  $\omega$ , где частотные характеристики отличаются значительной крутизной. Если необходимо точно задать интервал частот для построения диаграммы, то вектор  $\omega$  целесообразно

определять с помощью функции **logspace**. Смысл этой функции проиллюстрирован на рис. 2.4.

Диаграмма Боде построена с помощью скрипта, приведённого на рис. 2.5. Диапазон частот был выбран функцией **bode** автоматически. Впрочем, этот диапазон может быть задан и пользователем с помощью функции **logspace**. Функцию **bode** можно применять также в случае, когда модель системы задана в переменных состояния, как показано на рис. 2.6. При этом функция **bode** действует так же, как и при задании модели системы в виде передаточной функции.

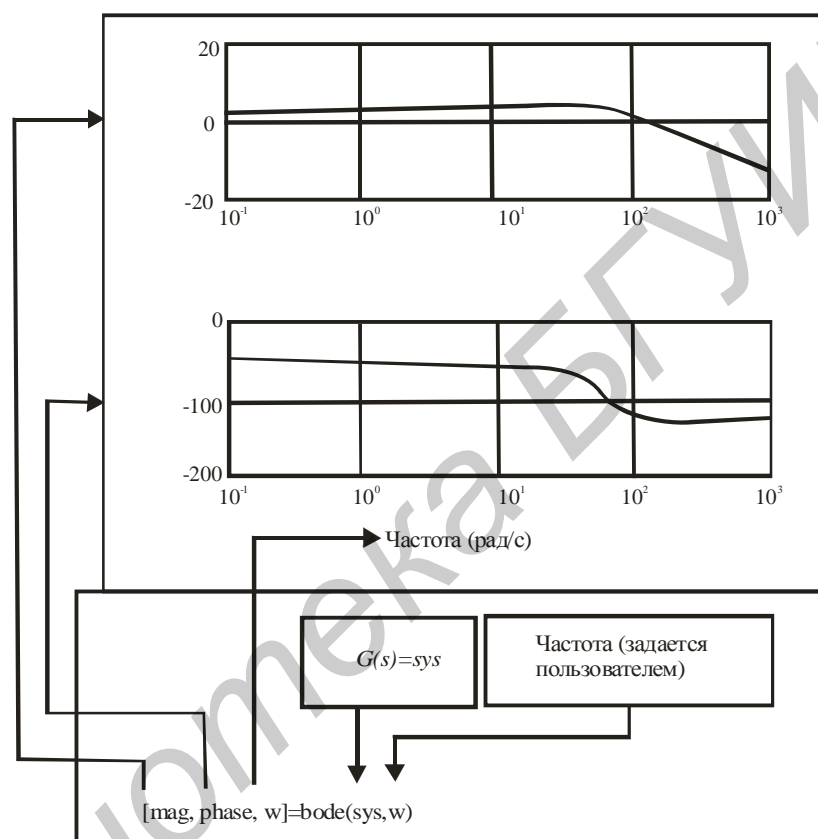


Рис. 2.3. Применение функции **bode** к заданной  $W(p)$

Имея в виду, что нашей целью является синтез системы управления, удовлетворяющей заданным требованиям к её переходной характеристике, прежде всего надо установить связь между временными и частотными характеристиками системы. Достоверность этой связи будет зависеть от того, насколько хорошо удаётся аппроксимировать систему моделью второго порядка на основании пары доминирующих полюсов.

Рассмотрим систему второго порядка, которая в замкнутом состоянии имеет передаточную функцию



$$T(p) = \frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\zeta\omega_n p + \omega_n^2} \quad (2.15)$$

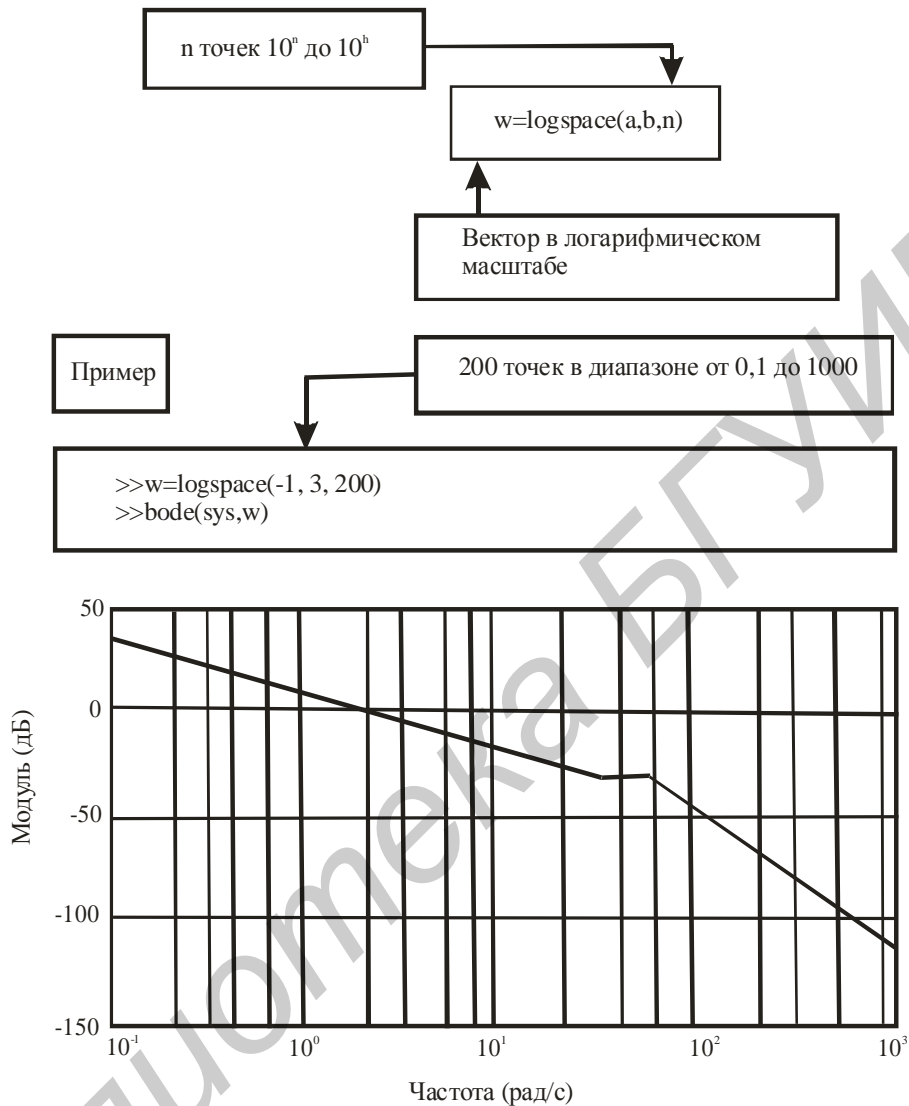


Рис. 2.4. Функция **longspace**

```
%Скрипт для построения диаграммы Боде
%изображенной на рис. 2.4
%
num=5*[011]
f1=[1 0], f2=[0 5 1], f3=[1/2500 6/50 1]
den=conv(f1,conv(conv(f2,f3)),
%
sys=tf(num,den);
bode(sys)
```

Вычисление

$$s(1+0,5s)\left(1+\frac{0,6}{50}s+\frac{0,6}{50}s^2\right)$$

Рис. 2.5. Скрипт для построения диаграммы Боде, изображенной на рис. 2.4

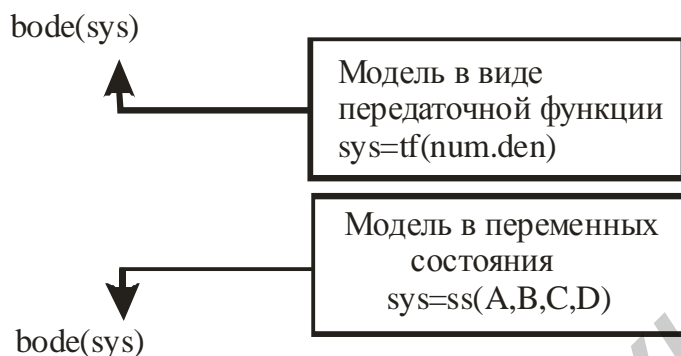
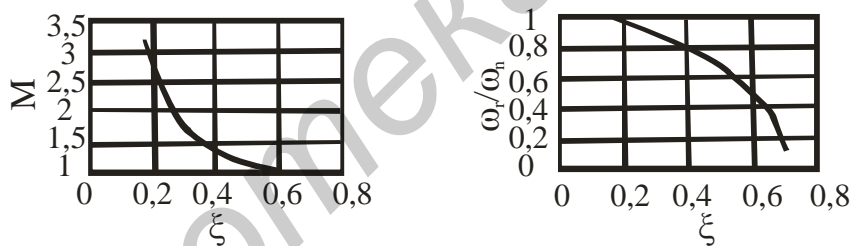


Рис. 2.6. Применение функции **bode** к модели в переменных состояниях

Связь между резонансной частотой  $\omega_r$ , максимумом амплитудно-частотной характеристики  $M_{p\omega}$ , коэффициентом затухания  $\zeta$  и собственной частотой  $\omega_n$  приведена на рис. 2.7. Данная информация чрезвычайно полезна, когда синтез системы производится в частотной области, а желаемые показатели качества заданы в виде требований к временным характеристикам.



а

```

zeta=[0.15:0.01:0.7]
wr_over_wn=sqrt(1-2*zeta.^2);
Mp=(2*zeta.*sqrt(1-2*zeta.^2)).^(-1);
%
subplot(121), plot(zeta,Mp),grid
xlabel('\zeta'), ylabel('M_{p\omega}')
subplot(122), plot (zeta, wr_over_wn),gnd
xlabel('\zeta'), ylabel('\omega_r\omega_n')
    
```

Построение графиков

б

Рис. 2.7. Зависимость  $M$  и  $\omega_r/\omega_n$  от параметра  $\zeta$  для системы второго порядка (а), скрипт **MATLAB** (б)

Коэффициенты полиномов

$w$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$

### Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретические сведения к лабораторной работе.
2. Получить у преподавателя структурную схему системы автоматического управления и индивидуальное задание (прил. 2).
3. Преобразовать структурную схему и вычислить передаточную функцию системы.
4. Рассчитать и вычислить на ЭВМ АЧХ замкнутой и разомкнутой систем, при этом составить таблицы для коэффициентов полинома, определить влияние коэффициентов звена обратной связи (см. табл. 2.2).
5. Рассчитать и вычертить на ПЭВМ ФЧХ замкнутой и разомкнутой систем, при этом составить таблицы для коэффициентов полинома, определить влияние коэффициентов обратной связи (см. табл. 2.3).
6. Определить  $w_c$ ,  $w_m$  и запасы устойчивости по фазе и амплитуде на этих частотах.
7. Определить наклон АЧХ в области частот среза ( $0,3w < w_c < 3w$ ).
8. Рассчитать вещественную частотную характеристику  $P(w)$  на частотах  $w$ , когда  $Q(w) = 0$ , и определить, устойчива система или нет.
9. Рассчитать с помощью MatLab ЛАЧХ разомкнутой системы и ФЧХ замкнутой (построить диаграмму Бode) и определить частоту  $\omega_c$  и  $\omega_m$ .

### Содержание отчета

1. Краткие теоретические сведения о преобразовании структурных схем и устойчивости.
2. Преобразования и задания структурных схем.
3. Передаточная функция системы.
4. Таблица коэффициентов характеристического уравнения.
5. АЧХ и ФЧХ замкнутой и разомкнутой системы.
6. Значения частот  $w_c$ ,  $w_m$  и наклон ЛАЧХ в области  $w_c$ .
7. Запас устойчивости по фазе  $\Delta\varphi(w_c)$  и амплитуде  $H(w_c)$ .
8. Вещественная частотная характеристика  $P(w)$  замкнутой системы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое передаточная функция системы управления и в каком виде система может быть описана?
2. Как обозначаются элементы структурных схем?

3. Объясните основные правила преобразования структурных схем систем управления.
4. Критерии устойчивости САУ.
5. Запасы устойчивости по фазе и амплитуде.

### Лабораторная работа №3

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ РЭА

### Цель работы

Изучить принципы функционирования вольтметра с микропроцессорным управлением и приобрести практические навыки проведения измерений в режиме программирования.

### Краткие теоретические сведения

Вольтметр универсальный В7-46 предназначен для измерения постоянных напряжений и силы тока, среднеквадратичных значений переменных напряжений и силы тока, электрического сопротивления постоянному току, отношения двух напряжений и обеспечивает математическую и логическую обработку результатов измерений. Вольтметр В7-46 применяется для обеспечения измерений при настройке, проверке и эксплуатации различной радиоэлектронной аппаратуры и используется как автономно, так и в составе автоматизированных измерительных систем. Вольтметр имеет выход в канал общего пользования (КОП).

Принцип действия вольтметра заключается в преобразовании измеряемой величины в нормированное постоянное напряжение значением от 0 до 2,2 В с последующим его преобразованием методом широтно-импульсной модуляции в цифровой код и вычислении значения измеряемой величины с учетом ранее полученных коэффициентов.

Схема электрическая структурная вольтметра универсального В7-46 приведена на рис. 3.1. Вольтметр состоит из аналоговой и цифровой части. Аналоговая часть предназначена для преобразования измеряемой величины в импульсы, длительность которых пропорциональна измеряемой величине, и состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП), источника опорного напряжения (ИОН), входного усилителя, усилителя  $U$ , преобразователя  $U_{\sim}$ , преобразователя  $R$ , преобразователя  $I$ , входного делителя  $U=$ , формирователя калибровочных напряжений, блока управления коммутационными элементами и стабилизатора аналогового.

Цифровая часть предназначена для управления вольтметром, формирования, обработки и индикации результата измерения, а также выдачи его в КОП. Цифровая часть состоит из микропроцессорного контроллера (МПК), дешифратора адреса, генератора синхроимпульсов

(ГСИ), реверсивного счетчика, блока передней панели, устройства сопряжения с КОП; блока развязки и стабилизатора цифрового.

Подавление помех общего вида в вольтметре достигается гальванической развязкой аналоговой части от цифровой части и от корпуса вольтметра, а также путем экранирования ее с помощью специального экрана G.

Библиотека БГУИР

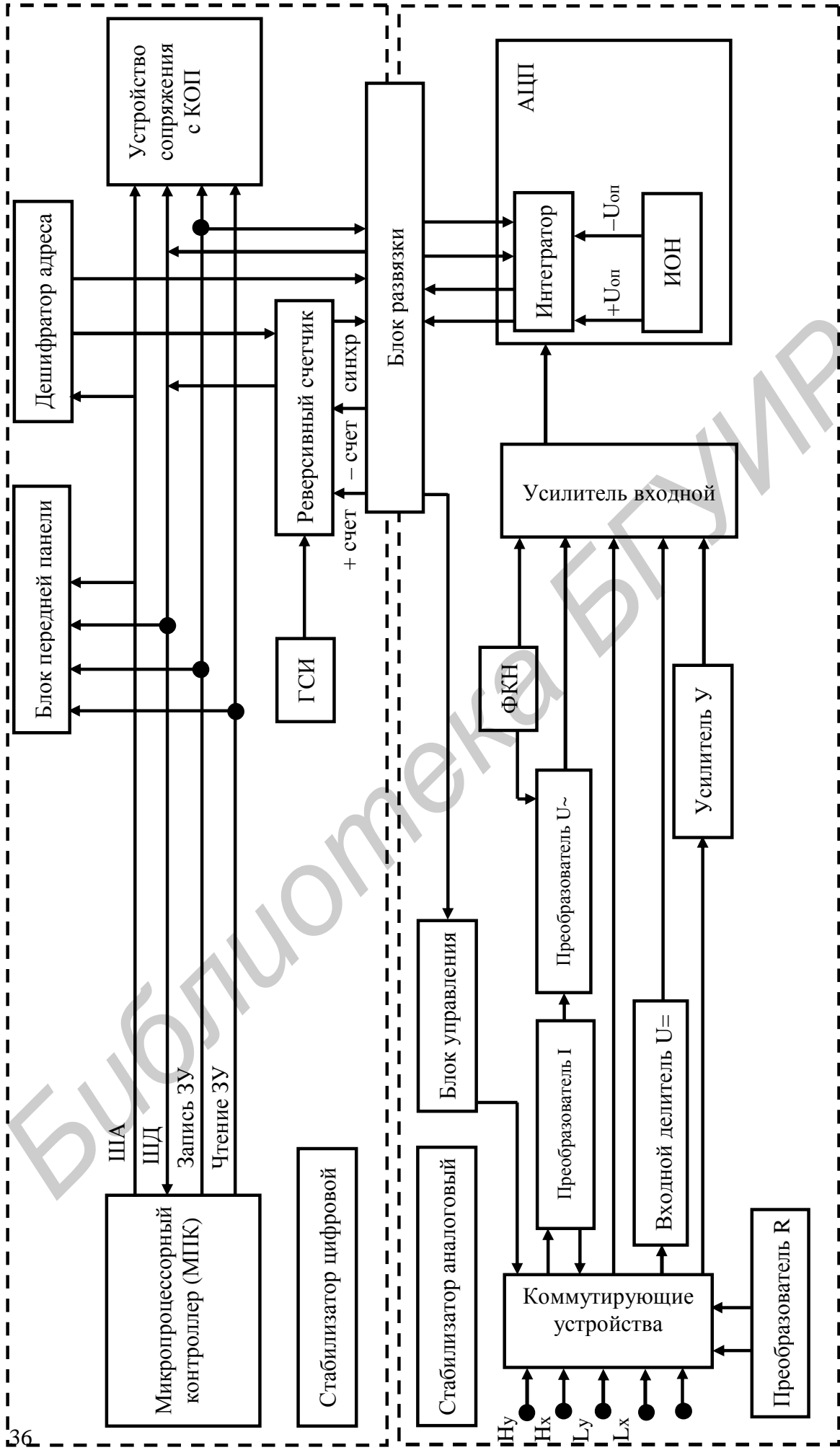


Рис. 3.1.1. Схема электрическая структурная вольтметра В7-46

Связь между аналоговой и цифровой частями осуществляется через импульсные трансформаторы блока развязки.

Измерение постоянного напряжения может проводиться по двум каналам – X (клеммы «Нх», «Lx») и Y (клеммы «Ну», «Лу»), а измерение переменного напряжения – только по каналу X.

Измерение электрического сопротивления может проводиться или по двухпроводной (клеммы «Нх», «Lx») или по четырехпроводной (клеммы «Нх», «Лу», «Ну», «Ly») схеме. При измерении токов источник тока подключают к клеммам «Ix», «Lx».

Входной усилитель обеспечивает необходимую чувствительность и высокое входное сопротивление вольтметра при измерении постоянного напряжения. Входной делитель служит для расширения диапазона измеряемых постоянных напряжений до 1000 В. Постоянное напряжение, поступающее на вход вольтметра, масштабируется с помощью входного делителя и входного усилителя и подается на вход АЦП.

ИОН вырабатывает опорные напряжения плюс  $U_{оп}$  и минус  $U_{оп}$ , из которых формируются опорные токи, необходимые для работы АЦП.

АЦП построен по методу широтно-импульсной модуляции, суть которого заключается в следующем: на вход интегратора непрерывно поступают ток, пропорциональный измеряемой величине, «форсирующий ток», периодически изменяющий полярность, и опорный ток, полярность которого зависит от соотношения выходного напряжения интегратора и уровня компарирования компараторов, подключенных к выходу интегратора. Полярность опорного тока автоматически устанавливается такой, чтобы суммарный заряд интегрирующей емкости за время преобразования был равен нулю.

В цифровую часть вольтметра передаются импульсы «+ счет» и «– счет». Импульс «+ счет» передается при положительной полярности, а импульс «– счет» – при отрицательной полярности опорного тока. Конец времени преобразования определяется по срезу импульса «– счет». При измерении переменного напряжения входные клеммы «Нх», «Lx» подключаются к входу преобразователя среднеквадратичного значения переменного напряжения в постоянное. В режиме измерения сопротивления входные клеммы вольтметра подключаются к преобразователю R. Принцип измерения состоит в измерении падения напряжения на измеряемом резисторе при протекании через него калиброванного тока.

Измеряемые токи с входных клемм «Ix», «Lx» поступают на вход преобразователя тока I, который представляет собой набор образцовых резисторов. Напряжение, создаваемое измеряемым током на образцовом резисторе, поступает либо на вход входного усилителя при измерении постоянного тока, либо на вход преобразователя переменного напряжения при измерении переменного тока.

Формирователь калибровочных напряжений выдает постоянные напряжения для калибровок входного усилителя и усилителя Y, а также переменное напряжение для калибровки преобразователя переменного напряжения.

Основным блоком цифровой части вольтметра является

микропроцессорный контроллер. Он обеспечивает управление процессом измерения, коррекцию результата измерения, выполнение математической и логической обработки результатов измерений, вывод их на индикаторное табло, взаимодействие всех узлов, контроль их работоспособности, ввод информации с передней панели и управление работой вольтметра с КОП.

С блоками цифровой части вольтметра МПК соединяется посредством:

- шины адреса (ША), обеспечивающей обращение контроллера к внутренней памяти и отдельным блокам вольтметра;
- шины данных (ШД), обеспечивающей передачу информации между запоминающим устройством контроллера и микропроцессором, а также между контроллером и узлами вольтметра;
- сигналов «Запись ЗУ» (ЗПЗУ) и «Чтение ЗУ» (ЧТЗУ) для синхронизации режимов записи и чтения информации в/из блоков вольтметра.

Обращение МПК к блокам вольтметра осуществляется по шине адреса. Дешифратор адреса дешифрирует состояние шины адреса и вырабатывает сигналы «Выбор устройства» и «Выбор аналоговой части».

Генератор синхроимпульсов предназначен для формирования счетных импульсов для реверсивного счетчика и форсирующих импульсов для работы АЦП.

Реверсивный счетчик обеспечивает формирование кода, соответствующего значению измеряемой величины.

Основную функциональную нагрузку в цифровой части вольтметра несет микропроцессорный контроллер, структурная схема которого приведена на рис. 3.2.

МПК состоит из:

- центрального процессорного устройства (ЦПУ);
- оперативного запоминающего устройства (ОЗУ);
- постоянного запоминающего устройства (ПЗУ).

В ЦПУ входят: генератор (Г), формирователь тактовых импульсов (ФТИ), буфер адреса (БА1), двунаправленный трехстабильный буфер данных (БД1), блок прерываний (БПр), системный контроллер (СК), блок сигнатурного анализа (БСА) и формирователь начальной установки (ФНУ).

В ПЗУ входят: буфер адреса (БА2), дешифратор адреса кристалла (ДАК), буфер данных (БД2), токовые ключи (К) и БИСС ПЗУ общей емкостью 16Кх8.

Организацию МПК и всей цифровой части вольтметра определяет однокристалльный восьмиразрядный микропроцессор 580ВМ80. Выводы МП А0-А15 формируют трехстабильную шину адреса, по которой осуществляется адресация памяти или блоков вольтметра. Выводы Д0 – Д7 МП формируют двунаправленную шину данных (ШД). По ней МП может как принимать данные для дальнейшей их математической и логической обработки, так и передавать результаты этой обработки внешним устройствам. При подаче на вход начальной установки SR микропроцессора сигнала логической «1» внутренние регистры МП устанавливаются в исходное состояние.



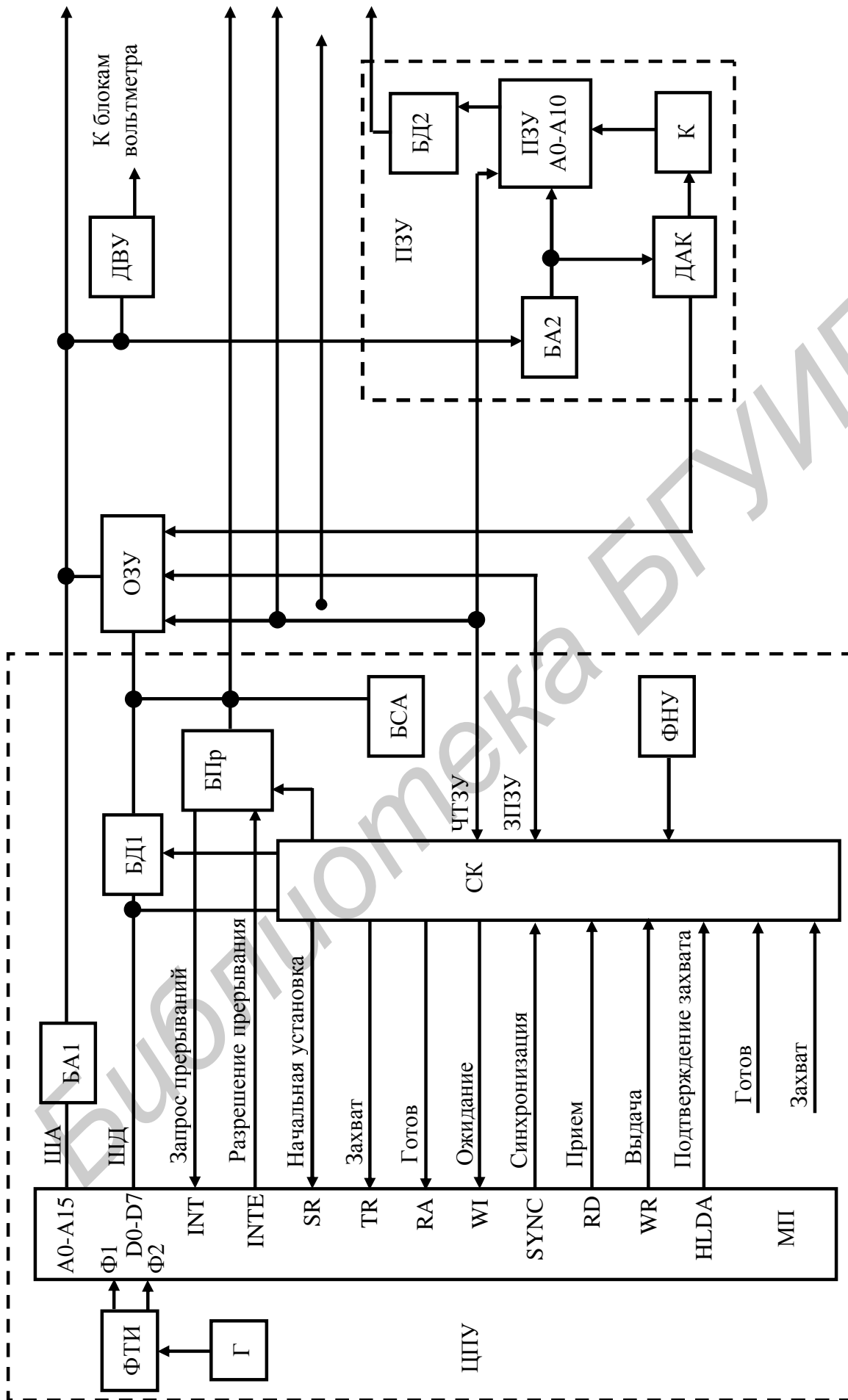


Рис. 3.2. Схема электрическая структурная микропроцессорного контроллера

На вывод TR («Захват») поступает от внешних устройств запрос допуска к шинам данных и адреса. Результатом появления сигнала захвата является то, что МП отключается от своих шин и информирует об этом другие блоки с помощью сигнала «Подтверждение захвата» на выводе HLDA.

Вход готовности «RA» и выход ожидания «WI» используются для синхронизации скорости работы МП с более медленными устройствами. При подаче на вход «RA» сигнала логического «0» МП переходит в режим ожидания и находится в нем до поступления на этот вход сигнала логической «1».

С вывода SYNC снимается сигнал синхронизации, который оповещает память и блоки вольтметра о начале нового машинного цикла, чем обеспечивается согласование во времени их работы с работой МП. Наличие на выводе «RD» («Прием») сигнала логической «1» дает разрешение на прием микропроцессором байта информации с шины данных ШД. Наличие на выводе WR («Выдача») сигнала логического «0» указывает на то, что МП выдает байт информации на шину данных.

Выводы «INT» («Запрос прерывания» INTE» («Разрешение прерывания») используются для организации режима прерываний от блоков вольтметра. Переход на режим прерываний осуществляется по специальной команде RST, которая формируется в блоке прерываний БПр при поступлении с одноименного выхода микропроцессора на его вход INTE сигнала логической «1», а на вход Пр1 или Пр2 – сигнала логического «0», поступающего соответственно из устройства сопряжения с КОП или из АЦП.

В БПр вырабатывается сигнал «Запрос прерывания», который поступает на вход INT микропроцессора. По этому сигналу МП считывает код команды RST, что позволяет ему сформировать сигнал прерывания, т.е. адресовать одну из двух подпрограмм обслуживания прерывания в зависимости от того, какое устройство выставило прерывание – КОП (Пр1) или АЦП (Пр2).

Прием информации из памяти или блоков вольтметра в МП происходит по сигналу «Чтение ЗУ» (ЧТЗУ), запись данных с ШД в память осуществляется по управляющему сигналу «Запись ЗУ» (ЗПЗУ).

Системный контроллер (СК) формирует следующие сигналы, управляющие микропроцессором: «Чтение ЗУ» и «Запись ЗУ»; «Готов», который используется для формирования такта ожидания микропроцессора и для организации пошагового выполнения программы в процессе настройки МПК; «Захват» – запрос допуска к шинам данных и адреса; «Начальная установка» – для установки регистров микропроцессора в исходное состояние.

Буфер данных БД1 служит для передачи данных из/в МП, а также для согласования шины данных микропроцессора с блоками вольтметра.

В процессе обмена информацией с ОЗУ или ПЗУ или с блоками вольтметра микропроцессор по шине адреса ША выдает адрес ячейки памяти или блока вольтметра, с которым будет проводиться обмен информацией.

Согласование микропроцессора по нагрузочной способности осуществляется буфером адреса БА1.

Дешифратор выбора устройств ДВУ предназначен для дешифрации адреса, поступающего по ША, и определения конкретного блока, с которым

должен произойти обмен информацией.

Дешифратор адреса кристалла ДАК выдает адрес кристалла ПЗУ или ОЗУ, в котором записана используемая в данный момент программа, при этом в ПЗУ ключи К подключают питание к выбранному кристаллу ПЗУ.

Формирователь начальной установки ФНУ служит для установки МПК в исходное состояние при включении вольтметра.

Блок сигнатурного анализа БСА предназначен для выбора одной из программ сигнатурного анализа блоков вольтметра и формирования окна сигнатурного анализа.

ОЗУ предназначено для хранения информации, получаемой в процессе работы вольтметра. Выбор адреса памяти ОЗУ осуществляют дешифратор адреса кристалла ДАК и блок системного контроллера.

В ПЗУ хранятся программы работы вольтметра, тестовой проверки и сигнатурного анализа.

Передача информации из цифровой части вольтметра в аналоговую выполняется следующим образом: сформированный в МПК для передачи байт информации восемь раз засылается по адресу «Выбор аналоговой части» по шине данных ШД7. После каждой засылки программно осуществляется сдвиг содержимого аккумулятора МП. Таким образом, через шину данных ШД7 последовательно передается байт информации, а затем аналогично передаются и остальные байты.

## Порядок выполнения работы

1. Установить переключатель СЕТЬ вольтметра в положение ВКЛ при отключенном кабеле на входе. Убедиться в течение 65–70 с в исправности вольтметра и правильности автокалибровки. В первый момент после включения на индикаторном табло в течение 2–3 с индицируется сообщение HELLO, а затем индицируются этапы автокалибровки. Критерием исправности вольтметра является отсутствие индикации ErrXX, где XX – номер неисправности.

2. Изучить порядок работы вольтметра в режиме программирования:

Режим программирования предназначен для задания математической, статистической и логической обработки результата измерения, а также для выполнения других дополнительных функций.

Для ввода программ необходимо провести следующие операции.

2.1. Нажать клавишу ПРОГРАМ, при этом на индикаторном табло вольтметра появится сообщение Pr XX, где XX – двузначный номер программы. При нажатой клавише ПРОГРАМ остальные клавиши вольтметра, кроме клавиш ИсП и ВМ, изменяют свое назначение. Назначение клавиш в режиме программирования указано непосредственно на их поверхности.

2.2. Установить номер выбранной программы, для чего нажать соответствующие клавиши, обозначенные гравировкой от «0» до «9». Вводить сначала старший, а затем младший разряды двухзначного номера программы. Если при вводе номера программы была допущена ошибка, ввод

программы повторить. Номер программы введен правильно, если он правильно индицируется на индикаторном табло.

2.3. Нажать клавишу ВвП. На индикаторном табло вольтметра должно индицироваться шестизначное число. В старшем разряде числа установится курсор, обозначенный миганием индикатора. Курсор указывает разряд, в котором возможна замена цифры. Курсор можно передвигать при помощи клавиш «←» и «→» Установить размер выборки N при помощи клавиш «0» – «9», работа клавиш «,» и «+/-» в этом режиме запрещена.

2.4. Для перехода из режима программирования в режим измерения нажать клавиши ВвП и ПРОГРАМ. Для отказа от выбранной программы нажать клавишу «X».

2.5. Нажать клавишу ВЫЧ. На индикаторном табло вольтметра будет индицироваться результат статистической обработки результатов N измерений в соответствии с выбранной программой.

3. Подключить кабель от генератора сигналов к входам вольтметра Нх и Lх. Установить на генераторе частоту и напряжение согласно заданному варианту в табл. 3.1. Включить генератор.

Таблица 3.1

Вариант	1	2	3	4
Частота генератора, Гц	0,8	0,7	0,6	0,5
Напряжение, В	2-3	4-5	6-7	8-9
Размер выборки N	75	100	125	150
Программа	20	21	22	20

4. Выполнить программу 06 по методике, изложенной в пп. 2.2–2.6.

5. Провести статистическую обработку результатов измерений.

Программа 11 используется для последовательного просмотра результатов статистической обработки.

5.1. Ввести номер программы 11 по методике, изложенной в пп. 2.2–2.4. На индикаторном табло будет индицироваться размер выборки, заданный в предыдущей операции.

5.2. Нажимая каждый раз клавишу ВвП, можно последовательно просмотреть результаты вычисления: среднего значения величин измерения, математического ожидания, вычисления дисперсии, среднеквадратического отклонения результата измерения.

5.3. Работа по программе 11 закончена, когда на индикаторном табло установится сообщение Pr11.

6. Отыскание экстремальных значений измеряемой величины.

Выполнить одну из программ 20–22 согласно заданному варианту по методике, изложенной в пп. 2.2–2.6. Вольтметр будет определять экстремальное значение измеряемой величины ( $X_{\min}$  или  $X_{\max}$  или  $X_{\max} - X_{\min}$ ).

7. Просмотр итоговых результатов поиска экстремальных значений результата измерения.

Программа 23 используется после работы вольтметра по программам

20,21,22.

7.1. Ввести номер программы 23 по методике, изложенной в пп. 2.2–2.6. На индикаторном табло будет индицироваться результат по программе 20.

7.2. Нажимая каждый раз клавишу ВВП, можно последовательно просмотреть результаты логической обработки результатов измерения по программе 21, а затем – по программе 22. Работа по программе 23 заканчивается, когда после очередного нажатия клавиши ВВП на индикаторном табло появится сообщение Pr 23.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Теоретические сведения о принципах функционирования управляющей системы вольтметра.
3. Схемы электрические структурные вольтметра и микропроцессорного контроллера.
4. Результаты измерений.
5. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Принцип действия вольтметра.
2. Состав и назначение блоков вольтметра.
3. Из чего состоит и как функционирует микропроцессорный контроллер?
4. Как организован обмен данными между микропроцессором, памятью и блоками вольтметра?
5. Как осуществляется управление микропроцессором блоками вольтметра?
6. Как организован режим прерываний?
7. Для чего предназначен системный контроллер сигнатурного анализа?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

### Цель работы

Исследование качественных показателей систем автоматического регулирования на ЭВМ.

### Краткие теоретические сведения

Устойчивость работы САУ является необходимым, но недостаточным условием. Система должна обладать определенными качеством и техническими условиями на разработку САУ.

Необходимо отметить, что нормы запасов устойчивости определяют показатели качества систем автоматического регулирования. Следует иметь в виду, что показатели переходного процесса определяются среднечастотной частью характеристики: время регулирования обратно пропорционально частоте среза  $\omega_c$  (быстродействие системы); перерегулирование, колебательность процесса тем меньше, чем больше запас устойчивости по фазе и протяженнее среднечастотная часть ЛАЧХ.

Точность установившегося режима зависит в первую очередь от коэффициента усиления и порядка астатизма системы и связана с низкочастотной частью ЛАЧХ. Коэффициент  $K_v$ , определяющий ошибку системы в установившемся режиме (при постоянном входном сигнале), численно равен величине, обратной частоте  $\omega = 1/K_v$ . Эта частота получается при продолжении низкочастотной части ЛАЧХ до оси частот (рис. 4.1).

Наиболее просто сведения о критериях качества определяются из кривой переходного процесса (рис. 4.2), получающейся на выходе системы при подаче на вход ступенчатого воздействия. О степени устойчивости системы судят по величине перерегулирования  $\sigma$ , о быстродействии – по времени регулирования (времени переходного процесса).

Коэффициент усиления  $K_v$  можно определить по кривой переходного процесса при подаче на вход системы скачка скорости. Этот метод определения качественных показателей удобен при экспериментальном определении качественных показателей системы.

Качество САУ характеризуется следующими показателями (см. рис. 4.2):

1) максимум перерегулирования

$$\sigma_{\max} = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} 100 \% ; \quad (4.1)$$

2) время регулирования  $t_p$ ;

3) число колебаний  $N$ , регулируемых в течение времени  $t_p$ ;

4) собственная частота колебаний системы  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ , где  $T_0$  – период

собственных колебаний системы;

5) логарифмический декремент затухания

$$d = \ln \frac{q_{i\max}}{q_{i+1\max}}; \quad (4.2)$$

б) максимальная скорость отработки регулируемой величины  $\left[ \frac{dx}{dt} \right]_{\max}$ .

Можно по показателям переходного процесса  $\sigma_{\max}$ ,  $t_p$ ,  $T_0$ , используя приближенные аппроксимирующие зависимости, оценить частоту среза и запас устойчивости или, наоборот, определить  $\sigma_{\max}$ ,  $t_p$ ,  $T_0$ , имея  $\omega_c$  и  $\Delta\varphi(\omega_c)$ :

$$\sigma_{\max} \% = 73 - \Delta\varphi(\omega_c), \quad (4.3)$$

$$t_p = \frac{7-9}{\omega_c}, \quad (4.4)$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_c \cos \frac{\Delta\varphi(\omega_c)}{2}}. \quad (4.5)$$

Рассмотрим связи между переходными процессами и амплитудными логарифмическими характеристиками для простейших систем первого и второго порядков. Обе системы в разомкнутом состоянии содержат одно интегрирующее звено. Для системы первого порядка частота среза  $\omega_c$  равна коэффициенту усиления  $K$ , где  $T = 1/K$  – постоянная времени экспоненты переходной функции  $\omega_c$  замкнутой системы.

В системе первого порядка время регулирования можно выразить следующим образом:

$$t_p = 3T = \frac{3}{\omega_c} = \frac{\pi}{\omega_c}. \quad (4.6)$$

Система второго порядка в замкнутом состоянии представляет собой колебательное звено или последовательно соединенные два апериодических звена.

Передаточная функция замкнутой системы может быть представлена как

$$W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (4.7)$$

где  $T = \sqrt{\frac{T_1}{K}} = \frac{1}{\sqrt{2T_1K}}$ .

Для системы второго порядка при  $\frac{1}{T_1} = \omega_1 < \omega_c < K$  затухание колебаний  $\xi$  в замкнутой системе будет всегда меньше 0,5, при  $\omega_1 < \omega_c < K$  затухание  $\xi = 0,5$  и при  $\omega_1 < \omega_c < K$  затухание  $\xi$  больше 0,5.

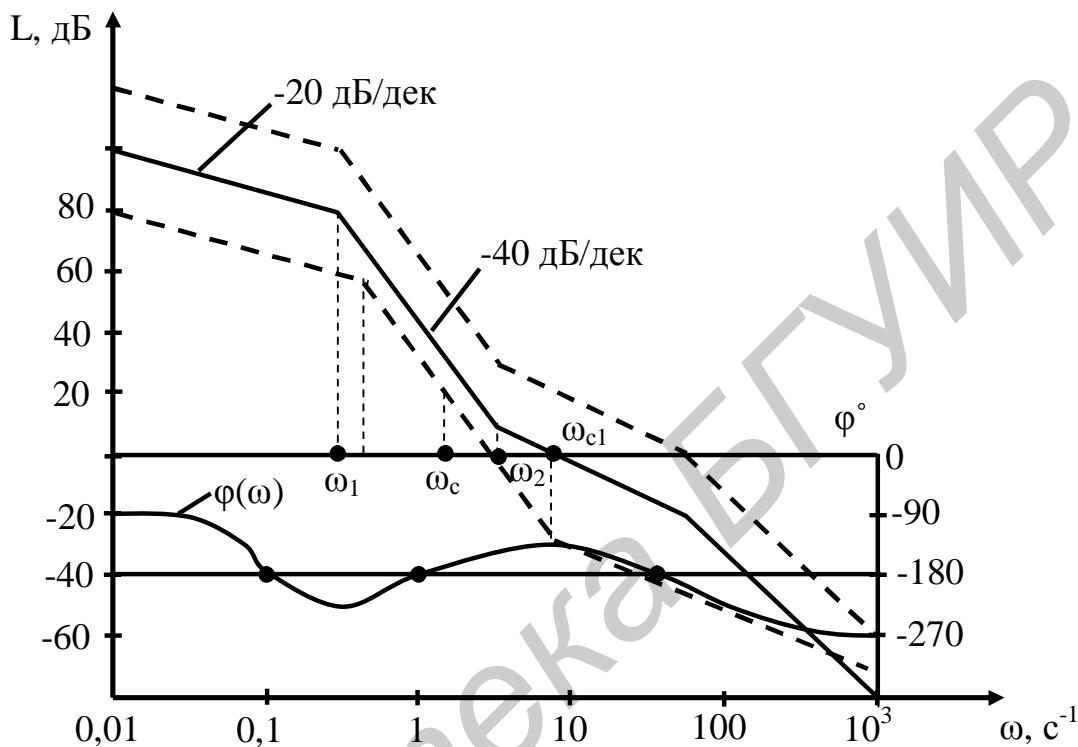


Рис. 4.1. Логарифмическая, амплитудная и фазочастотная характеристики для системы автоматического регулирования

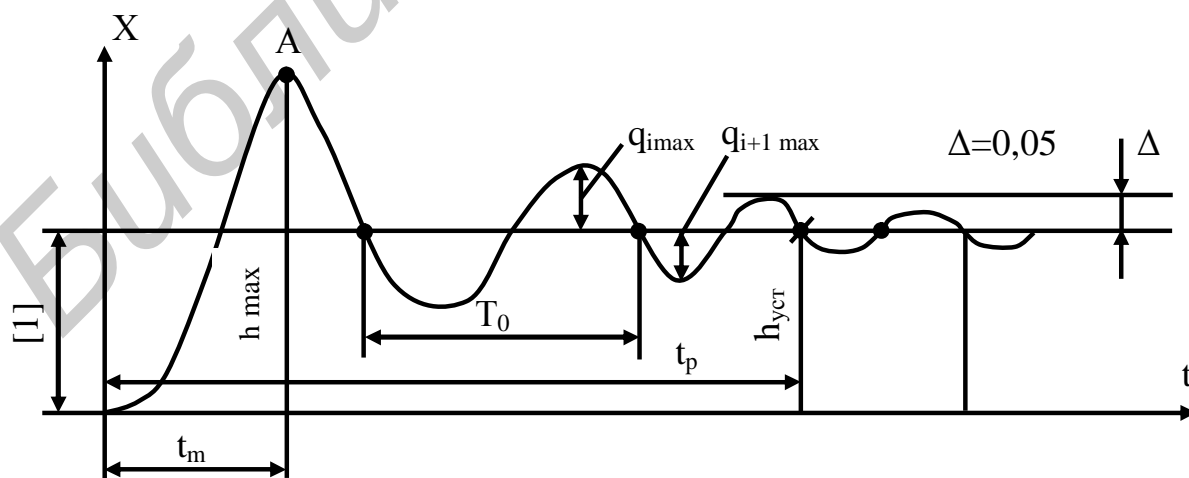


Рис. 4.2. Характеристики переходного процесса при типовом единичном возмущении



При оптимальном коэффициенте затухания  $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$  отношение частот

$\frac{\omega_1}{\omega_c}$  равно 2. Чем больше отношение  $\frac{\omega_1}{\omega_c}$ , тем выше коэффициент затухания,

тем ближе переходная функция к экспоненте постоянной времени  $T = \frac{1}{\omega_c}$ .

При отношении  $\frac{\omega_1}{\omega_c} > 2$  время регулирования в системе второго порядка

довольно точно соответствует формуле  $t_p = 3T = \frac{3}{\omega_c}$ , а перерегулирование

практически отсутствует. Можно сделать вывод: для того чтобы переходный процесс не был колебательным ( $\xi > 0,5$ ), частота среза  $\omega_c$  должна находиться на участке ЛАХ с наклоном 20 дБ/дек. Это справедливо и для более сложных систем.

Частотные методы исследования систем управления широко используются в инженерной практике. Применение этих методов позволяет определить такие важные показатели качества, как быстродействие, перерегулирование, колебательность процесса. При воздействии на систему единичной, ступенчатой функции  $\varphi(t) = 1(t)$  выходная величина, являющаяся переходной характеристикой системы  $h(t)$ , определяется через вещественную частотную или мнимую частотную характеристики замкнутой системы

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega)}{\omega} \sin \omega t dt, \quad (4.8)$$

где  $P(\omega)$  – вещественная частотная характеристика замкнутой САУ.

Вещественная частотная характеристика должна определяться для замкнутых систем с жесткой обратной связью. Самые различные системы имеют приблизительно одинаковые переходные процессы, если у них примерно одинаковые частотные характеристики. Разница в переходных процессах тем меньше, чем при больших частотах наблюдается различие в частотных характеристиках.

Изучение системы необязательно проводить во всем диапазоне частот от 0 до  $\infty$ . Достаточно ограничиться областью так называемых существенных частот (иначе называемых областью пропускания частот), соответствующих достаточно большим значениям ординат  $P(\omega)$ . Обычно считается, что если при некотором  $\omega$  соблюдается неравенство, то начиная с этой частоты, вид частотной характеристики можно не учитывать.

Значение переходной функции  $h(0)$  в начальный момент времени равно конечному значению вещественной частотной характеристики. Установившееся конечное значение переходной функции  $h(\infty)$  равно начальному значению  $P(0)$  частотной характеристики.

Чтобы величина перерегулирования в статической системе не превышала 18 % от статического отклонения:

$$\frac{x_{\max} - x_{\infty}}{x_{\infty}} 100 \% \leq 18 \%, \quad (4.9)$$

достаточно, чтобы  $P(\omega)$  была положительной невозрастающей функцией. Чтобы переходный процесс протекал монотонно, достаточно, чтобы производная  $\frac{dP}{d\omega}$  представляла собой отрицательно убывающую по абсолютной величине непрерывную функцию от  $\omega$ . Признаком немонотонности процесса и наличия перерегулирования является условие  $|P(\omega)| < P(0)$ . Если  $P(\omega)$  имеет максимум  $P_{\max}$  и ее можно представить как разность двух невозрастающих положительных непрерывных функций, каждая из которых удовлетворяет условию монотонности, то величина перерегулирования оценивается следующим образом:

$$\sigma = \frac{1,18P_{\max} - P(0)}{P(0)} 100 \% . \quad (4.10)$$

Если изменить масштаб  $P(\omega)$  вдоль оси  $P$  в  $n$  раз, то масштаб кривой переходного процесса изменится вдоль оси  $t$  тоже в  $n$  раз. Если увеличить или уменьшить масштаб  $P(\omega)$  вдоль оси  $W$  раз, то масштаб  $x(t)$  уменьшится или увеличится в то же число раз. Другими словами, если вещественной частотной характеристике  $P(\omega)$  соответствует переходная функция, то вещественной частотной характеристике  $P(n\omega)$  будет соответствовать переходная функция  $x = (t/n)$ . Если  $P(\omega)$  имеет высокий и острый пик при частоте  $W_k$ , то переходный процесс содержит медленно затухающие колебания этой частоты.

Склонность системы к колебаниям тем больше, а затухание колебаний тем меньше, чем острее и выше пик. Основным инженерным методом построения переходной характеристики является метод трапеций. Построение переходного процесса осуществляется следующим образом:

а) по логарифмическим частотным характеристикам разомкнутой системы с жесткой обратной связью, пользуясь номограммой замыкания  $P(\omega) = F[L(\omega)\varphi(\omega)]$ , строится вещественная частотная характеристика замкнутой системы с жесткой обратной связью;

б)  $P(\omega)$  разбивается на трапеции;

в) для каждой трапеции определяется коэффициент наклона как отношение частот и по нему из таблицы-функции определяют значение функции;

г) на общем графике строится для каждой трапеции соответствующий переходный процесс с учетом знака начальной ординаты. При этом каждый табличный интервал времени уменьшается в  $\omega_{ni}$  раз, а каждая табличная ордината увеличивается в  $P_i(0)$  раз;

д) суммируются ординаты всех построенных кривых и строится результирующий переходный процесс  $h(t)$ .

Интегральные оценки позволяют оценить быстроту затухания процесса и отклонение регулируемой величины, не определяя то и другое в отдельности. В основе метода лежит разработка условных интегральных показателей, наиболее просто характеризующих отклонение реального переходного процесса от идеализированного. За идеальный переходный процесс обычно принято считать либо ступенчатый (скачкообразный) процесс, протекающий мгновенно, либо экспоненциальный процесс с заданными параметрами. В качестве возмущения обычно принимается ступенчатая единичная функция.

Другой вид возмущения приведет к усложнению расчетов. Для оценки качества процесса регулирования используются интегральные характеристики, имеющие вид определенного интеграла от некоторых функций отклонения регулируемой величины.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с целью работы и теоретическими сведениями.
2. Получить у преподавателя номер варианта и дискету с программой расчета.
3. Рассчитать по структурной схеме передаточную функцию замкнутой системы управления.
4. Представить в табличной форме все коэффициенты полинома в зависимости от  $K$ ,  $T_i$ ,  $K_{oc}$ .
5. Рассчитать вещественную частотную характеристику  $P(\omega)$  замкнутой системы.
6. Рассчитать переходной процесс  $h(t)$  в замкнутой системе по методу трапеций.
7. Построить переходной процесс на ЭВМ, задавая различные значения  $K$  и  $T_i$ , получить графики  $h(t)$  от этих переменных.
8. По переходным процессам оценить качественные показатели процесса.
9. Рассчитать и построить переходный процесс для разомкнутой системы регулирования и оценить влияние  $K_{oc}$  и  $T_i$  на качественные показатели процесса.
10. По показателям переходного процесса, используя приближенные вычисления, подсчитать частоту среза и запас устойчивости по фазе.

### **Содержание отчета**

1. Краткие теоретические сведения о показателях качества и параметрах устойчивости.
2. Расчет вещественной частотной характеристики.
3. Расчет переходной характеристики замкнутой системы и графики переходного процесса.

4. Расчет переходной характеристики разомкнутой системы и графики переходного процесса.
5. Графики зависимости перерегулирования и времени регулирования от коэффициента обратной связи.
6. Выводы о влиянии постоянной времени и коэффициента усиления системы на переходной процесс.
7. Таблица коэффициентов полинома.
8. Качественные показатели переходного процесса.
9. Частота среза и запас устойчивости по фазе.

### **Контрольные вопросы**

1. Связь показателей качества с характеристиками устойчивости системы.
2. Показатели качества и их оценки.
3. Получение вещественной частотной характеристики замкнутой системы.
4. Метод трапеций.
5. Интегральные оценки качества.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Теория автоматического управления / А. А. Бобаков [и др.]. – М. : Высш.шк., 1986. – 365 с.
2. Иващенко, Н. Н. Автоматическое регулирование / Н. Н. Иващенко. – М. : Машиностроение, 1978. – 736 с.
3. Бессикерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бессикерский, Е. П. Попов. – М. : Высш.шк., 1976. – 437 с.
4. Воронов, А. А. Основы теории автоматического управления / А. А. Воронов. – М. : Машиностроение, 1980. – 560 с.
5. Биологическая кибернетика / под ред. А. Б. Когана. – М.: Высш.шк., 1977. – 436 с.
6. Майстрах, Е. В. Автоматическое управление физиологическими функциями организма в условиях патологии / Е. В. Майстрах, Ю. С. Вайль. – Л. : Медицина, Ленингр. отд., 1978. – 340 с.
7. Вольтметр универсальный В7-46: инструкция по эксплуатации. – 1991.
8. Вольтметр универсальный В7-46: техническое описание. – 1991.

## Индивидуальное задание к лабораторной работе №1

№ варианта	Характеристики звеньев					
	Тип звена	Тип звена ОС	$T_i$	$T$ звена ОС	$K_i$	$K_{oc}$
1	1, 3, 5	2 усилит.	$T1 = 0,04$ $T5 = 0,2$	$T2 = 0,01$	$K1 = 100$ $K3 = 0,02$ $K5 = 500$	$K2 = 0,005$
2	1, 3, 5	3 усилит.	$T1 = 0,02$ $T5 = 0,04$	—	$K1 = 200$ $K3 = 0,4$ $K5 = 1000$	$K3 = 0,0001$
3	2, 5, 8	1 усилит.	$T2 = 0,04$ $T5 = 0,02$ $T8 = 0,001$	$T2 = 0,06$	$K2 = 0,1$ $K5 = 40$ $K8 = 100$	$K1 = 20$
4	2, 5, 6	2 усилит.	$T2 = 0,005$ $T5 = 0,04$ $T6 = 0,001$	$T2 = 0,004$	$K2 = 0,4$ $K5 = 100$ $K6 = 0,1$	$K2 = 0,001$
5	3, 5, 8	1 усилит.	$T5 = 0,02$ $T8 = 0,002$	$T1 = 0,04$	$K3 = 0,04$ $K5 = 200$ $K8 = 50$	$K1 = 40$
6	3, 6, 8	2 усилит.	$T6 = 0,004$ $T8 = 0,2$	$T2 = 0,005$	$K3 = 0,05$ $K8 = 200$	$K2 = 0,004$
7	4, 2, 6	1 усилит.	$T4 = 0,04$ $T2 = 0,002$ $T6 = 0,001$	$T1 = 0,05$	$K4 = 100$ $K2 = 0,05$	$K1 = 10$
8	4, 1, 5	2 усилит.	$T4 = 0,02$ $T1 = 0,4$ $T5 = 0,1$	$T2 = 0,05$	$K4 = 200$ $K1 = 50$ $K5 = 200$	$K2 = 0,002$

## Индивидуальное задание к лабораторной работе №2

Параметры звена	Схема №1				Схема №2			
	Варианты							
	1	2	3	4	5	6	7	8
K1	200	400	500	600	250	400	500	800
K2	500	25	20	100	400	250	200	125
K3	20	54	10	20	20	40	80	50
K4	5	15	80	100	50	100	180	160
K5	1	1	1	1	0,02	0,01	0,04	0,05
K6	0,1	0,2	0,4	0,5	0,005	0,004	0,002	0,001
K7	0,02	0,05	0,01	0,08	0,02	0,01	0,05	0,02
T1	0,1	0,3	0,4	0,8	0,2	0,4	0,6	0,8
T3	0,05	0,01	0,08	0,1	0,05	0,02	0,03	0,01
T4	0,008	0,005	0,001	0,002	–	–	–	–
T5	–	–	–	–	0,1	0,3	0,5	0,6
T7	–	–	–	–	0,01	0,02	0,04	0,06
T8	0,001	0,0008	0,002	0,005	0,001	0,004	0,005	0,004
$\xi$	0,2	0,4	0,6	0,8	–	–	–	–

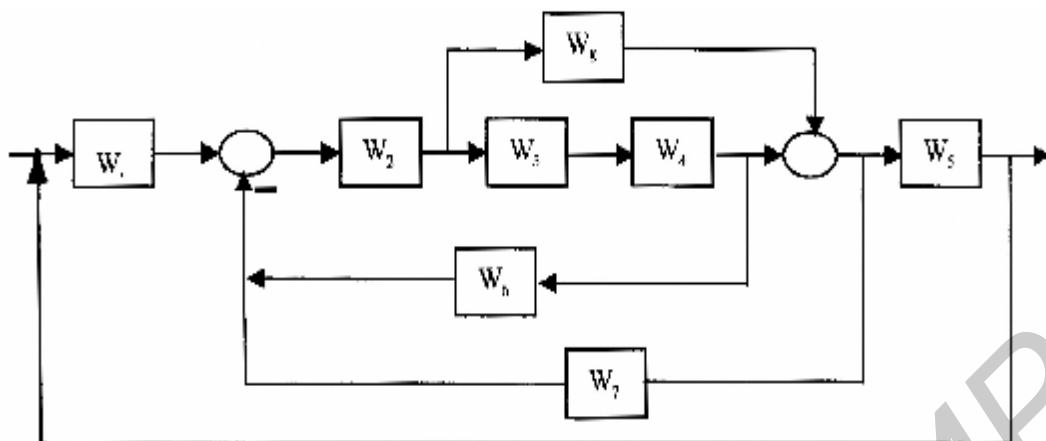


Рис. П.1. Структурная схема СУ №1

$$W_1 = K_1;$$

$$W_4 = \frac{K_4(T_4p + 1)}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1};$$

$$W_7 = K_7;$$

$$W_2 = K_2;$$

$$W_5 = \frac{1}{p};$$

$$W_8 = T_8 p + 1$$

$$W_3 = \frac{K_3}{p(T_3 p + 1)};$$

$$W_6 = K_6;$$

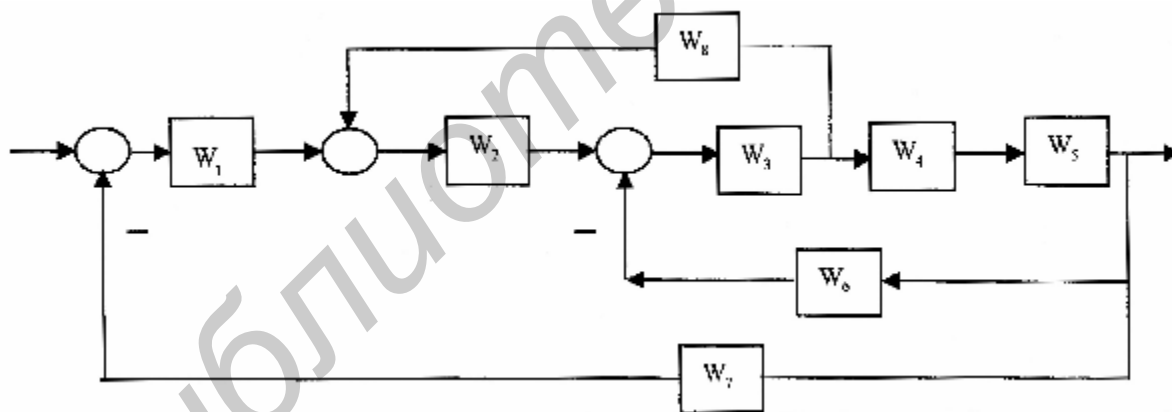


Рис. П.2. Структурная схема СУ №2

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1};$$

$$W_4(p) = K_4;$$

$$W_7(p) = (T_7 p + 1)K_7;$$

$$W_2(p) = K_2;$$

$$W_5(p) = \frac{K_5}{T_5 p + 1};$$

$$W_8(p) = T_8 p + 1$$

$$W_3(p) = \frac{K_3}{T_3 p + 1};$$

$$W_6(p) = K_6;$$

Библиотека БГУИР



Индивидуальное задание к лабораторной работе №4

Передаточная функция разомкнутой системы	Передаточная функция звена ОС	Характеристики звеньев					Вариант задания
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	
$W(p) = \frac{K_1(T_1p + 1)}{(T_2p + 1)}$	$W(p) = \frac{K_2}{p}$	0,005	0,05		50	0,005	1,1
	$W(p) = T_3p + 1$	0,02	0,1	$2 \cdot 10^{-4}$	150	1	1,2
	$W(p) = K_2$	0,01	0,2		600	0,001	1,3
$W(p) = \frac{K_1p}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}$	$W(p) = \frac{K_2}{p}$	0,008	0,2		25	0,04	2,1
	$W(p) = T_3p + 1$	0,25	0,1	$10^{-3}$	100	1	2,2
	$W(p) = K_2$	0,02	0,4		400	0,001	2,3
$W(p) = \frac{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}{K_3p}$	$W(p) = \frac{K_2}{p}$	0,002	0,008	0,2	1	0,02	3,1
	$W(p) = T_3p + 1$	0,01	0,004	0,4	1	1	3,2
	$W(p) = K_2$	0,04	0,008	0,1	1	0,05	3,3
$W(p) = \frac{K_1(T_1p + 1)}{T_2p^2 + 2\xi(T_1p + 1)}$	$W(p) = \frac{K_2}{p}$	0,005	0,2		20	0,05	4,1
	$W(p) = T_3p + 1$	0,01	0,4	$5 \cdot 10^{-3}$	100	1	4,2
	$W(p) = K_2$	0,02	0,1		2500	1	4,3

Учебное издание

**Грушецкий** Святослав Васильевич  
**Зайцев** Дмитрий Вячеславович  
**Кайдов** Олег Леонидович

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

по дисциплинам

«Управление в биологических и технических системах»  
и «Системы автоматического управления, микропроцессоры и микроЭВМ  
в электронно-оптическом аппаратостроении»

для студентов специальностей «Медицинская электроника»  
и «Электронно-оптическое аппаратостроение»  
дневной формы обучения

Редактор Т. П. Андрейченко  
Корректор Е. Н. Батурчик

---

Подписано в печать  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 2,8.

Формат 60×84 1/16.  
Печать ризографическая.  
Тираж 120 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л.  
Заказ 382.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровка, 6