А.М. АБАКУМОВ, Д.Г. РАНДИН

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

Учебно-методическое пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

К а ф е д р а «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

А.М. АБАКУМОВ, Д.Г. РАНДИН

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

Учебно-методическое пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2011

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 62-52 (075)
А 13

Абакумов А.М.

А 13 **Системы автоматического управления в электромеханике**: учеб.-метод. пособ. / *А.М. Абакумов*, *Д.Г. Рандин.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 153 с.: ил.

ISBN 978-5-7964-1498-9

Рассмотрены вопросы исследования динамических характеристик электромеханических систем автоматического управления. Приведены задания на проведение исследований и примеры расчетов характеристик типовых динамических звеньев, анализа устойчивости, исследования систем автоматического управления с типовыми регуляторами, синтеза регуляторов в одноконтурных системах и системах подчиненного регулирования.

Предназначено для бакалавров по направлению 13.03.02 "Электроэнергетика и электротехника", по дисциплине «Управление электромеханическими преобразователями», а также может быть полезно студентам родственных направлений подготовки.

УДК 62-52 (075)
А 13

Рецензенты: д-р техн. наук *С.Я. Галицков*,
канд. техн. наук *В.П. Курган*

ISBN 978-5-7964-1498-9

© А.М. Абакумов, Д.Г. Рандин, 2011
© Самарский государственный
технический университет, 2011

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АФХ – амплитудно-фазовая характеристика
АЧХ – амплитудная частотная характеристика
БВ – блок вентилей
ДПТ – двигатель постоянного тока
ЛАХ – логарифмическая амплитудная частотная характеристика
ЛФХ – логарифмическая фазовая частотная характеристика
МО – модульный оптимум
ООС – отрицательная обратная связь
П – пропорциональный регулятор
ПИ – пропорционально-интегральный регулятор
ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор
ПК – персональный компьютер
ПОС – положительная обратная связь
ПФ – передаточная функция
РС – регулятор скорости
РТ – регулятор тока
САУ – система автоматического управления
СИФУ – система импульсно-фазового управления
СПР – система подчиненного регулирования
ТО – технический оптимум

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое издание адресовано, прежде всего, студентам специальностей 140601 «Электромеханика» и 140607 «Электрооборудование автомобилей и тракторов», а также бакалаврам по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» в качестве учебно-методического пособия по курсу «Системы автоматического управления (САУ) в электромеханике».

Пособие содержит комплекс заданий по разработке и исследованию электромеханических САУ и методические указания к их выполнению.

Эффективным методом исследования САУ, представляющих собой замкнутые динамические системы, является моделирование их на ПК с использованием стандартных программ. В пособии для этих целей используется программа CLASSiC-3.01, разработанная в Санкт-Петербургском электротехническом университете «ЛЭТИ».

Работа №1 посвящена знакомству с программой CLASSiC-3.01. В работе №2 исследуются характеристики типовых динамических звеньев. Исследованию устойчивости и динамических характеристик САУ посвящена работа №3. В работе №4 исследуется одноконтурная система автоматического управления с типовыми регуляторами. Вопросы синтеза регуляторов в системах подчиненного регулирования (СПР) со статическим и астатическим объектом и исследования характеристик СПР при использовании стандартных настроек рассмотрены в работах №5 и №6. В комплексной работе №7 формируется математическая модель одноконтурной системы управления частотой вращения двигателя, анализируется ее устойчивость, выполняется синтез регулятора и исследуются динамические характеристики САУ. В работе №8 рассматриваются вопросы синтеза регуляторов и исследования динамических характеристик системы подчиненного регулирования тока якоря и частоты вращения двигателя постоянного тока. Работа №9 содержит задание на разработку САУ конкретным объектом управления.

Каждая работа содержит по 20 вариантов заданий, что позволяет индивидуализировать процесс обучения.

Целевое назначение заданий может варьироваться преподавателем с учетом учебных часов, отводимых на отдельные виды занятий.

Так, для студентов очной формы обучения работы №1 – №6 рекомендуются в качестве лабораторных работ. Расчетная часть указанных заданий может использоваться на практических занятиях. Работу №7 рекомендуется использовать в качестве заданий и методических указаний к выполнению курсовой работы. Работы №8 и №9 рекомендуется использовать в качестве заданий для дополнительной инициативной работы студентов. Для этих же целей предназначены специально выделенные пункты исследований в работах №3 – №7.

Для студентов заочной формы обучения с учетом количества часов на отдельные виды занятий некоторые из работ по усмотрению преподавателя могут выноситься на самостоятельную проработку.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для управления режимами работы различных объектов от космических аппаратов и сложных технологических установок до устройств бытовой техники широко используются ***системы автоматического управления (САУ)***, представляющие собой динамические системы с отрицательной обратной связью.

В качестве примеров электромеханических САУ можно указать системы управления основными генерирующими установками энергосистем – синхронными генераторами; системы автоматического регулирования возбуждения мощных синхронных электродвигателей, используемых, в частности, на компрессорных станциях в нефтегазовой промышленности при транспортировке топлива по трубопроводам; системы автоматизированного электропривода для металлорежущих станков, транспортных средств, устройств бытовой техники и др.

САУ создаются для того, чтобы автоматически, без непосредственного участия человека поддерживать требуемый режим работы различных установок, технологических процессов и др. Системы автоматического управления и регулирования поддерживают постоянными одну или несколько физических величин, определяющих режим работы объекта, либо изменяют по требуемому закону эти физические переменные. В общем случае САУ сами определяют в зависимости от ряда условий нужный или оптимальный закон управления объектом.

Общей чертой процессов управления в объектах различной физической природы является их ***информационный*** характер. Действительно, для эффективного достижения поставленной цели управления необходим сбор, передача и использование информации о внешних и внутренних условиях работы объекта. В теории управления изучаются, прежде всего, информационные процессы в системах управления и их общие закономерности.

Приведенные в пособии задания и примеры расчётов направлены на формирование у обучаемых практических навыков исследования динамических характеристик звеньев и электромеханических систем автоматического управления.

РАБОТА №1
ИЗУЧЕНИЕ ПРОГРАММЫ CLASSIC-3.01

Цель работы – получение навыков работы с программой **CLASSiC-3.01** для исследования систем автоматического управления моделированием на ПК.

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1.1. ВВОД И РЕДАКТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Исследование характеристик звеньев выполняется с использованием программы CLASSiC-3.01.

Работа с моделями начинается с Редактора моделей, в котором вводится и редактируется модель.

Можно выбрать одну из двух форм представления модели при вводе:

– структурная схема модели;

– табличное описание модели.

При выборе структурной схемы модели вызывается графический редактор модели и в этом случае новая модель вводится с созданием графического образа – структурной схемы.

Возможности программы CLASSiC-3.01 позволяют проводить анализ свойств и характеристик систем управления, анализ структурных особенностей, инвариантных к операторам блоков. В связи с этим данная программа рекомендована для учебного процесса – при изучении: основ теории управления, компьютерных методов расчета сложных систем, современных методов анализа структурно-сложных систем с использованием теории графов и в проектной практике в организациях – при создании современных систем управления объектами различного назначения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Переход от модели в форме структурной схемы (заданной в графическом или в табличном редакторе модели) к характеристикам означает выполнение следующих действий:

– получение передаточной функции системы;

– расчет нулей и полюсов (корней полиномов числителя и знаменателя передаточной функции);

– расчет переходных процессов;

– расчет частотных характеристик;

– отображение полученной информации в виде графиков и таблиц в окне «Характеристики».

Для получения окна «Характеристики» необходимо воспользоваться командой [F9] или выбрать пункт «Характеристики» меню «Расчеты».

ВНИМАНИЕ!

Пункт меню «**Расчеты/Характеристики**» недоступен, если исходная модель не определена полностью, то есть полином знаменателя хотя бы одного блока структурной схемы равен нулю.

1.2. ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

1.2.1. ПОРЯДОК ДЕЙСТВИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКОГО ЗВЕНА

В качестве примера используем типовое апериодическое звено. Исходными данными для моделирования являются передаточная функция звена и ее параметры.

Задана передаточная функция типового апериодического звена:

$$W(s) = \frac{k}{1+Ts}. \qquad (1.1)$$

Здесь k – коэффициент передачи звена; T – постоянная времени звена, s – оператор Лапласа. Звено содержит два параметра: k и T.

В качестве примера примем: коэффициент усиления k=1, постоянная времени T=0,1 с (номинальные параметры).

Исследование проводится в следующей последовательности.

Выберите пункт меню «**Файл**», «**Новый**», «**Структурная схема модели**». Используя клавиши на клавиатуре «←», «↑», «→», «↓» или «мышь», разместите изображение звена приблизительно в центре ок-

на. Зафиксируйте положение звена нажатием клавиши «**Enter**». Выход в меню – «**Esc**».

Дважды щелкните левой клавишей на изображении звена. В появившемся окне «**Параметры блока**» (рис. 1.1) назначьте для этого звена **Вход и Выход**. В окне «**Передаточная функция блока**» задайте 1 в числителе, а в знаменателе 1+0.1*s*. Обратите внимание, что знаменатель записывается начиная с 1. Для перехода к заданию коэффициента перед «*s*» нужно сместиться на следующую строку знаменателя («стрелка вниз» под *W*(*s*)). В качестве разделителя целой и десятичной части числа **используется точка**.

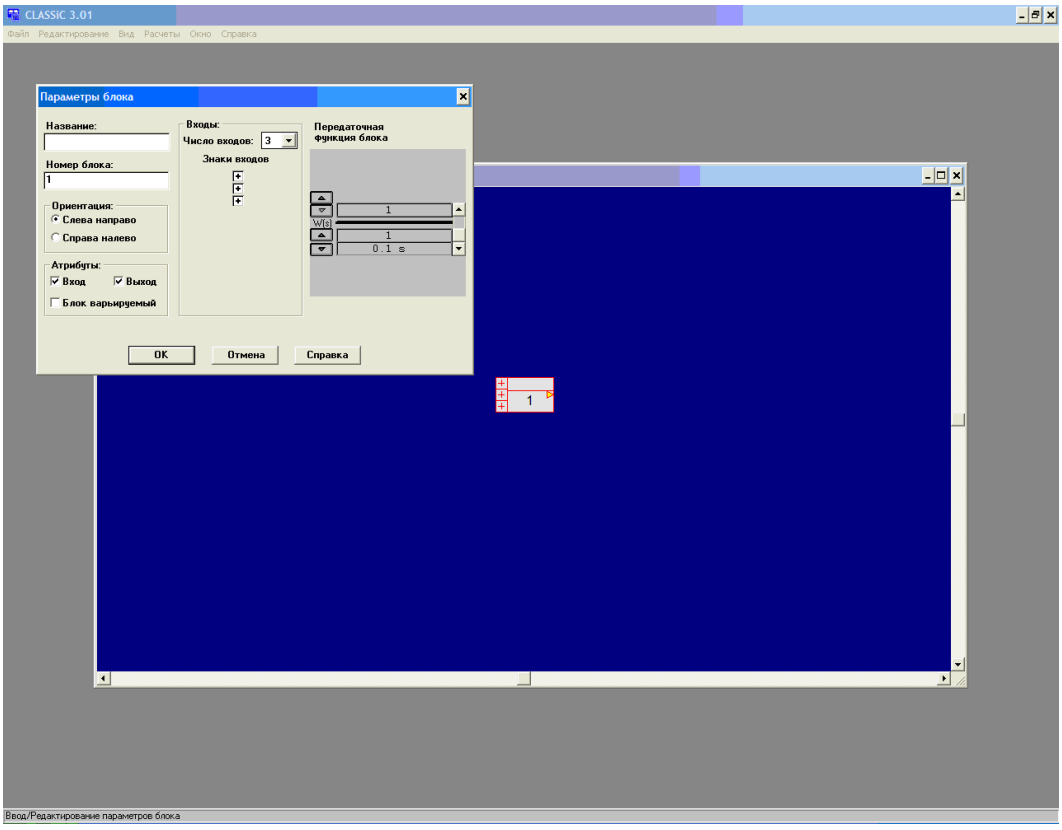

Рис. 1.1

Подтвердите ввод – «**ОК**». В основном меню выберите пункты «**Расчеты**», «**Характеристики**». После этого на экране появятся четыре окна, в которых расположены характеристики исследуемого звена (рис. 1.2).

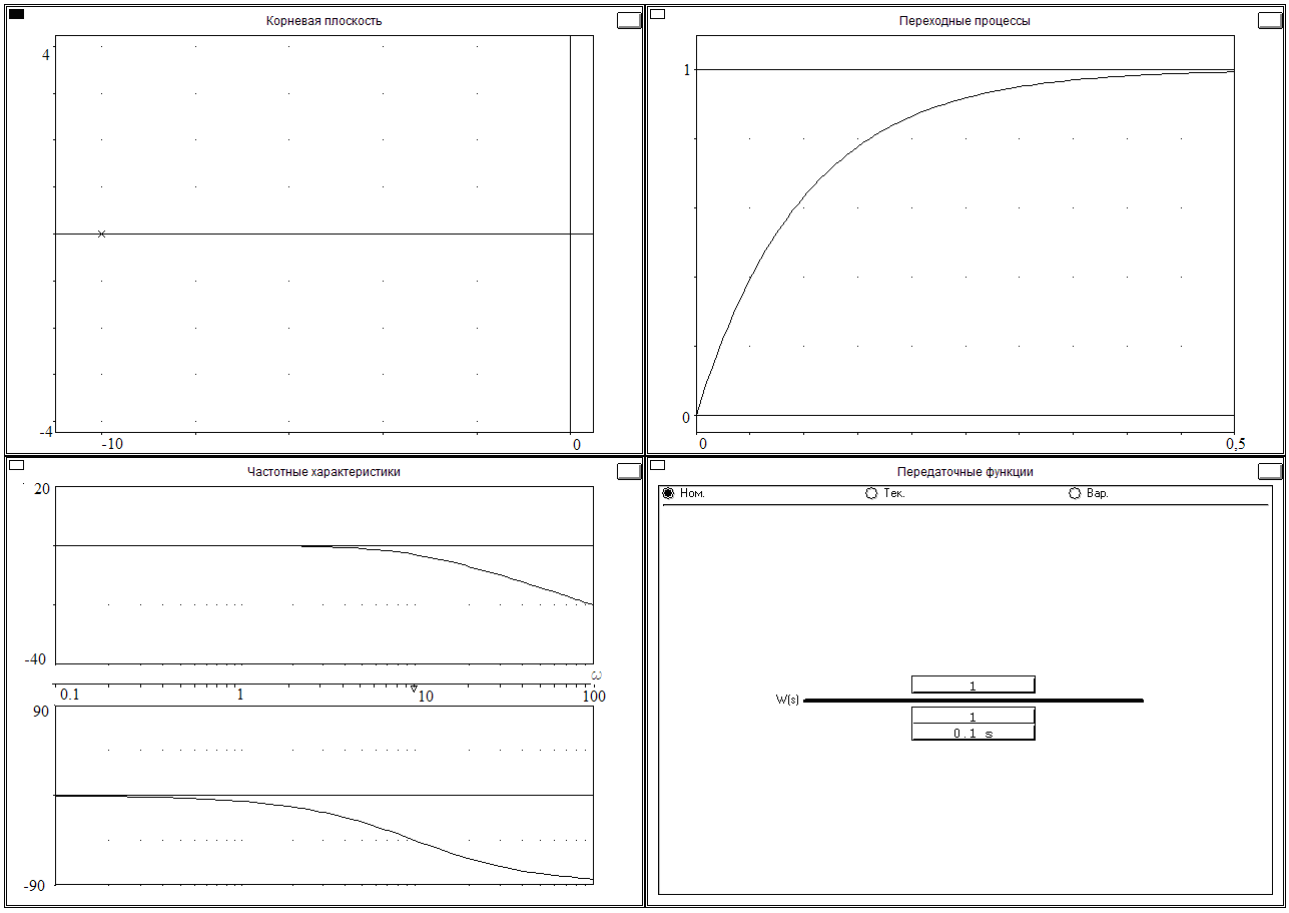

Рис. 1.2

Для детального изучения характеристик любую из них можно вывести *на весь экран*. Для этого воспользуйтесь изображениями «кнопок». В качестве примера на рис. 1.3 показано развернутое изображение переходного процесса.

При необходимости можно изменять начальное и конечное значения по осям абсцисс и ординат графиков – для этого необходимо использовать пункты меню «**Графики**», «**Параметры**» или дважды щелкнуть левой клавишей в поле графика, при этом появляется дополнительное окно (см. рис. 1.3), в котором можно задать желаемые начальное и конечное значения по осям абсцисс и ординат.

Увеличьте конечное значение по осям абсцисс и ординат графика переходного процесса в 2 раза.

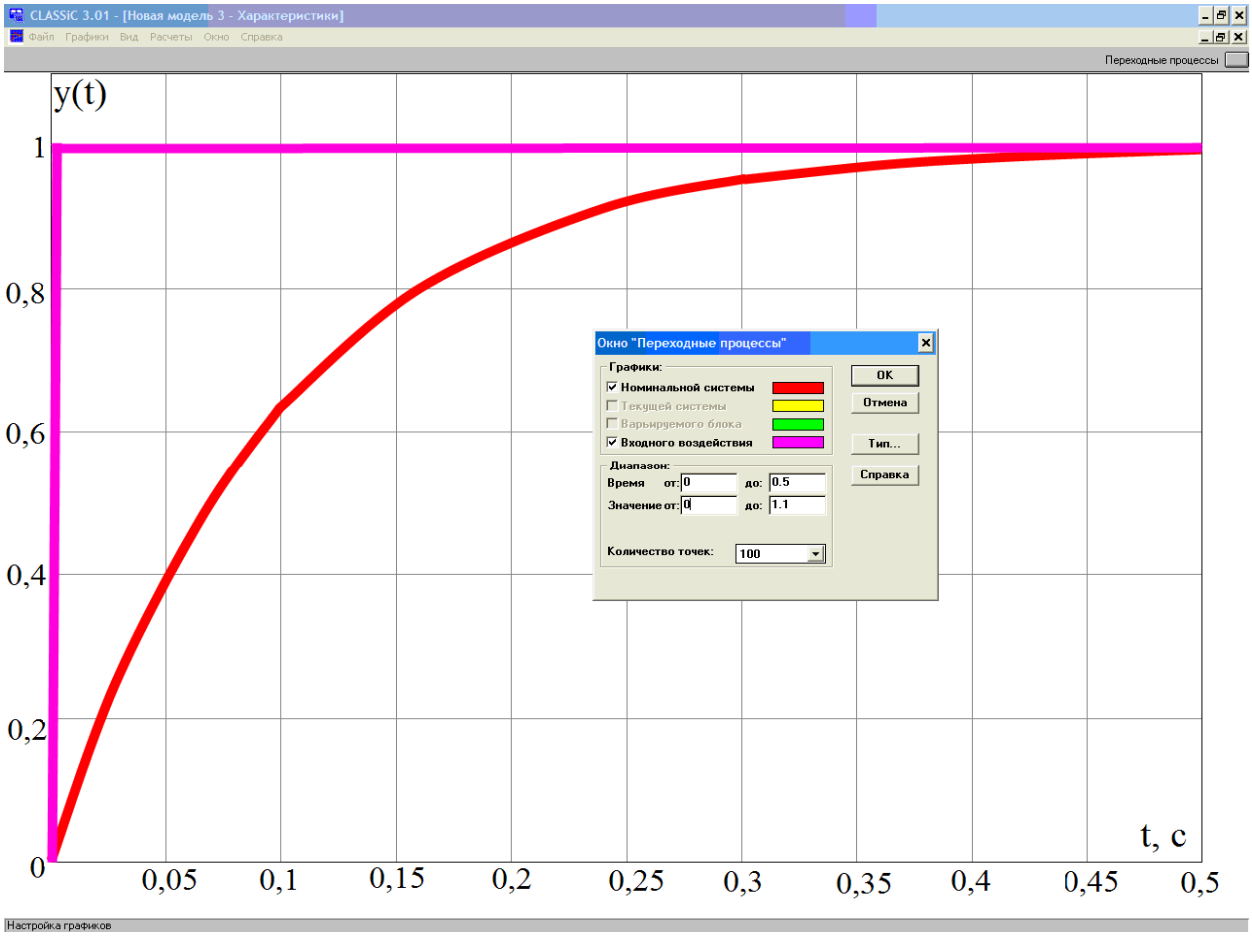

Рис. 1.3

Вернитесь к основному окну (см. рис. 1.2) – клавиша «**Esc**». В основном окне (слева внизу) строятся графики логарифмической амплитудной ЛАХ $L(\omega)$ частотной характеристики и логарифмической фазовой ЛФХ $F(\omega)$ частотной характеристики.

Для построения амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) или амплитудной частотной (АЧХ) и фазовой частотной (ФЧХ) характеристик необходимо щелкнуть правой кнопкой на изображении графиков ЛАХ и ЛФХ и в появившемся меню выбрать «**Тип**». Далее в меню «**Частотные характеристики**» (рис. 1.4) выбрать необходимый пункт (на рис. 1.4 выбран пункт АФХ). Если щелкнуть кнопку «**ОК**», будет построена АФХ (рис. 1.5).

Постройте АФХ, а также АЧХ и ФЧХ.

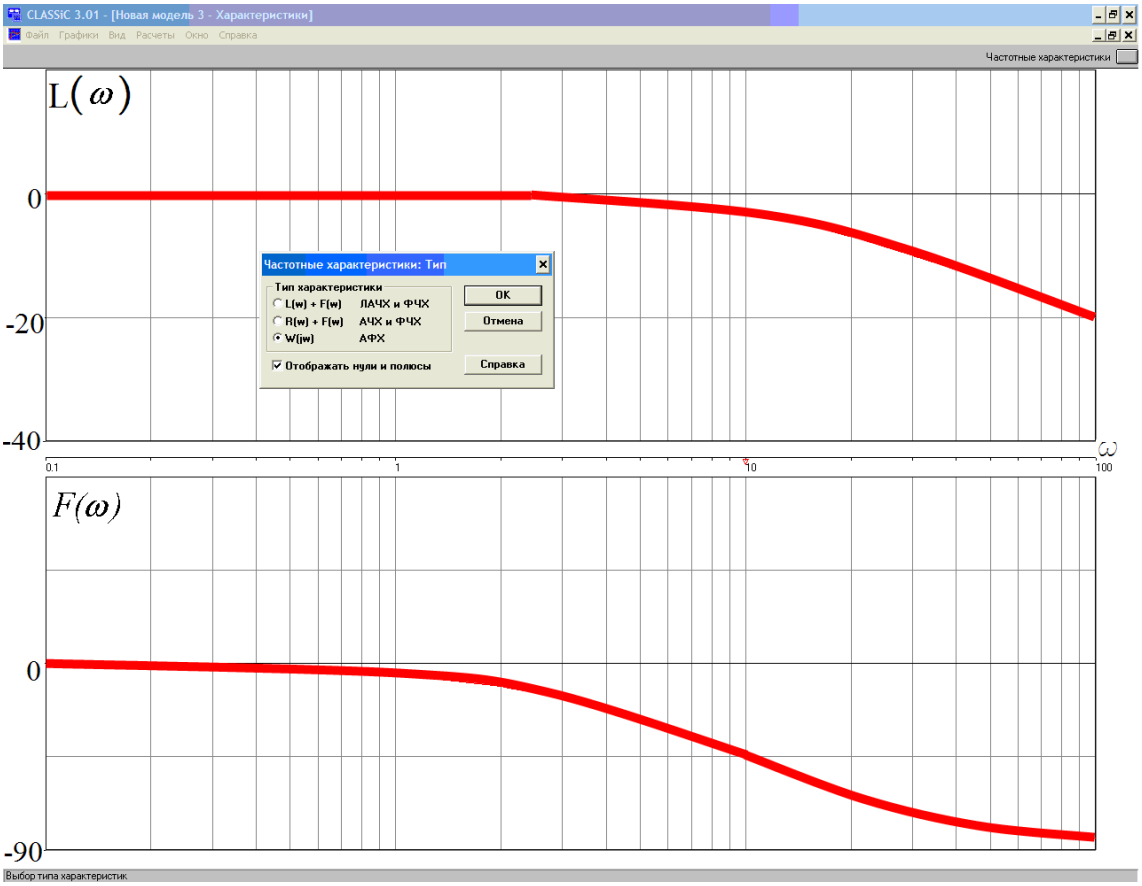
CLASSIC 3.01 - [Новая модель 3 - Характеристики]
Файл Графики Вид Расчеты Окно Справка
Частотные характеристики
L(ω)
0
-20
-40
0.1
1
10
100
ω
Частотные характеристики: Тип
Тип характеристики
L(w) + F(w) ЛАЧХ и ФЧХ
R(w) + F(w) АЧХ и ФЧХ
W(jw) АФХ
Отображать нули и полюсы
OK
Отмена
Справка
F(ω)
0
-90
Выбор типа характеристик

Рис. 1.4

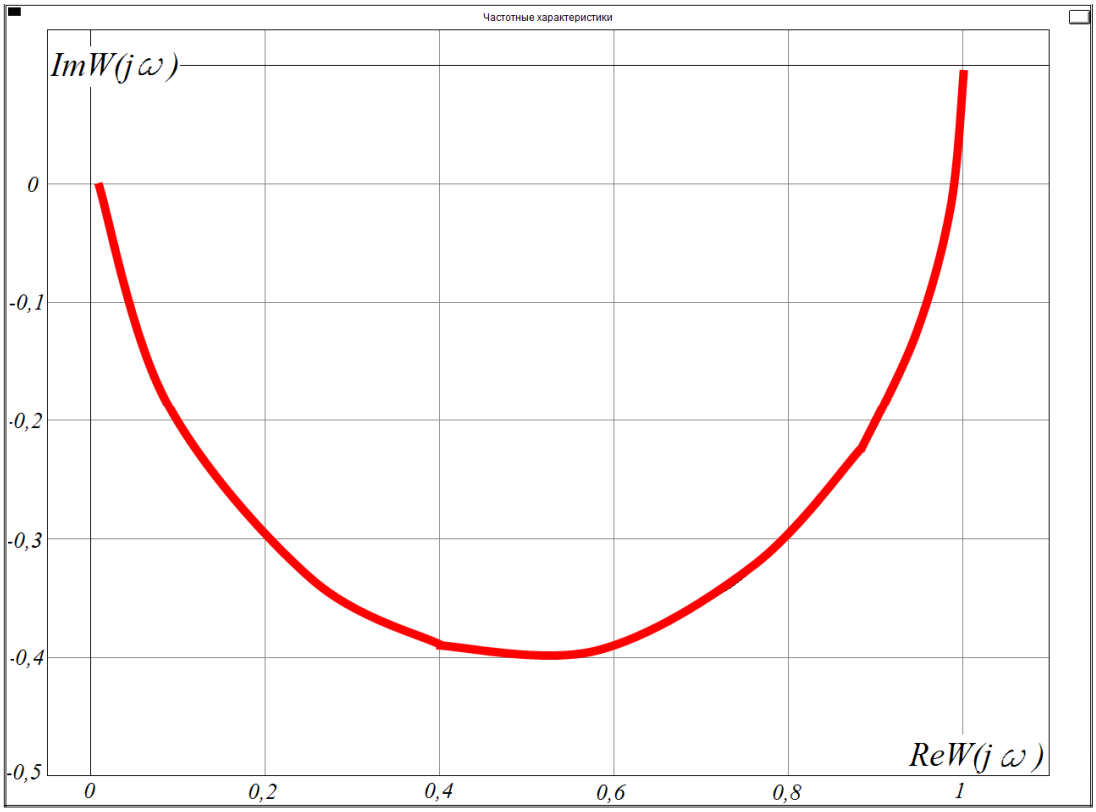
Частотные характеристики
ImW(jω)
0
-0,1
-0,2
-0,3
-0,4
-0,5
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
ReW(jω)

Рис. 1.5

1.2.2. НАБОР МОДЕЛЕЙ САУ ИЗ НЕСКОЛЬКИХ ЗВЕНЬЕВ

Схема САУ обычно состоит из нескольких тем или иным способом включенных звеньев.

Звенья могут быть включены последовательно (рис. 1.6, *а*), параллельно (рис. 1.6, *б*), в виде участка (рис. 1.6, *в*) с отрицательной обратной связью (ООС) и участка (рис. 1.6, *г*) с положительной обратной связью (ПОС).

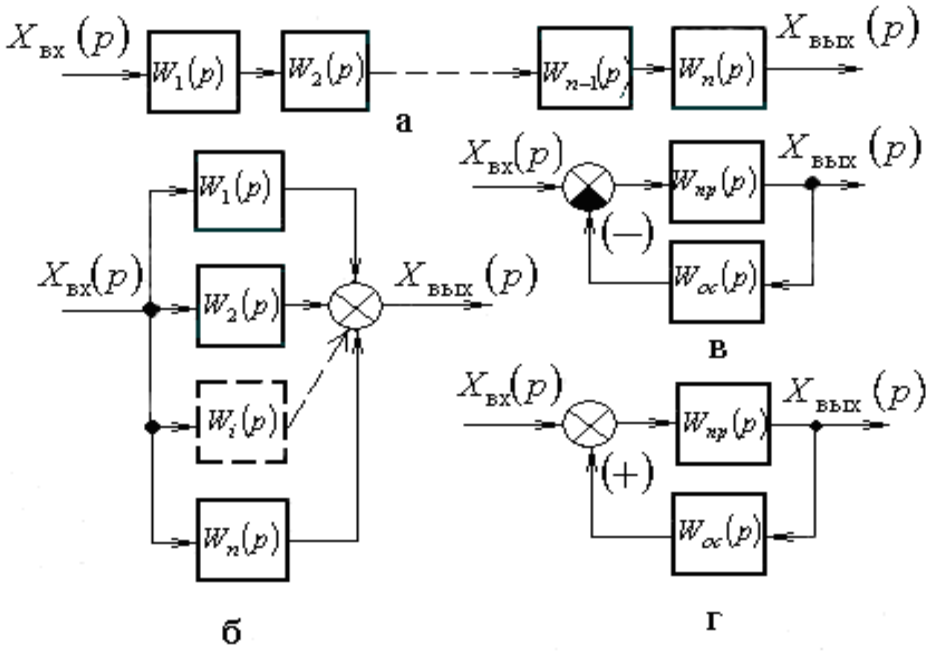

Рис 1.6

На рис. 1.6 видно, что $W_{ПР}(p)$ и $W_{О.С.}(p)$ – передаточные функции прямой цепи и цепи обратной связи. Вместо символа s использован символ p.

Модель САУ, состоящая из трех последовательно включенных звеньев, приведена на рис. 1.7. Наберите такую модель. Задайте следующие передаточные функции и параметры звеньев (подстрочные индексы в передаточных функциях соответствуют номерам звеньев):

$$W_1(s) = k_1 = 10;$$

$$W_2(s) = \frac{k_2}{1+T_2 s} = \frac{1}{1+0.1s}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{1+T_3 s} = \frac{1}{1+0.2s}.$$

Задайте вход на первом звене, выход – на третьем. Исследуйте переходный процесс в такой системе.

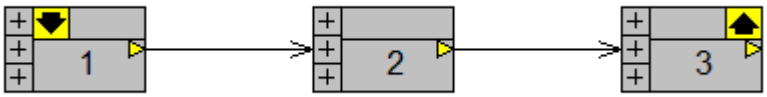

Рис. 1.7

Модель САУ, состоящая из трех (1, 2, 3) параллельно включенных звеньев, приведена на рис. 1.8. Наберите такую модель. Задайте следующие передаточные функции и параметры звеньев (подстрочные индексы в передаточных функциях соответствуют номерам звеньев):

$$W_1(s) = k_1 = 10;$$

$$W_2(s) = \frac{k_2}{1+T_2 s} = \frac{10}{1+0.1s}; \quad W_3(s) = \frac{k_3}{1+T_3 s} = \frac{1}{1+0.2s}.$$

Звено 4 на схеме необходимо для разветвления входного сигнала (вход в программе CLASSiC может задаваться только для одного звена). Задайте $W_4(s) = k_4 = 1$. Звено 5 необходимо для суммирования выходных сигналов параллельно включенных звеньев. Задайте $W_5(s) = k_5 = 1$.

Задайте вход на 4-м звене, выход – на 5-м. Исследуйте переходный процесс в такой системе.

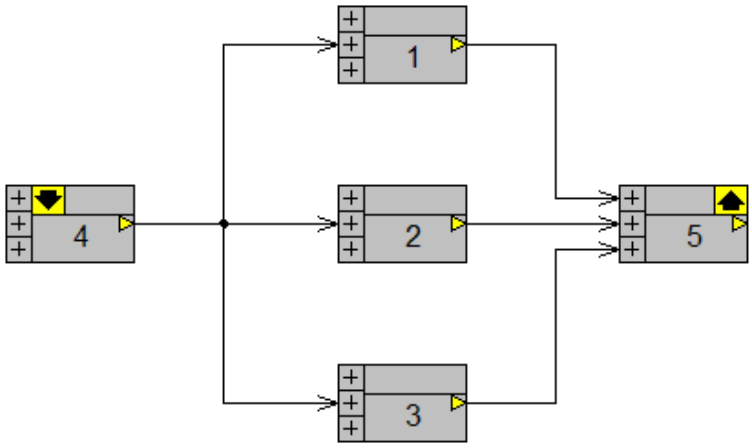

Рис. 1.8

Модель САУ с ООС приведена на рис. 1.9. Наберите такую модель. Звено 3 здесь служит для изменения при необходимости значения задающего сигнала. Задайте следующие передаточные функции и параметры звеньев:

$$W_1(s)=\frac{k_1}{1+T_1 s}=\frac{10}{1+1s};\quad W_2(s)=k_2=1;\quad W_3(s)=k_3=1.$$

Обратите внимание, что на нижнем входе первого звена должен быть задан знак минус. Задайте вход на 3-м звене, выход – на 1-м звене. Исследуйте переходный процесс в такой системе.

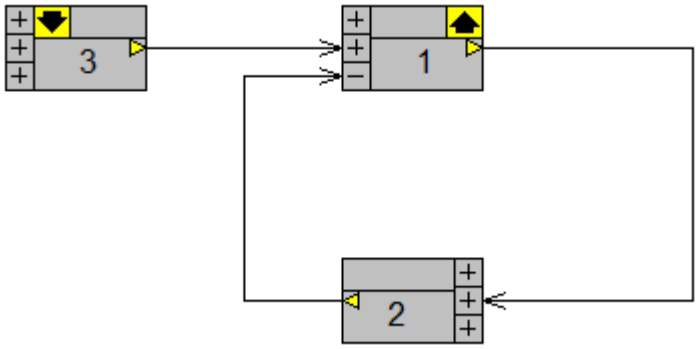

Рис. 1.9

Модель САУ с ПОС аналогична модели САУ с ООС. Отличие состоит только в знаке обратной связи. Измените в предыдущей модели знак нижнего входа первого звена на плюс. Параметры звеньев оставьте теми же. Исследуйте переходный процесс в такой системе.

ВНИМАНИЕ! Для улучшения качества представляемого в отчете по лабораторной работе графического материала (по пункту 1.2.1), рекомендуется изменять цвет кривых, представленных на графиках, на более тёмный. Для этого необходимо в меню «**Файл**» выбрать пункт «**Настройки**». В появившемся диалоговом окне развернуть список с заголовком «**Характеристики**» и двойным нажатием на левую клавишу мыши при нахождении указателя на цветной иконке напротив соответствующего подпункта («**Номинальная система**» или «**Варьируемый блок**») открыть цветовую палитру. Рекоменду-

ется также поставить галочку в диалоговом окне напротив пункта «**Выделять линиями двойной толщины**». Процесс редактирования необходимо завершить нажатием кнопки «**ОК**» в диалоговом окне.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что означает символ *s* (или *p*) в выражении для передаточной функции?
2. Какие характеристики строятся в основном окне при выполнении пункта «Расчеты»?
3. Какие типовые способы включения звеньев используются в САУ?
4. Приведите схему последовательного включения звеньев.
5. Приведите схему параллельного включения звеньев.
6. Приведите схему САУ с отрицательной обратной связью.
7. Приведите схему САУ с положительной обратной связью.

РАБОТА №2
ИССЛЕДОВАНИЕ ТИПОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ

Цель работы – исследование характеристик типовых динамических звеньев систем управления.

2.1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

2.1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При анализе и синтезе систем управления их разбивают на **динамические звенья**.

Под *динамическим звеном* понимают устройство любой физической природы и конструктивного оформления, но описываемого *определенным дифференциальным уравнением*. Динамические звенья классифицируются именно по виду дифференциального уравнения.

Под **типовым динамическим звеном** понимают такое звено, которое описывается дифференциальным уравнением *не выше второго порядка*.

Динамические свойства систем управления и типовых звеньев описывают обыкновенными дифференциальными уравнениями, например:

$$a_0 \frac{d^3 y}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_2 \frac{dy}{dt} + a_3 y = b_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + b_1 \frac{dx}{dt} + b_2 x, \quad (2.1)$$

где x – входная величина, а y – выходная величина.

В теории управления эти уравнения обычно *записывают в символической форме*, которая получается, если *производные* в исходном уравнении заменить с использованием *символического оператора дифференцирования*

$$p = \frac{d}{dt}. \quad (2.2)$$

С учетом этого вместо (2.1) можно записать:

$$a_0 p^3 y + a_1 p^2 y + a_2 py + a_3 y = b_0 p^2 x + b_1 px + b_2 x, \quad (2.3)$$

что можно преобразовать к виду

$$y(a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3) = x(b_0 p^2 + b_1 p + b_2). \quad (2.4)$$

Считая введенный оператор дифференцирования алгебраической величиной, можно решить дифференциальное уравнение (2.4) относительно выходной величины и выразить отношение выходной величины ко входной. Такое отношение в теории управления называют **передаточной функцией звена** (или системы) и обычно обозначают буквой W, то есть

$$W(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{b_0 p^2 + b_1 p + b_2}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3} = \frac{B(p)}{A(p)}, \quad (2.5)$$

где $B(p)$ – полином числителя, $A(p)$ – полином знаменателя.

Более строго ***передаточная функция определяется как отношение изображений Лапласа выходной и входной величин звена при нулевых начальных условиях. При этом оператор Лапласа является комплексной величиной*** $p = c + j\omega$. Однако во многих слу-

чаях вместо обозначения p в изображениях Лапласа используют букву s. Оператор s соответствует символической форме записи исходного уравнения в виде отношений полиномов числителя и знаменателя. Передаточная функция же в операторной форме является оператором. Её нельзя рассматривать как обычную дробь. В частности, нельзя числитель и знаменатель сокращать на общий множитель, содержащий оператор дифференцирования [3].

Корни уравнения $B(p)=0$ называют **нулями** передаточной функции.

Уравнение $A(p)=0$ называют ***характеристическим уравнением*** системы, а его корни – **полюсами** передаточной функции.

Корни характеристического уравнения удобно показывать на комплексной плоскости.

2.1.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ

Динамические свойства звена могут быть определены по его ***переходной функции***.

Переходная функция, **или переходная характеристика**, $y(t)$ представляет собой ***переходный процесс*** на выходе звена, возникающий при подаче на его вход ***скачкообразного*** воздействия при величине скачка, ***равной единице*** (рис. 2.1). Такое входное воздействие (кривая 1 на рис. 2.1) называют **единичной ступенчатой функцией** и обозначают $x_{вх}(t)=\mathbf{1}(t)$, что соответствует $x(t)=0$ при $t<0$ и $x(t)=1$ при $t\geq 0$.

2.1.3. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При экспериментальном определении частотных характеристик на вход звена подают гармоническое воздействие

$$x = A_1 \sin \omega t ,$$

где A_1 – амплитуда воздействия; ω – угловая частота.

После окончания переходного процесса выходная величина звена изменяется также по гармоническому закону, но имеет в общем случае другую амплитуду A_2 и сдвиг по фазе φ:

$$y = A_2 \sin(\omega t + \varphi).$$

Свойство звена или системы передавать гармоническое воздействие определенной частоты ω_1 можно характеризовать фазовым сдвигом $\varphi(\omega_1)$ и относительной амплитудой:

$$A(\omega_1) = \frac{A_2(\omega_1)}{A_1(\omega_1)}.$$

Задавая ряд частот входного воздействия от 0 до ∞, можно получить данные для построения зависимостей $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$. Первую из них – $A(\omega)$ – называют ***амплитудной частотной характеристикой*** **(АЧХ)**, а вторую – $\varphi(\omega)$ – ***фазовой частотной характеристикой*** **(ФЧХ).**

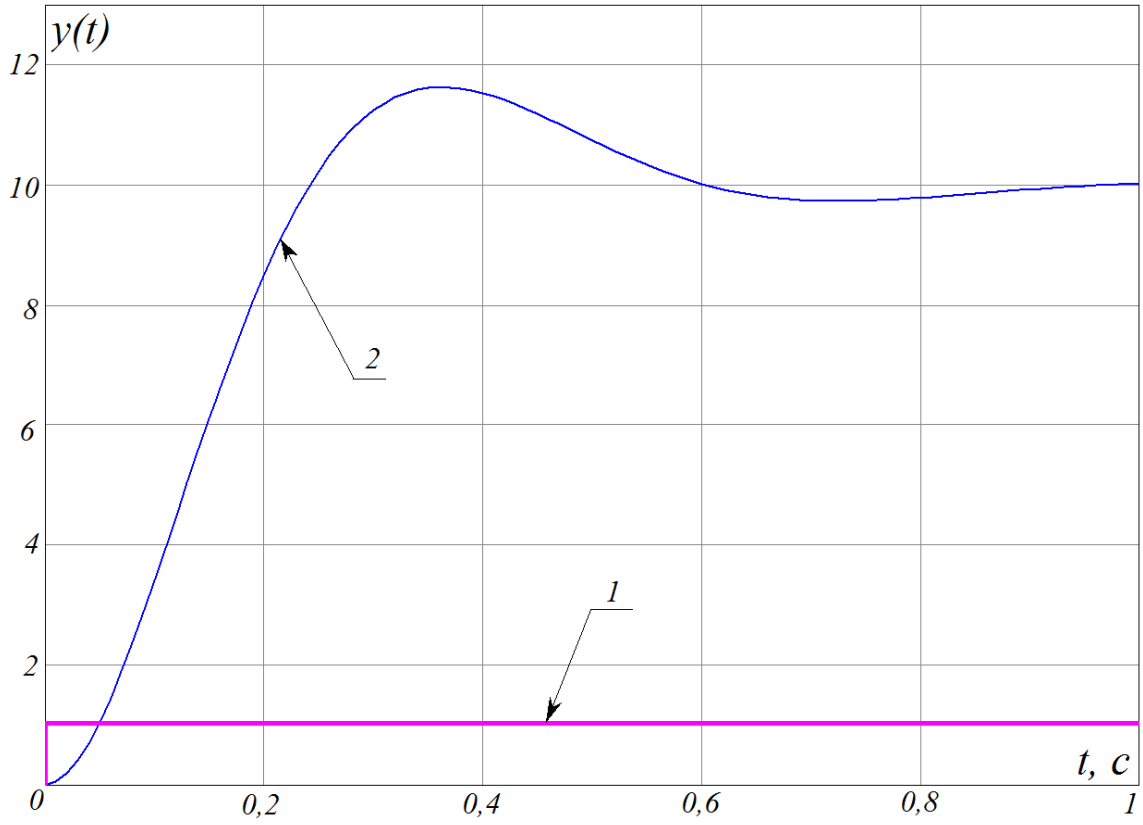

Рис. 2.1

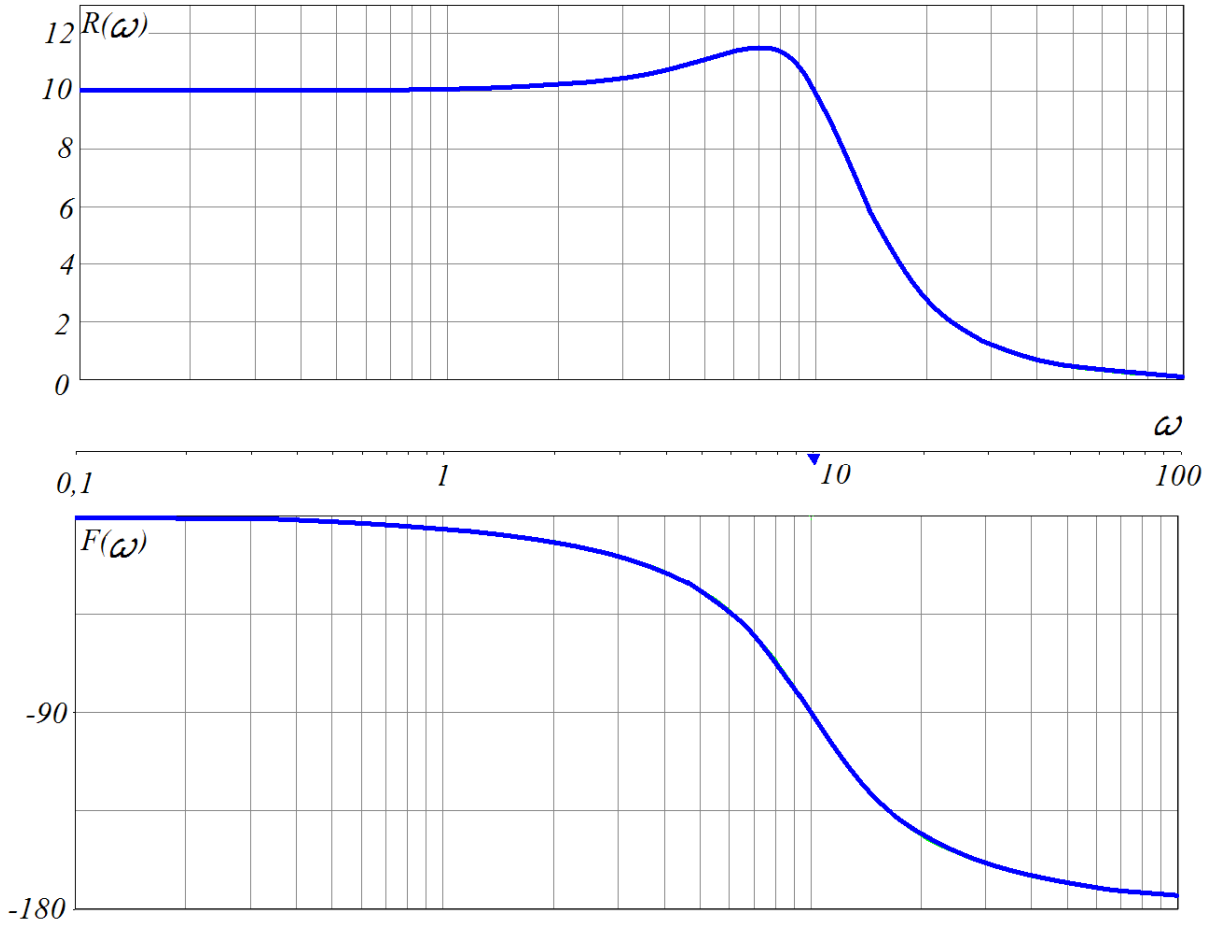

Рис. 2.2

Для определения начального значения АЧХ $A(0)$ на вход должно подаваться воздействие с частотой ω=0. При этом входное воздействие и выходная величина вырождаются в постоянные сигналы, а их отношение в установившемся режиме дает коэффициент передачи. Следовательно, $A(0)=k$.

Относительную амплитуду $A(\omega)$ можно рассматривать как «***коэффициент передачи***» гармонического сигнала. Причем этот «***коэффициент передачи***» зависит от частоты.

В программе CLASSiC (рис. 2.2) АЧХ обозначается $R(\omega)$, а ФЧХ – $F(\omega)$. Для обеих характеристик используется общая шкала для оси частот, частота обозначается ω.

Относительная амплитуда (*«коэффициент передачи»*) у инерционных звеньев с возрастанием частоты уменьшается, выходной сигнал по фазе отстает от входного (фазовый сдвиг φ – отрицательный),

и это отставание увеличивается при возрастании частоты. Если в некотором диапазоне частот АЧХ имеет максимум, то это свидетельствует о резонансных свойствах звена.

Амплитудную и фазовую частотные характеристики можно объединить, воспользовавшись полярными координатами. Предварительно для фиксированных частот ω_i по АЧХ и ФЧХ находят значения $A(\omega_i)$ и $\varphi(\omega_i)$. Далее на плоскости для каждого значения частоты ω_i строят вектор с модулем $A(\omega_i)$ под углом $\varphi(\omega_i)$.

Кривая, объединяющая концы векторов, представляет собой ***амплитудно-фазовую частотную характеристику*** **(АФХ)** (рис. 2.3). На рис. 2.3 выделена одна из точек АФХ и для нее указаны: частота ω, значение АЧХ $R(\omega)$ и значение фазового сдвига $F(\omega)$.

Плоскость АФХ может рассматриваться и как комплексная плоскость. На рис. 2.3 вещественная ось обозначена $ReW(j\omega)$, мнимая – $ImW(j\omega)$. В этом случае построенные векторы можно представить в виде проекций вектора $R(\omega)$ на вещественную и мнимую оси. Для выделенной точки указаны значения этих проекций: *Re* и *Im*.

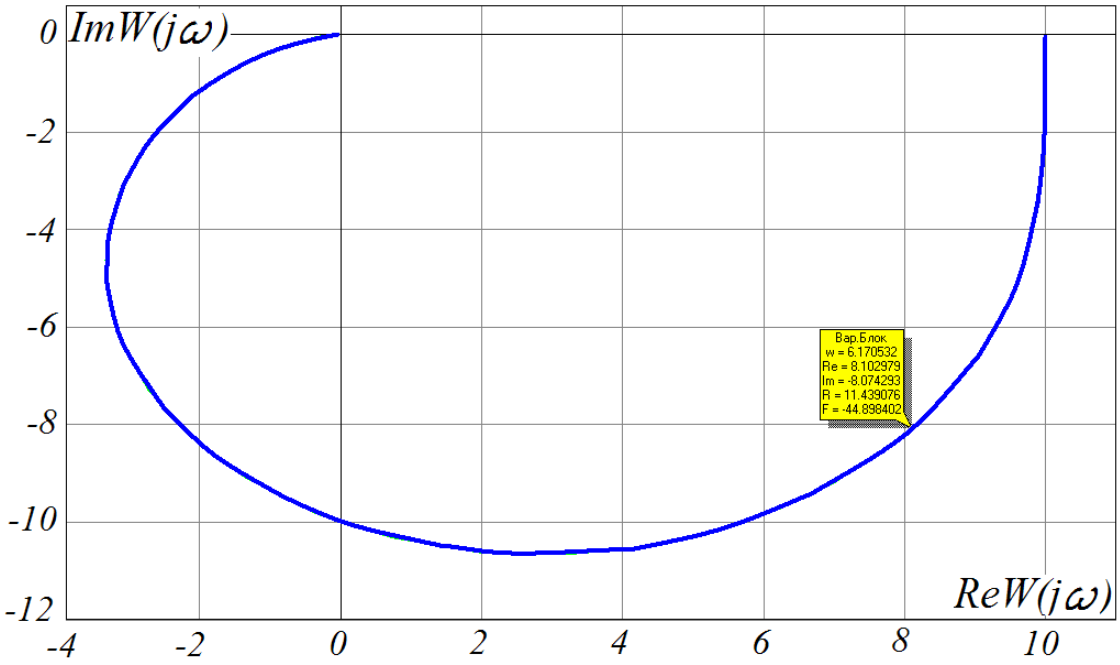

Рис. 2.3

При исследовании САУ амплитудную и фазовую частотные характеристики удобнее строить в логарифмических координатах. Пе-

реход к логарифмическому масштабу изменяет кривизну характеристик, в результате амплитудная характеристика в большинстве случаев с достаточной точностью может быть изображена ломаными линиями (асимптотами).

АЧХ и ФЧХ, построенные в логарифмических координатах, называют соответственно ***логарифмической амплитудной*** **(ЛАХ)** и ***логарифмической фазовой*** **(ЛФХ)** ***частотными характеристиками***. На рис. 2.4 ЛАХ – верхняя кривая обозначена $L(\omega)$, ЛФХ – нижняя кривая – $F(\omega)$. Для выделенной точки ЛФХ указаны значения частоты и фазового сдвига.

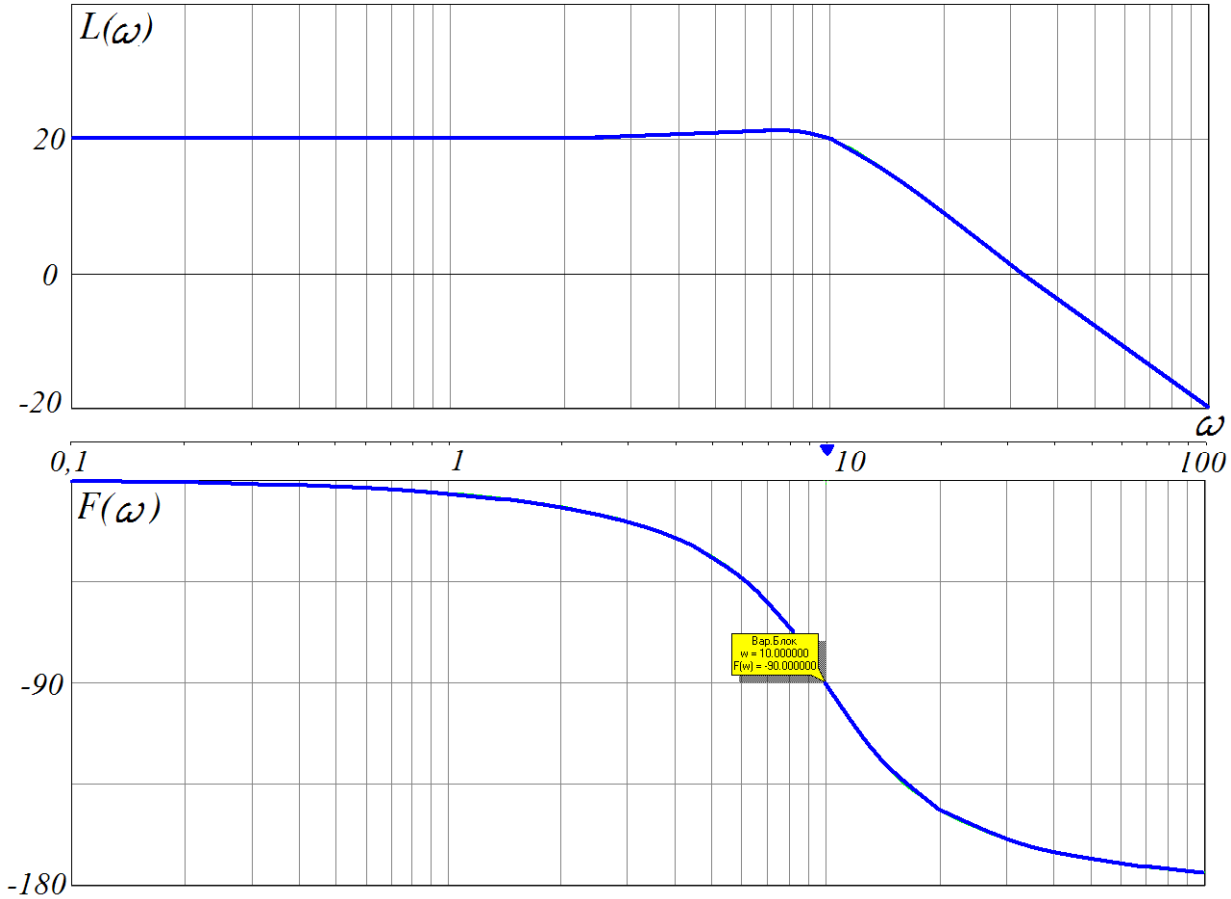

Рис. 2.4

По оси абсцисс в логарифмической плоскости откладывают угловую частоту в ***логарифмическом масштабе***, поэтому масштаб по оси частот неравномерный. Единицей измерения частоты в логарифмическом масштабе служит ***декада*** **(*дек*)**, она соответствует изменению частоты в 10 раз.

Ординаты ЛАХ ***L*(ω)** определяют по выражению

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega). \qquad (2.6)$$

Единицей измерения здесь служит **децибел *(дБ)***. Связь между величинами $L(\omega)$ и $A(\omega)$ показана в табл. 2.1. Для построения ЛФХ используется та же ось абсцисс, а фазовые сдвиги по оси ординат откладываются в равномерном масштабе, причем отрицательные значения $\varphi(\omega)$ откладываются ниже оси абсцисс.

Таблица 2.1

$A(\omega)$	0,01	0,1	1	10	100	1000	...
$L(\omega)$, *Дб*	-40	-20	0	20	40	60	...

Следует учитывать, что значение частоты ω=0 на логарифмической плоскости показать невозможно, так как lg0=-∞. Поэтому частота в точке пересечения координатных осей имеет ненулевое значение (на рис. 2.4 начальное значение частоты 0,1 рад/с).

Для построения ЛФХ используется та же ось абсцисс (ось частот), а по оси ординат откладывается фазовый сдвиг в градусах в линейном масштабе.

2.2. ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для каждого из типовых динамических звеньев необходимо исследовать:

1) переходную характеристику;

2) ЛАХ и ЛФХ;

3) расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости.

2.2.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗВЕНА ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Передаточная функция этого звена:

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}, \qquad (2.7)$$

где k – коэффициент передачи звена; T – постоянная времени звена, с. Звено содержит два параметра: k и T, значения которых могут изменяться.

Исследуйте характеристики звена для исходных (номинальных) и варьированных значений параметров. Параметры звена выбираются из табл. 2.2 по заданию преподавателя.

Таблица 2.2

№	Номинальные параметры		Первая вариация параметров		Вторая вариация параметров	
	k	T	k	T	k	T
1	1	0,2	1	0,4	2	0,2
2	5	0,4	5	0,8	10	0,4
3	10	0,1	10	0,2	5	0,1
4	2	0,2	2	0,4	10	0,2
5	10	0,5	10	1,0	20	0,5
6	4	0,4	4	0,8	8	0,4
7	20	0,1	20	0,2	10	0,1
8	15	0,3	15	0,6	30	0,3
9	10	1	10	2	20	1
10	5	2	5	4	10	2
11	20	4	20	8	40	4
12	2	2	2	4	4	2
13	6	0,1	6	0,2	12	0,1
14	5	0,5	5	1	10	0,5
15	8	0,4	8	0,8	16	0,4
16	10	4	10	8	20	4
17	15	0,6	15	1,2	30	0,6
18	100	0,2	100	0,4	200	0,2
19	50	2	50	4	100	2
20	70	5	70	10	140	5

2.2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ЗВЕНА

Передаточная функция интегрирующего звена имеет вид

$$W(p) = \frac{1}{Tp}. \qquad (2.8)$$

Звено содержит только один варьируемый параметр – постоянную времени T.

Исследуйте характеристики звена номинального и варьированного значения постоянной времени T. Значения T берутся из табл. 2.3 по заданию преподавателя.

Таблица 2.3

№	Номинальное значение T	Варьированное значение T
1	0,2	0,4
2	0,4	0,8
3	0,1	0,2
4	0,2	0,4
5	0,5	1,0
6	0,4	0,8
7	0,1	0,2
8	0,3	0,6
9	1	2
10	2	4
11	4	8
12	2	4
13	0,1	0,2
14	0,5	1
15	0,4	0,8
16	4	8
17	0,6	1,2
18	0,2	0,4
19	2	4
20	5	10

2.2.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ

Идеальное дифференцирующее звено

Передаточная функция идеального дифференцирующего звена:

$$W(p) = Tp. \qquad (2.9)$$

Исследуйте характеристики звена при следующих параметрах: постоянная времени T=1 с.

Реальное дифференцирующее звено

Существует несколько типов реальных дифференцирующих звеньев. Исследуйте характеристики звена с передаточной функцией (такое звено называют форсирующим)

$$W(p) = Tp + 1$$

для двух значений постоянной времени: T=1 с и T=0,1 с.

2.2.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНА ВТОРОГО ПОРЯДКА

Передаточная функция типового звена второго порядка может быть записана в нескольких формах, одной из которых является следующая:

$$W(s) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \qquad (2.10)$$

где k – коэффициент усиления;

T – постоянная времени;

ξ – коэффициент затухания.

Исследуйте характеристики звена для исходных (номинальных) и варьированных значений параметров. Коэффициент передачи звена при исследованиях принимается для всех вариантов k=10.

Параметры звена выбираются из табл. 2.4 по заданию преподавателя.

Таблица 2.4

№	Номинальные параметры		Первая вариация параметров		Вторая вариация параметров	
	ξ	T	ξ	T	ξ	T
1	0,5	0,2	0,5	0,4	0,2	0,2
2	0,6	0,4	0,6	0,8	0,3	0,4
3	0,7	0,1	0,7	0,2	0,4	0,1
4	0,5	0,2	0,5	0,4	0,3	0,2
5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,2	0,5
6	0,7	0,4	0,7	0,8	0,3	0,4
7	0,6	0,1	0,6	0,2	0,3	0,1
8	0,5	0,3	0,5	0,6	0,3	0,3
9	0,5	1	0,5	2	0,2	1
10	0,6	2	0,6	4	0,2	2
11	0,7	4	0,7	8	0,4	4
12	0,6	2	0,6	4	0,4	2
13	0,6	0,1	0,6	0,2	0,2	0,1
14	0,5	0,5	0,5	1	0,3	0,5
15	0,8	0,4	0,8	0,8	0,2	0,4
16	0,7	4	0,7	8	0,2	4
17	0,5	0,6	0,5	1,2	0,3	0,6
18	0,8	0,2	0,8	0,4	0,2	0,2
19	0,5	2	0,5	4	0,2	2
20	0,7	5	0,7	10	0,3	5

2.3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ И ОФОРМЛЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗВЕНА

Методику проведения исследований поясним на примере апериодического звена.

Исходные данные для расчетов приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

№	Номинальные параметры		Первая вариация параметров		Вторая вариация параметров	
	k	*T*	*k*	*T*	*k*	*T*
1	1	0,2	1	0,4	2	0,2

Выберите пункт меню «**Файл**», «**Новый**», «**Структурная схема модели**». Используя клавиши на клавиатуре «←», «↑», «→», «↓» или мышь, разместите изображение звена приблизительно в центре окна. Зафиксируйте положение звена нажатием клавиши «**Enter**». Выход в меню – «**Esc**».

Дважды щелкните левой клавишей мыши на изображении звена. В появившемся окне «**Параметры блока**» (рис. 2.5) назначьте для этого звена **Вход** и **Выход**, **Блок варьируемый**.

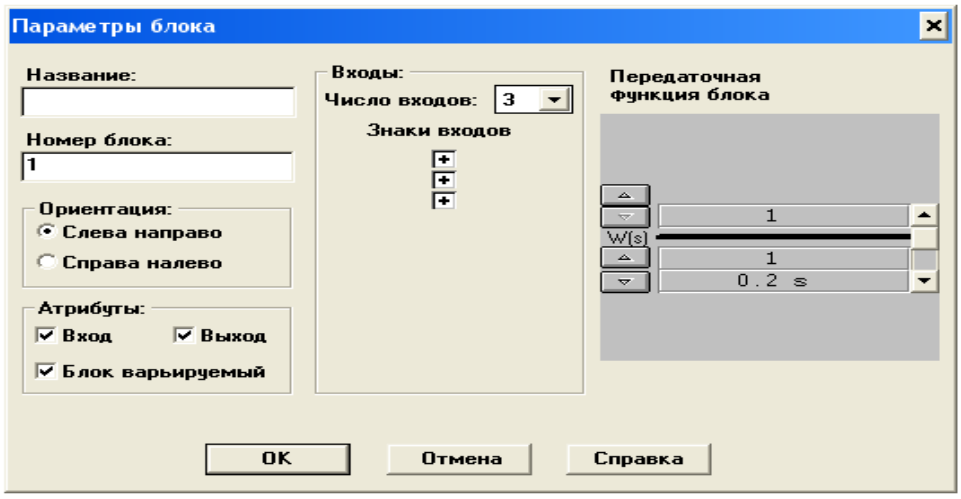

Рис. 2.5

В окне «**Передаточная функция блока**» задайте 1 в числителе, а в знаменателе 1+0.2*s*. Обратите внимание, что знаменатель записывается в обратном порядке, начиная с 1. Для перехода к заданию коэффициента перед *s* нужно сместиться на следующую строку знаменателя («стрелка вниз» под *W*(*s*)).

Подтвердите ввод – «**ОК**». В основном меню выберите пункты «**Расчеты**», «**Характеристики**». После этого на экране появятся четыре окна, в которых расположены характеристики исследуемого звена. Чтобы дополнительно получить характеристики звена при варьированном значении постоянной времени, в правом нижнем окне «**Передаточная функция**» задайте пункт «**Вар**», введите новое значение постоянной времени (знаменатель передаточной функции должен принять вид 1+0.4*s*) и нажмите «**Ввод**». В результате на графиках будут отображаться характеристики звена с номинальными и варьированными параметрами.

Для детального изучения характеристик любую из них можно вывести на весь экран. Для этого воспользуйтесь изображениями «кнопок». В качестве примера на рис. 2.6 показано развернутое изображение переходных процессов.

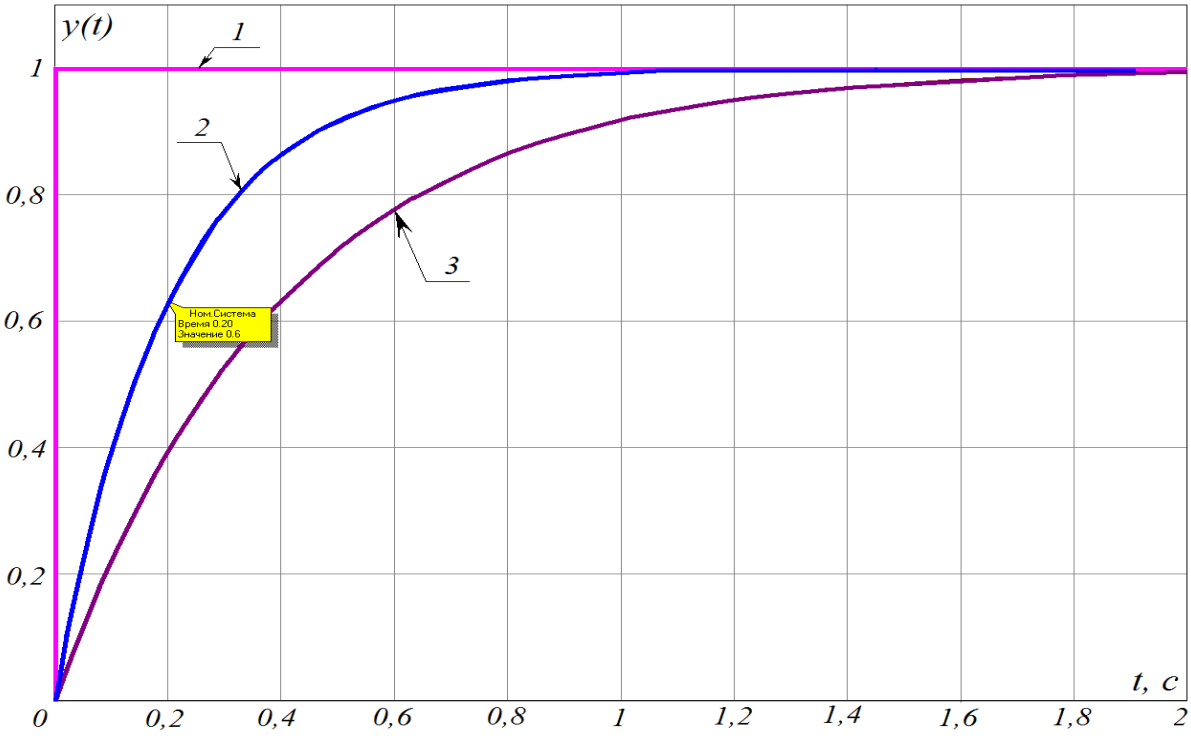

Рис. 2.6

При желании можно изменять масштаб графиков – для этого необходимо использовать пункты меню «**Графики**», «**Параметры**» или дважды щелкнуть левой клавишей в поле графика, при этом появляется дополнительное окно, в котором можно изменять начальное и конечное значения по осям абсцисс и ординат.

Проанализируем полученные графики переходных характеристик.

На графике показаны: единичное ступенчатое изменение входного воздействия – кривая 1; переходная характеристика звена с номинальным значением T=0,2 с – кривая 2; переходная характеристика звена с T=0,4 с – кривая 3. Из анализа кривых на графике видно, что кривые 2 и 3 стремятся к установившемуся значению $y_{УСТ} = k = 1$. Переходный процесс в апериодическом звене протекает по экспоненте. Известны следующие свойства экспоненты: за время, равное T, выходная величина достигает значения, равного $0{,}63 \cdot y_{УСТ}$.

На рис. 2.6 на кривой 2 переходной характеристики звена с номинальными параметрами – T=0,2 с для времени $t=T$=0,2 с выделена точка. (Для определения значений в интересующей точке нужно подвести курсор к этой точке и щелкнуть левой кнопкой мыши.) Как видно из рис. 2.6, в этой точке выходная величина действительно равна $0{,}63 \cdot y_{УСТ} = 0{,}63 \cdot 1 = 0{,}63$.

Кроме того, для экспоненты за время, равное $t=3T$, выходная величина достигает значения $0{,}95 \cdot y_{УСТ}$. Убедитесь в этом, определив значение выходной величины по графику. Аналогично найдите значения выходной величины для $t=T$=0,4 с и $t=3T$=3·0,4 с для второй кривой.

Как следует из полученных зависимостей, постоянная времени звена влияет на длительность протекания переходного процесса. Чем больше постоянная времени, тем медленнее протекает переходный процесс.

Далее аналогично получаем графики переходных процессов при второй вариации параметров – неизменном значении постоянной времени и вариации коэффициента передачи звена (рис. 2.7).

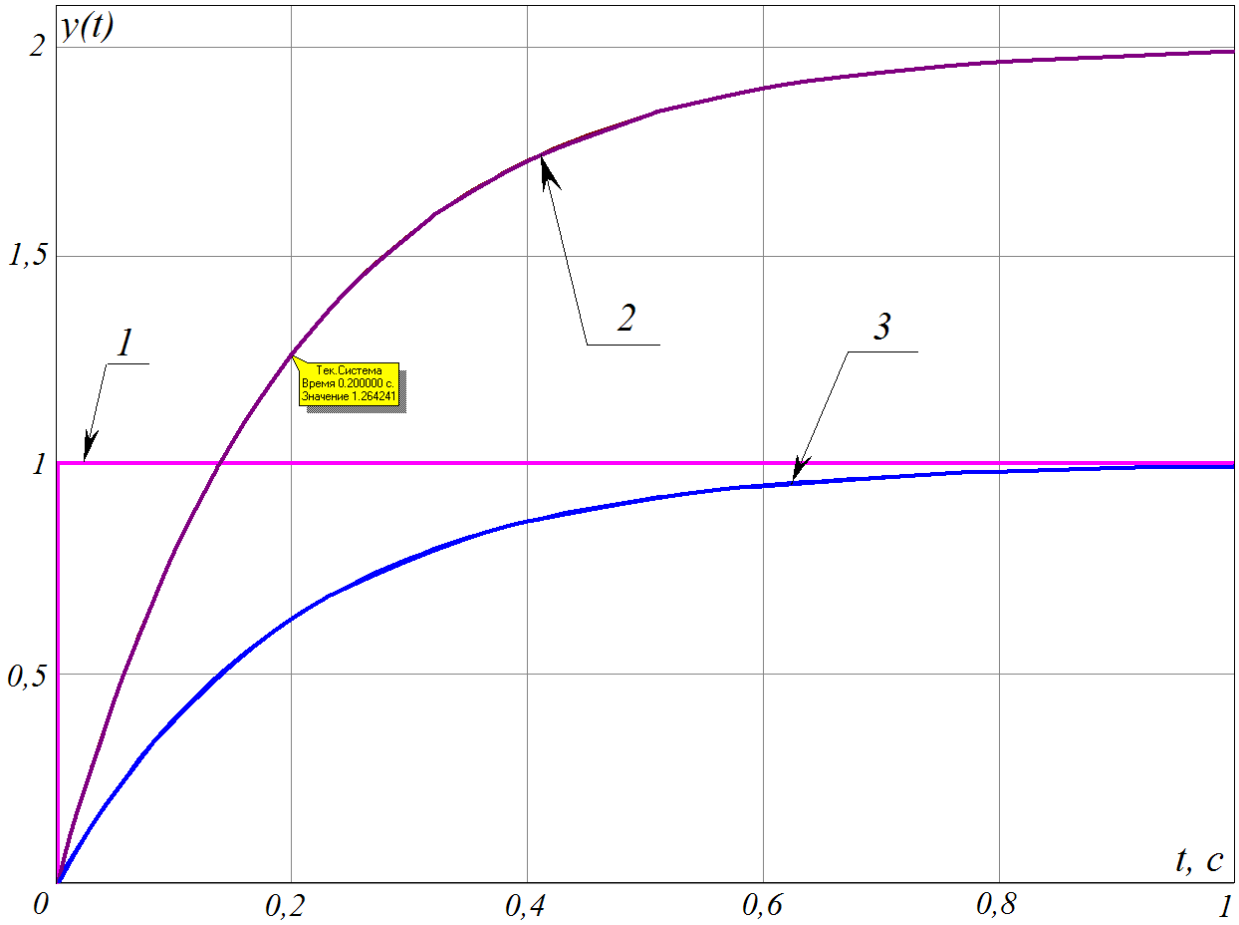

Рис. 2.7

На графике кривая 3 соответствует k=1, кривая 2 – k=2. Кривая 3 стремится к значению $y_{УСТ} = k = 1$, кривая 2 стремится к значению $y_{УСТ} = k = 2$.

На рис. 2.7 на переходной характеристике звена с k=2 для времени $t = T$=0,2 с выделена точка. В соответствии со свойством экспоненты значение выходной величины в этой точке должно быть равно 0,63·k=0,63·2=1,26, что совпадает с полученным по графику.

Дополнительно для звена с $k = 2$ определите по графику значение выходной величины для $t = 3T$ и сравните его с теоретическим значением.

По переходным характеристикам можно сделать следующие ***выводы:***

– коэффициент передачи звена определяет установившееся значение выходной величины;

– постоянная времени звена влияет на длительность переходного процесса: чем больше постоянная времени, тем медленнее протекает

переходный процесс. Иными словами, постоянная времени характеризует инерционные свойства звена.

Далее переходим к исследованию логарифмических частотных характеристик апериодического звена.

Логарифмические характеристики звена для первой вариации параметров приведены на рис. 2.8.

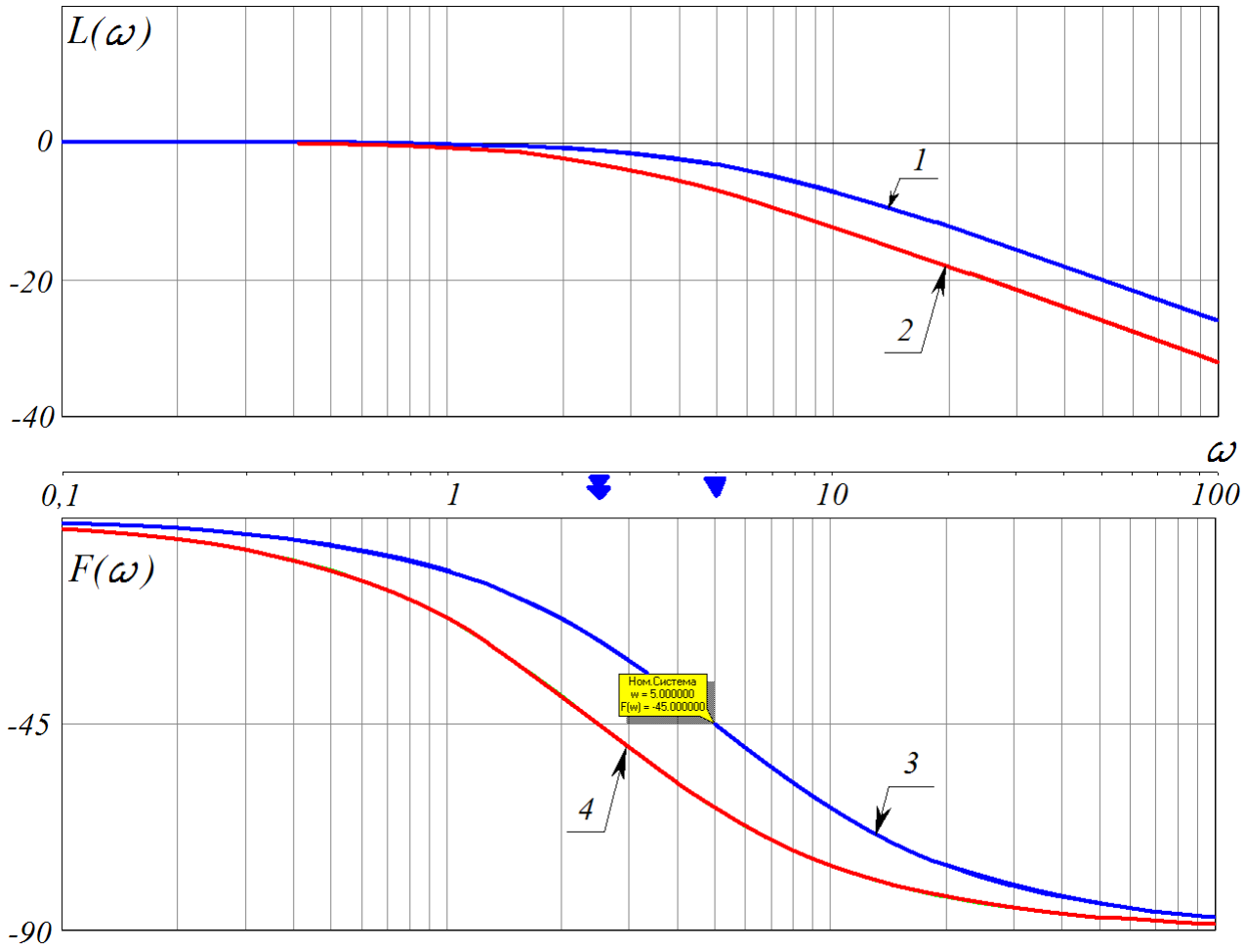

Рис. 2.8

Кривые 1 и 3 соответствуют номинальным значениям параметров (k=1, T=0,2 с). Кривые 2 и 4 соответствуют варьированным значениям параметров (k=1, T=0,4 с). На оси частот специальными значками отмечены так называемые частоты сопряжения $\omega_C=1/T$. Для T=0,2 с частота сопряжения $\omega_C=1/T=1/0{,}2=5$ рад/с, для T=0,4 с частота сопряжения $\omega_C=1/T=1/0{,}4=2{,}5$ рад/с. Напомним, что масштаб по оси частот неравномерный, логарифмический.

Отметим характерные особенности характеристик. Значение обеих ЛАХ при нулевой частоте

$$L(0) = 20\lg A(0) = 20\lg k = 20\lg 1 = 0.$$

Низкочастотный участок (до соответствующей частоты сопряжения) каждой ЛАХ идет примерно параллельно оси частот. После частоты сопряжения ЛАХ имеет наклон и ординаты ЛАХ убывают. Логарифмические фазовые характеристики в низкочастотной области стремятся к нулю, в высокочастотной области к -90 град. Причем при частоте сопряжения, как показано на рис. 2.8, соответствующая ЛФХ имеет значение -45 град.

В теоретической части отмечалось, что АЧХ и ЛАХ показывают зависимость «коэффициента передачи» звена от частоты. Используя этот термин, можно отметить, что «***коэффициент передачи***» ***апериодического звена в области частот, меньших частоты сопряжения, остается примерно постоянным, равным k. При возрастании частоты до значений, больших*** ω_C, «***коэффициент передачи***» ***начинает снижаться.***

ЛАХ и ЛФХ при второй вариации – изменении коэффициента передачи звена приведены на рис. 2.9. ЛФХ звена, как следует из рис. 2.9, при вариациях k не изменяется.

ЛАХ звена с коэффициентом передачи $k=2$ (кривая 1) располагается выше исходной (кривая 2). Ее начальное значение

$$L(0) = 20\lg A(0) = 20\lg k = 20\lg 2 = 6\ дБ,$$

что совпадает с точками, отмеченными на графике.

Таким образом, при увеличении коэффициента передачи звена ЛФХ остается неизменной, а ЛАХ перемещается вверх параллельно самой себе.

ЗАМЕЧАНИЕ. В основном окне строятся графики ЛАХ и ЛФХ. При необходимости построения амплитудно-фазовой характеристики АФХ или амплитудной частотной АЧХ и фазовой частотной ФЧХ характеристик необходимо щелкнуть правой кнопкой на изображении

графиков ЛАХ и ЛФХ и в появившемся меню выбрать «**Тип**». Далее в меню «**Частотные характеристики**» выбрать необходимый пункт и щелкнуть кнопку «**ОК**».

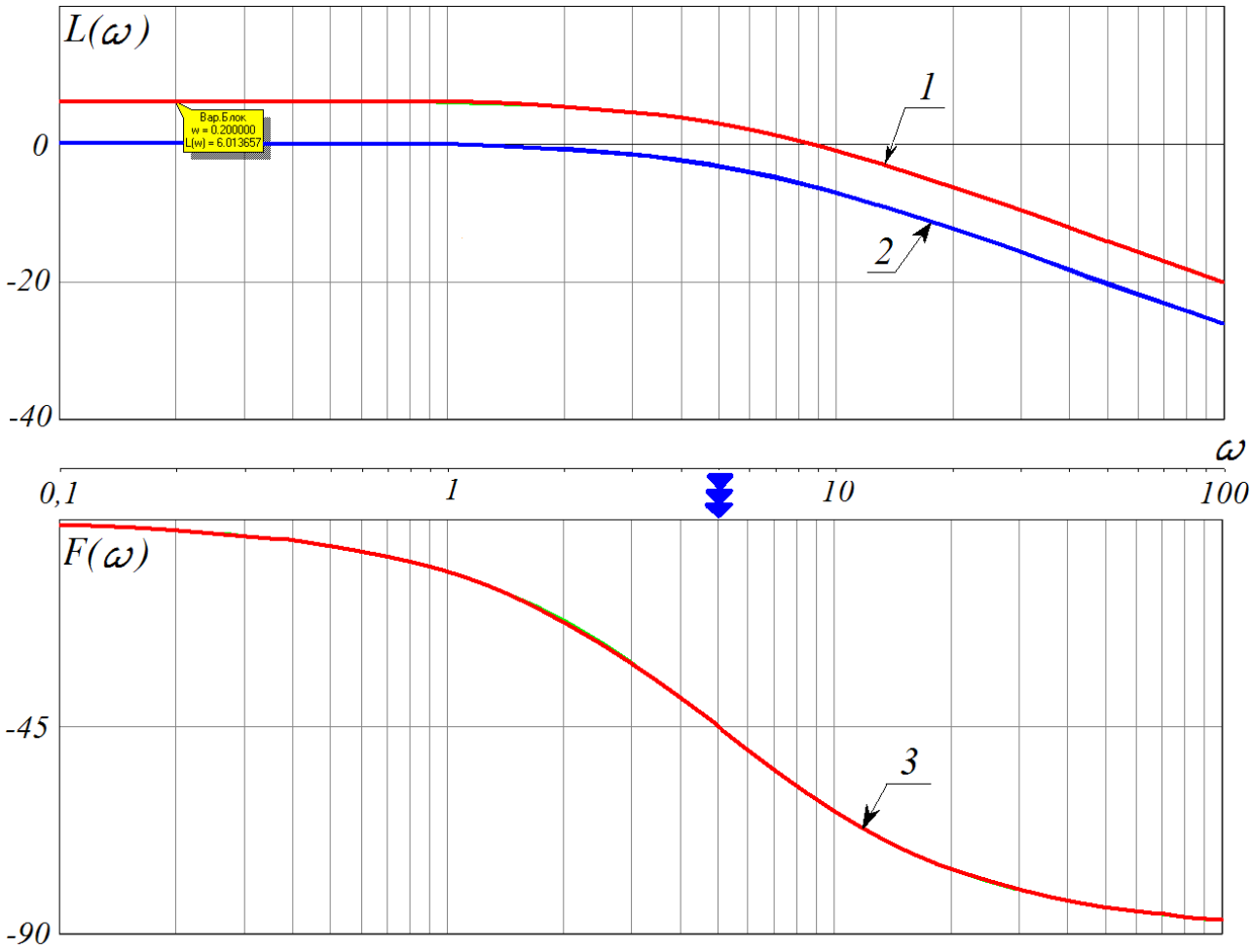

Рис. 2.9

Далее переходим к исследованию корней характеристического уравнения (полюсов передаточной функции) апериодического звена. Корни характеристического уравнения могут быть легко найдены аналитически. Для этого приравниваем к нулю знаменатель передаточной функции

$$Tp + 1 = 0$$

и находим корень $p = -1/T$. Для номинального значения $T = 0{,}2$ с корень $p = -1/0{,}2 = -5$. Для варьированного значения $T = 0{,}4$ с корень $p = -1/0{,}4 = -2{,}5$. Из графика расположения корней (рис. 2.10) видно, что расчетные значения совпадают с показанными на рисунке.

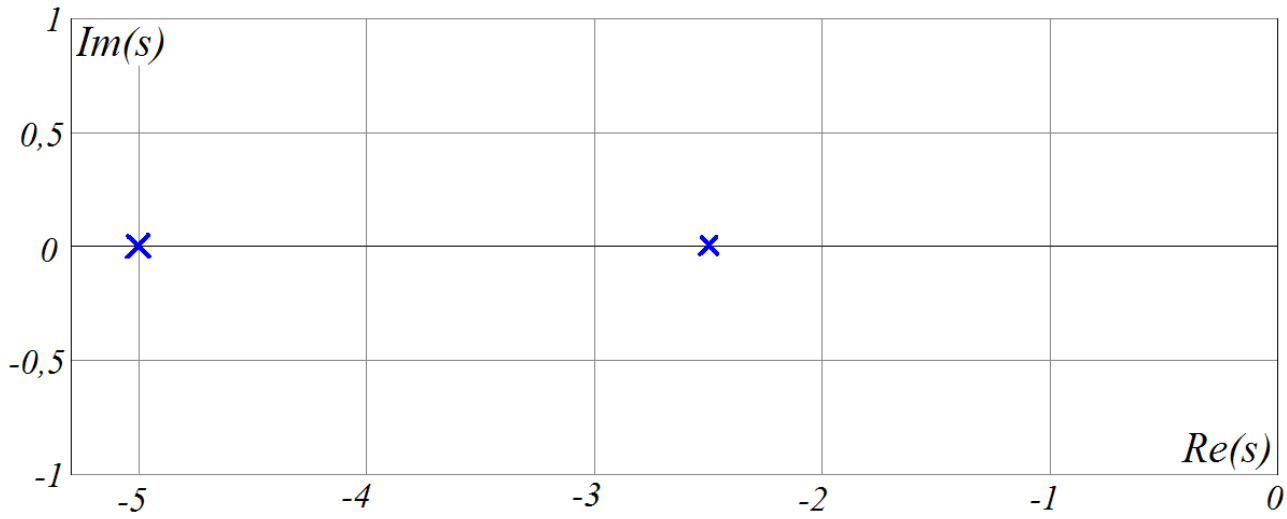

Рис. 2.10

ВНИМАНИЕ! При анализе других типовых звеньев просто изменяйте передаточную функцию на новую и далее выполняйте указанные выше действия.

2.3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ЗВЕНА

Передаточная функция интегрирующего звена имеет вид

$$W(p) = \frac{1}{Tp}. \qquad (2.11)$$

Звено содержит только один варьируемый параметр – постоянную времени T.

Исследуйте характеристики звена для номинального и варьированного значения постоянной времени T. Исследования выполняются аналогично предыдущему. При выполнении исследования необходимо учитывать особенности характеристик интегрирующего звена:

– переходная характеристика звена $y(t)$ – линейно нарастающая величина. При этом выходная величина достигает единичного значения за время, равное T. Чтобы убедиться в этом, по графику переходного процесса найдите значение выходной величины для $t = T$ (анализ выполните для номинального и варьированного значения T). Сделайте выводы о влиянии постоянной времени T на переходный процесс;

– ЛАХ представляет собой прямую, значения ординат ЛАХ с увеличением частоты убывают. Причем при частоте $\omega_C = 1/T$ ЛАХ пересекает ось абсцисс. Рассчитайте значения $\omega_C = 1/T$, отметьте их на графике и убедитесь, что ЛАХ пересекает ось абсцисс в указанной точке (анализ выполните для номинального и варьированного значения T).

По графику ЛФХ определите, какой фазовый сдвиг вносит интегрирующее звено. Сделайте выводы о влиянии постоянной времени T на вид ЛАХ и ЛФХ;

– передаточная функция имеет один корень, равный нулю. Убедитесь в этом по графику расположения корней.

2.3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕГО ЗВЕНА

Идеальное дифференцирующее звено

Идеальное дифференцирующее звено характеризуется передаточной функцией

$$W(p) = Tp. \qquad (2.12)$$

Исследуйте характеристики звена при T=1 с.

Реальное дифференцирующее звено

Существует несколько типов реальных дифференцирующих звеньев. Исследуйте характеристики звена с передаточной функцией

$$W(p) = Tp + 1$$

для двух значений постоянной времени: T=1 с и T=0,1 с.

Исследования выполняются аналогично предыдущему пункту.

При анализе характеристик звеньев учтите следующие характерные особенности идеального дифференцирующего звена:

– переходная характеристика звена представляет собой импульс теоретически бесконечно большой амплитуды. На графике он условно показан отрезком прямой со стрелкой. Установившееся значение выходной величины равно нулю, то есть в установившихся режимах сигнал на выходе звена равен нулю;

– ЛАХ представляет собой прямую, значения ординат ЛАХ с увеличением частоты возрастают. Причем при частоте $\omega_C=1/T$ ЛАХ пересекает ось абсцисс. Рассчитайте значения $\omega_C=1/T$ для двух значений T, отметьте их на графике и убедитесь, что ЛАХ пересекает ось абсцисс в указанной точке.

По графику ЛФХ определите, какой фазовый сдвиг вносит дифференцирующее звено. Сделайте выводы о влиянии постоянной времени T на вид ЛАХ и ЛФХ.

Сравните полученные характеристики с ЛАХ и ЛФХ интегрирующего звена.

Реальное дифференцирующее звено с приведенной передаточной функцией характеризуется следующими особенностями:

– переходная характеристика в момент $t=0$ представляет, как и у идеального дифференцирующего звена, импульс бесконечно большой амплитуды, а для $t>0$ имеет постоянное значение, равное 1. Убедитесь в этом по графику. Следовательно, такое звено передает сигнал в установившемся режиме с коэффициентом передачи $k=1$.

При исследовании ЛАХ рассчитайте значения частоты сопряжения $\omega_C=1/T$ для двух значений постоянной времени. Проанализируйте вид ЛАХ для частот слева и справа от ω_C. По графикам ЛФХ выясните особенности этих характеристик. В частности, найдите фазовый сдвиг на частоте ω_C. Сравните полученные характеристики с ЛАХ и ЛФХ апериодического звена;

– на корневой плоскости располагается отрицательный нуль, равный $-1/T$. Убедитесь в этом.

2.3.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНА ВТОРОГО ПОРЯДКА

Передаточная функция типового звена второго порядка может быть записана в нескольких формах, одной из которых является следующая:

$$W(s)=\frac{k}{T^2p^2+2\xi Tp+1}, \qquad (2.13)$$

где k – коэффициент усиления;

T – постоянная времени;

ξ – коэффициент затухания.

Характеристики звена существенно зависят от коэффициента затухания.

Если коэффициент затухания $\xi > 1$, то характеристическое уравнение звена (приравненный нулю знаменатель передаточной функции) имеет отрицательные вещественные корни и ***звено эквивалентно двум апериодическим звеньям первого порядка, включенным последовательно***. Звено второго порядка при $\xi \geq 1$ принято называть **апериодическим звеном второго порядка.**

При коэффициенте затухания $\xi < 1$ корни характеристического уравнения звена будут комплексными, а звено называют **колебательным звеном второго порядка**. Именно такое звено исследуется в работе.

Коэффициент затухания характеризует склонность звена к *колебательности*. ***Чем меньше коэффициент затухания, тем медленнее затухают колебания***. Обратите внимание, что ЛАХ может иметь резонансный пик. Можно показать, что пик будет существовать при $\xi < 0{,}707$.

Исследуйте характеристики звена для исходных (номинальных) и варьированных значений параметров. Коэффициент передачи звена при исследованиях принимается для всех вариантов $k = 10$.

Варьируются значения постоянной времени T и коэффициента затухания ξ. При первой вариации изменяется только постоянная времени, при второй – постоянная времени берется номинальной, а коэффициент затухания изменяется. Это позволяет оценить отдельно влияние каждого параметра на характеристики звена.

Исследования выполняются аналогично предыдущему.

Для задания параметров передаточной функции звена рассчитайте предварительно значения T^2 и $2\xi T$.

Параметры звена выбираются из табл. 2.6 по заданию преподавателя.

Таблица 2.6

№	Номинальные параметры		Первая вариация параметров		Вторая вариация параметров	
	ξ	T	ξ	T	ξ	T
1	0,5	0,2	0,5	0,4	0,2	0,2
2	0,6	0,4	0,6	0,8	0,3	0,4
3	0,7	0,1	0,7	0,2	0,4	0,1
4	0,5	0,2	0,5	0,4	0,3	0,2
5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,2	0,5
6	0,7	0,4	0,7	0,8	0,3	0,4
7	0,6	0,1	0,6	0,2	0,3	0,1
8	0,5	0,3	0,5	0,6	0,3	0,3
9	0,5	1	0,5	2	0,2	1
10	0,6	2	0,6	4	0,2	2
11	0,7	4	0,7	8	0,4	4
12	0,6	2	0,6	4	0,4	2
13	0,6	0,1	0,6	0,2	0,2	0,1
14	0,5	0,5	0,5	1	0,3	0,5
15	0,8	0,4	0,8	0,8	0,2	0,4
16	0,7	4	0,7	8	0,2	4
17	0,5	0,6	0,5	1,2	0,3	0,6
18	0,8	0,2	0,8	0,4	0,2	0,2
19	0,5	2	0,5	4	0,2	2
20	0,7	5	0,7	10	0,3	5

При анализе необходимо учесть, что колебательное звено характеризуется следующими особенностями:

– переходная характеристика имеет колебательный вид. Установившееся значение выходной величины равно k.

Проанализируйте графики при первой вариации параметров (вариации T) и сделайте вывод о влиянии постоянной времени на переходные процессы. Проанализируйте графики при второй вариации параметров (вариации ξ) и сделайте вывод о влиянии коэффициента затухания на переходные процессы.

При исследовании ЛАХ рассчитайте значения частоты сопряжения $\omega_C=1/T$ для двух значений постоянной времени. Проанализируйте вид ЛАХ для частот слева и справа от ω_C. По графикам ЛФХ выясните характерные особенности этих характеристик. В частности, найдите фазовый сдвиг на частоте ω_C. По результатам исследования графи-

ков при второй вариации параметров оцените, как влияет изменение коэффициента затухания на вид ЛАХ и ЛФХ;

– на корневой плоскости располагаются два комплексных полюса с отрицательной вещественной частью. Убедитесь в этом по графику.

Отчет должен содержать распечатку всех исследуемых графиков и результаты их анализа.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Дайте определение типового динамического звена.
2. Дайте определение передаточной функции звена.
3. Перечислите характеристики типовых звеньев.
4. Как получаются и представляются графически АФХ?
5. Как влияет коэффициент передачи каждого звена на характеристики звена?
6. Как влияет постоянная времени каждого звена на вид переходного процесса?
7. Через какое время текущее значение выходной величины интегрирующего звена будет равно 1?
8. Через какое время текущее значение выходной величины апериодического звена первого порядка составит 63 %, 95 % от установившегося значения?
9. Как влияет коэффициент затухания ξ колебательного звена на вид переходного процесса?
10. Как влияет коэффициент затухания ξ колебательного звена на вид АЧХ?
11. Какие типовые звенья вносят отрицательные фазовые сдвиги?
12. Какие типовые звенья вносят положительные фазовые сдвиги?

РАБОТА №3
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САУ

Цель работы – исследование замкнутых систем автоматического управления моделированием на ПК с использованием различных критериев устойчивости.

3.1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Алгоритмическая схема замкнутой системы, состоящей из трех последовательно включенных в прямой цепи динамических

звеньев с передаточными функциями (ПФ) $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$, приведена на рис. 3.1.

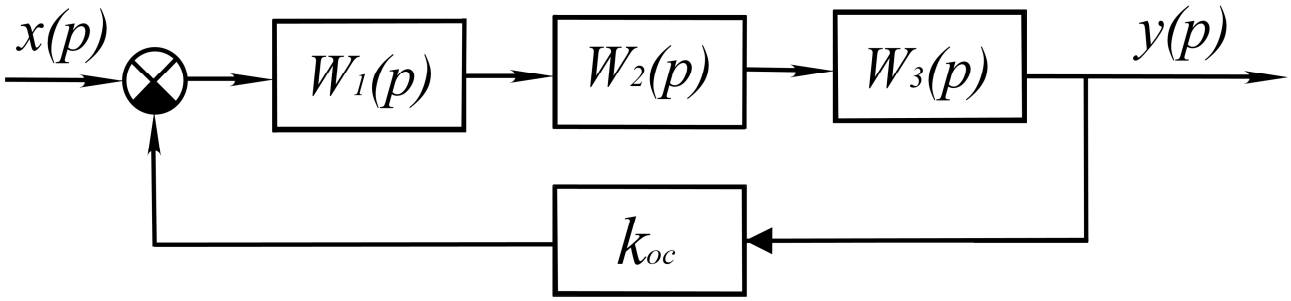

Рис. 3.1

В замкнутой системе может возникать расходящийся переходный процесс, свидетельствующий о неустойчивости системы. Такая система является неработоспособной. Поэтому требование устойчивости САУ – совершенно необходимое требование к ее динамическим свойствам.

Устойчивость – это свойство системы возвращаться к состоянию установившегося равновесия после исчезновения возмущения, нарушившего это равновесие.

Иными словами, ***в устойчивой системе после исчезновения возмущения отклонение выходной величины от исходного значения с течением времени стремится к нулю***.

Система, обладающая указанным свойством, называется ***устойчивой асимптотически***. Далее будет идти речь именно об этом типе устойчивости. Для линейных систем устойчивость (или неустойчивость) является свойством только системы**,** то есть зависит от структуры и параметров системы.

3.1.1. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ С ПОМОЩЬЮ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

Алгебраические критерии устойчивости позволяют провести анализ устойчивости «вручную», без использования ПК.

При исследовании устойчивости ***замкнутой системы*** по алгебраическим критериям используют характеристическое уравнение ***замкнутой системы***, которое можно получить, приравняв нулю зна-

менатель передаточной функции этой системы. Характеристическое уравнение n-ной степени приводят к виду

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \ldots + a_{n-1} p + a_n , \qquad (3.1)$$

где a_i – коэффициенты уравнения.

Для проверки условий устойчивости по Гурвицу из коэффициентов уравнения (3.1) составляют квадратную матрицу, которая строится по следующим правилам. По главной диагонали записывают последовательно коэффициенты уравнения (3.1), начиная с a_1.

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & . & . & . & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & . & . & . & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & . & . & . & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & . & . & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & a_{n-1} & a_n \\ 0 & 0 & . & . & . & . & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix}, \qquad (3.2)$$

Столбцы таблицы вверх от главной диагонали заполняют коэффициентами с возрастающими индексами, вниз от главной диагонали – с убывающими. Все коэффициенты с индексами ниже 0 и выше n заменяют нулями. Затем составляют определители Гурвица от первого до n-ного порядка. Определитель первого порядка получают из одной строки и столбца таблицы, т.е. $\Delta_1 = |a_1| = a_1$, определитель второго порядка включает 2 строки и 2 столбца таблицы

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix},$$

определитель i-того порядка содержит i строк и i столбцов, n-ный определитель – всю таблицу.

Условия устойчивости заключаются в том, что при $a_0 > 0$ все n определителей Гурвица должны быть больше нуля.

3.1.2. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ САУ МОДЕЛИРОВАНИЕМ НА ПК

При моделировании на ПК устойчивость системы может оцениваться по различным характеристикам.

Анализ устойчивости по графику переходного процесса.

Наиболее наглядным для анализа устойчивости является график переходного процесса в системе. В соответствии с приведенным выше определением устойчивости, необходимо исследовать переходный процесс, возникающий после подачи на систему исчезающего возмущения (рис. 3.2). В качестве такого возмущения можно использовать импульсное воздействие (на рис. 3.2 стрелка вверх в начале координат). Причем это воздействие может, в принципе, прикладываться в произвольной точке системы. Будем подавать это воздействие на вход системы.

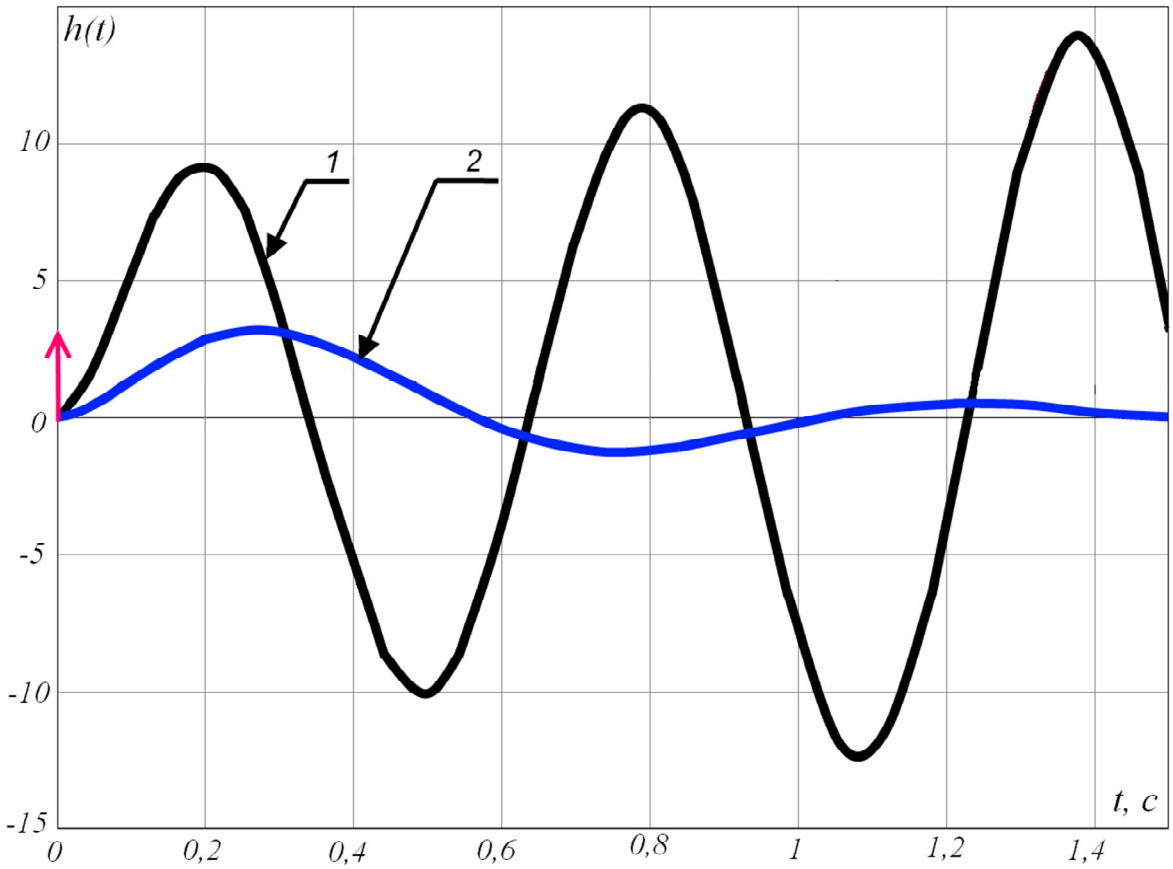

Рис. 3.2

Кривая 2 на рис. 3.2 соответствует переходному процессу в устойчивой системе, так как отклонение выходной величины от исходного (нулевого) значения с течением времени стремится к нулю.

Иными словами переходный процесс представляет собой затухающие колебания. Кривая 1 на рис. 3.2 соответствует переходному процессу в неустойчивой системе, так как амплитуда колебаний с течением времени нарастает.

Устойчивость системы может быть оценена и по графику переходного процесса при единичном ступенчатом воздействий (кривая 1 на рис. 3.3). Этот график позволяет не только выявить, устойчива система или нет, но и определить показатели качества переходного процесса. В **устойчивой системе** при приложении ступенчатого воздействия выходная переменная системы **стремится к новому установившемуся значению** (кривая 3 на рис. 3.3). **В неустойчивой системе** возникает **расходящийся переходный процесс** и выходная переменная теоретически бесконечно отклоняется от заданного значения. Для систем с отрицательной обратной связью в случае неустойчивости характерен колебательный расходящийся (с нарастанием амплитуды) процесс (кривая 2 на рис. 3.3).

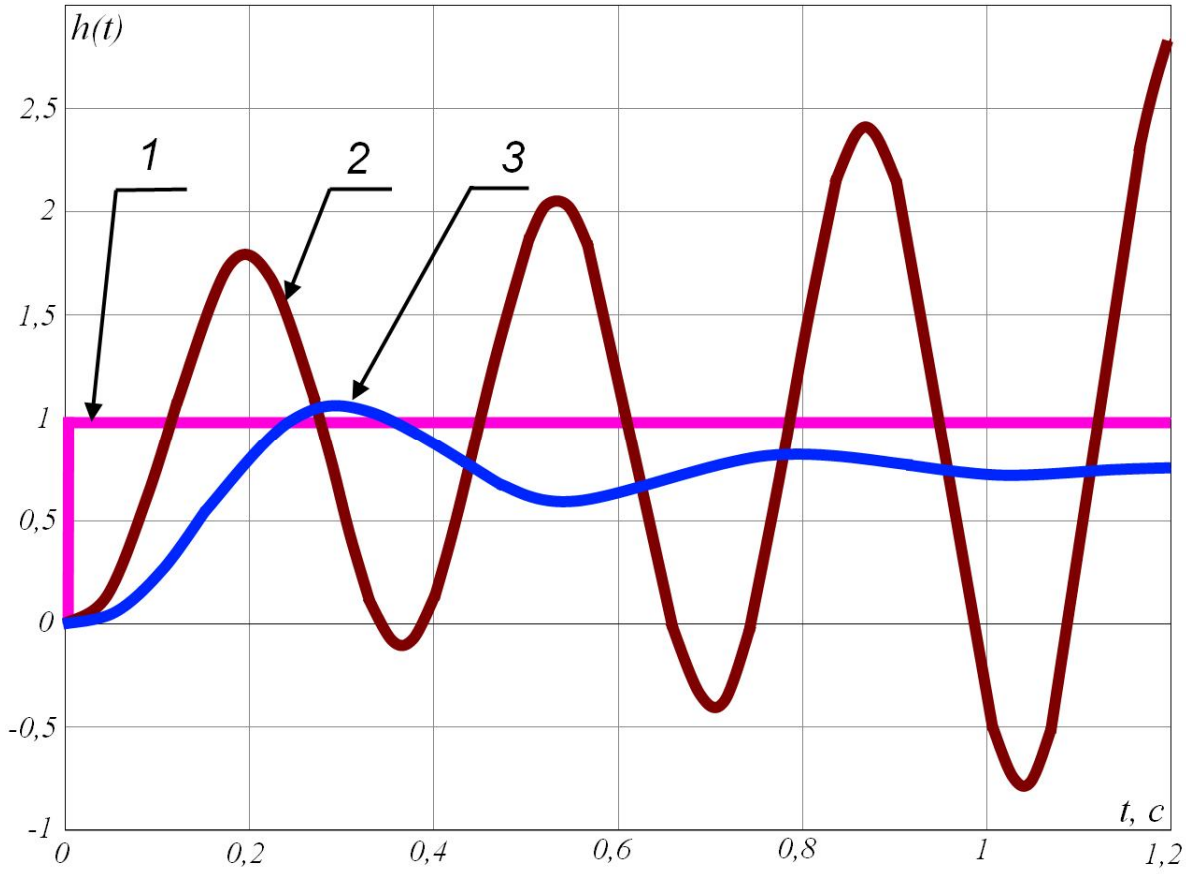

Рис. 3.3

Если переходный процесс (рис. 3.4) имеет вид незатухающих колебаний (амплитуда колебаний остается постоянной), то считают, что система находится **на границе устойчивости**.

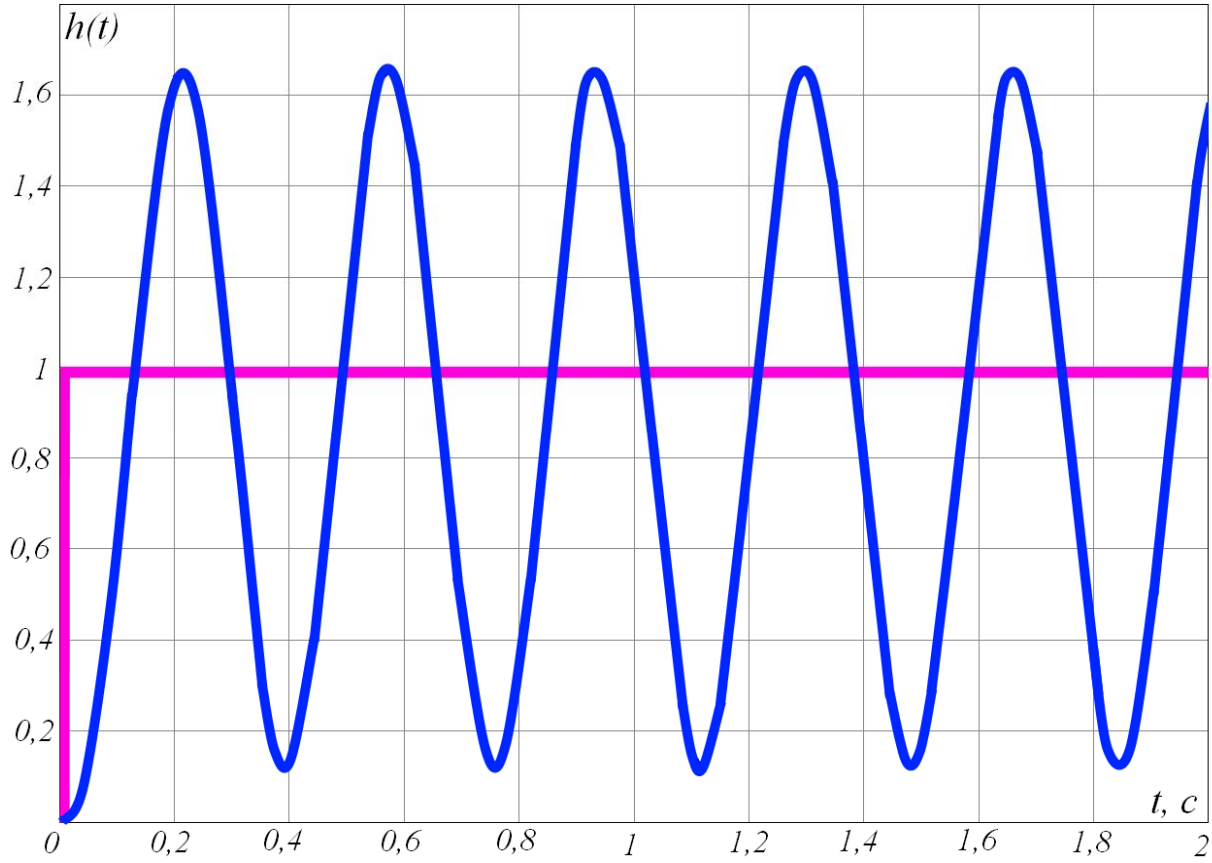

Рис. 3.4

Обратим внимание, что вид графика переходного процесса позволяет сделать однозначный вывод об устойчивости или неустойчивости системы, причем по соответствующим графикам можно оценивать устойчивость как **разомкнутой**, так **и замкнутой системы**. При «ручном» расчете построение графика, как правило, сопряжено с большим объемом вычислительной работы. В этой ситуации использование **критериев устойчивости** упрощает решение задачи анализа устойчивости. Кроме того, критерии устойчивости, особенно частотные, позволяют наметить пути обеспечения устойчивости.

При моделировании системы на ПК наряду с переходным процессом автоматически рассчитываются и другие характеристики, позволяющие сделать выводы об устойчивости или неустойчивости си-

стемы. Используя эти характеристики, можно дополнительно проанализировать устойчивость системы с использованием различных критериев устойчивости.

2. Анализ устойчивости по необходимым и достаточным условиям.

Необходимым и достаточным условием устойчивости линейной (линеаризованной) системы является отрицательность действительных частей всех корней ее характеристического уравнения.

Корни характеристического уравнения можно изобразить точками на комплексной плоскости, причем корни с отрицательной действительной частью будут лежать в левой полуплоскости. Тогда условие устойчивости можно сформулировать и в другом виде: ***необходимым и достаточным условием устойчивости системы является расположение всех корней ее характеристического уравнения в левой комплексной полуплоскости.***

Таким образом, мнимая ось является границей устойчивости. Если хотя бы один корень лежит на мнимой оси, то система находится **на границе устойчивости**.

В качестве примера на рис. 3.5 крестиками показано расположение корней характеристического уравнения системы (полюсов ПФ). Как следует из этого рисунка, корни вещественные отрицательные (расположены в левой полуплоскости на вещественной оси), следовательно, согласно необходимому и достаточному условию устойчивости система устойчива.

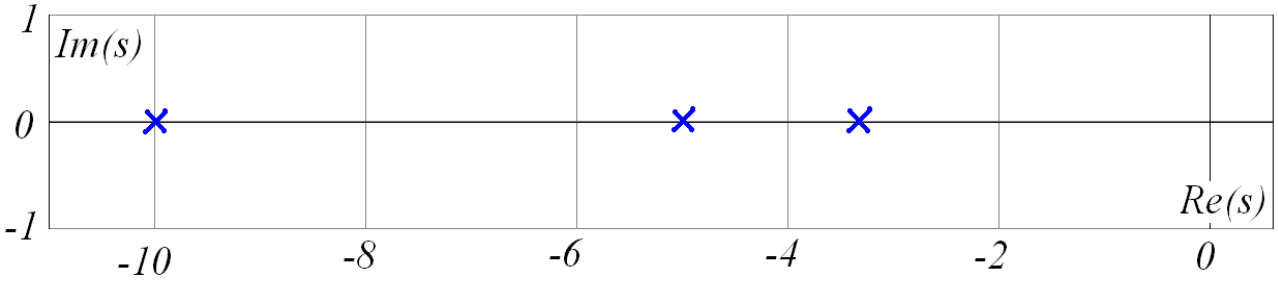

Рис. 3.5

Обратим внимание, что по расположению корней можно судить об устойчивости как **разомкнутой**, **так и замкнутой систем**: в первом случае нужно рассмотреть расположение корней характеристического уравнения **разомкнутой системы**, во втором – корней характеристического уравнения **замкнутой системы**.

3. Анализ устойчивости по виду АФХ системы.

Условия устойчивости по АФХ носят название критерия Найквиста. Его можно сформулировать так: ***если разомкнутая система устойчива, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФХ разомкнутой системы не охватывала точку с координатами (-1, j0)***.

Случай, когда АФХ разомкнутой системы проходит через указанную точку, соответствует ***границе устойчивости замкнутой системы.***

Подчеркнем, что полученные условия касаются устойчивости замкнутой системы, устойчивой в разомкнутом состоянии. В принципе система неустойчивая в разомкнутом состоянии может быть устойчива в замкнутом состоянии. Условия устойчивости для этого случая имеют несколько иной вид. На практике такие системы встречаются достаточно редко и здесь не рассматриваются.

Обратим также внимание на следующее. Критерий Найквиста позволяет судить об устойчивости **замкнутой системы** по виду **АФХ системы в разомкнутом состоянии**. Следовательно, он применим только для анализа устойчивости **замкнутых систем**.

На рис. 3.6 показаны примеры АФХ **разомкнутых** систем. Для анализа необходимо показать на графике точку с координатами (-1, j0), т.е. точку с координатой -1 на вещественной оси. Для первой системы график АФХ – кривая 1 на рис. 3.6 не охватывает точку с координатами (-1, j0), следовательно, в соответствии с критерием Найквиста, **замкнутая система будет устойчива**. График АФХ вто-

рой системы – кривая 2 на рис. 3.6 охватывает точку с координатами (-1, j0), следовательно, **замкнутая система будет неустойчива**.

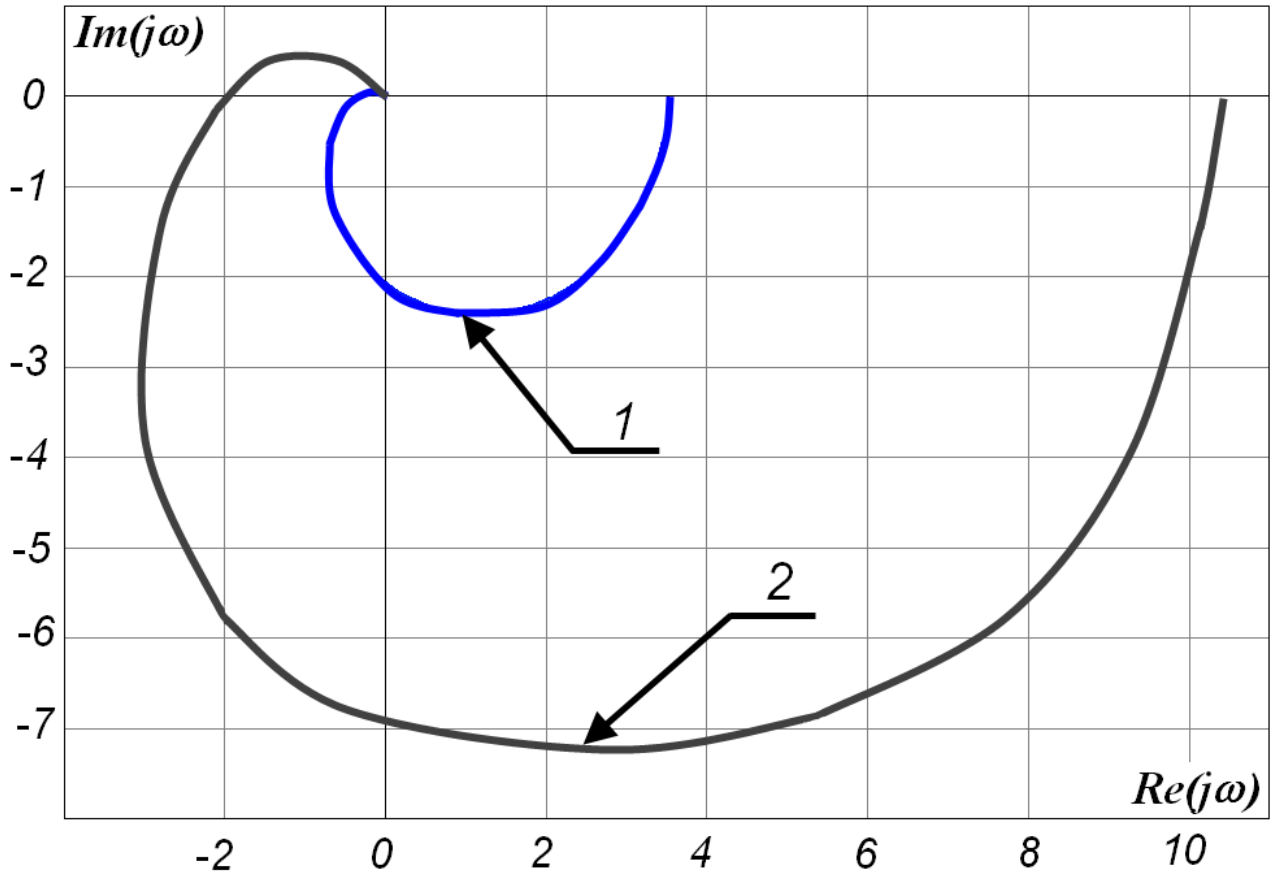

Рис. 3.6

4. Анализ устойчивости по ЛАХ и ЛФХ.

Условия устойчивости по ЛАХ и ЛФХ являются следствием критерия Найквиста и позволяют проанализировать устойчивость ***замкнутой системы*** по частотным характеристикам ***разомкнутой системы***.

Для систем, устойчивых в разомкнутом состоянии, условия устойчивости сводятся к следующему: замкнутая система будет устойчива, если для разомкнутой системы при фазовом сдвиге -180° ЛАХ располагается ниже оси частот (ордината ЛАХ меньше 0).

На рис. 3.7 показаны ЛАХ и ЛФХ двух разомкнутых систем. Обе системы имеют одну и ту же ЛФХ. Для анализа определяем частоту, при которой ЛФХ достигает отметки -180° (выделена на графике). Для первой системы при фазовом сдвиге -180° ЛАХ – кривая 1 на рис. 3.7 располагается ниже оси частот, следовательно, **замкнутая система будет устойчива**. Для второй системы при фазовом сдвиге

-180° ЛАХ – кривая 2 на рис. 3.7 располагается выше оси частот, следовательно, **замкнутая система будет неустойчива**.

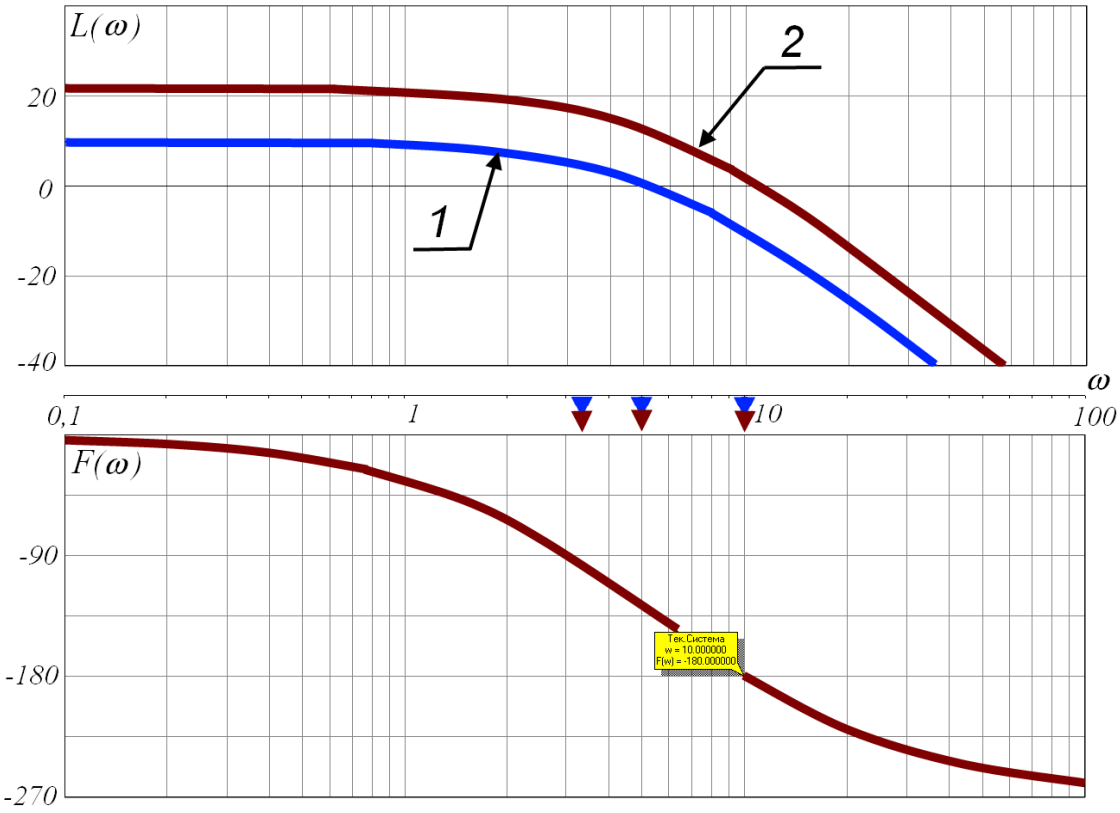

Рис. 3.7

В принципе, проведенный анализ уже достаточен для решения задачи оценки устойчивости разомкнутой и замкнутой систем. Дополнительный анализ может быть выполнен по характеристикам **замкнутой системы**. Такой анализ выполняется по переходной характеристике и расположению корней характеристического уравнения. При этом используются критерии, изложенные выше.

3.2. ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

Имеется замкнутая автоматическая система, алгоритмическая (структурная) схема которой показана на рис. 3.1.

Выражение для передаточной функции системы в разомкнутом состоянии $W_{PA3}(p)$ и численные значения параметров приведены в табл. 3.1 (номер варианта задается преподавателем), где:

k_i – коэффициенты усиления звеньев;

T_1 -T_3 – постоянные времени, с;

ξ – коэффициент затухания;

p – оператор Лапласа.

Таблица 3.1

№	$W(p)$	k_1	k_2	k_3	T_1	T_2	T_3
1	$W_1(p)=\frac{k_1}{(T_1p+1)}$; $W_2(p)=\frac{k_2}{(T_2p+1)}$; $W_3(p)=\frac{k_3}{(T_3p+1)}$.	20	3	2	1,0	0,50	0,04
2		10	2	2	2,20	0,35	0,90
3		10	5	2	3,50	0,45	0,15
4		25	2	2	1,60	0,95	0,06
5		5	4	2	0,50	0,70	1,20
6		15	3	2	0,90	2,10	1,50
7		10	2	4	0,30	0,40	0,50
8		20	1	3	0,40	0,50	0,60
9		30	2	4	0,20	0,30	0,40
10		50	2	1	0,90	1,10	1,20
	W(p)	k_1	k_2	k_3	T_1	T_2	ξ
11	$W_1(p)=k_1$; $W_2(p)=\frac{k_2}{(T_1p+1)}$; $W_3(p)\frac{k_3}{(T_2^2p^2+2\xi T_2p+1)}$	25	4	1	0,06	0,20	0,5
12		22	2	2	0,80	0,60	0,6
13		20	3	4	0,35	0,12	0,4
14		6	5	3	1,80	0,55	0,6
15		11	2	2	0,40	0,14	0,5
16		15	4	2	2,10	0,34	0,6
17		10	6	5	0,40	0,36	0,5
18		20	5	1	0,50	0,24	0,4
19		30	3	2	0,30	0,15	0,5
20		50	2	1	1,10	0,80	0,6

Необходимо:

– провести исследование системы на устойчивость;

– исследовать замкнутую систему на устойчивость с помощью алгебраического критерия Гурвица и найти предельный коэффициент усиления разомкнутой системы;

– исследовать на устойчивость разомкнутую систему путем моделирования на ЭВМ;

– исследовать на устойчивость замкнутую систему путем моделирования на ЭВМ;

– сравнить результаты, полученные при исследовании устойчивости разомкнутой и замкнутой САУ с помощью различных критериев;

– исследовать характеристики замкнутой системы при предельном значении коэффициента усиления.

3.3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОФОРМЛЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование замкнутой системы с помощью алгебраического критерия Гурвица. Определение предельного коэффициента усиления разомкнутой системы.

Исследование проводится по методике, изложенной выше.

Пример. Исходные данные для расчета:

$k_1 = 10$; $k_2 = 5$; $k_3 = 1$; $k_{OC} = 1$; T_1=0,1 с; T_2=0,1 с; T_3=0,1 с.

3.3.1. ПРОВЕРКА ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

Передаточная функция разомкнутой системы определяется как произведение ПФ отдельных звеньев

$$W_{PA3}(p) = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} = \frac{k_{PA3}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)},$$

где коэффициент усиления разомкнутой системы

$$k_{PA3} = k_1 \cdot k_1 \cdot k_3 = 10 \cdot 5 \cdot 1 = 50.$$

Записываем выражение для передаточной функции замкнутой системы

$$W_{3AM}(p) = \frac{W_{PA3}(p)}{1 + W_{PA3}(p) \cdot W_{OC}(p)},$$

где $W_{OC}(p) = k_{OC} = 1$ – передаточная функция звена в цепи обратной связи.

Подставляя в него выражение для $W_{3AM}(p)$, после преобразований получим:

$$W_{ЗАМ}(p)=\frac{k_{РАЗ}}{(T_1p+1)(T_2p+1)(T_3p+1)+k_{РАЗ}}.$$

Приравнивая знаменатель к нулю, найдем характеристическое уравнение замкнутой системы, которое после преобразований приводится к виду

$$a_0p^3+a_1p^2+a_2p+a_3=0,$$

где

$a_0=T_1T_2T_3=0{,}1\cdot0{,}1\cdot0{,}1=10^{-3}$;

$a_1=T_1T_2+T_1T_3+T_2T_3=0{,}1\cdot0{,}1+0{,}1\cdot0{,}1+0{,}1\cdot0{,}1=3\cdot10^{-2}$;

$a_2=T_1+T_2+T_3=0{,}1+0{,}1+0{,}1=3\cdot10^{-1}$;

$a_3=1+k_{РАЗ}=1+50=51$.

Из коэффициентов характеристического уравнения 3-го порядка составляем матрицу

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}.$$

Находим определители

$$\Delta_1=a_1>0; \qquad \Delta_2=\begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}=a_1\cdot a_2-a_0\cdot a_3=$$

$$=3\cdot10^{-2}\cdot3\cdot10^{-1}-10^{-3}\cdot51=9\cdot10^{-3}-51\cdot10^{-3}<0.$$

Рассчитывать третий определитель нет необходимости, так как его можно записать в виде

$$\Delta_3=a_3\,\Delta_2,$$

следовательно, его знак зависит от знака Δ_2.

Таким образом, можно сделать вывод: условия устойчивости не выполняются – замкнутая система неустойчива.

Выражение для Δ_2 с учетом формулы для a_3 можно записать в виде

$$\Delta_2=a_1\,a_2-a_0\,(1+k_{РАЗ}).$$

Из этого выражения следует, что при уменьшении $k_{РАЗ}$ второй определитель, а следовательно и третий, могут стать равными нулю – в этом случае система будет находиться на границе устойчивости, а при дальнейшем уменьшении $k_{РАЗ}$ определители станут больше 0 – система станет устойчивой.

Значение коэффициента усиления разомкнутой системы, при котором замкнутая система находится на границе устойчивости, называют **предельным значением**. Обозначим его $k_{ПР}$. Очевидно, что для нахождения $k_{ПР}$ нужно для рассматриваемой системы приравнять второй определитель к нулю:

$$a_1 a_2 - a_0(1 + k_{ПР}) = 0,$$

откуда

$$k_{ПР} = \frac{a_1 a_2}{a_0} - 1.$$

Для рассматриваемого примера получим

$$k_{ПР} = \frac{3 \cdot 10^{-2} 3 \cdot 10^{-1}}{10^{-3}} - 1 = 8.$$

3.3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПК

Модель системы (рис. 3.8) в соответствии с алгоритмической схемой можно представить в виде трех последовательно включенных звеньев. В блоках 1, 2, 3 следует задать передаточные функции $W_1(p)$, $W_2(p)$, $W_3(p)$. Для проведения связей следует воспользоваться пунктом меню «**Редактирование**». Вход следует назначить на звено 1, выход – на звено 3.

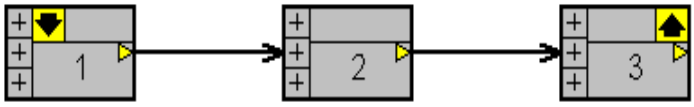

Рис. 3.8

Далее, перейдя к пунктам «**Расчеты**», «**Характеристики**», необходимо с учетом сведений, изложенных в пункте 3.1.2, исследовать:

– переходный процесс в разомкнутой системе при импульсном и ступенчатом воздействиях. На основании вида переходных процессов сделать вывод об устойчивости/неустойчивости разомкнутой системы;

– расположение корней характеристического уравнения разомкнутой системы; по расположению корней сделать вывод об устойчивости/неустойчивости разомкнутой системы;

– АФХ системы в разомкнутом состоянии; по виду АФХ на основании критерия Найквиста дать заключение об устойчивости/неустойчивости замкнутой системы;

– ЛАХ и ЛФХ системы в разомкнутом состоянии; по их виду дать заключение об устойчивости/неустойчивости замкнутой системы.

3.3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПК

Чтобы получить модель замкнутой системы, необходимо дополнить модель разомкнутой системы цепью отрицательной обратной связи (рис. 3.9). Обратите внимание, что сигнал обратной связи подается на «минусовой» вход первого звена. За счет этого связь оказывается отрицательной.

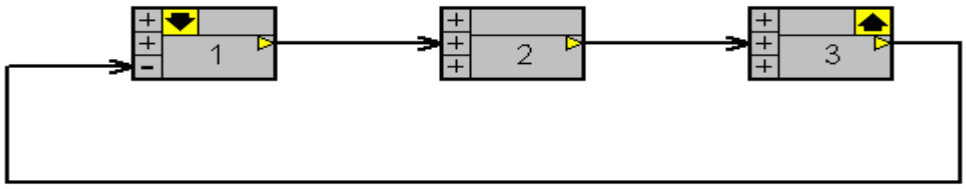

Рис. 3.9

Далее, перейдя к пунктам «**Расчеты**», «**Характеристики**», необходимо с учетом сведений, изложенных в разделе 3.1.2, исследовать:

– переходные процессы в замкнутой системе при импульсном и ступенчатом воздействиях. На основании вида переходных процессов сделать вывод об устойчивости/неустойчивости замкнутой системы;

– расположение корней характеристического уравнения замкнутой системы; по расположению корней сделать вывод об устойчивости/неустойчивости замкнутой системы.

3.3.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПРЕДЕЛЬНОМ ЗНАЧЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ

Чтобы система имела коэффициент усиления, равный предельному, нужно выбрать коэффициент усиления одного из звеньев, например 1-го, из условия

$$k_1 = \frac{k_{ПР}}{k_2 \cdot k_3} = \frac{8}{5 \cdot 1} = 1{,}6 \ ,$$

и задать его в блоке 1.

Далее необходимо проанализировать:

– переходный процесс в системе (ожидаемый вид переходного процесса показан на рис. 3.4) и сделать вывод об устойчивости замкнутой системы;

– расположение корней характеристического уравнения системы и сделать вывод об устойчивости.

3.3.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЗНАЧЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ $k_{РАЗ}=0{,}5 \cdot k_{ПР}$

Чтобы система имела коэффициент усиления равный $0{,}5 \cdot k_{ПР}$, нужно выбрать коэффициент усиления одного из звеньев, например 1-го, из условия

$$k_1 = \frac{0{,}5 \cdot k_{ПР}}{k_2 \cdot k_3} = \frac{0{,}5 \cdot 8}{5 \cdot 1} = 0{,}8 \ ,$$

и задать его в блоке 1.

Далее необходимо проанализировать:

– переходный процесс в системе и сделать вывод об устойчивости замкнутой системы;

– расположение корней характеристического уравнения системы и сделать вывод об устойчивости.

При оформлении отчета по каждому графику должно быть дано обоснованное заключение. Например, на рисунке (привести номер рисунка) приведен график переходного процесса. Из графика следует, что выходная величина стремится к новому установившемуся значению, т.е. переходный процесс сходящийся. Следовательно, исследуемая система в разомкнутом состоянии устойчива. Или, на

рис. (указать номер рисунка) приведена корневая плоскость и показано расположение корней характеристического уравнения замкнутой системы. Из графика следует, что два корня расположены в правой полуплоскости. Для устойчивости системы необходимо, чтобы все корни характеристического уравнения системы лежали в левой полуплоскости. Для исследуемой замкнутой системы это условие не выполняется, следовательно, она неустойчива.

Выводы по графикам можно записывать непосредственно под соответствующим графиком.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что понимают под устойчивостью системы? Начертите графики переходных процессов в устойчивой и неустойчивой САУ.
2. В чем заключается необходимое и достаточное условие устойчивости САУ?
3. Как получить характеристическое уравнение замкнутой системы?
4. Как можно судить об устойчивости по расположению корней характеристического уравнения на комплексной плоскости?
5. Как определяют по виду АФХ, устойчива САУ или нет? Пояснить на графиках.
6. Начертите АФХ разомкнутой системы, соответствующую устойчивой замкнутой системе.
7. Начертите АФХ разомкнутой системы, соответствующую неустойчивой замкнутой системе.
8. Что понимают под переходным процессом в системе? Каким воздействием вызван переходный процесс?
9. Начертите график переходного процесса в неустойчивой системе.
10. Начертите график переходного процесса в устойчивой системе.
11. Что используется в качестве исходных данных при исследовании системы с помощью критерия Гурвица?
12. В чем заключаются условия устойчивости по Гурвицу?
13. Что понимают под предельным коэффициентом усиления системы?
14. Как влияет изменение коэффициента усиления разомкнутой системы на ее устойчивость?
15. Как по виду ЛАХ и ЛФХ можно судить об устойчивости системы?