

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
“ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ”

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Основы теории управления»
для студентов специальности 6.05010101 «Информационно-управляющие си-
стемы и технологии»

Харьков 2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
“ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ”

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Основы теории управления»
для студентов специальности 6.05010101 «Информационно-управляющие си-
стемы и технологии»

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 1 от 20.03.15

Харьков
НТУ «ХПИ»
2015

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы теории управления» / Сост. В. В. Москалеко, Н. Г. Фонта, Т. В. Захарова. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – 168с.

Составители: В. В. Москаленко
Н. Г. Фонта
Т. В. Захарова

Рецензент проф. Гужва В. А.

Кафедра Автоматизированных систем управления

СОДЕРЖАНИЕ

Вступление	4
Лабораторная работа 1. Знакомство с программой <i>Vissim</i> . построение и исследование простых виртуальных лабораторных стендов	5
1. Теоретический материал лабораторной работы 1.....	5
2. Выполнение лабораторной работы 1.....	13
Лабораторная работа 2. Исследование линейных типовых звеньев	30
1. Теоретический материал лабораторной работы 2.....	30
2. Выполнение лабораторной работы 2.....	42
Лабораторная работа 3. Частотный анализ типовых звеньев	55
1. Теоретический материал лабораторной работы 3.....	55
2. Выполнение лабораторной работы 3.....	68
Лабораторная работа 4. Исследование устойчивости линейных систем с обратной связью	86
1. Теоретический материал лабораторной работы 4.....	86
2. Выполнение лабораторной работы 4.....	103
Лабораторная работа 5. Оценка качества регулирования. синтез saP	124
1. Теоретический материал лабораторной работы 5.....	124
2. Выполнение лабораторной работы 5.....	155
Список литературы.....	176

ВСТУПЛЕНИЕ

Выполнение лабораторных работ предусматривает систематизацию, закрепление и расширение теоретических знаний и практических навыков по дисциплине «Основы теории управления».

Лабораторные работы выполняются согласно учебному плану.

Каждое лабораторное занятие предусматривает:

- 1) повторение теоретического материала, для этого выделен в каждой лабораторной работе раздел «Теоретический материал»;
- 2) закрепление теоретических знаний на лабораторном практикуме, для этого выделен раздел «Выполнение лабораторной работы»;
- 3) оформление отчёта по окончании выполнения лабораторной работы;
- 4) ответы на контрольные вопросы для оценивания знаний студента.

В разделе «Список литературы» приведены источники информации, научная литература для самостоятельного изучения теоретического материала дисциплины «Основы теории управления».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. Знакомство с программой *VisSim*. Построение и исследование простых виртуальных лабораторных стендов

Цель работы: знакомство с назначением, графическим интерфейсом, принципами построения моделей и важными блоками программы *VisSim*. Ознакомление с главными этапами моделирования, приобретение навыков создания простейших моделей, текстового и графического оформления диаграмм. Определение общих методов представления результатов.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 1

1.1. Назначение программного комплекса *VisSim*

Программа *VisSim* предназначена для построения, исследования и оптимизации виртуальных моделей физических и технических объектов, в том числе и систем управления. *VisSim* это аббревиатура выражения *Visual Simulator* – визуальная, воспринимаемая зрением, среда и средство моделирования. Программа *VisSim*, разработана и развивается компанией *Visual Solutions (USA)* (<http://www.vissim.com/downloads.html>). Эта программа – мощное, удобное в использовании, компактное и эффективное средство моделирования физических и технических объектов, систем и их элементов. При описании и последующем построении модели в среде *VisSim* нет необходимости записывать и решать дифференциальные уравнения, программа это сделает сама по предложенной ей исследователем структуре системы и параметрам ее элементов. Результаты решения выводятся в наглядной графической форме. Поэтому программой могут пользоваться и те, кто не имеет глубоких познаний в математике и программировании.

1.2. Графический интерфейс *VisSim*

Интерфейс программы – это совокупность средств, позволяющих пользователю общаться с ней:

- вводить и получать данные,
- контролировать ход выполнения компьютером программы,

- подавать управляющие воздействия и наблюдать реакцию на них программы и т.п.

Интерфейс *VisSim* состоит из главного окна, имеющего меню и ряд кнопок управления, воспринимающих щелчки копков мыши, и т.н. рабочего пространства, в котором строится и корректируется модель, наблюдаются результаты ее работы

С точки зрения исследователя интерфейс программы *VisSim* представляет собой интерактивный виртуальный лабораторный стенд, обеспечивающий построение моделей из отдельных блоков, запуск процесса моделирования, управление им и контроль результатов.

Диаграммой в *VisSim*'е называется совокупность связанных, а также автономных блоков и надписей, помещённых на рабочее пространство и способных в известном смысле функционировать при запуске процесса моделирования. Диаграмма может быть сохранена в виде отдельного файла и, при необходимости, открыта вновь. Модель *VisSim*'а это часть диаграммы, содержащая виртуальный аналог реальной или проектируемой системы. Диаграмма может содержать несколько моделей. К модели *VisSim*'а в принципе могут быть подключены, с помощью дополнительных компьютерных плат, и внешние физические устройства, которыми модель системы, построенная в *VisSim*'е, сможет управлять. Таким образом, объектами управления модели системы автоматического управления, построенной в *VisSim*, могут быть не только виртуальные, но и реальные устройства.

1.3. Принципы построения моделей в среде *VisSim*

Исходными данными для построения модели в *VisSim*'е являются структурно-функциональная схема моделируемой системы, процесса или объекта и описывающие их дифференциально-алгебраические уравнения. Вместо таких уравнений могут быть заданы операторы или функции, характеризующие отдельные элементы моделируемой системы, например, передаточные функции для линейных элементов и статические характеристики для нелинейных элементов.

Реальные системы и объекты состоят из отдельных, связанных и взаимодействующих друг с другом элементов. И для всей системы в целом, и для отдельных

ее, должным образом выбранных элементов, можно указать место приложения воздействия, которое можно назвать входом, и место их реакции (отклика) на входное воздействие, называемое выходом. И воздействие, и реакция это некоторые физические величины, являющиеся функциями времени.

Модели систем и объектов в программе *VisSim* строятся из отдельных элементов – т.н. блоков. Блок - это виртуальный аналог физического элемента реальной системы. «Виртуальный» в данном контексте значит воображаемый, физически не существующий, реализуемый программно, но с точки зрения человека, работающего с моделирующей программой, блок воспринимается зрением, он видим на рабочем пространстве *VisSim*. Термин «аналог» предполагает, что блок функционирует, он подчиняется тем же самым уравнениям, что и реальный, моделируемый элемент системы. Виртуальные блоки *VisSim*'а могут иметь или вход, на который может быть подан выходной сигнал другого блока, или выход, виртуальный сигнал с которого может быть подан на вход другого блока. Наконец, блоки могут иметь и вход, и выход одновременно. Взаимодействие между блоками отображается т.н. линиями связи, указывающими направление передачи воздействий (сигналов) от одного блока к другому. Взаимодействие между блоками моделируется сигналами – функциями времени, передаваемыми между блоками по линиям связи. Сигналы в модели могут быть измерены с помощью виртуальных измерительных устройств или рассмотрены и изучены с помощью виртуального осциллографа. Внешне виртуальные блоки *VisSim* с некоторой степенью условности воспринимаются исследователем так же, как реальные устройства. Например, генераторы вырабатывают сигналы, блоки-преобразователи реагируют на входные сигналы в определенном смысле точно так же, как реальные устройства на реальные воздействия, индикаторы показывают величины сигналов.

Принцип построения модели в *VisSim*'е состоит в вынесении на рабочее пространство моделей реальных элементов (блоков) и соединении их в соответствии с заранее составленной структурно-алгоритмической схемой моделируемой системы. Такое построение модели из виртуальных блоков очень похоже, с известной степенью условности, на построение реальной системы из настоящих блоков (генерато-

ров, осциллографов, и других устройств) в производственных условиях или на лабораторном стенде.

1.4. Основные блоки VisSim

Блоки *VisSim*'а можно условно разделить на три основных категории и одну дополнительную:

- Блоки, имеющие только выход: генераторы.
- Блоки, имеющие вход и выход: преобразователи.
- Блоки, имеющие только вход: индикаторы.
 - Осциллограф
 - Цифровой индикатор
- Блоки без входов и выходов: надписи, комментарии и др.

Важным компонентом модели является *соединительная линия* – виртуальный аналог физического соединения элементов, передающего воздействия от одного элемента к другому. Соединительные линии в *VisSim*'е однонаправленные, передают сигналы с выхода одного блока к входу другого. Поэтому при построении модели следует так разделять реальную систему на функциональные блоки, чтобы последующий блок практически не влиял на функционирование предыдущего. Например, выходное электрическое сопротивление предыдущего блока должно быть значительно меньше входного сопротивления последующего блока.

Входные и выходные сигналы могут быть как одиночными функциями времени, так и набором таких функций. В последнем случае сигнал называется векторным, как и соответствующий вход или выход блока.

1.4.1. Генераторы. Генераторы это блоки, имеющие только выход. Генераторы вырабатывают изменяющиеся во времени или постоянные сигналы.

Примерами таких блоков в *VisSim* являются блоки (рис.1.3):

- *step* (ступенька) – генератор ступенчатой единичной функции $\mathbf{1_0(t)}$;
- *ramp* (спуск, подъем) – генератор линейно растущего сигнала $\mathbf{t \cdot 1_0(t)}$;
- *sinusoid* – генератор синусоидального сигнала $\mathbf{X_m \sin(\omega t + \phi)}$;

- *const* – генератор постоянного сигнала, величина которого не меняется в процессе работы модели;
- *slider* (скользящий контакт, ползунок) – генератор постоянного сигнала, величину которого можно менять в процессе работы модели.

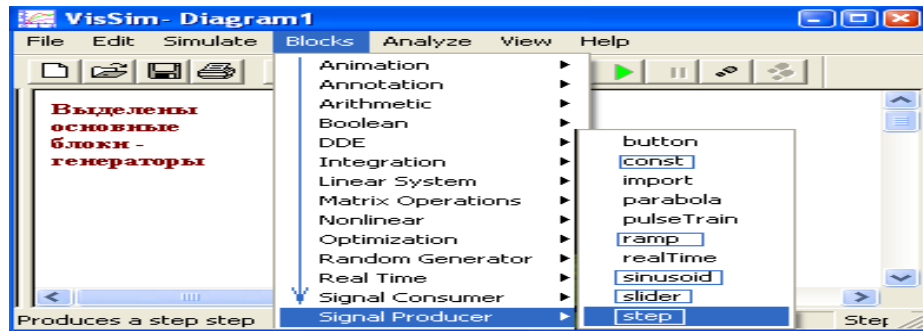


Рис.1.3. Важные блоки-генераторы программы VisSim

Для помещения блока на рабочее пространство следует щелкнуть по пункту меню *Blocks*, перейти на пункт *Signal Producer*, затем щелкнуть по названию требуемого генератора, перевести курсор в нужное место рабочего пространства и щелкнуть левой кнопкой мыши

1.4.2. Преобразователи. Преобразователи – это блоки, имеющие входы и выходы. Блоки-преобразователи способны воспринимать воздействия от других блоков, преобразовывать их в соответствии с определенными уравнениями или правилами и выдавать преобразованный сигнал (отклик, реакцию блока) на выход.

Важнейшие блоки для моделирования линейных систем:

- блок *transferFunction* – передаточная функция. Этот блок позволяет создавать модели как простых, так и очень сложных элементов линейных систем и систем в целом (рис 1.4);
- *integrator* – блок интегратора, осуществляющий интегрирование входного сигнала по времени и являющийся фундаментальным кирпичиком любой модели линейной системы;
- *summingJunction* – сумматор двух и более сигналов, его выходной сигнал равен сумме входных.
- *gain* – усилитель.

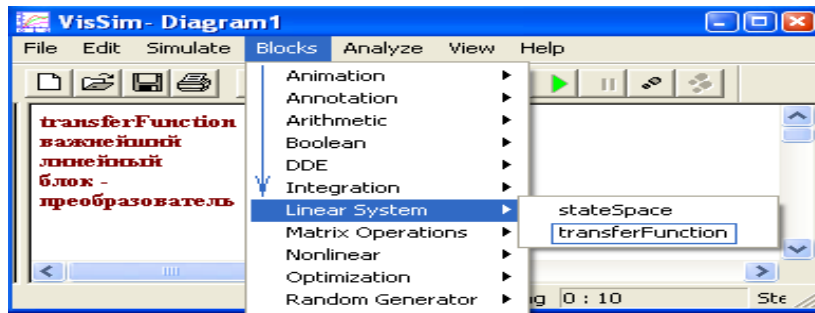


Рис. 1.4. Меню для вызова блока передаточная функция (transferFunction)

Сумматор и усилитель вызываются путем выбора: Blocks → Arithmetic → *summingJunction* или *gain* (усилитель).

1.4.3. Индикаторы. Индикаторы - это блоки, имеющие только вход. Индикаторы программы VisSim предназначены для отображения сигналов в форме удобной и привычной для исследователя.

Важнейшими индикаторами являются блоки (рис.1.5.):

- осциллограф – plot;
- цифровой индикатор – display.

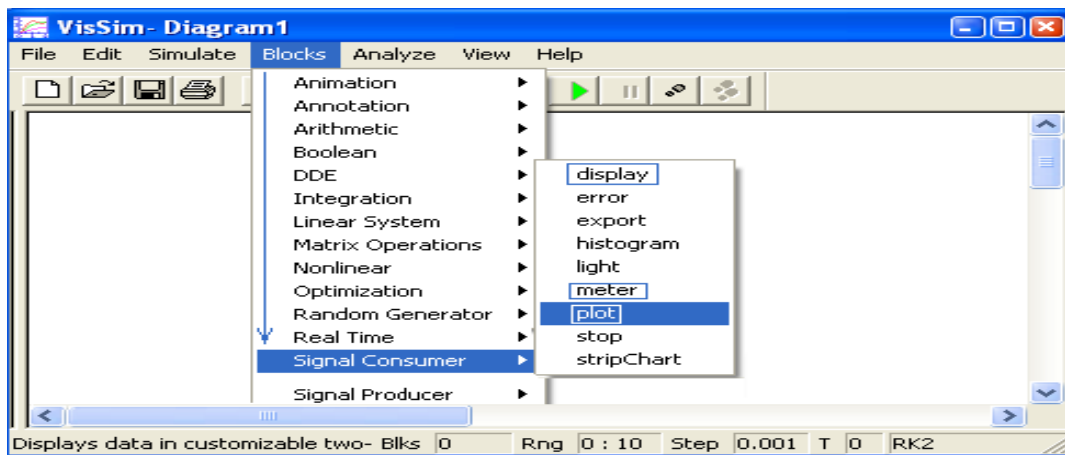


Рис.1.5. Меню для вызова блоков plot (осциллограф), display (цифровой индикатор) и meter (стрелочный прибор)

Осциллограф предназначен для графического представления в течение некоторого временного интервала зависимости мгновенной величины исследуемого сигнала от времени.



Рис. 1.6. Внешний вид осциллографа C1-157

Основа осциллографа – электронная лучевая трубка ЭЛТ. Она имеет экран, на котором луч электронной пушки ЭЛТ высвечивает маленькое пятно. Ниже экрана ЭЛТ расположены входные разъемы, куда подаются исследуемые сигналы. Трубка имеет отклоняющие луч системы, одна из которых, горизонтально-отклоняющая, равномерно перемещает луч, а, следовательно, и пятно, по экрану слева направо. Поэтому в течение времени развертки положение пятна на экране по горизонтальной оси пропорционально времени. Это способ представить, развернуть время в пространстве.

На другую, отклоняющую луч по вертикали систему ЭЛТ, подается исследуемый, меняющийся во времени сигнал. Отклоняющая система ЭЛТ устроена так, что отклонение луча по вертикали пропорционально мгновенному значению исследуемого сигнала.

Таким образом, луч, а, следовательно, и пятно на экране, участвуют одновременно в двух движениях: равномерном по горизонтали и, в соответствии с изменением величины сигнала во времени, по вертикали. В результате, на экране получается изображение зависимости сигнала от времени. Продолжительность временного отрезка, в течение которого наблюдается сигнал, называется временем развертки.

Осциллографы позволяют наблюдать периодические сигналы, в этом случае используется периодическая развертка, частота которой подбирается в целое число раз меньшей, чем частота исследуемого сигнала. При наблюдении непериодических сигналов луч пробегает по экрану слева направо один раз, а трубка выбирается с длительным послесвечением люминофора.

Виртуальный осциллограф VisSim'a представляет собой окно, похожее на экран осциллографа, в котором изображается зависимость наблюдаемых сигналов от

времени (рис. 1.7). На боковой стороне осциллографа помещены условные изображения входов, к которым могут быть подключены выходы других блоков диаграммы для наблюдения поведения их сигналов в зависимости от времени.

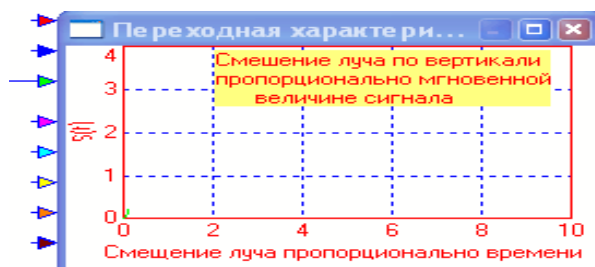


Рис. 1.7. Развертка на экране зависимости величины сигнала от времени

Цифровой индикатор VisSim'a display – выводит, показывает в цифровом виде значение сигнала на выходе того блока, к которому он подключен. Этот прибор используется для измерения постоянных величин.

Надписи – это блоки без входов и выходов.

1.4.4. Надписи и комментарии. Эти блоки позволяют создавать на рабочем пространстве диаграммы *VisSim* текстовые области, которые помогают понять смысл диаграммы и содержат сведения о том, кто, когда и какую диаграмму создал. Основной блок: *label* – надпись.

1.5. Принципы управления моделью и получения результатов моделирования

Параметры некоторых сигналов и блоков исследователь может изменять в процессе работы модели, другие параметры можно изменить, остановив процесс работы модели. Продолжительность работы модели можно задавать до ее запуска, можно и прерывать работу модели по желанию исследователя.

1.6. Понятие о принципах функционирования программы *VisSim*

После того, как модель построена, когда на рабочее пространство вынесены и соединены в нужном порядке блоки, составляющие систему, генераторы сигналов и индикаторы, а также введены параметры элементов модели, может быть запущен

процесс ее функционирования. Для этого следует щелкнуть по кнопке с зеленым треугольником  "Пуск" (рис. 1.1).

Получив эту команду, программа начинает анализировать то, как соединены блоки, на основе этого анализа составляет дифференциально-алгебраические уравнения, описывающие модель и решает их. Полученные результаты, как функции модельного времени, периодически и очень часто, придаются значениям входных и выходных сигналов блоков.

Дифференциально-алгебраические уравнения математически описывают т.н. динамические объекты, объекты очень широкого класса, обладающие инерционностью и рядом других свойств. И поскольку программа *VisSim* способна решать такие уравнения, то в ней можно моделировать системы и объекты очень широкого диапазона сложности. Решение уравнений проводится по шагам – дается малое приращение времени, вычисляются, с учетом начальных условий, значения сигналов на выходах и входах всех блоков, затем вновь дается малое приращение времени, проводятся вычисления и т.д. Малая величина шага интегрирования позволяет исследователю воспринимать сигналы как непрерывные. Выходные сигналы любого блока при желании можно наблюдать на экране виртуального осциллографа или измерять виртуальным цифровым индикатором. В результате решения можно получить зависимости выходных сигналов от времени.

Таким образом, работа по моделированию систем в программе *VisSim* для исследователя похожа на работу на реальном стенде. Программа позволяет более глубоко проанализировать полученные результаты и оптимизировать модель. Например, *VisSim* предоставляет возможность быстрого построения частотных характеристик фрагментов модели и всей системы.

2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 1.

2.1 Содержание работы

1. Выяснить порядок запуска используемого программного пакета *VisSim*.
2. Выявить: а) назначение программы, б) основные этапы работы с программой.

2.2. Помещение на рабочее пространство и редактирование надписей

2.2.1. Задание шрифта. Для обеспечения возможности помещения на рабочем пространстве надписей на русском языке установить - Кириллицу: выбрать в меню View (Вид) → Fonts (Шрифты). Появляется окно диалога, в котором полезно установить шрифт *MS Sans Serif*, а его размер сделать равным 8. Удостовериться, что набор символов кириллический и закрыть окно, щелкнув по кнопке ОК.

Примечание. В принципе можно установить и другие шрифты, но тогда при новом открытии сохраненной диаграммы, надписи будут выполнены нечитаемым шрифтом, который придется каждый раз менять на кириллицу.

Создать надпись " Привет, Студент! Hi, Student!": Для этого в меню выбрать Blocks (Блоки) → Annotation (Пояснения) → Label (Надпись), щелкнув левой кнопкой мыши по последнему пункту. Переместить курсор, с "прикрепившимся" к нему пунктирным прямоугольником, в нужное место рабочего пространства и щелчком левой кнопки мыши зафиксировать положение блока надписи. На рабочем пространстве появится надпись label. При необходимости надпись, как и любой другой блок можно перемещать по рабочему пространству, схватывая левой кнопкой и отпуская на новом месте.

Щелкнуть правой кнопкой мыши (или дважды левой) по надписи label на рабочем столе. В появившемся окне ввести требуемую надпись. Для перехода на новую строку следует, удерживая нажатой клавишу Ctrl (Control - Управление), нажать клавишу Enter (Ввод). При необходимости установить шрифт надписи: щелкнуть правой кнопкой на надписи → Font → Кириллица и MS Sans Serif. Щелкнуть по кнопке ОК. По желанию установить другой размер и вид шрифта, цвет заднего плана надписи. Поэкспериментировать со шрифтами и цветами. Вернуть исходные значения характеристик шрифта: View (Вид) → Fonts (Шрифты), MS Sans Serif, кириллица, размер 8. Текст надписи можно редактировать неоднократно в любое время.

2.2.3. Создание сопроводительной надписи диаграммы. Создать надпись, в которой указать сведения о диаграмме и о том, кто, когда и где ее выполнил.

2.3. Создание, настройка и испытание простого виртуального лабораторного стенда

Первая модель лабораторного стенда будет состоять всего лишь из виртуального генератора синусоидального напряжения и подключенного к нему виртуального осциллографа, на экране которого будет воспроизводиться, и наблюдаться сигнал генератора. Это позволит частично убедиться в работоспособности программы VisSim, т.е. в том, что виртуальные приборы действительно воспринимаются исследователем и работают так же, как и их реальные аналоги.

Законченная диаграмма будет иметь примерно вот такой вид:

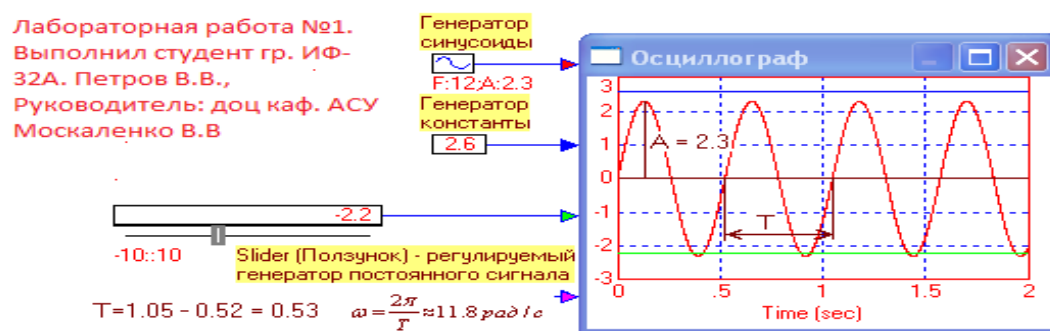


Рис 1.9. Первая диаграмма в законченном виде. Она содержит три генератора, осциллограф и четыре надписи

2.3.1. Помещение блоков на рабочее пространство VisSim

Поместить на рабочий стол генератор синусоиды (sinusoid) и осциллограф (plot). Для этого в меню программы выбрать Blocks (Блоки) → Signal Producer (Генераторы сигналов) → *sinusoid* (генератор синусоидального сигнала), поместить генератор в нужное место рабочего стола, в верхней его левой части, а затем выбрать Blocks → Signal Consumer (Индикаторы сигналов) → *plot* (осциллограф, график) и поместить осциллограф правее генератора (рис 1.10). Отметим, что в начале, по умолчанию частота синусоидального сигнала генератора равна $F = 1$ рад/сек, а амплитуда $A = 1$ условных единиц. Далее частоту, амплитуду и начальную фазу генератора можно будет изменить.

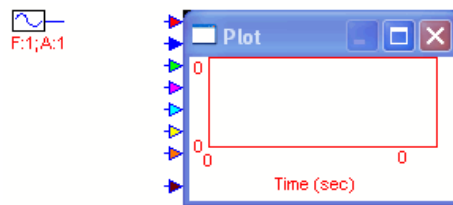


Рис. 1.10. Предварительное размещение блоков генератора и осциллографа на рабочем пространстве

2.3.2. Подключение генератора к осциллографу. Подключить генератор синусоиды к осциллографу: нажав у выхода генератора, когда курсор примет вид вертикальной стрелки, и удерживая левую кнопку мыши, подтянуть соединительную линию к входу осциллографа и отпустить кнопку. Повторим, что линия создается, если в момент нажатия кнопки мыши курсор установлен вблизи выхода блока так, что приобретает вид вертикальной стрелки. Для разрыва соединения нужно левой кнопкой мыши ухватить входное соединение, отнести в сторону и бросить.

2.3.3. Приведение модели в действие. Запустить программу на выполнение: щелчком по кнопке  с зеленым треугольником или выбрать в меню *Simulate* → *Go* (Моделировать - Пуск). На осциллографе появится график начальной части синусоиды, а оси автоматически приобретут градуировку:

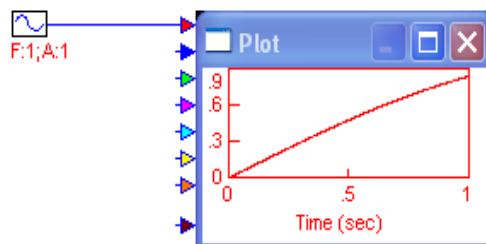


Рис.1.10. Простейший виртуальный лабораторный стенд

За время моделирования - одну секунду программе удастся воспроизвести, а наблюдателю затем увидеть на осциллографе только начальную часть синусоиды - выходного сигнала генератора, т.к. период его синусоиды равен $T = 2\pi/F = 2\pi/1 = 6.28$ сек.

2.3.4. Сохранение исходной диаграммы. По мере создания модели полезно сохранять промежуточные результаты, с тем, чтобы в случае ошибок или зависания программы, что впрочем, случается чрезвычайно редко, не выполнять всю работу заново, начиная с нуля. В меню File (Файл) программы VisSim выбрать Save As (Сохранить как), в появившемся диалоговом окне указать путь к личной папке, создать в ней папку TAU_Lab1, войти в нее, задать содержательное название файла диаграммы, например Lab1_1_Gen_sin.vsm и сохранить. Посмотреть в папку с названием TAU_Lab1 и убедиться, что сохраненный файл находится именно в ней.

2.3.5. Управление виртуальным генератором. Перед тем, как вносить изменения в модель и диаграмму в целом, целесообразно сохранить ее в папке первой лабораторной работы под новым именем Lab1_2_Gen_sin.vsm. Теперь изменения будут сохраняться в модели с этим названием, а предыдущая диаграмма, Lab1_1_Gen_sin.vsm останется неизменной и всегда может быть при необходимости открыта из личной папки. В настоящем, реальном генераторе на физическом стенде исследователь может менять амплитуду, частоту и начальную фазу синусоиды с помощью кнопок и ручек управления, расположенных на лицевой панели. Это же позволяет сделать и виртуальный генератор VisSim'a, но в специальном диалоговом окне. Дважды левой (или один раз правой) кнопкой мыши щелкнуть по блоку генератора синусоиды (sinusoid), в появившемся окне

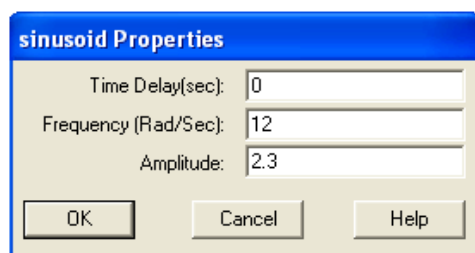


Рис.1.11. Задание параметров выходного сигнала генератора - установить частоту (Frequency) 12 рад/сек, амплитуду (Amplitude) 2.3, начальную задержку синусоиды (Delay)

В качестве десятичного знака следует ставить *точку*, а не запятую. Щелкнуть по кнопке ОК. Запустить модель кнопкой "Пуск". Убедиться, что частота синусоиды, воспроизведенной на осциллографе, увеличилась.

2.3.6. Управление виртуальным осциллографом

Поменять настройки осциллографа (plot'a). Это улучшит восприятие графика (рис.1.12). Для этого

- расширить окно осциллографа до размеров примерно 12x10 см, ухватившись за правую его сторону, а потом за нижнюю. Переместить генератор так, чтобы линия связи не имела лишних изгибов;

- правой кнопкой мыши (или дважды левой) щелкнуть на plot'e (осциллографе), в появившемся окне (рис.1.12) на вкладке Options (Параметры) поставить галочку у Grid Lines (Сетка координат). Перейти на вкладку Labels (Надписи) (рис.1.12) и содержательно подписать заголовок (Title). Эта надпись появится в верхней части окна осциллографа;

- нажать кнопку ОК.

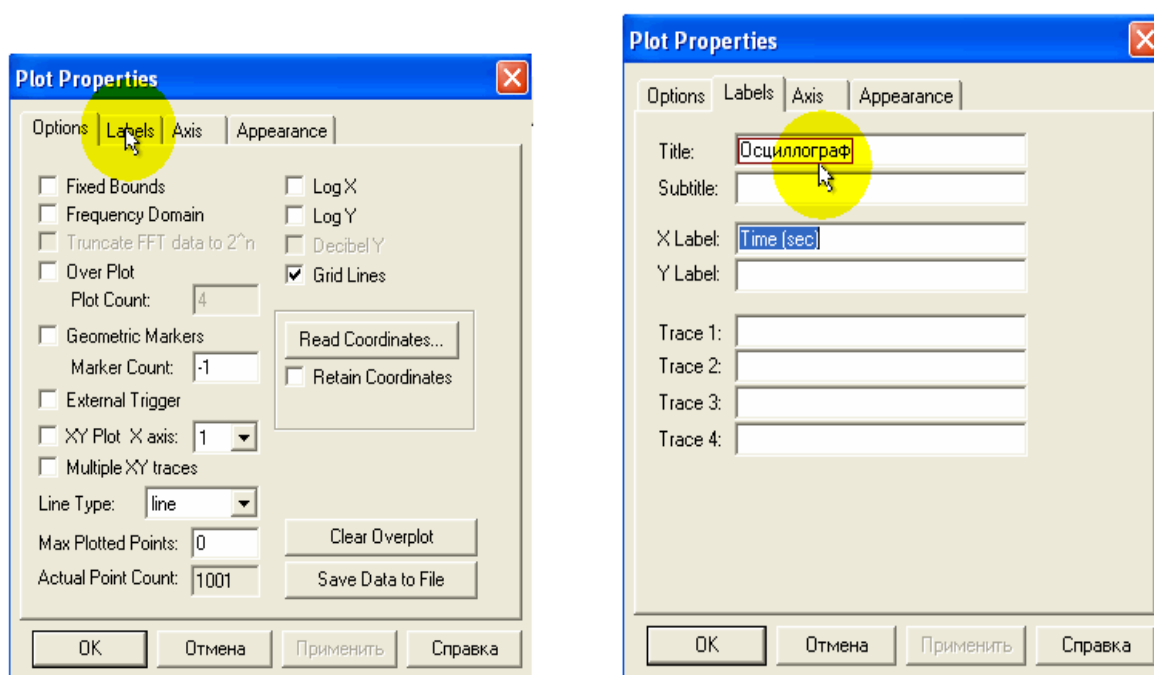


Рис.1.12. Настройка осциллографа. Выведение линий координатной сетки на экран и задание названия окна осциллографа

2.3.7. Первая модель. Построенная модель должна выглядеть следующим образом:

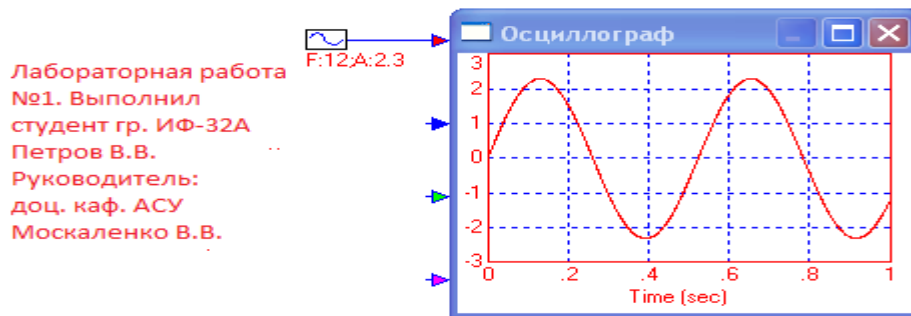


Рис. 1.13. Оформленная диаграмма первого простого лабораторного стенда

Метки под блоком генератора указывают, что частота его сигнала равна 12 рад/сек, а амплитуда 2.3 условных единиц, например вольт. Если меток под блоком не видно, то нужно поставить галочку View (Вид) → Block Labels (Метки блока)

Первый простой лабораторный стенд создан. Сохранить сделанные изменения: выбрать File - Save. Убедиться, что в личной папке имеется файл с названием Lab1_2_Gen_sin.vsm.

2.4. Проверка работоспособности некоторых блоков

2.4.1. Количественная проверка работоспособности генераторов и осциллографа

Сохранить предыдущую диаграмму под названием Lab1_3_Gen_sin.vsm для того, чтобы изменения вносить уже в новую диаграмму.

Из сравнения рис. 1.10 и рис.1.13. видно, что увеличение частоты виртуального генератора в окне рис.1.11 приводит к соответствующему изменению изображения на экране осциллографа. Остается убедиться в том, что частота синусоидального сигнала, изображенного на рис. 1.13 действительно численно равна той, которая была ранее установлена в диалоговом окне генератора рис.1.11. Размер рис.1.13 позволят определить период не очень точно, как видно, он примерно равен 0.52 сек. Следовательно, частота сигнала, изображенного на осциллографе, приближенно равна $\omega = 2\pi/0.52 = 12.08$ рад/сек.

Таким образом, точность работы модели, по крайней мере, не хуже, чем 1 %. На самом деле точность, конечно, значительно выше, поскольку и результаты мож-

но прочесть значительно точнее. Для повышения точности считывания величины периода можно развернуть окно осциллографа на весь экран. О других способах повышения точности отсчетов см. ниже п. 2.6.1.

Провести исследование и построить зависимость частоты сигнала, определенной по экрану осциллографа от величины частоты сигнала генератора, задаваемой в его диалоговом окне.

Результаты измерений занести в таблицу, форму которой создать самостоятельно.

Построить и привести в отчете график этой зависимости, оценить среднеквадратическое отклонение результатов от прямой теоретической линии

Сделать выводы о точности моделирования синусоиды в *VisSim'e* и точности считывания результатов с экрана осциллографа, а также о том, выполняют ли свои функции осциллограф и генератор.

Примечание. Предложенное исследование скорее ставит вопрос о возможности "экспериментальной" проверки качества моделирования элементов реальных систем с помощью виртуальных устройств и приборов, нежели дает всестороннее подтверждение состоятельности, работоспособности блоков. Тем не менее, общее представление о такой процедуре оно создает. Поэтому, в дальнейшем можно говорить, например, о проведении виртуальных измерений сигналов.

2.4.2. Исследование генераторов постоянного сигнала

Добавить на рабочее пространство блоки: генератор постоянного сигнала *constant* (константа) и регулируемый генератор постоянного сигнала *slider* (ползунок) (*Blocks* → *Signal Producer* → ...) и подключить их к осциллографу.

Эти блоки отличаются тем, что выходной сигнал первого нельзя изменять, когда модель запущена в работу, а второго - можно, перемещая движок с помощью мыши. Т.о. "ползунок" позволяет исследователю вмешиваться в ход работы модели в процессе ее функционирования. До запуска модели можно менять величины выходных сигналов у обоих генераторов.

Запустить модель на счет. Поэкспериментировать, изменяя значения выходного сигнала генератора константы *constant*, величину и пределы изменения выходного сигнала регулируемого генератора постоянного сигнала слайдера ("ползунка"), и наблюдая за изменением показаний осциллографа при повторных запусках процесса моделирования. Для изменения пределов выходного сигнала слайдера следует щелкнуть по нему дважды левой (или один раз правой) кнопкой мыши и в появившемся окне ввести значения верхней границы диапазона *Upper Bound* и нижней *Lower Bound*. Эти значения не обязательно должны быть равными по величине. Уменьшение диапазона выходного сигнала "ползунка" упрощает точную установку малых значений его выходного сигнала.

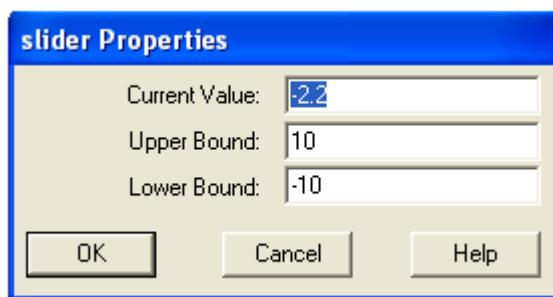


Рис. 1.14. Изменение верхней и нижней границ диапазона выходного сигнала слайдера ("ползунка")

Провести измерения и построить зависимости показаний осциллографа от величин выходных значений генераторов постоянных сигналов, устанавливаемых в их диалоговых окнах. Проанализировать графики и сделать выводы.

2.4.3. Первая диаграмма. Ввести надписи для блоков генераторов.

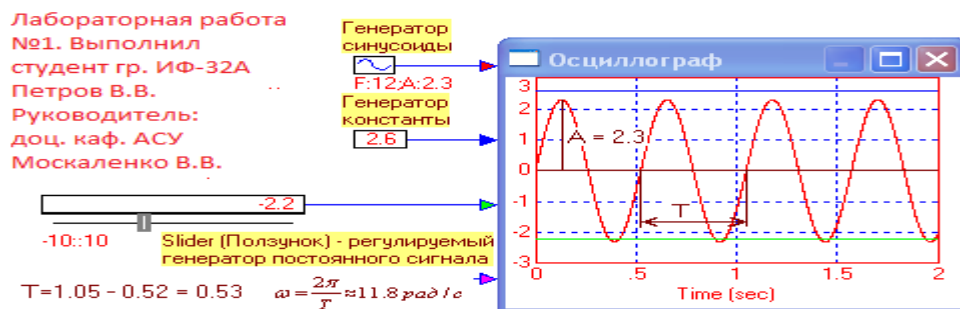


Рис. 1.15. Первая диаграмма

Как видно (рис.1.15), осциллограф действительно отображает выходные сигналы генераторов с точностью, не хуже чем в 2 - 3%. Т.о., можно утверждать, что виртуальный лабораторный стенд, построенный в программе VisSim, действует и работает правильно. Сохранить диаграмму Lab1_3_Gen_sin.vsm: File - Save As.

Сделать снимок экрана, подобный рис. 2.15 и сохранить его с содержательным названием, например, Lab1_3_Gen_sin.gif. в формате gif в личной папке. Снимок экрана необходим для распечатки диаграммы на бумаге, с тем, чтобы приложить его к отчету по работе. Чтобы распечатка получилась четкой, следует располагать блоки по возможности плотнее.

2.4.4. Создание новой диаграммы. Знакомство с цифровым индикатором и стрелочным прибором.

Открыть новую диаграмму: *File - Open* (Открыть) или щелкнуть по кнопке на панели инструментов VisSim. Если предыдущая диаграмма была сохранена, то появится новое пустое рабочее пространство, в противном случае программа VisSim может спросить следует ли сохранить предыдущую диаграмму. Ее нужно сохранить в личной папке и открыть новую диаграмму.

Поместить на рабочее пространство стрелочный прибор *meter* и цифровой индикатор *display*: Blocks → Signal Consumer → meter (или display). Вынести регулируемый генератор постоянного сигнала (Blocks → Signal Producer → slider) и подключить стрелочный прибор и цифровой индикатор к выходу этого генератора (рис. 1.16).

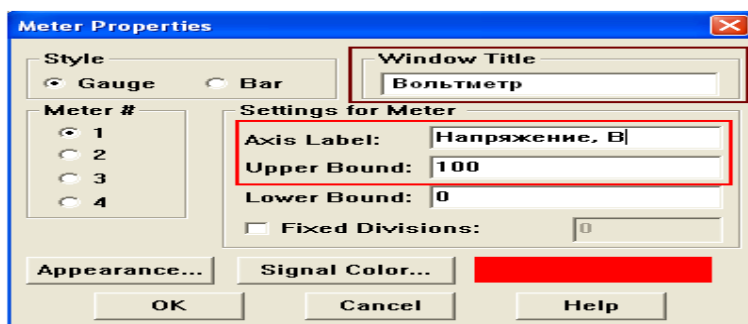


Рис. 1.16. Увеличение предела измерений стрелочного прибора и обозначение единиц измерений

Изменить предел измерений стрелочного прибора, так чтобы он мог измерить выходной сигнал слайдера, величиной 32 единицы: Upper Bound (Верхний предел) установить равным 100. Для этого, дважды щелкнуть по блоку "ползунка" (slider). Подписать название единиц измерения Axis Label (значения шкалы измерений): Напряжение, В, а также название стрелочного прибора в поле ввода Window Title (Заголовок окна): Вольтметр. Растянуть окно стрелочного прибора для повышения точности чтения его показаний

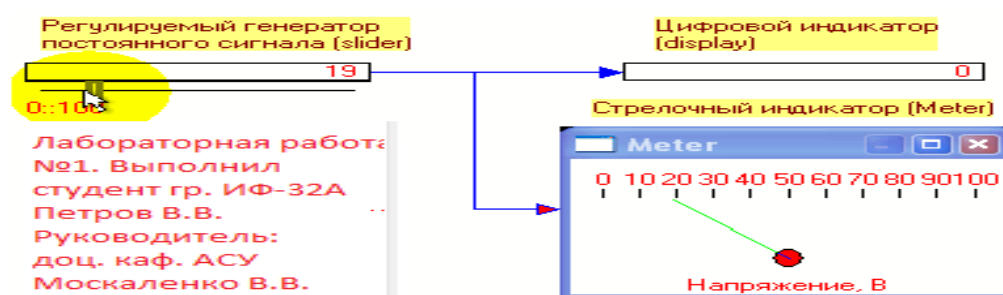


Рис.1.17. Вторая диаграмма

Индикаторы действительно показывают величину выходного сигнала регулируемого генератора постоянного напряжения. Если присмотреться, то видно, что стрелочный прибор реагирует на изменения выходного сигнала генератора сразу, по мере смещения ползунка мышкой, в то время как цифровой индикатор более инерционен. Запустить на счет. Изменять значение выходного сигнала генератора, каждый раз запуская моделирование. Оценить точность чтения показаний цифровым индикатором и стрелочным прибором.

Сохранить диаграмму, назвав содержательно файл, например, Lab1_Indic.vsm. Сделать снимок экрана и сохранить его в файле Lab1_Indic.gif с расширением gif.

По возможности распечатать снимок экрана и приложить его к отчету. Или начертить диаграмму в отчете.

2.5. Изменение продолжительности функционирования модели и шага интегрирования

Модель в VisSim'e может функционировать как в реальном времени, так и просчитываться ускоренно.

Точность и даже правильность модели, ее соответствие реальной системе зависят и от величины шага интегрирования. При достаточно малом шаге модель, построенная в соответствии с функциональной схемой реальной системы, работает правильно. Если шаг необоснованно завысить, то модель будет просчитываться быстро, но даст неточные и даже не правильные результаты. Слишком малый шаг приводит к чрезмерному увеличению продолжительности расчетов.

Изменить *время функционирования* модели: Simulate (Моделировать) → Simulation Properties (Свойства моделирования) → *Range End* (Время конца моделирования) рис.1.18. Установить время конца моделирования равным 2 сек. Нажать ОК. Щелкнуть по кнопке с зеленым треугольником "Пуск". Убедиться, что длительность развертки осциллографа стала равной 2 сек.

Обратим внимание на возможность установки галочки в пункте рис. 2.18 *Run in Real Time* (Запуск в реальном времени), в этом случае модельная секунда будет длиться столько же, сколько и реальная.

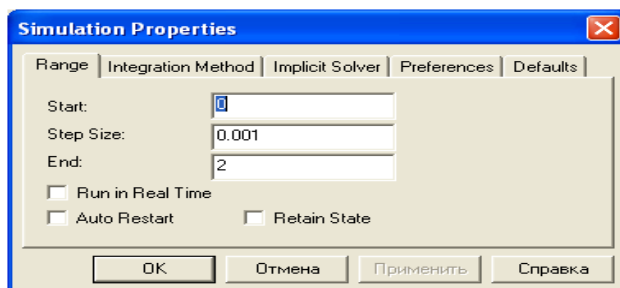


Рис. 1.18. Задание шага интегрирования *Step Size* и времени конца *End* работы

Зачастую момент начала моделирования, т.е. время старта *Start* имеет смысл оставлять равным нулю, тогда время конца моделирования *End* совпадает с полным временем моделирования. Установка галочки в пункте *Run in real Time* (Запуск в реальном времени) поддерживает модельное время равным реальному.

Изменить величину шага интегрирования. Выбрать Simulate → Simulation Properties и установить величину шага *Step Size* (Величина шага интегрирования) равной 0.001 (рис. 1.18). Отметим, что чем меньше шаг интегрирования, тем точнее

будут получаться результаты, но тем медленнее компьютер будет вычислять значения сигналов блоков модели. Поэтому целесообразно уменьшать шаг интегрирования только до тех пор, пока дальнейшее уменьшение не будет приводить к заметному изменению результатов, например вида кривой на осциллографе. Щелкнуть ОК.

Величина шага интегрирования и продолжительность моделирования - важные параметры, которые нужно уметь правильно подбирать, ориентируясь на характерные и наименьшие постоянные времени элементов модели и модели в целом.

Для первой диаграммы, рис. 1.15, последовательно задать значения шага интегрирования, равными 0.1; 0.01; 0.001; 0.0001 сек. Сравнить диаграммы и сделать вывод об оптимальном значении шага интегрирования в данном случае.

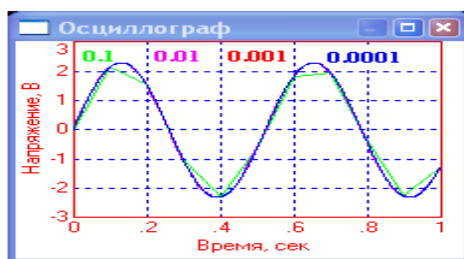


Рис. 1.19 Последовательное десятикратное уменьшение шага интегрирования

Поскольку период синусоиды составляет примерно 0.5 сек, то при шаге интегрирования в 0.1 сек график на периоде проводится только через 7 точек, что явно не достаточно. Значение 0.01 сек. значительно улучшает представление графика, при уменьшении шага от 0.001 до 0.0001 график практически не изменяется. Оптимальным значением шага в данном случае является 0.001 сек.

2.6. Полезные приёмы и настройки

2.6.1. Управление осциллографом и некоторые его настройки

Виртуальный осциллограф VisSim'a способен выполнять много разных функций, решать различные задачи. Прежде всего, это многолучевой осциллограф с автоматической настройкой. Размер окна осциллографа целесообразно устанавливать примерно 12x10 см с тем, чтобы он вместе с моделью не выходил за рамки одного экрана. Это делает и диаграмму обозримой, и точность чтения результатов с осциллографа довольно высокой.

Свойства осциллографа. Вкладка Параметры (Options). Для изменения настроек, заложенных в осциллограф по умолчанию, как исходные, следует щелкнуть правой (или дважды быстро левой) клавишей мыши по окну осциллографа на рабочем пространстве. Появится диалоговое окно, открытое на вкладке Options (Параметры). На рис.1.20 выделены полезные элементы управления осциллографом. Прежде всего, это возможность создания сетки координат Grid Lines.

При начальном освоении VisSim'a здесь достаточно проставлять галочку создания сетки координат Grid Lines (Линии сетки) и щелкать по клавише ОК.

Значения координат точек можно прочесть значительно точнее, щелкнув по кнопке Read Coordinates (Читать координаты) (рис. 1.21).

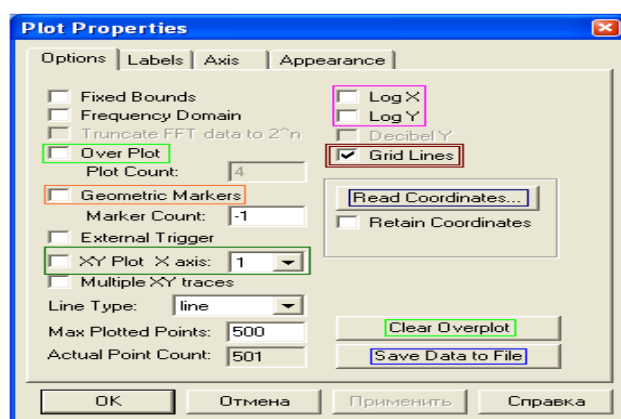


Рис. 1.20. Вкладка параметров свойств осциллографа

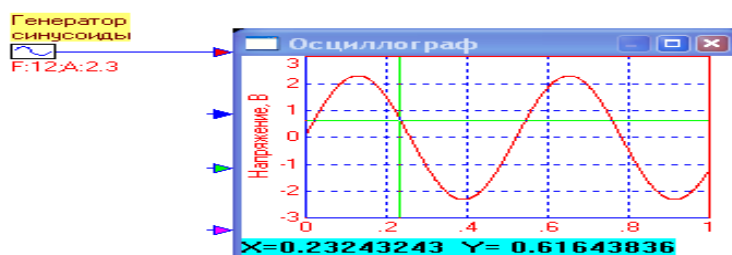


Рис.1.21. Чтение значений координат точек

Появившееся перекрестие наводят на точку, координаты которой определяют, и щелкают левой клавишей для фиксации перекрестия. Внизу окна осциллографа выводятся значения координат точки. Щелчок по окну осциллографа перекрестие убирает. Кроме того, точность чтения повышается при развертке экрана осциллографа на все рабочее пространство VisSim'a.

Еще один способ повышения точности чтения - *увеличение фрагмента экрана* осциллографа на весь его экран. Для этого следует, нажав и удерживая клавишу *Ctrl*, выделить левой кнопкой мыши фрагмент экрана и отпустить кнопку, а потом клавишу *Ctrl*. Это можно проделывать последовательно неоднократно. Для возвращения к исходному масштабу следует, удерживая клавишу *Ctrl*, щелкнуть по окну осциллографа правой кнопкой.

На экран осциллографа можно *поочередно вывести несколько графиков* (см. для примера рис.1.19). Для этого следует поставить галочку в пункте *Over Plot* (Поверх графика) (см. рис. 1.20), щелкнуть *OK*, запустить модель, изменить параметр модели, перенести линию соединения с одного входа осциллографа на другой и вновь запустить модель. Для очистки экрана осциллографа следует щелкнуть по кнопке *Clear Overplot* (рис. 1.20).

Возможности перевода градуировки осей из натурального в логарифмический масштаб, проставления кривой не точками, а другими символами, возможность подачи сигналов не только на вертикальную, но и на горизонтальную развертку, а также сохранения значений координат точек кривой в текстовом файле.

Свойства осциллографа. Вкладка Axis (Оси). При окончательном оформлении диаграммы бывает полезно уточнить значения градуировки осей, отменив автоматическую их разметку и перейдя в режим ручного управления. Для этого, на вкладке *Axis (Оси)* устанавливаются значения верхних (*Upper*) и нижних (*Lower*) границ (*Bound*) развертки по соответствующим осям. Количество делений при выбранном пункте *Fixed Tick Count* (Фиксированное число делений), например, по вертикальной оси *Y: Y Divisions*, следует выбирать таким, чтобы результат деления диапазона на эту величину был круглым: 0.2; 0.5; 1; 2; 5; 10 и т.п. Это упрощает чтение значений координат точек.

Свойства осциллографа. Вкладка Appearance (Внешний вид). В некоторых случаях, для повышения наглядности, реалистичности внешнего вида окна осциллографа можно изменить в нем цвет надписей (*Foreground*) и цвет заднего плана (*Background*) при установленной галочке *Override default colors* (Переназначение исходных цветов) (рис 1.23, 1.24).

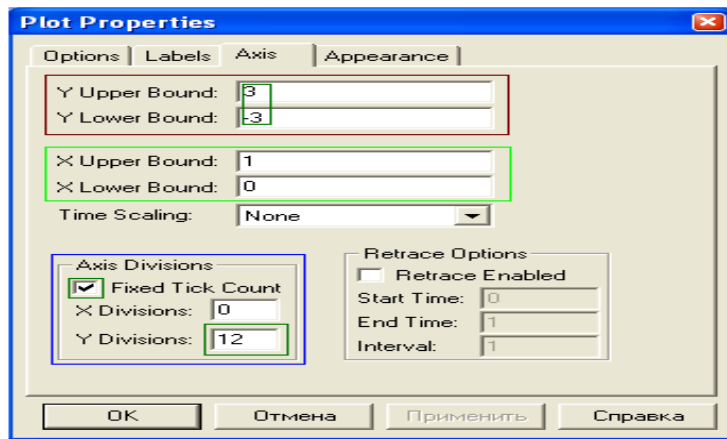


Рис. 1.22. Уточнение разметки осей в ручном режиме

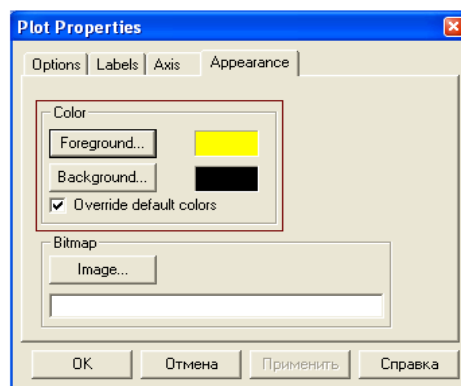


Рис. 1.23. Изменение цветовой гаммы окна осциллографа

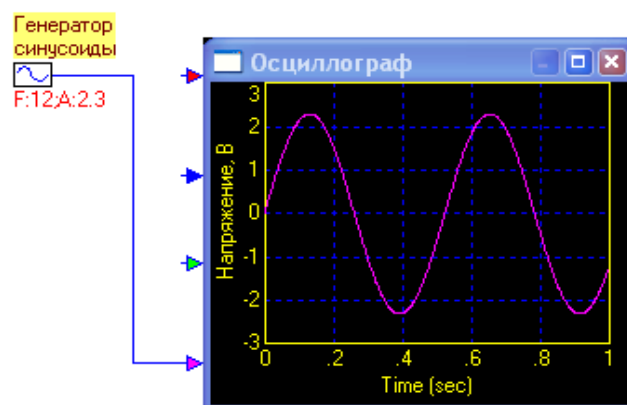


Рис. 1.24. Цветовая гамма окна осциллографа

2.6.2. Копирование и перемещение одного или нескольких блоков

Отметим, что для ускорения работы, блоки, помещенные на рабочем столе, можно копировать и вставлять как в эту же диаграмму, так и в другую диаграмму, открытую в другом экземпляре *VisSim*. Для этого нужно выделить один или не-

сколько блоков, щелкнуть по кнопке Копировать (*Copy*) вверху, на панели инструментов VisSim, а затем там же по кнопке Вставить (*Paste*) и перенести копию блоков (пунктирный прямоугольник) на нужное место и зафиксировать ее щелчком левой клавиши. Выделенные блоки можно перемещать как совокупность, не меняя при этом их взаимного расположения.

2.7. Знакомство со справкой о программе VisSim и примерами диаграмм

В меню *VisSim* выбрать *Help - Contents*. Ознакомиться с оглавлением, просмотреть отдельные разделы.

3. Выводы по проделанной работе и оформление отчёта.

Содержание отчёта:

1. Кратко описать принципы функционирования программного пакета *VisSim*.
2. Описать выполнение работы (п.2.2. - 2.6). Привести распечатки, подтверждающие выполнение всех пунктов экспериментальной части, и текстовые пояснения к ним.

Сделать выводы на основании решения поставленных в работе цели и задач. Нужно отличать выводы от констатации фактов, из которых и следуют выводы. Выводы следует формулировать в технической форме, а не в методической, используя безличную форму изложения. Например, вывод может быть такой: "Блоки VisSim'a генератор синусоиды (*sinusoid*) и осциллограф (*plot*) действительно являются виртуальными аналогами реальных устройств" или, по крайней мере, такой: "Изменяющиеся сигналы целесообразнее исследовать с помощью осциллографа, а постоянные - с помощью цифрового индикатора".

Контрольные вопросы

1. Что такое модель и моделирование?
2. Для чего предназначена программа *VisSim*?
3. Как вынести на рабочее пространство *VisSim*'a генератор синусоиды? Как и какие параметры синусоиды можно изменить?
4. Как и какие настройки осциллографа можно менять?
5. Как изменить количество точек на экране осциллографа?
6. Как практически проверить состоятельность, работоспособность *VisSim*'a?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. Исследование линейных типовых звеньев

Цель работы: изучение временных характеристик типовых динамических звеньев с использованием автоматизированных средств моделирования на ПК. Исследование взаимосвязей между параметрами типовых динамических звеньев и их характеристиками. Идентификация реальных технических устройств – схем на операционных усилителях с типовыми звеньями (т.е. с математическим описанием). Приобретение навыков использования типовых возмущающих воздействий и инструментов частотного анализа для исследования систем.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 2

В ТАУ при моделировании линейных систем применяют так называемые *типовые звенья*, которые приближённо соответствуют элементам реальных систем и точно и просто описываются математически.

Типовое звено - это структурно-математическая модель динамического элемента системы автоматического регулирования (САР) или САР в целом, обладающая определённым ограниченным набором физических свойств, например, способностью к накоплению воздействия или к усилению воздействия и инерционностью.

Типовые звенья позволяют провести структурное моделирование системы управления путём замены функциональных элементов системы их моделями при сохранении связей между элементами. Свойства структурной модели системы исследуются математическими методами, а результаты исследований проецируются на исходную САР, что позволяет судить о ее физических свойствах. Типовые звенья по мере увеличения совокупности свойств, которыми они обладают, и порядка дифференциального уравнения, которым они описываются, разделяют на:

- простейшие (пропорциональное, интегрирующее и дифференцирующее);
- звенья первого порядка (апериодическое, форсирующее, инерционно-дифференцирующее и др.);
- звенья второго порядка (колебательное и апериодическое второго порядка);
- звено третьего порядка (это звено, способное терять устойчивость);

- звено запаздывания.

Перечисленные линейные звенья содержат один вход и один выход. Существует еще одно линейное звено, которое может иметь несколько, больше одного, входов и один выход: сумматор. Сумматор - необходимое звено для построения модели достаточно сложной системы, состоящей из нескольких звеньев. Типовых звеньев всего около полутора десятков, но из них, как из кубиков, можно построить модель линейной системы управления любой сложности. Минимальный набор звеньев, который позволяет построить модель линейной системы любой сложности, в том числе и самих типовых звеньев, состоит всего из трех звеньев: пропорционального, интегратора и сумматора. Однако модель, построенную из этих трёх звеньев, бывает труднее анализировать, чаще удобнее применять кроме них ещё несколько типов звеньев. В более общем классе систем – нелинейных выделяют ещё и нелинейные звенья, как безынерционные, так и инерционные.

Основные характеристики линейных звеньев:

- *передаточная функция* $W(s)$, связывающая изображения выходного $Y(s)$ и входного $X(s)$ сигналов линейного звена;
- *переходная характеристика* $h(t)$ - реакция звена на ступенчатое единичное воздействие $1(t)$;
- *комплексный коэффициент передачи* $W(j\omega)$, связывающий спектры входного $X(j\omega)$ и выходного $Y(j\omega)$ сигналов линейного звена;
- *импульсная или весовая функция* $w(t)$ реакция звена на дельта-функцию Дирака $\delta(t)$.

Передаточная функция. Рассматривается система автоматического управления (САУ), описываемая линейным дифференциальным уравнением вида:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $u(t)$ – входной процесс; $y(t)$ – выходной процесс a_i, b_i , – постоянные коэффициенты; n, m ($n \geq m$) – постоянные числа.

Если ввести обозначение p для оператора дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$, то можно записать (2.1) в операторной форме:

$$\begin{aligned} & (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) y(t) = \\ & = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0) u(t), \end{aligned} \quad (2.2)$$

откуда получается: $\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{B(p)}{A(p)} = W(p)$, где $A(p)$ и $B(p)$ – полиномы из формулы (2.2).

Выражение (2.2) по виду совпадает с определением *передаточной функции (ПФ)* как отношения преобразования по Лапласу выходной переменной к преобразованию по Лапласу входной переменной при нулевых начальных условиях:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = W(s), \quad (2.3)$$

где s – комплексная переменная.

Комплексные числа, являющиеся корнями многочлена $B(s)$, называются *нулями* передаточной функции, а корни многочлена $A(s)$ – *полюсами*.

В русскоязычной литературе аргумент передаточной функции обозначается как p , а в англо-американской как s .

Описание типовых динамических звеньев приведено в табл.1.

Таблица 2.1 – Типовые динамические звенья

	Название звена	Передаточная функция звена
1	Интегрирующее	$W(s) = \frac{K}{s}$
2	Дифференцирующее	$W(s) = Ks$
3	Усилительное (безынерционное)	$W(s) = K$
4	Апериодическое 1-го порядка (инерционное)	$W(s) = \frac{K}{Ts + 1}$
5	Апериодическое 2-го порядка (все корни вещественные)	$W(s) = \frac{K}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}; \quad T_1 \geq 2T_2$
6	Колебательное *	$W(s) = \frac{K}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}; \quad T_1 < 2T_2$
7	Консервативное	$W(s) = \frac{K}{Ts^2 + 1}$
8	Интегрирующее с запаздыванием (реальное интегрирующее)	$W(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$
9	Дифференцирующее с запаздыванием (реальное дифференцирующее)	$W(s) = \frac{Ks}{Ts + 1}$
10	Форсирующее	$W(s) = K(Ts + 1)$
11	Изомомное	$W(s) = \frac{K(Ts + 1)}{s}$

* часто используется описание колебательного звена в виде: $W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}; \quad T = T_2, \quad \xi = \frac{T_1}{2T_2}$.

В программе *Vissim* линейные аperiodическое, колебательное и более сложные типовые звенья выносятся на рабочее поле с помощью блока *transferFunction* (*Blocks – Linear System - transferFunction*) (рис 2.1)

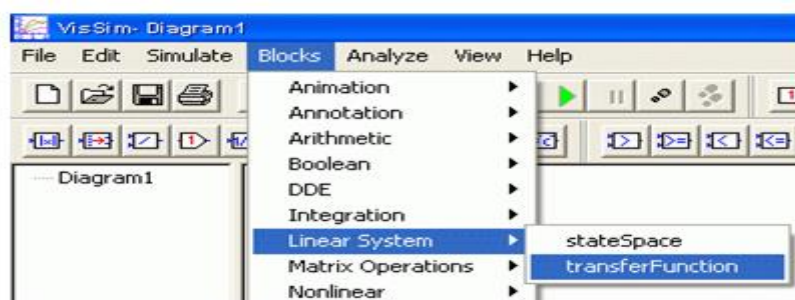


Рис.2.1. Пункт меню Vissim'а для вынесения на рабочее поле блока *transferFunction* (Передающая функция)

Задание параметров звена осуществляется в окне диалога (с помощью двойного щелчка (или однократным правой кнопкой) по блоку). Блок задания параметров представлен на рис.1.2. Внизу показана часть окна диалога для задания параметров линейного звена в блоке *transferFunction*

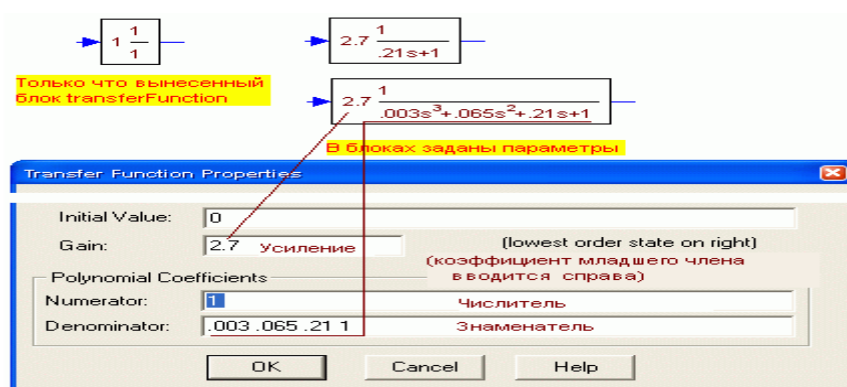


Рис. 2.2. Вид блоков *transferFunction* на рабочем поле Vissim'а

Как видно на рис. 2.2, блок *transferFunction* на рабочем поле Vissim'а формально задается (обозначается) передаточной функцией. Однако работает он не в соответствии с формулой, определяющей с помощью передаточной функции изображение выходного сигнала по изображению входного, а непосредственно решая соответствующее дифференциальное уравнение. Это дифференциальное уравнение

определяется теми же самыми параметрами, что и передаточная функция. Формула передаточной функции в блоке на рабочем поле отображается вместо дифференциального уравнения просто из соображений экономии места на рабочем поле.

Пропорциональное звено выносится на рабочее поле из пункта меню (*Blocks – Arithmetic – gain*), интегратор выносится из пункта меню (*Blocks – Integration - Integrator*), звено запаздывания выносится из меню (*Blocks - Time Delay – timeDelay*).

Временные характеристики динамического звена представляют собой зависимость выходного сигнала системы от времени при подаче на ее вход некоторого типового воздействия. Обычно выполняется анализ выхода системы на *единичный скачок (функция Хевисайда)* и *импульсную функцию (функция Дирака или δ -функция)*.

Единичный скачок $1(t)$ определяется условиями:

$$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ 1 & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

Реакция САУ на единичный скачок называется *переходной функцией* системы и обозначается $h(t)$. При неединичном ступенчатом воздействии $g(t) = N \cdot 1(t)$, где $N = \text{const}$, в соответствии с принципом суперпозиции выходная реакция системы будет

$$y(t) = Nh(t).$$

Импульсная функция $\delta(t)$ определяется условиями:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases}$$

Очевидно: $\delta(t) = 1'(t)$.

Реакция САУ на импульсную функцию называется *импульсной переходной функцией системы* (функцией веса) и обозначается $w(t)$.

Импульсная и переходная функции системы связаны соотношением

$$h(t) = \int_0^t w(\tau) d\tau.$$

Пример виртуального лабораторного стенда, построенного в программе *Vissim*, для определения переходных характеристик звеньев, и осциллограмма пере-

ходной функции колебательного звена представлен на рис.2.3. Переходная функция колебательно стремится к значению 2.7.

Переходная функция это своеобразный «отпечаток пальца» звена – каждое звено имеет свою особенную, отличающуюся от переходных функций других звеньев, переходную функцию, по которой можно определить тип и параметры звена. Почему именно переходную функцию выбрали в качестве характеристики звена? Потому что ступенчатый сигнал легко генерировать: не было сигнала, появился постоянный. Переходная функция модели САР позволяет характеризовать ее качество (быстродействие и точность) в переходном режиме работы. Кроме того, зная переходную функцию линейной системы можно определить реакцию системы на произвольное воздействие. Важное для практики приложение переходной функции – идентификация объектов и систем: определение по экспериментально снятой переходной функции вида типового звена, которым можно промоделировать отдельные элементы и системы в целом, а также возможность определения параметров моделирующих звеньев.

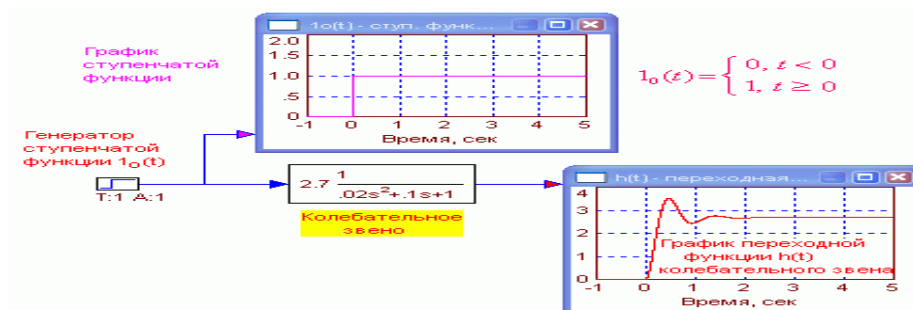


Рис. 2.3. Пример определения переходных характеристик звеньев и осциллограмма переходной функции колебательного звена

Примеры переходных функций некоторых основных типовых звеньев.

1. Пропорциональное звено. Его переходная функция равна

$$h(t) = k \cdot 1_0(t), \quad (2.3)$$

где k – коэффициент усиления звена.

Коэффициенты усиления типовых звеньев могут быть размерными и безразмерными.

Примечание. Часто в литературе в формулах переходных функций звеньев ((3) и далее) ступенчатая функция в правой части не указывается, но подразумевается, что $h(t)$ равна нулю при $t \leq 0$. Это условие физической реализуемости звена, которое означает, что отклик звена появляется вследствие и, поэтому, после воздействия, а не до него. Условие физической реализуемости отражает причинно-следственную связь между входным и выходным сигналами.

Как видно из определения, пропорциональное звено это безынерционное звено, усиливающее сигнал в k раз в любой момент времени, как бы быстро он не изменялся. Пропорциональным звеном моделируются системы управления и их элементы в статике, в таком режиме, когда воздействия, поступающие на систему управления, не изменяются во времени уже в течение достаточно длительного времени.

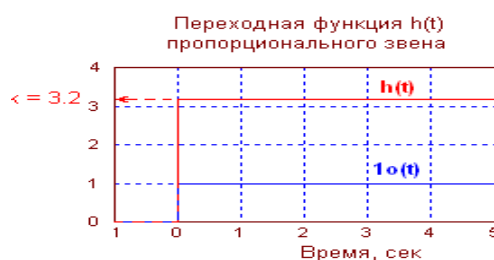


Рис. 2.4 . Переходная функция пропорционального звена

2. *Интегратор.* Его переходная функция в соответствии с определением равна

$$h(t) = \frac{1}{T} t \cdot 1_0(t), \quad (2.4)$$

где T – постоянная времени интегратора. $k_1 = 1/T$ – коэффициент усиления интегратора.

Интегратор способен накапливать поступающий на него сигнал с течением времени. В частности, формула (4) показывает, что при подаче ступенчатого воздействия на интегратор, его выходной сигнал изменяется линейно с течением времени, т.е. накопление действительно происходит (рис 2.5).



Рис. 2.5 Переходная функция интегратора и его постоянная времени T

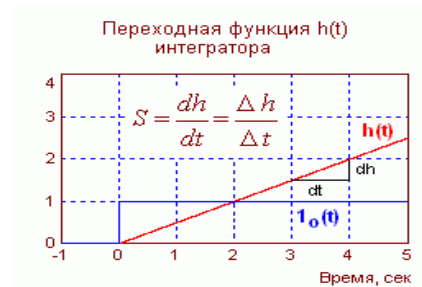


Рис.2.6. Определение крутизны переходной характеристики интегратора

Проверка того, действительно ли звено является интегратором, осуществляется следующим образом. Переходная функция линейно растет с увеличением времени. Постоянная времени интегратора определяется временем пересечения переходной функцией уровня входной ступеньки. Звено действительно является интегратором, поскольку увеличение, например, вдвое величины входной ступеньки приводит к такому же удвоению крутизны переходной характеристики и сохранению значения постоянной времени.

Примеры реальных устройств, которые могут быть промоделированы интегратором: электрические и гидравлические емкости, двигатели и вообще, устройства, имеющие вращающиеся валы.

3. *Апериодическое (инерционное) звено.* Его переходная функция равна

$$\begin{aligned} h(t) &= k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \cdot 1_0(t) = \\ &= k \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right)\right] \cdot 1_0(t) \end{aligned} \quad , \quad (2.5)$$

здесь – k -коэффициент усиления и T – постоянная времени апериодического звена.

Апериодическое звено – простейшее из тех звеньев, которые обладают инерцией. Действительно, (2.7) показывает, что это звено не сразу, вначале быстро, а за-

тем все более постепенно реагирует на ступенчатое воздействие. Это происходит потому, что в физическом оригинале аperiodического звена имеется один накапливающий элемент (а также один или несколько потребляющих энергию элементов), энергия, запасенная в котором, не может изменяться скачком во времени – для этого потребовалась бы бесконечная мощность.

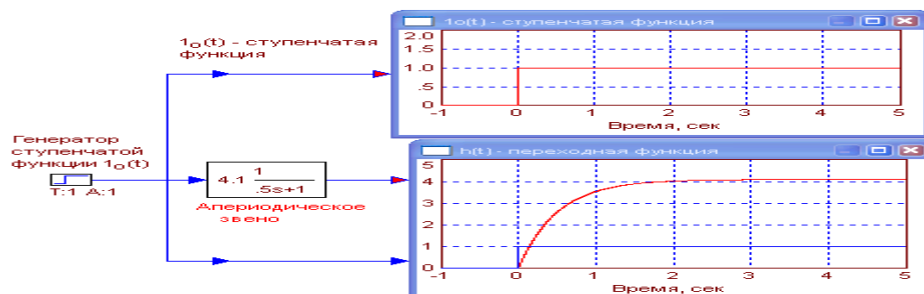


Рис. 2.7. Переходная функция аperiodического звена

Звено не сразу, а постепенно реагирует на скачкообразное изменение входного сигнала. Определение параметров аperiodического звена: коэффициента усиления k и постоянной времени T , осуществляется следующим образом. Постоянная времени T определяется временем пересечения касательной, проведенной к переходной функции в нулевой момент времени, уровня коэффициента усиления звена. Этот уровень равен асимптотическому значению переходной функции. За время $3T$ переходная функция достигает уровня в 95% от ее конечного значения, поэтому считается, что за время $3T$ переходный процесс в аperiodическом звене практически заканчивается (рис.2.8.). Таким образом, длительность переходного процесса в аperiodическом звене является мерой его инерционности.



Рис. 2.8. Переходная функция аperiodического звена

Модель аperiodического звена может быть задана передаточной функцией (блоком *transferFunction*), а может быть составлена из интегратора, сумматора и усилителя. На рис.2.10 представлена эквивалентная схема аperiodического звена, составленная из интегратора, охваченного жесткой отрицательной обратной связью с коэффициентом усиления k_1 , сумматора и входного усилителя с коэффициентом усиления k_2 . Изменяя значения коэффициентов усиления k_1 и k_2 можно получить любые требуемые значения параметров k и T аperiodического звена

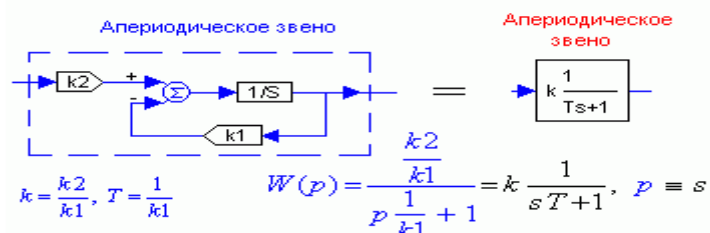


Рис. 2.10. Эквивалентная схема аperiodического звена

Схема, составленная из интегратора, сумматора и усилителей занимает на рабочем поле Vissim'a больше места, но работает быстрее.

4. *Колебательное звено*. Его переходная функция равна

$$h(t) = k \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \delta^2}} \cdot e^{-\frac{\delta t}{T}} \cdot \sin(\omega_3 t + \varphi) \right], \quad \delta < 1$$

$$\omega_3 = \frac{\sqrt{1 - \delta^2}}{T}; \quad \varphi = \arccos(\delta); \quad (2.6)$$

где k – коэффициент усиления, T – постоянная времени и δ - декремент затухания.

Колебательное звено наряду со свойствами, присущими уже перечисленным звеньям (способности к усилению, накоплению и инерционностью), обладает и еще одним свойством, которого нет у более простых звеньев, колебательностью. Это его способность при определенном сочетании параметров T и δ переходить к новому стационарному значению, определяемому воздействием, или возвращаться в исходное состояние после снятия воздействия, колебательно. Такое поведение обусловлено наличием в колебательном звене двух накапливающих элементов, способных обмениваться друг с другом энергией разного рода (потенциальной и кинетической,

электрической и магнитной и т.п.), и элемента(ов), потребляющего, рассеивающего энергию. Если затухание достаточно велико или накапливающие элементы содержат энергию одного вида, например это два электрических конденсатора, то колебаний в звене не происходит, и его называют еще и *апериодическим*.

Из рис.2.11 видно, что с течением времени значения функций стремятся к величине коэффициентов усиления звеньев. При $\delta > 1$ трение в системе, рассеивание энергии, относительно велико и колебательность переходной функции исчезает, функция становится монотонной.

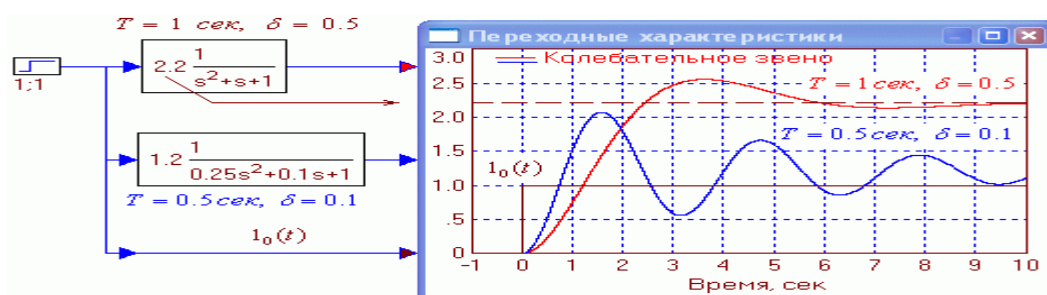


Рис. 2.11. Переходные функции колебательных звеньев

Постоянная времени T колебательного звена не равна периоду колебаний $T_{\text{кол}}$,

она связана с периодом, но существенно меньше его:
$$T_{\text{кол}} = \frac{2\pi T}{\sqrt{1-\delta^2}}$$
, при $\delta < 0.5$ период затухающих колебаний примерно равен $T_{\text{кол}} \approx 2\pi T$.

По колебательной ($\delta < 0.5$) переходной характеристике колебательного звена можно приближенно оценить его параметры:

- - уровень успокоения колебаний равен коэффициенту усиления k звена;
- - постоянная времени приближенно равна $T \approx T_{\text{кол}} / 2\pi$
- - декремент затухания приближенно равен $\delta \approx 3T / T_{\text{пер}}$,
- где $T_{\text{пер}}$ - длительность переходного процесса, определяемая промежутком времени, за которое переходная функция попадает в пятипроцентный коридор.

Из рис. 2.12. видно, что продолжительность переходного процесса $T_{\text{пер}}$ в колебательном звене при $\delta < 0.5$ равно отношению утроенной постоянной времени T к декременту затухания δ .

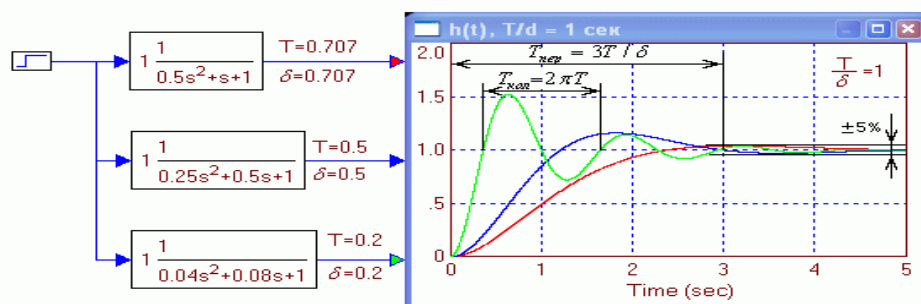


Рис. 2.12. Оценка параметров колебательного звена по переходной функции

Модель колебательного звена может быть задана передаточной функцией (блоком *transferFunction*), а может быть составлена из интеграторов, сумматоров и усилителей. Пример схемы представлен на рис. 2.13, схема составлена из двух последовательно включенных интеграторов, охваченных отрицательными обратными связями, сумматоров и усилителей. Изменяя значения коэффициентов усиления $k1$, $k2$ и $k3$ можно получить любые требуемые значения параметров колебательного звена.

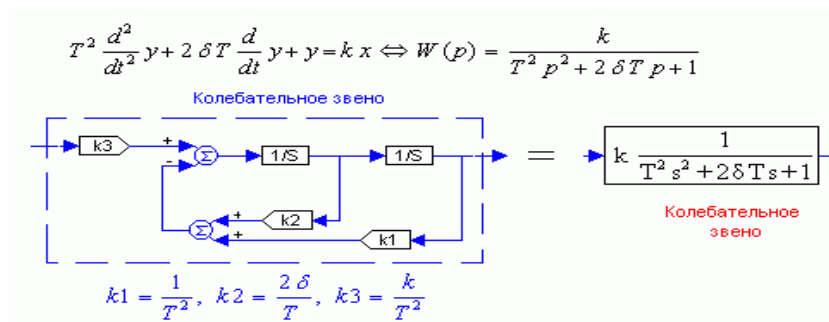


Рис. 2.13. Эквивалентная схема колебательного звена

5. *Звено запаздывания.* Его переходная функция равна

$$h(t) = 1_0(t - \tau_s), \quad (2.7)$$

где τ_s – единственный параметр звена запаздывания: это время, на которое задерживается сигнал, проходя звено запаздывания.

Звено запаздывания не изменяет форму сигнала, но задерживает его по времени на величину τ_s (рис.2.14) Этим звеном моделируются системы и устройства, сиг-

налы в которых задерживаются на ощутимую величину по сравнению с временными параметрами, характеризующими инерционность этих систем.



Рис. 2.14. Звено запаздывания

Это, как правило, протяженные в пространстве устройства: линии связи, трубопроводы, транспортеры и т.п. Звено запаздывания выносится на рабочее поле Vissim'a из меню (*Blocks - Time Delay – timeDelay*).

Звено запаздывания может быть приближенно заменено аperiodическим звеном при относительно небольших задержках сравнительно медленно изменяющихся сигналов (верхняя осциллограмма). Постоянная времени аппроксимирующего аperiodического звена равна времени задержки сигнала в звене запаздывания (рис.2.15).

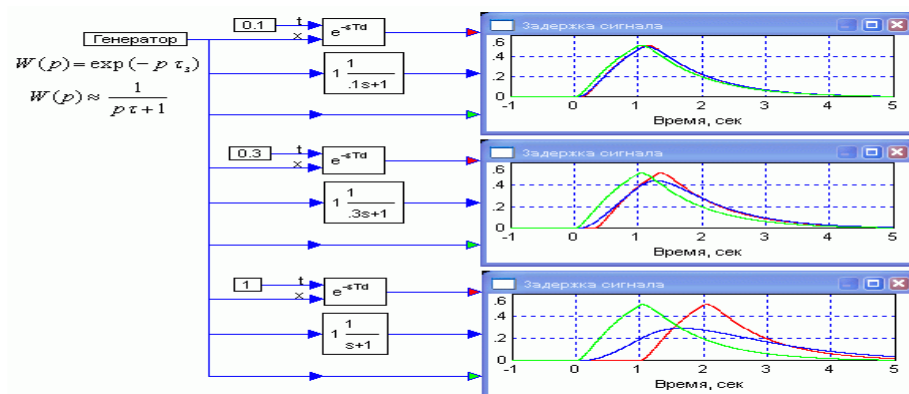


Рис.2.15. Замена звена запаздывания аperiodическим звеном

2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 2

2.1. Содержание работы.

1. Провести исследование на основе виртуального лабораторного стенда следующих типовых звеньев: интегратора, аperiodического звена, колебательного звена, звена запаздывания, сумматора.

2. Построить в Vissim'е переходные характеристики звеньев.
3. Проанализировать влияние изменения их параметров на переходные характеристики.
4. Сделать выводы по каждому звену.

2.2. Исследование интегратора

1. Построить в программе Vissim виртуальный лабораторный стенд для исследования модели интегратора. Вынести на рабочее поле Vissim'а генератор *step* ступенчатого сигнала (*Blocks – Signal Producer - step*), интегратор (*Blocks – Integration - Integrator*), осциллограф (*Blocks – Signal Consumer – Plot*), сделать надписи (*Blocks – Annotation - label*) На рис. 2.16. приведен примерный вид виртуального лабораторного стенда по исследованию интегратора, собранный на рабочем поле программы Vissim.



Рис. 2.16. Примерный вид виртуального стенда по исследованию интегратора

Пояснения по настройке виртуального лабораторного стенда (заданию параметров моделирования).

Чтобы вид модели был аккуратнее, следует выбрать в меню *View* (Вид) пункт *Presentation Mode* (Режим представления);

Для отображения под блоками, в частности под блоком генератора ступенчатой функции (*step*), их параметров следует выбрать в меню *View* пункт *Block Labels* (Подписи Блоков).

В нижней части рис. 2.16 показана панель *Vissim'a*, на которой отображаются основные параметры моделирования:

- - количество блоков (Blks) – 11;
- - модельное время Rng выбрано (*Simulate – Simulation Properties* – вкладка *Range: Start u End*) изменяющимся от -0.5 сек до 2 сек. Это сделано для повышения наглядности осциллограммы, чтобы показать часть оси времени левее нуля и поведение там исследуемых функций;
- - шаг моделирования *Step* (там же *Step Size*) выбран равным 0.001 сек;
- - T – текущее время, параметр, полезный при моделировании в реальном времени (*Simulate – Simulation Properties* - вкладка *Range*: отметить при необходимости *Run In Real Time*);
- - RK2 – интегрирование проводится по методу Рунге-Кутты 2 порядка.

Верхний генератор ступенчатой функции на рис. 2.1, как видно из подписи под блоком, создает ступеньку с амплитудой, равной 1, задержанную на 0.5 сек относительно времени (-0.5 сек) начала моделирования с тем, чтобы на осциллографе она появлялась в нулевой момент времени (синяя линия). Выполняя лабораторную работу, стенд можно строить прямо по рис 2.16.

Сохранить лабораторный стенд, дав файлу содержательное название.

2. Проверить, действительно ли интегратор *Vissim'a* (*Blocks – Integration - Integrator*) является таковым. Для этого вычислить по формуле (4) значения переходной функции интегратора в различные моменты времени, отделяя их некоторым шагом, и проставить точки на снимке осциллограммы в программе *Paint*. Кроме того, задать величину ступеньки, отличающуюся от единицы и убедиться, что крутизна выходного сигнала интегратора изменилась пропорционально изменению величины ступеньки. Если точки, вычисленные по формуле переходной функции ложатся на экспериментальную линию, то исследуемое устройство – интегратор.

Сделать снимок экрана, обрезать и сохранить его с содержательным названием в формате gif в подпапке *Lab_2* лабораторной работы 2.

3. Убедиться, что постоянную времени интегратора можно изменять, включая последовательно с ним (*Blocks – Arithmetic - gain*) усилитель и изменяя его коэффи-

циент усиления. Для изменения усиления блока следует дважды по нему щелкнуть и в единственном поле диалогового окна задать значение коэффициента усиления.

Vissim позволяет исследовать одновременно несколько интеграторов с разными постоянными времени.

На рис. 2.17. представлен примерный вид виртуального лабораторного стенда для проверки возможности изменения постоянной времени интегратора посредством изменения коэффициента усиления усилителя, включенного последовательно с интегратором. Постоянные времени следует определить по графикам с точностью, не хуже чем в две значащих цифры.

Интегратор *Vissim*'а не позволяет изменять его постоянную времени. Для этого применен усилитель (*Blocks – Arithmetic – gain*), усиление которого обратно пропорционально постоянной времени (см. формулу по табл. 1).

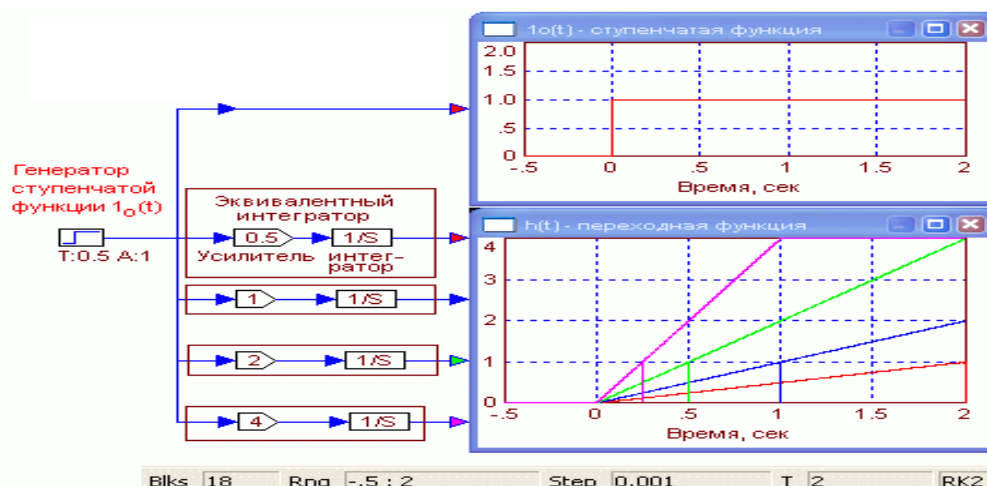


Рис. 2.17. Примерный вид виртуального стенда для проверки возможности изменения постоянной времени интегратора

Как видно из подписи к генератору ступенчатой функции, он создает ступеньку с амплитудой A , равной 1, задержанную на $T=0.5$ сек относительно начала моделирования с тем, чтобы на осциллографе она появлялась в нулевой момент времени. Внизу показана панель *Vissim*'а, на которой отображаются основные параметры моделирования: количество блоков – 18; модельное время (*Simulate – Simulation Properties: Start u End*) выбрано изменяющимся от -0.5 сек до 2 сек, шаг моделирования (там же *Step Size*) выбран равным 0.001 сек.

Примечание. На осциллографах рис.2.16 и 2.17 можно в режиме запоминания отобразить вместе с имеющимися еще несколько графиков для других значений входного сигнала. Для этого следует дважды щелкнуть в центре осциллографа и в появившемся окне диалога на вкладке Options (Параметры) поставить галочку в пункте Over Plot (Поверх предыдущих графиков) (рис.2.18.). Затем, при наличии свободных входов осциллографа, можно перенести выход интегратора на следующий свободный вход осциллографа, чтобы цвет графика был другим, изменить величину ступеньки, например, в два раза, и запустить процесс счета (моделирования).

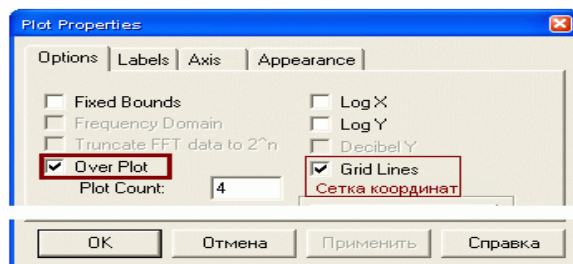


Рис. 2.18. Окно свойств осциллографа открыто на вкладке Options

4. Установить, как связаны коэффициент усиления и постоянная времени эквивалентного интегратора. Можно ли утверждать, что передаточная функция последовательно включенных усилителя и интегратора равна произведению их передаточных функций?

5. Сохранить лабораторный стенд рис.2.17 с содержательным названием. Сделать снимок экрана и сохранить его с содержательным названием в формате gif в.

6. Сделать выводы о соответствии и о точности соответствия виртуального интегратора идеальному.

2.3. Исследование апериодического звена

1. Построить в программе Vissim виртуальный лабораторный стенд для исследования модели апериодического звена. Апериодическое звено создается вынесением на рабочее поле блока *transferFunction (Blocks – Linear System - transferFunction)* и заданием его параметров. Одновременно можно исследовать семь экземпляров звена с разными параметрами.

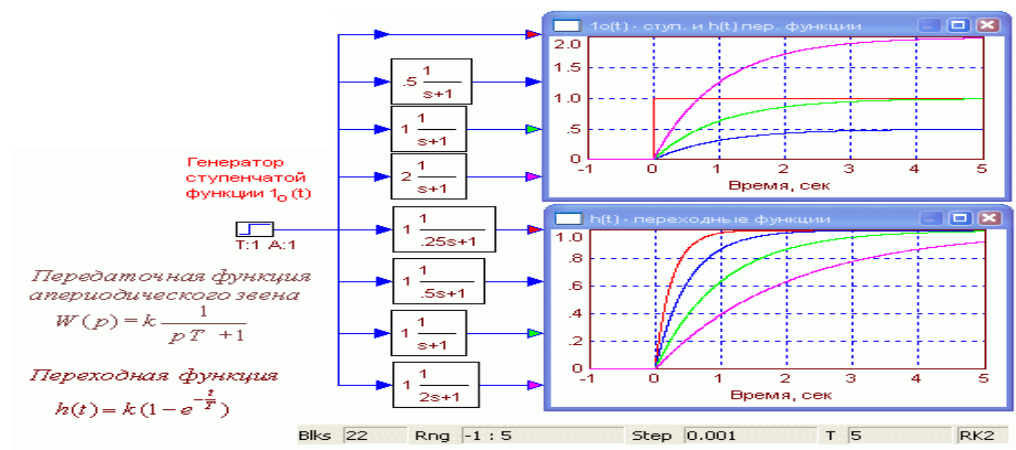


Рис. 2.19. Стенд для исследования аperiodического звена

Параметры аperiodического звена задаются в окне диалога, появляющегося при двойным щелчке по блоку *transferFunction* (рис.2.20).

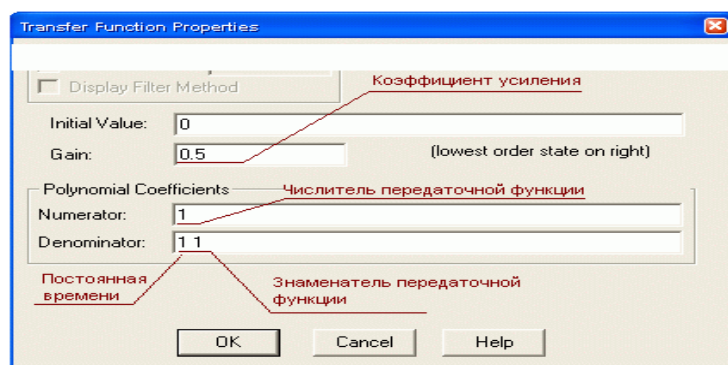


Рис. 2.20. Поля окна диалога для задания параметров аperiodического звена

2. Определить по осциллограммам постоянные времени и коэффициенты усиления звеньев и указать, какая кривая соответствует какому звену. Объяснить почему. Сделать снимок экрана и сохранить его с содержательным названием в формате *gif* в подпапке Lab_2 личной папки.

3. Проверить правильности работы стенда. Для этого вычислить значения переходной функции для звена с параметрами $k=2.0$, $T=1.0$ сек по формуле (5) и про- ставить в Paint'е точки на соответствующей осциллограмме (пример оформления проверки в отчете по лабораторной работе приведен на рис.2.20А).

Вычислить значения переходной функции для звена с параметрами $k = 2.0$, $T = 1.0$ сек и проставить в Paint'e точки на соответствующей осциллограмме.

Решение

Значение параметров аperiodического звена
Коэффициент усиления
Постоянная времени

$k := 2.0$
 $T := 1.0$

Диапазон изменения времени

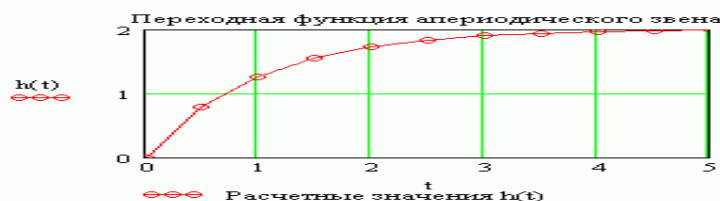
$t := 0, 0.5 \dots 5$

Выражение для переходной функции:

$$h(t) := k \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Численные значения переходной функции

t =	h(t) =
0	0
0.5	0.787
1	1.264
1.5	1.554
2	1.729
2.5	1.836
3	1.9
3.5	1.94
4	1.963
4.5	1.978
5	1.987



Нанесем в Paint'e расчетные точки на экспериментальную кривую

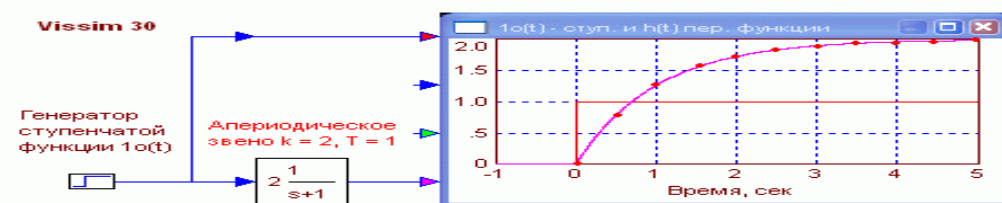


Рис. 2.20А Пример проверки правильности представления результатов в Vissim'e

4. Как проверить то, что реакция на сумму воздействий блока аperiodического звена равна сумме его реакций на каждое из них, т.е. линейность блока? Сделать вывод о точности модели аperiodического звена, используемой в Vissim'e.

5. Исследовать аperiodическое звено с параметрами $k = 4.7$; $T = 0.2$ с. (усиление (Gain) равным 4.7, числитель (Numerator) оставить равным 1, для знаменателя (Denominator) набрать 0.2 (пробел) 1., запустить на счет). Проанализировать график переходной функции. Найти соотношение между постоянной времени T аperiodического звена и временем, за которое переходная функция приближается к своему установившемуся значению на величину, меньшую 5% этого значения. Как еще по переходной характеристике аperiodического звена можно определить значение постоянной времени?

6. Подключить несколько звеньев к одному осциллографу. Рассмотреть варианты с различными значениями коэффициента усиления и постоянной времени

(0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 50.0, 100.0 сек) аperiodического звена. Сделать выводы.

7. Сохранить лабораторный стенд.

2.4. Исследование колебательного звена

1. Построить в программе Vissim виртуальный лабораторный стенд для исследования модели колебательного звена (рис.2.21.). Колебательное звено создается вынесением на рабочее поле блока Передаточная функция - *transferFunction (Blocks – Linear System - transferFunction)* и заданием его параметров. Сохранить лабораторный стенд в личной папке с содержательным названием и расширением vsm. Параметры колебательного звена задаются так же, как и для аperiodического звена (рис.2.22.) Подавая на вход типовых динамических звеньев синусоидальный сигнал, убедиться, что изменение коэффициента усиления вне полосы пропускания за одну декаду составляет либо 20 дБ (10 раз), либо 40 дБ (100 раз).

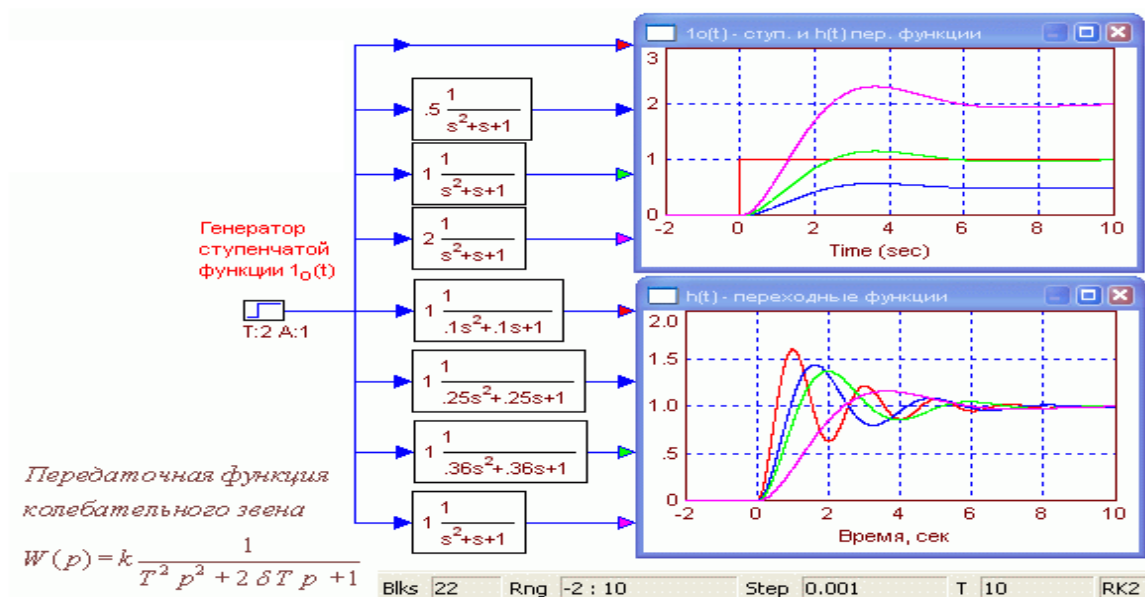


Рис. 2.21. Стенд для исследования колебательного звена

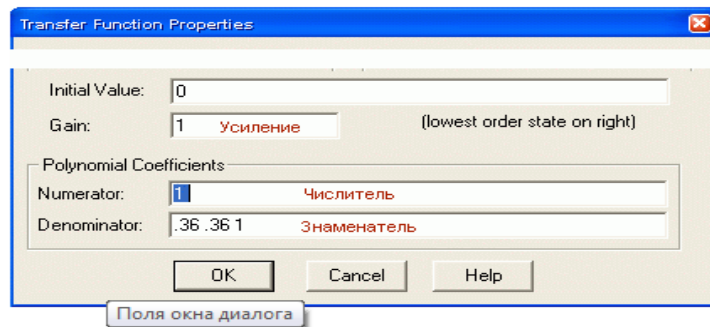


Рис. 2.22. Поля окна диалога для задания параметров колебательного звена

Числа (коэффициенты полиномов) должны быть отделены пробелами, аргумент s не вводится, программа выводит его в формуле сама.

2. Определить по осциллограммам параметры звеньев: постоянные времени, коэффициенты усиления и декременты затухания и указать, какая кривая соответствует какому звену. Объяснить почему.

3. Вычислить значения переходной функции $h(t)$ звена с параметрами $k=1.0$, $T=0.6$ сек и $\delta=0.3$ или с параметрами $k=2.0$, $T=0.5$ сек и $\delta=0.25$. Проверить правильность представления в *Vissim*'е результатов, для этого по формуле (6) провести вычисления переходной функции и проставить в *Paint*'е точки на соответствующей осциллограмме (пример проведения проверки представлен на рис 2.22.А).

Сделать вывод о точности модели колебательного звена, используемой в *Vissim*'е. Как проверить то, что реакция на сумму воздействий блока колебательного звена равна сумме его реакций на каждое из них?

4. Построить переходную характеристику колебательного звена для $k=7.8$; $T=1$, 0.2 и 5.0, при изменении затухания δ от 0.25 до 2.0 (установить: усиление (*Gain*) равным 7.8, числитель (*Numerator*) оставить равным 1, для знаменателя (*Denominator*) в случае, когда $T=0.2$ и $\delta=2$ набрать 0.04 (пробел) 0.8 (пробел) 1.; запустить на счет).

5. Оценить влияние изменения параметров передаточной функции колебательного звена на вид и длительность его переходной характеристики.

6. Сохранить снимки экрана. Сделать выводы.

Вычислить значения переходной функции $h(t)$ звена с параметрами $k = 2.0$, $T = 0.5$ сек и $\delta = 0.25$ по формуле . . . и проставить точки в Paint'e на снимке экрана соответствующей осциллограммы. Сделать вывод о точности модели колебательного звена, используемой в Vissim'e.

Решение

Значения параметров колебательного звена

Коэффициент усиления $k := 2.0$
Постоянная времени $T := 0.5$
Декремент затухания $\delta := 0.25$

Диапазон изменения времени

$t := 0..10$

Выражение для переходной функции и ее параметров:

Частота затухающих колебаний, рад/сек

$$\omega_s := \frac{\sqrt{1 - \delta^2}}{T}$$

Начальная фаза

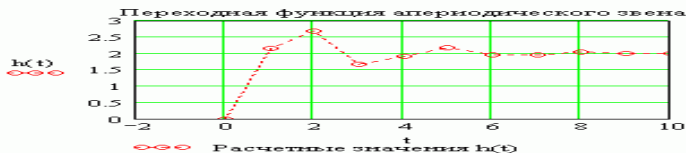
$$\phi := \arccos(\delta)$$

Переходная функция колебательного звена

$$h(t) := k \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \delta^2}} e^{-\frac{\delta}{T} t} \cdot \sin(\omega_s \cdot t + \phi) \right)$$

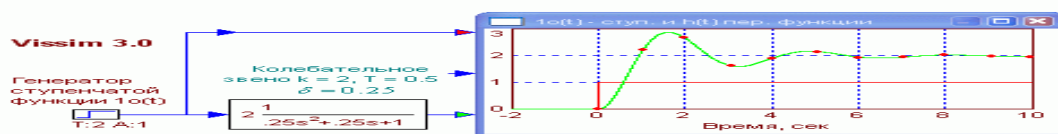
Значения переходной функции

t =	h(t) =
0	0
1	2.141
2	2.674
3	1.655
4	1.901
5	2.17
6	1.963
7	1.954
8	2.034
9	2.002
10	1.987



○ ○ ○ ○ Расчетные значения h(t)

Нанесем в Paint'e расчетные точки на экспериментальную кривую



Переходная функция колебательного звена, полученная экспериментально в Vissim'e, совпадает с теоретической

Вывод: блок **transferFunctions** правильно моделирует колебательное звено

Рис. 2.22А. Пример проверки правильности представления результатов в Vissim'e

2.5. Исследование звена запаздывания

1. Построить в программе Vissim виртуальный лабораторный стенд для исследования модели звена запаздывания. Звено запаздывания выносится на рабочее поле из пункта меню (*Blocks – Time Delay - timeDelay*), блок константы – из (*Blocks – Signal Producer - const*).

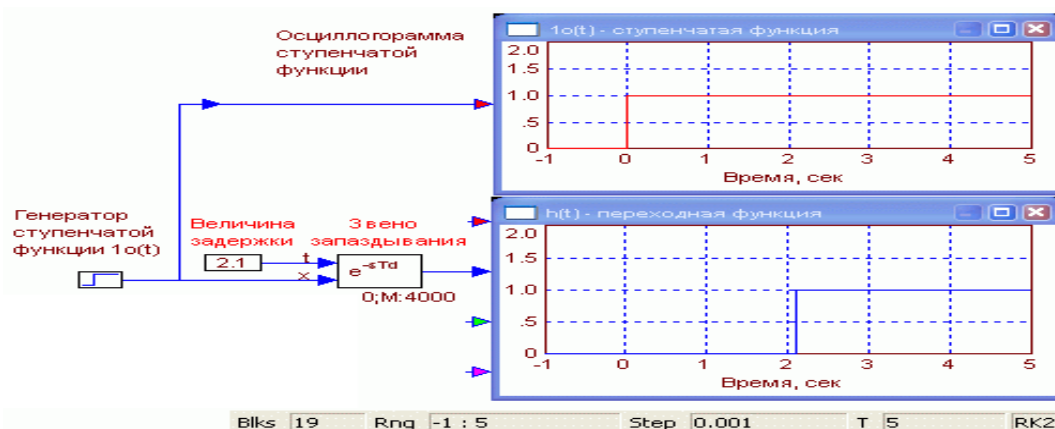


Рис. 2.23. Стенд для исследования звена запаздывания

Величина задержки сигнала в звене запаздывания определяется величиной сигнала, подаваемого на его верхний вход t . Задерживаемый сигнал подается на нижний вход x звена. Сохранить лабораторный стенд в личной папке с содержательным названием и расширением *vsm*.

2. Меняя величину задержки, задаваемой блоком константы двойным щелчком по нему и изменением значения, убедиться, что величина задержки, отображаемая осциллографом, равна величине сигнала, подаваемого на вход t звена запаздывания. Построить график величины запаздывания в звене, определяемой непосредственно по осциллографу, от задаваемой величины задержки.

3. Сохранить снимок экрана в личной папке. Сделать выводы.

2.6. Исследование сумматора и усилителя

1. Построить в программе *Vissim* виртуальный лабораторный стенд для исследования модели сумматора. Сумматор выносится на рабочее поле из меню *Blocks – Arithmetic – SummingJunction*. Генераторы линейно растущего сигнала (*ramp*) и синусоидального (*sinusoid*) выносятся из меню *Blocks – Signal Producer*. На рис.2.24. представлен стенд для проверки работоспособности виртуального сумматора. В любой момент времени его выходной сигнал равен сумме входных сигналов. Сумматор успевает складывать меняющиеся во времени сигналы, следовательно, он обладает малой инерционностью.

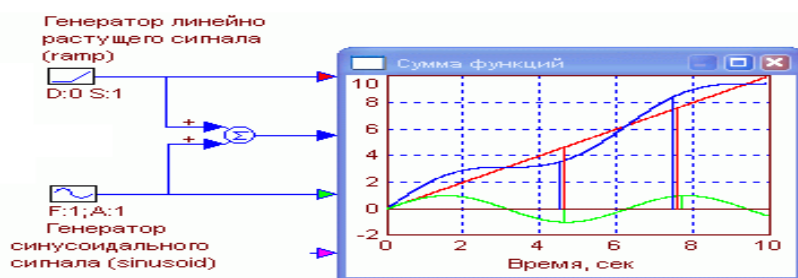


Рис. 2.24. Стенд для проверки работоспособности виртуального сумматора

2. Увеличить частоту генератора синусоиды и скорость роста линейного напряжения. Проверить, что сумматор успевает суммировать быстрые сигналы.

3. Проанализировать осциллограммы. Сделать выводы.

4. Предложить методику и самостоятельно исследовать усилитель, в том числе, его быстродействие.

2.7. Эквивалентные схемы типовых звеньев

1. Проверить эквивалентность схемы *апериодического звена*, заданной блоком *transferFunctions* и составленной из элементарных блоков (интегратора, сумматора и усилителей). Стенд для проверки эквивалентности моделей апериодического звена показан на рис 2.25. Совпадение переходных функций будет свидетельствовать об идентичности моделей.

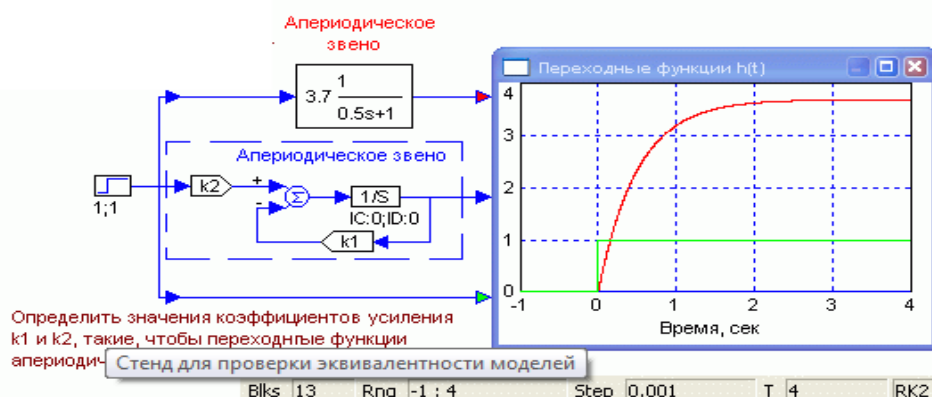


Рис.2.25. Стенд для проверки эквивалентности моделей апериодического звена

2. Рассчитать значения коэффициентов усиления усилителей, таких, чтобы переходные функции совпали, и проверить эквивалентность моделей экспериментально. Сделать снимок экрана и выводы.

Примечание. Для удобства сравнения осциллограмм к выходному сигналу одной из моделей можно прибавить малую константу, например 0.05, тогда осциллограммы расположатся параллельно, и одна не будет закрывать другую.

3. Проверить возможность аппроксимации звена запаздывания одним или несколькими апериодическими звеньями. Стенд для определения диапазона задержек, при которых звено запаздывания может быть приближённо заменено одним или несколькими последовательно соединёнными апериодическими звеньями, приведён на рис.2.26.

4. Определить пределы изменения задержки, при которой апериодические звенья сравнительно мало искажают сигнал и приближённо можно считать, что он задерживается ими. Сделать снимок экрана и выводы.

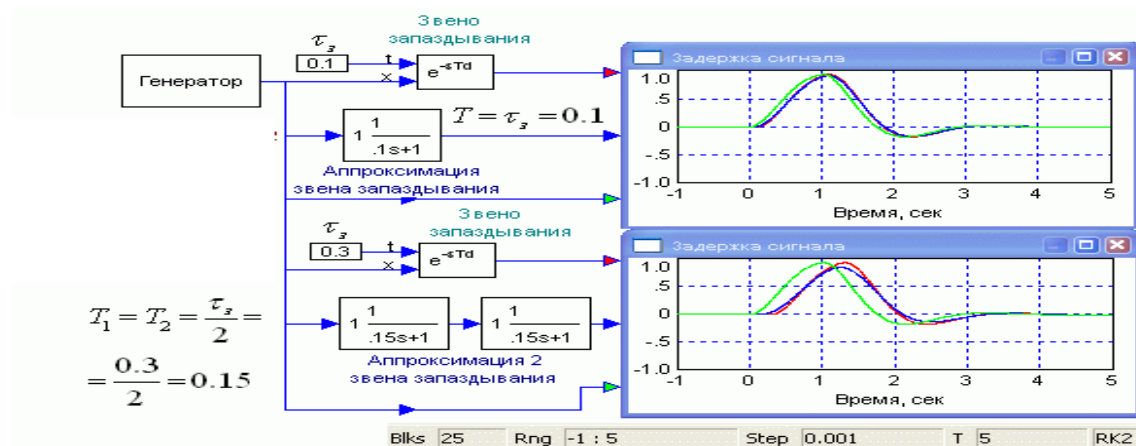


Рис. 2.26. Стенд для определения диапазона задержек

2.8. Идентификация линейных объектов

Идентификация заключается в подборе типового звена или их комбинации, достаточно близких по свойствам к исследуемому объекту, представленному «черным ящиком», и определению наилучших параметров аппроксимирующего звена (совокупности звеньев). Идентификация может осуществляться различными способами, в частности, по переходным функциям или по частотным характеристикам.

3. Выводы по проделанной работе и оформление отчета

Проанализировать работу типовых звеньев и изменения в реакции типовых звеньев на варьирование параметров воздействий. Оформить отчет.

Содержание отчета: титульный лист; цель и задачи лабораторной работы; передаточные функции и схемы моделирования исследуемых звеньев, привести названия и графики, использованных типовых возмущающих воздействий; экспериментально полученные характеристики при вариации параметров каждого звена; выводы, обобщающие проделанные эксперименты по каждому звену.

Контрольные вопросы

1. Что такое типовые звенья линейных систем? Для чего они используются?
2. Какие типы звеньев Вы знаете? Какие характеристики звеньев Вы знаете?
3. Что такое переходная характеристика звена?
4. Что такое интегратор, апериодическое звено, колебательное звено?
5. Порядок определения переходной характеристики апериодического звена.
6. Порядок определения переходной характеристики колебательного звена.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. Частотный анализ типовых звеньев

Цель работы:

- 1) приобрести и закрепить навыки исследования частотных характеристик звеньев и элементов систем, а также приемы работы в программе *Vissim*;
- 2) построить модели типовых звеньев линейных САР и исследовать их частотные характеристики;
- 3) построить модели виртуальных лабораторных стендов для снятия частотных характеристик интегратора, апериодического и колебательного звеньев;
- 4) получить с помощью *Vissim*'а частотные характеристики звеньев;
- 5) исследовать влияние параметров звеньев на вид их частотных характеристик.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 3

1.1 Частотные характеристики

Сущность метода частотных характеристик заключается в том, что на вход исследуемой системы подается гармонический сигнал (синусоидальные колебания) в широком диапазоне частот. Реакция системы при разных частотах позволяет судить о ее динамических свойствах.

Пусть входной сигнал системы имеет амплитуду a и частоту ω , т. е. описывается формулой $x = a \sin(\omega t)$.

Выходной сигнал будет иметь амплитуду A_1 и отличаться от входного по фазе на величину ψ (фазовый сдвиг): $y = A_1 \sin(\omega t + \psi)$.

Таким образом, можно рассчитать усиление по амплитуде $A = \frac{A_1}{a}$.

Для каждой частоты входного сигнала ω будут свои A и ψ .

Изменяя ω в широком диапазоне, можно получить зависимость $A(\omega)$ – амплитудную частотную характеристику (АЧХ) и $\psi(\omega)$ – фазовую частотную характеристику (ФЧХ).

Главное достоинство метода частотных характеристик заключается в том, что АЧХ и ФЧХ объекта могут быть получены экспериментально. Для этого необходимо иметь генератор гармонических колебаний, который подключается к входу объекта, и измерительную аппаратуру для измерения амплитуды и фазового сдвига колебаний на выходе объекта.

Частотные характеристики САУ могут быть получены по ее переходным функциям (ПФ) $W(s)$. Для суждения о реакции звена на синусоидальный сигнал достаточно исследовать его реакцию на гармонический сигнал вида

$$x(j\omega) = e^{j\omega t}.$$

Тогда выходной сигнал определяется по соотношению

$$y(j\omega) = A(\omega)e^{j(\omega t + \psi(\omega))},$$

и частотная ПФ получается равной

$$W(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = A(\omega)e^{j\psi(\omega)}.$$

Формально для получения частотной ПФ надо сделать в $W(s)$ подстановку $s=j\omega$, и тогда, полученная $W(j\omega)$ является комплексным выражением, которое можно представить в виде:

$$W(j\omega) = \frac{a_1(\omega) + jb_1(\omega)}{a_2(\omega) + jb_2(\omega)}.$$

Для нахождения вещественной и мнимой частей частотной передаточной функции необходимо умножить числитель и знаменатель на сопряженную знаменателю величину, а затем провести деление:

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{a_1(\omega) + jb_1(\omega)}{a_2(\omega) + jb_2(\omega)} = \frac{(a_1(\omega) + jb_1(\omega))(a_2(\omega) - jb_2(\omega))}{(a_2(\omega) + jb_2(\omega))(a_2(\omega) - jb_2(\omega))} = \\ &= \frac{a_1(\omega)a_2(\omega) + b_1(\omega)b_2(\omega)}{a_2^2(\omega) + b_2^2(\omega)} + j \frac{a_2(\omega)b_1(\omega) - a_1(\omega)b_2(\omega)}{a_2^2(\omega) + b_2^2(\omega)} = \\ &= U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \end{aligned}$$

где

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}}, \quad \psi(\omega) = \arg(W(j\omega)) = \arctg \left[\frac{V(\omega)}{U(\omega)} \right] = \arctg \left[\frac{b_1}{a_1} \right] - \arctg \left[\frac{b_2}{a_2} \right].$$

Графики функции $U(\omega)$ и $V(\omega)$ называют соответственно вещественной и мнимой частотной характеристиками.

В некоторых источниках $W(j\omega)$ еще называют *комплексным коэффициентом передачи* (ККП).

Годограф Найквиста - это графическое отображение для всех частот спектра отношений выходного сигнала САР к входному, представленных в комплексной форме (рис.3.1). Величина отрезка от начала координат до каждой точки годографа показывает во сколько раз на данной частоте выходной сигнал больше входного, а сдвиг фазы между сигналами определяется углом до упомянутого отрезка.

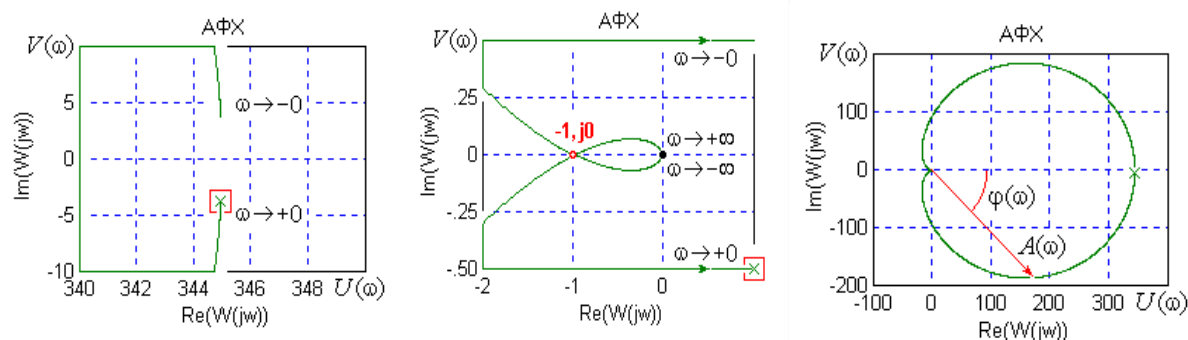


Рис. 3.1. Построение годографа Найквиста

Пример годографа *колебательного звена* приведен на рис.3.2. Он начинается в точке $(1, 0j)$ и при изменении частоты от нуля до бесконечности, пройдя по четвертому, а затем по третьему квадрантам, приходит в начало координат.

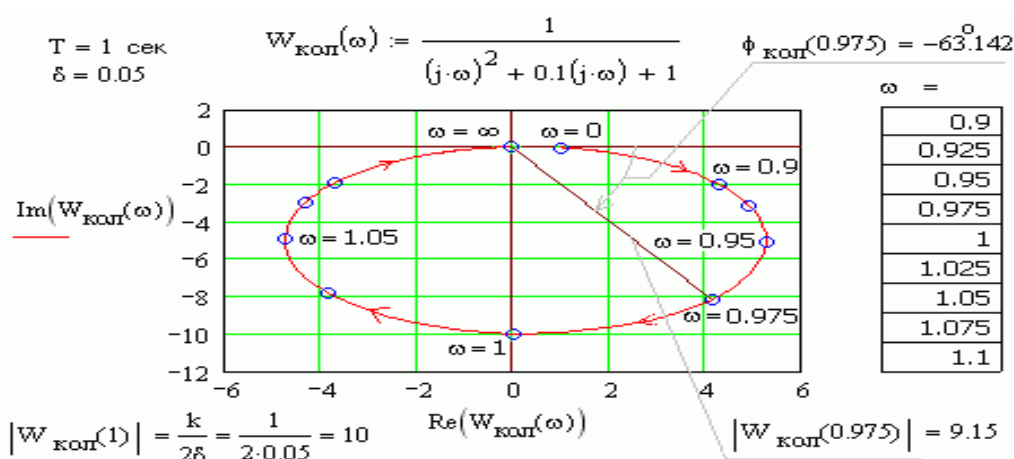


Рис.3.2. Пример годографа колебательного звена

Изменение годографа комплексного коэффициента передачи колебательного звена в зависимости от декремента затухания δ , изменяющегося от 0.5 до 0.1 представлен на рис.3.3. С уменьшением декремента годограф «разбухает», колебательные свойства звена проявляются все более ярко.

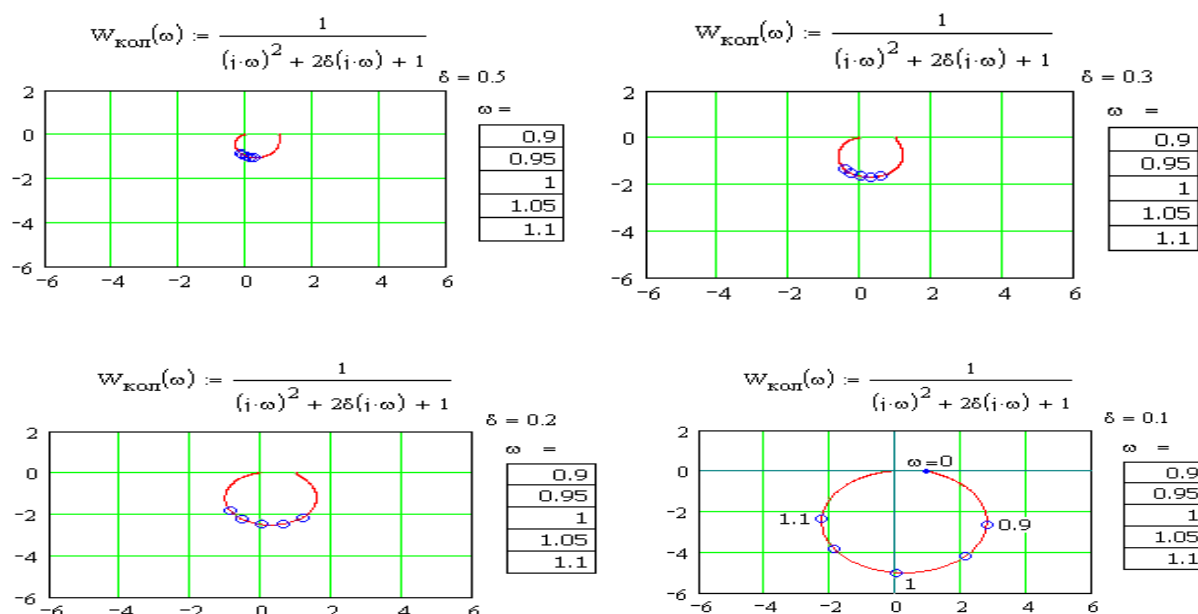


Рис.3.3. Изменение годографа колебательного звена в зависимости от декремента затухания δ

Частотные характеристики могут быть рассчитаны по формулам (см. выше) или сняты экспериментально.

1.2. Логарифмические частотные характеристики

В практических расчетах удобно применять графики частотных характеристик, построенных в логарифмическом масштабе – *логарифмические частотные характеристики* (ЛЧХ).

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ) определяется следующим выражением:

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

Логарифмической фазовой частотной характеристикой (ЛФЧХ) называется график зависимости $\psi(\omega)$, построенный в логарифмическом масштабе частот.

Единицей $L(\omega)$ является децибел (дБ), а единицей логарифма частоты – декада. *Декадой* называют интервал частот, на котором частота изменяется в 10 раз. При изменении частоты в 10 раз говорят, что она изменилась на одну декаду. Например, 3 декады это изменение частоты в 1000 раз.

Соотношение крат и децибелов приведено в таблице

Во сколько раз	1	2	4 = 2 x 2	5 = 10/2	10	100	½ = 0.5	0.1
На сколько дБ	0	6	12 = 6 + 6	14 = 20 - 6	20	40	-6	- 20

Ось ординат при построении ЛЧХ проводят через произвольную точку, а не через точку $\omega = 0$. Частоте $\omega = 0$ соответствует бесконечно удаленная точка: $\lg \omega \rightarrow -\infty$ при $\omega \rightarrow 0$. Основное преимущество использования ЛЧХ заключается в том, что приближенные (асимптотические) ЛАЧХ типовых динамических звеньев изображаются отрезками прямых.

Пример. Построим ЛЧХ апериодического звена первого порядка.

Передаточная функция звена

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

Частотная передаточная функция

$$W(j\omega) = \frac{k}{Tj\omega + 1} = \frac{k(1 - Tj\omega)}{(T\omega)^2 + 1}, \quad U = \frac{k}{(T\omega)^2 + 1}, \quad V = -\frac{kT\omega}{(T\omega)^2 + 1}.$$

Следовательно, АЧХ описывается формулой

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(T\omega)^2 + 1}},$$

ФЧХ строится по формуле

$$\psi(\omega) = \arctg(T\omega).$$

ЛАЧХ апериодического звена 1-го порядка

$$L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{(T\omega)^2 + 1}.$$

По этой формуле можно построить две асимптоты – прямые, к которым стремится ЛАЧХ при $\omega \rightarrow 0$ и при $\omega \rightarrow \infty$. Так, при $\omega \rightarrow 0$ второе слагаемое близко к нулю, и этот участок ЛАЧХ представляет собой горизонтальную прямую

$$L(\omega) = 20 \lg k.$$

При $\omega \rightarrow \infty$ получаем наклонную прямую

$$L(\omega) \approx -20 \lg \sqrt{(T\omega)^2 + 1} \rightarrow -\infty.$$

Для определения наклона этой прямой можно рассмотреть границы декады:

$$\omega = \frac{1}{T} \quad \text{и} \quad \omega = \frac{10}{T}.$$

Изменение ЛАЧХ между этими точками:

$$L(\omega) \approx -20 \lg \sqrt{\left(T \frac{10}{T}\right)^2 + 1} + 20 \lg \sqrt{\left(T \frac{1}{T}\right)^2 + 1} \approx -20(\text{дБ} / \text{дек}).$$

ЛЧХ часто называют *диаграммами Боде*.

На рис. 3.5. представлен процесс построения ЛАЧХ & ЛФЧХ.

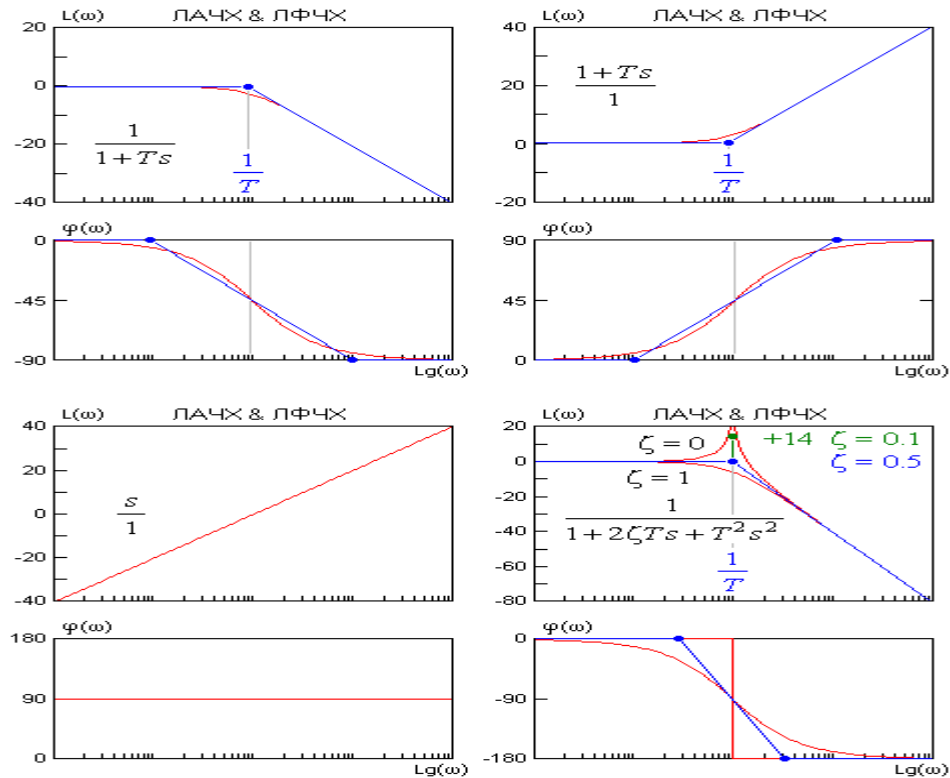


Рис. 3.5. Правила построения асимптотических ЛАЧХ & ЛФЧХ

Точность асимптотических ЛАЧХ & ЛФЧХ достаточна для большинства решаемых задач. Для звеньев первого порядка максимальная амплитудная ошибка вблизи частот сопряжения составляет 3 дБ. Максимальная фазовая ошибка – 6 %. Фрагмент ЧХ колебательного звена вблизи резонансной частоты лишь иногда следует уточнить по опорным справочным кривым для данного ζ .

Примеры амплитудно- и фазо-частотных характеристик звеньев, представленных в натуральном (АЧХ и ФЧХ) и логарифмическом (ЛАЧХ и ЛФЧХ) масштабах приведены на рис.3.6. Усиление (модуль частотной ПФ) реальных и реализуемых устройств начиная с некоторой частоты уменьшается и стремится к нулю. ФЧХ таких устройств имеют отрицательный наклон (первую производную) и стремятся к отрицательным значениям, что обусловлено задержкой сигналов, проходящих эти устройства.

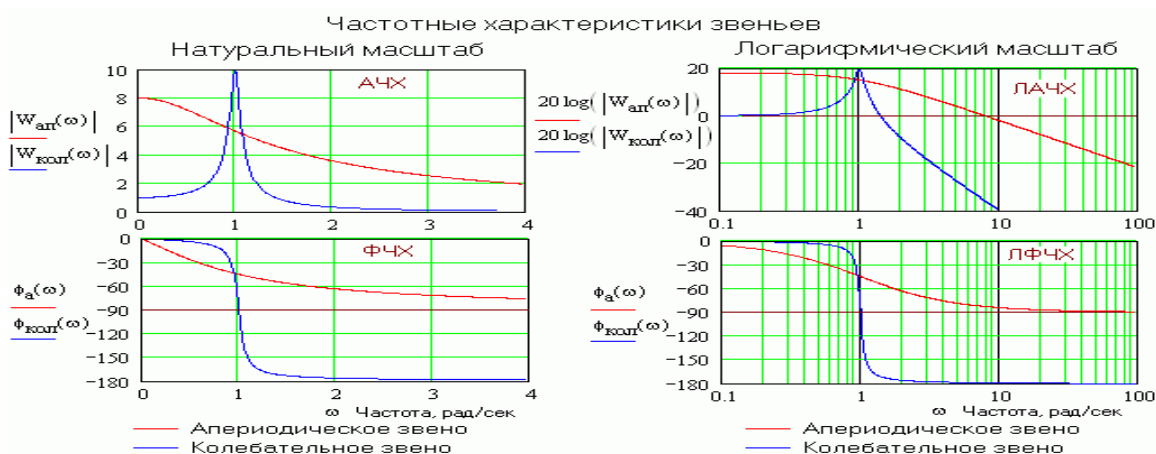


Рис.3.6. Примеры амплитудно- и фазо-частотных характеристик звеньев

1.3 Идентификация систем по частотным характеристикам.

Анализ снятых экспериментально частотных характеристик некоторого устройства позволяет идентифицировать его, т.е. построить его модель, состоящую, например, из последовательного соединения типовых звеньев. Для этого ЛАЧХ рассматриваемой системы аппроксимируют отрезками линий с наклонами, кратными – 20 дБ/дек, и по точкам их пересечения и поведению ЛАЧХ и ЛФЧХ на нижних частотах определяют тип и параметры звеньев. Принцип построения последовательной модели некоторой системы по ее известным ЛАЧХ и ЛФЧХ основывается на том, что ЛАЧХ и ЛФЧХ последовательного соединения звеньев равны суммам ЛАЧХ и ЛФЧХ этих звеньев. Рассмотрим порядок идентификации системы, характеристики которой представлены на рис.3.7. ЛАЧХ идентифицируемой системы (красная кривая) на рис. 3.7 аппроксимирована отрезками линий (салатные) с наклонами, кратными – 20 дБ/дек.

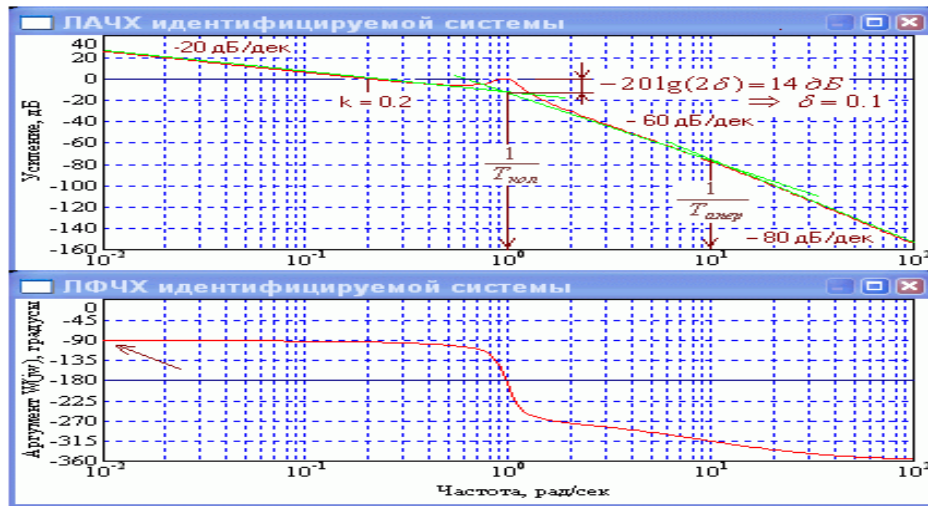


Рис.3.7. Определение модели системы, составленной из последовательных типовых звеньев, по ее частотным характеристикам

В первую очередь следует обратить внимание на низкочастотную область характеристик, которая определяет наличие и количество интеграторов в модели. Если в НЧ области ЛАЧХ проходит горизонтально, то интеграторы в модели отсутствуют, и общий коэффициент усиления модели определяется уровнем, на котором она проходит: $L(0) = 20 \lg(k)$. Если наклон ЛАЧХ в НЧ области равен -20 дБ/дек, то интегратор в системе один, если наклон равен $-n \cdot 20$ дБ/дек, то интеграторов n .

Коэффициент усиления системы с интеграторами определяется частотой, при которой продолжение НЧ области ЛАЧХ, в которой она имеет наклон, кратный -20 дБ/дек, или она сама пересекает уровень 0 дБ. В случае одного интегратора, как на рис 3.7, коэффициент усиления просто равен частоте, на которой ЛАЧХ пересекает уровень 0 дБ: $k = 0.2$ 1/сек.

Итак, коэффициент усиления системы, ЛАЧХ которой показана на рис.3.7, равен $k = 0.2$ 1/сек и в системе есть один интегратор. О наличии одного интегратора свидетельствует и НЧ - область ЛФЧХ: характеристика проходит на уровне -90° .

Линии аппроксимации пересекаются на частоте 1.0 рад/сек, причем наклон изменяется сразу на -40 дБ/дек (он был -20 , а стал -60 дБ/дек). Это говорит, что на частоте 1.0 рад/сек уже «вступило в дело» колебательное звено. Этот вывод под-

тверждается и тем, что ЛАЧХ на этой частоте имеет пик. Величина этого пика позволяет определить декремент затухания δ колебательного звена, а его частота – постоянную времени звена $T_{\text{кол}} = 1$ рад/сек (см. рис.3.7).

Поскольку полный коэффициент усиления всей системы уже найден, в нем учтены коэффициенты усиления всех звеньев, то коэффициент усиления колебательного звена модели равен 1.

При дальнейшем увеличении частоты ЛАЧХ испытывает еще один излом, на частоте 10 рад/сек. Наклон ЛАЧХ здесь изменяется на -20 дБ/дек (с -60 на -80 дБ/дек), что свидетельствует о наличии в последовательной модели апериодического звена с коэффициентом усиления, равным 1, и постоянной времени, равной $T_{\text{апер}} = 0.1$ сек. Поскольку ЛФЧХ на высоких частотах стремится к уровню -360° , то в последовательной модели больше нет других звеньев (интегратор изменяет аргумент ККП на -90° , колебательное звено на -180° , апериодическое на -90° , в сумме получается -360°).

Таким образом, структура модели для рассматриваемого диапазона частот установлена. Последовательная модель идентифицированной системы состоит из усилителя, интегратора, колебательного и апериодического звеньев (рис.3.8)



Рис.3.8. Последовательная модель идентифицированной системы

1.4. Примеры устройств, моделируемых типовыми звеньями, характеристики основных типовых звеньев

1 Пропорциональное звено: усилитель постоянного тока (УПТ); рычаги, редукторы. При сравнительно медленных изменениях воздействий инерционностью таких устройств можно пренебречь и считать их безинерционными.

2. *Интегратор*: устройства, имеющие вал, частота вращения которого пропорциональна подаваемому на устройство сигналу: двигатели постоянного тока и внутреннего сгорания и др. Угол поворота вала пропорционален интегралу от частоты, а следовательно, и от напряжения на якоре. Поэтому, например, все заслонки и задвижки в трубах, приводимые в действие двигателями, частота вращения которых пропорциональна подаваемому на них воздействию (напряжению, газу), могут в первом приближении рассматриваться как интеграторы. Аналоговые интеграторы - это УПТ, охваченные глубокой отрицательной обратной связью (интегратор Vissim'a это виртуальный аналог такого интегратора). Различные емкости, например, гидравлические и электрические.

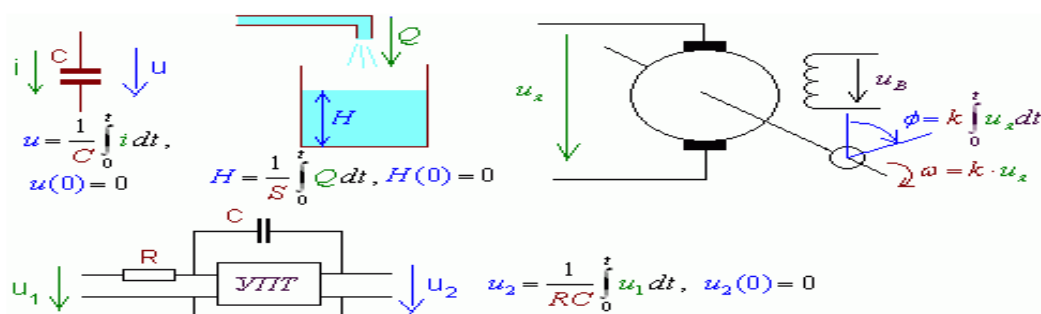
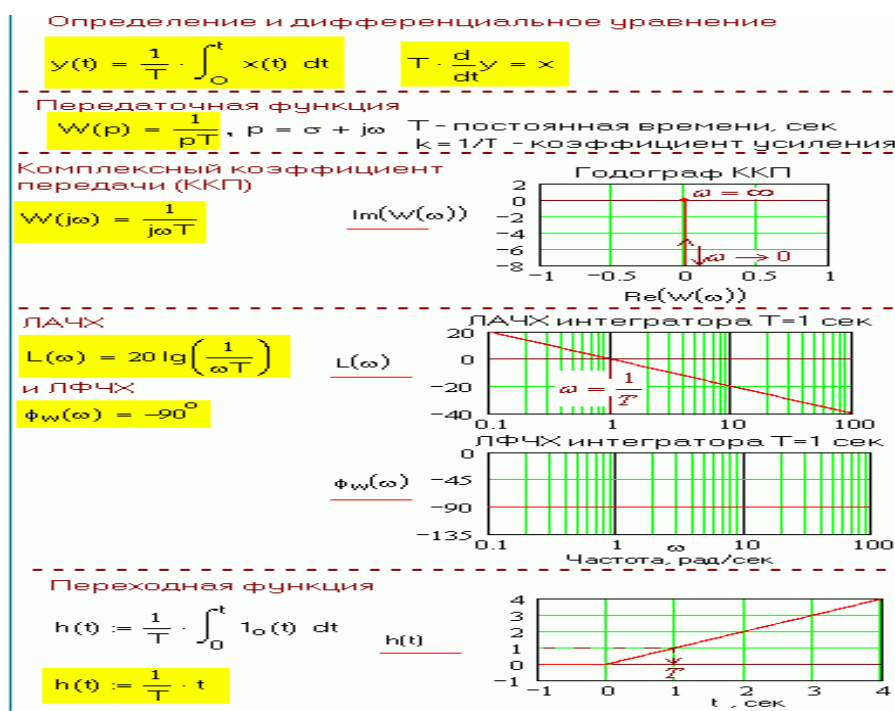


Рис.3.9. Примеры устройств, которые в первом приближении могут считаться интеграторами

Характеристики интегратора.



3. Аperiodическое звено: RC-цепь, усилитель постоянного тока, амортизатор автомобиля.

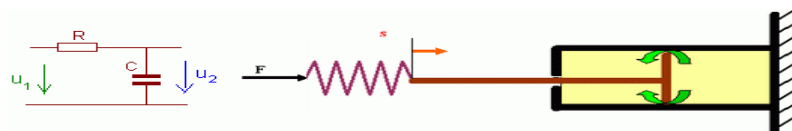
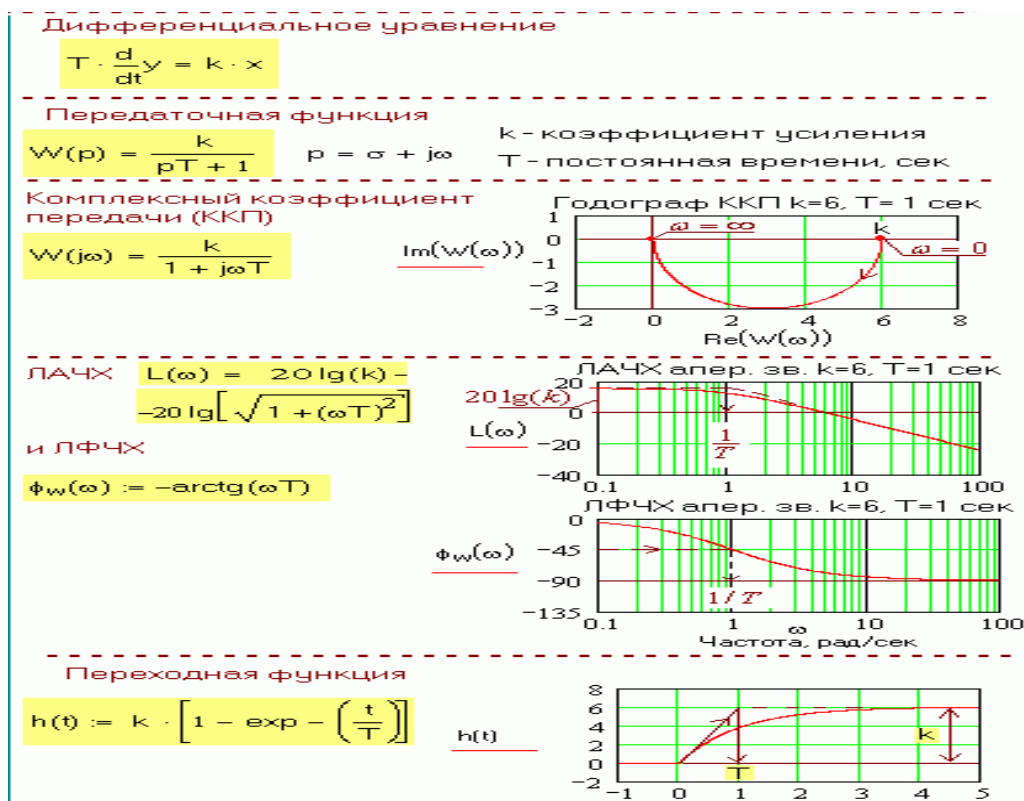


Рис. 3.10. Примеры аperiodических звеньев: RC-цепь и демпфер (амортизатор)

Характеристики аperiodического звена.



4. Аperiodическое звено второго порядка: RC-цепь с двумя емкостями, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением.

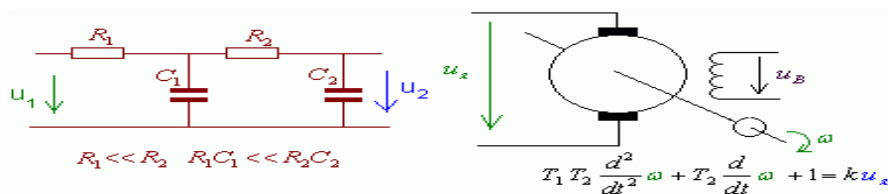
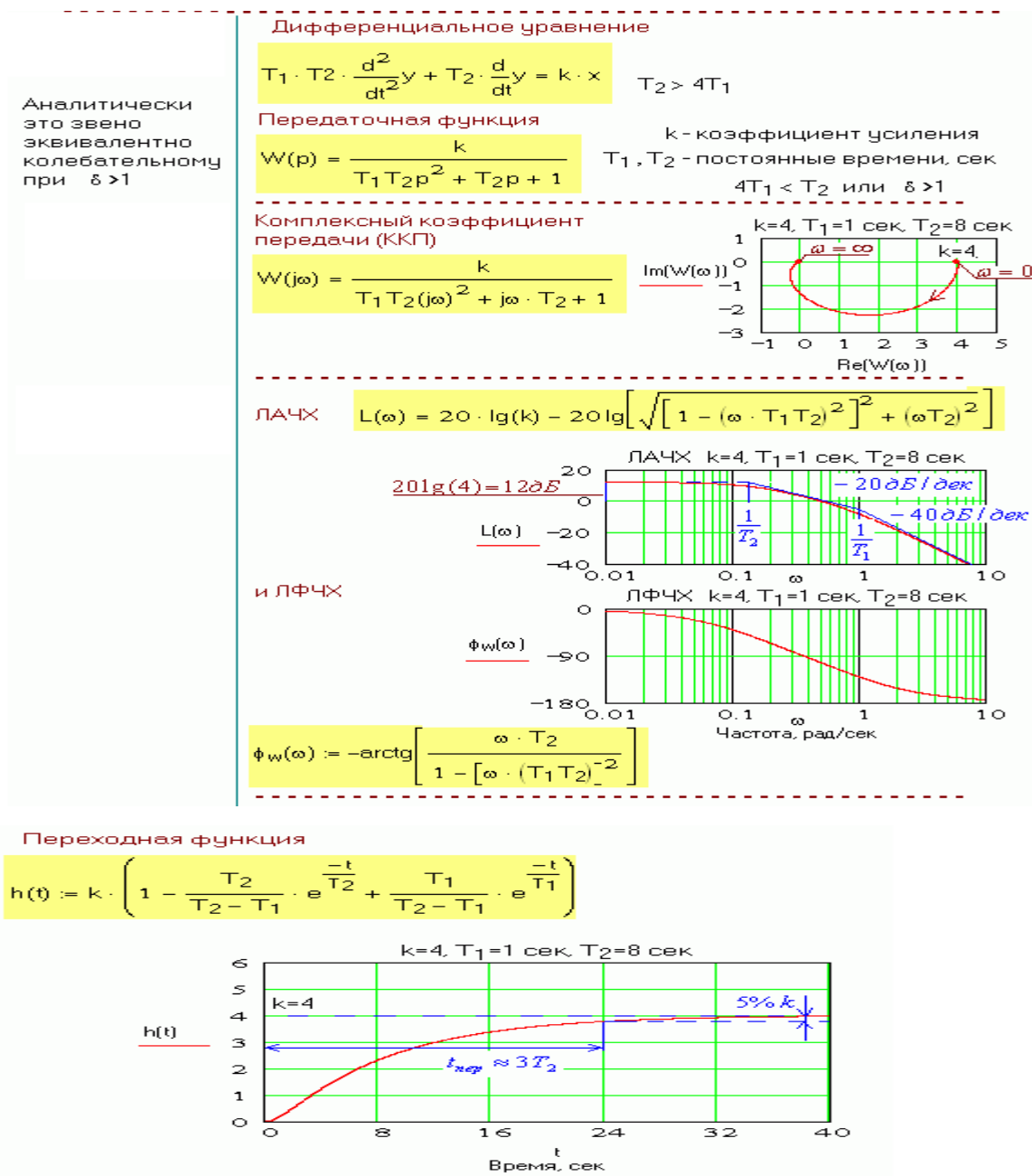


Рис. 3.11. Примеры аperiodических звеньев второго порядка: RC-цепь и двигатель постоянного тока (входная величина - напряжение на якоре, выходная - частота вращения вала)

Характеристики апериодического звена второго порядка



5. *Колебательное звено*: резонансный усилитель, в котором нагрузкой усиленного элемента является резонансный контур, просто резонансный контур, механические колебательные устройства - гравитационные и пружинные маятники.

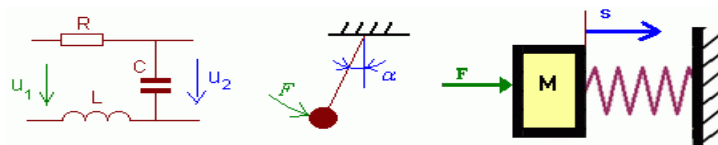
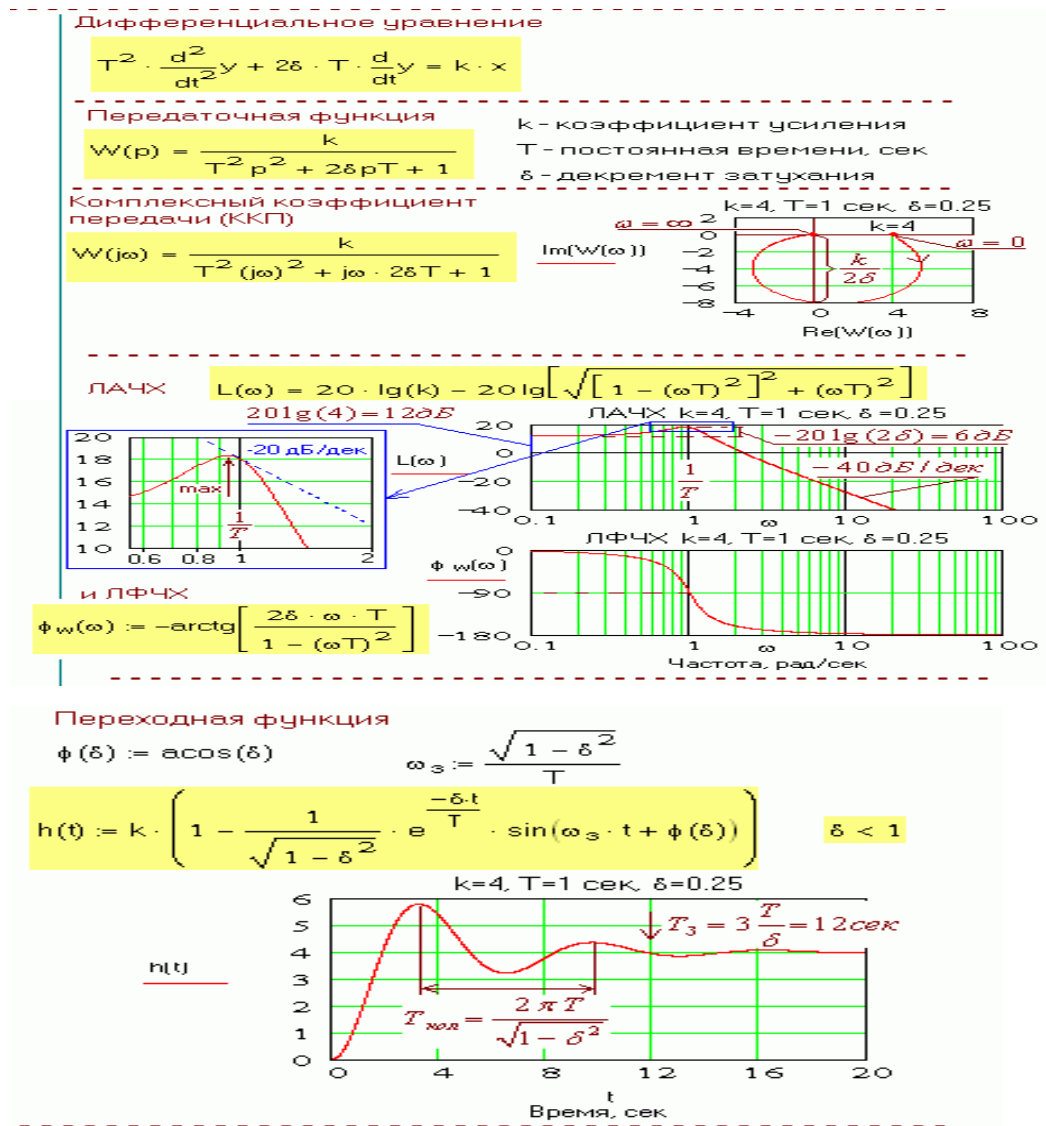


Рис. 3.12. Примеры колебательных звеньев: последовательный RLC контур, маятник и пружинный осциллятор

Характеристики колебательного звена.

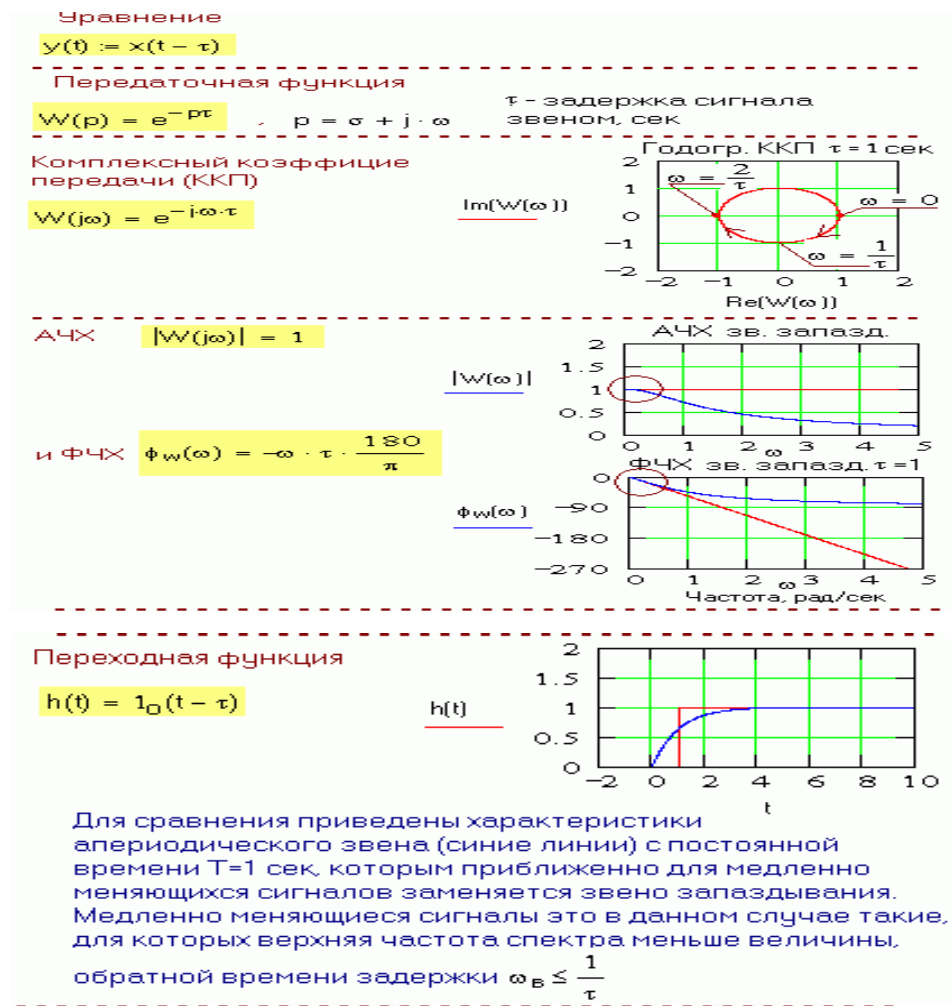


6. *Звено запаздывания*: протяженные устройства, время движения в которых сигналов или материалов от входа к выходу составляет заметную величину: транспортеры, длинные электрические линии. Типичные промышленные объекты регулирования наряду с инерционностью обладают и запаздыванием.



Рис. 3.13. Пример звена запаздывания: транспортер. Материал ссыпается с транспортера через некоторое время после того, как попадает на его ленту

Характеристики звена запаздывания



2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 3

2.1. Содержание работы.

1. Провести исследование интегратора.
2. Освоить технику построения частотных характеристик в программе Vissim.
3. Установить, как влияет постоянная времени или коэффициент усиления интегратора на его ЛАЧХ и ЛФЧХ.
4. Установить, как влияют постоянная времени T и коэффициент усиления k апериодического звена на его ЛАЧХ и ЛФЧХ.
5. Проверить связь параметров колебательного звена и вида его частотных характеристик.
6. Сделать выводы.

2.2. Исследование интегратора

1. Запустить *Vissim*. Установить кириллицу: *View* (Вид) - *Fonts* (Шрифты) - выбрать шрифт *MS Sans Serif*, кириллица, размер 8). Выбрать красивое оформление блоков и линий связи: *View* (Вид) - *Presentation Mode* (Режим презентации).

2. Создать лабораторный стенд (рис.3.14): вынести на рабочее поле *Vissim*'а генератор ступенчатого сигнала (*Blocks - Signal Producer - step*), усилитель (*Blocks - Arithmetic - gain*), интегратор (*Blocks - Integration - Integrator*) и осциллограф (*Blocks - Signal Consumer - plot*), и соединить их. Сделать надписи.

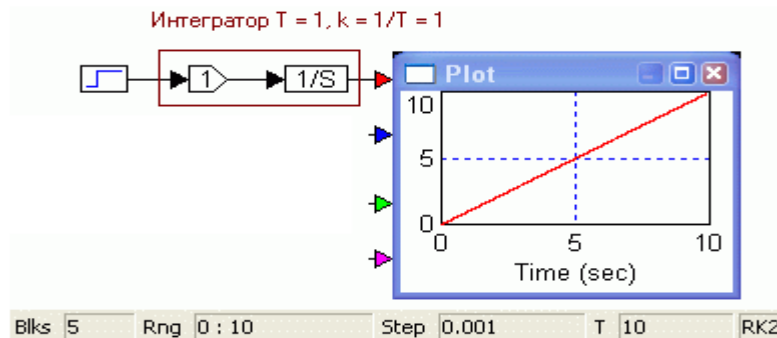


Рис. 3.14. Стенд для построения частотных характеристик интегратора

Примечание. Вход и выход фрагмента схемы, для которого в *Vissim*'е строится частная характеристика, должны быть присоединены к другим блокам, например в данном случае к генератору и осциллографу соответственно.

3. Получение графиков частотных характеристик. Запустить моделирование щелчком по кнопке с зеленым треугольником "Пуск (Go)" на панели инструментов *Vissim*'а. Выделить фрагмент схемы с усилителем и интегратором, нажав левую кнопку мыши за его пределами и расширив рамку до включения в нее только этих блоков. Отпустить кнопку. Блоки станут черными. В меню выбрать: *Analyze* (Анализируй) --> *Frequency Response* (Частотный отклик) (рис 3.15).

На рабочем пространстве появятся два графика, вычисленные *Vissim*'ом и представляющие собой ЛАЧХ и ЛФЧХ выделенного фрагмента схемы. Растянуть их и поместить друг под другом (рис.3.16.). ЛАЧХ (*Bode-Magnitude*) должна находиться сверху, а ЛФЧХ (*Bode-Phase*) – ниже.

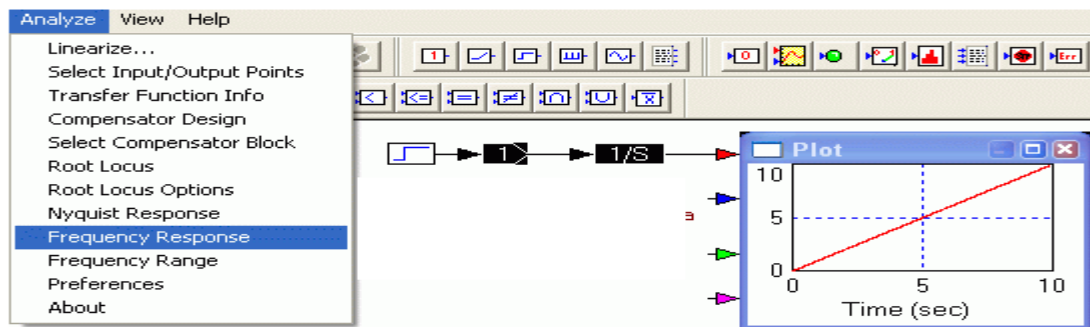


Рис. 3.15. Вызов частотных характеристик выделенного фрагмента схемы

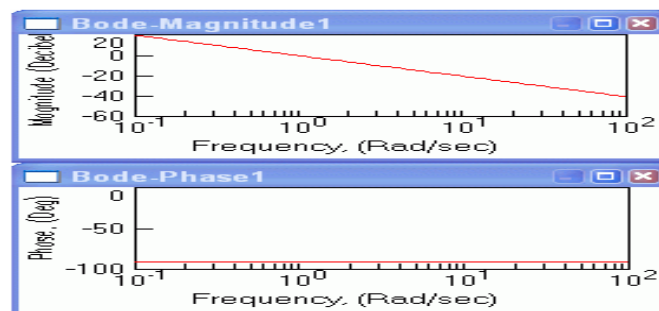


Рис.3.16. Исходный вид частотных характеристик интегратора

Примечание. Частотный диапазон, в котором Vissim представляет характеристики, зависит от его настроек. С практической точки зрения удобно, когда диапазон составляет 2 - 4 декады, т.е. частота по горизонтальной оси графика изменяется в 100 - 10000 раз. Если при выполнении настоящей работы частотный диапазон построенных Vissim'ом частотных характеристик отличается от показанного на рис.2.3, то следует его изменить, выбрав в меню *Analyze --> Frequency Range* (Частотный диапазон) (рис. 3.17.) Частота будет меняться от 0.1 до 100 рад/сек, т.е. на 3 декады. После этого, нужно снова выполнить процедуру построения частных характеристик.

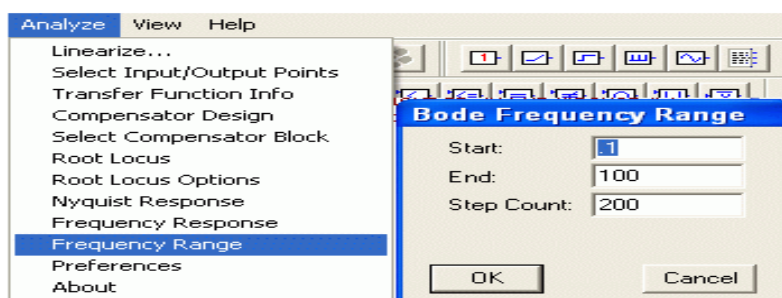


Рис. 3.17 Задание пределов частотной характеристики

4. Оформить графики частотных характеристик. Ввести сетки координат: навести курсор на центр графика *plot* --> двойной щелчок --> вкладка *Options* (Параметры) *Grid Lines* (Сетка координат) - установить флажок. Нажать ОК. Только на верхнем графике, для ЛАЧХ, установить по оси ординат значение в децибелах (там же, вкладка *Options* флажок *Decibel Y*) (рис.3.18.). Флажками отмечены сетка координат (*Grid Lines*) по обеим осям и децибелы по вертикальной оси *Y*.

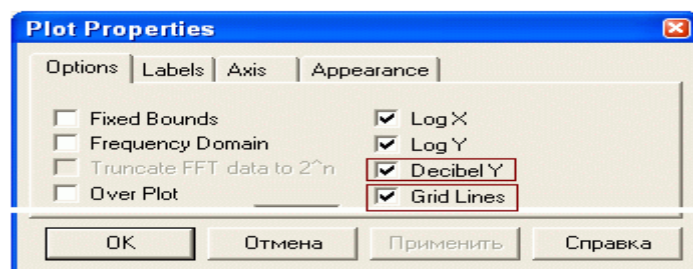


Рис.3.18. Задание свойств графика

Сделать подписи графиков, кривых, осей (двойной щелчок по центру окон характеристик) (рис.3.19).

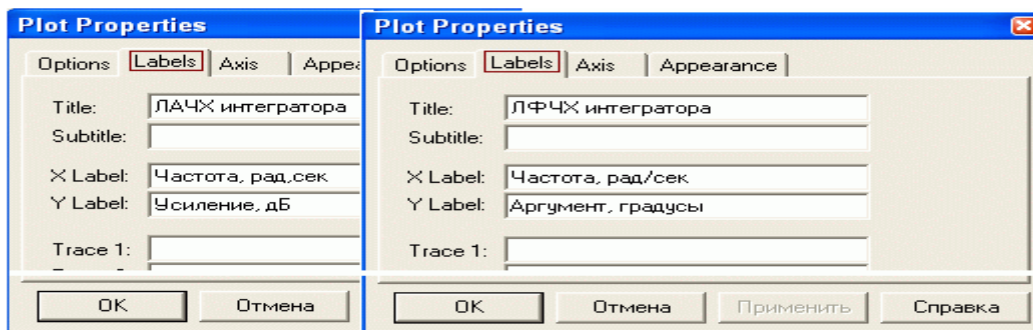


Рис. 3.19. Подписи для графиков частотных характеристик (совмещены два отдельных окна)

Примечание. На некоторых компьютерах Vissim не правильно отображает надписи вертикальных осей. В таком случае нужно поменять шрифт (выбрать в меню View - Fonts) на Times New Roman - кириллица. Кроме того, при открытии и закрытии окна свойств графика, подпись оси частот заменяется Vissim'ом на Time (sec). Чтобы это исправить, нужно вновь ввести в текстовое поле для X Label надпись Частота, сек, а затем щелкнуть на другом поле ввода текста, например на Y Label, и только после этого щелкнуть по кнопке ОК.

Для нижнего графика, ЛФЧХ, в свойствах, на вкладке *Axis* (Оси) установить значение *Y Lower Bound* (Нижнее значение по оси *Y*) равным -1800 градусов. Поставить флажок *Fixed Tick Count* (Фиксированное число делений), установить значение

Y Divisions (Деления по оси Y) равным 4. В этом случае будут отмечены как линия - 90^0 , так и линия -180(рис.3.20).

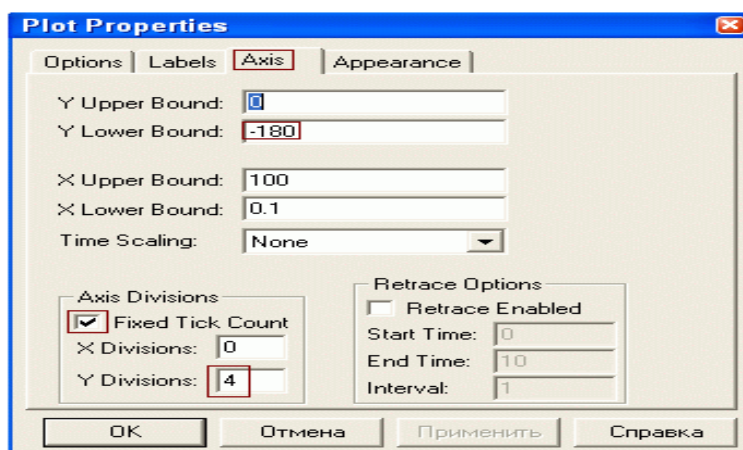


Рис. 3.20. Установка предела и числа делений вертикальной оси ЛФЧХ

Нажать ОК. Характеристики интегратора при коэффициенте усиления $k=1$ представлены на рис.3.21. При таком размере графиков точность чтения величины усиления 1 - 2 дБ, аргумента - 2 -3 градуса, что достаточно для практики.

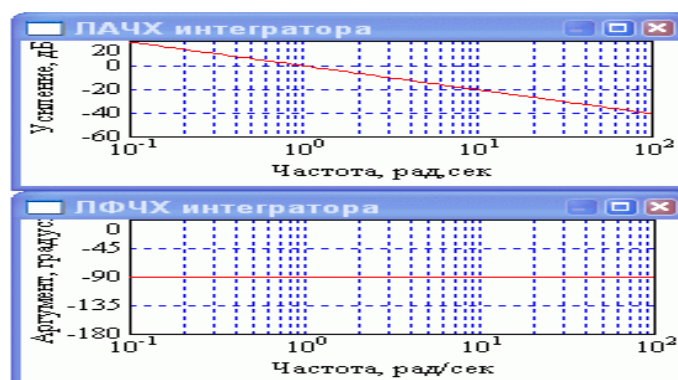


Рис. 3.21. Окончательный вид частотных характеристик интегратора при $k=1$

Для повышения точности чтения значений каждое из окон можно развернуть на весь экран, а кроме того, использовать кнопку *Read Coordinates* на вкладке *Options* свойств графика.

5.Сохранение характеристик. Частотные характеристики *Vissim'a* можно сохранить или как рисунок, или как таблицу значений в текстовом файле.

При наличии на экране окна *Vissim'a* с частотными характеристиками, нажать клавишу клавиатуры *Print Screen* (Снимок экрана). Открыть программу *Paint* (Пуск -

-> программы --> Стандартные --> *Paint*). Выбрать: Правка --> Вставить. Вырезать в *Paint*'е лишние части и нужное сохранить в личной папке в формате *gif* и распечатать. В *Paint*'е можно сделать и дополнительную прорисовку рисунка, например, провести коричневым цветом ось частот и нанести дополнительные надписи.

6. Исследование зависимости характеристик интегратора от величины постоянной времени T (или, что тоже, от коэффициента усиления k , поскольку $k = 1$. В модели, снимок которой приведен на рис.3.14, задать последовательно значения коэффициента усиления равными 0.2, 1.0 и 5.0, и для каждого построить частотные характеристики интегратора. Поместить их на одном рисунке или рядом, или друг под другом, и проанализировать.

Примечание. После каждого изменения параметров блоков модели программу Vissim следует запускать на счет щелчком по кнопке "Пуск" (Go) и только затем выделять блоки и вызывать частотные характеристики.

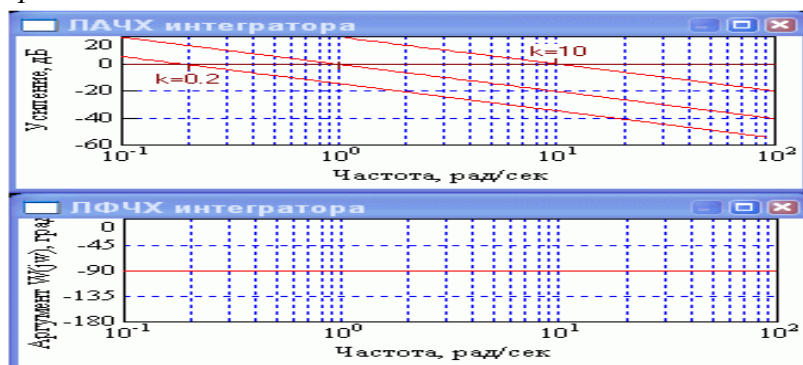


Рис.3.22. Пример частотных характеристик интегратора при $k = 0.2, 1.0, 10$

В работе следует выполнить построение для $k = 0.2, 1.0$ и 5.0 (рис.3.23).

Записать формулы комплексного коэффициента передачи интегратора, его ЛАЧХ и ЛФЧХ. Вычислить несколько значений ЛАЧХ и ЛФЧХ интегратора для $k = 0.2$ и $k = 10$ и проставить в *Paint*'е точки на ЛАЧХ и ЛФЧХ.

Проанализировать характеристики интегратора в соответствии с поставленными выше вопросами. Сделать выводы и записать их в отчете.

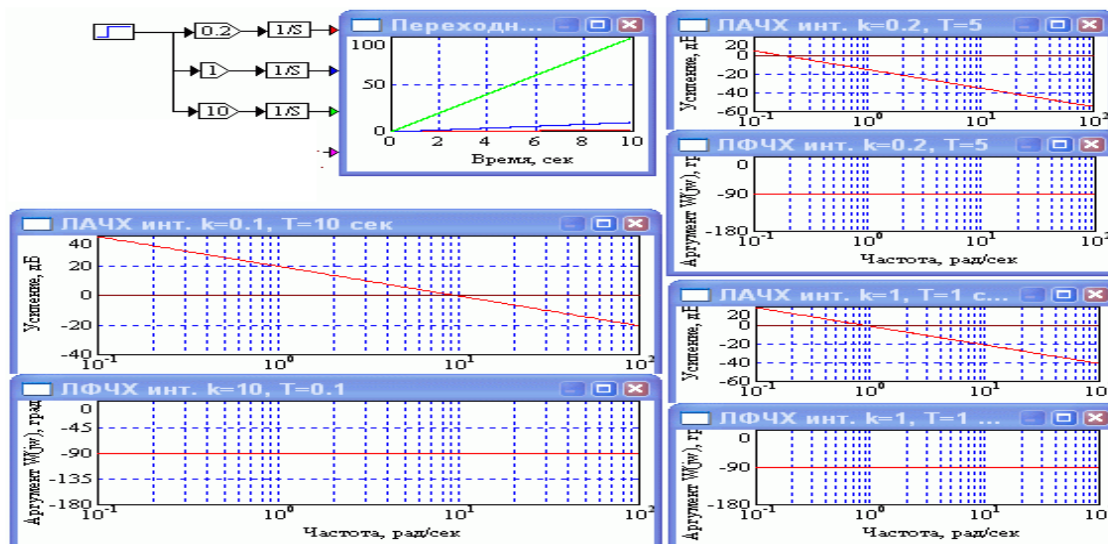


Рис. 3.23. Пример частотных характеристик интегратора для разных значений коэффициента усиления

2.3. Исследование апериодического звена

1. Создать лабораторный стенд. Запустить *Vissim*. Вынести на рабочее поле *Vissim*'а генератор синусоидального сигнала (*Blocks – Signal Producer – sinusoid*), линейный блок (*Blocks – Linear System – transfer Functions*), усилитель (*Blocks – Arithmetic – gain*), а также осциллограф (*Blocks – Signal Consumer – plot*), и соединить их. Сделать надписи (рис. 3.24).

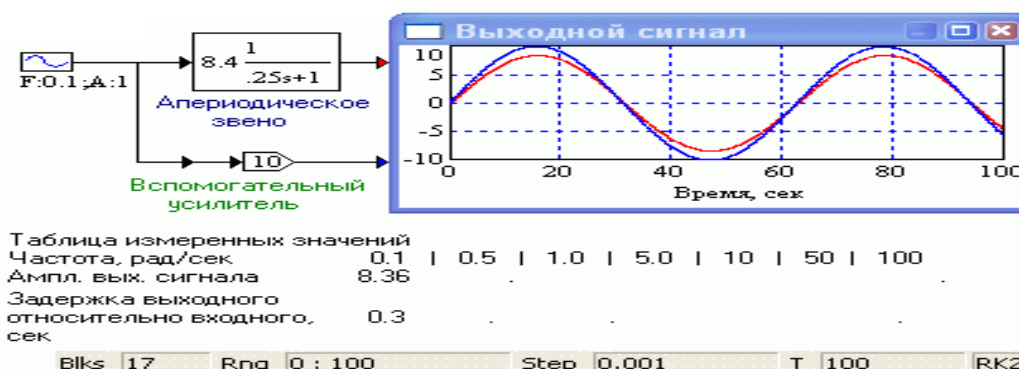


Рис.3.24. Примерный вид лабораторного стенда для снятия частотных характеристик апериодического звена

Стенд состоит из перестраиваемого генератора синусоидальных колебаний, блока апериодического звена и осциллографа, используемого как вольтметр (для измерения амплитуды), так и как фазометр (для измерения сдвига фаз), а также

стенд имеет вспомогательный усилитель. Здесь же, для удобства регистрации результатов, размещена таблица для записи задаваемых и измеряемых величин, выполненная с помощью двух блоков Vissim'a label (надписи). Стенд используется следующим образом. Задается, для упрощения вычислений модуля ККП, единичная амплитуда синусоидального сигнала генератора, а частота последовательно меняется от 0.1 до 100 рад/сек. Каждый раз измеряются и регистрируются амплитуда выходного сигнала и его отставание по времени от входного.

Внимание. Для правильного определения фазовой задержки отставание выходного сигнала относительно входного следует измерять после окончания переходного процесса, обусловленного подачей синусоиды на апериодическое звено. Это значит, что задержка должна измеряться по времени пересечения сигналами нулевого уровня на втором, третьем или еще более поздних периодах, в зависимости от частоты подаваемого на звено сигнала генератора. Так, на рис.2.12. частота генератора относительно низкая, поэтому запаздывание можно измерять уже в начале второго периода, поскольку переходный процесс апериодического звена при постоянной времени равной $T = 0.25$ сек, длится меньше секунды.

Переходный процесс может быть сдвинут влево и убран с экрана осциллографа, если в настройках выбрать начальный момент моделирования Start равным – 10 - 100 сек, а в настройках осциллографа начальное значение горизонтальной оси принять равной 0. Вспомогательный усилитель используется для поддержания амплитуды входного сигнала, подаваемого на осциллограф примерно такой же величины, что и значение выходного. Это упрощает измерение запаздывания и повышает точность измерений.

2. Провести измерение и вычисление значений частотных характеристик. Установить значения параметров апериодического звена $k = 0.2$, $k = 1.0$ и $k = 5$ постоянную времени $T = 0.25$ сек (рис 3.25)

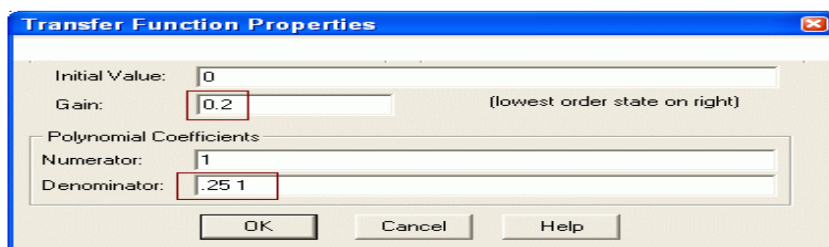


Рис. 3.25. Задание параметров апериодического звена

Проверить, что амплитуда синусоиды, генерируемой генератором, равна 1, и установить начальную частоту равной 0.1 рад/сек.

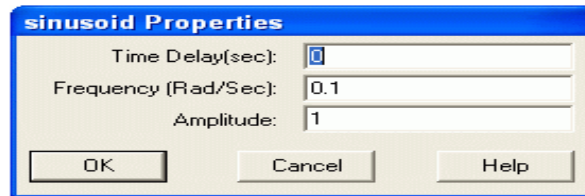


Рис.3.26 Задание частоты (Frequency) и амплитуды синусоиды генератора

В свойствах моделирования (*Simulate – Simulation Properties* на вкладке *Range*) установить время начала моделирования *Start* 0 сек и величину шага *Step Size* 0.001 сек, а также для начала время конца моделирования *End* 100 сек. (рис 3.27).

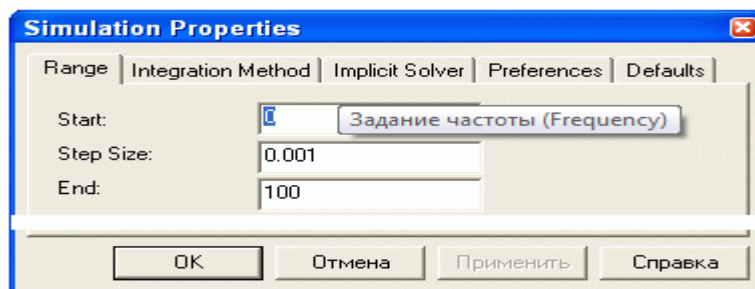


Рис. 3.27. Задание свойств моделирования

По мере увеличения частоты время конца моделирования *End* придется уменьшать. Подобрать значение коэффициента усиления k_{yc} вспомогательного усилителя (двойной щелчок) такое, чтобы при запуске моделирования амплитуды входного и выходного сигналов были примерно одинаковыми, например, взять для начала $k_{yc} = 0.2$.

Измерить на осциллограмме и занести в таблицу на рабочем поле Vissim'a и в документе Word'a значения амплитуды выходного сигнала, запаздывания выходного относительно входного, а также для контроля, величину периода синусоиды. Запаздывание нужно измерять в правой половине экрана, когда переходный процесс закончился.

Примечание. Виртуальный лабораторный стенд позволяет проводить измерения с чрезвычайно высокой точностью, не достижимой на практике. При проведении реальных измерений обычно достаточно точности в 1 – 3 %. Именно с такой точностью (2 - 4 значащих цифры) и следует прочитывать результаты и заносить их в таблицы, а проводить вычисления с этими данными следует, удерживая на одну- две значащие цифры больше. Vissim позволяет построить и более точную модель реального лабораторного стенда, результаты измерений в которой будут

отягощены ошибками. Для этого может быть использован генератор случайных сигналов (Blocks – Random Generator - gaussian). Для повышения точности отсчетов можно развернуть окно осциллографа на весь экран. Кроме того, можно увеличить фрагмент экрана, проводя по диагонали фрагмента курсором, удерживая левую кнопку и клавишу Ctrl. Для восстановления исходного вида осциллограммы, достаточно удерживая клавишу Ctrl щелкнуть правой кнопкой по экрану осциллографа (рис 3.28). Кроме того, можно щелкнуть дважды по центру графика, и в появившемся окне щелкнуть по кнопке Read Coordinates (Чтение координат). Появится перекрестие, которое можно поместить на точку, координаты которой следует прочесть, и щелкнуть левой кнопкой. Координаты будут отображены в специальном поле. Повторный щелчок по графику убирает перекрестие.

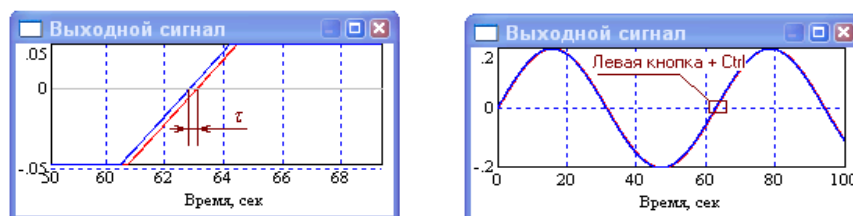


Рис. 3.28. Увеличение фрагмента осциллограммы

По мере увеличения частоты синусоиды генератора необходимо уменьшать и время моделирования, с тем, чтобы на осциллографе отображалось 3 – 5 периодов. Это упростит измерение запаздывания. Кроме того, следует подбирать и усиление k_{yc} вспомогательного усилителя с тем, чтобы амплитуды входного и выходного сигналов были примерно одинаковыми (например, отличались бы не более, чем в два раза).

Вычислить значения АЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ. Равны ли частоты сигналов, отображаемых осциллографом, вычисленные в таблице 3.1, частотам, задаваемым в генераторе?

Таблица 3.1- ЛАЧХ и ЛФЧХ апериодического звена $k = 0.2$, $T = 0.25$ сек

Задается	Частота ω , рад/сек	0.1	0.5	1.0	5	10	50	100	Примечание
Измеряются	A_{max}								Ампл. вых. сигн.
	τ , сек								Задержка
	T , сек								Период
Вычисляются	$\omega = 2\pi/T$								Частота, рад/сек
	$ W(\omega) = A_{max} / 1$								АЧХ
	$20\lg(W(\omega))$								ЛАЧХ
	$\varphi_\omega = -360^\circ \tau T$								ФЧХ и ЛФЧХ

Выполнив следующий пункт задания, нужно будет проставить в полученных там графиках точки, соответствующие значениям, вычисленным в табл3.1.

3. Определить влияние коэффициента усиления апериодического звена на его частотные характеристики. На лабораторном стенде задать значения параметров апериодического звена $k = 0.2$, $T = 0.25$ сек, выделить блок и вызвать ЛАЧХ и ЛФЧХ (Analyze – Frequency Response). Оформить графики.

Задать значения параметров апериодического звена $k = 1.0$, $T = 0.25$ сек, $k = 5.0$, $T = 0.25$ сек и построить частотные характеристики (рис.3.29).

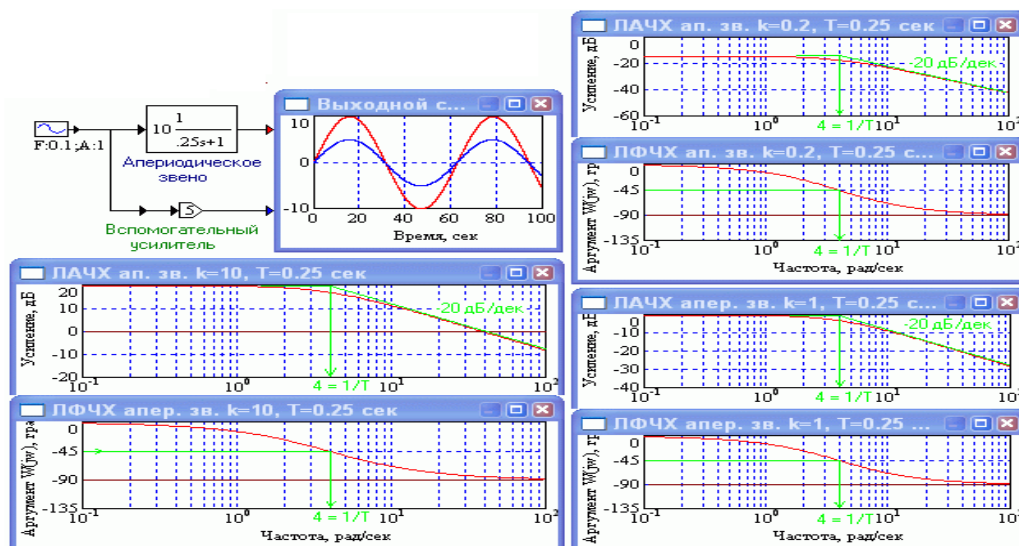


Рис.3.29. Пример оформления частотных характеристик апериодического звена для $k = 0.2$, 1.0 и 10.0 .

Как видно на рис. 3.29, частота сопряжения линий с наклоном 0 и -20 дБ/дек, аппроксимирующих ЛАЧХ, равна $1/T$, где T – постоянная времени апериодического звена, усиление на нижних частотах звена равно $20 \lg(k)$. Т.о. чем больше коэффициент усиления звена, тем выше проходит его ЛАЧХ на нижних частотах. Наклон ЛАЧХ апериодического звена на высоких частотах составляет -20 дБ/дек. Аргумент ККП апериодического звена на частоте $1/T$ равен -45° и с увеличением частоты стремится к -90° . Пример помещения трех частотных характеристик на одном графике представлен на рис.3.30. Это упрощает анализ.

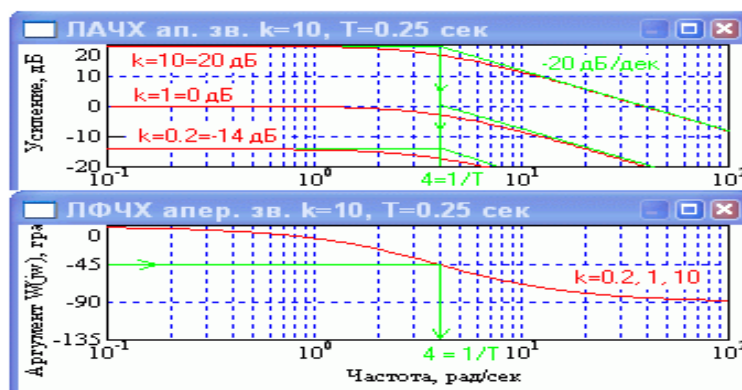


Рис.3.30. Пример помещения трех частотных характеристик на одном графике.

В работе следует сделать построение для $k = 0.2, 1.0$ и 5.0 .

Как видно, аргумент ККП (т.е. ЛФЧХ) аperiodического звена не зависит от его коэффициента усиления.

Взять из табл. 3.1 предыдущего пункта значения и проставить их в Paint'е на частотных характеристиках. Сделать выводы о соответствии характеристик, получаемых в Vissim'е экспериментально и вычисляемых.

Вычислить значения частотных характеристик в нескольких точках по формулам на калькуляторе и отобразить их на частотных характеристиках, полученных в Vissim'е. Сделать вывод о соответствии результатов, получаемых в Vissim'е.

Сохранить рисунки частотных характеристик, полученных в Vissim'е .

4. Определить влияние постоянной времени аperiodического звена на его частотные характеристики. Модифицировать лабораторный стенд (см. рис. 3.31): коэффициент усиления у всех трех аperiodических звеньев сделать равным $k = 10$, а постоянные времени установить для первого 0.25 сек, у второго 1.0 сек и у третьего 10.0 сек.



Рис. 3.31 Модифицированный стенд для изучения ЧХ аperiodического звена

Осциллограммы не совпадают потому, что переходный процесс звеньев длится разное время, и фазовые запаздывания на заданной частоте 0.1 рад/сек у них разные, поскольку их постоянные времени разные.

Поскольку постоянные времени звеньев существенно, почти в 10 раз отличаются, то для более полного представления характеристик на одном графике целесообразно увеличить диапазон частот, в котором будут построены характеристики. Для этого выбрать в меню *Analyze* (Анализировать) --> *Frequency Range* (Частотный диапазон) и в окне диалога задать начальное значение *Start* равным 0.01, а конечное *End* оставить равным 100. Это позволит отобразить характеристики на четырех декадах изменения частоты.

Построить частотные характеристики для звеньев с постоянными времени $T = 0.25, 1.0$ и 10.0 сек, и поместить их на одном рисунке (см. рис.3.32)

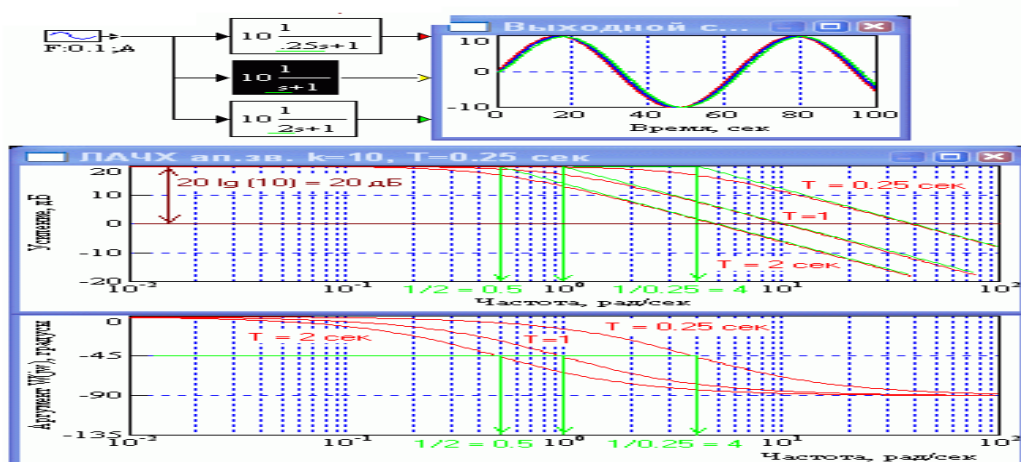


Рис.3.32. ЛАЧХ и ЛФЧХ апериодического звена при $k = 10$ и $T = 0.25, 1.0, 2.0$ сек

Проанализировать результаты, ответив на вопросы:

Как ведут себя ЛАЧХ и ЛФЧХ апериодического звена с изменением постоянной времени? Как проходят линии аппроксимации ЛАЧХ на низких и на высоких частотах? Как связана частота точки сопряжения линий аппроксимации ЛАЧХ и постоянная времени апериодического звена? К каким значениям стремится ЛФЧХ на низких и на высоких частотах?

Вычислить значения частотных характеристик для нескольких точек по формулам на калькуляторе и отобразить их на частотных характеристиках, полученных

в *Vissim*'е. Сделать вывод о соответствии результатов, получаемых в *Vissim*'е и по формулам.

2.4. Исследование колебательного звена

1. Создать лабораторный стенд. Вынести на рабочее поле *Vissim*'а генератор ступенчатого сигнала (*Blocks – Signal Producer - step*), 4 линейных блока (*Blocks – Linear System - transfer Functions*), а также осциллограф (*Blocks – Signal Consumer - plot*), и соединить их. Сделать надписи (рис.3.33).

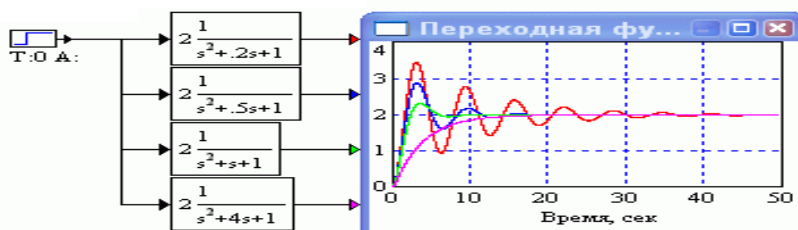


Рис.3.33. Примерный вид лабораторного стенда для построения частотных характеристик колебательного звена

2. Определить связи коэффициента усиления колебательного звена и его частотных характеристик. Задать параметры блоков *transfer Functions* так, чтобы они моделировали колебательные звенья с одинаковыми декрементами затухания $\delta=0.2$, постоянными времени $T=1$ сек, и коэффициентами усиления $k=0.1$, 1 и 2.0 (рис.3.34).

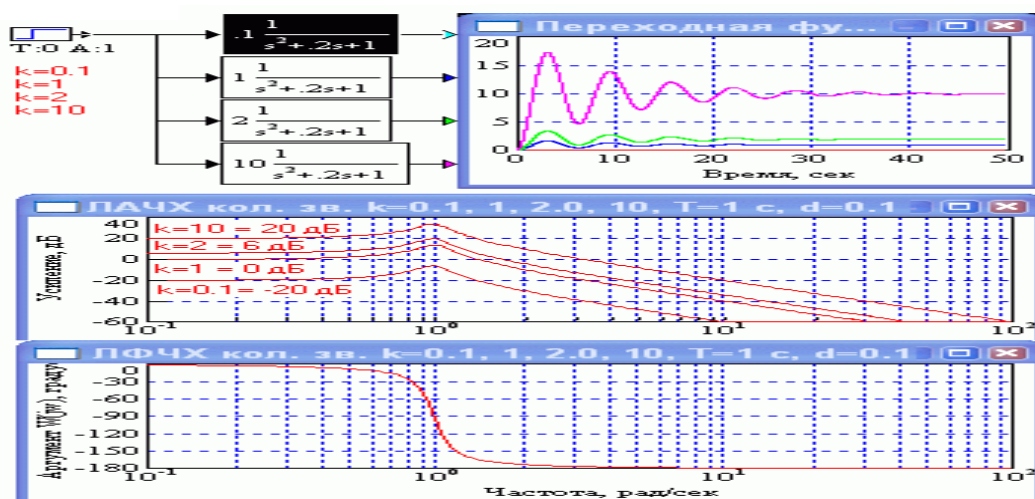


Рис.3.34. Стенд и частотные характеристики колебательных звеньев

Отметим, что здесь декремент затухания принят равным 0.1, а в лабораторной работе следует провести построение характеристик при $\delta = 0.2$ и коэффициентах усиления $k = 0.1, 1$ и 2.0 .

Вычислить значения частотных характеристик в нескольких точках по формулам на калькуляторе и отобразить их на частотных характеристиках, полученных в Vissim'е. Сделать вывод о соответствии результатов, получаемых в Vissim'е с расчетными. Проанализировать результаты, ответив на вопросы.

Как ведет себя ЛАЧХ колебательного звена в зависимости от частоты? Почему ЛАЧХ имеет резонансный пик? Каким параметром определяется высота этого пика? Как ведет себя ЛФЧХ колебательного звена в зависимости от частоты?

Приложить снимки стенда и частотных характеристик к отчету.

3. Определить влияние постоянной времени колебательного звена на его частотные характеристики. Модифицировать параметры лабораторного стенда, приведенного на рис.3.35, зафиксировав коэффициент усиления $k = 4$ и декремент затухания $\delta = 0.2$ и изменяя от блока к блоку постоянные времени $T = 0.2, 1.0, 2.0$ сек

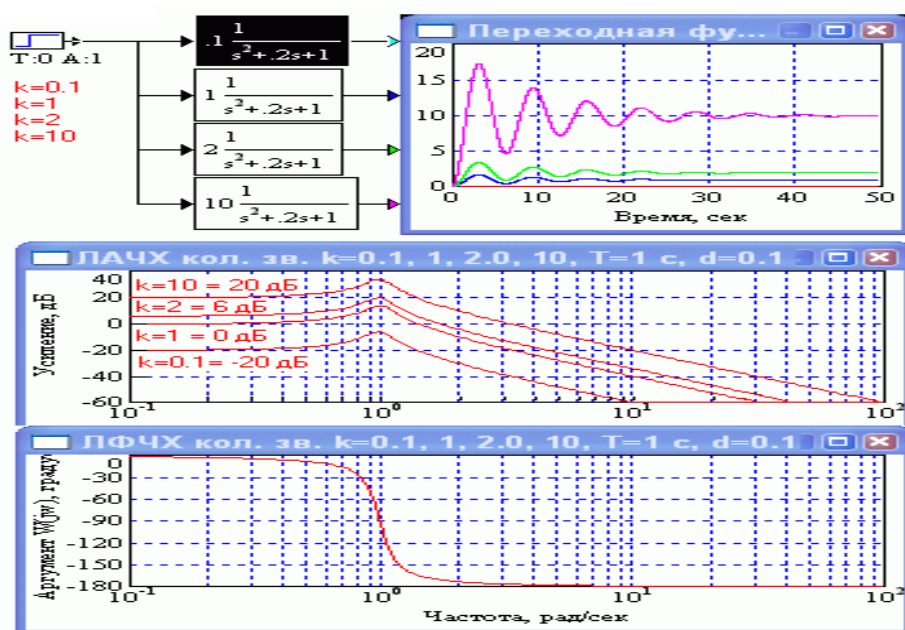


Рис. 3.35. Частотные характеристики колебательных звеньев

В лабораторной работе следует провести построение характеристик для $k = 4$, $\delta = 0.2$ и $T = 0.2, 1.0, 2.0$ сек.

Вычислить значения частотных характеристик в нескольких точках по формулам на калькуляторе и отобразить их на частотных характеристиках, полученных в *Vissim*'е. Сделать вывод о соответствии результатов, получаемых в *Vissim*'е. Проанализировать результаты, ответив на вопросы.

Что происходит с частотными характеристиками колебательного звена при изменении его постоянной времени? На каких частотах по отношению к ЛАЧХ крутизна ЛФЧХ колебательного звена имеет максимальную величину? Соответствуют ли ЛАЧХ и ЛФЧХ, построенные в *Vissim*'е, частотным характеристикам колебательных звеньев? Другими словами, правильно ли строит *Vissim* ЛАЧХ и ЛФЧХ?

Приложить снимки экрана и частотных характеристик к отчету.

4. Определить влияние декремента затухания колебательного звена на частотные характеристики звена. Снимок экрана приведен выше, на рис. 3.33. Задать параметры блоков *transfer Functions*, чтобы они моделировали колебательные звенья с одинаковыми усилениями $k = 4$ и постоянными времени $T = 1$ сек, а декремент затухания δ был равен 0.1, 0.5 и 1.0.

Построить частотные характеристики звеньев и поместить их на одном рисунке (рис. 3.36).

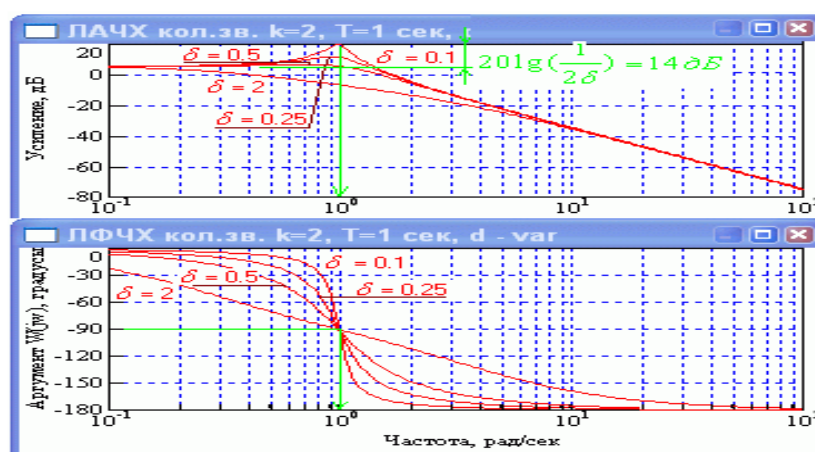


Рис.3.36. ЛАЧХ и ЛФЧХ колебательного звена. Параметры звеньев $k = 2$, $T = 1$ сек, $\delta = 0.1$, 0.25, 0.5 и 2.0

Высота пика ЛАЧХ при $\delta = 0.1$ составляет 14 дБ. В работе следует задать $k = 4$ и $\delta = 0.1, 0.5$ и 1.0 .

Вычислить значения частотных характеристик в нескольких точках по формулам на калькуляторе и отобразить их на частотных характеристиках, полученных в Vissim'е. Проанализировать результаты, ответив на вопросы.

Что происходит с частотными характеристиками колебательного звена при изменении его декремента затухания? Как связаны величина максимума ЛАЧХ колебательного звена и его декремент затухания? Приложить снимки стенда и частотных характеристик к отчёту.

5. Построение годографа комплексного коэффициента передачи (комплексной передаточной функции). Построение годографа ККП выделенного фрагмента схемы осуществляется в Vissim'е подобно тому, как и построение частотных характеристик. В модели предыдущего пункта 4 выделить блок колебательного звена и выбрать в меню *Analyze* (Анализировать) – *Nyquist Response* (Годограф Найквиста) (рис.3.37) Vissim меняет частоту от минус бесконечности до плюс бесконечности, поэтому годограф имеет и верхнюю часть, соответствующую отрицательным частотам.

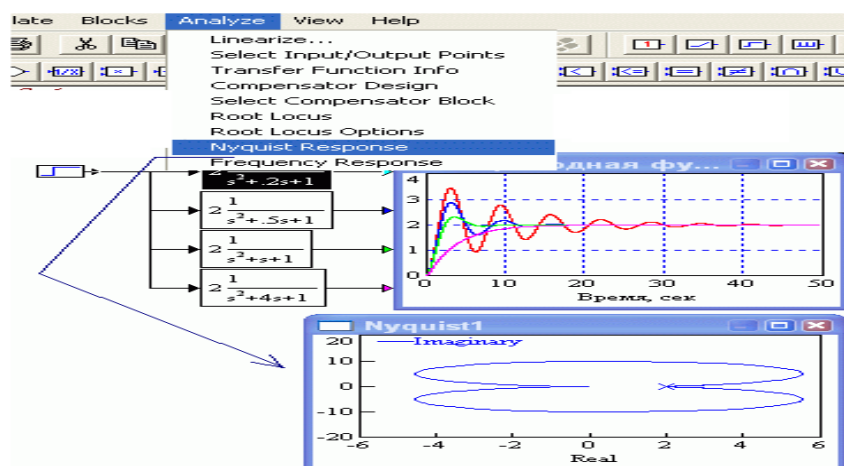


Рис. 3.37. Меню вызова годографа Найквиста и исходный вид окна годографа

Оформить график годографа, выбрав диапазоны и масштабы осей такими, чтобы график занимал большую часть поля окна, подписать оси, избавиться от верхней, зеркальной компоненты графика, соответствующей отрицательным частотам.

там. Последнее можно сделать подбором диапазона оси Y или просто стереть ее в Paint'е. Сделать содержательные надписи.

Примечание. Для правильного отображения аргументов ККП следует выбирать одинаковые масштабы, как по горизонтальной, так и по вертикальной осям.

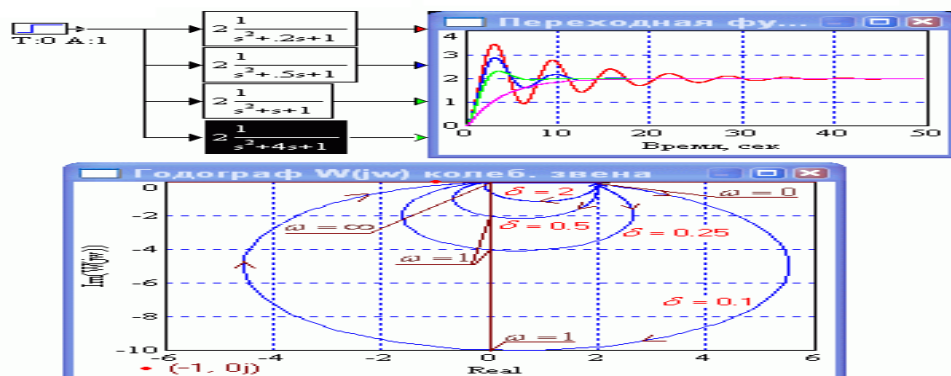


Рис. 3.38. Годографы ККП колебательного звена полученные в Vissim'е и оформленные в Paint'е

Вычислить значения частотных характеристик в нескольких точках по формулам ТАУ на калькуляторе и отобразить их на частотных характеристиках, полученных в Vissim'е. Проанализировать результаты, ответив на вопросы.

Как ведет себя годограф колебательного звена при изменении частоты от нуля до бесконечности? Как связаны коэффициент усиления звена и координаты точки, из которой начинается годограф? Охватывает ли годограф ККП колебательного звена точку с координатами $(-1, 0j)$? Что происходит с годографом колебательного звена при изменении его декремента затухания?

Приложить снимок стенда и частотных характеристик к отчету.

3. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА.

Отчет по лабораторной работе должен содержать: а) титульный лист; б) краткие теоретические сведения; в) передаточные функции и схемы моделирования исследуемых звеньев; г) экспериментально полученные характеристики при вариации параметров каждого звена; д) выводы, обобщающие проделанные эксперименты по каждому звену.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.

Исследование устойчивости линейных систем с обратной связью

Цель работы

- 1 Ознакомиться с понятием "устойчивость" линейной системы и критериями устойчивости; с порядком оценки устойчивости линейных САУ в программе Vissim.
- 2 Изучение особенностей практического использования алгебраических и частотных критериев устойчивости для анализа динамики линейных САУ.
- 3 Приобретение навыков постановки эксперимента по исследованию устойчивости САУ; использования критериев устойчивости Михайлова и Найквиста.
- 4 Исследование влияний параметров систем на их устойчивость.
- 5 Определение влияния структуры САУ и параметров ее элементов на ее устойчивость

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 4

1.1 Устойчивость САУ.

Устойчивость САУ является одним из основных условий ее работоспособности и включает требование затухания во времени переходных процессов.

Система является устойчивой, если при ограниченном входном сигнале её выходной сигнал также является ограниченным. Если система устойчива, то она противостоит внешним воздействиям, а выведенная из состояния равновесия возвращается снова к нему. Система с расходящимся переходным процессом будет неустойчивой и неработоспособной.

По *Ляпунову* система устойчива, если по окончании воздействия она возвращается в исходное состояние. Весовая функция системы, т.е. ее реакция на дельта-функцию $\delta(t)$ Дирака, в соответствии с приведенным определением может характеризовать устойчивость системы.

Поскольку переходная функция $h(t)$ системы (ее реакция на ступенчатое воздействие) является интегралом от ее весовой функции, то и по переходной функции можно судить о факте и степени устойчивости САУ.

САР устойчива, если ее переходная функция с течением времени монотонно или колебательно стремится к некоторому постоянному значению (рис.4.1). Переходная функция отображает поведение выходной величины САР при ее переходе из одного стационарного состояния, определяемого нулевым входным сигналом в отрицательные моменты времени, в другое стационарное состояние, определяемое единичной величиной входного сигнала. Замедленный переход (кривая 1 - красная) свидетельствует о чрезмерной инерционности САР, ее пониженном быстродействии. Если изменение параметров САР приближает ее к границе устойчивости, то переходная функция приобретает колебательный характер (кривые 3 и 4, зеленая и фиолетовая), причем амплитуда колебаний уменьшается тем медленнее, чем ближе САР находится к границе устойчивости.



Рис.4.1. Примеры переходных функций устойчивых САР, имеющих различную степень устойчивости

Оптимальная САР имеет переходную функцию аperiодического вида (кривая 2 - синяя): имеется незначительная колебательность: амплитуда колебаний затухает быстрее, чем за период. Отклик на ступенчатое воздействие САР, находящейся на границе устойчивости, представляет собой незатухающие колебания. Отклик неустойчивых САР на ступенчатое воздействие имеет колебательный характер, причем амплитуда колебаний возрастает с течением времени. Чем более неустойчива САР, тем быстрее возрастает амплитуда отклика. Скорость роста амплитуды целесообразно соотносить с периодом колебаний. В частном случае выходной сигнал неустойчивой системы может иметь не колебательный, а монотонный характер, величина сигнала просто возрастает по экспоненте.

Амплитуда колебаний выходного сигнала неустойчивой, но близкой к границе устойчивости САР растет в течение многих периодов колебаний сравнительно медленно, а затем все быстрее и быстрее (в целом - по экспоненте) (см. рис.1.2).

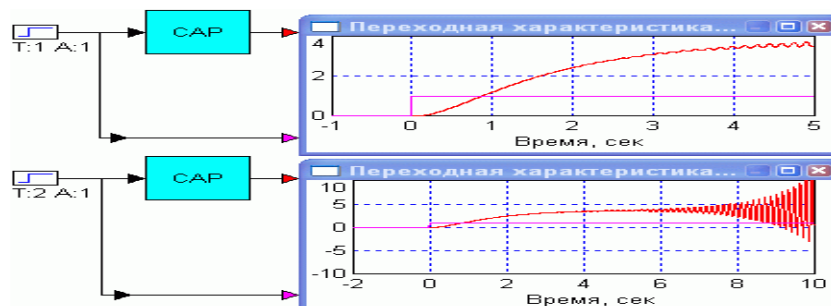


Рис.4.2. Амплитуда колебаний выходного сигнала неустойчивой, но близкой к границе устойчивости

На нижнем графике рис. 4.2 показана переходная характеристика той же самой САР, но в удвоенном интервале времени. Размах колебаний к концу десятой секунды увеличился во много раз по сравнению с размахом, достигнутым к концу пятой секунды.

Линейные системы, содержащие контур из устойчивых звеньев могут быть неустойчивыми. С физической точки зрения именно наличие контура обратной связи является необходимым (но не достаточным) условием неустойчивости системы. Поэтому наличие в системе контура, например местной или главной обратной связи, служит структурным признаком потенциальной неустойчивости САР.

В системах управления неустойчивость, как правило, является недопустимой, вредной. В системах генерации (энергетических мощностей, радиотехнических сигналов и т.п.) неустойчивость напротив, необходима.

Из определения *устойчивости Ляпунова* вытекает *основное условие устойчивости САР*: все корни характеристического полинома (знаменателя передаточной функции) САР должны иметь отрицательную действительную часть, т.е. располагаться в левой полуплоскости комплексной плоскости. Пример расположения на комплексной плоскости корней характеристического полинома устойчивой системы представлен на рис.1.3. Если все корни слева от мнимой оси, то САР устойчива, если хотя бы один корень справа, то САР не устойчива.

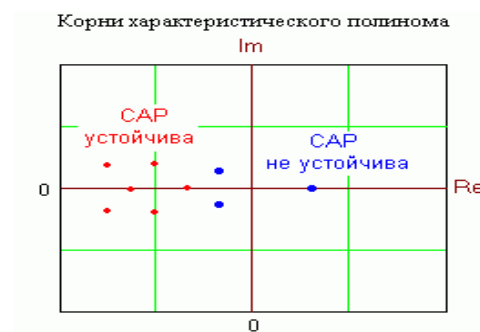


Рис.4.3. Пример расположения на комплексной плоскости корней характеристического полинома

Необходимое и достаточное условие устойчивости заключается в том, чтобы все корни характеристического уравнения (полюсы передаточной функции системы) имели отрицательные вещественные части. Иначе говоря, условием устойчивости системы является расположение всех полюсов в левой комплексной полуплоскости. Тогда все полюсы будут давать затухающую реакцию.

Выше сформулированное условие устойчивости справедливо как для линейных, так и для линеаризованных систем. Однако в случае нулевых или чисто мнимых корней характеристического уравнения вопрос об устойчивости линеаризованной системы может быть решен только на основании исследования ее нелинейных уравнений. В конце XIX и первой половине XX в. задача вычисления корней характеристического уравнения высокого порядка вызывала большие проблемы. Поэтому были предложены несколько косвенных методов оценки устойчивости, позволяющих обойтись без вычисления корней – по значениям коэффициентов характеристического уравнения.

Критерии устойчивости разделяют на алгебраические и частотные. В частности, к алгебраическим критериям относится критерий Гурвица, к частотным критериям – критерий Найквиста.

1.2 Критерий устойчивости Найквиста

Частотный критерий устойчивости Найквиста анализирует АФЧХ разомкнутой системы. Пусть имеется ПФ разомкнутой системы $W(j\omega)$. Для нахождения

вещественной и мнимой части частотной ПФ нужно освободиться от мнимости в знаменателе путем умножения числителя и знаменателя на комплексную величину, сопряженную знаменателю, а затем выполнить деление на вещественную и мнимую части. Передаточная функция приобретает вид

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega).$$

Задавая различные значения частоты, можно найти множество пар: $\{P(\omega_1); jQ(\omega_1)\}$, $\{P(\omega_2); jQ(\omega_2)\}$, ..., $\{P(\omega_n); jQ(\omega_n)\}$. Затем по этим парам строится АФЧХ на комплексной плоскости.

Основные свойства АФЧХ разомкнутой системы:

1. Если разомкнутая система не имеет интегрирующих звеньев, то при $\omega = 0$ ее АФЧХ начинается на вещественной оси в точке $P(\omega) = K$ (где K – коэффициент усиления разомкнутой системы). Заканчивается АФЧХ в начале координат при $\omega \rightarrow \infty$ (рис. 1.4, а).

2. Если разомкнутая система имеет одно интегрирующее звено, то ее АФЧХ начинается при $\omega = 0$ в бесконечности на отрицательной мнимой полуоси, а заканчивается в начале координат при $\omega \rightarrow \infty$ (рис. 1.4, б).

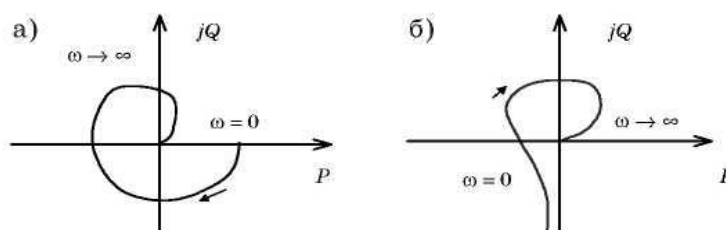


Рис. 4.4 АФЧХ разомкнутой системы

Критерий устойчивости Найквиста формулируется так:

1. Если разомкнутая система устойчива или находится на границе устойчивости, то для того чтобы замкнутая система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы при изменении частоты ω от 0 до ∞ не охватывала точку с координатами $(-1, j0)$.

2. Если разомкнутая система неустойчива, а ее передаточная функция имеет m полюсов справа от мнимой оси на комплексной плоскости, то для устойчивости за-

мкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы при изменении частоты ω от $-\infty$ до $+\infty$ охватывала m раз точку с координатами $(-1, j0)$.

При использовании этого критерия нужно учитывать две особенности:

1. Если разомкнутая система находится на границе устойчивости, то ее АФЧХ уходит в бесконечность. Для проверки критерия Найквиста нужно мысленно соединить конец АФЧХ дугой бесконечно большого радиуса с положительной вещественной полуосью.

2. На практике АФЧХ может строиться только для положительных частот ($0 < \omega < +\infty$). При применении критерия Найквиста считается, что ветвь АФЧХ для отрицательных частот симметрична относительно вещественной оси.

Таким образом, *замкнутая САУ* устойчива тогда и только тогда, когда годограф комплексного коэффициента передачи (ККП) ее *разомкнутого* контура начинается на действительной оси комплексной плоскости и при изменении частоты от нуля до бесконечности не охватывает точку с координатами $(-1, 0j)$. На рис.4.5 представлены примеры годографов комплексных коэффициентов передачи разомкнутых статической (1 - кривая) и астатической первого порядка (2 – линия) САР. Годограф статической САР 1 в данном случае охватывает точку с координатами $(-1, 0j)$. Статическая САР 1 не устойчива. Годограф астатической САР2 не охватывает названную точку. Поэтому рассматриваемая астатическая САР устойчива.

Приведенная формулировка критерия Найквиста справедлива только для случая, *когда разомкнутая САР устойчива.*

Проверить факт устойчивости разомкнутого контура можно с помощью критериев Михайлова или Гурвица, а также прямым моделированием в Vissim'е разомкнутого контура и определением факта устойчивости по переходной характеристике.

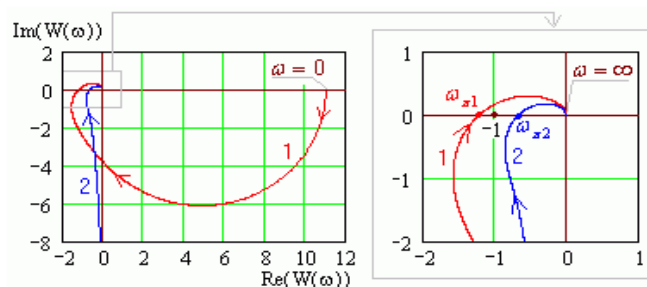


Рис.4.5. Примеры годографов разомкнутых статической и астатической первого порядка САР

Но если имеется годограф комплексного коэффициента передачи, то об устойчивости разомкнутого контура проще всего судить по его поведению в окрестностях начала координат, т.е. при частотах, стремящихся к бесконечности. В соответствии с обобщенным инверсным критерием устойчивости Михайлова: годограф ККП устойчивого разомкнутого контура приходит в начало координат по часовой стрелке, в то время как годограф неустойчивого разомкнутого контура приходит против часовой стрелки. На рис.4.6. представлены годографы ККП устойчивых в разомкнутом состоянии САР (красный и синий) и неустойчивой в разомкнутом состоянии САР (черный).

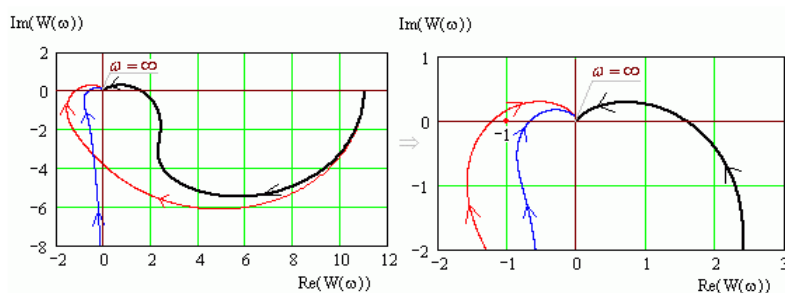


Рис.4.6. Примеры годографов

По первым двум годографам можно судить об устойчивости замкнутых САР в соответствии с критерием Найквиста. К черному годографу нельзя применить вышеприведенную формулировку критерия Найквиста, а значит, нельзя и определить, будет ли устойчива соответствующая САР в замкнутом состоянии.

1.3 Логарифмический вариант критерия Найквиста

Физический смысл критерия устойчивости Найквиста заключается в том, что система будет неустойчива, если фаза выходного сигнала противоположна фазе входного сигнала, а коэффициент усиления больше 1. Поэтому для анализа устойчивости можно использовать не АФЧХ, а ЛАХ системы (для минимально-фазовых систем). Система устойчива, если на частоте среза значение фазы не превышает $-\pi$. Соответственно для устойчивой системы можно рассматривать на ЛФЧХ запас устойчивости по фазе – расстояние от значения фазы на частоте среза до уровня $-\pi$, и запас устойчивости по амплитуде – расстояние от оси частот ЛАЧХ до значения усиления на частоте, где фаза становится равной $-\pi$.

Поскольку ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура содержат ту же самую информацию о системе, что и годограф ККП, то по ним также можно судить об устойчивости САР. Зачастую это значительно удобнее.

Замкнутая САР устойчива тогда и только тогда, когда частота среза $\omega_{ср}$ ЛАЧХ разомкнутого контура меньше частоты ω_{π} (читается омега-пи) ЛФЧХ. На рис.4.7 представлены ЛАЧХ и ЛФЧХ тех же самых систем, чьи годографы показаны на рис. 4.5. Слева – общий вид, справа – увеличенный фрагмент. Частота среза $\omega_{ср1}$ статической САР (1 – красные линии) больше частоты $\omega_{\pi1}$. Эта САР не устойчива. Частота среза $\omega_{ср2}$ астатической САР (2 – синие линии) меньше частоты $\omega_{\pi2}$, поэтому эта САР устойчива.

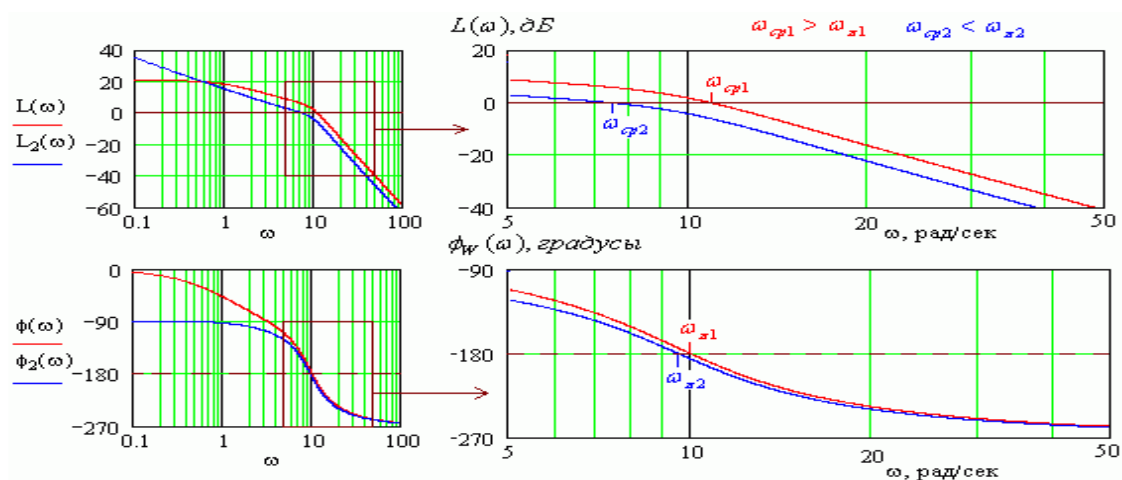


Рис.4.7. ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутых статической и астатической 1 порядка

1.4 Косвенные показатели качества САР

Достоинство критерия Найквиста состоит в том, что, используя его аналитические инструменты – ЛАЧХ и ЛФЧХ или годограф ККП разомкнутого контура можно не только установить факт устойчивости или неустойчивости замкнутой САР, но и количественно оценить степень устойчивости. Эта количественная оценка косвенно характеризует и качество САР. Более того, анализируя названные частотные характеристики можно выработать меры по стабилизации и оптимизации параметров САР. Это определяет непреходящую значимость критерия устойчивости Найквиста.

Запасы устойчивости по амплитуде (β) и фазе (γ) это численные параметры, характеризующие степень устойчивости замкнутой САР.

Запас устойчивости по амплитуде (ЗУА) β показывает во сколько раз (или, что то же самое, на сколько децибел) следует увеличить коэффициент усиления контура САР, с тем, чтобы перевести ее на границу устойчивости. Таким образом, если усиление контура устойчивой САР увеличится по каким-либо причинам меньше, чем на запас устойчивости, то САР сохранит устойчивость.

Запас устойчивости по фазе показывает, какую дополнительную фазу на частоте ω_{cp} (см. рис. 4.8) следует внести в контур с тем, чтобы САР оказалась на границе устойчивости. Запасы устойчивости как по фазе, так и по амплитуде, естественно, совпадают, но амплитудный выражается в разных единицах (натуральных единицах и дБ).

Запасы устойчивости необходимы для того, чтобы качество САР оставалось удовлетворительным даже в том случае, когда при моделировании, как это и бывает, не были учтены некоторые малозначительные элементы реальной системы. Кроме того, запасы устойчивости необходимы и для сохранения удовлетворительного качества САР при влиянии на нее внешних факторов, которые не всегда можно учесть, например, изменения температуры и т.п.

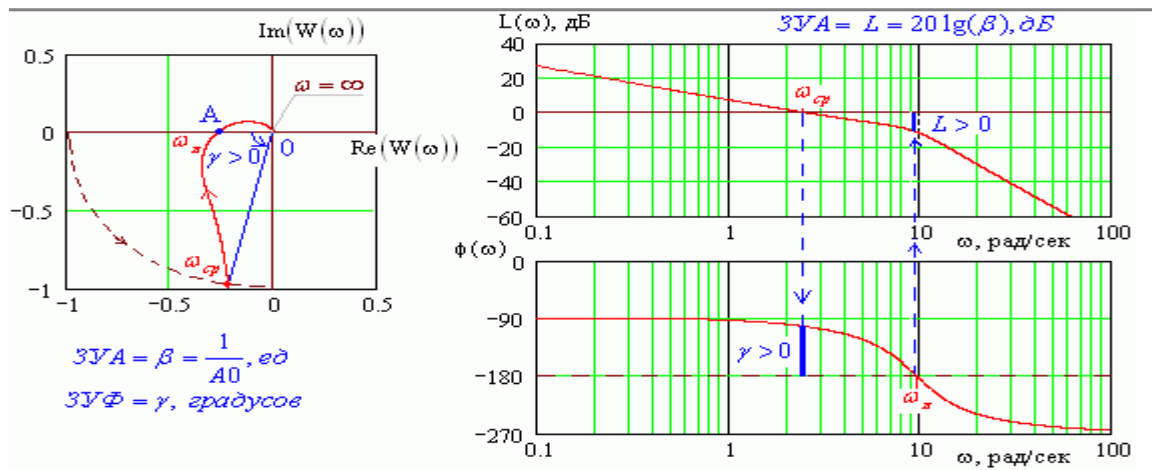


Рис.4.8. Определение запасов устойчивости по годографу, по ЛАЧХ и ЛФЧХ

Практика показывает, что у хороших САР запасы устойчивости по фазе находятся в пределах $40^\circ - 70^\circ$ градусов, а по амплитуде в пределах 4–10 раз (12–20 дБ). Для статических систем, в отличие от астатических к этим требованиям добавляется ограничение на коэффициент усиления контура: он должен находиться в пределах 20–40 дБ (10–100 единиц). Если запасы устойчивости и контурное усиление САР находятся в названных выше пределах, то время регулирования САР примерно равно $t_p = 3/\omega_{cp}$, а перерегулирование не превышает 40 %.

На рис. 4.8 видно, что для повышения запасов устойчивости следует уменьшать усиление контура, однако не следует забывать, что при этом ухудшаются показатели качества работы САР в установившемся режиме. Поэтому в инженерной практике приходится искать разумный компромисс, оптимизируя величину коэффициента усиления контура. Отметим, что введение в контур значительной инерционности, например, апериодического звена со сравнительно большой постоянной времени, повышает стабильность, но снижает быстродействие САР.

1.5 Диапазоны изменения параметров, в которых САР сохраняет устойчивость

При проектировании, а также в процессе эксплуатации САР важно знать, в каких пределах можно изменять параметры САР, сохраняя при этом ее устойчивость, или, выдвигая более жесткое требование, не ухудшая качество регулирования ниже

некоторого предела. Решение этой задачи наглядно представляется на так называемой *плоскости параметра* (параметров). На этой плоскости графические области отображают множество значений параметра(-ов), при которых система сохраняет устойчивость.

Области устойчивости в плоскости коэффициентов характеристического полинома. Вышнеградский в 1876 году, задолго до появления в 1895 году критерия Гурвица, определил условия и установил характер устойчивости системы третьего порядка

$$\Phi(p) = \frac{1}{p^3 + A_1 p^2 + A_2 p + 1},$$

представив их на диаграмме, названной в его честь. На рис. 4.11 представлена диаграмма Вышнеградского. Показаны области неустойчивости и устойчивости с различными соотношениями параметров, которые определяют характер переходного процесса

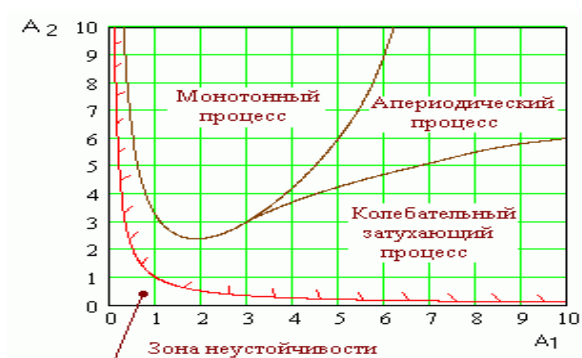


Рис.4.11. Диаграмма Вышнеградского

Для звена Вышнеградского, имеющего передаточную функцию, в которой коэффициенты A_1 и A_2 можно рассматривать как параметры, от соотношения которых зависит устойчивость системы, область устойчивости определяется критерием Гурвица в виде: $A_1 \cdot A_2 > 1$ (рис .4.12). Штриховка направлена в область устойчивости звена. Любая пара значений коэффициентов приведенного характеристического полинома в области, в которую направлена штриховка, определяет устойчивую САР.

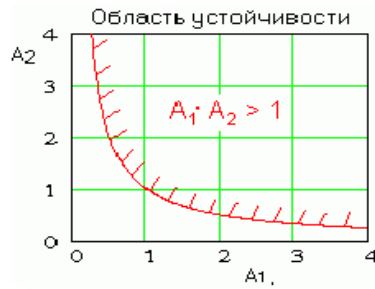


Рис.4.12. Область устойчивости звена Вышнеградского в плоскости нормированных коэффициентов характеристического полинома

Вышнеградский показал, в частности, что для стабилизации САР можно вводить в контур инерционность. Правда, такой метод стабилизации уменьшает быстродействие САР. Предпочтительной для САР является область, где переходный процесс апериодический.

Области устойчивости в плоскости постоянных времени звеньев контура. Одной из самых простых моделей системы третьего порядка является замкнутая САР с тремя апериодическими звеньями в контуре. Ее области устойчивости могут быть показаны на плоскости относительных значений постоянных времени. На рис. 4.13 показаны области устойчивости САР, контур которой состоит из трех апериодических звеньев, при различном соотношении постоянных времени звеньев ($T_1 > T_2$, $T_1 > T_3$). Рядом с кривыми указаны значения критических коэффициентов усиления, при которых САР находится на границе устойчивости. Штриховка обращена в области устойчивости.

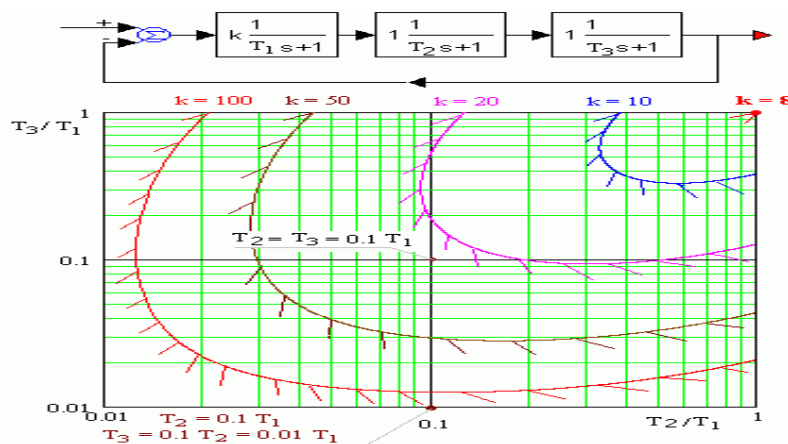


Рис.4.13. Области устойчивости САР

1.6 Области устойчивости в плоскости коэффициента усиления контура.

Метод D-разбиения.

Этот метод позволяет строить области устойчивого состояния САР в плоскости ее одного комплексного или двух действительных параметров. Для модели на рис. 4.13, состоящей из контура, содержащего три апериодических звена, определим диапазон изменения коэффициента контура, в котором САР сохраняет устойчивость. Передаточная функция замкнутой САР имеет вид:

$$\Phi(p) = \frac{k}{T_1 T_2 T_3 p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3) p + k + 1},$$

Если САР находится на границе устойчивости, то корни (хотя бы один) располагаются на мнимой оси и, следовательно, для критического значения коэффициента усиления контура можно записать:

$$T_1 T_2 T_3 (j\omega)^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) (j\omega)^2 + (T_1 + T_2 + T_3) (j\omega) + k_{\text{крит}} + 1 = 0.$$

Отсюда:

$$k_{\text{крит}}(\omega) = -T_1 T_2 T_3 (j\omega)^3 - (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) (j\omega)^2 - (T_1 + T_2 + T_3) (j\omega) - 1.$$

Последнее уравнение описывает кривую на комплексной плоскости, которая определяет критические значения коэффициента усиления контура, когда САР находится на границе устойчивости (рис.1.14). Штриховка нанесена слева по движению по линии разделения областей при изменении частоты от $-\infty$ до $+\infty$. При изменении коэффициента усиления контура от -1 до 11.25 САР при выбранных постоянных времени устойчива.

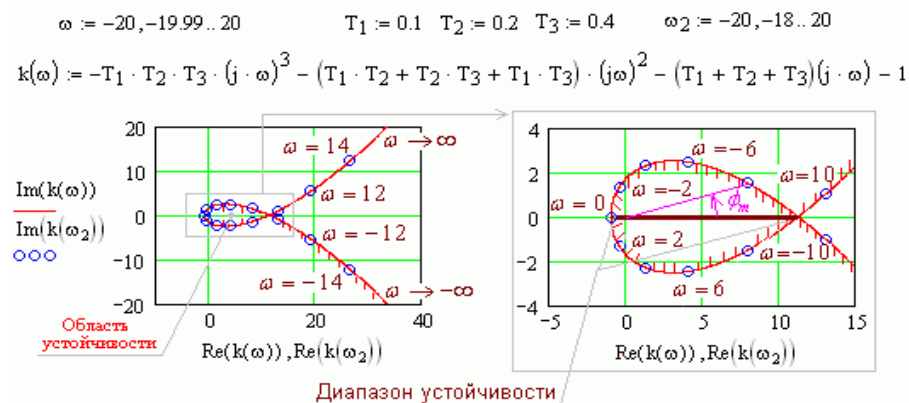


Рис. 4.14. Область изменения коэффициента усиления контура САР

Как видно из рис.4.14, коэффициент усиления может составлять даже отрицательную величину, большую -1, т.е. обратная связь может стать даже неглубокой положительной, и, тем не менее, САР сохранит устойчивость. Хотя коэффициент усиления является действительной величиной, область устойчивости на рис.1.14 показывает, что в контур может быть внесена и некоторая фазовая задержка (например, на частоте $\omega = -8$ рад/сек и при усилении $k = 8$ она меньше φ_m), и, тем не менее, САР сохранит устойчивость.

1.7 Неустойчивость САР. Физика явления

Кратко рассмотрим процессы, происходящие в контуре неустойчивой САР. Пусть имеется САР с управлением по отклонению, приведенная на рис.4.15. Если САР более или менее близка к границе устойчивости, частота колебаний переходной функции примерно равна ω_π . То, что частота колебаний на выходе неустойчивой САР несколько больше частоты ω_π , обусловлено возрастанием амплитуды.

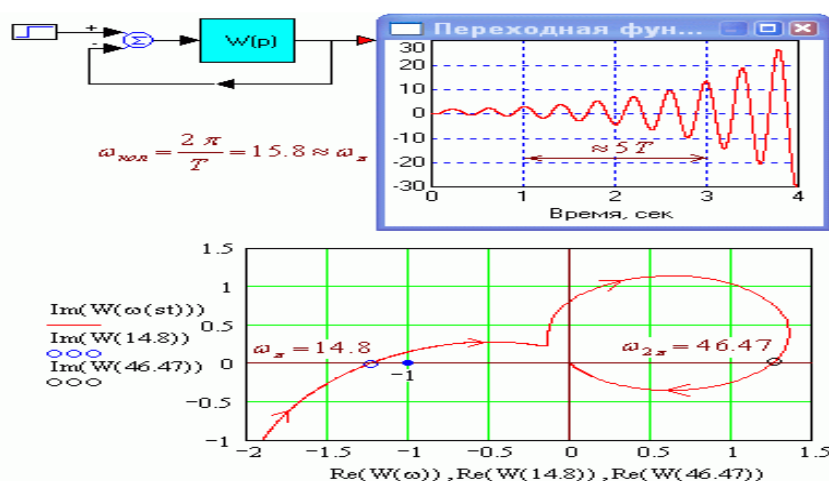


Рис. 4.15. Неустойчивая САР и годограф ее разомкнутого контура

Контур «подстегивает» полупериоды синусоиды, циркулирующие в нем. Как видно, годограф ККП разомкнутого контура охватывает точку с координатами $(-1, 0j)$, что согласуется с видом переходной характеристики: САР не устойчива. Отметим, что для данного примера передаточная функция контура подобрана так, что усиления на частотах $\omega_\pi = 14.8$ рад/сек и $\omega_{2\pi} = 46.47$ рад/сек примерно равны между собой и составляют 1.2 – 1.3 раза.

Возникновение на выходе неустойчивой САР колебаний со все быстрее возрастающей амплитудой, и частотой, примерно равной частоте ω_π , обусловлено тем, что возвращаемая обратной связью и инвертируемая сумматором синусоида частоты ω_π совпадает по фазе со входным сигналом звена прямой связи САР. Действительно, синусоида частоты ω_π задерживается по фазе в звене прямой связи на угол -180° , да еще инвертирование в сумматоре следует рассматривать как дополнительную задержку на -180° , что дает в итоге задержку на 360° . Кроме того, проходя очередной раз контур, синусоида усиливается звеном прямой связи (в примере в 1.2 раза). Этот своеобразный резонанс с подкачкой энергии в звене прямой связи и ведет к возрастанию амплитуды колебаний частоты ω_π , по экспоненциальному закону. Проиллюстрируем это (рис.4.16).

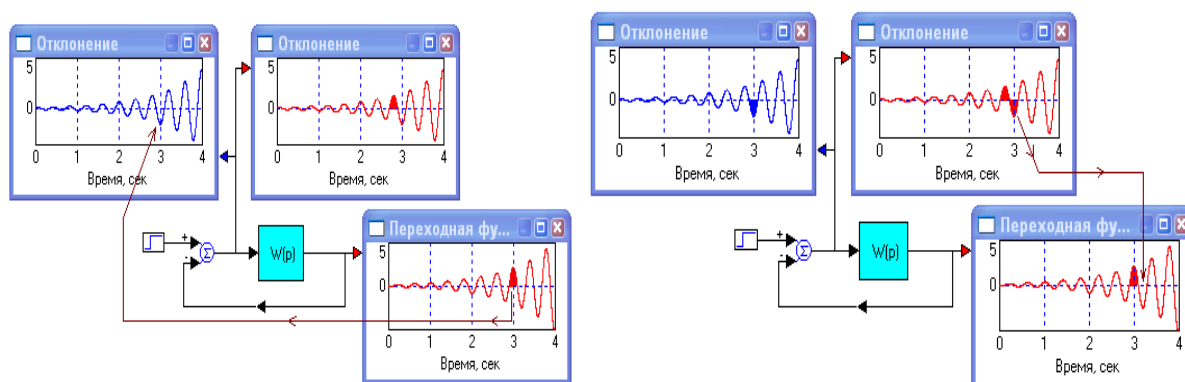


Рис. 4.16. Трансформация синусоидального импульса при его «перемещении»

Выделим мысленно один из полупериодов непрерывных колебаний и проследим за трансформациями этого синусоидального импульса при его «перемещении» и вдоль контура. Каждое прохождение контура синусоидой частоты ω_π увеличивает ее амплитуду. Задержка на 180° градусов, т.е. на половину периода колебаний по времени, в звене прямой связи компенсируется изменением знака на противоположный в сумматоре. В результате возросший по амплитуде полупериод синусоиды попадает обратно на вход звена прямой связи в фазе и формирует следующий полупериод, продолжая непрерывный сигнал. Амплитуды отклонения и выходного сигнала растут все быстрее. Колебания с частотой, отличающейся от частоты ω_π , ввиду того, что они возвращаются с выхода САР на вход звена прямой связи не в фазе, в конеч-

ном итоге подавляются. Поэтому из всего спектра входного сигнала, в данном случае ступенчатой функции, неустойчивой системой выделяется и развивается в дальнейшем только компонента с частотой ω_π .

Ответ на вопрос: «Откуда взялась на входе звена прямой связи синусоида частоты ω_π ?» прост. Такая компонента есть в непрерывном спектре ступеньки. Но даже если не подавать на вход реальной САР никаких сигналов, то и в этом случае возникнут и начнут развиваться колебания выходной величины. В реальности существуют шумы различной природы, и они есть и на входе звена прямой связи. В спектре шумов имеется и, пусть малая по величине, компонента с частотой ω_π . Несмотря на то, что усиление на частоте $\omega_{2\pi}$ примерно такое же по величине, как и на частоте ω_π , колебания частоты $\omega_{2\pi}$ затухают. Это происходит вследствие того, что они оказываются на выходе сумматора в противофазе. Колебания других частот, отличающихся от ω_π , также затухают, оказываясь в противофазе, но не через один, как сигнал частоты $\omega_{2\pi}$, а через несколько периодов.

Таким образом, неустойчивость САР проявляется в том, что на ее выходе под действием однократного возмущения на входе, специально поданного или спонтанного, возникают и развиваются колебания, амплитуда которых растет с течением времени все быстрее. Физический механизм развития колебаний может рассматриваться как резонанс, при котором в процессе этих колебаний добавляется энергия большая, чем теряется на трение. Это эквивалентно колебательному звену с отрицательным декрементом затухания. На рис.4.17 представлено колебательное звено с отрицательным декрементом затухания, которое является неустойчивым. Отрицательный декремент физически означает превышение поступающей в систему энергии над рассеиваемой в течение периода колебаний

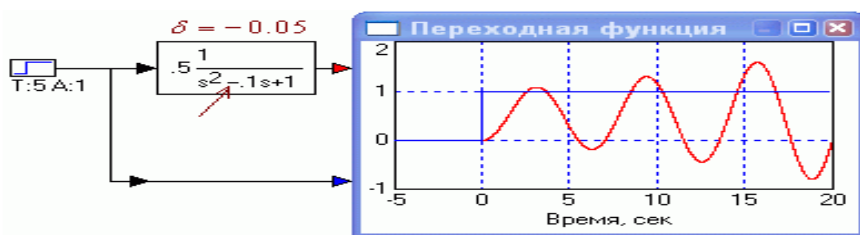


Рис.4.17. Колебательное звено с отрицательным декрементом затухания

Как видно, для колебательного звена правило Стодолы имеет прозрачный физический смысл: отрицательный коэффициент характеристического полинома свидетельствует о поступлении в звено энергии извне в таком размере, что она превышает потери на трение.

Из проведенного рассмотрения следует, что для возникновения в контуре САР колебаний с возрастающей амплитудой требуется, чтобы хотя бы на одной частоте были выполнены условия:

- - контурное усиление превышает 1;
- - совокупная фазовая задержка в контуре с учетом инвертирования сигнала в сумматоре кратна 360^0 .

В устойчивой САР эти условия одновременно не выполняются: контурное усиление на частоте ω_π меньше единицы, что и приводит к затуханию колебаний, если они возникают в переходном процессе.

Устойчивость или неустойчивость САР определяются ее внутренними свойствами, свойствами ее контура, а значит, элементов контура, и не зависят ни от типа и свойств элементов САР, находящихся вне контура, ни от вида сигналов, подаваемых на САР.

Степень устойчивости устойчивой САР проявляется только в переходных режимах ее работы, когда САР не успевает отслеживать быстро изменяющееся воздействие, и, может быть, только косвенно сказывается на установившемся режиме работы САР.

1.8 Обобщенная формулировка критерия устойчивости Найквиста

В практике проектирования систем управления следует стремиться к тому, чтобы разомкнутый контур, а в частности объект управления, были бы устойчивыми. В этом случае, при аварийном или несанкционированном разрыве обратной связи объект не будет подвергаться угрозе саморазрушения. Трагический пример такой ситуации, когда, объект управления стал не устойчивым при отключении обратных связей, это авария на Чернобыльской АЭС. Тем не менее, в некоторых случаях мо-

жет потребоваться решить задачу стабилизации некоторой неустойчивой системы или ее фрагмента путём охвата ее обратной связью.

В таком случае применяется вторая, *обобщённая формулировка критерия устойчивости Найквиста*: Для устойчивости замкнутой САР необходимо и достаточно, чтобы разность между числами положительных и отрицательных переходов частотным годографом комплексного коэффициента передачи разомкнутого контура САР через отрицательную действительную полуось от -1 до $-\infty$ была бы равна $l/2$, где l – число корней характеристического полинома разомкнутого контура, лежащих в правой полуплоскости.

Альтернативная и эквивалентная формулировка: Замкнутая САР устойчива тогда и только тогда, если годограф комплексного коэффициента передачи ее разомкнутого контура при изменении частоты от минус бесконечности до плюс бесконечности охватывает точку с координатами $(-1, 0j)$ l раз в положительном направлении, где l – число корней характеристического полинома разомкнутого контура, расположенных в правой полуплоскости комплексной плоскости, т.е. имеющих положительные действительные части.

Число охватов определяется, например, как разность положительных и отрицательных переходов.

2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 4

2.1. Содержание работы.

1. Исследование на устойчивость статической САР, определение теоретически и экспериментально ее запасов устойчивости и критического коэффициента усиления.

2. Исследование на устойчивость астатической САР.

3. Определение диапазона изменения параметров, в котором САР сохраняет устойчивость.

2.2. Исследование устойчивости линейной САР

2.2.1. Создание лабораторного стенда. Построить модель виртуального стенда: вынести на рабочее поле Vissim'a (см. рис.4.18):

- - генератор ступенчатого сигнала (*Blocks - Signal Producer - step*),
- - три линейных блока Передаточная функция (transfer Function) (*Blocks – Linear System - transfer Function*),
- - сумматор (*Blocks – Arithmetic – summing Junction*) и
- - осциллограф (*Blocks - Signal Consumer - plot*), и соединить их.
- - сделать надписи.

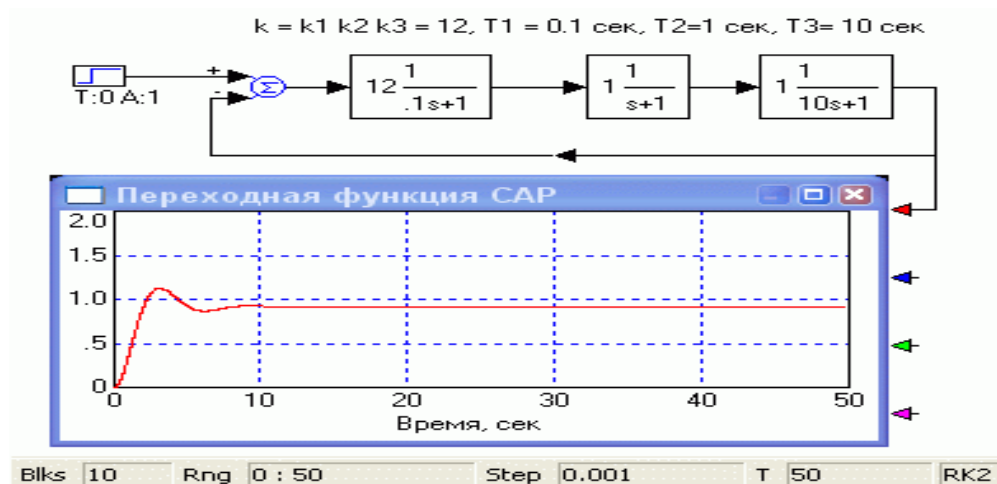


Рис.4.18. Виртуальный лабораторный стенд для исследования устойчивости

Лабораторный стенд для исследования устойчивости статической САР с жесткой единичной обратной связью, контур САР состоит из трех апериодических звеньев с постоянными времени $T_1 = 0.1$ сек, $T_2 = 1$ сек, $T_3 = 10$ сек, и коэффициентом усиления контура, равным $k = 12$. При выполнении лабораторной работы взять $k = 24$. *Запустить* моделирование щелчком по кнопке с зеленым треугольником. Убедиться в работоспособности стенда.

2.2.2 Расчет запасов устойчивости и критического коэффициента усиления контура. Разомкнуть контур обратной связи, подключить выход контура к осциллографу, запустить моделирование, выделить элементы контура и построить его ЛАЧХ и ЛФЧХ (*Analyze – Frequency Response*). На рис.4.19. показано построение частотных характеристик и определение по ЛАЧХ и ЛФЧХ запасов устойчивости САР и критического коэффициента усиления его контура. Для выведения САР на границу устойчивости необходимо поднять ЛАЧХ на величину запаса устойчивости

по амплитуде, т.е. на $L = 20$ дБ. Это значит, что коэффициент усиления заданной САР, равный 12, следует увеличить в 10 раз (на $L = 20$ дБ).

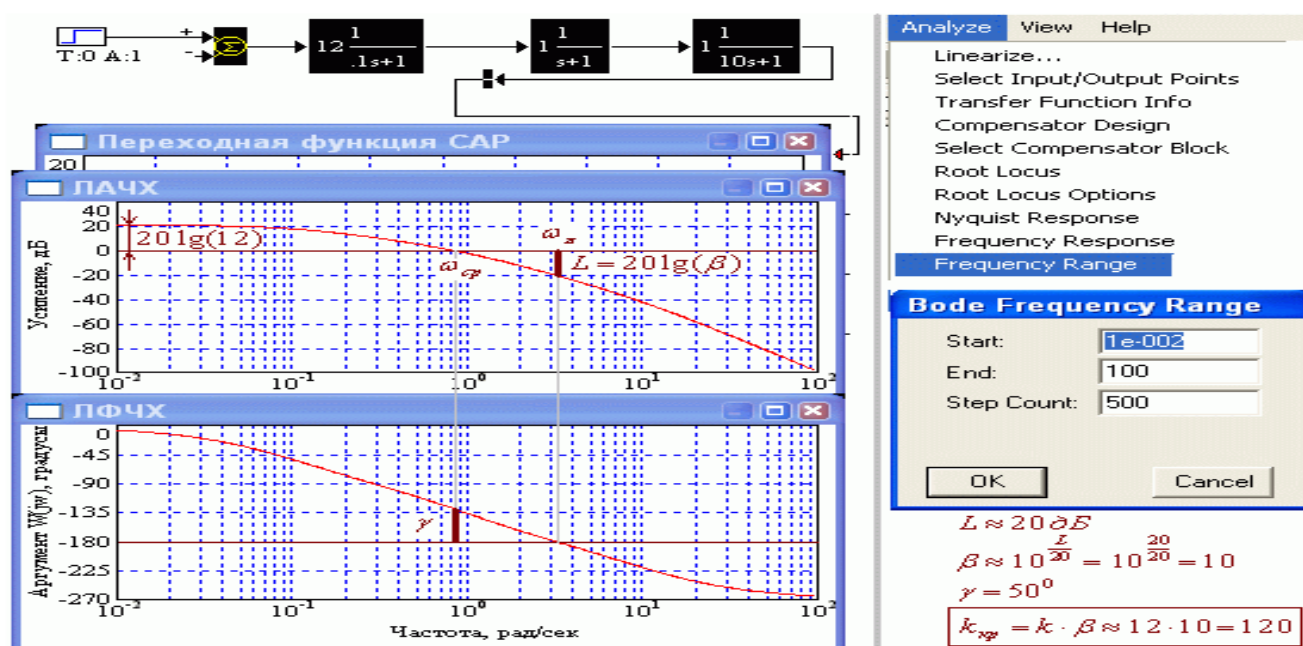


Рис. 4.19. Определение по ЛАЧХ и ЛФЧХ запасов устойчивости САР

Диапазон изменения частоты выбирается в окне, вызываемом из меню *Analyze* – *Frequency Range* (см. рис. 4.19).

Оформить графики, определить запасы устойчивости и критический коэффициент усиления контура, при котором замкнутая САР окажется на границе устойчивости. Сделать снимок частотных характеристик и сохранить их в формате gif.

Построить годограф комплексного коэффициента передачи (ККП) разомкнутой САР (рис.4.20), определить запасы устойчивости САР по амплитуде и фазе и критический коэффициент усиления контура, и соотнести полученные значения со значениями, полученными на логарифмических частотных характеристиках.

Для построения годографа ККП, следует выделить элементы разомкнутого контура и *выбрать* в меню *Analyze* – *Nyquist Response*. Сделать то же еще раз для получения графика в увеличенном масштабе.

Программа *Vissim* строит две ветви годографа, одну для положительных значений частот, а также симметричную, для отрицательных значений. Определение

запасов устойчивости САР по амплитуде β и по фазе γ , а также коэффициента усиления контура k показано на рис.4.20.

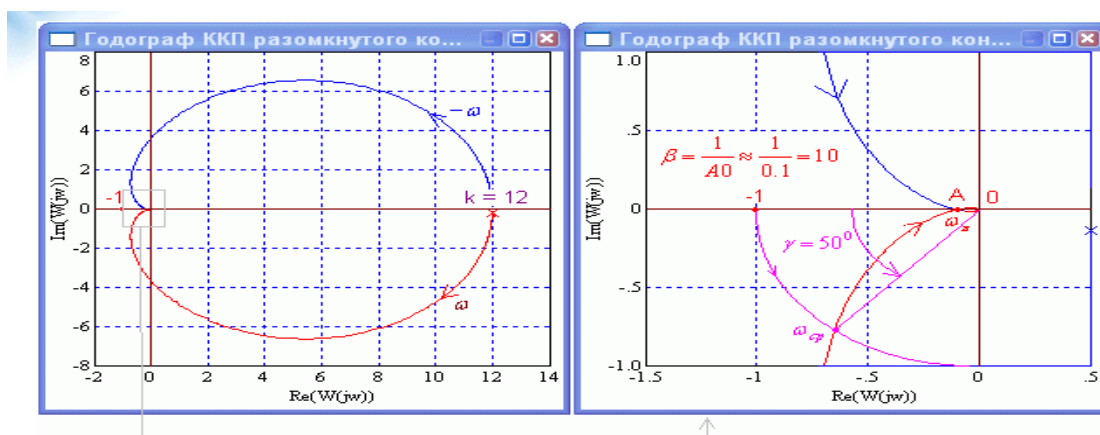


Рис.4.20. Годограф комплексного коэффициента передачи (годограф Найквиста)

Оформить графики, подобрать одинаковые масштабы по обеим осям (это необходимо для правильного считывания углов при определении запаса устойчивости по фазе).

Экспериментально определить коэффициент усиления контура исходной САР, взять $k = 12$; 24.(рис.4.21).

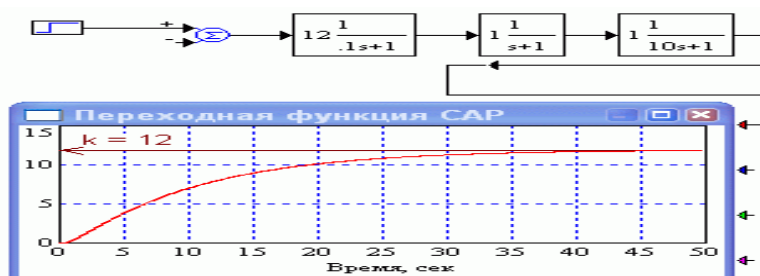


Рис. 4.21. Определение контурного усиления САР по переходной функции разомкнутого контура

Соотнести полученное экспериментально значение коэффициента усиления разомкнутого контура статической САР со значением, полученным расчетным путем по ЛАЧХ (рис. 4.19 - значение усиления на нижних частотах) и по годографу Найквиста рис. 4.21.

2.2.3 Экспериментально определить критический коэффициент усиления контура и запасов устойчивости по амплитуде и фазе.

Определить запас устойчивости САР по амплитуде. В *Vissim*’е можно методом проб и ошибок подобрать значение коэффициента усиления контура, приблизительно равное критическому, когда САР оказывается вблизи границы устойчивости. Для этого следует подобрать такое значение коэффициента усиления, например, изменяя коэффициент усиления первого апериодического звена рис.2.1, чтобы переходная функция приобрела колебательный характер, и амплитуда колебаний от периода к периоду медленно бы возрастала или убывала, или, в идеале, оставалась постоянной. На рис.4.22 приведены примеры переходных функций систем САР, близких к границе устойчивости. В начальные моменты времени после подачи ступеньки амплитуда колебаний мало изменяется от периода к периоду.

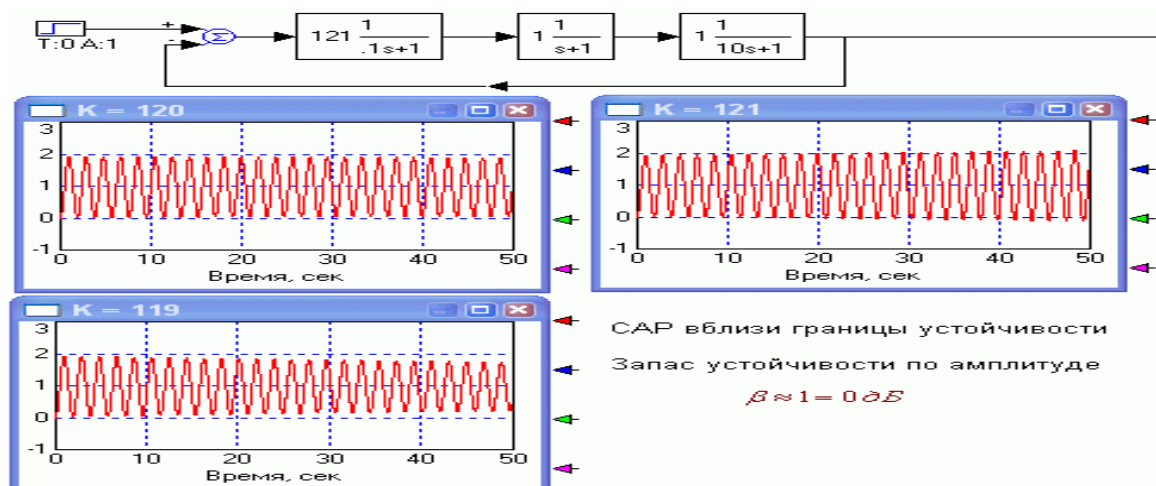


Рис. 4.22. Примеры переходных функций САР

Частота колебаний переходной функции системы, близкой к границе устойчивости, приблизительно равна ω_n , что позволяет определять ее экспериментально по осциллограмме, например, рис. 4.22.

Вернуться к исходной схеме лабораторного стенда рис. 4.18 или 4.22, и привести замкнутую САР на границу устойчивости, изменяя коэффициент усиления первого апериодического звена. Коэффициент усиления контура, равный произведению коэффициентов усиления всех его звеньев, в данном случае совпадает с коэффициентом усиления первого звена, поскольку коэффициенты усиления остальных звеньев

ев равны единице. Зная критический коэффициент усиления $k_{кр}$, определить запас устойчивости по амплитуде исходной модели

$$\beta = \frac{k_{кр}}{k} = \frac{119}{12} \approx 10 = 20 \text{ дБ}, \quad (4.1)$$

где k - коэффициент усиления контура исходной САР.

Сравнить полученное только что экспериментально значение критического коэффициента усиления и запаса устойчивости САР по амплитуде, а также частоты ω_π со значениями, полученными в предыдущем, «теоретическом» пункте.

Сделать снимки экранов исходного лабораторного стенда, частотных характеристик САР и САР, находящейся на границе устойчивости, сделать выводы.

Определить частоты среза и запас устойчивости САР по фазе. Модифицировать стенд рис. 4.21, заменив генератор ступеньки генератором синусоиды и подав его сигнал на второй вход осциллографа (рис.4.23). Сигнал, проходя звенья контура, задерживается по фазе менее, чем на -180° . Следовательно, запас устойчивости по фазе положительный. Сдвиг фаз следует определять в правой части осциллограммы, после завершения переходного процесса. Взять значение коэффициента усиления $k = 24$.

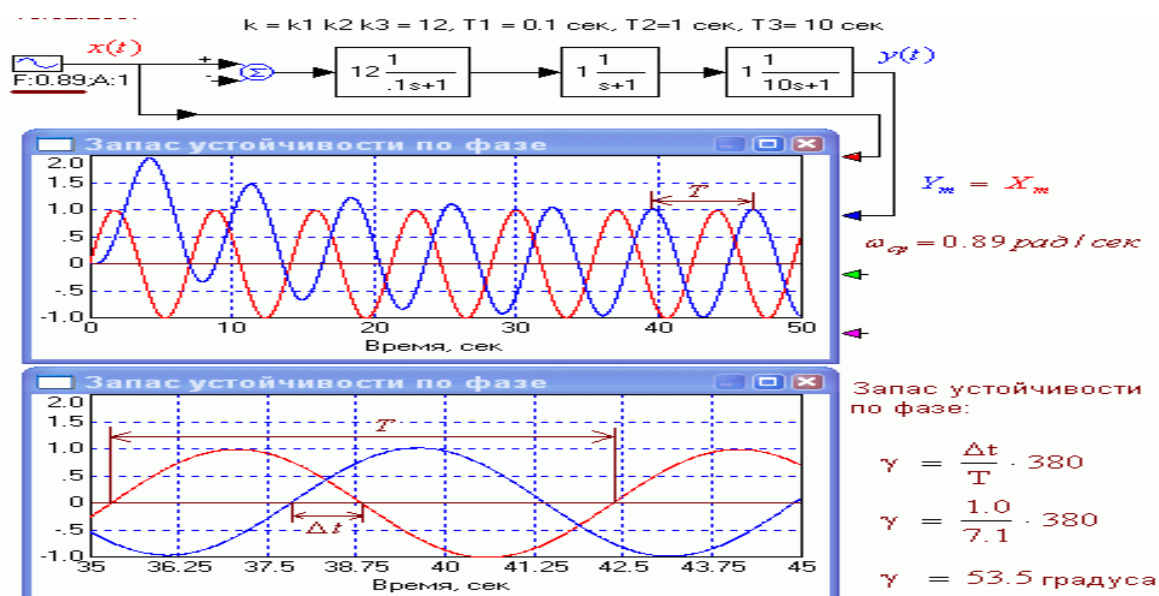


Рис. 4.23. Лаб. стенд для определения запаса устойчивости по фазе и частоты среза

Подобрать частоту генератора такую, чтобы амплитуда выходного сигнала по окончании переходного процесса стала равной амплитуде входного сигнала. Это и есть частота среза ω_{cp} , CAP.

В зоне установившегося режима определить период синусоид и отрезок времени, на который нужно дополнительно задержать выходной сигнал, чтобы он был сдвинут относительно входного на -180° . Отношение временного сдвига к периоду синусоиды, помноженное на 360° и дает запас устойчивости CAP по фазе.

Определить частоту ω_π и запас устойчивости по амплитуде. Модифицировать лабораторный стенд: добавить усилитель *Blocks – Arithmetic – gain* (рис.4.24). Взять $k = 24$.

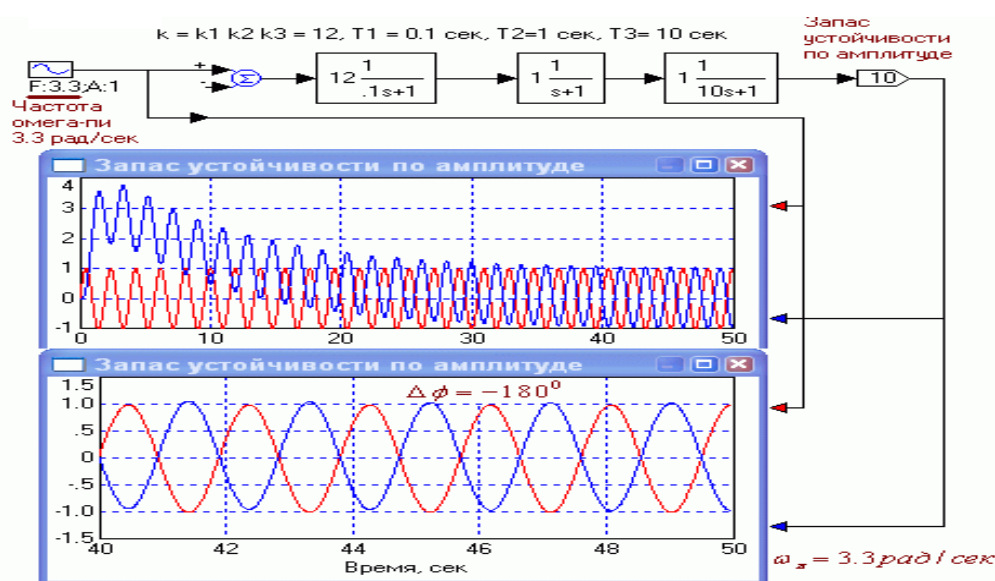


Рис. 4.24 Стенд для определения запаса устойчивости и частоты ω_π по амплитуде

Подобрать частоту генератора такую, чтобы выходной сигнал контура в установившемся режиме, т.е. в правой части осциллограммы был в противофазе по отношению к входному, т.е. чтобы фазовый сдвиг составил -180° . Для удобства сравнения сигналов изменять усиление вспомогательного усилителя так, чтобы амплитуды синусоид на осциллографе были примерно одинаковы;

Изменяя усиление вспомогательного усилителя сделать амплитуду выходной синусоиды точно равной амплитуде входной, в данном случае, равной 1.0 единиц. Значение усиления и даст запас устойчивости по амплитуде. В данном случае он равен $\beta = 10$.

Сравните значения запасов и частот, полученных на стендах рис. 4.23 и 4.24, и вычисленных на рис.4.19 и 4.20.

2.3. Исследование устойчивости астатической САР

2.3.1 Построить модель виртуального стенда (см. рис.2.8). Вынести на рабочее поле Vissim'a:

- - генератор ступенчатого сигнала (*Blocks - Signal Producer - step*),
- - два линейных блока Передаточная функция (*Blocks – Linear System - transfer Function*),
- - усилитель (*Blocks – Arithmetic - Gain*),
- - интегратор (*Blocks – Integration - Integrator*),
- - два сумматора (*Blocks – Arithmetic – summing Junction*),
- - осциллограф (*Blocks - Signal Consumer - plot*), и соединить их.

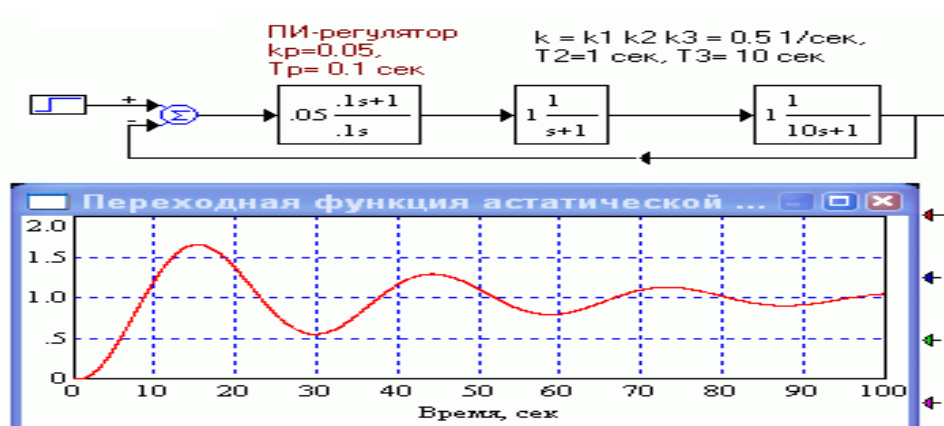


Рис. 4.25 Стенд для исследования устойчивости астатической САР

Астатическая САР это такая, которая содержит в контуре один интегратор. В данном случае этот интегратор входит в состав ПИ-регулятора. Интегратор включён последовательно с форсирующим звеном. При выполнении работы следует задать коэффициент усиления k_p ПИ-регулятора равным не 0.05, а $k_p = 0.01$.

Полный коэффициент усиления ПИ-регулятора равен $k_{\text{ПИ}} = k_p/T_p = 0.05/0.1 = 0.5$ 1/сек.

2.3.2 Рассчитать ЛАЧХ И ЛФЧХ и определить запас устойчивости. Разомкнуть контур обратной связи, запустить моделирование, выделить элементы кон-

тура и построить его ЛАЧХ и ЛФЧХ (Analyze – Frequency Response). Оформить графики, определить запасы устойчивости и критический коэффициент усиления контура, при котором замкнутая САР окажется на границе устойчивости (рис.4.26). Ввиду наличия в контуре интегратора, ЛАЧХ на низких частотах проходит с наклоном -20 дБ/дек, а ЛФЧХ вблизи -90° . Форсирующее звено устремляет на высоких частотах крутизну ЛАЧХ к -40 дБ/дек, а значения ЛФЧХ – к -180° . Запасы устойчивости рассматриваемой САР невелики.

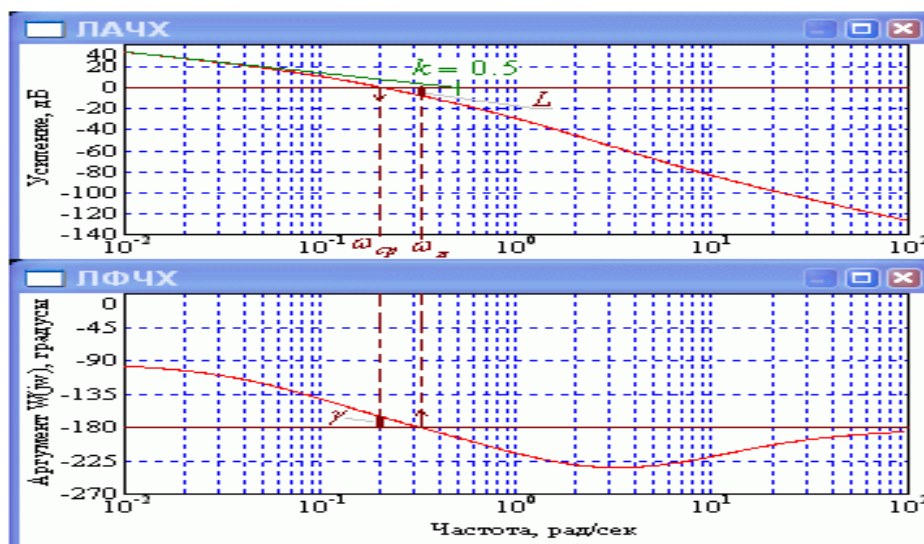


Рис. 4.26 Частотные характеристики разомкнутого контура астатической САР

Примечание. Обычно, в отличие от схемы рис. 4.25, постоянная времени ПИ-регулятора имеет наибольшее значение из всех постоянных времени элементов контура. Малое значение постоянной времени на рис. 4.25 выбрано из методических соображений, для сравнения со свойствами схемы рис. 4.18, а также для того, чтобы на рис. 4.26 частота ω_π была конечной величины.

Построить годограф Найквиста. На рис.4.27 показаны запасы устойчивости САР по фазе и амплитуде для стенда рис. 4.25.

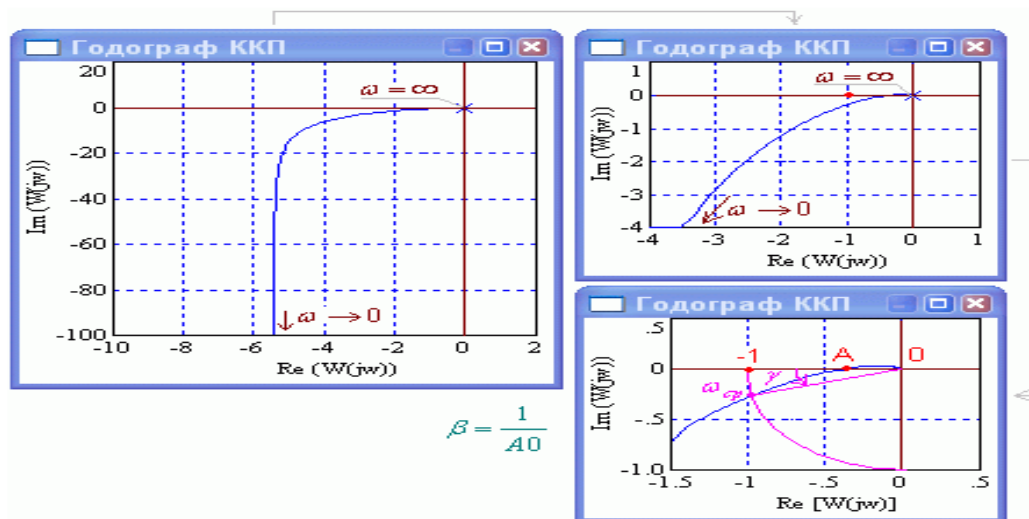


Рис.4.27. Годограф ККП (годограф Найквиста) астатической САР (стенд рис.4.25)

Определить коэффициент усиления разомкнутого контура исходной САР, содержащего интегратор, по приращениям его переходной функции (рис.4.28). Приращения следует брать на линейном участке характеристики. Коэффициент усиления контура, содержащего интегратор, имеет размерность 1/сек, а полный коэффициент усиления контура учитывает и постоянную времени ПИ-регулятора (коэффициент в знаменателе его передаточной функции).

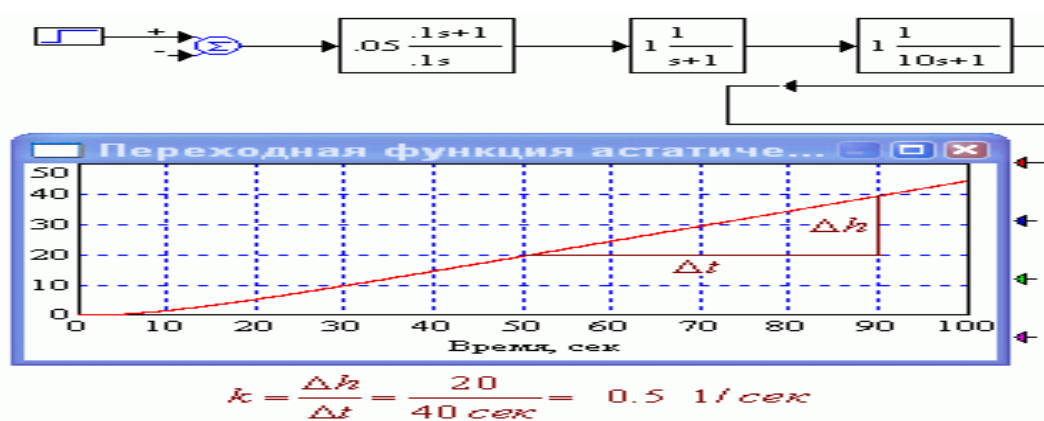


Рис.4.28. Определение коэффициента усиления разомкнутого контура астатической САР

Соотнести полученное экспериментально значение коэффициента усиления разомкнутого контура астатической САР со значением, полученным расчётным путём на ЛАЧХ (рис. 4.26 - значение частоты, на которой продолжение линии аппроксимации НЧ-области ЛАЧХ с наклоном – 20 дБ/дек пересекает уровень 0 дБ).

Измерить запас устойчивости по амплитуде. Вернуться к исходной схеме лабораторного стенда рис. 4.25, и привести замкнутую САР на границу устойчивости, изменяя коэффициент усиления k_p ПИ-регулятора.

Зная критический коэффициент усиления $k_{кр}$ контура определить запас устойчивости по амплитуде исходной модели:

$$\beta = \frac{k_{кр}}{k} \quad (4.2)$$

Примечание. В представленной на рис. 4.25 и рис. 4.28 форме записи параметров ПИ-регулятора общий коэффициент усиления контура находится с учётом его постоянной времени:

$$k_{общ} = \frac{k_p}{T_p} k_2 k_3 = \frac{0.05}{0.1 \text{ сек}} \cdot 1 \cdot 1 = 0.5 \text{ 1/сек} \quad (4.3)$$

Сравнить полученное экспериментально значение критического коэффициента усиления и запаса устойчивости САР по амплитуде с рассчитанными значениями.

Сделать снимки экранов исходного лабораторного стенда, частотных характеристик САР и САР, находящейся на границе устойчивости, сделать выводы.

2.4 Определение диапазонов изменения параметров, в которых САР сохраняет устойчивость

2.4.1 Определить диапазон изменения коэффициента усиления. В схеме рис.4.29 ввести запаздывание 0.2 сек и методом проб и ошибок определить диапазон изменения коэффициента усиления контура, в котором САР устойчива.

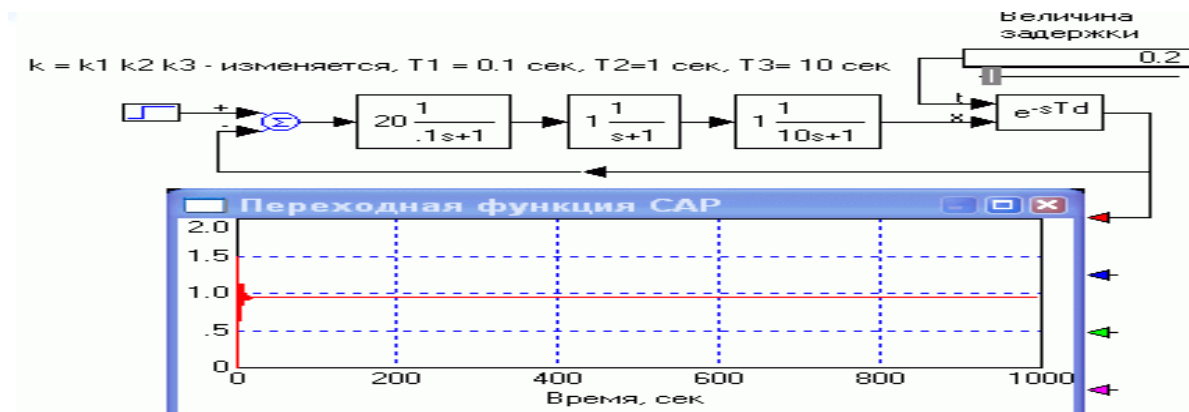


Рис. 4.29 Схема САР для определения диапазона изменения коэффициента усиления

Построить полученный диапазон на приведённом ниже рис. 4.30, отметив точками значения коэффициента усиления, а также отметить крестиками диапазон неустойчивости САР.

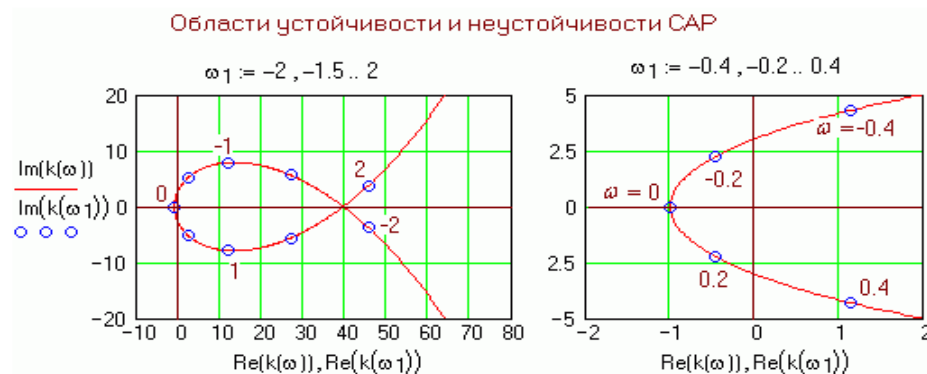


Рис. 4.30 Заготовка графика для размещения результатов оценки устойчивости САР при различных значениях коэффициента усиления контура

Указать, в каких пределах можно менять коэффициент усиления контура и какое значение усиления можно считать оптимальным.

2.4.2. Определить диапазон изменения постоянной времени. По схеме рис. 4.31 определить диапазон изменения постоянной времени T , в котором САР сохраняет устойчивость. Определить оптимальное значение этой постоянной времени. В схеме (рис 4.31) задавать значения постоянной времени из диапазонов устойчивости и неустойчивости САР (предварительно эти диапазоны можно получить расчетным путем – см. ниже по тексту) и по виду переходной характеристики проверить результаты.

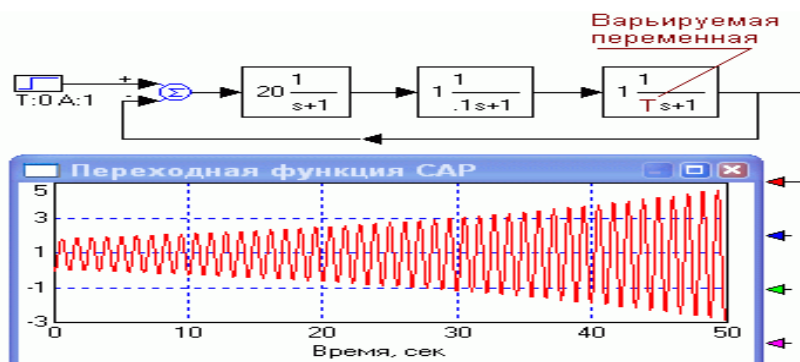


Рис. 4.31. Схема САР для экспериментального определения диапазона изменения постоянной времени T , в котором САР сохраняет устойчивость

Проставить на оси действительных чисел значения постоянной времени, при которых САР устойчива точками на рисунке в отчёте, подобно рис. 4.32, а значения постоянной, при которых САР не устойчива, крестиками.

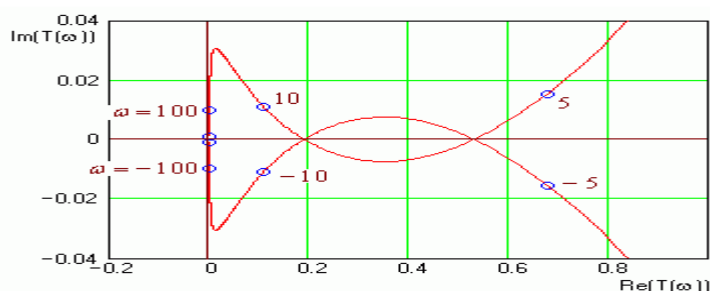


Рис. 4.32. Графическое поле для нанесения значений постоянных времени

Определить диапазон изменения постоянной времени расчетным путем. Для этого применить метод *D-разбиения*. На рис. 4.33. приведен фрагмент расчетов.

3.3.2. Определение диапазона изменения постоянной времени T в котором САР сохраняет устойчивость

$$k := 20$$

$$\omega := -1000, -999.9 \dots 1000$$

Передаточные функции звеньев контура:

$$W_1(p) := \frac{k}{p+1} \quad W_2(p) := \frac{1}{0.1 \cdot p+1} \quad W_3(p) := \frac{1}{T \cdot p+1}$$

$$W(p) := W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \quad \text{Передаточная функция разомкнутого контура}$$

$$\Phi(p) := \frac{W(p)}{1+W(p)} \quad \text{Передаточная функция САР}$$

Выражение для передаточной функции в явном виде:

$$\Phi(p) \text{ simplify} \rightarrow \frac{200.}{(T \cdot p^3 + 11. \cdot T \cdot p^2 + p^2 + 11. \cdot p + 10. \cdot T \cdot p + 210.)}$$

Разрешим характеристическое уравнение относительно исследуемой постоянной времени:

$$T \cdot p^3 + 11. \cdot T \cdot p^2 + p^2 + 11. \cdot p + 10. \cdot T \cdot p + 210. \text{ solve } T \rightarrow -1. \cdot \frac{(210. + p^2 + 11. \cdot p)}{p \cdot (p^2 + 11. \cdot p + 10.)}$$

$$T(p) := -1. \cdot \frac{(210. + p^2 + 11. \cdot p)}{p \cdot (p^2 + 11. \cdot p + 10.)} \quad \text{Постоянная времени - функция } p$$

$$T(\omega) := -1. \cdot \frac{210. + (j\omega)^2 + 11. \cdot (j\omega)}{j\omega \cdot [(j\omega)^2 + 11. \cdot (j\omega) + 10.]} \quad \text{На границе устойчивости } p = j\omega$$

Области устойчивости и неустойчивости САР

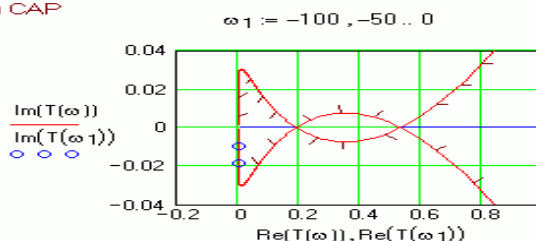
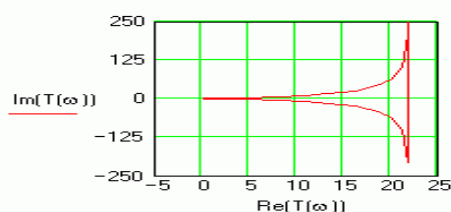


Рис. 4.33. Определение диапазонов устойчивости САР

Вертикальная линия на рис.4.33 $\text{Re}(T(\omega)) = 22$ соответствует значению частоты $\omega=0$. Это своеобразное "дополнение в бесконечности", которое и следует отнести на бесконечность вправо.

На полученных графиках следует провести штриховку, аналогично рис.4.34.

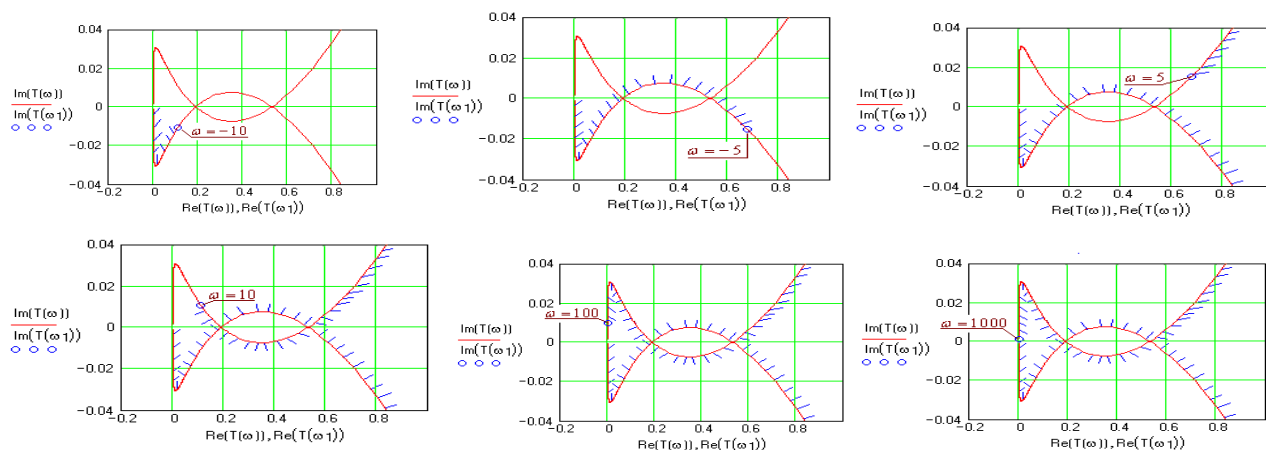


Рис. 4.34 Штриховка линии границы устойчивости и определение диапазонов устойчивости

Как видно на рис. 4.34, существует два диапазона изменения постоянной времени T , в которых исследуемая САР сохраняет устойчивость: это диапазон от 0 до 0.18 сек и диапазон от 0.53 сек до 22 (но действительно до бесконечности), что следует из физического смысла задачи: чем больше постоянная времени, тем более инерционен контур, тем более он устойчив.

Сравните полученные результаты с диаграммой рис. 4.35, на котором указаны диапазоны изменения постоянной времени T_3 (соответствующие рис. 4.34), в которых САР устойчива (жирные коричневые линии) и не устойчива (голубая линия). Как видно, для того чтобы САР сохраняла устойчивость при значительных коэффициентах усиления контура, следует существенно разносить постоянные времени его элементов. Проанализировать, что произойдет с диапазонами устойчивости и неустойчивости, если постоянную времени T_2 увеличить вдвое, с 0.1 сек до 0.2 сек.

Примечание. Определение диапазонов устойчивости САР методом D-разбиения по тем или иным причинам часто приводит к ошибочным результатам. Поэтому целесообразно проверять их непосредственным определением на модели и, при необходимости, корректировать аналитическое решение.

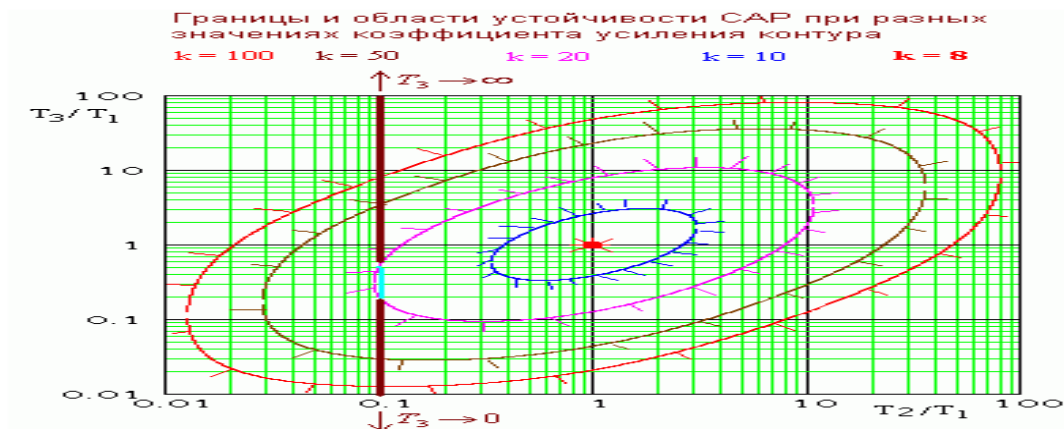


Рис. 4.35. Диапазоны изменения постоянной времени T_3

Указать оптимальное значение постоянной времени и обосновать выбор. Что выгоднее с точки зрения быстродействия САР: большое или малое значение постоянной времени?

2.5. Исследование САР на основе обобщённой формулировки критерия устойчивости Найквиста

Создать лабораторный стенд (рис.4.36).

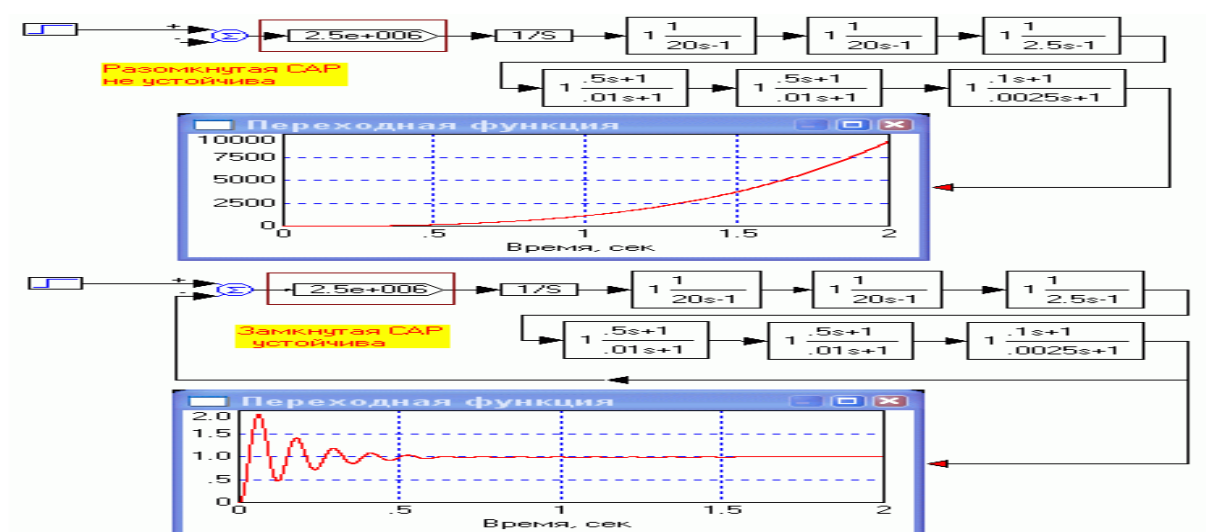


Рис. 4.36. Неустойчивая и устойчивая САР

Контур управления САР рис. 4.36 содержит три неустойчивых звена. Они следуют за интегратором и имеют отрицательные свободные члены характеристических полиномов, что в соответствии с правилом Стодолы и свидетельствует об их неустойчивости. Поэтому и весь разомкнутый контур неустойчив.

Изменить параметры системы, произвести моделирование и ручной расчет параметров системы, как показано на рис.4.37.

Figure 1 consists of four subplots arranged in a 2x2 grid, showing the dependence of the logarithmic module and natural module on the frequency ω for the system (1) with parameters (2). The plots are labeled as follows:

- Top-left plot:** Logarithmic module vs ω . The y-axis is labeled $\text{Im}(L(\omega))$, $\text{Im}(L(8.6))$, and $\text{Im}(L(-\omega))$. The x-axis is labeled $\text{Re}(L(\omega))$, $\text{Re}(L(8.6))$, and $\text{Re}(L(-\omega))$. The plot shows three curves: a red curve for $\omega \rightarrow +0$, a blue curve for $\omega \rightarrow -0$, and a purple curve for $\omega \rightarrow \infty$. A label "Дополнение в бесконечности" points to the purple curve.
- Top-right plot:** Logarithmic module vs ω . The y-axis is labeled $\text{Re}(L(\omega))$, $\text{Re}(L(8.6))$, and $\text{Re}(L(-\omega))$. The x-axis is labeled $\text{Re}(L(\omega))$, $\text{Re}(L(8.6))$, and $\text{Re}(L(-\omega))$. The plot shows three curves: a red curve for $\omega = 50$, a blue curve for $\omega = -50$, and a purple curve for $\omega \rightarrow \infty$.
- Bottom-left plot:** Natural module vs ω . The y-axis is labeled $I(\omega)$, $I(8.6)$, and $I(-\omega)$. The x-axis is labeled $R(\omega)$, $R(8.6)$, and $R(-\omega)$. The plot shows three curves: a red curve for $\omega \rightarrow \infty$, a blue curve for $\omega \rightarrow -\infty$, and a purple curve for $\omega \rightarrow 0$.
- Bottom-right plot:** Natural module vs ω . The y-axis is labeled $I(\omega)$, $I(68)$, and $I(-\omega)$. The x-axis is labeled $R(\omega)$, $R(68)$, and $R(-\omega)$. The plot shows three curves: a red curve for $\omega = \infty$, a blue curve for $\omega = -\infty$, and a purple curve for $\omega \rightarrow 0$.

118

Покажите подробнее охват точки $(-1, 0j)$, искажив модули, но сохранив углы. Проиллюстрируйте (например, как на рис. 4.38), что годограф ККП с учетом дополнения в бесконечности при изменении частоты от $-\infty$ до $+\infty$ охватывает точку $(-1, 0j)$ трижды, обходя ее в положительном направлении (против часовой стрелки). Аргументы на рис. 4.38 не изменялись, модули, большие 1 уменьшены пропорционально их величине, но они все еще больше 1, меньшие 1 увеличены, но они все еще меньше 1, так что характер графика не изменился. Показано дополнение годографа в бесконечности. Разомкнутая САР неустойчива, но замкнутая – устойчива.

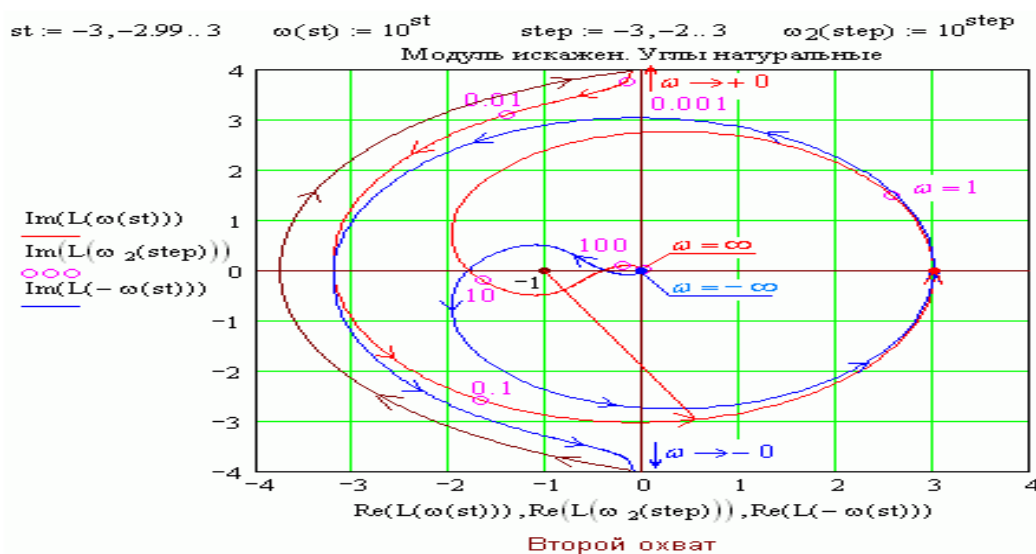


Рис. 4.38. Годограф ККП

Изменить стенод, как показано на рис.4.39. Замкнуть обратную связь и запустить моделирование. Как видно, что та же система, что и на рис. 4.36, но с меньшим коэффициентом усиления, единичной отрицательной обратной связью не стабилизируется. Таким образом, для стабилизации неустойчивой системы посредством охвата ее отрицательной обратной связью необходимо ввести в контур такие корректирующие устройства, чтобы результирующий годограф ККП при изменении частоты от $-\infty$ до $+\infty$ охватил точку $(-1, 0j)$ в положительном направлении столько раз, сколько правых корней имеется у разомкнутой скорректированной системы.

Сделать снимки экранов стенодов, характеристик САР, сделать выводы.

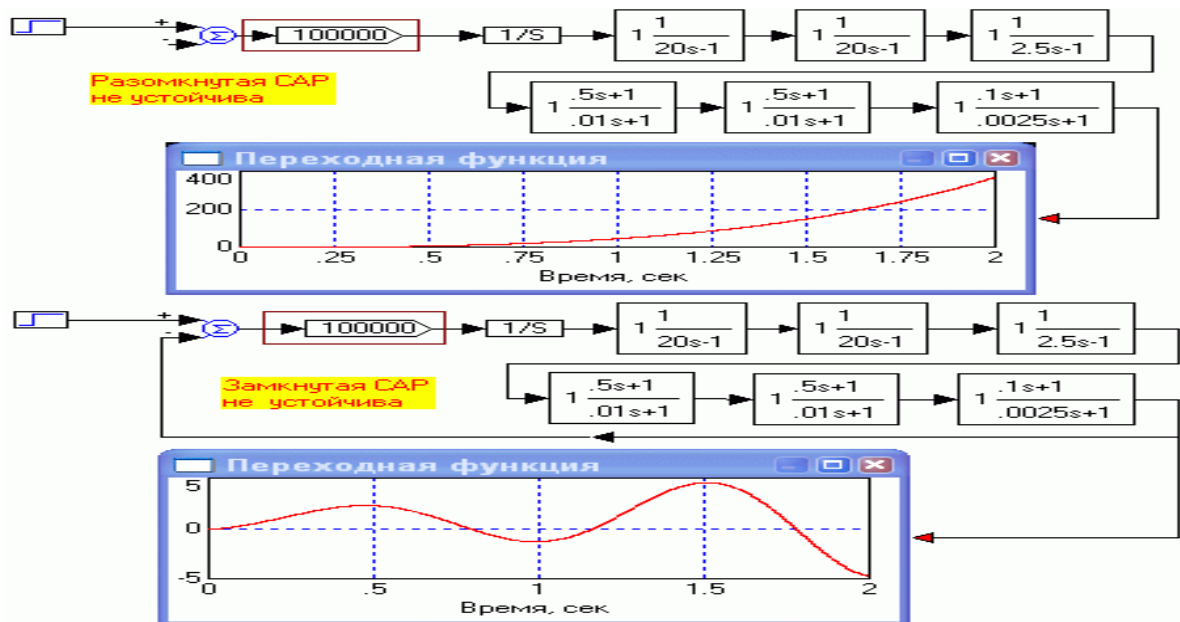


Рис. 4.39. Неустойчивая САР

2.6 Определение коэффициентов полиномов, нулей и полюсов передаточной функции в Vissim'е

Построить стенд неустойчивой разомкнутой САР рис. 4.40.

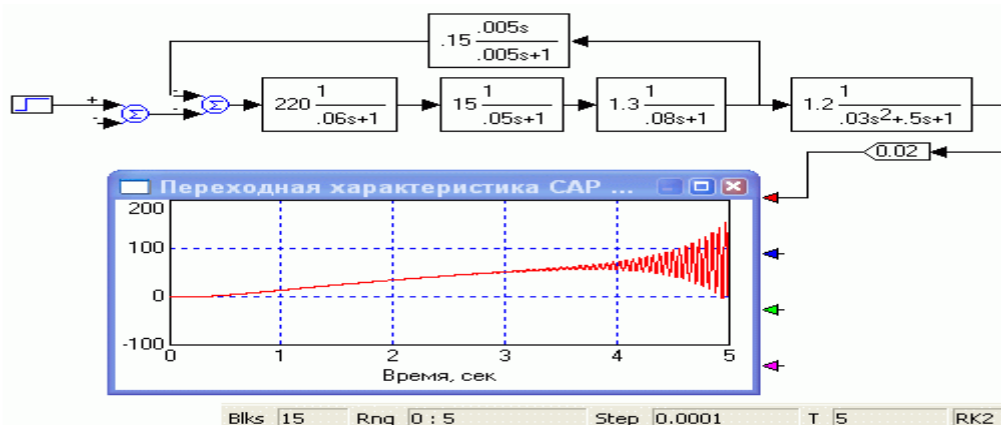


Рис. 4.40 Неустойчивый разомкнутый контур САР

Выделить все элементы разомкнутого контура. (рис. 4.41).

В меню *Vissim*'а выбрать *Analyze – Transfer Function Info* (Анализировать – Информация о передаточной функции), *прочитать* значения коэффициентов числителя (вызов информации - *Numerator*) и знаменателя передаточной функции (*Denominator*), щелкнуть по кнопке ОК и получить окно с нулями (*Zeros* - корнях числителя этой передаточной функции) и полюсами (*Poles* - корнях знаменателя,

характеристического полинома фрагмента) передаточной функции выделенного фрагмента модели.

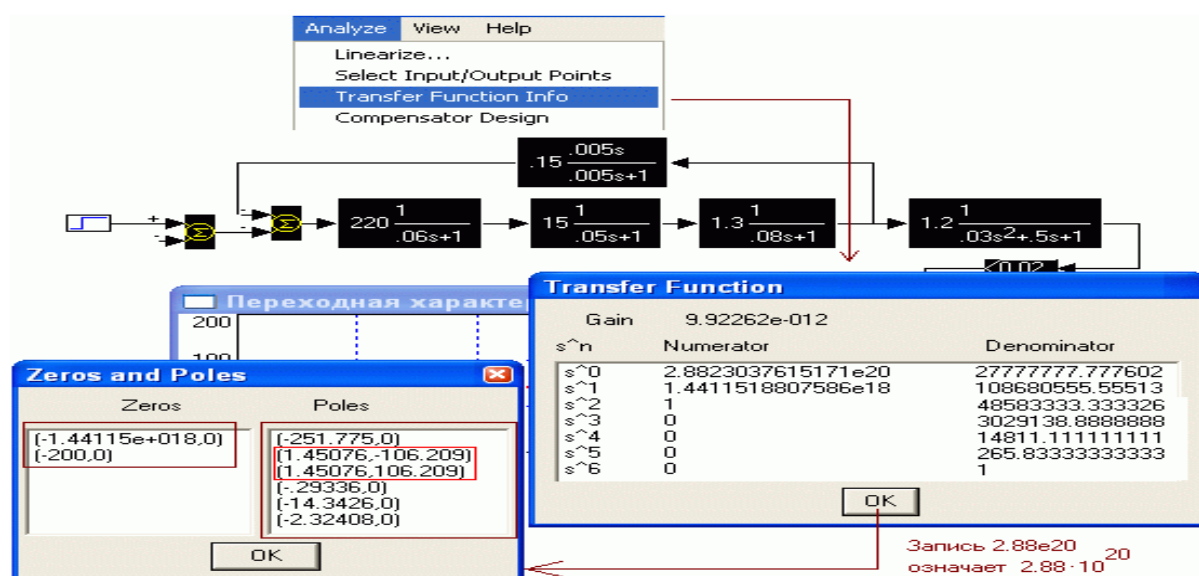


Рис. 4.41 Вызов информации о передаточной функции

Как видно, *Vissim* предоставляет информацию и о коэффициентах полиномов числителя и знаменателя передаточной функции выбранного фрагмента схемы, а также его коэффициент усиления (*Gain*). Эти коэффициенты нормированы так, что единичные коэффициенты получаются, к сожалению, у старших членов, что для ТАУ неудобно и приходится пересчитывать, что сравнительно не трудно, значения коэффициентов так, чтобы единичными были свободные члены. Тогда и коэффициент усиления представляется таким, какой он и есть у выделенного фрагмента:

$$\begin{aligned}
 W(p) &= 9.922 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{p^2 + 1.441 \cdot 10^{18} p + 2.882 \cdot 10^{20}}{p^6 + 265.8 p^5 + 14811.1 p^4 + 3029138.8 p^3 + 48583333.3 p^2 + 108680555.5 p + 27777777.7} = \\
 &= 102.96 \frac{0.34710^{-20} p^2 + 5 \cdot 10^{-3} p + 1}{3.6 \cdot 10^{-8} p^6 + 9.57 \cdot 10^{-5} p^5 + 5.332 \cdot 10^4 p^4 + 0.109 p^3 + 1.749 p^2 + 3.913 p + 1}
 \end{aligned}$$

Значения коэффициентов, нулей и полюсов из таблицы в окнах *Vissim*'а можно «выдергивать» с помощью некоторых программ, например *SnagIt*, и сохранять в текстовом файле. Тогда значения не потребуется вводить вручную, а можно будет просто копировать в документ *Word* (в отчет) для обработки.

Как видно в нижнем окне на рис. 4.41, характеристический полином разомкнутого контура рассматриваемой схемы имеет два комплексно-сопряжённых корня в правой полуплоскости:

$$p_1 = 1.45076 + j106.209 \text{ и } p_2 = 1.45076 - j106.209,$$

что и обуславливает неустойчивость разомкнутого контура САР.

Проверить полученные результаты. Построить модель с общей передаточной функцией разомкнутого контура значения (рис. 4.42) в Vissim'е. Построить годограф, процедура приведена на рис. 4.46.



Рис. 4.42 Модель Vissim'а с общей передаточной функцией разомкнутого контура

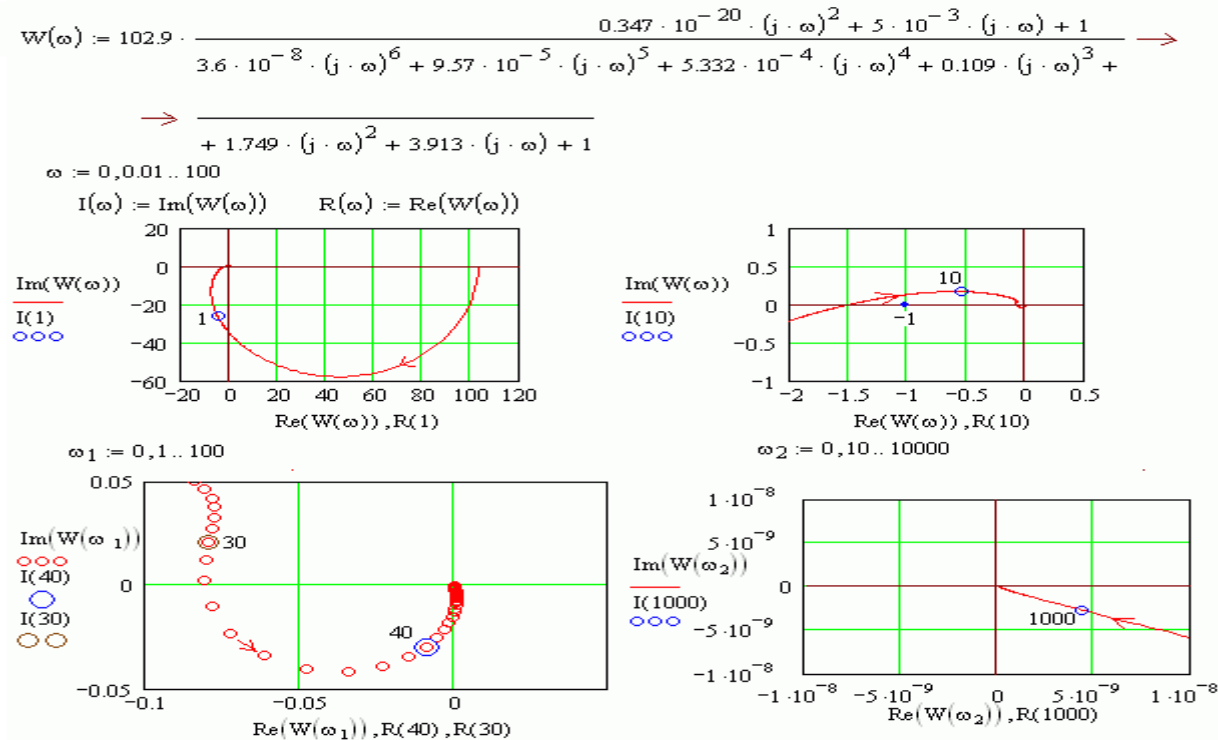


Рис. 4.43 Годограф ККП модели с общей передаточной функцией разомкнутого контура

Сделать выводы. Из рис.4.43 видно, что блок с общей передаточной функцией не устойчив так же, как и исходная модель (рис. 4.40).

Сделать снимки экранов лабораторных стендов, сделать выводы.

3. Выводы по проделанной работе и оформление отчета

Содержание отчета: титульный лист; краткие теоретические сведения; снимки лабораторных стендов, выводы и рекомендации.

Контрольные вопросы

1. Дать определение понятия «Устойчивость» линейной системы по Ляпунову.
2. Что является причиной неустойчивости системы, составленной из устойчивых звеньев?
3. Как качественно (т.е. не количественно, приближенно) можно судить о степени устойчивости САР по ее переходной характеристике?
4. Сформулировать критерий устойчивости Найквиста, а также условие его практического применения.
5. Можно ли по годографу комплексного коэффициента передачи разомкнутого контура САР судить о его устойчивости?
6. Что такое запас устойчивости САР по фазе? Какой его физический смысл?
7. Что такое запас устойчивости САР по амплитуде? Какой его физический смысл?
8. Что такое частота среза и частота ω_π ?
9. Как влияет на устойчивость САР с управлением по отклонению запаздывание в ее контуре? Почему?
10. Как и какие процессы протекают в контуре неустойчивой САР? А в контуре устойчивой САР?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.

Оценка качества регулирования. Синтез САР

Цель работы

1. Ознакомление с основными группами критериев качества (оценивающими точность, устойчивость, быстродействие и обобщённые свойства САР).
2. Изучение методики использования интегральных оценок качества при исследовании ошибок систем в типовых режимах движения.
3. Экспериментальное определение показателей качества переходного и установившегося режимов работы САР и исследование связи параметров САР с ее показателями качества.
4. Изучение простейших методов синтеза САР и оптимизации ее параметров, экспериментальное определение оптимальных настроечных параметров САР.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 5

1.1 Задачи и виды САР, параметры качество САР

Качество системы автоматического регулирования (САР) это понятие, характеризующее способность САР правильно выполнять возложенные на неё задачи. Основные, принципиальные с точки зрения ТАУ, характеристики качества работы САР это ее быстродействие и точность. И оценивать их целесообразно отдельно для установившегося и переходного режимов работы САР.

Качество работы САР характеризуется пятью основными числовыми показателями. Для установившегося режима работы это коэффициенты ошибок c_0 , c_1 и c_2 , а для переходного режима работы это время регулирования t_p и перерегулирование $\sigma\%$. Названные параметры могут быть вычислены с использованием математических моделей или получены экспериментально при исследовании реальной системы или ее аналоговой или квазианалоговой (виртуальной) модели.

САР предназначены для решения задач слежения и стабилизации.

Слежение состоит в том, что САР поддерживает с заданной точностью на протяжении большего времени своей работы выходную (управляемую) величину объекта управления пропорциональной отслеживаемой, задающей величине. Пропор-

циональность состоит в том, что управляемая величина в некоторое число раз больше задающей и если задающая величина изменяется, то во столько же раз изменяется и управляемая величина. Не следует забывать, что зачастую физические размерности отслеживаемой и управляемой величин разные.

Стабилизация состоит в том, что САР в значительной мере или полностью компенсирует влияние возмущений на управляемую величину. Это значит, что если возмущение, поступающее на объект, изменяет управляемую величину, то правильно работающая САР через сравнительно короткое время возвращает управляемую величину к исходному значению.

САР разделяют на *разомкнутые*, том числе: с жестким управлением; с управлением по возмущению, и *замкнутые*: с управлением по отклонению; с комбинированным управлением по отклонению и возмущению.

По свойствам ошибки (отклонения) в установившемся режиме различают статические и астатические системы. Свойство астатизма системы рассматривают по отношению к конкретному воздействию.

Система, в которой величина установившейся ошибки зависит от величины возмущения при постоянном задании называется *статической по возмущению*. Если установившаяся ошибка не зависит от величины возмущения, то система является *астатической 1-ого порядка*. Если установившаяся ошибка не зависит от первой производной возмущающего воздействия, то система является *астатической 2-го порядка*. Кроме того, различают статизм и астатизм по задающему воздействию. При этом возмущение считается постоянным и установившаяся ошибка рассматривается в зависимости от величины задающего воздействия. Для повышения показателей работы САУ применяется одно- и много-контурное регулирование с использованием жестких (действуют как во время переходного процесса, так и в установившемся режиме) и гибких (действует только во время переходного процесса) обратных связей.

1.2 Принцип работы САР в переходном и установившемся режимах

Работа САР с управлением по отклонению основывается на инерционности звена прямой связи и на наличии главного контура отрицательной обратной связи,

благодаря которому ошибка регулирования устремляется системой управления к нулю.

Рассмотрим процессы, происходящие в системе автоматического регулирования при подаче ступенчатого единичного воздействия на ее вход. На рис.5.1 показан переход САР от одного установившегося режима, когда воздействие было равно нулю, к другому, когда воздействие стало равным единице. Отрицательная обратная связь вынуждает ошибку, прыгнувшую в нулевой момент времени до единицы, стремиться к нулю с течением времени. Выходная величина становится примерно равной входной. САР переходит в режим отслеживания постоянной величины, равной единице.

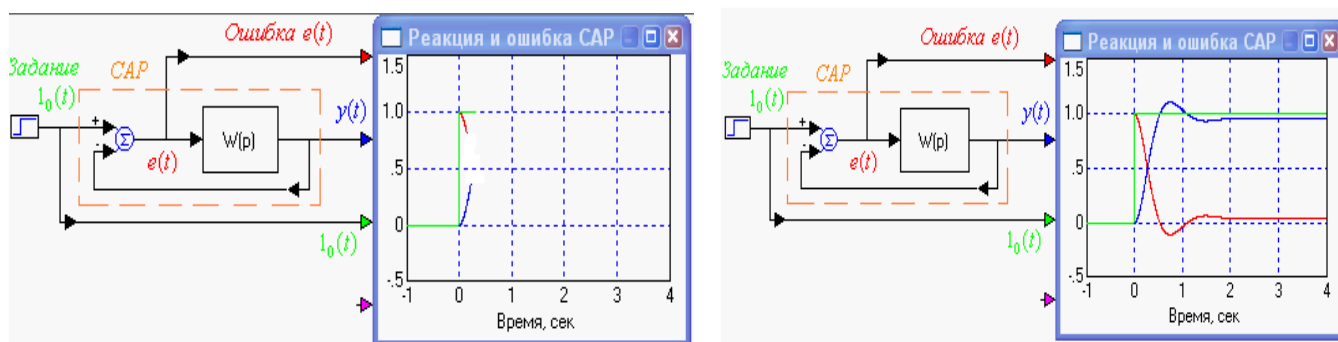


Рис. 5.1. Переход САР от одного установившегося режима к другому

Сумматор – устройство безынерционное, поэтому по поступлению на вход САР ступеньки, она немедленно оказывается на выходе сумматора, поскольку на втором входе сумматора сигнал, поступающий с выхода САР все еще равен нулю, т.к. инерционность звена прямой связи не позволяет прыгнуть его выходному сигналу скачком. Но выходной сигнал, вследствие наличия большого сигнала на входе звена прямой связи, начинает расти. Это приводит к уменьшению с течением времени ошибки регулирования, а выходной сигнал продолжает расти, хотя и все медленнее, до величины, примерно равной входной единичной ступеньки, когда переходный процесс заканчивается и наступает установившийся статический режим. Если в обратной связи главного контура САР имеется усилитель, то переходная функция САР асимптотически стремится к величине, обратной коэффициенту усиления этого усилителя.

Принцип *стабилизации*, осуществляемой САР с управлением по отклонению, состоит в том, что если возмущение изменяет управляемую величину, то это сказывается на ошибке регулирования. Контур отрицательной обратной связи стремится свести эту ошибку к нулю или минимуму, близкому к нулю. В результате управляемая величина вновь становится пропорциональной заданию, а значит действие возмущения компенсировано. Стабилизация осуществлена.

На рис.5.1 показано, что по окончании переходного процесса, вызванного подачей на САР единичного ступенчатого воздействия, наступает статический режим: все сигналы постоянны. В этом случае инерционные свойства звена прямой связи не проявляют себя, в статической САР, не имеющей интеграторов в контуре, это звено ведёт себя как усилитель, с коэффициентом усиления, равным коэффициенту усиления контура САР. В статике (при неизменных воздействиях) ошибка регулирования прямо пропорциональна заданию и обратно пропорциональна коэффициенту усиления контура. Чем больше коэффициент усиления, тем меньше ошибка, тем точнее осуществляется слежение. Ошибка астатической САР в статике равна нулю благодаря наличию интегратора в контуре. Выходной сигнал интегратора перестаёт изменяться только в том случае, когда на его входе сигнал равен нулю. Поэтому переходный процесс длится до тех пор, пока ошибка не станет равной нулю. Если входной сигнал САР меняется весьма медленно по сравнению с длительностью в ней переходных процессов, то такой режим работы САР можно рассматривать как квазистатический (практически статический). В таком случае САР будет обеспечивать слежение, поскольку ее выходная величина будет равна, или в общем случае, пропорциональна заданию.

При более быстрых изменениях входного сигнала (т.е. задания, отслеживаемой величины) на ошибках САР начнёт сказываться скорость, ускорение, а затем и другие младшие производные входного сигнала по времени.

САР с управлением по отклонению осуществляет и *стабилизацию*. Действительно, возмущение, действующее на объект управления, отклоняет управляемую величину от заданного значения и это отклонение по обратной связи с учётом изме-

нения знака в сумматоре полностью входит в ошибку регулирования. Контур обратной связи устремляет ошибку к нулю, компенсируя влияние возмущения.

1.3. Показатели качества САР.

Способность САР выполнять возложенные на неё задачи количественно определяется т.н. *показателями качества* – численными параметрами, характеризующими ее точность и быстродействие. Показатели качества разделяются на

- - показатели качества *переходного*,
- - показатели качества *установившегося* режимов, которые, в свою очередь, разделяются *прямые и косвенные* показатели качества.

Для удобства анализа установившийся режим работы САР подразделяют на подрежимы:

- - статический (*статику*), когда воздействия на САР и ее реакции постоянны,
- - динамический (*динамику*), когда воздействия меняются, но меняются плавно и медленно, т.е. являются гладкими, без скачков функциями времени, чтобы не проявлялись сколько-нибудь заметно собственные инерционно-колебательные свойства САР, вызывающие переходный режим.

О динамических свойствах САР в установившемся режиме судят по ее реакции на пробные воздействия, изменяющиеся во времени по:

- - степенному закону;
- - по гармоническому (синусоидальному) закону.

Прямые показатели качества установившегося режима это:

- - коэффициент ошибки по положению c_0 ;
- - коэффициент ошибки по скорости c_1 ;
- - коэффициент ошибки по ускорению c_2 , определяемые отдельно по заданию и по возмущению,
- частотные характеристики замкнутой САР: по каналу управления и каналу задание (возмущение) – ошибка.

Косвенный показатель качества установившегося режима это порядок *астатизма* САР. Установившийся режим характеризуется отсутствием, точнее, слабым

проявлением переходных процессов. Воздействия на САР изменяются сравнительно медленно, так, что она успевает их отслеживать (для задания) или компенсировать (для возмущения). Но и слежение в установившемся динамическом режиме, когда воздействия на САР относительно медленно изменяются с течением времени, САР осуществляет с ошибками, которые в условиях нормальной работы сравнительно малы. При пробных степенных воздействиях вида $x(t) = A_v \cdot t^v \cdot 1_0(t)$ качество САР удобно характеризовать коэффициентами ошибок. Коэффициенты ошибок связывают ошибку слежения $e(t)$ с отслеживаемой величиной (заданием) и ее производными:

$$e(t) = c_0 x(t) + c_1 \frac{d}{dt} x(t) + \frac{c_2}{2} \frac{d^2}{dt^2} x(t) + \dots, \quad (5.1)$$

Обычно, при исследовании динамики установившегося режима в ряде (5.1) ограничиваются двумя или тремя членами. Аналогичную формулу можно записать и для канала возмущение – ошибка. Как следует из (5.1), ошибка регулирования в установившемся режиме тем больше, чем больше отслеживаемая величина, скорость и ускорение ее изменения, и тем меньше, чем меньше коэффициенты ошибок. Смысл формулы (5.1) состоит в том, что в общем случае на ошибку слежения влияет не только отслеживаемая величина, но и ее младшие производные. При увеличении скорости и ускорения изменения воздействия ошибка может возрасти настолько, что превысит допустимое значение, т.е. САР не успеет отследить с требуемым качеством быстро изменяющийся сигнал.

Сказанное накладывает ограничения на максимальные значения отслеживаемой величины, ее скорости и ускорения, при которых САР осуществляет слежение с заданной точностью. Например, если задана максимально допустимая ошибка регулирования e_m , то привлекая принцип равного влияния ограничения можно записать:

$$|x(t)_{\max}| < \frac{e_m}{3c_0}, \quad |\dot{x}(t)_{\max}| < \frac{e_m}{3|c_1|}, \quad |\ddot{x}(t)_{\max}| < \frac{2e_m}{3|c_2|}, \quad (5.2)$$

Отсюда, при необходимости, можно получить формулы для максимальных значений коэффициентов ошибок проектируемой САР по заданным максимально допустимой ошибке регулирования и величинам задания и его производных.

В статике, когда $x(t)=const$, ошибка слежения пропорциональна отслеживаемой (задающей) величине:

$$e(t) = c_0 x(t), \quad x(t) = const, \quad (5.3)$$

поскольку первая и вторая производные константы равны нулю (см. (5.1)).

Формулу, подобную (5.1) можно написать не только для ошибки слежения, но и для ошибки стабилизации, при этом воздействием будет возмущение.

Астатизм – косвенная характеристика качества работы САР в установившемся режиме. *Порядок астатизма* равен числу интеграторов в контуре, или, что эквивалентно, наименьшему индексу коэффициента ошибки, не равного нулю.

У статических САР, в контуре которых отсутствуют интеграторы, а уменьшение ошибки слежения достигается увеличением коэффициента усиления контура, коэффициент ошибки по положению c_0 не равен нулю.

Для статических САР во многих случаях считается достаточным, чтобы коэффициент ошибки по положению c_0 находился в пределах 0.01 – 0.1. В таком случае, как видно из (5.3), относительная точность слежения составит 1% – 10 %.

У статической САР (астатизм нулевого порядка) ошибка регулирования в установившемся режиме пропорциональна заданию. Если задание постоянно, то и ошибка постоянна. Если задание сравнительно медленно и плавно растёт, то и ошибка растёт по тому же закону. При постоянном воздействии ошибка постоянна, при линейно растущем задании ошибка линейно растёт с течением времени. В установившемся режиме ошибка регулирования много меньше растущего задания. У статической САР ошибка слежения меньше задания в $k+1$ раз, где k – коэффициент усиления контура. На рис. 5.2 показан процесс при $k = 23$.

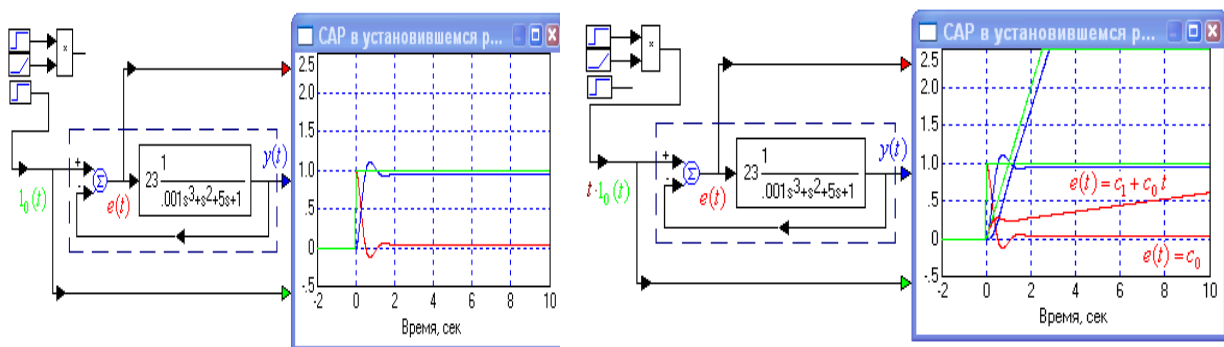


Рис. 5.2. Переходный процесс

Коэффициент ошибки по положению астатической САР, содержащей в контуре управления один или несколько последовательно включённых интеграторов, равен нулю: $c_0 = 0$.

Астатизм САР проявляется в том, что при отслеживании постоянных или меняющихся по степенному закону сигналов, ошибка регулирования САР в зависимости от порядка ее астатизма может быть нулевой. Чем выше порядок астатизма, тем может быть выше степень отличной от нуля производной изменения воздействия, которую САР отследит с нулевой, или как вариант, с постоянной ошибкой.

САР с астатизмом первого порядка отслеживает с нулевой ошибкой постоянный сигнал, с постоянной ошибкой линейно растущий сигнал. Если сигнал растёт все быстрее с течением времени, по квадратичной параболе, то ее ошибка регулирования линейно растет стечением времени. Все это следует из формулы (5.1). На рис.6.3 показана работа САР первого порядка астатизма. Степень роста ошибки со временем на единицу меньше степени роста задания (отслеживаемой величины). Астатическая САР первого порядка отслеживает постоянный сигнал с нулевой ошибкой и успевает отслеживать линейно растущие сигналы с постоянной ошибкой, пропорциональной скорости нарастания сигнала. Следить за все ускоряющимся сигналом (параболой) САР первого порядка при продолжительной работе не успевает: ошибка растёт линейно с течением времени. Но поскольку рост и убывание отслеживаемых сигналов обычно сравнительно не велики, и не продолжительны, то и ошибка при работе САР не успевает стать чрезмерно большой.

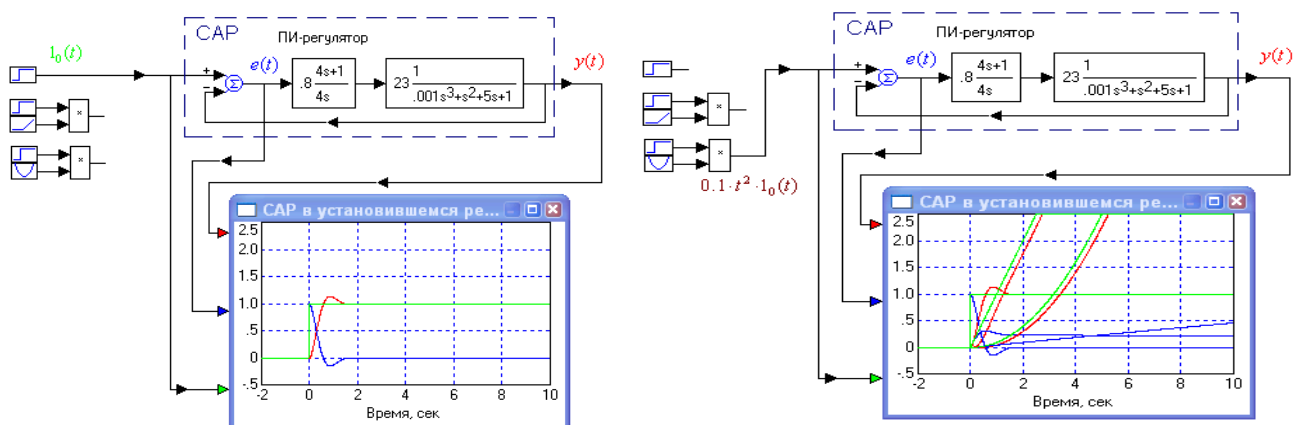


Рис. 5.3. САР первого порядка астатизма с интегратором, который входит в состав ПИ-регулятора

Астатическая САР второго порядка успевает отслеживать растущие с течением времени по параболе сигналы с постоянной ошибкой, пропорциональной ускорению нарастания сигнала. Проиллюстрируем работу САР в установившемся режиме слежения, когда на неё подаётся задание сложного вида (рис.5.4.).

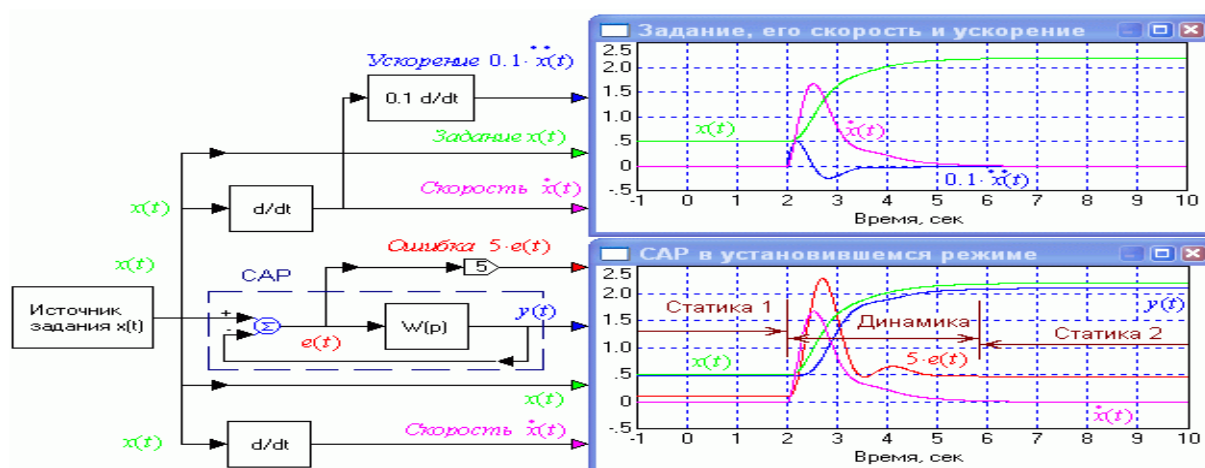


Рис. 5.4. Статическая САР в установившемся режиме, воздействие на неё и его параметры, реакция и ошибка регулирования, режимы слежения: статика и динамика

Задание $x(t)$ до второй секунды постоянно и равно 0.5, а затем плавно к седьмой секунде достигает уровня 2.2 и вновь становится постоянным. В рассматриваемом интервале времени САР, работая в установившемся режиме, дважды находится в статике и один раз в динамике, когда воздействие меняется, причём меняется сравнительно плавно и медленно.

На нижней осциллограмме управляемая величина $y(t)$ объекта управления, пусть и с некоторой ошибкой, повторяет задание $x(t)$, т.е. рассматриваемая САУ осуществляет слежение – выходная величина пропорциональна заданию. Видно, что ошибка регулирования в динамике значительно, данном случае раз в пять, превышает ошибку статического режима.

Статический режим работы САР поддерживается с -1 по 2 и с 7 по 10 сек, когда воздействие не изменяется. Поскольку ошибка регулирования в статическом

режиме не равна нулю, рассматриваемая САР статическая (не имеет астатизма). Второй отрезок работы в статике (Статика 2) соответствует возросшему значению задания и, как видно, пропорционально возросла и ошибка регулирования $e(t)$. Коэффициент пропорциональности здесь – коэффициент ошибки САР по положению c_0 (5.3).

На рис.5.5. представлено вычисление коэффициентов ошибок для САР, показанной на рис. 5.2.

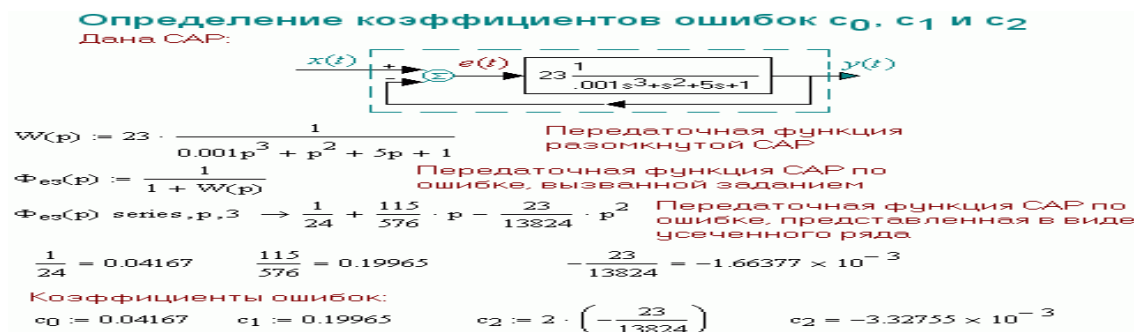


Рис. 5.5. Определение коэффициентов ошибок

Моделирование САР по ошибке. Промоделируем САР, работающую в установившемся режиме, с помощью полученных коэффициентов ошибок и сравним ошибки модели с ошибками исходной САР. Модель (рис.5.6) основывается на уравнении (5.1). Учет в модели коэффициента ошибки по скорости c_1 существенно улучшает ее точность, а учет коэффициента по ускорению c_2 в данном случае практически не влияет на ошибку. Это значит, что ускорение изменения данного сигнала для рассматриваемой САР относительно не велико. В статике совпадение полное (фиолетовая кривая повторяет красную), а в динамике в ошибках есть отличие, обусловленное вкладом переходного процесса. Но этот вклад в данном случае сравнительно мал и характер изменения ошибки модели в основном соответствует поведению ошибки САР.

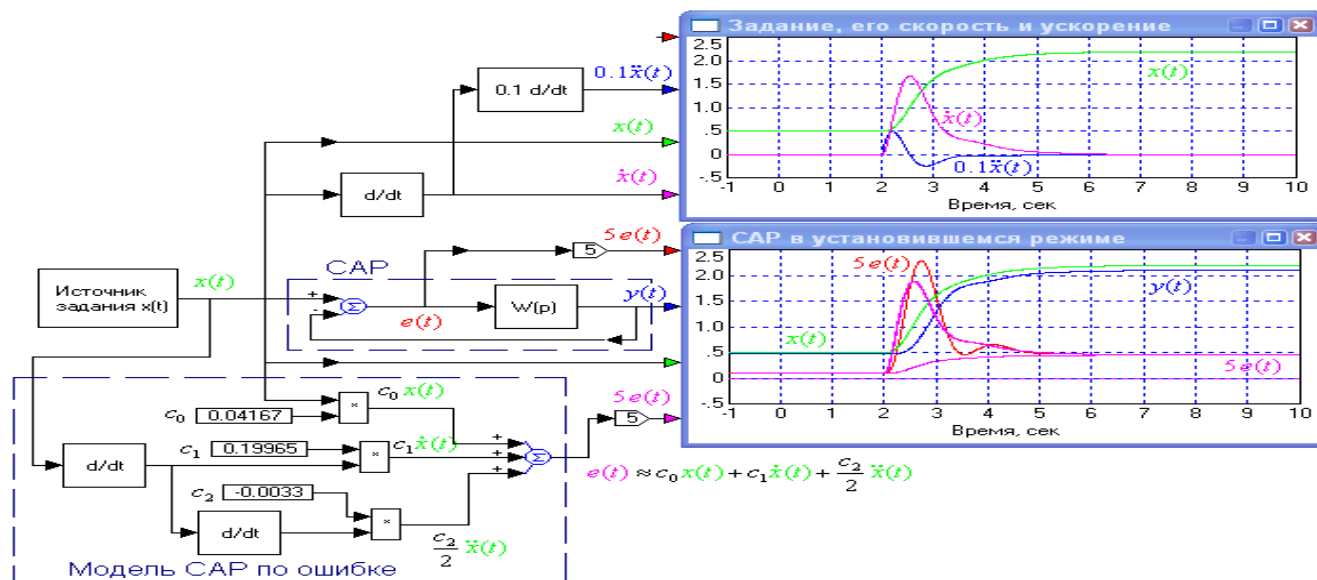


Рис. 5.6. Простая модель САР по ошибке, построенная на основе ее коэффициентов ошибок, адекватна исходной САР, работающей в установившемся режиме

Смысл модели САР по ошибке, представленной рис.5.6, для установившегося режима состоит в том, что дифференцирование гладкого сигнала предсказывает его поведение на некоторый интервал времени вперед. А коэффициенты ошибок являются весовыми коэффициентами, определяющими свойства САР воспринимать производные воздействия, и учитывающими вклад сигнала и его производных в получаемую ошибку. На этой основе может быть построена и модель САР, определяющая ее выходной сигнал в установившемся режиме. На рис.5.7 представлено *вычисление коэффициентов отклика*.

Определение коэффициентов отклика g_0 , g_1 и g_2

$$W(p) := 23 \cdot \frac{1}{0.001p^3 + p^2 + 5p + 1} \quad \text{Передаточная функция разомкнутой САР}$$

$$\Phi(p) := \frac{W(p)}{1 + W(p)} \quad \text{Передаточная функция замкнутой САР}$$

$$\Phi(p) \text{ series, } p, 3 \rightarrow \frac{23}{24} - \frac{115}{576} \cdot p + \frac{23}{13824} \cdot p^2 \quad \text{Передаточная функция САР, представленная в виде усеченного ряда}$$

Коэффициенты отклика:

$$g_0 := 0.95833 \quad g_1 := -0.19965 \quad g_2 := 2 \cdot \left(\frac{23}{13824} \right) \quad g_2 = 3.32755 \times 10^{-3}$$

$$\frac{23}{24} = 0.95833 \quad -\frac{115}{576} = -0.19965$$

Рис. 5.7. Вычисление коэффициентов отклика

В установившемся режиме линейная САР может рассматриваться в виде простой модели, выходной сигнал которой определяется взвешенной суммой отслеживаемой величины и ее младших производных:

$$y(t) = g_0 x(t) + g_1 \frac{d}{dt} x(t) + \frac{g_2}{2} \frac{d^2}{dt^2} x(t) + \dots, \quad (5.4)$$

где g_0 , g_1 и g_2 – коэффициенты отклика

Отметим, что коэффициенты ошибок и соответствующие коэффициенты отклика связаны:

$$c_0 = \frac{1}{k+1}, \quad g_0 = \frac{k}{k+1},$$

где k – коэффициент усиления контура

$$c_0 = 1 - g_0, \quad c_1 = -g_1, \quad c_2 = -g_2, \dots \quad (5.5)$$

Моделирование САР по отслеживаемой величине. Модель, построенная на основе коэффициентов отклика состоятельна, т.е. адекватна, соответствует реальной САР в установившемся режиме работы (рис.5.8.). Как видно из рис.5.8., в установившемся режиме, когда переходные процессы слабо выражены и в задании отсутствуют шумы, модель, построенная на основе коэффициентов отклика, дает хорошее приближение к полной модели САР.

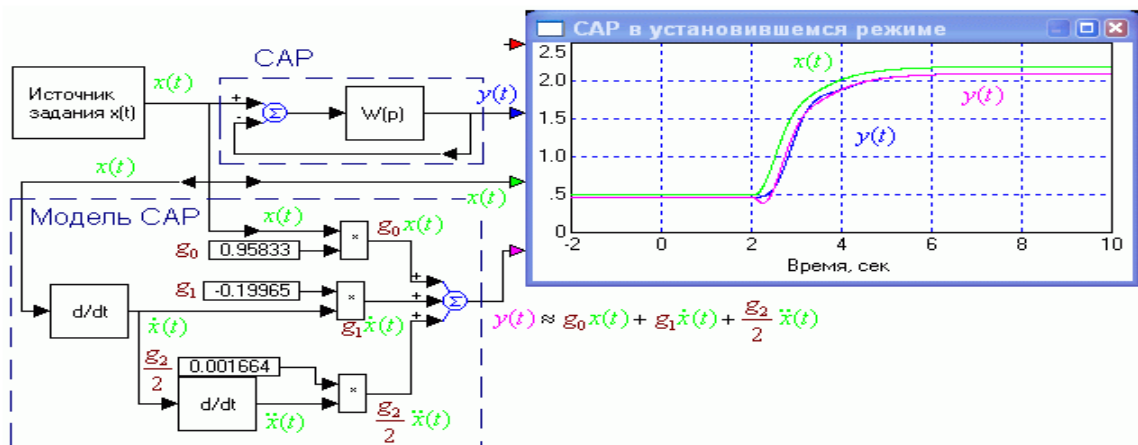


Рис. 5.8. Модель САР, построенная на основе коэффициентов отклика

Определение коэффициента ошибки по положению c_0 . Из формулы (5.3) следует, что при постоянном воздействии, равном единице, ошибка регулирования численно равна коэффициенту ошибки по положению c_0 . Другими словами, установившееся значение ошибки при воздействии на САР ступенчатой единичной функции равно коэффициенту ошибки по положению c_0 .

Пример экспериментального определения коэффициента ошибки по положению для рассматриваемой системы приведено на рис.5.9. С течением времени ошибка отслеживания постоянного единичного сигнала стремится к значению коэффициента ошибки c_0 по положению.

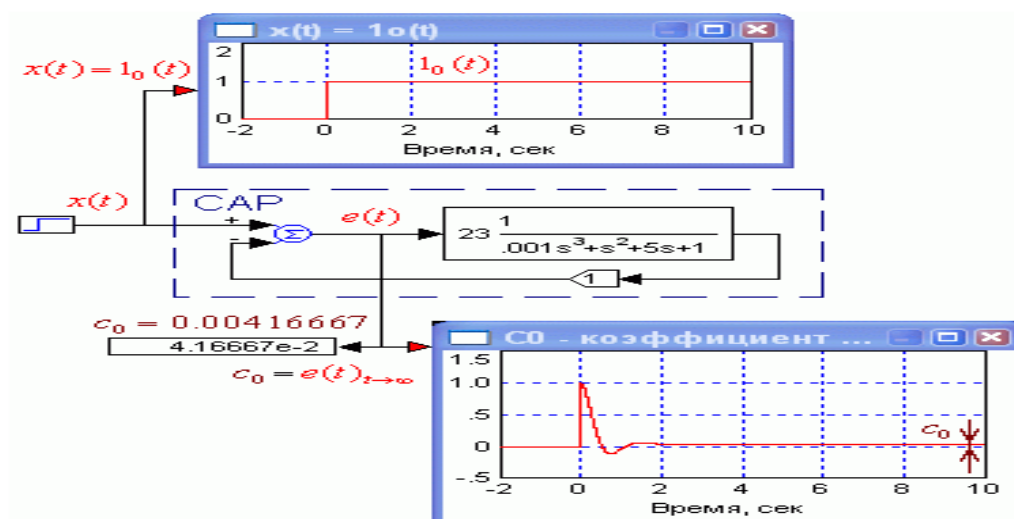


Рис. 5.9. Экспериментальное определение коэффициента ошибки по положению

Определение коэффициента ошибки по скорости. При линейно растущем воздействии $t \cdot 1_0(t)$ по окончании переходных процессов для ошибки слежения можно на основе (1) записать:

$$e(t)_{t \rightarrow \infty} = c_0 t + c_1 \quad (5.6)$$

Поскольку в установившемся режиме первая производная задания равна единице $d/dt\{x(t)\}=1$, а вторая производная задания равна нулю: $d^2/dt^2\{x(t)\} = 0$, то

$$c_1 = e(t)_{t \rightarrow \infty} - c_0 t \quad (5.7)$$

Пример экспериментального определения коэффициента ошибки по скорости для рассматриваемой системы приведен на рис.5.10. С течением времени ошибка, за вычетом величины, пропорциональной входному линейно растущему сигналу, стремится к значению коэффициента ошибки c_1 по скорости. У САР первого порядка астатизма коэффициент ошибки по положению c_0 равен нулю и схема рис. 5.10 упрощается.

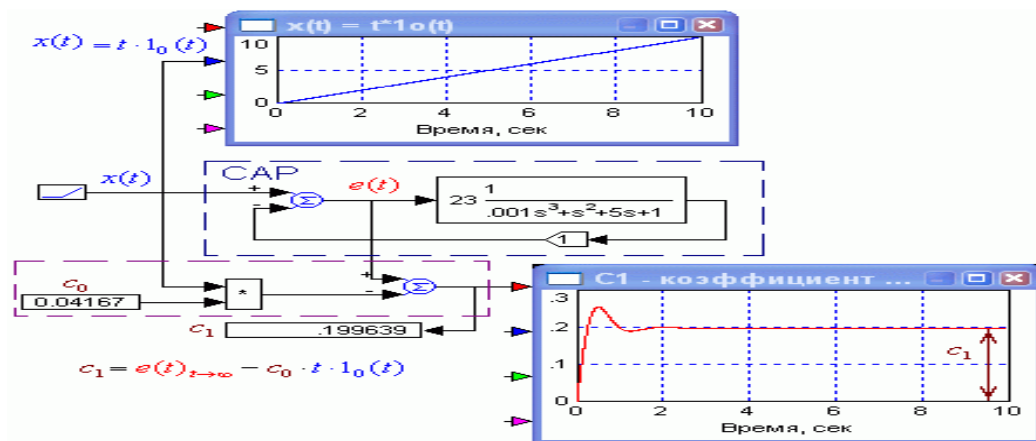


Рис. 5.10. Пример экспериментального определения коэффициента ошибки по скорости

На основе формулы (5.1) по аналогии с (5.6) и (5.7) может быть построена и модель для экспериментального определения *коэффициента ошибки по ускорению*. В этом случае на вход САР следует подавать сигнал, растущий по параболе.

Качество САР при гармонических воздействиях. Работа САР по отслеживанию периодического воздействия, например, синусоидального, происходит в установившемся режиме. Пробное гармоническое (синусоидальное) воздействие позволяет оценить качество работы САР при отслеживании и компенсации знакопеременных воздействий, например, вибраций, а также шумов. Качество САР при гармоническом пробном сигнале характеризуется частотными характеристиками САР по каналам: управления, задание – ошибка, возмущение – ошибка, а также параметрами этих характеристик. Характеристики могут быть получены расчетным путем или измерены экспериментально.

Переходный режим. САР работает в переходном режиме тогда, когда происходит резкое изменение задания или возмущения (скачкообразное изменение самого воздействия или его младших производных). Переходный режим сугубо динамический, поскольку воздействия на САР меняются во времени и меняются резко. Поэтому на выходном сигнале в переходном режиме существенно сказываются собственные инерционно-колебательные свойства САР. В течение переходного режима работы САР не всегда выполняет задачи слежения и стабилизации: ошибки регулирования могут быть слишком велики.

Прямые показатели качества переходного режима характеризуют то, как быстро и с какими ошибками САР справляется с резкими изменениями задания и возмущения, отслеживает и компенсирует их. Прямые показатели это параметры: время регулирования t_p и перерегуливание σ .

В дополнение к названным числовым показателям качества должен быть указан и вид переходной функции САР. САР хорошего качества, имеет вид переходной функции, близкий к граничному между монотонной и апериодической. И тот и другой параметры легко определяются по переходной функции САР (рис.5.11).

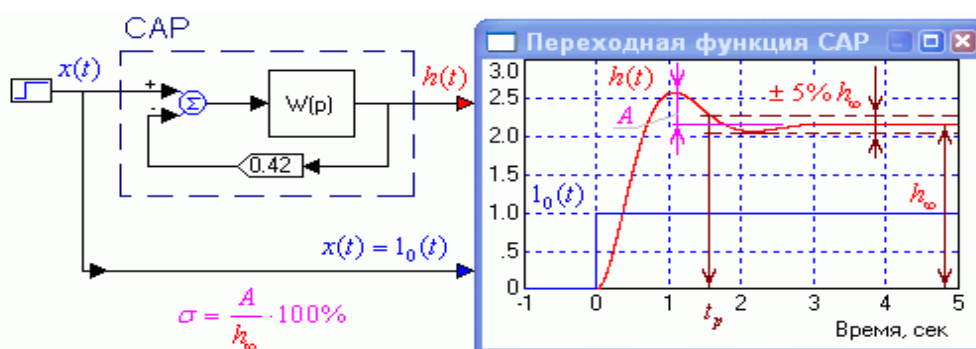


Рис. 5.11. Определение прямых показателей качества по переходной функции САР

Смысл прямых показателей следующий. *Время регулирования t_p* это время, за которое переходная функция достигает уровня, который отличается от ее асимптотического значения h_∞ не более чем на 5% (т.е. функция попадает в т.н. 10%-й коридор). Т.о., в течение времени регулирования t_p ошибки слежения за ступенчато изменяющимся сигналом велики (рис.5.11). Ошибка регулирования при отслеживании ступенчатой функции в течение переходного процесса вначале прыгает скачком до уровня входного сигнала, а затем постепенно уменьшается. В данном случае переходный процесс заканчивается примерно за одну секунду и далее САР начинает следить за входным сигналом с удовлетворительной точностью.

Перерегуливание σ это максимальное относительное превышение переходной функцией ее установившегося значения, выраженное в процентах (см. рис. 5.11):

$$\sigma = \frac{A}{h_\infty} \cdot 100\% \quad , \quad (5.8)$$

Нереализуемая идеальная (инвариантная) САР является безинерционной, ее выходной сигнал при отслеживании ступенчатого изменения задания изменился бы скачком. Реальная САР обладает инерционностью и поэтому ее выходной сигнал устанавливается за время t_p , которое и характеризует количественно инерционность реальной САР, т.е. ее быстродействие. Перерегулирование характеризует степень колебательности САР. Чем быстрее САР переходит из одного установившегося режима в другой, тем меньше совокупная ошибка регулирования, связанная с переходным процессом. Но на практике бывает важно и то, как «мягко» переходит САР из определяемого одним значением входной величины (задания или возмущения), к установившемуся режиму, определяемому другим значением. Поэтому часто в качестве оптимальной имеет смысл принять такую САР, у которой переходная функция находится на границе между монотонной и аperiodической. Последнее условие выполняется автоматически, если перерегулирования составляет 1% - 5 %.

На практике от САР зачастую требуется отслеживать значительно более плавно изменяющиеся сигналы, чем ступенчатая функция. И, поэтому, если САР удовлетворительно отслеживает ступенчатую функцию, достаточно быстро и с допустимой ошибкой (перерегулированием), то сигналы, изменяющиеся более плавно, САР будет отслеживать еще лучше.

Косвенные показатели качества переходного режима это:

- - запасы устойчивости САР по фазе и амплитуде, а также частота среза разомкнутого контура;
- - корневые показатели качества (колебательность и затухание, среднегармоническое значение);
- - частотные показатели качества (граничная частота и колебательность частотной характеристики замкнутой САР) и др.

Если косвенные показатели качества САР попадают в известные диапазоны, то качество САР, определяемое прямыми показателями, оказывается удовлетворительным или лучше.

Работа САР в переходном режиме. Граница между установившимся динамическим режимом работы САР при достаточно быстро изменяющихся воздействиях,

когда САР не успевает отслеживать такое воздействие и ошибка возрастает, и переходным режимом, когда САР в явной форме проявляет свои внутренние инерционно-колебательные свойства, несколько размыта. По мере увеличения скорости изменения младших производных воздействия установившийся динамический режим плавно становится переходным (свободная компонента становится все более заметной на фоне принужденной). Переходный режим это негативное явление, сопровождающее процесс слежения и стабилизации. Он обусловлен резкими изменениями отслеживаемой величины и возмущения, которые не всегда удастся контролировать и сглаживать. На сравнительно короткое время ошибки регулирования, связанные с переходным процессом могут достигать значительных величин, иметь порядок отслеживаемой величины.

1.4 Синтез САР

Синтез (теоретическое конструирование) линейной САР для указанного объекта управления (ОУ) это построение модели САР отвечающей требованиям качества, предъявляемым к ней заказчиком в отношении плавности, быстродействия и точности регулирования.

Оптимизация САР это процедура модификации структуры и определения таких численных значений параметров заданной САР, при которых она имеет наилучшее, в определённом заранее смысле, качество регулирования (слежения и стабилизации). Оптимизация это частый случай синтеза САР.

Критерий оптимизации задаёт численную меру качества САР и прямо или косвенно указывает такое ее значение, при котором качество САР считается наилучшим. Критерий оптимизации САР позволяет в относительной мере судить и о степени приближения качества САР к некоторому идеалу, определяемому конкретным критерием. Изменяя параметры и структуру САР, добиваются наилучшего численного значения меры качества САР, соответствующего выбранному критерию, т.е. оптимизируют САР.

Метод оптимизации САР это алгоритм, последовательность действий, которые следует осуществить для того, чтобы получить из исходной САР наилучшую, с

точки зрения конкретного критерия качества, САР. Методы бывают аналитические, приближенные графо-аналитические и др. Они могут реализовываться исследователем «вручную» или программой моделирования.

Оптимизация САР может осуществляться и по совокупности критериев.

Идеального, абсолютно наилучшего критерия качества САР, а значит и метода оптимизации, не существует. Для одних объектов управления, например, массивных механизмов, прежде всего требуется плавность регулирования, а уж потом минимизация времени регулирования. Для других объектов, например, малоинерционных электронных систем слежения, более важным является минимизация времени регулирования, пусть даже и с повышенной, но допустимой колебательностью.

Если для оптимизации САР, т.е. достижения желаемого ее качества, оказывается достаточным только определения и задания наилучших значений настроечных параметров ее элементов (коэффициентов усиления и постоянных времени звеньев), прежде всего регулятора, то такая *оптимизация называется параметрической*.

Параметрическая оптимизация САР это определение таких значений ее параметров, при которых САР имеет наилучшие, в определённом заранее смысле, показатели качества.

Значимость решения такой задачи определяется тем, что в типичной рутинной ситуации, когда известна структура САР, и уже заданы типы и характеристики всех ее элементов и способ их соединения (т.н. неизменяемая часть), выбранных на этапе предварительного ее проектирования, остаётся лишь определить тип и наилучшие (оптимальные) настроечные параметры регулятора.

Невозможность достижения желаемого качества изменением параметров САР приводит к необходимости изменения не только параметров, но и структуры САР. В простейшем случае может потребоваться заменить П – регулятор на ПИ – или ПИД – регулятор, т.е. изменить структуру регулятора.

Оптимизация САР, требующая изменения структуры и настроечных параметров ее элементов называется *структурно-параметрической*.

Как правило, при решении задач оптимизации предполагается, что параметры объекта управления изменению не подлежат: объект задан. Но в некоторых, исклю-

чительных случаях для решения технологической задачи может потребоваться и изменение объекта управления, если при имеющемся задаче технологического процесса, обслуживаемого системой автоматического регулирования, не решаются с должным качеством.

Смысл оптимизации в узком смысле сводится к минимизации ошибок регулирования САР в переходном и установившемся режимах, а также ее времени регулирования путем определения и задания в САР наилучших значений настроечных параметров.

Функция цены это математическое понятие, определяющее совокупную количественную относительную меру качества САР при некотором сочетании ее параметров. Функция цены задаётся исследователем так, чтобы при наилучшем в определенном смысле сочетании и значениях параметров эта функция имела минимум. Функциями цены могут быть *среднеквадратическая ошибка* (СКО) регулирования в переходном режиме, *величина* колебательности или *перерегулирования* и др. Функция цены является относительной мерой качества в том смысле, что позволяет сравнивать качество одной и той же САР при разных значениях ее параметров, но разные САР эта мера не позволяет сравнивать, для такого сравнения она теряет смысл.

Из множества критериев качества САР для рассмотрения ниже выберем критерий минимума среднеквадратической ошибки (СКО), а также сформулируем простой и эффективный *критерий* качества САР, основанный на *близости* величины перерегулирования САР к 5%.

Примечание: В ряду других критериев качества отметим близость настройки САР к т.н. модульному (МО), т.е. приближение ее к фильтру Баттерворта (http://model.exponenta.ru/bt/bt_00117.html), и симметричному (СО) оптимумам.

Критерий минимума среднеквадратической ошибки (СКО). Этот критерий качества САР использует в качестве функции цены среднеквадратическую ошибку (СКО) слежения или стабилизации в переходном режиме. Наилучшей настройкой САР (значения и сочетание параметров ее элементов) при этом считается такая, при которой СКО регулирования достигает минимума. Метод оптимизации по критерию минимума СКО состоит в выборе таких ее параметров САР, при которых СКО -

среднеквадратическая ошибка переходного процесса (без учета ошибок установившегося режима) минимальна:

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ж}}} \int_0^T e^2(t) dt} \rightarrow \min \quad (5.9)$$

Смысл формулы (5.9) состоит в том, что чем короче переходный процесс, и чем меньше колебательность САР и ее ошибки перерегулирования, тем меньше получается значение СКО. Возведение в квадрат ошибки регулирования увеличивает вклад в СКО больших значений ошибки и не позволяет положительным и отрицательным значениям компенсировать друг друга при интегрировании. Устремление СКО к минимуму приводит к САР, имеющей высокое, насколько это возможно для конкретной САР, быстродействие, но несколько завышенную, а иногда чрезмерную колебательность. Такая настройка может служить и исходной для ее последующего уточнения. Время интегрирования для получения СКО с достаточной точностью в моделирующей программе следует выбирать большим, чем время регулирования САР. Для статических САР из ошибки $e(t)$ в (5.9) следует вычесть ее установившееся значение $e_{\text{уст}}$. Критерий минимума СКО предпочтительнее использовать для минимизации времени регулирования, т.е. обеспечения максимального быстродействия САР, например, в малоинерционных электронных системах слежения. Критерий минимума СКО может быть модифицирован для уменьшения колебательности САР.

Критерий 5%-го перерегулирования (Сигма 5). Во многих задачах автоматического регулирования, например при управлении приводом поворота или подъема стрелы экскаватора, когда масса поворачиваемой электроприводом конструкции составляет десятки и сотни тонн, весьма нежелательно иметь излишнюю колебательность, вызывающую знакопеременные нагрузки на привод, сокращающие срок его службы. В таких случаях предпочтительнее иметь монотонную разгонную характеристику САР. При этом время регулирования, хотя и важный параметр, отступает на второй план. Тем не менее, если настроить САР, в частности ее регулятор, так, чтобы перерегулирование составило примерно 5%, то и знакопеременные нагрузки бу-

дут отсутствовать, и быстродействие получится близким к максимально возможному для данного объекта управления (рис.5.12).

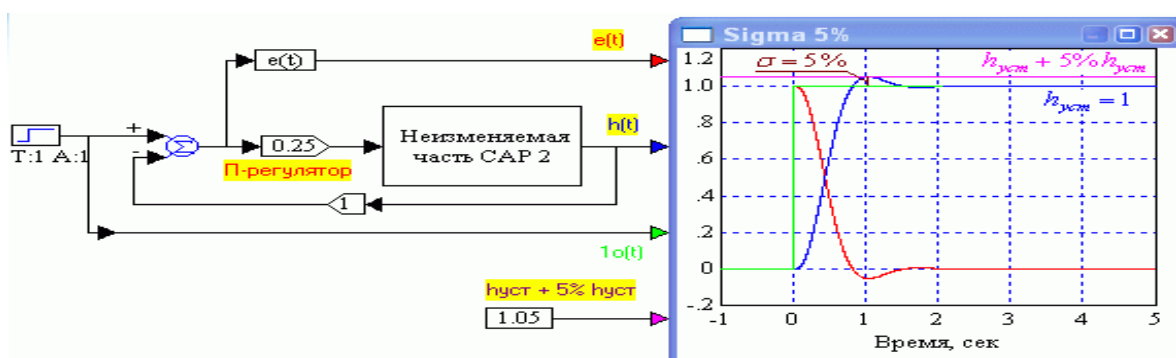


Рис. 5.12. Астатическая САУ, настроенная на оптимум качества по критерию Сигма 5 близости перерегулирования к 5%

Настройка САУ на 5%-ое перерегулирование минимизирует время регулирования при одновременном обеспечении плавности изменения переходной характеристики.

1.5. Регуляторы и законы регулирования

Регулятором называют полнофункциональное, конструктивно оформленное в виде отдельного блока физическое устройство. Это устройство имеет вход для получения сигнала с датчика управляемой величины объекта управления, выход для подачи сигнала управления на исполнительный механизм САУ, пульт для задания человеком-оператором требуемого поведения САУ или систему связи с компьютером, управляющим технологическим процессом. Наконец, такой физический регулятор имеет устройство, вырабатывающее сигнал управления на основе задания, текущего значения управляемой величины и, м.б. возмущения, и заданного алгоритма обработки этих сигналов. Многие технические регуляторы реализуются на основе микроконтроллеров. Кроме того, бывает, что в состав технического регулятора включают и исполнительный механизм (ИМ), и регулирующий орган (РО). Такой регулятор достаточно подключить к объекту управления, чтобы получилась САУ.

В ТАУ *регулятором называют структурный алгоритмический блок*, расположенный на функционально-структурной схеме сразу за устройством сравнения задания и управляемой величины (сумматором) (рис.5.13). Этот блок преобразует по

заданному алгоритму сигнал ошибки в сигнал, подаваемый на модель исполнительного механизма (ИМ) для управления последней.

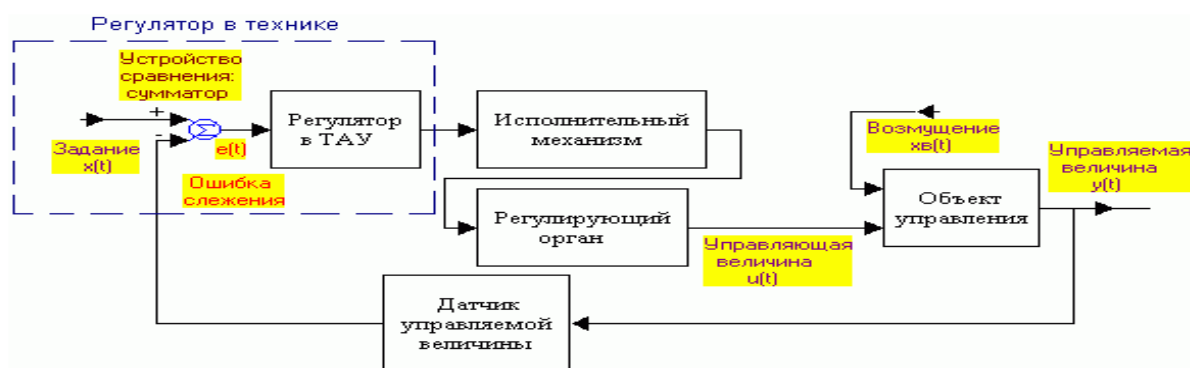


Рис. 5.13. Регулятор САР с управлением по отклонению в ТАУ это часть технического регулятора

Таким образом, в технике регулятор это физический функциональный блок, а в ТАУ в САР с управлением по отклонению регулятор это алгоритм преобразования сигнала ошибки в сигнал управления. В САР с комбинированным управлением по отклонению и возмущению регулятор реализует алгоритм преобразования сигналов ошибки и возмущения в сигнал управления.

Законы регулирования - это математические алгоритмы, в соответствии с которыми в САР с управлением по отклонению сигнал ошибки слежения (отклонение), преобразуется в сигнал управления, подаваемый на исполнительный механизм САР или непосредственно на объект управления, если ИМ и РО включены в состав модели последнего. Законы регулирования позволяют САР решать возложенные на нее задачи: осуществлять слежение и стабилизацию с требуемым качеством. Наиболее часто используются на практике регуляторы, реализующие *П-, ПИ- и ПИД- законы регулирования* (пропорциональный, пропорционально-интегральный и пропорционально – интегрально - дифференциальный).

П- регулятор - это регулятор, реализующий простейший пропорциональный закон регулирования. Функционально он представляет собой безинерционный усилитель, а структурно – алгоритмически это пропорциональное звено (рис. 5.14) Т.о. П-регулятор просто усиливает сигнал ошибки в некоторое число раз. Важность П-регулятора определяется тем, что в статических САР, где он используется, изменяя

его коэффициент усиления можно не только добиться устойчивости САР, но и оптимизируя значение этого коэффициента оптимизировать и качество всей САР. Однако, получить требуемые или просто хорошие показатели качества САР с помощью одного только П-регулятора удастся далеко не всегда.

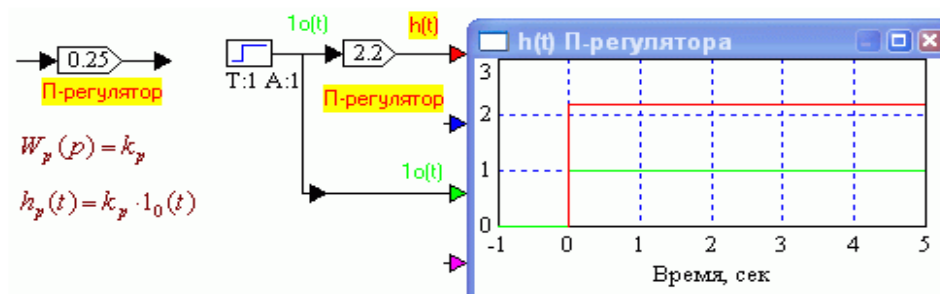


Рис. 5.14. П-регулятор, его передаточная и переходная функции

ПИ-регулятор. Выходной сигнал ПИ-регулятора пропорционален взвешенной сумме входного сигнала и интеграла от него (рис. 5.15). В соответствии с этим алгоритмом строится так называемая параллельная модель ПИ-регулятора. Часто используется и альтернативная эквивалентная модель, представляющая собой последовательное соединение интегратора и форсирующего звена (рис. 5.15). ПИ-регулятор обладает двумя важными достоинствами. Во-первых, введение его в статическую САР вместо П-регулятора превращает САР в астатическую, что улучшает качество регулирования в установившемся режиме. Во-вторых, ПИ-регулятор позволяет посредством форсирующего звена, входящего в его состав, в существенной мере компенсировать на высоких частотах инерционность, вносимую интегратором, и сохранить качество переходного режима исходной статической САР, в частности ее быстродействие. Таким образом, ПИ-регулятор простыми средствами одновременно улучшает качество установившегося режима работы исходной статической САР, и сохраняет качество переходного, чем и обусловлено широкое распространение таких регуляторов.

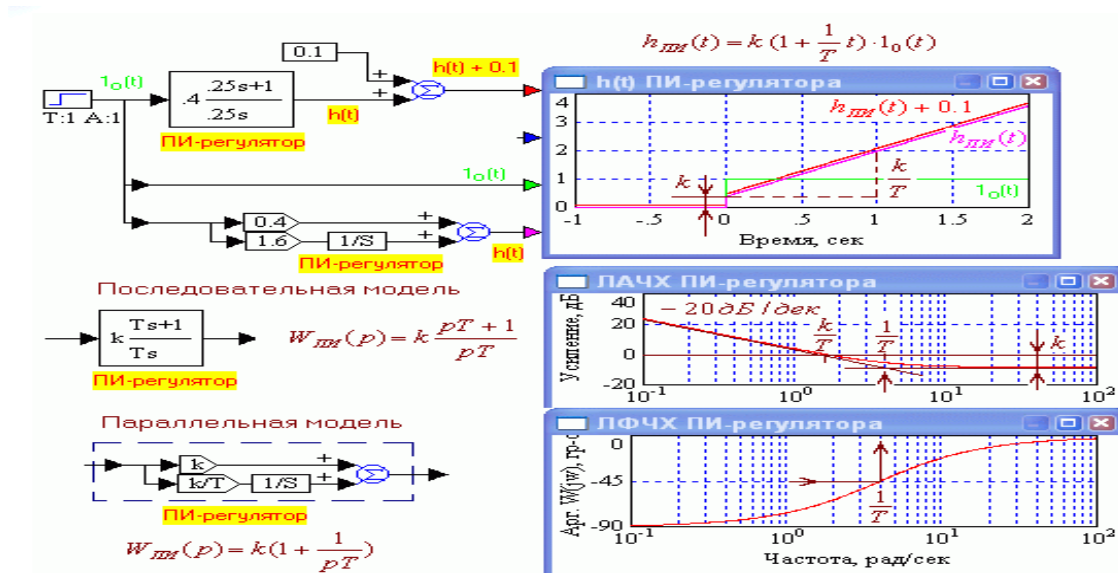


Рис. 5.15. ПИ-регулятор, его передаточные и переходные функции и частотные характеристики

Как видно на рис. 5.15, на низких частотах ПИ-регулятор ведет себя как интегратор, а на высоких – как пропорциональное звено. Тем самым при правильной настройке ПИ-регулятора улучшаются свойства САР в установившемся режиме и сохраняются свойства переходного режима, т.е. быстродействие и точность

ПИ-регулятор не только усиливает сигнал ошибки, как это делает Прегулятор, но и благодаря наличию интегратора накапливает его со временем. Это позволяет САР с ПИ-регулятором работать в установившемся режиме при отслеживании постоянных заданий с нулевой ошибкой. Другими словами, САР с ПИ-регулятором – астатическая.

ПИД-регулятор. Выходной сигнал ПИД-регулятора пропорционален взвешенной сумме входного сигнала, интеграла от него и его производной (рис. 5.16). В соответствии с этим алгоритмом строится так называемая параллельная модель ПИ-регулятора. Часто используется и эквивалентная альтернативная модель, представляющая собой последовательное соединение интегратора и двух форсирующих звеньев (рис. 5.16). Назовем такие модели идеальными.

«Реальный» ПИД-регулятор выполняет свои функции только при сигналах, спектр которых ограничен сверху, т.е. для достаточно медленных сигналов (красные стрелки). Этот диапазон может быть расширен до требуемой величины уменьше-

ем вспомогательной постоянной времени T_3 . ПИД-регулятор поднимает усиление одновременно на низких и на высоких частотах. Он более энергично, чем ПИ-регулятор реагирует на быстрые изменения входных сигналов, что видно на переходной функции. В результате улучшается и быстродействие САР, и качество ее установившегося и переходного режимов.

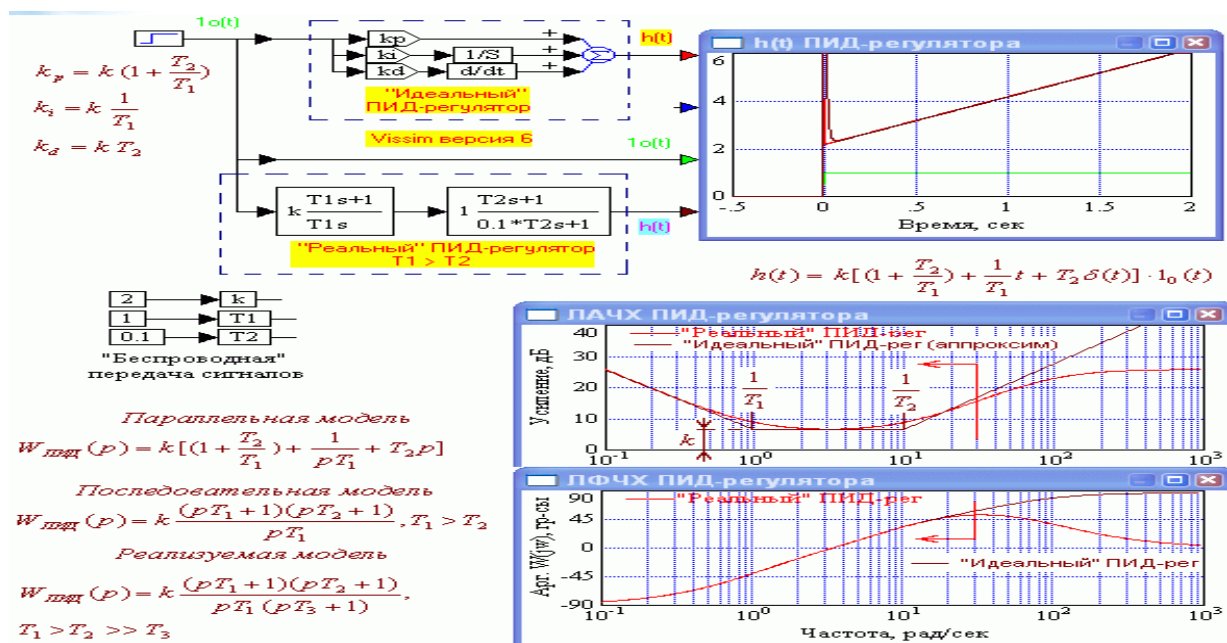


Рис. 5.16. Три модификации ПИД-регулятора

1.6. Методы оптимизации САР

Математически оптимизация САР сводится к минимизации функции стоимости путем определения (например, подбором) наилучших значений и сочетания параметров, характеризующих САР. Разработан целый ряд аналитических методов оптимизации, алгоритмов, которые сводятся к определению значений параметров, при которых функция стоимости становится минимальной. Например, в программе Vissim можно применить на выбор методы Пауэлла, Флетчера-Ривза, Полака-Рибейры и др. Основная идея алгоритмических методов оптимизации состоит, во-первых, в таком малом изменении предварительно заданных приближенных значений параметров, при котором функция цены плавно и последовательно уменьшается, пока не достигает минимума (метод кратчайшего спуска). Так можно определить ближайший к начальным значениям параметров минимум. Но этот минимум цены в

зависимости от выбора начальных значений параметров может оказаться вовсе не самым малым, глобальным, а локальным.

Во-вторых, если не только не известно приближенное значение параметров, близких к минимуму цены, но даже неизвестно, имеется ли минимум вообще, то приходится перебирать значения параметров в очень широких диапазонах, с последующим уточнением расположения минимума функции цены. Такой алгоритм в случае нескольких минимумов функции цены может случайным образом привести к любому из них. Случается, что, при решении задач оптимизации исследователь не знает ни количество локальных минимумов, ни достаточно близких к разыскиваемому минимуму значений параметров. Для правильного решения задачи приходится применять метод проб и ошибок, задавая разные начальные значения параметров, определяя минимум функции цены и сравнивая получаемые результаты один с другим и с требованиями задания на проектирование САР.

Определение и экспериментальное уточнение настроечных параметров регуляторов САР. Общая идея предлагаемой ниже методики параметрической оптимизации, основывается на предварительном определении приближенных значений настроечных параметров регуляторов по ЛАЧХ неизменяемой части САР, с последующим уточнением их значений методом проб и ошибок. При таком методе оптимизации, будет ли она выполняться компьютером или экспериментально и вручную, важно для сокращения работы подобрать начальные значения параметров по возможности близкие к их оптимальным значениям, если такие существуют.

Настройка ПИ-регулятора. Если при оптимизации коэффициента усиления статической САР, рассмотренной в предыдущем пункте, не удастся получить САР с хорошими показателями качества (САР имеет большие ошибки в установившемся режиме вследствие малого усиления контура на нижних частотах), то приходится изменять структуру регулятора, заменяя П-регулятор на ПИ-регулятор. Поскольку САР с ПИ-регулятором является астатической, то для предварительной ее коррекции достаточно обеспечить точно такие же, как и ранее, запасы устойчивости по фазе $45^{\circ} - 70^{\circ}$, лучше всего 60° , по амплитуде 12 – 20 дБ (4 – 10 раз), лучше 18 дБ, путем изменения коэффициента усиления контура. Поскольку ПИ-регулятор содержит

интегратор, то САР с ним обязательно является астатической. Поэтому требований к величине коэффициента усиления контура с точки зрения обеспечения качества работы САР в статике, в отличие от статической САР, не предъявляется.

Обеспечить требуемые запасы устойчивости можно в различной последовательности, но предпочтительнее сделать следующим образом.

1. В исходной статической САР, варьируя коэффициент усиления ПИ-регулятора обеспечить запас устойчивости по фазе в $60^0 - 70^0$ или больше, и запас устойчивости по амплитуде не менее 12 дБ.

2. По ЛАЧХ разомкнутого контура только что скорректированной САР определить оптимальное значение постоянной времени T ПИ-регулятора (рис.5.17). Искомая постоянная времени обратно пропорциональна частоте сопряжения отрезков аппроксимации САР с наклонами 0 и -20 дБ/дек. В данном примере $T = 1/0.5 = 2.0$ сек.

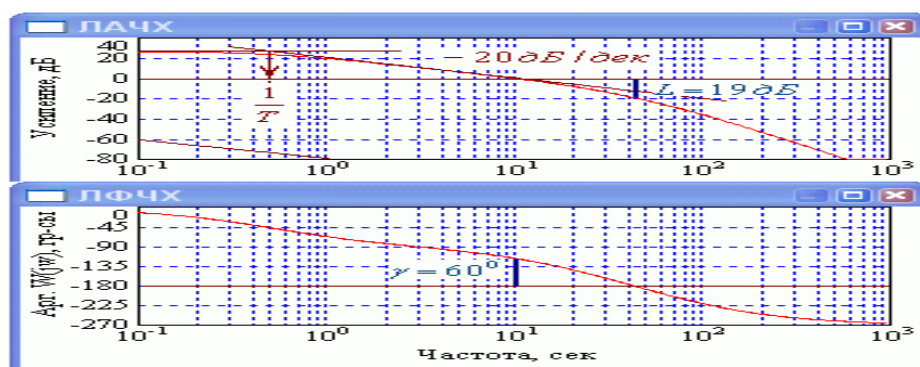


Рис. 5.17. Определение постоянной времени ПИ-регулятора по ЛАЧХ разомкнутого контура

3. Начальное значение коэффициента усиления ПИ-регулятора выбрать равным $k = 0.5$. В результате, с учетом коэффициента усиления ПИ-регулятора ($k_p = 0.25$) передаточная функция ПИ-регулятора и схема САР показанны на рис.5.18. Как видно, переходная характеристика удовлетворительна, а запасы устойчивости слегка завышены, поэтому перерегулирование равно нулю. Исходное приближение вполне удовлетворительное, но быстродействие САР может быть несколько повышено.

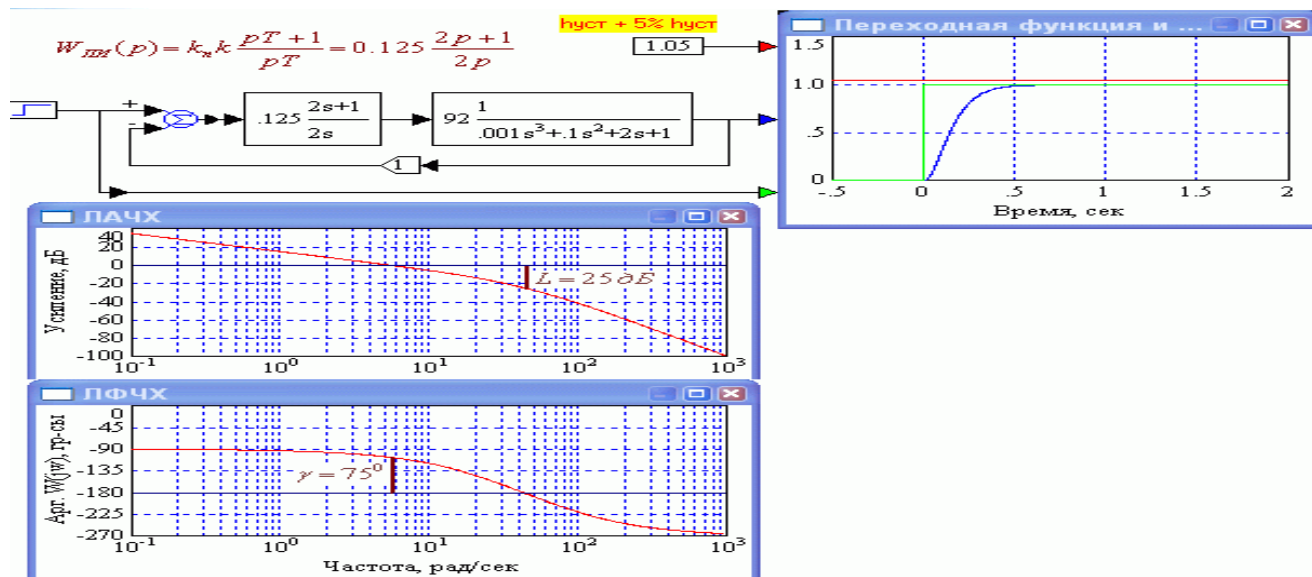


Рис. 5.18. Приближенная настройка ПИ-регулятора

Оптимизация значения коэффициента усиления ПИ-регулятора. В общем случае для ПИ-регулятора оптимизацию следует осуществлять по обоим его параметрам: коэффициенту усиления k и постоянной времени T . Это трудоемкая работа для выполнения вручную. Поэтому далее можно ограничиться лишь оптимизацией коэффициента усиления, считая, что постоянная времени T определена с удовлетворительной точностью. Остается методом проб и ошибок, изменяя коэффициент усиления ПИ-регулятора добиться 5%-ого или чуть меньшего перерегулирования σ .

1.7 САР в режиме стабилизации

Выше основное внимание уделялось оптимизации САР в режиме слежения. САР при управлении типовыми промышленными объектами и процессами в соответствии с требованиями технологии чаще всего основную часть времени работают в режиме стабилизации, компенсируя влияние изменяющихся возмущений на управляемую величину объекта. Этим и определяется значимость режима стабилизации – именно в этом режиме производится продукция и обеспечивается ее должное качество. Оптимизировав САР в режиме слежения, следует проверить качество ее работы в режиме стабилизации и при необходимости внести коррективы. Для анализа САР в режиме стабилизации следует привести (пересчитать) возмущение ко входу или к выходу объекта управления. Сделать это можно либо аналитически, за-

писав дифференциальные уравнения, связывающие управляемую величину с возмущением, либо практически, подав на объект управления дозированное возмущение и по разгонной характеристике управляемая величина – возмущение построить модель. На рис.5.19 показано САР, которая осуществляет слежение и стабилизацию. С шестой до 32-й секунды управляемая величина пропорциональна заданию – ступенчатой функции, поданной в нулевой момент времени (салатная линия). Слежение осуществляется с допустимой ошибкой. Изменение возмущения, заданного в виде ступенчатой функции в момент времени 30 сек (фиолетовая линия), отклоняет на некоторое время управляемую величину от требуемого заданием значения, равного единице. САР, благодаря наличию контура обратной связи, через некоторое время компенсирует это отклонение, т.е. осуществляет стабилизацию. С 38-й по 50-ю секунды САР одновременно решает задачи слежения и стабилизации.

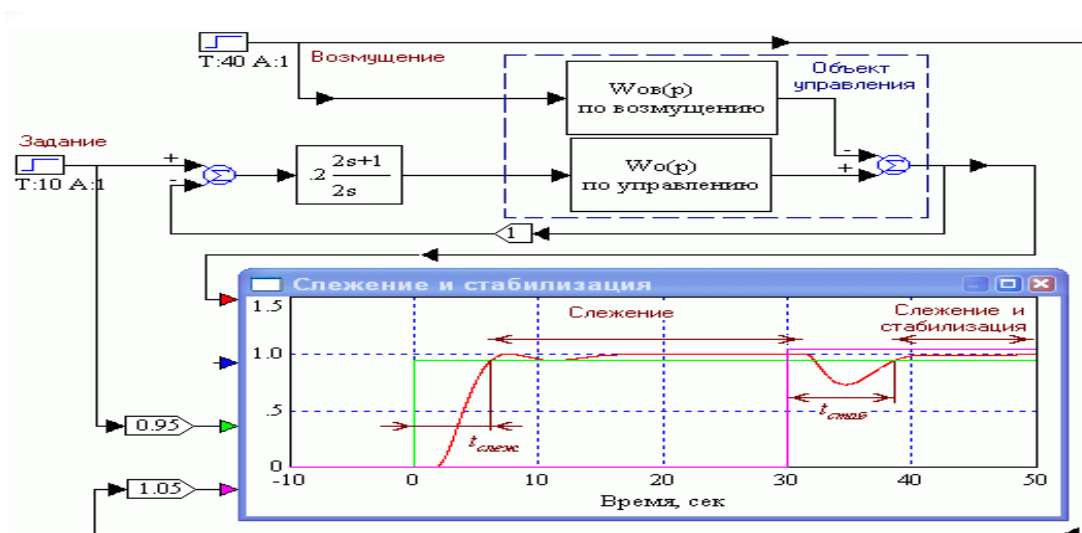


Рис. 5.19. САР осуществляет слежение и стабилизацию

1.8 Автоматическая оптимизация настроечных параметров регулятора САР в программе Vissim

Vissim позволяет автоматизировать уточнение значений параметров, полученных приближенным способом, например с помощью ЛАЧХ. Более того, оптимизация в этих программах может быть проведена сразу по нескольким параметрам, например для ПИД-регулятора сразу по всем трем. Выполнение этой работы вручную довольно трудоемкое занятие. Принцип оптимизации в программе *Vissim* со-

стоит в автоматическом поиске сочетания значений параметров, непосредственно влияющих на качество САР, и опосредованно влияющих на заданную исследователем функцию цены, такого, который приводит к минимальному ее значению.

Функция цены выбирается исследователем в соответствии с некоторым критерием качества САР так, чтобы при наилучшем, в определенном смысле, качестве она достигала минимального значения.

Для автоматической оптимизации в *Vissim*’е применяется специальный режим «Оптимизация» с использованием блока *parameter Unknown* (Неизвестный параметр) с помощью которого задаются исходные значения параметров и получаются их оптимальные значения, а также блока *Cost* (Цена), с помощью которого формируется функция цены.

В режиме оптимизации *Vissim* последовательно автоматически, в соответствии с выбранным исследователем алгоритмом, выбирает значения переменных, вычисляет функцию цены, сравнивает ее значение с предыдущими, изменяет значения параметров, вновь находит значение цены, стремясь найти такое сочетание параметров, при которых функция цены станет минимальной.

Порядок построения модели и оптимизации САР в Vissim’е. Для оптимизации параметров САР на рабочем поле *Vissim*’а нужно построить три основных фрагмента модели:

1) ввести обозначения оптимизируемых параметров и их исходные значения. Это делается с помощью блоков *parameter Unknown*.

2) собрать модель САР, используя в ней только что заданные переменные.

3) сформировать из блоков *Vissim*’а фрагмент вычисления целевой функции или функции цены. Это функция каких-либо переменных модели САР, например, ошибки слежения или времени регулирования, и т.п., которые могут быть взяты из модели САР. Вид функции цены определяется критерием оптимизации. А критерий оптимизации формулируется исследователем так, чтобы эта функция имела минимум при таких значениях оптимизируемых параметров, при которых САР имеет наилучшее, с точки зрения конкретного критерия, качество.

Для запуска оптимизации достаточно щелкнуть по кнопке «Пуск» (Go) на панели инструментов *Vissim*'а. Пойдет быстро сменяющийся друг друга расчет итераций, по окончании каждой изменяются показания цифровых индикаторов и переходные функции на осциллографе. После прекращения расчета на индикаторах отображаются оптимизированные значения параметров, а на осциллографе – переходная функция САР с этими настроечными параметрами, по которой можно судить о качестве полученной САР.

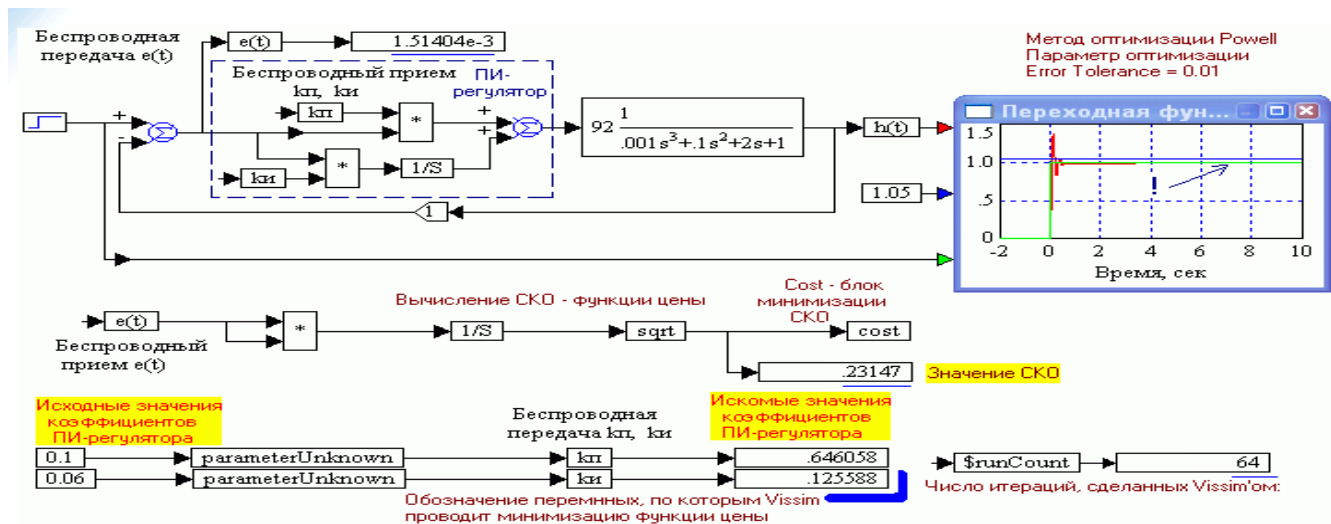
Однако, если функция цены имеет несколько минимумов, то *Vissim* может найти вовсе не тот, что требуется исследователю. В качестве полученного результата следует убедиться непосредственно по переходной характеристике.

Если переходная функция по мнению исследователя соответствует качественной САР, то остается построить модель оптимизированной САР.

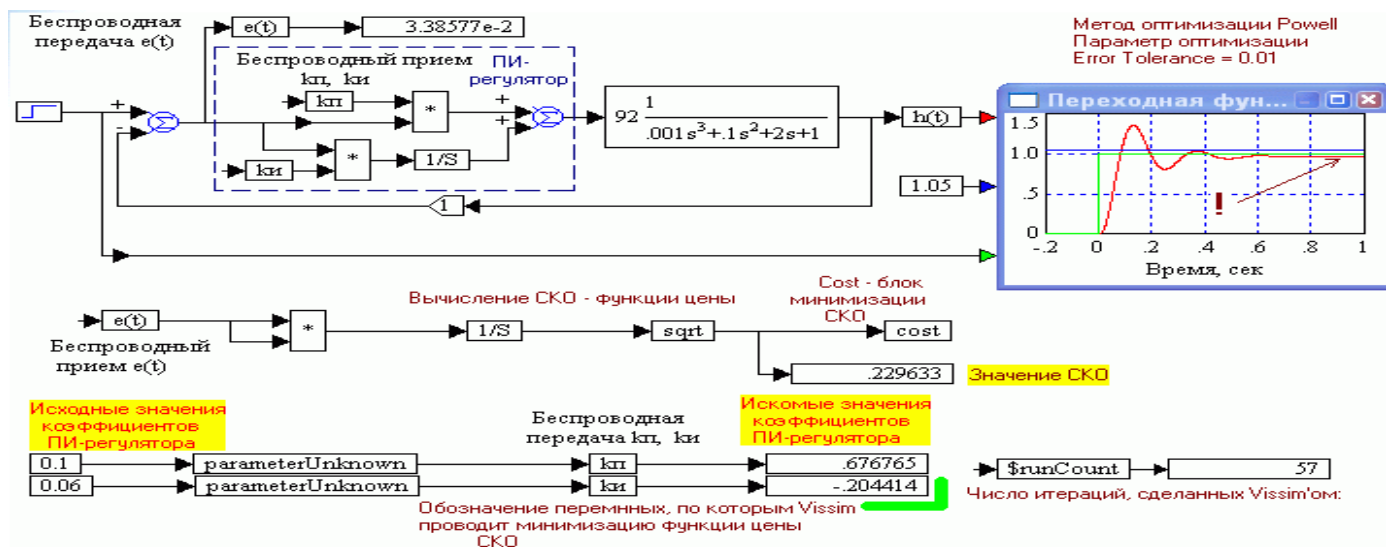
1.9. Оптимизация параметров ПИ-регулятора

ПИ-регулятор можно рассматривать как частный случай ПИД-регулятора при коэффициенте усиления дифференциальной компоненты равном нулю.

Как видно на рис. 5.20 А), оптимизация при времени моделирования равном 1 сек приводит к отрицательному значению коэффициента усиления интегрирующей компоненты k_i регулятора, что не приемлемо. При отрицательном значении коэффициента k_i САР потеряла астатизм, стала статической: переходная функция устанавливается на уровне, меньшем единицы. Увеличение времени моделирования в десять раз до 10 сек приводит к приемлемому результату (рис. 5.20 Б). Т.о. для получения правильного и нужного результата необходимо либо ограничить снизу диапазон изменения коэффициента k_i нулем, либо модифицировать функцию цены так, чтобы она резко возрастала при отрицательных значениях k_i . Но для начала лучше всего задать по возможности большое время моделирования.



А)



Б)

Рис. 5.20 Оптимизация параметров ПИ-регулятора в Vissim'е

2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ 5

2.1. Содержание работы

1. Исследование качества линейной САР. Определение показателей качества переходного и установившегося режима для САР 1 и САР 2. Установление степени астатизма этих САР.
2. Исследование влияния постоянной времени форсирующего звена на качество САР
3. Идентификация регулятора и объекта управления САР1.

4. Оптимизация параметров ПИ-регулятора линейной САР (по критерию Сигма 5 направленным подбором параметров ПИ-регулятора и в автоматическом режиме в программе Vissim; по критерию минимума СКО автоматически в Vissim-e)

5 Оценка чувствительности времени регулирования оптимизированной САР к изменению коэффициента усиления ПИ-регулятора

2.2. Исследование качества линейной САР

2.2.1. Создать лабораторный стенд. Загрузить из файла (файл TAU_Lab_5_Vissim_Stends\Task_1_C0_C1_C2.vsm) основу модели виртуального стенда (см. рис.5.21). Внутренняя структура регулятора и объекта управления не известна.

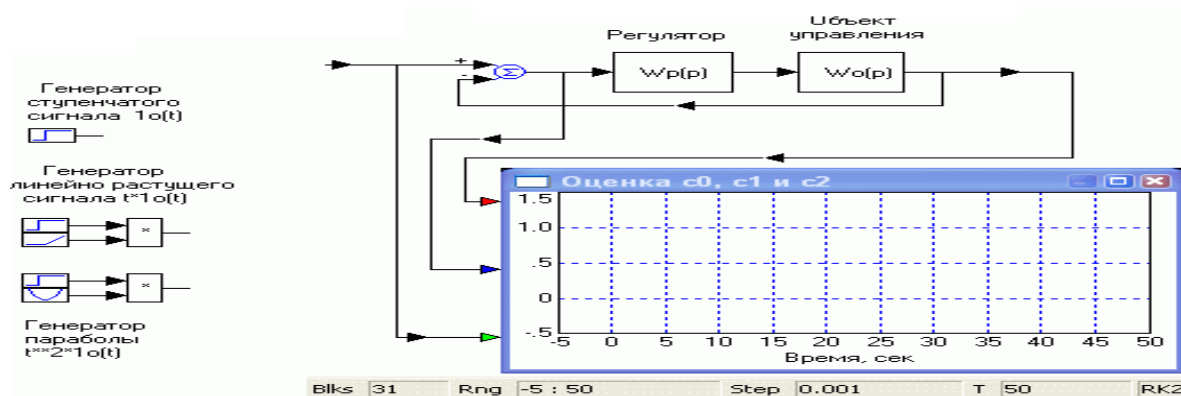


Рис.5.21. Основа виртуального лабораторного стенда для исследования качества переходного режима САР 1 и определения ее коэффициентов ошибок

Задать параметры моделирования в соответствии со значениями, указанными на панели, помещенной ниже виртуального стенда на рис. 5.21. В свойствах осциллографа на вкладке *Axis* (Оси) в разделе *Axis Divisions* (Деления осей) отметить флажком *Fixed Tick Count* (Фиксированное число делений) и установить значение числа делений по оси *X* (*X Divisions*) равным 11.

Собрать схему для определения параметров качества переходного режима и определения коэффициента ошибки по положению c_0 в соответствии со схемой рис. 5.9 и 5.10. Подключить на вход САР 1 генератор ступенчатого единичного сигнала, выход САР 1 подключить к осциллографу. Скорректировать надписи, в том числе в

заголовках осциллографов. *Запустить* моделирование щелчком по кнопке с зеленым треугольником. Убедиться в работоспособности стенда. Сохранить файл модели собранного стенда.

2.2.2. Определить параметры качества САР 1

1) *Определить время регулирования t_p , перерегулирование σ и коэффициент ошибки по положению c_0 .* Запустить моделирование щелчком по кнопке с зеленым треугольником Пуск (Go). *Определить* время регулирования t_p , перерегулирование σ по переходной характеристике и коэффициент ошибки по положению c_0 по соответствующей осциллограмме ошибки. Для точного отсчета времени регулирования и перерегулирования использовать режим чтения координат (кнопка Read Coordinates) на вкладке Параметры (*Options*) свойств осциллографа, окно которых вызывается двойным щелчком по нему.

При определении показателей качества переходного режима время моделирования для удобства измерений и достижения достаточной точности целесообразно сделано равным 5 сек (*Simulate* (Моделирование) - *Simulation Properties* (Свойства моделирования) – *End* (Конец временного интервала моделирования)). Для определения коэффициента ошибки это время следует сделать достаточно большим, например, в данном случае 50 сек.

Проверить, что с увеличением времени регулирования коэффициент ошибки по положению c_0 САР 1 становится все меньше и стремится к нулю. Занести результаты в отчет по лабораторной работе, сделать снимок экрана, сохранить его в формате .gif в личной папки. *Распечатать* и приложить к отчету снимок экрана. *Сделать выводы* о порядке астатизма САР1.

2) *Определить коэффициент ошибки по скорости c_1 .* Изменить схему стенда, подключив на вход САР 1 вместо генератора ступеньки генератор линейно растущего сигнала. Значение коэффициента ошибки по положению c_0 взять из предыдущего пункта. *Определить* коэффициент ошибки по скорости c_1 , занести результат в отчет. Для определения коэффициента ошибки по скорости время моделирования следует сделать достаточно большим, например, 20 - 50 сек. Сохранить файл модели. Сделать снимок экрана и приложить к отчету.

Сделать выводы о порядке астатизма САР1.

3) *Определить коэффициент ошибки по ускорению c_2 .* Из формулы (5.1) следует, что при параболическом воздействии вида $x(t) = t^2 1_0(t)$, имеющем производные при $t > 0$:

$$\dot{x}(t) = 2t, \quad \ddot{x}(t) = 2, \quad (5.10)$$

коэффициент ошибки по ускорению c_2 равен:

$$c_2 = e(t)_{t \rightarrow \infty} - c_0 t^2 - c_1 \cdot 2t. \quad (5.11)$$

Изменить схему стенда в соответствии с формулой (5.10), а также подключить на вход САР 1 генератор параболы. Значение коэффициентов ошибок по положению c_0 и скорости c_1 взять из предыдущего пункта. *Сохранить* файл модели в папке. *Определить* коэффициент ошибки по ускорению c_2 , занести результат в отчет. Для определения коэффициента ошибки по ускорению c_2 время моделирования следует сделать достаточно большим, например, 20 - 50 сек. Сделать снимок экрана и приложить к отчету снимок экрана. *Провести анализ* результатов, сделать выводы и занести их в отчет по работе.

2.2.3. Определить параметры качества переходного и установившегося режима САР 2 и степень астатизма

1) *Создание стенда.* Загрузить из файла (см. файл TAU_Lab_5_Vissim_Stends\Task_2_C0_C1_C2.vsm) основу модели виртуального стенда (рис.5.22). Дополнить надписи. Далее исследование проводится аналогично тому, как это было сделано для САР1.

Задать параметры моделирования в соответствии со значениями, указанными на панели, помещенной ниже виртуального стенда на рис. 5.22. В свойствах осциллографа на вкладке *Axis* (Оси) в разделе *Axis Divisions* (Деления осей) отметить флажком *Fixed Tick Count* (Фиксированное число делений) и установить значение числа делений по оси *X* (*X Divisions*) равным 11.

Собрать схему для определения параметров качества переходного режима и определения коэффициента ошибки по положению c_0 в соответствии со схемой рис.

5.9 и 5.11. Подключить на вход САР 2 генератор ступенчатого единичного сигнала, выход САР 2 подключить к осциллографу.

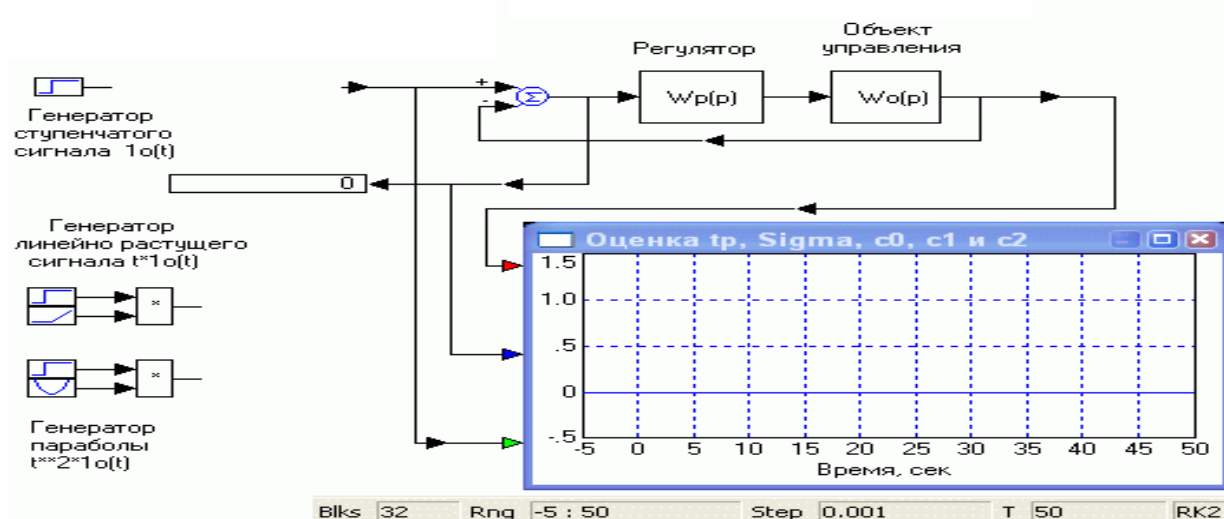


Рис.5.22. Основа стенда для исследования качества переходного и установившегося режимов САР2

Скорректировать надписи, в том числе в заголовках осциллографов.

Запустить моделирование щелчком по кнопке с зеленым треугольником.

Убедиться в работоспособности стенда. Сохранить файл модели собранного стенда.

2) *Определить время параметров качества переходного режима и коэффициента ошибки по положению c_0 .*

Запустить моделирование щелчком по кнопке с зеленым треугольником Пуск (Go). *Определить время* регулирования t_p , перерегулирование σ по переходной характеристике и коэффициент ошибки по положению c_0 по соответствующей осциллограмме ошибки. Для точного отсчета времени регулирования и перерегулирования использовать режим чтения координат (кнопка *Read Coordinates*) на вкладке Параметры (Options) свойств осциллографа, окно которых вызывается двойным щелчком по нему.

При определении показателей качества переходного режима пределы времени моделирования для удобства измерений и достижения достаточной точности целесообразно выбрать от -0.5 сек до 5 сек (*Simulate* (Моделирование) - *Simulation Properties* (Свойства моделирования) – *Start* и *End* (Начало и Конец временного ин-

тервала моделирования)). Задержку в блоке генератора единичной ступенчатой функции следует при этом сделать равной 0.5 сек.

Для определения коэффициента ошибки c_0 время моделирования следует сделать достаточно большим, например, 20 сек.

Занести результаты в отчет по лабораторной работе, сделать снимок экрана и приложить к отчету. *Сделать выводы* о порядке астатизма САР 2.

3) *Определить коэффициент ошибки по скорости c_1* . Изменить схему стенда, подключив на вход САР 2 вместо генератора ступеньки генератор линейно растущего сигнала. Значение коэффициента ошибки по положению c_0 взять из предыдущего пункта. *Определить коэффициент ошибки по скорости c_1* , занести результат в отчет. Для определения коэффициента ошибки по скорости время моделирования следует сделать достаточно большим, например 20 - 50 сек. *Сохранить файл* модели. Сделать снимок экрана и приложить к отчету снимок экрана.

4) *Определить коэффициент ошибки по ускорению c_2* . Из формулы (1) п.1.3. следует, что при параболическом воздействии вида $x(t) = t^2 1_0(t)$, имеющем производные по формуле (5.10): коэффициент ошибки по ускорению c_2 вычисляется по (5.11) *Изменить* схему стенда в соответствии с формулой (5.11), а также подключить на вход САР 2 генератор параболы. Значение коэффициентов ошибок по положению c_0 и скорости c_1 взять из предыдущего пункта.

Определить коэффициент ошибки по ускорению c_2 , занести результат в отчет. Для определения коэффициента ошибки по ускорению время моделирования следует сделать достаточно большим, в данном случае, например, 20 - 50 сек.

Сохранить файл модели. Сделать снимок и приложить к отчету.

Провести анализ результатов, сделать выводы и занести их в отчет по работе.

2.3. Исследование влияния постоянной времени форсирующего звена на качество САР

2.3.1. Создание лабораторного стенда. Загрузить из файла (см. файл TAU_Lab_5_Vissim_Stends\Task_3_Fors_Zveno.vsm) или построить самостоятельно (см. рис.2.3) модель виртуального стенда: вынести на рабочее поле Vissim'a

- - генератор ступенчатого сигнала (Blocks - Signal Producer - step),
- - линейный блок Передаточная функция (transfer Function) (Blocks – Linear System - transfer Function),
- - осциллограф (Blocks - Signal Consumer - plot), соединить их.

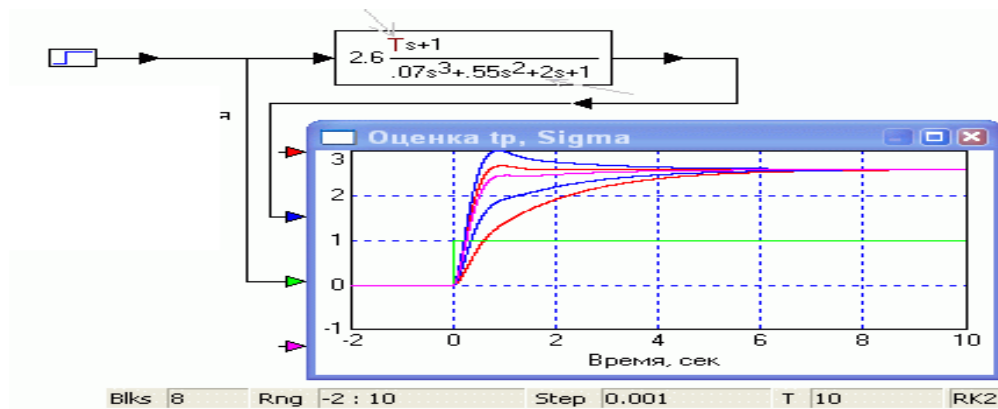


Рис. 5.23. Стенд для оценки влияния пост. времени T форсирующего звена на качество САР

2.3.2. Определить зависимости времени регулирования и перерегулирования от постоянной времени форсирующего звена. Изменяя постоянную времени T форсирующего звена от 0 до 2 сек (0.5 сек, 1.0 сек, 1.5 сек, 1.7 сек, 1.8 сек, 1.9 сек) определить значения времени регулирования и перерегулирования.

Сделать снимок экрана и в Пайнте отметить на графике получаемые значения.

Для одновременной индикации нескольких графиков на осциллографе Vissim'a следует в его свойствах (двойной щелчок по осциллографу) на вкладке Options установить флажок в поле *Over Plot* (Поверх графика). Кроме того, для того, чтобы от измерения к измерению не срабатывала автоматическая установка пределов осциллографа, полезно поставить флажок и в поле *Fixed Bounds* (Фиксированные границы). *Определить* оптимальное значение постоянной времени T форсирующего звена. Соотнести ее с главной постоянной времени САР, равной в данном случае 2 сек (см. рис 5.23). *Сохранить* график.

Примечание. Форсирующее звено не имеет реального (физического) аналога в чистом виде. Однако его можно с достаточной точностью реализовать как инерционно-форсирующее, выбрав постоянную времени знаменателя много меньшей постоянной времени форсирующего множителя (числителя передаточной функции) (см. рис.5.25).



Рис. 5.25. Нереализуемое форсирующее звено и его реализуемая модель – инерционно-форсирующее звено

Использование форсирующего звена для повышения быстродействия САР путем компенсации части главной инерционности объекта управления подразумевает, что неминуемо потребуются значительно большие мощности для управления объектом. Это нужно иметь в виду. Если объектом управления является электронная схема, может потребоваться и не очень заметная дополнительная мощность. В то же время, если объектом управления является, например, электромеханическая система, то учитывать энергетические параметры просто необходимо. Например, можно потребовать, чтобы двигатель постоянного тока разогнался бы не за 1 – 5 сек, а на порядок быстрее. Для достижения этого потребуются куда большие номинальных напряжения и токи, под действием которых может выйти из строя или сам двигатель или сеть, его питающая. Таким образом, структура проектируемой САР определяется не только необходимостью выполнения требований качества управления, достигаемой в модели, но и энергетическими требованиями, которые возникают на этапе реализации оптимизированной модели. Последнее может потребовать изменения модели или ее элементов, например, исполнительного механизма САР.

2.4. Идентификация регулятора и объекта управления САР1

Постановка задачи: имеется работающая САР1 (см. рис. 5.21), но состав регулятора и объекта управления ее неизвестны. Необходимо исследовать названные элементы САР 1, построить их модели и убедиться, что они соответствуют элементам исследуемой САР1.

Решение задачи:

1) **Идентификация регулятора.** Запустить модель САР1 (файл TAU_Lab_5_Vissim_Stends\Task_1_C0_C1_C2.vsm). Скопировать блок регулятора и вставить его в новую диаграмму Vissim'a, которую сохранить.

Построить стенд для исследования регулятора (рис.5.26). По переходной характеристике **построить модель регулятора** (записать его передаточную функцию). Если это вызовет затруднение (также для проверки), то определить передаточную функцию по ЛАЧХ и ЛФЧХ, которые следует для этого построить. Для задания требуемого диапазона отображения частотных характеристик необходимо выбрать в меню Analyze – Frequency Range и установить значения Start = 0.01, End = 100, Step Count = 500.

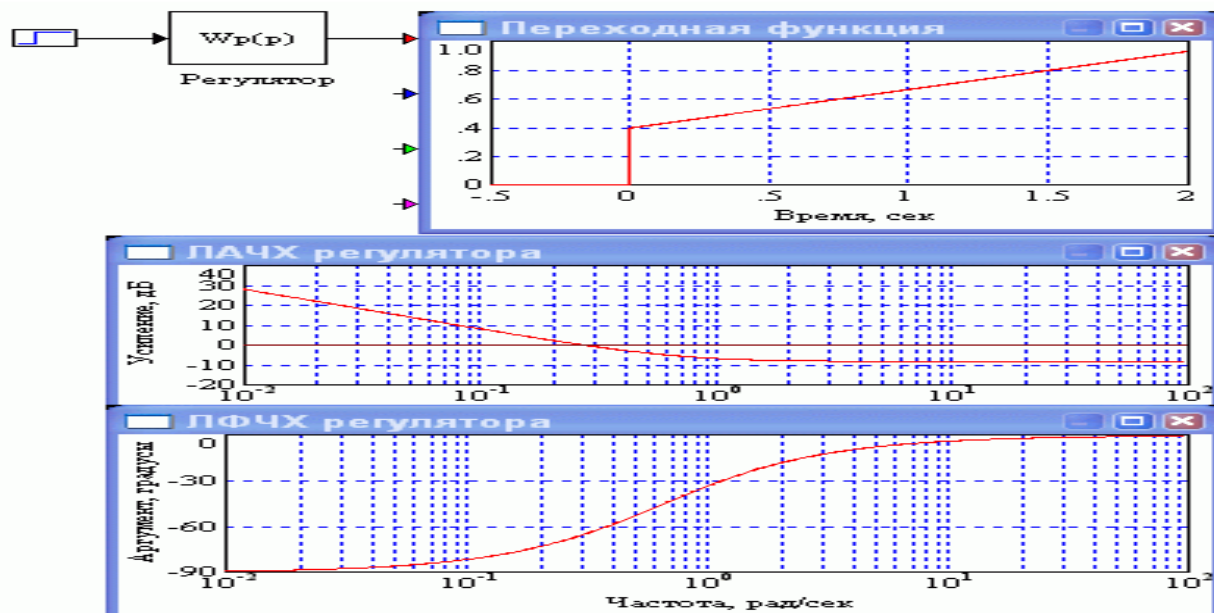


Рис. 5.26. Стенд для идентификации регулятора CAP 1

Подсказка. По переходной функции в данном случае целесообразно построить модель, состоящую из параллельного согласного соединения звеньев:

$$W_p(p) = k_n + \frac{1}{p T_n}, \quad (5.10)$$

а по частотным характеристикам – из последовательно соединенных звеньев:

$$W_p(p) = k_p \frac{(p T_\phi + 1)}{p}. \quad (5.11)$$

Установить в схеме рис.5.26 параллельно с регулятором его модель, только что полученную и сравнить переходные характеристики. Какова точность полученной модели? Сохранить модель и снимок экрана.

2) *Идентификация объекта управления.* Запустить модель CAP 1 (файл Task_1_C0_C1_C2.vsm). Скопировать объект управления и вставить его в новую диаграмму Vissim'a, которую сохранить. Построить стенд для исследования объекта управления (рис.5.27). Для уточнения поведения частотных характеристик на высоких частотах следует изменить диапазон их представления: *Analyze – Frequency Range – Start = 1, End = 10000, Step Count = 500* (рис.5.28). *Установить* в схеме рис.5.27 параллельно с объектом его модель, только что полученную, и сравнить переходные характеристики.

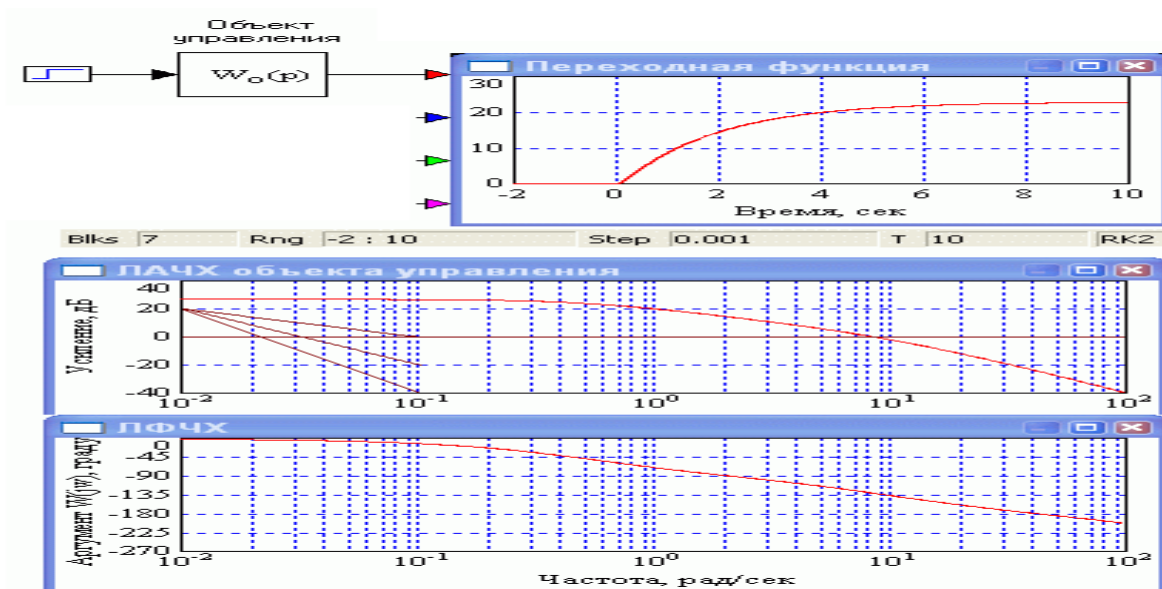


Рис. 5.27. Стенд для идентификации объекта управления САР 1

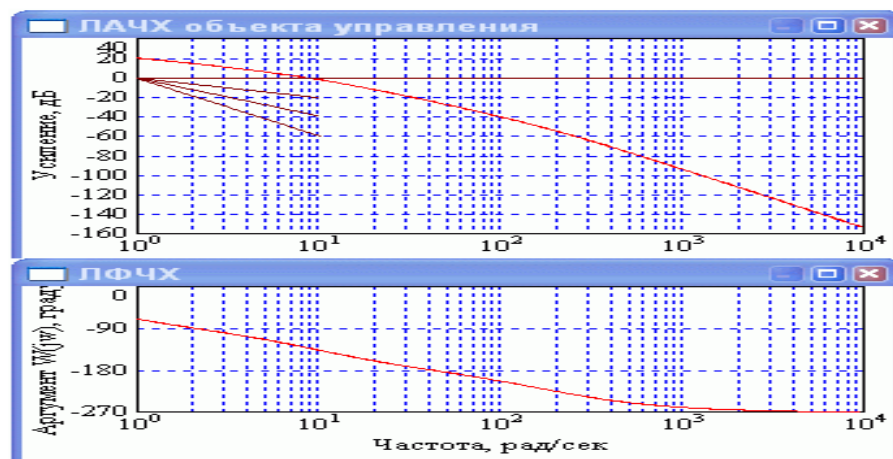


Рис. 5.28. Поведение частотных характеристик на высоких частотах

Определить точность полученной модели. *Сохранить* модель и снимок экрана.

3) *Проверка адекватности модели.* Запустить исходный лабораторный стенд рис. 5.21 (файл Task_1_C0_C1_C2.vsm). Построить переходную функцию исходной САР1, а также собрать модель САР1 и построить ее переходную функцию и сравнить их. Какова точность полученной модели? *Сохранить* модель и снимок экрана, занести в отчет. *Сделать* выводы.

2.5. Оптимизация параметров ПИ-регулятора линейной САР.

2.5.1. Создать лабораторный стенд. Построить самостоятельно (см. рис.5.29) или загрузить из файла (Vis_Lab_6\ O_31_PI_Reg_Opt.vsm) модель виртуального стенда.

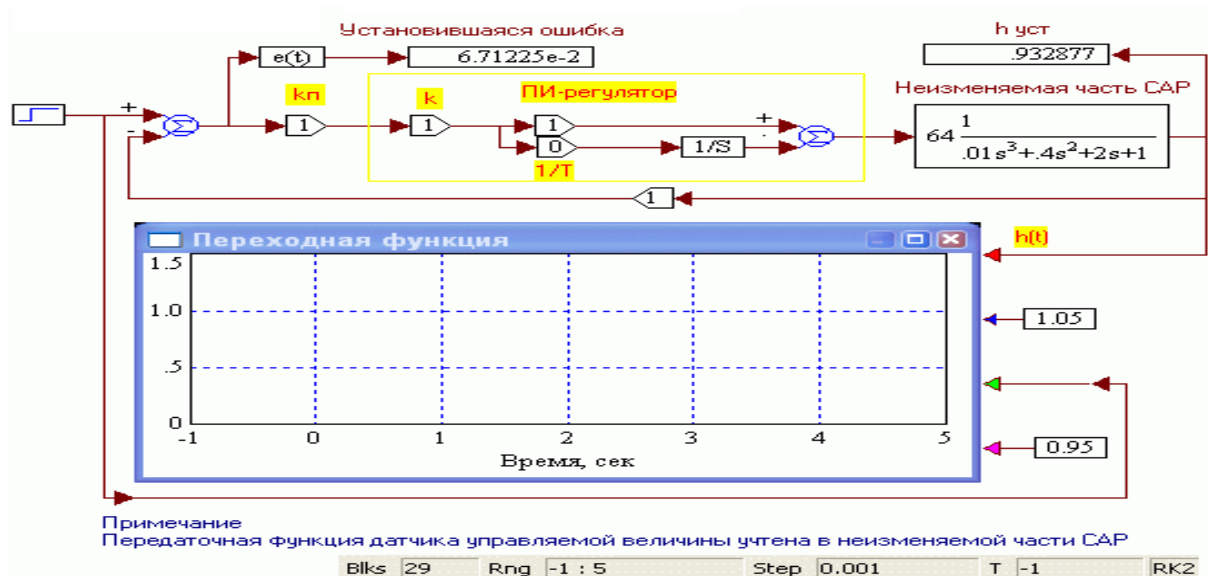


Рис. 5.29. Лабораторный стенд для оптимизации параметров ПИ-регулятора

2.5.2. Провести оптимизацию по критерию Сигма 5 направленным подбором параметров ПИ-регулятора

1) Приблизительно определить параметры настройки ПИ-регулятора.

Построить ЛАЧХ и ЛФЧХ с неизменяемой частью схемы рис. 5.29, далее изменить параметры в соответствии с рис. 5.30, и определить по частотным характеристикам требуемые значения коэффициента усиления и постоянной времени ПИ-регулятора.

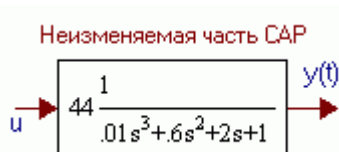


Рис. 5.30. Неизменяемая часть САР для оптимизации регуляторов студентом

Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ осуществляется выделением неизменяемой части и выбором в меню *Analyze – Frequency Response* (рис.5.31). При необходимости следует установить пределы изменения частоты на характеристиках, выбрав *Analyze –*

Frequency Range. Для упрощения построения ЛАЧХ и ЛФЧХ можно воспользоваться отдельной диаграммой *Vissim*'а (файл Vis_Lab_6\O_31_Neizm_Chast.vsm).

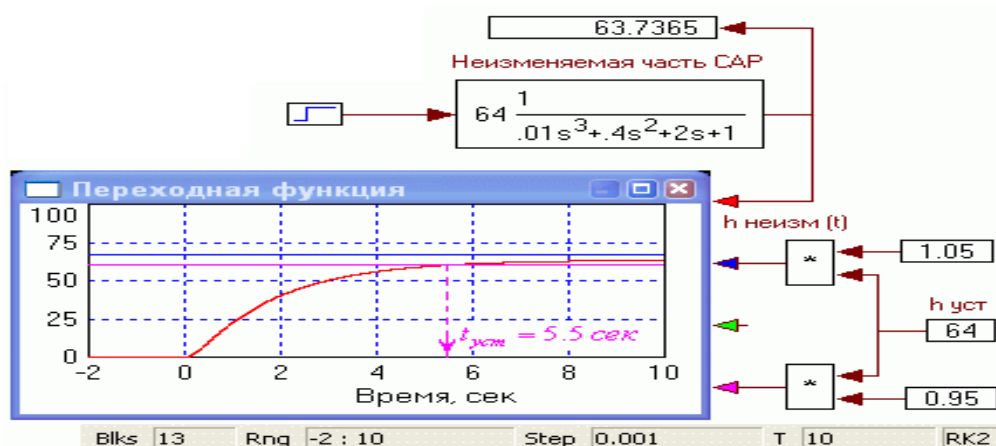


Рис. 5.31. Вспомогательный стенд для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ неизменяемой части САР

В соответствии с рис.5.17 *определить начальные значения настроечных параметров ПИ-регулятора*. Получим коэффициент усиления ПИ-регулятора $k_n = -22 \text{ дБ} = 10^{-22/20} = 0.079$ раз. (рис.5.32).

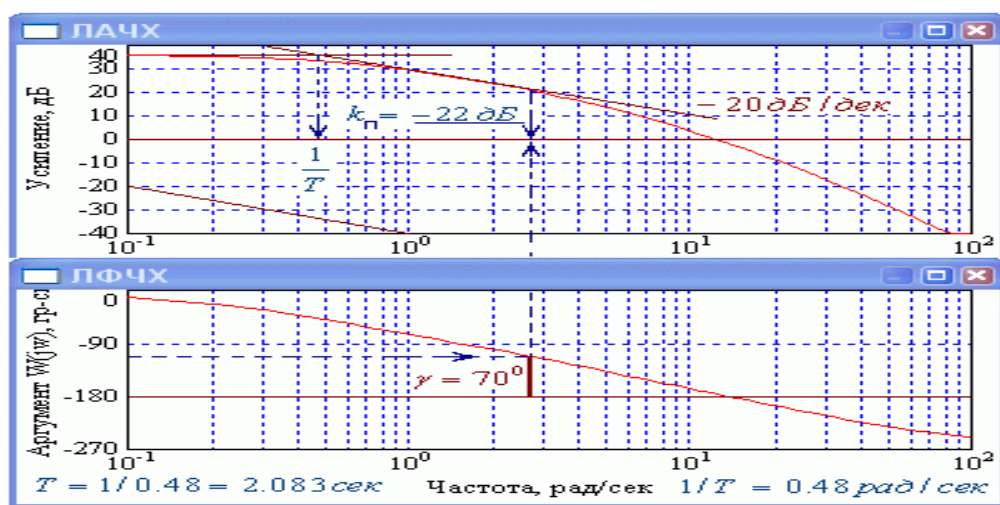


Рис. 5.32. Приближенное определение параметров ПИ-регулятора по ЛАЧХ и ЛФЧХ неизменяемой части

Подставить полученные значения параметров ($k_n=0.079$, и $1/T=0.48$), а также предварительное значение коэффициента усиления ПИ-регулятора $k=0.5$ в схему рис. 5.29 и запустить моделирование (рис.5.33).

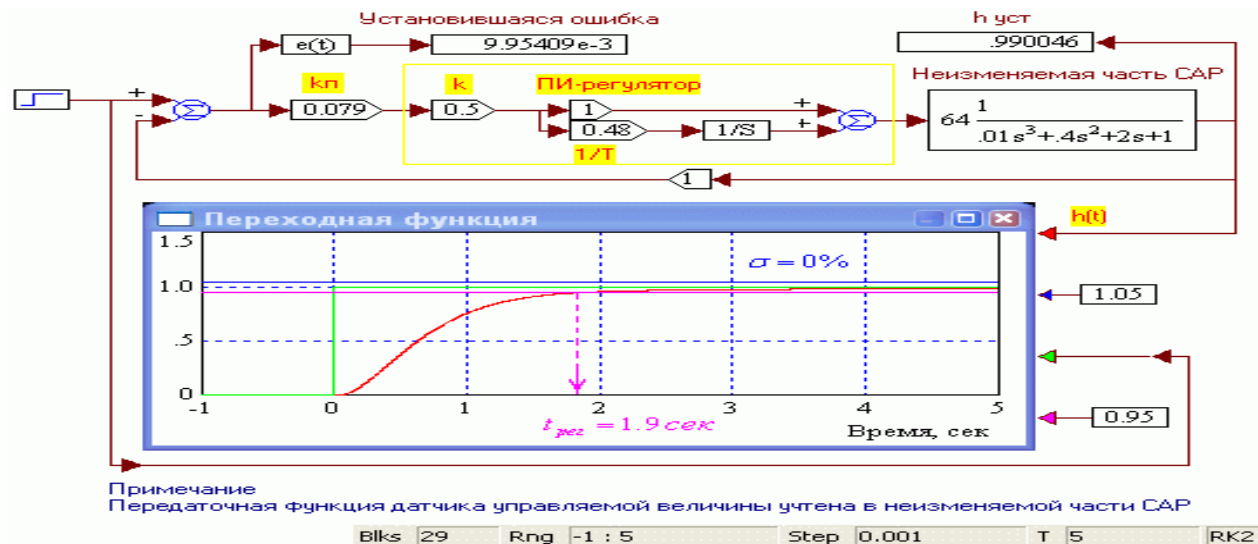


Рис. 5.33. САП с предварительными настройками ПИ-регулятора. Виртуальный стенд после проведения моделирования

Определить значения перерегулирования и времени регулирования полученной САП. Для получения точного результата можно развернуть окно осциллографа на весь экран и перейти в режим чтения координат: двойной щелчок по осциллографу – кнопка Read Coordinates. Сохранить файл модели.

2) Уточнить параметры настройки ПИ-регулятора. Изменяя в небольших пределах значение коэффициента усиления k ПИ-регулятора (методом проб и ошибок) добиться перерегулирования, Сигма = 5% (см. рис.5.34).

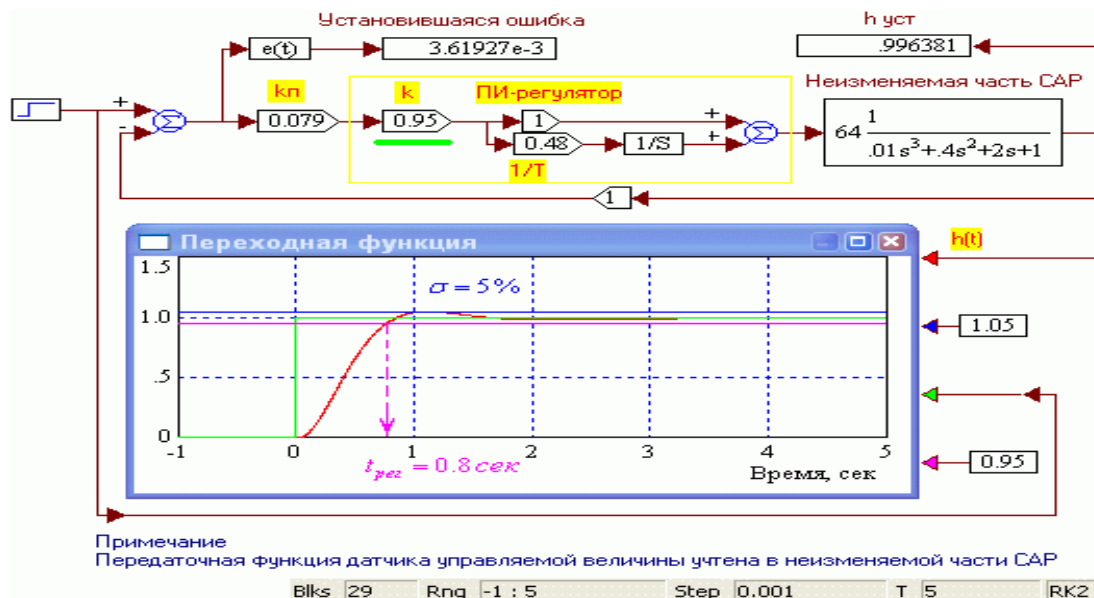


Рис. 5.34. Оптимизированная САП

Как видно из сравнения рис. 5.33 и 5.34, изменение перерегулирования от 0% до 5% позволило сократить время регулирования с 1.9 сек до 0.8 сек, т.е. почти в 2.5 раза, при сохранении плавности изменения переходной характеристики. Сделать снимок экрана и сохранить его. Приложить его к отчету.

Заменить последовательно включенные усилители с коэффициентами усиления, равными k_n и k , одним усилителем с коэффициентом усиления, равным произведению k_n и k . Это и будет окончательное значение коэффициента усиления оптимального ПИ-регулятора для заданной неизменной части САР (рис.5.35).

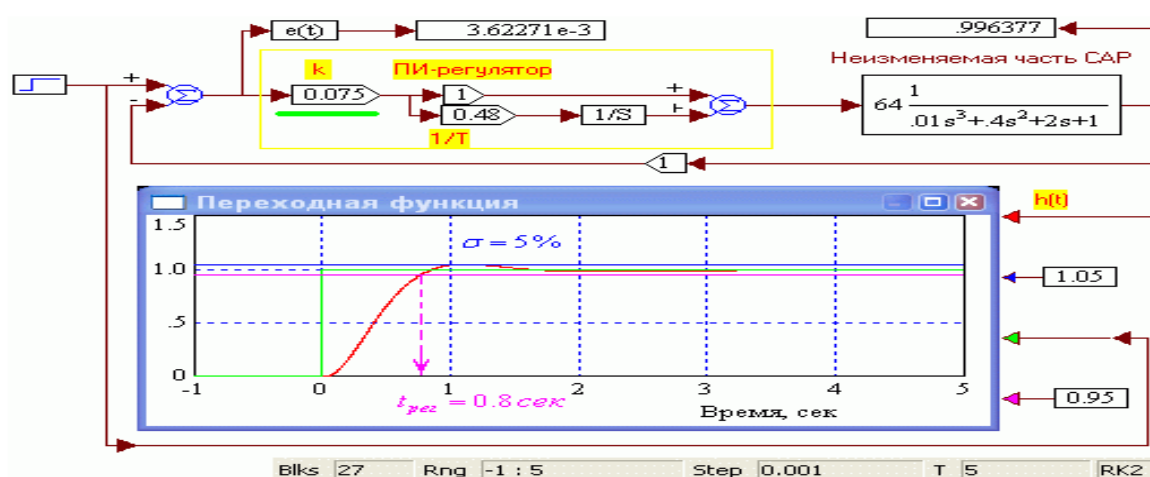


Рис. 5.35. Результат «ручной» оптимизации ПИ-регулятора САР

Определить полученные значения перерегулирования и времени регулирования. Сравнить значения перерегулирования и времени регулирования уточненной схемы с предварительно полученными значениями. Достигнуто ли максимальное быстродействие САР и в каком смысле?

Построить на отдельной диаграмме Vissim'a переходную характеристику неизменяемой части САР, сохранить модель в личной папке.

Соотнести время разгона неизменяемой части САР со временем регулирования оптимизированной САР.

Сохранить файл модели, аналогичный рис. 5.35, но с другой неизменяемой частью рис.5.30. Сделать снимки экранов оптимизированной САР и неизменяемой ее части с их переходными характеристиками, оформить и сохранить их. Приложить их к отчету.

2.5.3. Провести оптимизацию параметров ПИ-регулятора по критерию Сигма 5 в программе Vissim в автоматическом режиме.

1) Построить лабораторный стенд. Загрузить и запустить из файла виртуальный стенд (файл Vis_Lab_6\O_313_Vis_Opt_PI.vsm, и файл Max_In.dll) .

На рис. 5.36 показан результат оптимизации. Фрагменты с вычислением функции цены d_Sigma и ограничения диапазонов параметров заключены в составные блоки. Для проведения автоматической оптимизации на стенде помещены три необходимых фрагмента:

- модель САР, в которую посредством беспроводной передачи по имени передаются оптимизируемые параметры;
- схема вычисления функции цены d_Sigma , с блоком cost;
- схема обозначения и индикации значений оптимизируемых параметров.

Кроме того, на стенде помещен и необязательный информационный фрагмент, индицирующий число проведенных при оптимизации итераций и время одной итерации. Время всей оптимизации измеряется по ручным часам и вводится вручную.

Заменить, как и ранее, параметры неизменяемой части САР параметрами, показанными на рис. 5.30.

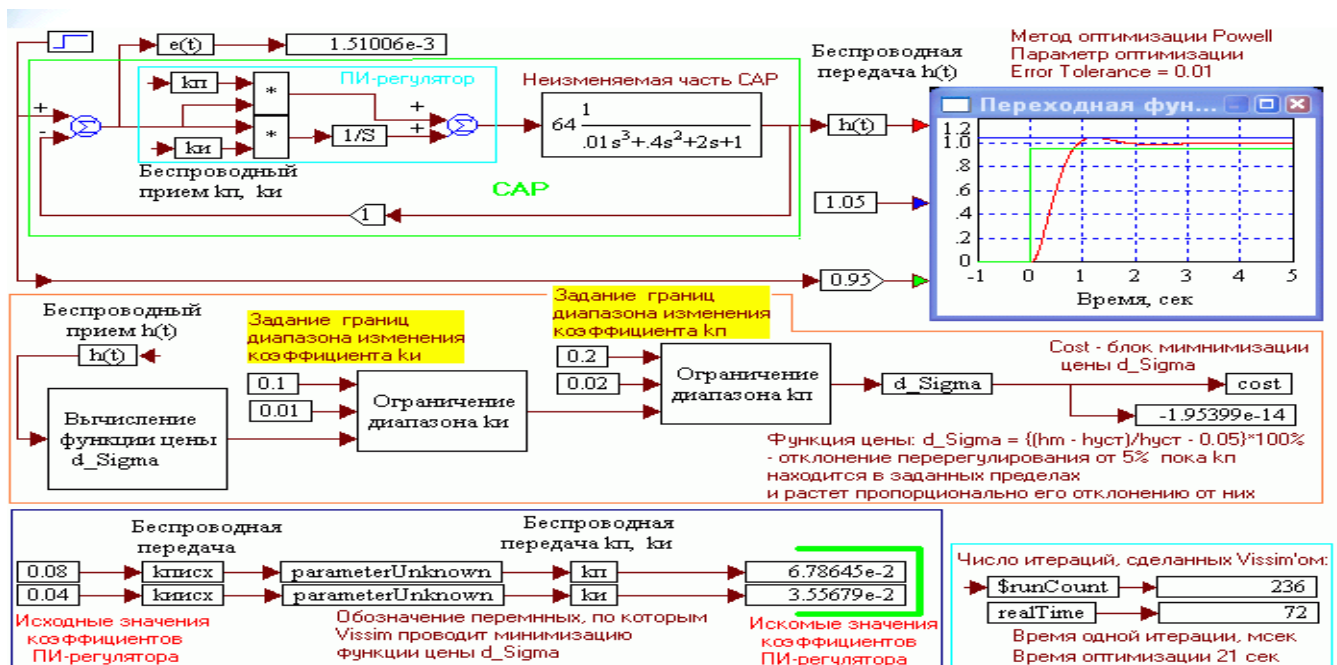


Рис.5.36. Стенд для оптимизации параметров ПИ-регулятора САР по критерию Sigma 5 в автоматическом режиме

2) *Провести автоматическую оптимизацию параметров ПИ-регулятора.* Для проведения автоматической оптимизации в программе Vissim следует:

- задать начальные значения коэффициентов усиления пропорциональной и интегральной компонент ПИ-регулятора. Эти значения определяются предварительно, например, по ЛАЧХ и ЛФЧХ. На рис. 5.36 они приняты $k_n = 0.08$ и $k_u = 0.04$ (сравните со значениями на рис. 5.35, равными $k_n = 0.075$ и $k_u = 0.075 \cdot 0.48 = 0.036$);
- задать пределы изменения этих коэффициентов. Ориентировочно, границы диапазонов можно взять примерно в два раза больше и меньше приближенных значений, а затем, при необходимости, уточнить их. На схеме рис. 5.36 заданы пределы для k_n от 0.02 до 0.2 и для k_u от 0.01 до 0.1;
- убедиться, что в меню Simulate – Optimization Properties установлен флажок Perform Optimization, выбран метод оптимизации Powell и параметр Error Tolerance задан равным 0.01, а в случае отличий поправить;
- запустить моделирование, как обычно, щелчком по кнопке с зеленым треугольником. Выждать несколько секунд пока выполняется оптимизация;
- убедиться по осциллограмме в том, что перерегулирование составляет величину, близкую к 5%, а в случае если это не так, повторить оптимизацию при задании более узкого диапазона изменения параметров.

Как видно на рис. 5.36 оптимальные значения параметров, полученные Vissim'ом в режиме автоматической оптимизации по методу Пауэлла составляют $k_n = 0.0679$ и $k_u = 0.0356$ и время регулирования равно 0.9 сек, в то время как значения, полученные методом приближений равны $k_n = 0.075$ и $k_u = 0.075 \cdot 0.48 = 0.036$, а время регулирования равно 0.8 сек (см. рис.5.35).

Таким образом, значения, полученные приближенным ручным методом и автоматически, при ограничении диапазона поиска, в Vissim'е получились весьма близкими, что взаимно доказывает состоятельность и применимость обоих методов.

Примечание. Для точного определения времени регулирования имеет смысл разворачивать окно осциллографа на весь экран и использовать режим чтения координат: двойной щелчок по осциллографу, кнопка Read Coordinates

Сохранить файл модели и снимок экрана.

3) Построить модель оптимизированной САР. Перенести полученные значения параметров ПИ-регулятора в схему исходной САР (рис. 5.37).

Сохранить файл модели. Сделать снимок экрана. Приложить его к отчету.

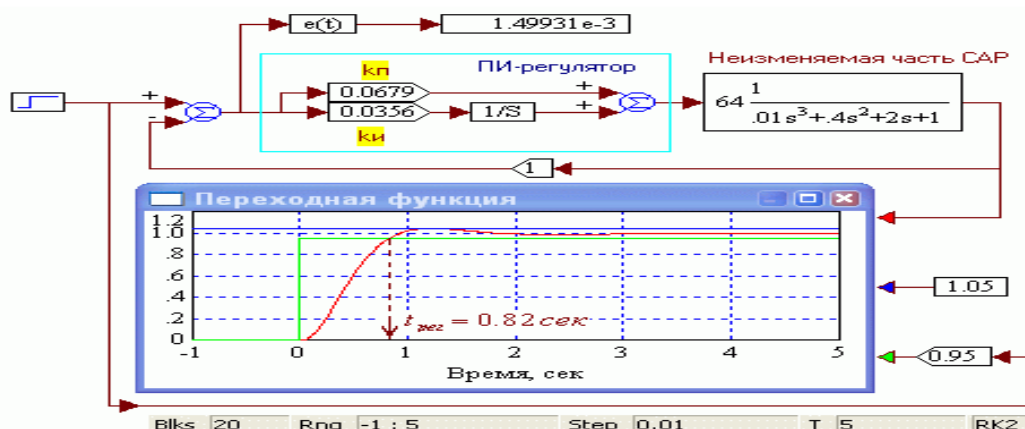


Рис. 5.37. Модель САР, автоматически оптимизированной в программе Vissim

2.5.4. Провести автоматическую оптимизация параметров ПИ-регулятора по критерию минимума СКО в программе Vissim

1) Построить лабораторный стенд. Загрузить из файла Vis_Lab_6\O_314_Vis_Auto_Opt_PI_Min_SKO.vsm виртуальный стенд. На рис.5.38 показаны результаты оптимизации.

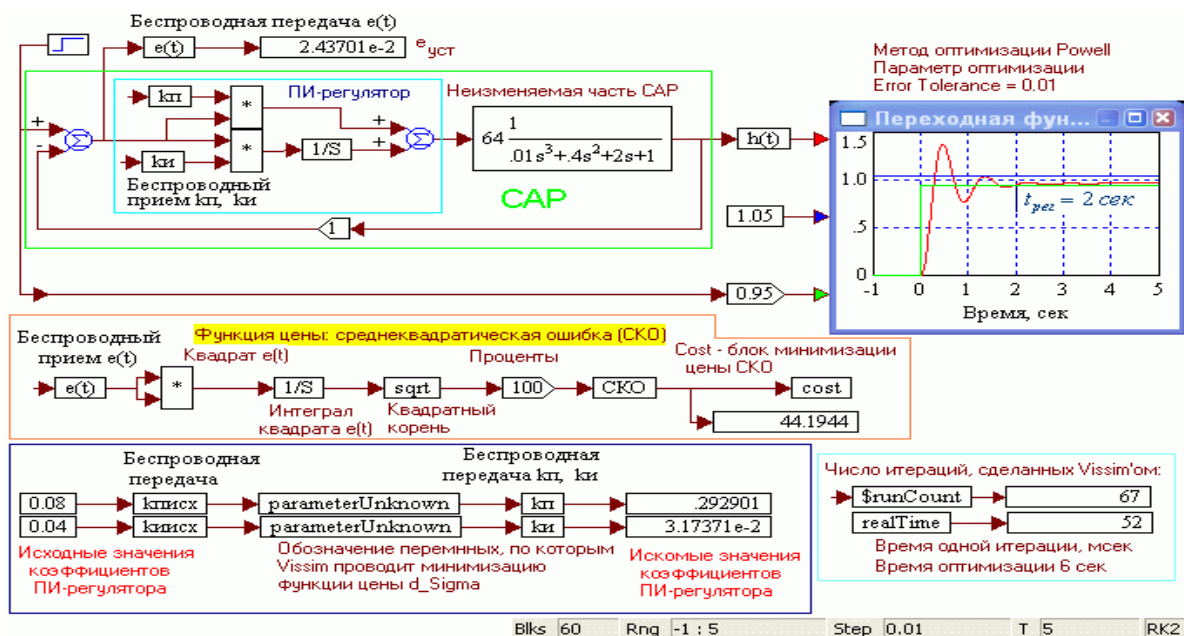


Рис. 5.38. Автоматическая оптимизация параметров ПИ-регулятора по критерию минимума среднеквадратической ошибки

Для получения более точных результатов следует увеличить время моделирования.

Из сравнения рисунков 5.36 и 5.38 следует, что критерий минимума СКО приводит в САР с повышенной колебательностью. Достигнуто это учетверением по сравнению со схемой, оптимизированной выше по критерию Сигма 5, пропорционального коэффициента и уменьшением на 15% интегрального.

Время нарастания у САР, оптимизированной по критерию минимума СКО значительно меньше (примерно в 4 раза), чем у системы, настроенной по критерию Сигма 5, а время регулирования примерно в два раза больше.

Заменить, как и ранее, параметры неизменяемой части САР параметрами, показанными на рис. 5.30.

Примечание. Если при проведении оптимизации будут получены неудачные результаты, например, один или оба коэффициента усиления ПИ-регулятора получатся отрицательными, то следует:

- увеличить время моделирования;
- изменить исходные значения коэффициентов методом проб и ошибок.

Если это не приведёт к желаемому результату, то следует задать ограничения на пределы диапазона изменения параметров, используя соответствующие блоки из модели рис. 5.36.

2) *Автоматически определить оптимальные параметры ПИ-регулятора.* Оптимизация проводится аналогично п. 2.4.3. 2) На рис. 5.18 создается впечатление того, что оптимизированная САР не астатическая, а статическая: установившееся значение переходной функции не равно единице. Следует увеличить время регулирования в 2 -10 раз, см. рис. 5.39.

Сохранить файл модели и снимок экрана. Приложить снимок к отчету.

3) *Создать модель оптимизированной САР.* Задать полученные оптимальные по критерию минимума СКО значения коэффициентов пропорциональной и интегральной ветвей ПИ-регулятора. Как видно с рис. 5.39 САР, автоматически оптимизированная в Vissim'е по критерию минимума СКО имеет удовлетворительное, но не хорошее качество. Колебательность завышена, выход в установившийся режим затянут.

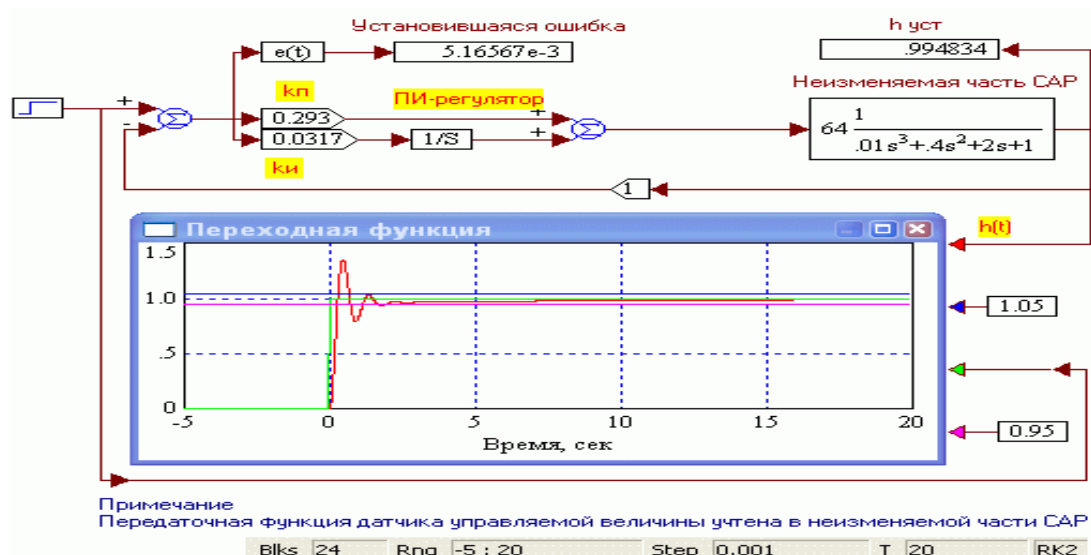
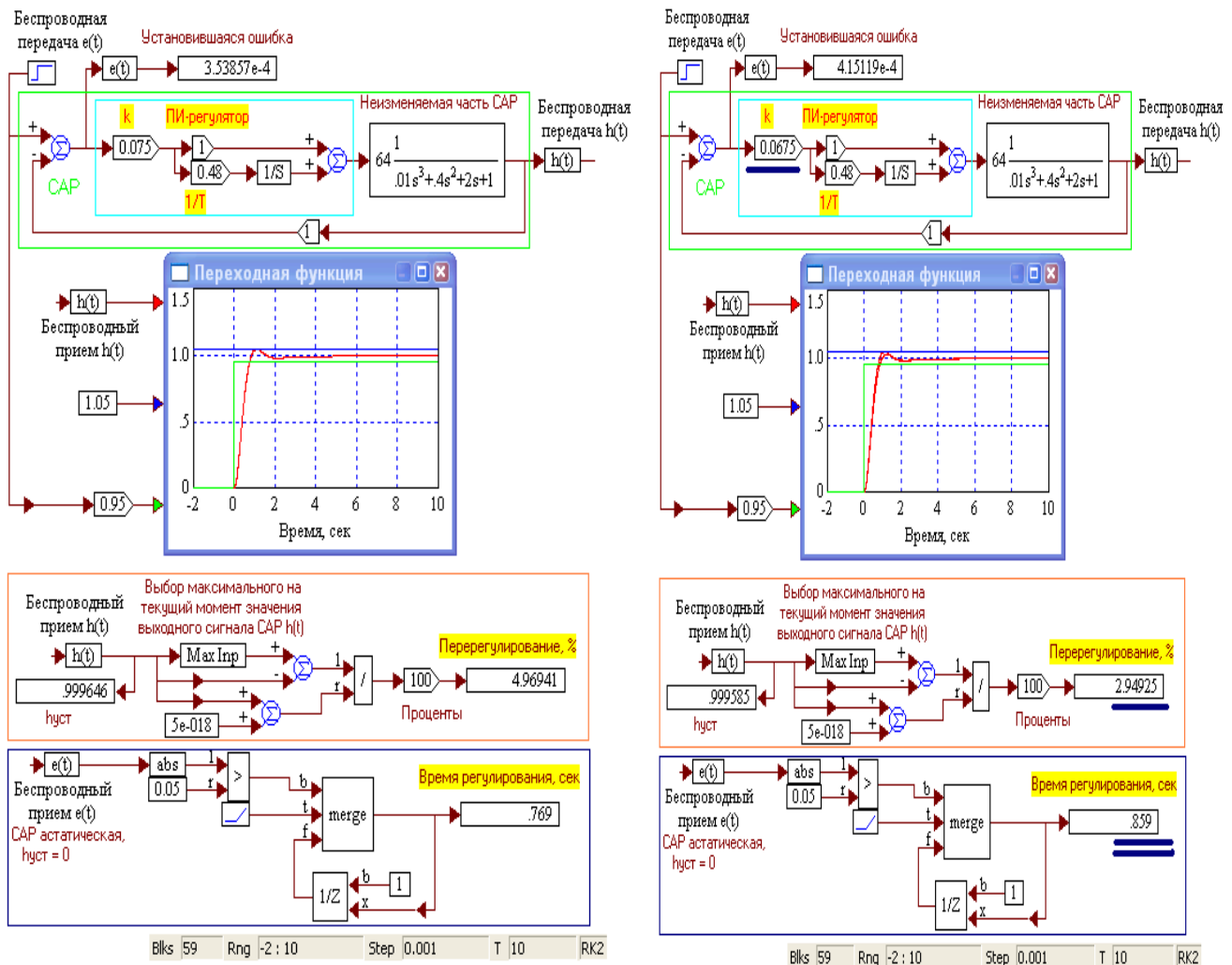


Рис. 5.39. Автоматически оптимизированная САР по критерию минимума СКО

Увеличение времени моделирования по сравнению со моделью рис. 5.38 с 5 до 20 сек показывает, что САР определённо астатическая, но значение коэффициента усиления интегральной компоненты ПИ-регулятора относительно невелико, поэтому процесс выравнивания длится весьма долго по сравнению с продолжительностью и так затянутого из-за колебательности переходного процесса. Уменьшение коэффициента усиления ПИ-регулятора вручную до достижения перерегулирования в 5% существенно улучшает время регулирования. Тем не менее, приближение, определяемое по ЛАЧХ и ЛФЧХ, с последующим уточнением по критерию Сигма 5 % (рис. 5.34 и 5.35) дает лучшие результаты, нежели критерий минимума СКО (рис. 5.38). Сохранить файл модели и снимок экрана. Сделать выводы.

2.6. Оценка чувствительности САР по параметру

2.6.1. Создать лабораторный стенд. Загрузить и запустить из файла виртуальный стенд (Vis_Lab_6\ O_32_Sensitiv.vsm или то же, но в «вертикальной» конфигурации Vis_Lab_6\ O_32_Sensitiv_2.vsm). На рис. 5.40 представлено 2 фрагмента работы стенда. Уменьшение коэффициента усиления ПИ-регулятора на 10%, с 0.075 (А) до 0.0675 (Б) приводит к увеличению времени регулирования с 0.769 сек до 0.859 сек, т.е. на 10.5 %.



А)

Б)

Рис. 5.40 Стенд для оценки влияния изменения параметров САР на ее время регулирования и перерегулирование

Заменить, как и ранее, параметры неизменяемой части САР параметрами, показанными на рис. 5.30. Провести моделирование и исследование результатов.

Таким образом, относительная чувствительность времени регулирования к изменению коэффициента усиления ПИ-регулятора, а значит и всего контура, состав-

ляет $S_{t_{\text{рег}}} = \frac{-10.5\%}{10\%} = -1.05$, где минус означает, что увеличение коэффициента усиления приводит к уменьшению времени регулирования и наоборот.

Сделать выводы: относительное изменение времени регулирования приблизительно равно относительному изменению коэффициента усиления разомкнутого контура САР, взятому с обратным знаком.

Примечание. Если при перерегулировании, равном 5% слегка увеличить усиление, то очевидно, что и свойства САР, в частности время регулирования, изменятся также слегка. Но формально, переходная функция выйдет за пределы 5%-го коридора и войдет в него на заметную величину позднее первого входа. Произойдет скачкообразное изменение формально измеряемого времени регулирования. Поэтому в проведенных выше измерениях коэффициент усиления уменьшался на 10%, а не увеличивался.

2.6.2. Оценить чувствительность времени регулирования САР к изменениям коэффициента усиления ПИ-регулятора.

Запустить моделирование. Зарегистрировать в отчете время регулирования.

Уменьшить на 10% коэффициент усиления ПИ-регулятора, вновь запустить моделирование, зарегистрировать новое значение времени регулирования.

Вычислить относительную чувствительность времени регулирования исследуемой САР к изменению коэффициенту усиления ее контура, или, что то же самое, к изменению коэффициента усиления ПИ-регулятора.

Сохранить файл модели и снимок экрана. Сделать выводы.

3. Выводы по проделанной работе и оформление отчёта

Содержание отчета: титульный лист; порядок работы и снимки лабораторных стендов; выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие свойства охватывает понятие "качество САР"?
2. В чем заключается принцип работы разомкнутых САР, замкнутых САР?
3. Что такое установившийся и переходный режимы работы САР?
4. Какими показателями характеризуется качество переходного и установившегося режима?
5. В чем состоит принцип определения параметров качества переходного режима и определения коэффициентов ошибок САР?
6. Каковы косвенные показатели качества САР в переходном и установившемся режимах?
7. Что такое синтез САР?
8. Что такое оптимизация САР, параметрическая оптимизация САР, структурно-параметрическая оптимизация САР?
9. Что такое критерий оптимизации?
10. Что такое функция цены? Какие функции цены применяются в критериях оптимизации по минимуму СКО и 5%-го перерегулирования?
11. Типы регуляторов и их передаточные и переходные функции.
12. В каком смысле критерий Sigma 5 обеспечивает наилучшее быстродействие САР?
13. Что такое чувствительность САР к изменению ее параметра? Зачем нужно знать численные оценки чувствительности?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт фирмы Visual Solution Inc.: <http://www.vissim.com/>
2. Лукас В.А. Теория автоматического управления. - М.: Недра, 1990. - 416 с.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования.— М.: Наука, 1975.
4. VisSim User's Guide - Version 3. Visual Solutions Inc., Westford, MA 01886 USA. 1998, 330 p.
5. Топчеев Ю.И., Цыпляков А.П. Задачник по ТАУ. М.: Машиностроение, 1977.- 592с.
6. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления/ Под редакцией В.А. Бесекерского. — М.: Наука, 1978.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство/ Пер. с нем. — М.: Мир, 1982.
8. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3 т./ Пер. с англ. — М.: Мир, 1993.
9. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних занять з дисципліни
«Основи теорії управління»
для студентів спеціальності
6.05010101 «Інформаційно управляючі системи та технології»

Російською мовою

Укладачі: МОСКАЛЕНКО Валентина Володимирівна
ФОНТА Наталія Григорівна
ЗАХАРОВА Тетяна В'ячеславівна

Відповідальний за випуск проф. Годлевський М. Д.
Роботу до видання рекомендував проф. Горілий О. В.

В авторській редакції

План 2015 р., поз. 177 / _____
Підп. до друку 09 . 04 . 15 . Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.
Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 7.
Обл.-вид. арк. _____. Наклад 50 прим. Зам. № _____. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач

ТОВ «Видавництво «Підручник НТУ «ХПІ»».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.
