

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Баламирзоев Назим Лиодиевич
Должность: Ректор
Дата подписания: 06.10.2025 22:12:05
Уникальный программный ключ:
5cf0d6f89e80f49a334f6a4ba58e91f3326b9926

**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

**Методические указания
к выполнению лабораторных работ №1-4 по
дисциплине «Теория автоматического управления»
для студентов направления подготовки 27.03.04 – Управление в
технических системах, профиля подготовки «Управление и информатика в
технических системах» (для всех форм обучения)
и по дисциплине «Основы теории управления»
для студентов направления подготовки 09.03.01 – Информатика и
вычислительная техника, профиля подготовки «Вычислительные
машины, комплексы, системы и сети»**

Махачкала 2021

УДК 681.5.015.2

Методические указания к выполнению лабораторных работ №1-4 по дисциплине «Теория автоматического управления» для студентов направления подготовки 27.03.04 – Управление в технических системах, профиля подготовки «Управление и информатика в технических системах» и по дисциплине «Основы теории управления» для студентов направления подготовки 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника, профиля подготовки «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Махачкала, ДГТУ, 2021г., с.56.

Приведено описание: комплекса программа для анализа и синтеза систем автоматического управления – SimInTech, лабораторных работ №1 (Исследование временных характеристик позиционных звеньев), №2 (Исследование временных характеристик интегрирующих, дифференцирующих и интегро-дифференцирующих звеньев), №3 (Исследование частотных характеристик звеньев и систем автоматического регулирования), №4 (Исследование влияния обратных связей на качество переходных процессов систем автоматического регулирования), основные теоретические сведения к ним, порядок их выполнения и содержания отчетов.

Составитель: к.т.н., зав. каф. УиИТСиВТ Т.Г. Асланов

Рецензент: к.т.н., профессор П.А. Кадиев
к.т.н., ведущий инженер Махачкалинского филиала ОАО ПО «Азимут» О.И. Гасанов

Печатается по решению Ученого совета Дагестанского государственного технического университета от _____ 2021 г.

Введение

Понятие «модель» весьма широкое и многозначное. Можно утверждать, что человек, часто не думая об этом, в жизни все время создает и использует всевозможные модели: окружающего пространства, поведения других людей, физических и технических объектов и т.д., с тем, чтобы получить практическую пользу. Можно сказать, что отображение реальности сознанием человека является в той или иной степени моделированием. Например, переходя дорогу, мы моделируем движение приближающейся машины, чтобы предсказать, успеем ли безопасно перейти, и выбрать правильное решение.

В науке и технике модели могут быть:

- физическими (масштабными и аналоговыми),
- математическими (аналитическими),
- виртуальными (воображаемыми, реализуемыми на компьютерах) и др.

Моделирование технических объектов и систем проводится для того, чтобы определить свойства и характеристики проектируемых систем еще до их изготовления и при необходимости скорректировать, уточнить их структуру и параметры. Это позволяет получить проект работоспособной системы, которую не придется существенно дорабатывать тогда, когда она будет изготовлена. Таким образом, моделирование сокращает и удешевляет процесс проектирования и реализации систем и объектов.

Кроме того, на модели системы можно проверить ее поведение в таких условиях и режимах, для которых система не предназначена, с тем, чтобы знать, как она себя поведет и к каким последствиям это приведет. Очевидно, что такие эксперименты на реальной системе могут быть не только дороги, но и небезопасны, в то время как моделирование позволяет получить нужную информацию о процессе или системе без лишних затрат и, главное, без негативных последствий.

1. Назначение программы SimInTech

Программа SimInTech предназначена для детального исследования и анализа нестационарных процессов в ядерных и тепловых энергоустановках, в системах автоматического управления, в следящих приводах и роботах, и в любых технических системах, описание динамики которых может быть представлено в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений и/или реализовано методами структурного моделирования. Основными направлениями использования SimInTech являются создание моделей, проектирование алгоритмов управления, их отладка на модели объекта, генерация исходного кода на языке Си для программируемых контроллеров.

Программа SimInTech, разработана и развивается компанией ООО «ЗВ Сервис». Эта программа – мощное, удобное в использовании, компактное и эффективное средство моделирования физических и технических объектов, систем и их элементов.

Программа предоставляет пользователю, развитый графический интерфейс, используя который, исследователь создает модель из виртуальных элементов с некоторой степенью условности так же, как если бы он строил реальную систему из настоящих элементов. Это позволяет создавать, а затем исследовать и оптимизировать модели систем широкого диапазона сложности.

При описании и последующем построении модели в среде SimInTech 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.

При использовании SimInTech не требуется владеть программированием на языках высокого уровня или ассемблере. В то же время, специалисты, владеющие программированием, могут создавать собственные блоки, дополняя ими богатую библиотеку стандартных блоков SimInTech.

Моделирование систем управления это далеко не весь круг задач, которые можно решать в SimInTech. Программа математического моделирования SimInTech среда динамического моделирования технических систем, предназначенная для расчётной проверки работы систем управления сложными техническими объектами. SimInTech осуществляет моделирование технологических процессов, протекающих в различных объектах, с одновременным моделированием системы управления, и позволяет повысить качество проектирования систем управления за счет проверки принимаемых решений на любой стадии проекта.

2. Графический интерфейс SimInTech

Запуск среды SimInTech осуществляется одним из следующих способов:

- с помощью ярлыка на рабочем столе или на панели быстрого запуска;
- с помощью стартового меню «Пуск» (Windows XP/7/10);
- с помощью ярлыка на экране приложений (Windows 8/8.1).

После запуска приложения на экране появится Главное окно SimInTech (рисунок 2.1).

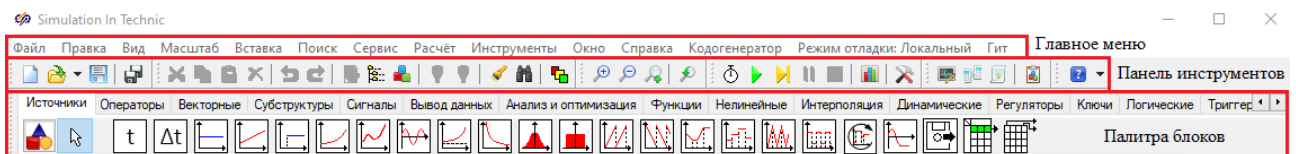


Рисунок 2.1 – Главное окно SimInTech

Главное меню Главного окна (*Файл, Правка, Вид* и т.д.) отвечает за настройку программы, позволяет редактировать, управлять созданием и расчетом собранных схем, содержит инструменты работы с базой данных.

Панель инструментов Главного окна (*Новый проект, Открыть, Сохранить проект* и т.д.) содержит набор кнопок, отвечающих за наиболее часто используемые команды. Часть кнопок дублирует команды Главного меню и предназначена для ускорения работы с программой.

Палитра блоков Главного окна (*Источники, Операторы* и т.д.) содержит набор библиотек блоков для создания расчетных схем и моделей. «Линейка» типовых блоков состоит из отдельных каталогов, сгруппированных по функциональному признаку. Переключение между ними осуществляется 1-кратным щелчком левой клавиши мыши в поле «закладки» с соответствующим названием. К основным библиотекам относятся: **Источники** входных воздействий; **Операторы** математические; **Векторные** операторы; **Субструктуры**; **Сигналы**; **Вывод данных**; **Анализ и оптимизация**; **Функции** математические; **Нелинейные**; **Динамические**; **Ключи**; **Логические**; **Дискретные**. В Приложении представлено краткое описание основных блоков различных библиотек SimInTech.

Создание и изменение структурной схемы производится при помощи **Схемного окна**. Редактор структурных схем способен загружать несколько независимых проектов. Каждый проект располагается на своем отдельном **Схемном окне**. Для того чтобы создать расчетную схему необходимо (см. рисунок 2):

– либо выбрать с помощью **Главного меню Главного окна**: «**Файл → Новый проект → Схема модели общего вида**»;

– либо воспользоваться кнопкой **Новый проект** на **Панели инструментов Главного окна**.

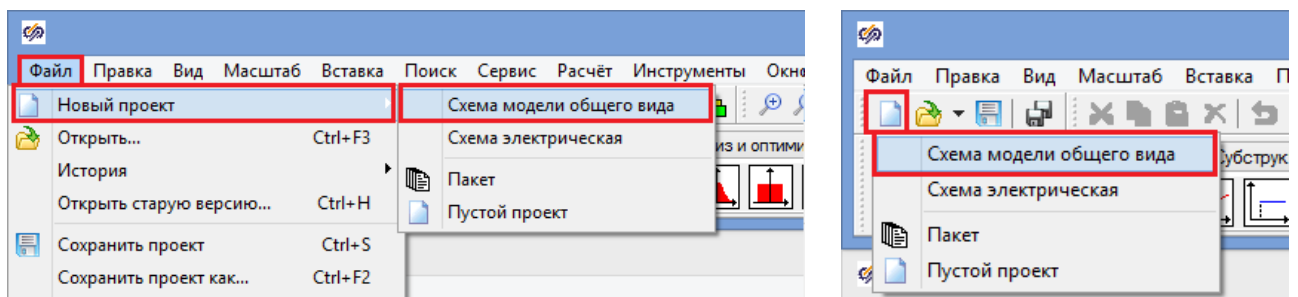


Рисунок 2.2 – Способы создания нового проекта

После выполнения одного из вышеупомянутых способов на экране появится новое **Схемное окно** (рисунок 2.3).

Меню окна проекта отвечает за основные функции работы со схемой, за настройку визуального отображения схемы.

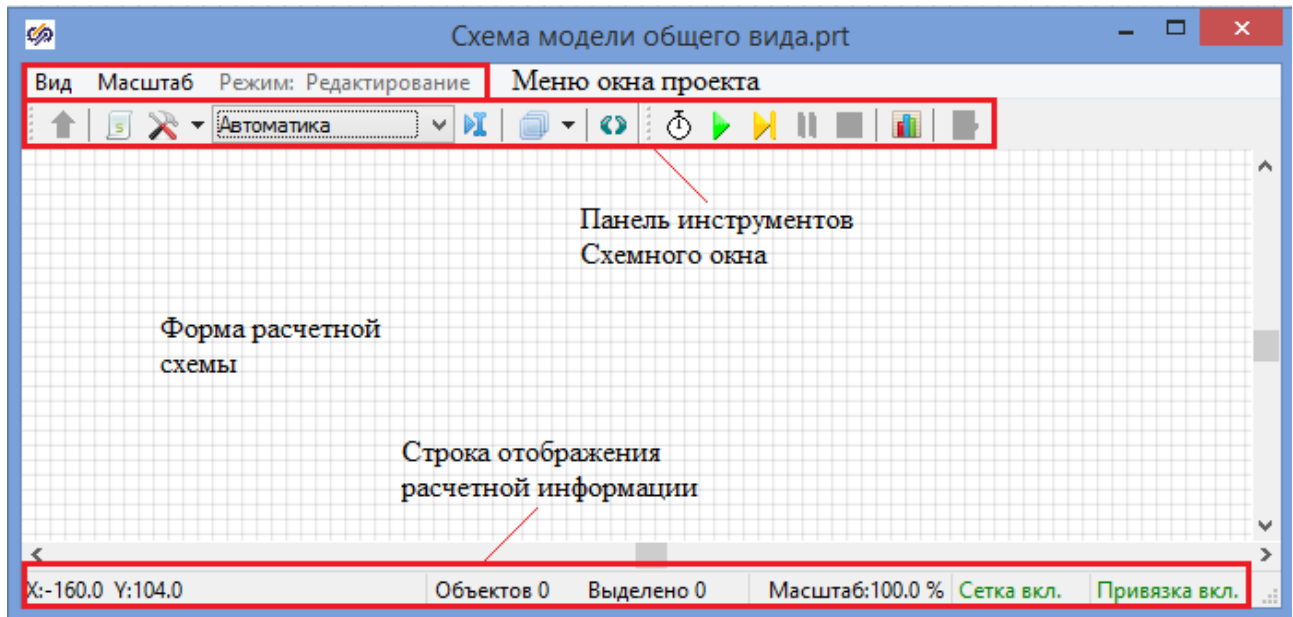


Рисунок 2.3 – Схемное окно проекта

Панель инструментов Схемного окна содержит следующие основные объекты:

-  **скрипт** – кнопка доступа к редактору скрипта;
-  **параметры расчета** – кнопка доступа к окну изменения расчетных параметров схемы;
-  **инициализация** – инициализирует расчетную схему, но не запускает ее расчет;
-  **пуск** – инициализирует расчетную схему и сразу запускает ее расчет;
-  **сделать шаг** – задача делает один шаг с величиной, заданной пользователем в расчетных параметрах схемы;
-  **пауза** – приостанавливает расчет;
-  **стоп** – останавливает расчет;
-  **менеджер данных** – доступ к окну редактора базы сигналов проекта.

Структурная схема SimInTech строится из блоков, линий связи, являющихся активными элементами схемы, и декоративных элементов (комментариев, рисунков, подписей), не участвующих в расчёте.

Блок – базовый элемент проекта (функциональной диаграммы, расчетной схемы). Основными атрибутами блока являются его графический образ,

свойства (задаются пользователем), параметры (вычисляются блоком), математическая модель, входные и выходные порты. В математическом аспекте блоки представляют собой операторы преобразования входных сигналов блока в его выходные сигналы.

Портом называется объект на изображении блока, от которого можно вести линию связи или к которому можно подсоединить линию связи. Порты и линии связи могут быть различных типов. Тип линии связи определяется соответствующим идентификатором и может быть изменён. Линию связи можно подсоединить к порту, только если у них совпадает тип.

Свойство блока – задаваемая пользователем характеристика (константа или переменная величина определённого типа данных) для работы блока.

Параметр блока – формируемая (вычисляемая) блоком переменная, характеризующая работу блока.

Линия связи – служебный блок в виде полилинии, второй базовый элемент расчетной схемы, соединяющий выходной порт одного блока и входной порт другого блока. В общем случае линия связи может соединять множество входных портов с одним выходным портом. В математическом аспекте линии связи являются шинами данных (сигналов) и осуществляют направленную передачу данных от выходов блока к входам других блоков.

Совокупность блоков и соединяющих их порты линий связи образует **алгоритм управления** в схеме автоматики.

Субмодель (макроблок) – блок, математическая модель которого задана в виде структурной схемы, расположенной «внутри» субмодели. Макроблоки позволяют реализовать принцип вложенности структурных схем, являются одним из механизмов создания и сохранения в библиотеке новых типов блоков. Математическая модель макроблока может быть сохранена в отдельном файле (в отдельном проекте) для многократного использования в других проектах.

Проект SimInTech – файл, содержащий структурную схему, предназначенную для расчета тем или иным математическим решателем или расчетным кодом и созданную в окне графического редактора SimInTech,

сохраненный в виде бинарного и/или текстового файла с уникальным именем и расширением «prt» (для бинарного) и «xprt» (для текстового) файла.

Схема автоматике – проект SimInTech, содержащий набор взаимосвязанных алгоритмов управления отдельной подсистемой объекта управления. Может также содержать математические модели объектов управления, реализованные в виде схем типа «вход-выход» или набранные на встроенном языке программирования.

Язык программирования SimInTech – специализированный язык программирования высокого уровня, предназначенный для создания программ, описывающих функционирование типового блока «Язык программирования»; задания глобальных констант и переменных проекта; создания типовых подпрограмм и программ, которые могут производить по мере расчета манипуляции с объектами схемы. Основной отличительной особенностью языка программирования SimInTech является то, что текст программы предназначен для исполнения на каждом расчетном шаге при моделировании схемы.

3. Основные блоки SimInTech

Блоки **SimInTech** можно условно разделить на три основных категории:

- Блоки, имеющие только выход: **генераторы**.
- Блоки, имеющие вход и выход: **преобразователи**.
- Блоки, имеющие только вход: **индикаторы**:
 - **Осциллограф**
 - **Цифровой индикатор**

Важным компонентом модели является **соединительная линия** – виртуальный аналог физического соединения элементов, передающего воздействия от одного элемента к другому. Соединительные линии в SimInTech 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.

Примечание: 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.

3.1. Генераторы

Генераторы – это блоки, имеющие только выход.

Генераторы вырабатывают изменяющиеся во времени или постоянные сигналы.

Примерами таких блоков в SimInTech являются блоки:

-  (ступенька) – генератор ступенчатой единичной функции $1_0(t)$;
-  (линейный источник) – генератор линейно растущего сигнала $t \cdot 1_0(t)$;
-  (синусоида) – генератор синусоидального сигнала $X_m \sin(\omega t + \varphi)$;
-  (константа) – генератор постоянного сигнала, величина которого не меняется в процессе работы модели;

Для помещения блока на рабочее пространство следует щелкнуть на палитре блоков по пункту «Источники», затем щелкнуть по названию иконке требуемого генератора, перевести курсор в нужное место рабочего пространства и еще раз щелкнуть кнопкой мыши.

3.2. 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:

–  (интегратор) – блок интегратора, осуществляющий интегрирование входного сигнала по времени и являющийся фундаментальным кирпичиком любой модели линейной системы;

–  (инерционное звено первого порядка) – аperiodическое звено первого порядка;

–  (колебательное звено) – колебательное звено;

–  (передаточная функция общего вида) – передаточная функция. Этот блок позволяет создавать модели как простых, так и очень сложных инерционных элементов линейных систем и систем в целом;

–  (инерционно-дифференцирующее звено) – инерционно-дифференцирующее звено;

–  (инерционно форсирующее звено) – инерционно форсирующее звено;

–  (инерционно-интегрирующее звено) – инерционно-интегрирующее звено;

–  (сумматор) – сумматор двух и более сигналов, его выходной сигнал равен сумме входных;

–  (сравнивающее устройство) – элемент сравнения для отрицательных обратных связей;

–  (перемножитель) – перемножитель;

–  (делитель) – делитель;

–  (усилитель) – усилитель.

Для помещения блока на рабочее пространство следует щелкнуть на палитре блоков по пункту «Операторы» либо «Динамические», затем щелкнуть

по названию иконке требуемого генератора, перевести курсор в нужное место рабочего пространства и еще раз щелкнуть кнопкой мыши.

3.3. Индикаторы

Индикаторы – это блоки, имеющие только вход.

Индикаторы программы SimInTech предназначены для отображения сигналов в форме удобной и привычной для исследователя.

Важнейшими индикаторами являются блоки:

–  (временной график) – позволяет строить график в зависимости от времени;

–  (фазовый портрет) – фазовый портрет.

–  (построение частотных характеристик) – позволяет строить D-разбиение, $\text{Im}(w)$, $\text{Re}(w)$, АЧХ, ЛАХ, ФЧХ, Годограф Найквиста, Годограф Попова.

Для помещения блока на рабочее пространство следует щелкнуть на палитре блоков по пункту «Вывод данных» либо «Анализ и оптимизация», затем щелкнуть по названию иконке требуемого генератора, перевести курсор в нужное место рабочего пространства и еще раз щелкнуть кнопкой мыши.

Лабораторная работа № 1 «Исследование временных характеристик позиционных звеньев»

Цель работы: изучение временных характеристик позиционных звеньев линейных систем автоматического управления (САУ), приобретение и закрепление навыков моделирования элементов систем в программе SimInTech, постановки и решения элементарных исследовательских задач и грамотного, эстетичного оформления отчетов.

1. Краткие теоретические сведения

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

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

Типовые звенья позволяют провести структурное моделирование системы управления путем замены функциональных элементов системы их моделями при сохранении связей между элементами. Свойства структурной модели системы исследуются математическими методами, а результаты исследований проецируются на исходную САУ, 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 (Вышнеградского. Это простейшее 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 (или, если угодно, как любое сложное вещество из отдельных химических элементов), 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 трех звеньев, бывает труднее анализировать, чаще удобнее применять кроме них еще несколько типов звеньев.

Примечание. В более общем классе систем – нелинейных выделяют еще и нелинейные звенья, как безинерционные, так и инерционные.

Передаточная функция

Типовые звенья линейных систем можно определять различными эквивалентными способами, в частности с помощью, так называемой передаточной функции, имеющей, как правило, дробно-рациональный вид, т.е. представляющей собой отношение двух полиномов:

$$W = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + b_2 p^{m-2} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_{n-1} p + a_n} \quad (1.1)$$

где b_i и a_j – коэффициенты полиномов. Это т.н. параметры передаточной функции или звена.

Передаточная функция связывает изображение $Y(p)$ выходного сигнала $y(t)$ звена с изображением $X(p)$ его входного сигнала $x(t)$:

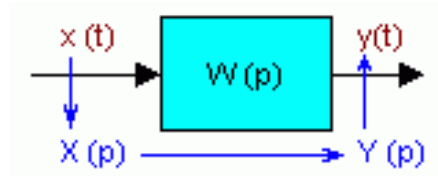


Рис. 1.1. Звено

$$Y(p) = W(p)X(p) \quad (1.2)$$

т.е. позволяет по любому известному входному сигналу $x(t)$ найти выходной $y(t)$. Это значит, что с точки зрения ТАУ передаточная функция полностью характеризует систему управления или ее звено. Это же самое можно сказать и в отношении совокупности коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции.

Передаточной функцией звена $W(p)$ называется отношение преобразования Лапласа выходной величины к преобразованию Лапласа входной величины

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} \quad (1.3)$$

2. Краткие сведения о позиционных звеньях

К позиционным звеньям относятся следующие типовые динамические звенья:

- безынерционное звено,
- апериодическое звено первого порядка,
- апериодическое звено второго порядка,
- колебательное звено,
- консервативное звено.

Временные характеристики позиционных звеньев сведены в табл. 1. Здесь же указаны передаточные функции звеньев.

а) Безынерционное звено

Это звено не только в статике, но и в динамике описывается алгебраическим уравнением

$$x_{\text{вых}} = k \cdot x_{\text{вх}} \quad (2.1)$$

Передаточная функция звена равна постоянной величине

$$W(p) = x_{\text{вых}}(p) / x_{\text{вх}}(p) = k \quad (2.2)$$

Примером такого звена являются: механический редуктор (без учета явления скручивания и люфта), безынерционный (широкополосный) электронный усилитель, делитель напряжения и т.п. Многие датчики сигналов, как, например, потенциометрические датчики, индукционные датчики, вращающиеся трансформаторы и сельсины, фотоэлементы и т.п., также могут рассматриваться как безынерционные звенья.

Вообще безынерционное звено является некоторой идеализацией реальных звеньев. В действительности, все звенья характеризуются некоторой инерционностью, поэтому ни одно звено не в состоянии равномерно пропускать все частоты от 0 до ∞ . Обычно к такому виду звена сводится одно из реальных звеньев, рассмотренных ниже, например, апериодическое или колебательное, если можно пренебречь влиянием динамических процессов в этом звене (т.е. постоянными времени).

б) Апериодическое звено 1-го порядка

Это звено описывается дифференциальным уравнением

$$T \cdot \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = k \cdot x_{\text{ВХ}} \quad (2.3)$$

где T – постоянная времени, с,

k – коэффициент передачи звена.

Передаточная функция звена имеет вид

$$W(p) = \frac{X_{вых}(p)}{X_{вх}(p)} = \frac{k}{Tp + 1} \quad (2.4)$$

Апериодическое звено – простейшее из тех звеньев, которые обладают инерцией. Действительно это звено не сразу, вначале быстро, а затем все более постепенно реагирует на ступенчатое воздействие. Это происходит потому, что в физическом оригинале апериодического 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.

В качестве примеров апериодических звеньев 1-го порядка можно указать: двигатель любого типа (электрический, гидравлический, пневматический), генератор постоянного тока, электрические RC – и LR – цепи, магнитный усилитель, резервуар с газом, нагревательная печь. Рабочие процессы в этих звеньях описываются общим уравнением (2.3).

в) Апериодическое звено 2-го порядка

Дифференциальное уравнение звена имеет вид:

$$T_2^2 \cdot \frac{d^2 x_{вых}}{dt^2} + T_1 \cdot \frac{dx_{вых}}{dt} + x_{вых} = k \cdot x_{вх} \quad (2.5)$$

При этом корни характеристического уравнения

$$T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1 = 0 \quad (2.6)$$

должны быть вещественными, что будет выполняться при условии

$$T_1 \geq 2 \cdot T_2 \quad (2.7)$$

В операторной форме уравнение (2.5) имеет вид

$$(T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1) \cdot x_{вых}(p) = k \cdot x_{вх}(p) \quad (2.8)$$

Если левую часть уравнения (2.8) разложить на множители, то получим

$$(T_3 \cdot p + 1) \cdot (T_4 \cdot p + 1) \cdot x_{вых}(p) = k_1 \cdot x_{вх}(p) \quad (2.9)$$

$$T_{3,4} = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4} - T_2^2}, \quad T_3 > T_4$$

Передаточную функцию апериодического звена 2-го порядка можно представить в виде:

– из уравнения (2.8) получим

$$\frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = \frac{k}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1} \quad (2.10)$$

– из уравнения (2.9) имеем

$$\frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = \frac{k}{(T_3 \cdot p + 1) \cdot (T_4 \cdot p + 1)} \quad (2.11)$$

Из (2.11) следует, что апериодическое звено 2-го порядка эквивалентно двум апериодическим звеньям 1-го порядка, соединенным последовательно, с общим коэффициентом передачи k и постоянными времени T_3 и T_4 .

В качестве примеров АПЗ-2 можно привести: двигатель постоянного тока при учете электромеханической (T_1) и электромагнитной (T_2) постоянных времени, электромашинный усилитель и т.п.

г) *Колебательное звено*

Это звено описывается тем же дифференциальным уравнением (2.5), что и АПЗ 2-го порядка. Однако корни характеристического уравнения (2.6) должны быть комплексными, что имеет место при условии $T_1 < 2 \cdot T_2$.

В операторной форме дифференциальное уравнение (2.5) для колебательного звена обычно представляется в виде

$$(T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot T \cdot p + 1) \cdot X_{\text{вых}}(p) = k \cdot X_{\text{вх}}(p) \quad (2.12)$$

или

$$\left(\frac{p^2}{q^2} + \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot p}{q} + 1 \right) \cdot X_{\text{вых}}(p) = k \cdot X_{\text{вх}}(p)$$

где $q = 1/T$ – угловая частота свободных колебаний (при отсутствии затухания),

ξ – параметр затухания, причем $0 < \varepsilon < 1$ для АПЗ2 $\varepsilon > 1$.

Передаточная функция колебательного звена

$$\frac{X_{\text{вх}}(p)}{X_{\text{вых}}(p)} = \frac{k}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot T \cdot p + 1} \quad (2.13)$$

В качестве примеров колебательных звеньев можно указать: колебательные RLC – цепи, управляемые двигатели постоянного тока при выполнении условия $4T_{\varepsilon} > T_m$, упругие механические передачи (для передачи вращательного движения, например) с упругостью C , моментом инерции J и коэффициентом скоростного трения S , гироскопические элементы и др.

Примечание: уравнение (3.13) может быть получено из уравнения (2.6) путем замены T_2 на T и T_1 на $2\varepsilon T$ откуда может быть найдено значение ε т.е $T_1 = 2\varepsilon T_2$; $\varepsilon = \frac{T_1}{2T_2}$;

д) Консервативное звено

Консервативное звено является частным случаем колебательного звена при $\varepsilon=0$. Тогда передаточная функция (2.13) будет иметь вид

$$W(p) = \frac{X_{\text{вх}}(p)}{X_{\text{вых}}(p)} = \frac{k}{T^2 \cdot p^2 + 1} \quad (2.14)$$

Консервативное звено представляет собой идеализированный случай, когда можно пренебречь влиянием рассеяния энергии в звене. Например, если последовательном RLC -контуре положить $R=0$, получим консервативное звено.

2.2. Переходная функция и функция веса

В теории управления в качестве входных сигналов рассматривают единичное ступенчатое воздействие, единичное импульсное воздействие или гармонические сигналы. Единичное ступенчатое воздействие (рис. 2.1) – скачкообразное воздействие, величина скачка равна 1.

$$1(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0 \\ 0, & \text{при } t < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

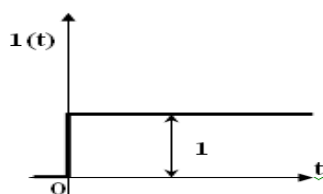


Рис. 2.1. Единичное ступенчатое воздействие

Единичная импульсная функция (рис. 2.2) представляет собой производную от единичного ступенчатого воздействия $\delta(t) = 1'(t)$

Единичная импульсная функция равна бесконечности при $t=0$ и равно нулю во всех остальных случаях.

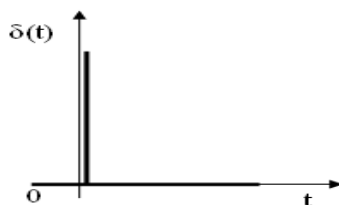


Рис. 2.2. Единичная импульсная функция

Основное свойство дельта функции заключается в том, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (2.16)$$

Т.е. она имеет единичную площадь.

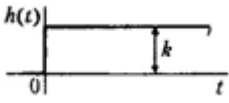
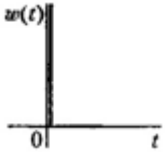
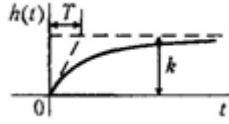
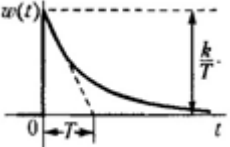
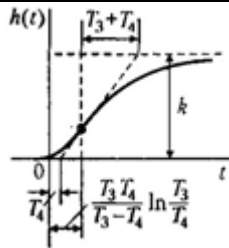
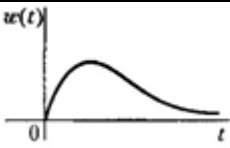
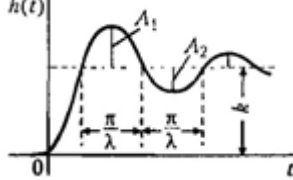
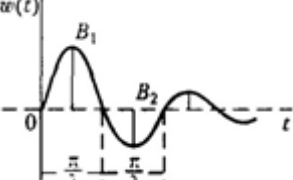
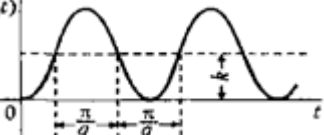
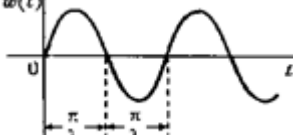
Переходной функцией $h(t)$ называется реакция системы на единичное ступенчатое воздействие.

Весовой функцией $\omega(t)$ называется реакция системы на дельта функцию.

Между переходной и весовой функцией существуют следующие зависимости:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t) dt \quad \omega(t) = \frac{dh(t)}{dt} \quad (2.17)$$

Табл. 1. Временные характеристики позиционных звеньев

Тип звена и его передаточная функция	Переходная функция $h(t)$	Функция веса $\omega(t)$
Безынерционное $W(p)=k$	 $h(t) = k1(t)$	 $\omega(t) = k\delta(t)$
Апериодическое 1-го порядка $W(p) = k/(1 + Tp)$	 $h(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) 1(t)$	 $\omega(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}} 1(t)$
Апериодическое 2-го порядка $W(p) = \frac{k}{1 + T_1 p + T_2^2 p^2}$ $= \frac{k}{(1 + T_3 p)(1 + T_4 p)}$ $T_{3,4} = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4} - T_2^2}$ ($T_1 > 2T_2$; $T_3 > T_4$)	 $h(t) = k \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_4}}\right) 1(t)$	 $\omega(t) = \frac{k}{T_3 - T_4} \left(e^{-\frac{t}{T_3}} - e^{-\frac{t}{T_4}}\right) 1(t)$
Колебательное $W(p) = \frac{k}{1 + 2\zeta Tp + T^2 p^2}$ $= \frac{k}{1 + \frac{2\zeta}{q} p + \frac{p^2}{q^2}}$ $q = \frac{1}{T}$	 $\gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{A_1}{A_2}$ $\gamma = \zeta q, \quad \lambda = q\sqrt{1 - \zeta^2}$ $h(t) = k \left(1 - e^{-\gamma t} \left(\cos \lambda t + \frac{\gamma}{\lambda} \sin \lambda t\right)\right) 1(t)$	 $\gamma = \frac{\lambda}{\pi} \ln \frac{B_1}{B_2}$ $q = \sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}$ $\zeta = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + \lambda^2}}$ $\omega(t) = \frac{kq^2}{\lambda} e^{-\gamma t} \sin \lambda t 1(t)$
Консервативное $W(p) = \frac{k}{1 + T^2 p^2} = \frac{k}{1 + \frac{p^2}{q^2}}$ $q = \frac{1}{T}$	 $h(t) = k(1 - \cos qt) 1(t)$	 $\omega(t) = kq \sin qt 1(t)$

Получение переходной функции и функции веса в программе SimInTech

В программе SimInTech линейные апериодическое, колебательное и более сложные типовые звенья выносятся на рабочее поле с помощью блоков

инерциальное звено первого порядка, колебательное звено, передаточная функция общего вида с последующим заданием параметров звена в окне диалога, вызываемого двойным щелчком (или однократным правой кнопкой) по блоку.

Для того, чтобы получить функцию веса необходимо взять производную от переходной функции. Для этого на рабочее поле выносим блок **derivative** (Blocks – integration - **derivative**).

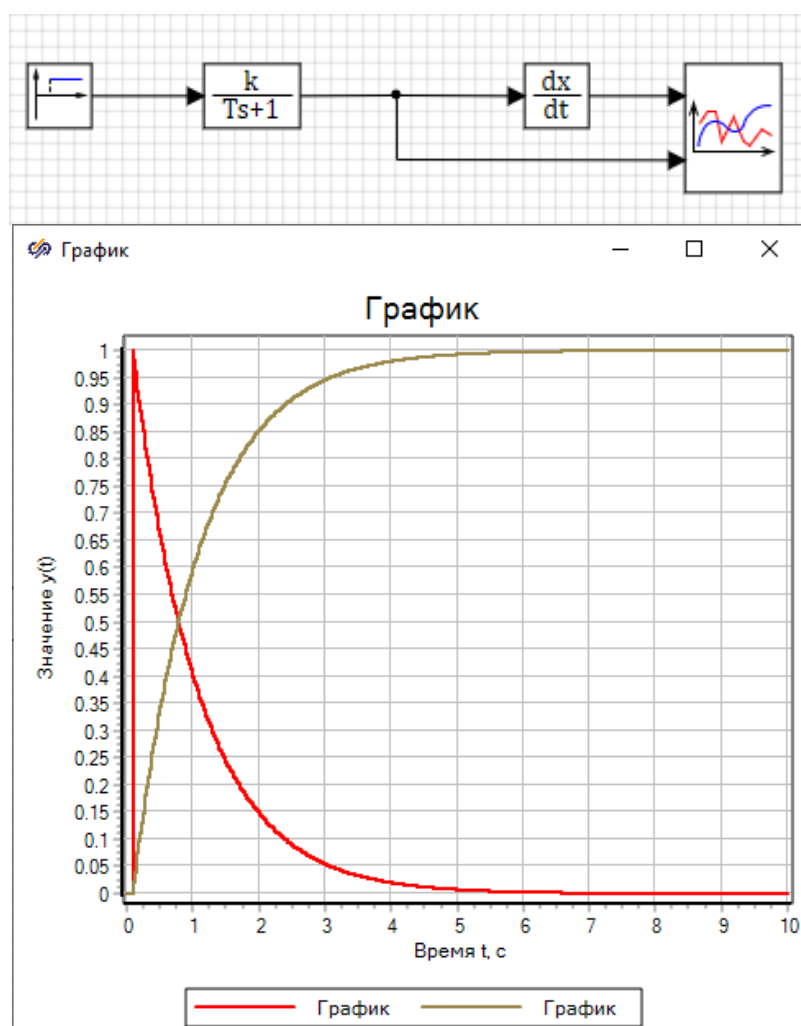


Рис.2.5. Переходная функция и функция веса АПЗ-1

3. Программные и технические средства для выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется с помощью комплекса программ для анализа и синтеза систем автоматического управления SimInTech.

4. Лабораторное задание

4.1. Для каждого типового звена (табл.1) построить переходную функцию и функцию веса при значениях параметров:

а) БЗ:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5

б) АПЗ-1:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0,5	0,1	0,7	1,3	1,5	2	0,8	1,5	2	2,5

в) АПЗ-2:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T_1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,3	1,6	2,0	2,5	1,8
T_2	0,04	0,09	0,14	0,24	0,35	0,62	0,7	0,93	1,1	1,3

г) Колебательное звено:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.3	1,6	2,0	2,5	1,8
ξ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0,7	0,8	0,9	0,9

д) Консервативное звено:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.3	1,6	2,0	2,5	1,8

4.2. Проанализировать и объяснить влияние изменения параметров звена на переходную функцию и функцию веса.

4.3. Оформить отчет по лабораторной работе в соответствии с требованиями, установленными на кафедре.

5. Содержание отчета

В отчет по выполненной работе должны войти:

1. Цель и назначение работы.
2. Краткие сведения по выполненной работе
3. Исходные данные для построения переходного процесса и функции веса.
4. Графики переходных процессов и функции веса для позиционных звеньев.
5. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Что вы знаете о комплексе программ SimInTech?
2. Что такое единичное ступенчатое воздействие и единичный импульс?
3. Что такое переходная функция и функция веса?
4. Какие вы знаете позиционные звенья?
5. Как по коэффициентам характеристического уравнения отличать апериодическое звено 2-го порядка, колебательное и консервативные звенья?
6. Как влияют постоянные времени и коэффициент усиления звена на вид переходного процесса?
7. Какая существует связь между переходной и весовой функциями?

Лабораторная работа № 2 «Исследование временных характеристик интегрирующих, дифференцирующих и интегро-дифференцирующих звеньев»

Цель работы: изучение временных характеристик интегрирующих, дифференцирующих и интегро-дифференцирующих звеньев при единичном ступенчатом входном сигнале (выходной сигнал – переходная функция) и входном сигнале в виде единичного импульса (выходной сигнал – функция веса).

1. Краткие теоретические сведения

Интегрирующие звенья

а) Идеальное интегрирующее звено. Звено описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dx_{\text{вых}}}{dt} = kx_{\text{вх}} \quad (1.1)$$

т.е. скорость изменения выходного сигнала пропорциональна входному сигналу (или выходной сигнал представляет собой интеграл от входного сигнала).

Передаточная функция звена имеет вид

$$W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = \frac{k}{p} \quad (1.2)$$

Такое звено является идеализацией реальных интегрирующих звеньев.

В качестве примера идеального интегрирующего звена можно указать: интегральный операционный усилитель, интегрирующий гироскоп, гидравлический или пневматический демпфер и т.д.

б) Интегрирующее звено с замедлением

ИЗ с замедлением описывается дифференциальным уравнением:

$$T \frac{d^2 x_{\text{вых}}}{dt^2} + \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} = kx_{\text{вх}} \quad (1.3)$$

Передаточная функция реального ИЗ, полученная из уравнения (1.3), имеет вид

$$W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = \frac{k}{p(Tp+1)} \quad (1.4)$$

Примером такого звена является электрический двигатель, если в качестве выходной величины рассматривать не угловую скорость, а угол поворота, являющийся интегралом от угловой скорости.

ИЗ с замедлением можно рассматривать как совокупность двух включенных последовательно звеньев – идеально интегрирующего и АПЗ 1-го порядка.

Для нахождения временных характеристик удобно передаточную функцию представить в виде алгебраической суммы

$$W(p) = \frac{k}{p(Tp+1)} = \frac{k}{p} - \frac{kT}{Tp+1} \quad (1.5)$$

что позволяет представить решение дифференциального уравнения (1.3) в виде суммы решений для идеального ИЗ и АПЗ 1-го порядка.

Временные характеристики ИЗ представлены в табл. 1.

в) Изодромное звено. Звено описывается уравнением

$$\frac{dx_2}{dt} = kx_1 + k_1 \frac{dx_1}{dt} \quad (1.6)$$

Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{k}{p} + k_1 = \frac{k(Tp+1)}{p} \quad (1.7)$$

где $T = k_1/k$ — постоянная времени изодромного звена.

Таким звеном может быть комбинация пружины с демпфером. В качестве входной величины здесь рассматривается прикладываемая сила F , а в качестве выходной — перемещение x точки a , в которой приложена сила. Это перемещение складывается из деформации пружины.

При использовании операционного усилителя изодромное звено может быть получено посредством применения *RC-цепи* в обратной связи.

В системах управления часто находят применение изодромные звенья, построенные на базе интегрирующего привода.

Дифференцирующие звенья

а) Идеальное дифференцирующее звено:

Идеальное дифференцирующее звено описывается уравнением

$$x_{\text{вых}} = k \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} \quad (1.8)$$

Передаточная функция идеального ДЗ имеет вид

$$W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = kp \quad (1.9)$$

Примером идеального ДЗ являются: тахогенератор постоянного тока, если в качестве входной величины рассматривать угол поворота его ротора α , а выходной – ЭДС якоря E (или выходное напряжение), и, если пренебречь постоянной времени, дифференцирующий операционный усилитель и т.п.

б) Дифференцирующее звено с замедлением

ДЗ с замедлением описывается уравнением

$$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = k \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} \quad (1.10)$$

Передаточная функция ДЗ с замедлением имеет вид

$$W(p) = \frac{X_{\text{вых}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = \frac{kp}{Tp + 1} \quad (1.11)$$

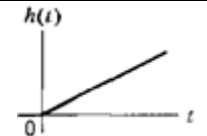
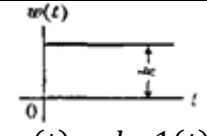
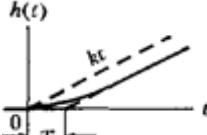
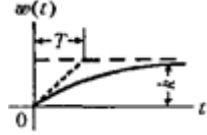
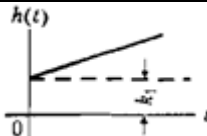
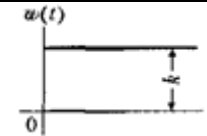
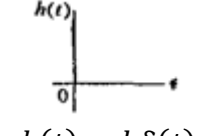
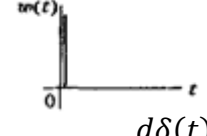
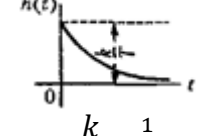
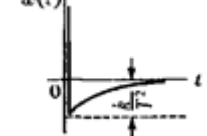
Такое звено условно можно представить в виде двух включенных последовательно звеньев – идеального ДЗ и АПЗ 1-го порядка.

В качестве примера ДЗ с замедлением можно рассматривать: тахогенератор постоянного тока, различные RC - и RL -цепи, дифференцирующий трансформатор, демпфер с корпусом на упругой подвеске (пружине) и т.п.

Временные характеристики ДЗ показаны в табл. 2.

На практике в качестве корректирующих устройств в системах автоматического регулирования широко используются пассивные RC -цепи, реализующие различные интегрирующие, дифференцирующие и интегро-дифференцирующие звенья.

Таблица 1 – Временные характеристики ИЗ

Тип звена и передаточная функция	Переходная функция	Функция веса
Идеальное $W(p) = \frac{k}{p}$	 $h(t) = kt \cdot 1(t)$	 $w(t) = k \cdot 1(t)$
С замедлением $W(p) = \frac{k}{p(1 + Tp)}$	 $h(t) = k \left(t - T(1 - e^{-1/T}) \right) \cdot 1(t)$	 $w(t) = k(1 - e^{-1/T}) \cdot 1(t)$
Изодромное $W(p) = \frac{k}{p} + k_1 = \frac{k(1 + Tp)}{p}$ $T = \frac{k_1}{k}$	 $h(t) = (kt + k_1) \cdot 1(t)$	 $w(t) = k \cdot 1(t) + k_1 \delta(t)$
Идеальное дифференцирующее $W(p) = kp$	 $h(t) = k\delta(t)$	 $w(t) = k \frac{d\delta(t)}{dt}$
Дифференцирующее с замедлением $W(p) = \frac{kp}{1 + Tp}$	 $h(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{1}{T}} \cdot 1(t)$	 $w(t) = \frac{k}{T} \delta(t) - \frac{k}{T^2} e^{-\frac{1}{T}} \cdot 1(t)$

3. Программные и технические средства для выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется с помощью комплекса программ для анализа и синтеза систем автоматического управления SimInTech.

4. Лабораторное задание

4.1. Для каждого типового звена (табл.1 и табл.2) построить переходную функцию и функцию веса при значениях параметров:

а) ИИЗ:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5

б) Интегрирующее звено с замедлением:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0,5	0,1	0,7	1,3	1,5	2	0,8	1,5	2	2,5

в) Изотропное звено:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0,04	0,09	0,14	0,24	0,35	0,62	0,7	0,93	1,1	1,3

г) Идеальное дифференцирующее звено:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5

д) Дифференцирующее звено с замедлением:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,3	1,6	2,0	2,5	1,8

4.2. Оформить отчет по лабораторной работе в соответствии с требованиями, установленными на кафедре.

5. Содержание отчета

В отчет по выполненной работе должны войти:

1. Цель и назначение работы.
2. Краткие сведения по выполненной работе
3. Исходные данные для построения переходного процесса и функции веса интегрирующего, дифференцирующего, интегрирующего с замедлением, дифференцирующего с замедлением звеньев.

4. Графики переходных процессов и функции веса интегрирующего, дифференцирующего, интегрирующего с замедлением, дифференцирующего с замедлением звеньев.

5. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Приведите передаточные функции интегрирующего и интегрирующего с замедлением звеньев.

2. Приведите передаточные функции дифференцирующего и дифференцирующего с замедлением звеньев.

3. Изобразить переходную и весовую функции интегрирующего звена и интегрирующего звена с замедлением.

4. Изобразить переходную и весовую функции дифференцирующего и дифференцирующего с замедлением функций.

5. Как влияет подключение АПЗ-1 последовательно с интегрирующим и дифференцирующим звеньями на переходную и весовую функции.

Лабораторная работа №3 «Исследование частотных характеристик звеньев и систем автоматического регулирования»

Цель работы:

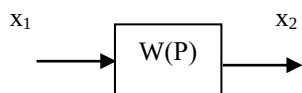
- изучение частотных характеристик позиционных и непозиционных звеньев (лабораторная работа № 1)

- изучение частотных характеристик дифференцирующих, интегрирующих и интегро-дифференцирующих звеньев (лабораторная работа № 2)

1. Краткие теоретические сведения

Частотные характеристики это один из способов описания линейных систем и звеньев. Характеристики могут быть представлены не только аналитически, но и графически, что делает их использование понятным и наглядным.

Важнейшей характеристикой динамического звена является его частотная передаточная функция. Для ее получения на вход звена подается гармонический сигнал.



$$x_1 = X_{1m} \cos \omega t \quad (1.1)$$

где X_{1m} — амплитуда, а ω — угловая частота этого воздействия.

На выходе линейного звена в установившемся режиме будет также гармоническая функция той же частоты, но в общем случае сдвинутая по фазе относительно входной величины на угол ψ . Таким образом, для выходной величины можно записать:

$$x_2 = X_{2m} \cos(\omega t + \psi) \quad (1.2)$$

В линейной системе на основании принципа суперпозиции можно рассмотреть отдельно прохождение составляющих x_1' и x_2'' . Соотношение между составляющими x_1' и x_2' получается таким же, как между x_1'' и x_2'' .

Поэтому в дальнейшем рассмотрении воспользуемся символической записью $\cos \omega t = e^{j\omega t}$. Тогда

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= X_{1M} e^{j\omega t} \\ x_2 &= X_{2M} e^{j(\omega t + \psi)} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Пусть звено описывается дифференциальным уравнением:

$$T_2^2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + T_1 \frac{dx_2}{dt} + x_2 = kx_1 + k_2 \frac{dx_1}{dt} \quad (1.4)$$

Из уравнения (1.3) определим производные:

$$\frac{dx_1}{dt} = j\omega X_{1M} e^{j\omega t}; \quad \frac{dx_2}{dt} = j\omega X_{2M} e^{j(\omega t + \psi)}; \quad \frac{d^2 x_2}{dt^2} = (j\omega)^2 X_{2M} e^{j(\omega t + \psi)} \quad (1.5)$$

Подставим (1.5) в (1.4) получим:

$$T_2^2 X_{2M} e^{j(\omega t + \psi)} + T_1 j\omega X_{2M} e^{j(\omega t + \psi)} + X_{2M} e^{j(\omega t + \psi)} = k_1 X_{1M} e^{j\omega t} + k_2 j\omega X_{1M} e^{j\omega t} \quad (1.6)$$

Откуда после сокращения на $e^{j\omega t}$ получим:

$$\frac{X_{2M}}{X_{1M}} e^{j\psi} = \frac{k_1 + k_2 j\omega}{1 + T_1 j\omega + T_2^2 (j\omega)^2} = W(j\omega) \quad (1.7)$$

Выражение (1.7) называется частотной передаточной функцией. Частотная передаточная функция есть отношение преобразования Фурье выходной величины к преобразования Фурье входной величины.

Таким образом, частотная передаточная функция $W(j\omega)$ представляет собой комплексное число, модуль которого равен отношению амплитуды выходной величины к амплитуде входной, а аргумент — сдвигу фаз выходной величины по отношению к входной:

$$\left. \begin{aligned} \text{mod } W(j\omega) &= |W(j\omega)| \frac{X_{2M}}{X_{1M}} \\ \arg W(j\omega) &= \psi \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

Частотная передаточная функция может быть представлена в следующем виде:

$$W(j\omega) = A(\omega) e^{j\psi} = U(\omega) + jV(\omega) \quad (1.9)$$

где $A(\omega)$ — модуль частотной передаточной функции, $\psi(\omega)$ — аргумент, $U(\omega)$ и $V(\omega)$ — вещественная и мнимая составляющие частотной передаточной функции.

Модуль частотной передаточной функции находится как отношение модулей числителя и знаменателя. Аргумент или фаза частотной передаточной

функции находится как разность аргументов числителя и знаменателя. Для рассмотренного выше выражения (1.7) имеем:

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 \omega^2}}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2}} \quad \psi(\omega) = \arctg \frac{k_2 \omega}{k_1} - \arctg \frac{T_1 \omega}{1 - T_2^2 \omega^2} \quad (1.10)$$

Для нахождения вещественной и мнимой частей частотной передаточной функции необходимо освободиться от мнимости в знаменателе путем умножения числителя и знаменателя на комплексную величину, сопряженную знаменателю, и затем произвести разделение на вещественную и мнимую части. Для (1.7)

$$U(\omega) = \frac{k_1(1 - T_2^2 \omega^2) + k_2 T_1 \omega^2}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2} \quad V(\omega) = \frac{k_2 \omega(1 - T_2^2 \omega^2) - k_1 T_1 \omega}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + T_1^2 \omega^2} \quad (1.11)$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (а. ф. х.) строится на комплексной плоскости. Она представляет собой геометрическое место концов векторов (векторный годограф), соответствующих частотной передаточной функции $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ при изменении частоты от нуля до бесконечности. По оси абсцисс откладывается вещественная часть $U(\omega) = \operatorname{Re} W(j\omega)$ и по оси ординат — мнимая часть $V(\omega) = \operatorname{Im} W(j\omega)$. Для каждой частоты на комплексной плоскости наносится точка. Полученные точки соединяются затем плавной кривой. Около нанесенных точек можно написать соответствующие им частоты $\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3$ и т. д.

Длина вектора, проведенного из начала координат в точку а. ф. х., соответствующую какой-то выбранной частоте, равна модулю частотной передаточной функции. Угол между вектором и положительным направлением вещественной оси, отсчитываемый против часовой стрелки, равен аргументу или фазе частотной передаточной функции. Таким образом, а. ф. х. дает возможность наглядно представить для каждой частоты входного воздействия звена отношение амплитуд выходной и входной величин и сдвиг фаз между ними.

Построение а.ф.х. по вещественной и мнимой частям частотной передаточной функции, как правило, является трудоемкой работой, так как умножение частотной передаточной функции на комплексную величину,

сопряженную ее знаменателю, повышает в два раза степень частоты и знаменателе. Обычно гораздо проще строить а. ф. х., используя полярные координаты, т. е. вычисляя непосредственно модуль и фазу. Зная модуль и фазу, можно легко построить соответствующую точку на комплексной плоскости. В случае необходимости при известных модуле и фазе легко вычислить вещественную и мнимую части умножением модуля на направляющий косинус между вектором и соответствующей осью.

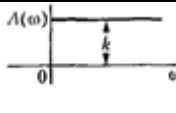
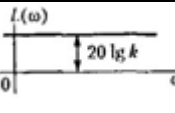
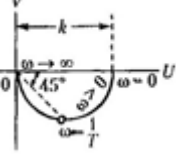
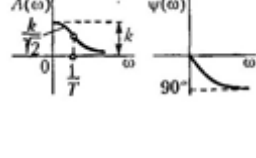
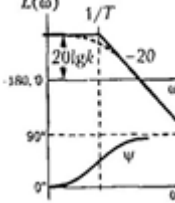
Рис. 1.1. АФЧХ

Вместо а.ф.х. можно построить отдельно амплитудно-частотную характеристику (а.ч.х.) и фазочастотную характеристику (ф. ч. х.).

Амплитудно-частотная характеристика показывает, как пропускает звено сигнал различной частоты. Оценка пропускания делается по отношению амплитуд выходной и входной величин. Фазочастотная характеристика показывает фазовые сдвиги, вносимые звеном на различных частотах.

Как следует из сказанного выше, модуль частотной передаточной функции представляет собой четную функцию частоты, а фаза – нечетную функцию частоты.

Частотные характеристики звеньев приведены на рис.1.2- рис.1.5.

Тип звена и частотная передаточная функция	Амплитудно-фазовая	Амплитудная и фазовая	Логарифмические
Безынерционное $W(j\omega) = k$			
Апериодическое 1-го порядка $W(j\omega) = \frac{k}{1 + j\omega T}$			

Аperiодическое 2-го порядка $W(j\omega) = \frac{k}{(1 + j\omega T_3)(1 + j\omega T_4)}$			
Колебательное $W(j\omega) = \frac{k}{1 + 2j\omega\zeta T - \omega^2 T^2}$			
Консервативное $W(j\omega) = \frac{k}{1 - T^2\omega^2} = \frac{k}{1 - \frac{\omega^2}{q^2}}$			
Идеальное $W(j\omega) = \frac{k}{j\omega}$			
Интегрирующее с замедлением $W(j\omega) = \frac{k}{j\omega(1 + Tj\omega)}$			
Изодромное $W(j\omega) = \frac{k}{j\omega} + k_1 = \frac{k(1 + Tj\omega)}{j\omega}$			
Идеальное дифференцирующее $W(j\omega) = kj\omega$			
Дифференцирующее с замедлением $W(j\omega) = \frac{kj\omega}{1 + Tj\omega}$			

1.1. Логарифмические частотные характеристики

Логарифмические частотные характеристики (л. ч. х.) включают в себя построенные отдельно на одной плоскости логарифмическую амплитудную характеристику (л. а. х.) и логарифмическую фазовую характеристику (л. ф. х.). Для построения л. а. х. находится величина

$$L(\omega)20Lg|W(j\omega)| = 20Lg(A(\omega)) \quad (1.12)$$

Эта величина выражается в децибелах. Бел представляет собой логарифмическую единицу, соответствующую десятикратному увеличению мощности. Один Бел соответствует увеличению мощности в 10 раз, 2 Бела — в 100 раз, 3 Бела — в 1000 раз и т. д.

Децибел равен одной десятой части Бела. Если бы $A(\omega)$ было отношением мощностей, то перед логарифмом в правой части (1.12) должен был бы стоять множитель 10. Так как $A(\omega)$ представляет собой отношение не мощностей, а выходной и входной величин (перемещений, скоростей, напряжений, токов и т. п.), то увеличение этого отношения в десять раз будет соответствовать увеличению отношения мощностей в сто раз, что соответствует двум Белам или двадцати децибелам. Поэтому в правой части (1.12) стоит множитель 20.

Необходимость логарифмировать модуль частотной передаточной функции приводит к тому, что, строго говоря, л. а. х. может быть построена только для тех звеньев, у которых передаточная функция представляет собой безразмерную величину.

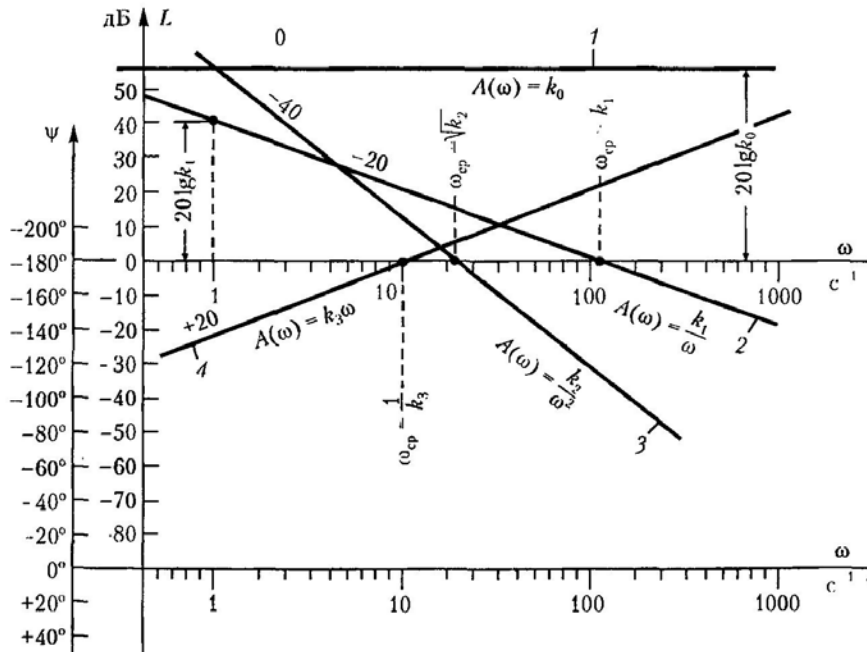


Рис. 1.2. Стандартная сетка

Это возможно при одинаковых размерностях входной и выходной величин звена. В дальнейшем изложении будет подразумеваться именно этот случай.

Однако л. а. х. может условно строиться и для тех звеньев, у которых передаточная функция имеет какую-либо размерность. В этом случае некоторая исходная величина, соответствующая размерности передаточной функции, принимается за единицу и под значением $A(\omega)$ понимается отношение модуля частотной передаточной функции к этой исходной единице.

Это же замечание относится и к угловой частоте ω , которая имеет размерность $[c^{-1}]$ и которую приходится логарифмировать в соответствии с изложенным.

Для построения л. а. х. и л. ф. х. используется стандартная сетка (рис. 1.6). По оси абсцисс откладывается угловая частота в логарифмическом масштабе, т. е. наносятся отметки, соответствующие $\lg \omega$, а около отметок пишется само значение частоты ω в рад/с. Для этой цели может использоваться какая-либо шкала счетной логарифмической линейки.

По оси ординат откладывается модуль в децибелах (дБ). Для этой цели на ней наносится равномерный масштаб. Ось абсцисс должна проходить через точку 0 дБ, что соответствует значению модуля $A(\omega) = 1$, так как логарифм единицы равен нулю.

Ось ординат может пересекать ось абсцисс (ось частот) в произвольном месте. Следует учесть, что точка $\omega = 0$ лежит на оси частот слева в бесконечности, так как $\lg 0 = -\infty$. Поэтому ось ординат проводят так, чтобы справа от нее можно было показать весь ход л. а. х. Как будет показано ниже, для этой цели необходимо провести ось ординат левее самой малой сопрягающей частоты л. а. х.

Для построения л. ф. х. используется та же ось абсцисс (ось частот). По оси ординат откладывается фаза в градусах в линейном масштабе. Для практических расчетов, как это будет ясно ниже, удобно совместить точку нуля децибел с точкой, где фаза равна -180° . Отрицательный сдвиг по фазе откладывается по оси ординат вверх, а положительный — вниз.

Главным достоинством логарифмических амплитудных частотных характеристик является возможность построения их во многих случаях

практически без вычислительной работы. Это особенно проявляется в тех случаях, когда частотная передаточная функция может быть представлена в виде произведения сомножителей. Тогда результирующая л.а.х. может быть приближенно построена в виде так называемой асимптотической л.а.х. представляющей собой совокупность отрезков прямых линий с наклонами, кратными величине 20 дБ/дек. Это будет показано ниже при рассмотрении конкретных звеньев.

Для иллюстрации простоты построения л. а. х. рассмотрим несколько важных примеров.

1. Пусть модуль частотной передаточной функции равен постоянному числу

$$A(\omega) = k_0; \text{ тогда } L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg k_0.$$

Л. а. х. представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс (прямая 1 на рис. 1.2).

2. Рассмотрим случай, когда $A(\omega) = k_1/\omega$. Тогда

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{k_1}{\omega} = 20 \lg k_1 - 20 \lg \omega$$

Нетрудно видеть, что это — прямая линия, проходящая через точку с координатами $\omega=1 \text{ с}^{-1}$ и $L(\omega) = 20 \lg k_1$, и имеющая отрицательный наклон -20 дБ/дек так как каждое удешагерение частоты вызовет увеличение $\lg \omega$ на одну единицу, т. е. уменьшение $L(\omega)$ на 20 дБ (прямая 2 на рис. 1.2).

Точку пересечения прямой с осью нуля децибел (осью частот) можно найти, положив $L(\omega) = 0$ или, соответственно, $L(\omega) = 1$. Отсюда получаем так называемую частоту среза л. а. х., рапную в данном случае $\omega_{\text{ср}}=k_1$. Очевидно, что размерность коэффициента k_1 должна быть $[\text{с}^{-1}]$.

3. Аналогичным образом можно показать, что в случае $A(\omega) = k_2/\omega^2$ л. а. х. представляет собой прямую с отрицательным наклоном -40 дБ/дек (прямая 3 на рис. 1.6). Вообще для $A(\omega)=k_n/\omega^n$ л. а. х. представляет собой прямую с отрицательным наклоном $-n*20$ дБ/дек. Эта прямая может быть построена по одной какой-либо точке, например по точке $\omega=1 \text{ с}^{-1}$ и $L(\omega) = 20 \lg k_n$ или по

частоте среза $\omega_{\text{ср}} = \sqrt[n]{k_n}$.

4. Рассмотрим случай, когда $A(\omega) = k_3 \omega$. Тогда

$$L(\omega) = 20 \lg k_3 \omega = 20 \lg k_3 + 20 \lg \omega$$

Нетрудно видеть, что это — прямая линия, проходящая через точку $\omega = 1 \text{ с}^{-1}$ и $L(\omega) = 20 \lg k_3$ и имеющая положительный наклон 20 дБ/дек. Эта прямая может быть построена также по частоте среза $\omega_{\text{ср}} = 1/k_3$, полученной приравниванием $A(\omega) = 1$ (прямая 4 на рис. 1.6).

Аналогичным образом можно показать, что в случае, когда $A(\omega) = k_m \omega^m$, л. а. х. представляет собой прямую линию с положительным наклоном $m \cdot 20$ дБ/дек.

2. Техника построения частотных характеристик в SimInTech

Вынести на рабочее поле SimInTech генератор ступенчатой единичной функции, усилитель, интегратор и построение частотных характеристик, и соединить их.

Нажать правой кнопкой мыши по блоку «Построение частотных характеристик» и выбрать пункт «Свойства объекта». В окне «Свойства» задать значения согласно рисунку

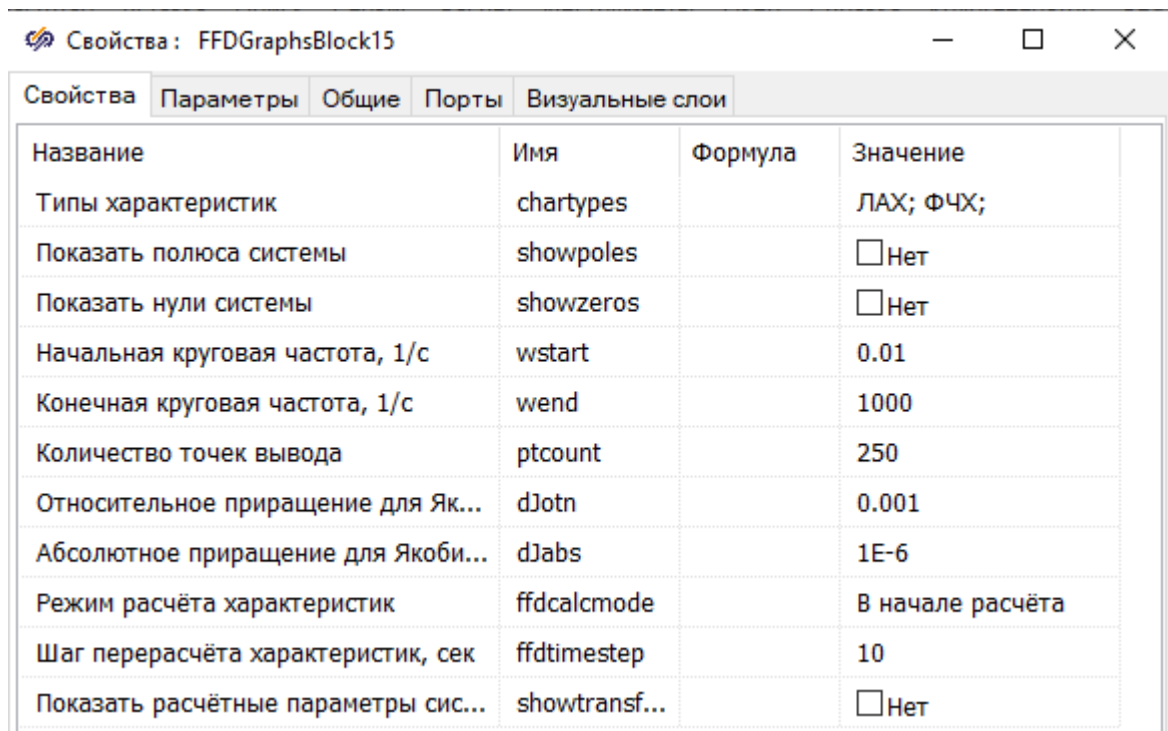


Рис. 2.1 Свойства блока «Построение частотных характеристик»

Открыть график расчета двойным нажатием левой кнопкой мыши по блоку «Построение частотных характеристик». Нажатием правой кнопки мыши по графику открыть контекстное меню и выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства графика» задать параметры согласно рисунку

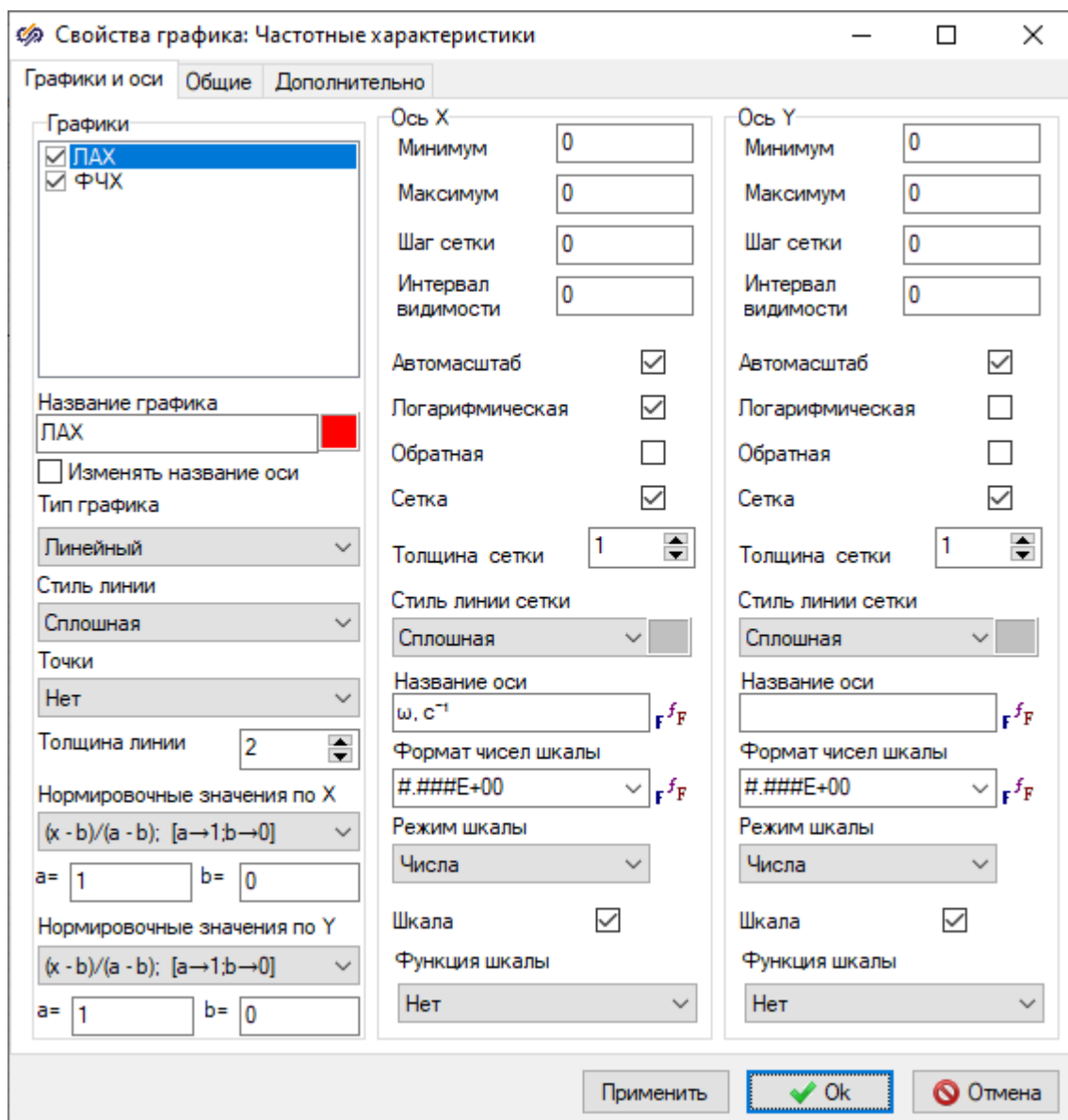


Рис. 2.2. Свойства графиков ЛАХ и ФЧХ.

Запустить моделирование щелчком по кнопке с зеленым треугольником на панели инструментов SimInTech.

Нажав двойным щелчком мыши на блок «Построение частотных характеристик», на рабочем пространстве появятся два графика, вычисленные

SimInTech и представляющие собой ЛАЧХ и ЛФЧХ выделенного фрагмента схемы.



Рис.2.3. Исходный вид частотных характеристик интегратора

3. Программные и технические средства для выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется с помощью комплекса программ для анализа и синтеза систем автоматического управления SimInTech.

4. Лабораторное задание

4.1. Построить АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ позиционных, интегрирующих и дифференцирующих звеньев

а) БЗ:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5

б) АПЗ-1:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0,5	0,1	0,7	1,3	1,5	2	0,8	1,5	2	2,5

в) АПЗ-2:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T_1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,3	1,6	2,0	2,5	1,8
T_2	0,04	0,09	0,14	0,24	0,35	0,62	0,7	0,93	1,1	1,3

г) Колебательное звено:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,3	1,6	2,0	2,5	1,8
ξ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9

д) Консервативное звено:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
κ	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,3	1,6	2,0	2,5	1,8

е) ИИЗ:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5

ж) Интегрирующее звено с замедлением:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

K	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0,5	0,1	0,7	1,3	1,5	2	0,8	1,5	2	2,5

з) Изодромное звено:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0,04	0,09	0,14	0,24	0,35	0,62	0,7	0,93	1,1	1,3

и) Идеальное дифференцирующее звено:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5

к) Дифференцирующее звено с замедлением:

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K	0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5
T	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,3	1,6	2,0	2,5	1,8

4.2. Оформить отчет по лабораторной работе в соответствии с требованиями, установленными на кафедре.

5. Содержание отчета

В отчет по выполненной работе должны войти:

1. Цель и назначение работы.
2. Краткие сведения по выполненной работе
3. Исходные данные для построения частотных характеристик звеньев.
4. Частотные характеристики исследуемого устройства (звена).
5. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое частотная передаточная функция?

2. Что такое АЧХ?
3. Что такое ФЧХ?
4. Что такое АФЧХ?
5. Что такое ЛАЧХ?
6. Как по известным АЧХ и ФЧХ построить АФЧХ и ЛАЧХ?

Лабораторная работа № 4 «Синтез позиционных звеньев с использованием интегрирующего и усилительного звеньев и обратных связей»

Цель работы: изучение влияния обратных связей на качество переходных процессов систем автоматического регулирования.

1. Краткие теоретические сведения

Параллельным встречным соединением двух звеньев называется такое соединение, при котором выходной сигнал первого звена подается на вход второго, а выходной сигнал второго звена с соответствующим знаком суммируется с общим входным сигналом и подается на вход первого звена. Общим выходным сигналом является выход первого звена.

Звено, в котором направление передачи сигнала совпадает с направлением передачи общего сигнала (первое звено), называется *звеном прямой связи*, а звено, в котором направление передачи сигнала противоположно направлению передачи общего сигнала (второе звено), называется *звеном обратной связи*.

Если знак сигнала обратной связи положителен, т. е. если он суммируется с общим сигналом (см. рис.1.1), то обратная связь называется *положительной*. Если знак сигнала обратной связи отрицателен, т. е. если он вычитается из общего сигнала (см. рис. 2), то обратная связь называется *отрицательной*.

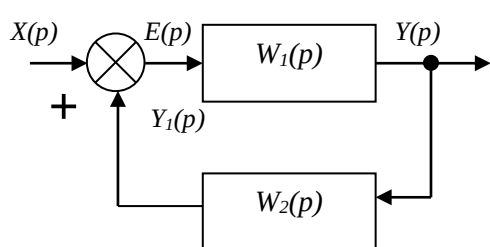


Рис. 1.1

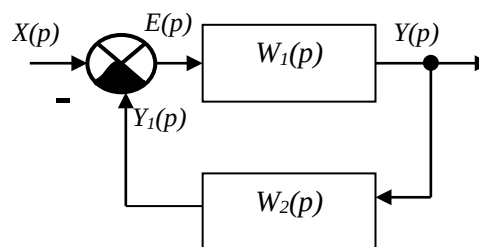


Рис.1.2

Параллельное встречное соединение представляет собой такое сочетание последовательного и параллельного соединений, при котором звенья прямой и обратной связи соединены между собой последовательно в виде замкнутого

кольца, а внешний сигнал подается к общей точке входа первого и выхода второго звеньев. Уравнения параллельного встречного соединения имеют вид:

1) уравнения входа:

а) для положительной обратной связи

$$E(p) = X(p) + Y_1(p) \quad (1.1)$$

б) для отрицательной обратной связи

$$E(p) = X(p) - Y_1(p) \quad (1.2)$$

Эти уравнения называются *уравнениями замыкания*;

В теории колебаний обычно рассматривают цепи с положительной обратной связью и пользуются уравнением (1.1).

В теории регулирования и управления большей частью рассматриваются цепи с отрицательной обратной связью и пользуются уравнением (1.2), которое принимается за основу в дальнейшем.

Из рисунков 1.1 и 1.2 имеем

$$Y(p) = W_1(p) X(p); Y_1(p) = W_2(p) Y(p); E(p) = X(p) - Y_1(p) \quad (1.3)$$

откуда

$$Y(p) = W_1(p) X(p) / [1 + W_1(p) W_2(p)], \quad (1.4)$$

или

$$W(p) = Y(p) / X(p) = W_1(p) / [1 + W_1(p) W_2(p)], \quad (1.5)$$

Для положительной обратной связи имеем

$$W(p) = Y(p) / X(p) = W_1(p) / [1 - W_1(p) W_2(p)], \quad (1.6)$$

Для звеньев с дробно-рациональной передаточной функцией

$$W_1(p) = K_1(p) / D_1(p); W_2(p) = K_2(p) / D_2(p) \quad (1.7)$$

уравнение (1.5) может быть записано как

$$W(p) = K_1(p) D_2(p) / [K_1(p) K_2(p) + D_1(p) D_2(p)]. \quad (1.8)$$

Из рассмотрения этого уравнения следует, что нули $W(p)$ совпадают с нулями $W_1(p)$ и полюсами $W_2(p)$, однако полюсы функции $W(p)$ отличаются от полюсов $W_1(p)$ и $W_2(p)$ (полюсами p_i и нулями q_i функции $W(p) = K(p) / D(p)$ называется соответственно корни уравнений $D(p) = 0$ и $K(p) = 0$).

Таким образом, устойчивые звенья при параллельном встречном соединении могут образовать неустойчивую систему. Наоборот, соединение звеньев, среди которых имеются неустойчивые, может оказаться устойчивым.

При гармонических сигналах комплексный коэффициент передачи

$$W(j\omega) = W_1(j\omega) / [1 + W_1(j\omega) W_2(j\omega)]. \quad (1.9)$$

Если цепь обратной связи представляет собой пропорциональное звено $W_2(p) = k_2$, то обратная связь называется *жесткой*, или *пропорциональной*.

Если цепь обратной связи представляет собой дифференцирующее звено $W_2(p) = Tp$, или $W_2(p) = pT_1 / [(1 + pT)]$, то обратная связь называется *гибкой*, или *дифференцирующей*.

Если цепь обратной связи представляет собой интегрирующее звено $W_2(p) = 1/pT$, то обратная связь называется *интегрирующей*.

Некоторые из типовых звеньев могут быть приведены к встречному параллельному соединению более простых звеньев.

Пример 1. Интегрирующее звено охвачено жесткой обратной связью, при этом $W_1 = k_1/p$, $W_2 = k_2$

Подставляя W_1 и W_2 в формулу (1.5), получаем

$$W(p) = k_1 / (k_1 k_2 + p) = k / (1 + pT),$$

где

$$T = 1/(k_1 k_2); \quad k = 1/k_2$$

Таким образом, встречное параллельное соединение интегрирующего и пропорционального звеньев образует инерционное звено.

Пример 2. В пропорциональном звене с интегрирующей обратной связью

$$W_1 = k_1, \quad W_2 = k_2 / p.$$

Подставляя W_1 и W_2 в (1.5), получаем

$$W(p) = k_1 p / (k_1 k_2 + p) = kp / (1 + pT),$$

где $k = 1/k_2$; $T = 1/(k_2 k_1)$.

Таким образом, дифференцирующее звено с замедлением может быть получено путем встречного параллельного соединения пропорционального и интегрирующего звеньев.

Пример 3. Реальное интегрирующее звено охвачено жесткой обратной связью, при этом

$$W_1 = k_1 / [p(1 + pT_2)], \quad W_2 = k_2.$$

Подставляя в (1.5), получаем

$$W(p) = \frac{k_1}{k_1 k_2 + p + p^2 T_1} = \frac{k}{1 + 2\zeta T p + T^2 p^2}, \quad (1.10)$$

где

$$k = \frac{1}{k_2}; T = \sqrt{\frac{T_1}{k_1 k_2}}; \zeta = \frac{1}{2\sqrt{k_1 k_2 T_1}}.$$

Таким образом, колебательное звено может быть получено путем охвата жесткой обратной связью интегрирующего звена с замедлением.

Пример 4. Усилитель с высоким коэффициентом усиления охвачен обратной связью.

Если в выражении (1.8) принять $W_1 = k_1 W_0(p)$ и устремить $k_1 \rightarrow \infty$, то

$$W(p) = 1/W_2(p) \quad (1.11)$$

Таким образом, при очень высоком коэффициенте усиления звена прямой связи передаточная функция встречного параллельного соединения не зависит от частотной характеристики цепи прямой связи и представляет собой инверсную передаточную функцию звена обратной связи. Так, включая в цепь обратной связи интегрирующее звено, можно получить систему, эквивалентную дифференцирующему звену, или, включая в цепь обратной связи инерционное звено, можно получить систему с характеристикой форсирующего звена.

Таким образом, рассмотренные в лабораторной работе №1 типовые звенья могут быть сведены к различным соединениям двух простейших элементарных звеньев: пропорционального и интегрирующего.

3. Программные и технические средства для выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется с помощью комплекса программ для анализа и синтеза систем автоматического управления SimInTech.

4. Программа выполнения лабораторной работы

4.1. Охватив интегрирующее звено $[W(p) = k_1/p]$ с отрицательной обратной связью усилительным звеном $W(p) = k_2$ получить инерционное звено при следующих параметрах звеньев

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_1	1	0,5	2	2	2,5	1,5	3	3,5	4	4,2
k_2	2	1	0,5	2	1,5	3	4	0,5	1,5	2

4.2. Охватив усилительное звено $W(p) = k_1$ отрицательной обратной связью интегрирующим звеном $[W(p) = k_2/p]$ получить дифференциальное звено с замедлением для следующих параметров звеньев

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_1	1,5	0,5	2	2	2,5	1,5	3,3	3,5	4,5	2,2
k_2	2,3	1,8	1,5	3	0,5	3,5	4,4	1,5	2,5	3

4.3. Охватив интегрирующее звено с замедлением $[W(p) = k_1/p(1+pT)]$ жесткой обратной связью $[W(p) = k_2]$ получить колебательное звено для следующих параметров звеньев.

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_1	1,5	0,5	2	2	2,5	1,5	3,3	3,5	4,5	2,2
k_2	2,3	1,8	1,5	3	0,5	3,5	4,4	1,5	2,5	3
T	0,5	1,3	1	1,2	0,8	0,2	0,5	1,5	0,5	0,7

4.4. Оформить отчет по лабораторной работе в соответствии с требованиями, установленными на кафедре.

5. Содержание отчета

В отчет по выполненной работе должны войти:

1. Цель и назначение работы.
2. Краткие сведения по выполненной работе
3. Исходные данные для выполнения работы.
4. Графики переходных процессов.
5. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое положительная обратная связь?
2. Что такое отрицательная обратная связь?
3. Как влияет на общий коэффициент усиления системы введения отрицательной обратной связи?
4. Как влияет на общий коэффициент усиления системы введения положительной обратной связи?
5. Как с помощью пропорциональных и интегрирующего звеньев получить типовые звенья САР?

Список использованной литературы

1. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 1976.
2. Ключев А.С. Автоматическое регулирование.- М.: Высш. школа, 1986-351с.
3. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. –М.: «Машиностроение», 1973.
4. Теория автоматического регулирования под ред. А.В.Нетушила –М.: «Высшая школа», 1967.
5. Лукас В.А. Теория автоматического управления. – М.: Недра, 1990. – 416 с.
6. Брюханов В.Н. и др. Теория автоматического управления. – М: Высшая школа, 2000.