

Министерство образования Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Робототехнические системы»

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
к лабораторным работам

по курсу «Теория автоматического управления, ч. 1»
для студентов специальностей 53 01 01 – «Автоматизация техно-
логических процессов и производств» и 53 01 06 – «Промышлен-
ные роботы и робототехнические комплексы»

Часть 1

Минск 2009

УДК 621-52(076.5)
ББК 32.965 з 14

С о с т а в и т е л и:
В.П.Загорский, Ю.Н.Позник

Р е ц е н з е н т ы:
канд. техн. наук, доцент С.В.Харитончик
канд.техн.наук,доцент А.Т.Кулаков

Теория автоматического управления. Методическое пособие к лабораторным работам для студентов специальностей 53 01 01 – «Автоматизация технологических процессов и производств» и 53 01 06 – «Промышленные роботы и робототехнические комплексы» в 2 ч. / сост.: В.П.Загорский, Ю.Н.Позник. – Минск: БНТУ, 2009. – ч.1. - 95с.

ISBN 978-985-525-131-7 (ч.1)

В настоящее издание включены методические рекомендации к лабораторным работам по курсу «Теория автоматического управления», часть первая – линейные непрерывные системы.

Цель пособия – приобретение студентами практических навыков использования базовых теоретических методов анализа и синтеза автоматических систем.

УДК 621-52(076.5)
ББК 32.965 з 14

ISBN 978-985-525-131-7 (ч.1)
ISBN 978-985-525-132 – 4

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Лабораторная работа № 1 ВВЕДЕНИЕ В MATLAB. НАЧАЛО РАБОТЫ В SIMULINK	6
Лабораторная работа № 2 ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ	29
Лабораторная работа № 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	35
Лабораторная работа № 4 ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	37
Лабораторная работа № 5 ИМПУЛЬСНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ...	44
Лабораторная работа № 6 ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	47
Лабораторная работа № 7 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SIMULINK LTI-VIEWER ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ)	52
Лабораторная работа № 8 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ	60
Лабораторная работа № 9 ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ	68

Лабораторная работа № 10 ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ.....	73
Лабораторная работа № 11 УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ	77
Лабораторная работа № 12 УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ С ЭЛЕМЕНТОМ ЧИСТОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ	88
Список использованной литературы.....	95

ВВЕДЕНИЕ

Теория автоматического управления и регулирования – наука, которая изучает методы анализа и синтеза различных автоматических систем на основе их математического моделирования.

Данная разработка представляет собой учебно-методическую базу для выполнения лабораторных работ по первой части курса «Теория автоматического управления» (ТАУ) студентами специальностей «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Промышленные роботы и робототехнические комплексы».

Цель работы: развить и закрепить у студентов практические навыки анализа и синтеза систем управления.

Тематика лабораторных работ охватывает базовые разделы ТАУ для линейных непрерывных систем. В процессе выполнения лабораторных работ студенты должны получить наглядное представление о связи основных теоретических положений ТАУ и реальных характеристик систем и элементов. Для этого необходимо изучить методики:

- исследования динамических, статических и частотных характеристик различных звеньев автоматических систем;
- исследования устойчивости замкнутых систем;
- определения показателей точности и быстродействия замкнутых систем.

Выполнение лабораторных работ предполагает использование пакета моделирования MatLab с расширениями Control System Toolbox и Simulink. Каждая работа содержит описание команд MatLab, которые могут быть использованы при выполнении заданий. При подготовке и выполнении лабораторных работ рекомендуется использовать классические учебные пособия по теории автоматического управления.

Лабораторная работа № 1

ВВЕДЕНИЕ В MATLAB. НАЧАЛО РАБОТЫ В SIMULINK

Цель работы – приобрести практические навыки работы с пакетом Matlab с расширениями Control System Toolbox и Simulink.

Для достижения этой цели необходимо изучить инструментальные средства Matlab и методики их использования на простейших примерах в соответствии и в последовательности нижеприведенного материала.

Основные сведения

Программа Simulink является приложением к пакету MATLAB. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики. Часть входящих в состав MATLAB пакетов имеют инструменты, встраиваемые в Simulink (например, LTI – Viewer приложения Control System Toolbox – пакета для разработки систем управления). Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (Power System Blockset – моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset – набор блоков для разработки цифровых устройств и т.д).

Программный пакет моделирования Simulink

Программный пакет Simulink является встроенным средством моделирования технических систем и для его использования необходимо предварительно запустить MATLAB. Основное окно программы MATLAB показано на рис. 1.1. Там же показана подсказка появляющаяся в окне при наведении указателя мыши на ярлык Simulink в панели инструментов.

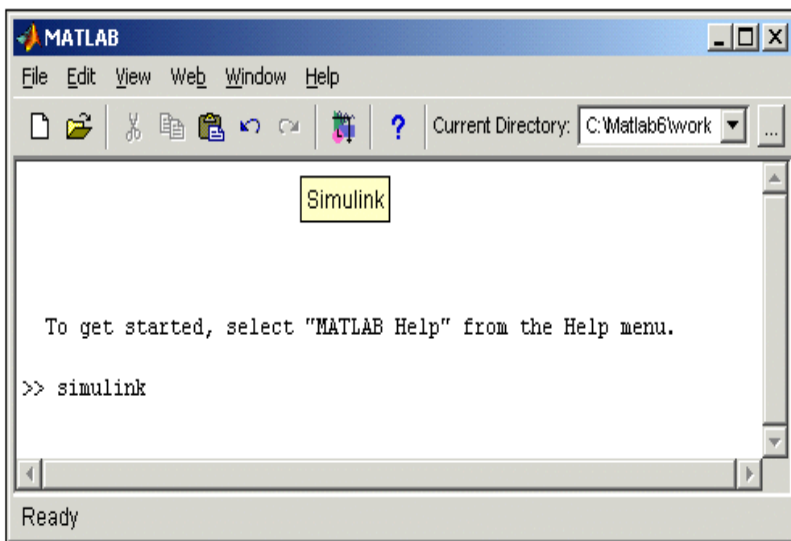



Рис. 1.1. Основное окно программы MATLAB

Открыть Simulink можно одним из трех способов.

- Нажать кнопку  (Simulink) на панели инструментов командного окна MATLAB.
- В командной строке главного окна MATLAB напечатать Simulink и нажать клавишу Enter на клавиатуре.
- Выполнить команду Open... в меню File и открыть файл модели (mdl - файл).

Последний вариант удобно использовать для запуска уже готовой и отлаженной модели, когда требуется лишь провести расчеты и не нужно добавлять новые блоки в модель. Использование первого и второго способов приводит к открытию окна обозревателя разделов библиотеки Simulink (рис.1.2).

Окно обозревателя библиотеки блоков содержит следующие элементы.

- 1) Заголовок, с названием окна – Simulink Library Browser.
- 2) Меню, с командами File, Edit, View, Help.

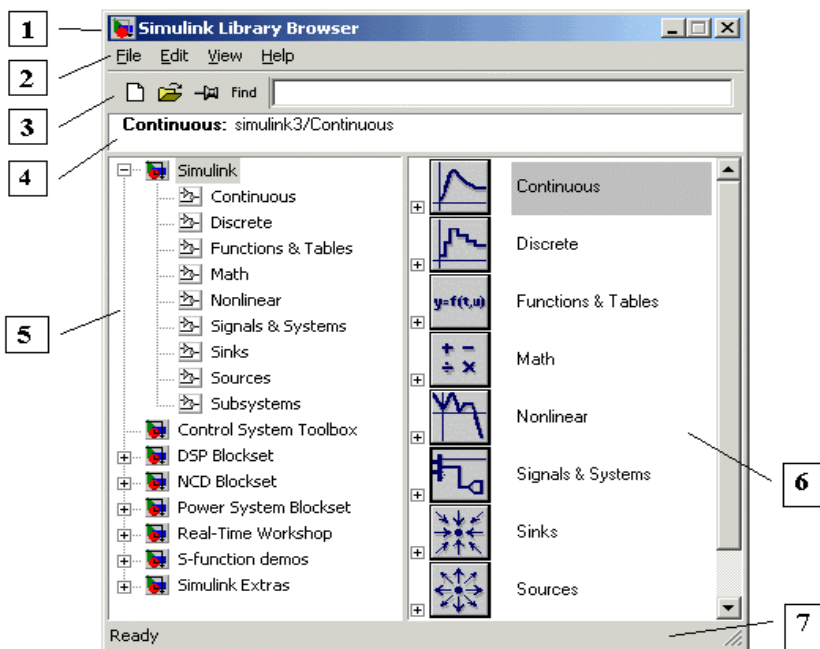


Рис. 1.2. Окно обозревателя разделов библиотеки Simulink

3) Панель инструментов, с ярлыками наиболее часто используемых команд.

4) Окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном блоке.

5) Список разделов библиотеки, реализованный в виде дерева.

6) Окно содержимого раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков)

7) Строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию.

На рис. 1.2 выделена основная библиотека Simulink (в левой части окна) и показаны ее разделы (в правой части окна).

Библиотека Simulink содержит следующие основные разделы.

1. Continuous – линейные блоки.
2. Discrete – дискретные блоки.
3. Functions & Tables – функции и таблицы.
4. Math – блоки математических операций.

5. Nonlinear – нелинейные блоки.
6. Signals & Systems – сигналы и системы.
7. Sinks - регистрирующие устройства.
- 8 Sources – источники сигналов и воздействий.
- 9 Subsystems – блоки подсистем.

Список разделов библиотеки Simulink представлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида. Пиктограмма свернутого узла дерева содержит символ «+», а пиктограмма развернутого содержит символ «-».

Для того чтобы развернуть или свернуть узел дерева, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши (ЛКМ).

При выборе соответствующего раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое (см. рис. 1.3).

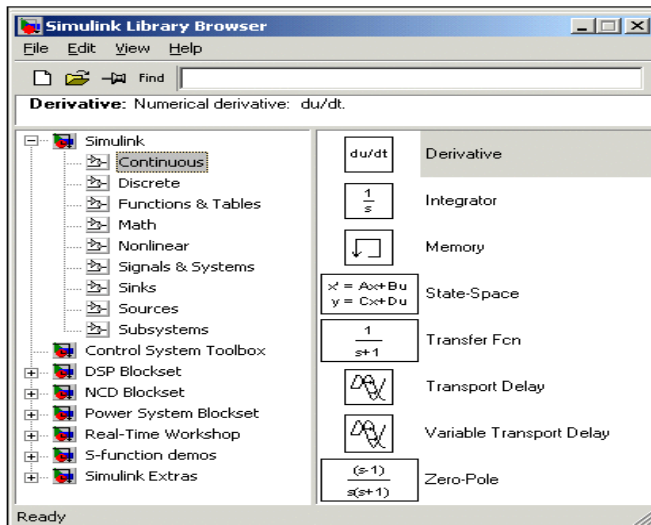


Рис. 1.3. Окно обозревателя с набором блоков раздела библиотеки

Для работы с окном используются команды собранные в меню. Меню обозревателя библиотек содержит следующие пункты:

- File (Файл) – Работа с файлами библиотек,
- Edit (Редактирование) – Добавление блоков и их поиск (по названию),

- View (Вид) – Управление показом элементов интерфейса,
- Help (Справка) – Вывод окна справки по обозревателю библиотек.

Для работы с обозревателем можно также использовать кнопки на панели инструментов (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Панель инструментов обозревателя разделов библиотек


Кнопки панели инструментов имеют следующее назначение:

1. Создать новую S-модель (открыть новое окно модели).
2. Открыть одну из существующих S-моделей.
3. Изменить свойства окна обозревателя. Данная кнопка позволяет установить режим отображения окна обозревателя "поверх всех окон". Повторное нажатие отменяет такой режим.
4. Поиск блока по названию (по первым символам названия).

После того как блок будет найден, в окне обозревателя откроется соответствующий раздел библиотеки, а блок будет выделен. Если же блок с таким названием отсутствует, то в окне комментария будет выведено сообщение Not found <имя блока> (Блок не найден).

Создание проекта модели

Для создания проекта модели в среде SIMULINK необходимо последовательно выполнить ряд действий.

1. Создать новый файл модели с помощью команды File/New/Model, или используя кнопку  на панели инструментов (здесь и далее, с помощью символа «/», указаны пункты меню программы, которые необходимо последовательно выбрать для выполнения указанного действия). Вновь созданное окно модели показано на рис. 1.5.

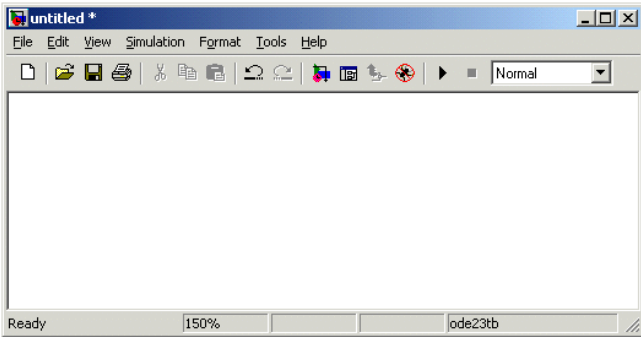


Рис. 1.5. Пустое окно модели

2. Расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки (Например, Sources – Источники). Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу «мыши» - «перетащить» блок в созданное окно. Клавишу мыши нужно держать нажатой. На рис 1.6 показано окно модели, содержащее блоки.

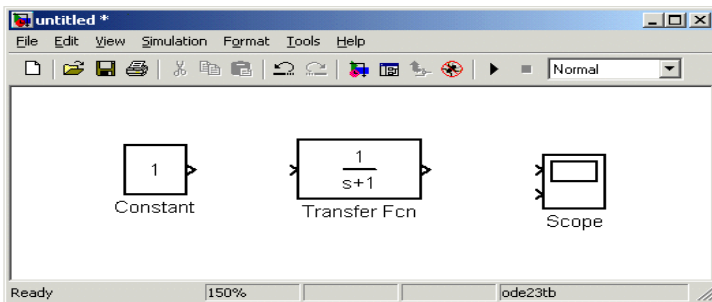


Рис. 1.6. Окно модели, содержащее блоки

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу «мыши»), а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре. Для изменения размеров блока требуется выбрать блок, установить курсор в один из углов блока и, нажав левую клавишу «мыши», изменить размер блока (курсор при этом превратится в двухстороннюю стрелку).

3. Если требуется, то изменить параметры блока, установленные программой «по умолчанию». Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей «мыши», указав курсором на изображение блока. Откроется окно редактирования параметров данного блока. При задании численных параметров следует иметь в виду, что в качестве десятичного разделителя должна использоваться точка, а не запятая. После внесения изменений нужно закрыть окно кнопкой ОК. На рис.1.7 в качестве примера показаны блок, моделирующий передаточную функцию и окно редактирования параметров данного блока.

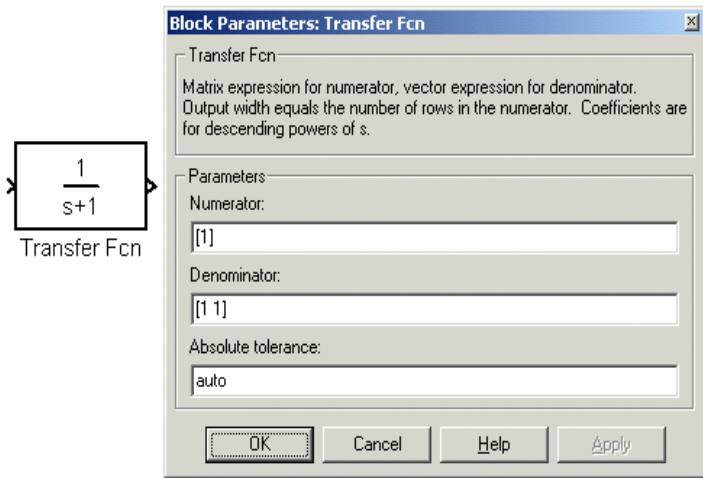


Рис. 1.7. Блок, моделирующий передаточную функцию и окно редактирования параметров блока.

4. После установки на схеме всех блоков из требуемых библиотек нужно выполнить соединение элементов схемы. Для соединения блоков необходимо указать курсором на «выход» блока, а затем, нажав и, не отпуская левую клавишу «мыши», провести линию к входу другого блока. После чего отпустить клавишу. В случае правильного соединения изображение стрелки на входе блока изменяет цвет. Для создания точки разветвления в соединительной линии нужно подвести курсор к предполагаемому узлу и, нажав правую клавишу «мыши», протянуть линию. Для удаления линии требуется выбрать линию (так же, как это выполняется для блока), а затем

нажать клавишу Delete на клавиатуре. Схема модели, в которой выполнены соединения между блоками, показана на рис. 1.8.

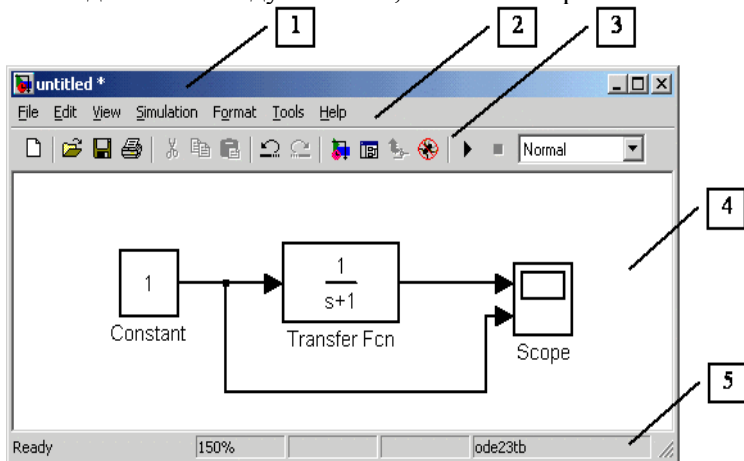


Рис. 1.8. Пример структурной модели

5. После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню File/Save As... в окне схемы и указав папку и имя файла. Следует иметь в виду, что имя файла, размером до 32 символов, должно начинаться с буквы и не может содержать символы кириллицы и спецсимволы. Это же требование относится и к пути файла (к тем папкам, в которых сохраняется файл). При последующем редактировании схемы можно пользоваться пунктом меню File/Save. При повторных запусках программы SIMULINK загрузка схемы осуществляется с помощью меню File/Open... в окне обозревателя библиотеки или из основного окна MATLAB.

Окно проекта модели

Окно проекта модели содержит следующие элементы (см. рис. 1.8).

1. Заголовок, с названием окна. Вновь созданному окну, по умолчанию, присваивается имя «Untitled» с соответствующим номером.

2. Меню с командами File, Edit, View и т.д.
3. Панель инструментов.
4. Окно для создания схемы модели.
5. Строка состояния, содержащая информацию о текущем состоянии модели.

Меню окна содержит команды для редактирования модели, ее настройки и управления процессом расчета, работы файлами и т.п.

- File (Файл) – Работа с файлами моделей,
- Edit (Редактирование) – Изменение модели и поиск блоков,
- View (Вид) – Управление показом элементов интерфейса,
- Simulation (Моделирование) – Задание настроек для моделирования и управление процессом расчета,
- Format (Форматирование) – Изменение внешнего вида блоков и модели в целом,
- Tools (Инструментальные средства) – Применение специальных средств для работы с моделью (отладчик, линейный анализ и т.п.),
- Help (Справка) – Вывод окон справочной системы.

Для работы с моделью можно также использовать кнопки на панели инструментов (рис.1.9).

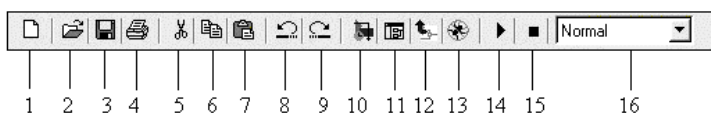


Рис. 1.9. Панель инструментов окна модели

Кнопки панели инструментов имеют следующее назначение.

- 1) New Model – Открыть новое (пустое) окно модели.
- 2) Open Model – Открыть существующий mdl-файл.
- 3) Save Model – Сохранить mdl-файл на диске.
- 4) Print Model – Вывод на печать блок-диаграммы модели.
- 5) Cut – Вырезать выделенную часть модели в буфер промежуточного хранения.
- 6) Copy – Скопировать выделенную часть модели в буфер промежуточного хранения.

- 7) Paste – Вставить в окно модели содержимое буфера промежуточного хранения.
- 8) Undo – Отменить предыдущую операцию редактирования.
- 9) Redo – Восстановить результат отмененной операции редактирования.
- 10) Library Browser – Открыть окно обозревателя библиотек.
- 11) Toggle Model Browser – Открыть окно обозревателя модели.
- 12) Go to parent system – Переход из подсистемы в систему высшего уровня иерархии (“родительскую систему”). Команда доступна только, если открыта подсистема.
- 13) Debug – Запуск отладчика модели.
- 14) Start/Pause/Continue Simulation – Запуск модели на исполнение (команда Start); после запуска модели на изображении кнопки выводится символ **II**, и ей соответствует уже команда Pause (Приостановить моделирование); для возобновления моделирования следует щелкнуть по той же кнопке, поскольку в режиме паузы ей соответствует команда Continue (Продолжить).
- 15) Stop – Закончить моделирование. Кнопка становится доступной после начала моделирования, а также после выполнения команды Pause.
- 16) Normal/Accelerator – Обычный/Ускоренный режим расчета. Инструмент доступен, если установлено приложение Simulink Performance Tool.

В нижней части окна модели находится строка состояния, в которой отображаются краткие комментарии к кнопкам панели инструментов, а также к пунктам меню, когда указатель мыши находится над соответствующим элементом интерфейса. Это же текстовое поле используется и для индикации состояния Simulink: Ready (Готов) или Running (Выполнение). В строке состояния отображаются также:

- масштаб отображения блок-диаграммы (в процентах, исходное значение равно 100 %),
- индикатор степени завершенности сеанса моделирования (появляется после запуска модели),
- текущее значение модельного времени (выводится также только после запуска модели),

- используемый алгоритм расчета состояний модели (метод решения).

Редактирование проекта модели

Добавление текстовых надписей

Для повышения наглядности модели удобно использовать текстовые надписи. Для создания надписи нужно указать мышью место надписи и дважды щелкнуть левой клавишей мыши. После этого появится прямоугольная рамка с курсором ввода. Аналогичным образом можно изменить и подписи к блокам моделей. На рис. 1.10 показаны текстовая надпись и изменение надписи в блоке передаточной функции. Следует иметь в виду, что рассматриваемая версия программы (Simulink 4) не адаптирована к использованию кириллических шрифтов, и применение их может иметь самые разные последствия: - отображение надписей в нечитаемом виде, обрезание надписей, сообщения об ошибках, а также невозможность открыть модель после ее сохранения. Поэтому, применение надписей на русском языке для текущей версии Simulink крайне не желательно.

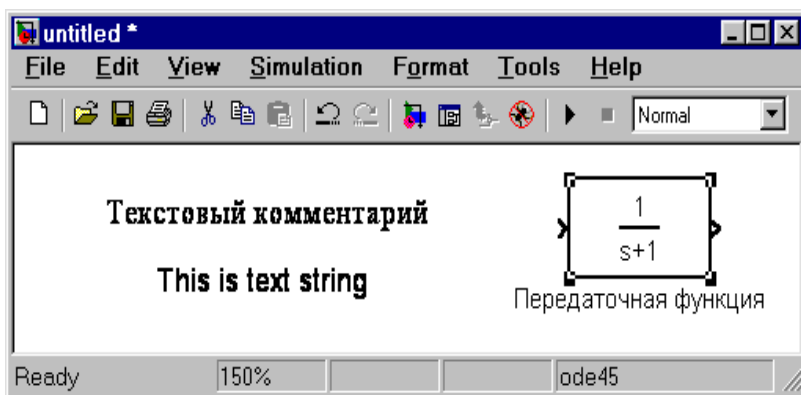




Рис. 1.10. Текстовая надпись и изменение надписи в Transfer Function


Выделение объектов

Для выполнения какого-либо действия с элементом модели (блоком, соединительной линией, надписью) этот элемент необходимо сначала выделить. Выделение объектов проще всего осуществляется мышью. Для этого необходимо установить курсор мыши на нужном объекте и щелкнуть левой клавишей мыши. Произойдет выделение объекта. Об этом будут свидетельствовать маркеры по углам объекта (см. рис. 1.10). Можно также выделить несколько объектов. Для этого надо установить курсор мыши вблизи группы объектов, нажать левую клавишу мыши и, не отпуская ее, начать перемещать мышь. Появится пунктирная рамка, размеры которой будут изменяться при перемещении мыши. Все охваченные рамкой объекты становятся выделенными. Выделить все объекты также можно, используя команду Edit/Select All. После выделения объекта его можно копировать или перемещать в буфер промежуточного хранения, извлекать из буфера, а также удалять, используя стандартные приемы работы в Windows-программах.

Копирование и перемещение объектов в буфер промежуточного хранения

Для копирования объекта в буфер его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду Edit/Сору или воспользоваться инструментом  на панели инструментов. Для вырезания объекта в буфер его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду Edit/Cut или воспользоваться инструментом  на панели инструментов. При выполнении данных операций следует иметь в виду, что объекты помещаются в собственный буфер MATLAB и недоступны из других приложений. Использование команды Edit/Сору model to Clipboard позволяет поместить графическое изображение модели в буфер Windows и, соответственно, делает его доступным для остальных программ. Копирование можно выполнить и таким образом: нажать правую клавишу мыши, и не отпуская ее, переместить объект. При этом будет создана копия объекта, которую можно переместить в необходимое место.

Вставка объектов из буфера промежуточного хранения

Для вставки объекта из буфера необходимо предварительно указать место вставки, щелкнув левой клавишей мыши в предполагаемом месте вставки, а затем выполнить команду Edit/Paste или воспользоваться инструментом  на панели инструментов.

Удаление объектов

Для удаления объекта его необходимо предварительно выделить, а затем выполнить команду Edit/Clear или воспользоваться клавишей Delete на клавиатуре. Следует учесть, что команда Clear удаляет блок без помещения его в буфер обмена. Однако эту операцию можно отменить командой меню File/Undo.

Соединение блоков

Для соединения блоков необходимо сначала установить курсор мыши на выходной порт одного из блоков. Курсор при этом превратится в большой крест из тонких линий (рис. 1.11).

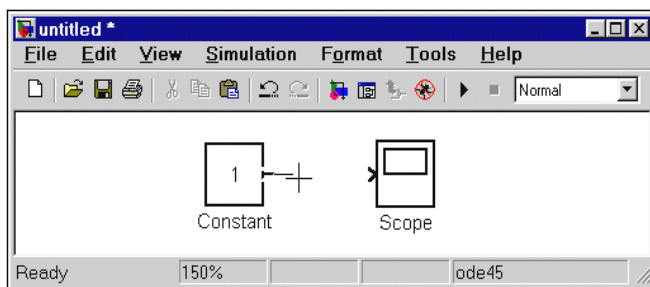


Рис. 1.11. Начало создания соединения

Держа нажатой левую кнопку мыши, нужно переместить курсор к входному порту нужного блока. Курсор мыши примет вид креста из тонких сдвоенных линий (рис. 1.12). Свидетельством того, что соединение создано, будет жирная стрелка у входного порта блока. Выделение линии производится точно также как и выделение блока

одинарным щелчком левой клавиши мыши. Черные маркеры, расположенные в узлах соединительной линии будут говорить о том, что линия выделена.

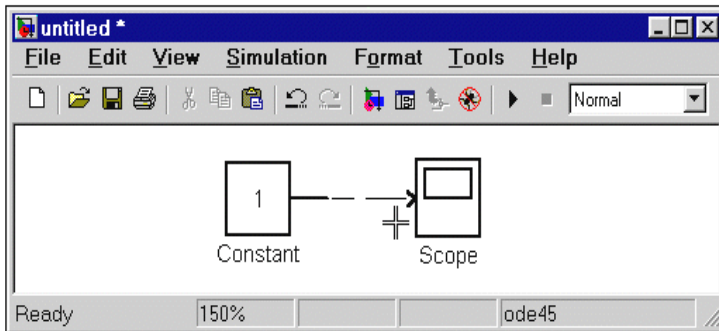


Рис. 1.12. Завершение создания соединения

Создание петли линии соединения выполняется также как перемещение блока. Линия соединения выделяется, и затем нужная часть линии перемещается. Рис 1.13 поясняет этот процесс.

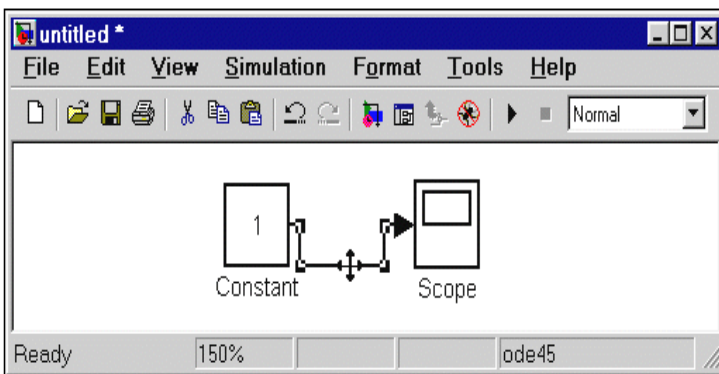


Рис. 1.13. Создание петли в соединительной линии

Удаление соединений выполняется также как и любых других объектов (см. п. 5).

Изменение размеров блоков

Для изменения размера блока он выделяется, после чего курсор мыши надо установить на один из маркеров по углам блока. После превращения курсора в двустороннюю стрелку, необходимо нажать левую клавишу мыши и растянуть (или сжать) изображения блока. На рис. 1.14 показан этот процесс. Размеры надписей блока при этом не изменяются.

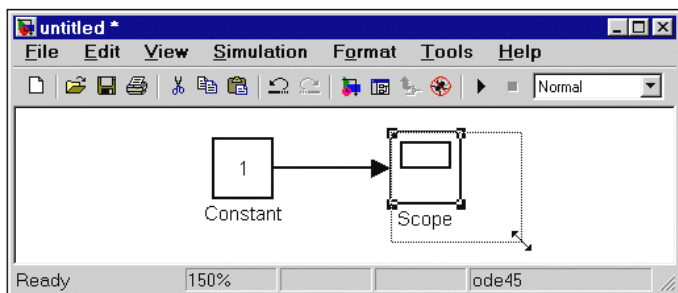



Рис. 1.14. Изменение размера блока


Перемещение блоков

Любой блок модели можно переместить, выделив его, и передвинув, держа нажатой левую клавишу мыши. Если к входам и выходам блока подведены соединительные линии, то они не разрываются, а лишь сокращаются или увеличиваются в длине. В соединении можно также вставить блок, имеющий один вход и один выход. Для этого его нужно расположить в требуемом месте соединительной линии.

Использование команд Undo и Redo

В процессе освоения программы пользователь может совершать действия кажущиеся ему необратимыми (например, случайное удаление части модели, копирование и т.д.). В этом случае следует воспользоваться командой Undo — отмена последней операции.

Команду можно вызвать с помощью кнопки  в панели инстру-

ментов окна модели или из меню Edit. Для восстановления отмененной операции служит команда Redo (инструмент ).

Форматирование объектов

В меню Format (также как и в контекстном меню, вызываемом нажатием правой клавиши мыши на объекте) находится набор команд форматирования блоков. Команды форматирования разделяются на несколько групп.

1. Изменение отображения надписей:

Font – форматирование шрифта надписей и текстовых блоков,

Text alignment – выравнивание текста в текстовых надписях,

Flip name – перемещение подписи блока,

Show/Hide name – отображение или скрытие подписи блока.

2. Изменение цветов отображения блоков:

Foreground color – выбор цвета линий для выделенных блоков,

Background color – выбор цвета фона выделенных блоков,

Screen color – выбор цвета фона для всего окна модели.

3. Изменение положения блока и его вида:

Flip block – зеркальное отображение относительно вертикальной оси симметрии,

Rotate block – поворот блока на 90° по часовой стрелке,

Show drop shadow – показ тени от блока,

Show port labels – показ меток портов.

Прочие установки:

Library link display – показ связей с библиотеками,

Sample time colors – выбор цвета блока индикации времени,

Wide nonscalar lines – увеличение/уменьшение ширины нескаллярных линий,

Signal dimensions – показ размерности сигналов,

Port data types – показ данных о типе портов,

Storage class – класс памяти. Параметр, устанавливаемый при работе Real-Time Workshop,

Execution order – вывод порядкового номера блока в последовательности исполнения.

Параметры и выполнение расчетов

Перед выполнением расчетов необходимо предварительно задать параметры расчета. Задание параметров расчета выполняется в панели управления меню Simulation/Parameters. Вид панели управления приведен на рис.1.15.

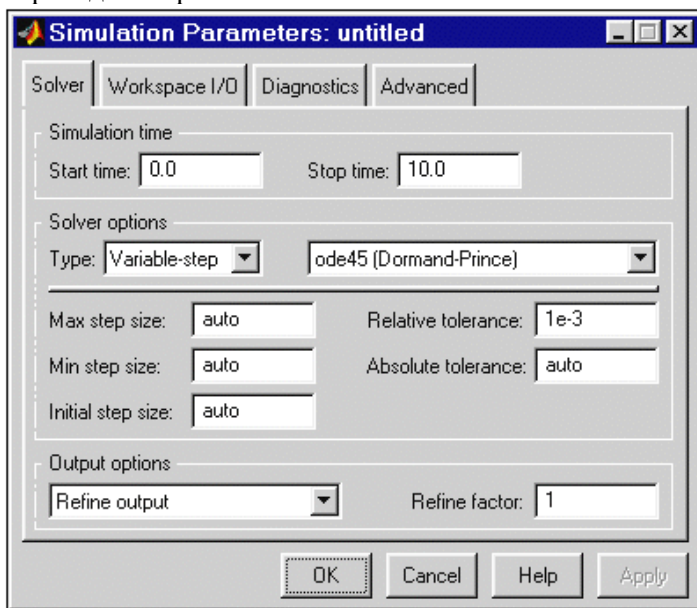


Рис. 1.15. Панель управления расчетами

Окно настройки параметров расчета имеет 4 вкладки.

- Solver (Расчет) – установка параметров расчета модели.

- Workspace I/O (Ввод/вывод данных в рабочую область) – установка параметров обмена данными с рабочей областью MATLAB.
- Diagnostics (Диагностика) – выбор параметров диагностического режима.
- Advanced (Дополнительно) – установка дополнительных параметров.

Установка параметров расчета модели выполняется с помощью элементов управления, размещенных на вкладке Solver. Эти элементы разделены на три группы (рис. 1.16): Simulation time (Интервал моделирования или, иными словами, время расчета), Solver options (Параметры расчета), Output options (Параметры вывода).

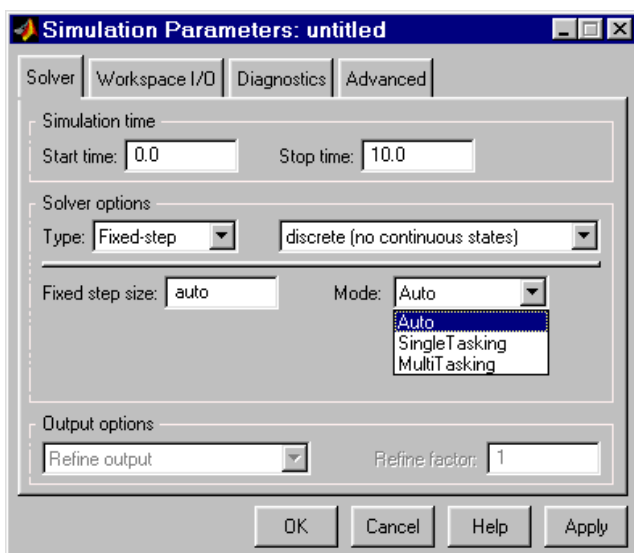


Рис. 1.16. Вкладка Solver при выборе фиксированного шага расчета

Установка параметров расчета модели

Simulation time (Интервал моделирования или время расчета)

Время расчета задается указанием начального (Start time) и конечного (Stop time) значений времени расчета. Начальное время, как

правило, задается равным нулю. Величина конечного времени задается пользователем исходя из условий решаемой задачи.

Solver options (Параметры расчета)

При выборе параметров расчета необходимо указать способ моделирования (Type) и метод расчета нового состояния системы. Для параметра Type доступны два варианта – с фиксированным (Fixed-step) или с переменным (Variable-step) шагом. Как правило, Variable-step используется для моделирования непрерывных систем, а Fixed-step – для дискретных. Список методов расчета нового состояния системы содержит несколько вариантов. Первый вариант (discrete) используется для расчета дискретных систем. Остальные методы используются для расчета непрерывных систем. Эти методы различны для переменного (Variable-step) и для фиксированного (Fixed-step) шага времени, но, по сути, представляют собой процедуры решения систем дифференциальных уравнений. Подробное описание каждого из методов расчета состояний системы приведено во встроенной справочной системе MATLAB. Ниже двух раскрывающихся списков Type находится область, содержимое которой меняется зависимости от выбранного способа изменения модельного времени. При выборе Fixed-step в данной области появляется текстовое поле Fixed-step size (величина фиксированного шага) позволяющее указывать величину шага моделирования (см. рис. 1.16). Величина шага моделирования по умолчанию устанавливается системой автоматически (auto). Требуемая величина шага может быть введена вместо значения auto либо в форме числа, либо в виде вычисляемого выражения (то же самое относится и ко всем параметрам устанавливаемым системой автоматически).

При выборе Fixed-step необходимо также задать режим расчета (Mode). Для параметра Mode доступны три варианта.

- **MultiTasking** (Многозадачный) – необходимо использовать, если в модели присутствуют параллельно работающие подсистемы, и результат работы модели зависит от временных параметров этих подсистем. Режим позволяет выявить несоответствие скорости и дискретности сигналов, пересылаемых блоками друг другу.

- **SingleTasking** (Однозадачный) – используется для тех моделей, в которых недостаточно строгая синхронизация работы элементов не влияет на конечный результат.

- Auto (Автоматический выбор режима) – позволяет Simulink автоматически устанавливать режим MultiTasking для тех моделей, в которых используются блоки с различными скоростями передачи сигналов и режим SingleTasking для моделей, в которых содержатся блоки, оперирующие одинаковыми скоростями.

При выборе Variable-step в области появляются поля для установки трех параметров.

- Max step size – максимальный шаг расчета. По умолчанию он устанавливается автоматически (auto) и его значение в этом случае равно $(SfopTime - StartTime)/50$. Довольно часто это значение оказывается слишком большим, и наблюдаемые графики представляют собой ломаные (а не плавные) линии. В этом случае величину максимального шага расчета необходимо задавать явным образом:

- Min step size – минимальный шаг расчета,
- Initial step size – начальное значение шага моделирования.

При моделировании непрерывных систем с использованием переменного шага необходимо указать точность вычислений: относительную (Relative tolerance) и абсолютную (Absolute tolerance). По умолчанию они равны соответственно 10^{-3} и auto.

Output options (Параметры вывода) – задают настройки параметров вывода выходных сигналов моделируемой системы (Output options). Для данного параметра возможен выбор одного из трех вариантов.

- Refine output (Скорректированный вывод) – позволяет изменять дискретность регистрации модельного времени и тех сигналов, которые сохраняются в рабочей области MATLAB с помощью блока To Workspace. Установка величины дискретности выполняется в строке редактирования Refine factor, расположенной справа. По умолчанию значение Refine factor равно 1, это означает, что регистрация производится с шагом $dt = 1$ (то есть для каждого значения модельного времени:). Если задать Refine factor равным 2, это означает, что будет регистрироваться каждое второе значение сигналов, 3 - каждое третье т. д. Параметр Refine factor может принимать только целые положительные значения

- Produce additional output (Дополнительный вывод) – обеспечивает дополнительную регистрацию параметров модели в заданные моменты времени; их значения вводятся в строке редактирования (в этом случае она называется Output times) в виде списка, за-

ключенного в квадратные скобки. При использовании этого варианта базовый шаг регистрации ($D t$) равен 1. Значения времени в списке Output times могут быть дробными числами и иметь любую точность.

- Produce specified output only (Формировать только заданный вывод) – устанавливает вывод параметров модели только в заданные моменты времени, которые указываются в поле Output times (Моменты времени вывода).

Установка параметров обмена с рабочей областью

Элементы, позволяющие управлять вводом и выводом в рабочую область MATLAB промежуточных данных и результатов моделирования, расположены на вкладке Workspace I/O (рис. 1.17).

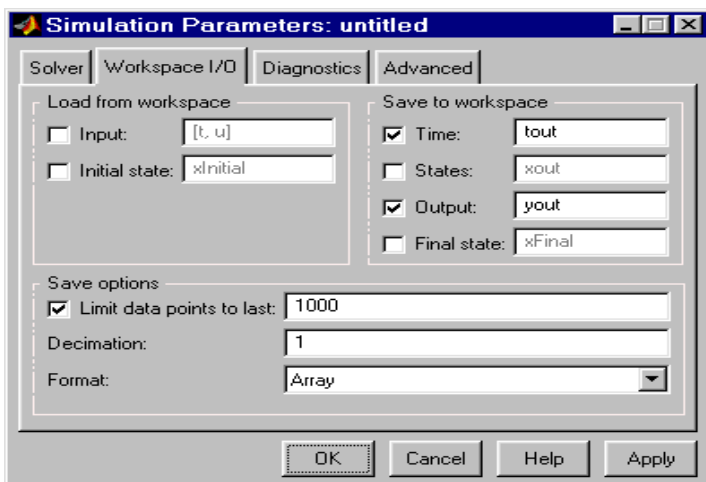


Рис. 1.17. Вкладка Workspace I/O диалогового окна установки параметров моделирования

Элементы вкладки разделены на 3 поля:

- Load from workspace (Загрузить из рабочей области). Если флажок Input (Входные данные) установлен, то в расположенном справа текстовом поле можно ввести формат данных, которые бу-

дуг считываться из рабочей области MATLAB. Установка флажка Initial State (Начальное состояние) позволяет ввести в связанном с ним текстовом поле имя переменной, содержащей параметры начального состояния модели. Данные, указанные в полях Input и Initial State, передаются в исполняемую модель посредством одного или более блоков In (из раздела библиотеки Sources).

- Save to workspace (Записать в рабочую область) – Позволяет установить режим вывода значений сигналов в рабочую область MATLAB и задать их имена.

- Save options (Параметры записи) – Задаёт количество строк при передаче переменных в рабочую область. Если флажок Limit rows to last установлен, то в поле ввода можно указать количество передаваемых строк (отсчет строк производится от момента завершения расчета). Если флажок не установлен, то передаются все данные. Параметр Decimation (Исключение) задаёт шаг записи переменных в рабочую область (аналогично параметру Refine factor вкладки Solver). Параметр Format (формат данных) задаёт формат передаваемых в рабочую область данных. Доступные форматы Array (Массив), Structure (Структура), Structure With Time (Структура с дополнительным полем – «время»).

Установка параметров диагностирования модели

Вкладка Diagnostics (рис. 1.18) позволяет изменять перечень диагностических сообщений, выводимых Simulink в командном окне MATLAB, а также устанавливать дополнительные параметры диагностики модели.

Сообщения об ошибках или проблемных ситуациях, обнаруженных Simulink в ходе моделирования и требующих вмешательства разработчика выводятся в командном окне MATLAB. Исходный перечень таких ситуаций и вид реакции на них приведен в списке на вкладке Diagnostics. Разработчик может указать вид реакции на каждое из них, используя группу переключателей в поле Action (они становятся доступны, если в списке выбрано одно из событий):

- None – игнорировать,
- Warning — выдать предупреждение и продолжить моделирование,

- Error – выдать сообщение об ошибке и остановить сеанс моделирования.

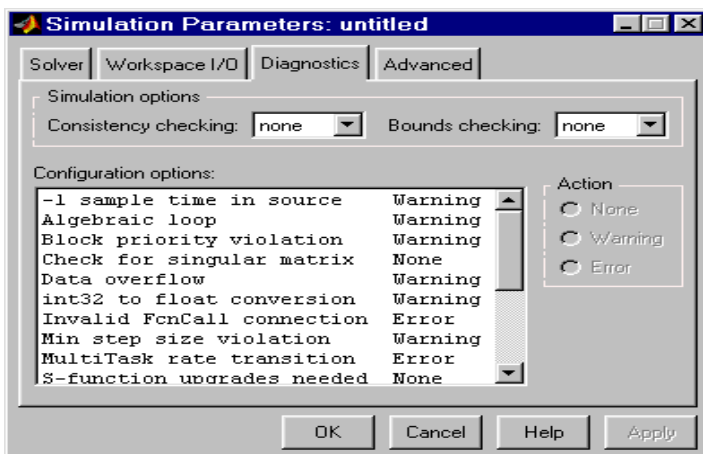




Рис. 1.18. Вкладка Diagnostics окна установки параметров моделирования

Выбранный вид реакции отображается в списке рядом с наименованием события.

Выполнение расчета

Запуск расчета выполняется с помощью выбора пункта меню Simulation/Start. или кнопкой  на панели инструментов. Процесс расчета можно завершить досрочно, выбрав пункт меню Simulation/Stop или кнопку . Расчет также можно остановить (Simulation/Pause) и затем продолжить (Simulation/Continue).

Завершение работы пакета MATLAB

Для завершения работы необходимо сохранить модель в файле, закрыть окно модели, окно обозревателя библиотек, а также основное окно пакета MATLAB.

Библиотека блоков Simulink представлена в рекомендованном учебном пособии [5]

Выполнение лабораторной работы

1. Изучить общие правила использования пакета программ MATLAB.
2. Создать в среде Simulink новый проект, разместить в окне проекта несколько элементов из библиотеки моделей.
3. Освоить средства создания структуры модели, ее редактирования, изменения параметров элементов в соответствии с приведенными выше рекомендациями.

Лабораторная работа № 2

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ

Цель работы – приобрести практические навыки получения передаточных функций и их характеристик из дифференциальных уравнений элементов или систем.

Основные сведения

Основной математической моделью динамических систем является дифференциальное уравнение. Если система линейная, то и дифференциальное уравнение также является линейным

Описание автоматических систем существенно упрощается при использовании методов операционного исчисления. Используя преобразование Лапласа, линейное дифференциальное уравнение приводят к алгебраическому уравнению с комплексными переменными.

Преобразованием Лапласа называют соотношение

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt$$

которое функции $x(t)$ вещественного переменного ставит в соответствие функцию $X(s)$ комплексного переменного s , где $s = \alpha + j\beta$.

Функцию $x(t)$ называют оригиналом, а $X(s)$ – изображением по Лапласу. Преобразование Лапласа можно применять к функции $x(t)$, если она имеет конечное число разрывов, равна нулю при $t < 0$ и

ограничена по модулю при $t > 0$.

Преобразование Лапласа можно записать в символической форме $X(s) = L\{x(t)\}$,

где L — оператор Лапласа.

Предположим, что свойства автоматической системы описываются дифференциальным уравнением вида

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_0,$$

где $x(t)$ - входное воздействие, $y(t)$ - реакция системы (выходной процесс), a и b - постоянные коэффициенты.

Используя преобразование Лапласа к этому уравнению, получаем линейное алгебраическое уравнение относительно $Y(s)$.

$$\begin{aligned} a_n s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \dots + a_0 Y(s) = \\ b_m s^m X(s) + b_{m-1} s^{m-1} X(s) + \dots + b_0 X(s) \end{aligned}$$

или

$$Y(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} X(s) \quad (2.1)$$

Выражение

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.2)$$

определяет передаточную функцию автоматической системы.

Передаточной функцией системы называется отношение изображения по Лапласу ее реакции к изображению по Лапласу входного воздействия при нулевых начальных условиях.

Из (2.1) видно, что изображение реакции определяется передаточной функцией и изображением входного воздействия:

$$Y(s) = W(s) X(s),$$

откуда следует второе определение передаточной функции.

Передаточной функцией системы называется функция, связывающая изображение по Лапласу ее реакции с изображением по Лапласу входного воздействия при нулевых начальных условиях.

Передаточную функцию можно получить непосредственно по дифференциальному уравнению путем формальной замены оператора дифференцирования – комплексной переменной s , а функций времени $x(t)$, $y(t)$ – их изображениями $X(s)$, $Y(s)$.

Если динамическое звено или автоматическая система имеет несколько входов, то по каждому из них составляют передаточную функцию, принимая во внимание принцип суперпозиции.

Передаточные функции линейных динамических звеньев представляют собой дробно-рациональные функции комплексной переменной s с постоянными коэффициентами, зависящими от параметров системы. Для физически реализуемых систем $m \leq n$ и передаточные функции являются правильными дробно-рациональными функциями s .

Многочлен, фигурирующий в знаменателе передаточной функции, называется характеристическим полиномом, а уравнение вида

$$Q(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0 = 0$$

называется характеристическим уравнением.

Особые точки передаточной функции

Полюсами передаточной функции называют те значения комплексной переменной s , при которых передаточная функция равна бесконечности.

Для нахождения полюсов достаточно найти корни характеристического уравнения.

Нулями передаточной функции называют те значения комплексной переменной s , при которых передаточная функция равна нулю.

Для нахождения нулей достаточно найти корни многочлена, расположенного в числителе передаточной функции.

Распределение нулей/полюсов обычно изображают в графическом виде. Для этого строят s -плоскость с системой координат, где по горизонтальной оси откладывают значения $Re s$, а по вертикальной – $Im s$. Пример такого графика приведен на рис. 2.1.

Здесь нули показаны кружками, а полюса – крестиками.

Будем называть нули и полюсы левыми (правыми), если они расположены в левой (правой) части комплексной s -плоскости и нейтральными или нулевыми, если они лежат на мнимой оси или, соответственно, в начале координат.

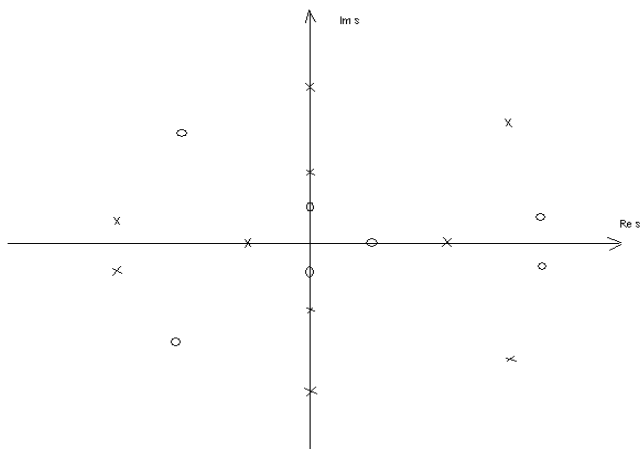


Рис. 2.1. График распределения нулей/полюсов

Введем следующие показатели передаточной функции $W(s)$:

- 1) порядок n , равный степени знаменателя передаточной функции $W(s)$;
- 2) степень $n - m$, равная разности степеней знаменателя и числителя передаточной функции $W(p)$;

- 3) индекс апериодической нейтральности, равный числу нулевых полюсов передаточной функции $W(p)$;
- 4) индекс колебательной нейтральности, равный числу мнимых полюсов передаточной функции $W(p)$;
- 5) индекс неустойчивости, равный числу правых полюсов передаточной функции $W(p)$;
- 6) индекс неминимально-фазовости, равный числу правых нулей передаточной функции $W(p)$.

Нормированная передаточная функция

Выражение (2.2) можно представить в нормированной форме

$$\begin{aligned}
 W(s) &= \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} = \\
 &= \frac{b_0}{a_0} \frac{T_m s^m + T_{m-1} s^{m-1} + \dots + 1}{T_n s^n + T_{n-1} s^{n-1} + \dots + 1} = k \overline{W}(s)
 \end{aligned}$$

где k – статический коэффициент передачи.

Выполнение лабораторной работы

Исходные данные по вариантам приведены в табл. 2.1.

1. Из дифференциального уравнения получить выражение для передаточной функции.
2. Записать передаточную функцию в нормированной форме, указать значение статического коэффициента передачи.
3. Найти численные значения нулей и полюсов передаточной функции и изобразить их расположение на комплексной плоскости, отметить на графике, к какому виду относится тот, или иной полюс;
4. Записать значения показателей передаточной функции;
5. Оформить отчет по проделанной работе.

Таблица 2.1

№	Дифференциальные уравнения системы
1	$0.05 \frac{dy^2(t)}{dt^2} + 0.01 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = 0.02 \frac{dx^2(t)}{dt^2} + \frac{dx(t)}{dt} + 0.01x(t)$
2	$0.3 \frac{dy^2(t)}{dt^2} + 2 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = 0.5x(t)$
3	$0.01 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = 2 \frac{dx(t)}{dt} + 0.01x(t)$
4	$0.05 \frac{dy^2(t)}{dt^2} + y(t) = 0.02 \frac{dx^2(t)}{dt^2} + \frac{dx(t)}{dt} + 0.01x(t)$
5	$\frac{dy^2(t)}{dt^2} + 0.07 \frac{dy(t)}{dt} = 12 \frac{dx^2(t)}{dt^2} + \frac{dx(t)}{dt} - 0.01x(t)$
6	$0.5 \frac{dy^2(t)}{dt^2} + 0.01 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{dx^2(t)}{dt^2} + 5x(t)$
7	$5 \frac{dy^3(t)}{dt^3} + \frac{dy^2(t)}{dt^2} - \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = 0.02 \frac{dx^2(t)}{dt^2} - \frac{dx(t)}{dt} + 0.01x(t)$
8	$10 \frac{dy^3(t)}{dt^3} + \frac{dy^2(t)}{dt^2} + 2 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{dx^2(t)}{dt^2} + 5 \frac{dx(t)}{dt} + 15x(t)$
9	$5 \frac{dy^3(t)}{dt^3} + \frac{dy^2(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{dx(t)}{dt} + 5x(t)$
10	$4 \frac{dy^3(t)}{dt^3} + 0.2 \frac{dy^2(t)}{dt^2} + 0.15 \frac{dy(t)}{dt} + 5y(t) = 0.01x(t)$

Лабораторная работа № 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Цель работы – с помощью пакета MatLab с расширениями Control System Toolbox и Simulink построить статическую характеристику объекта, заданного уравнением статики вида $y = f(u)$ где y – реакция объекта, а u – его вход;

Основные сведения

Режим работы системы автоматического управления (САУ), в котором управляемая величина и все промежуточные величины не изменяются во времени, называется установившимся, или статическим режимом.

Любое звено и САУ в целом в данном режиме описывается уравнениями статики вида $y = f(u)$, в которых отсутствует время t . Соответствующие им графики называются статическими характеристиками. Статическая характеристика звена с одним входом и может быть представлена кривой $y = f(u)$.

Звенья с линейными статическими характеристиками называются линейными. Статические характеристики реальных звеньев, как правило, нелинейны. Такие звенья называются нелинейными. Зная статические характеристики отдельных звеньев, можно построить статическую характеристику САУ.

Если все звенья САУ линейные, то САУ имеет линейную статическую характеристику и называется линейной. Если хотя бы одно звено нелинейное, то и САУ – нелинейная.

Порядок выполнения работы

1. Запустить MatLab Simulink и в новом окне модели собрать схему вида (рис.3.1)
2. Двойным щелчком мыши выделить блок $f(u)$ и вставить в него выражение из табл.3.1 согласно своему варианту.

3. Снять показания с блока Display, изменяя значения на блоке Constant в диапазоне от -50 до 50 с шагом 5.

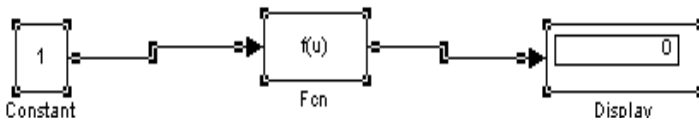


Рис. 3.1. Окно модели

4. Полученные результаты занести в таблицу вида

u	y

5. Построить по точкам график $y(u)$, представляющий из себя статическую характеристику объекта, заданного функцией $f(u)$.

Таблица 3.1

№ варианта	Функция $f(u)$
1	$(2u^2 + 3)/(3u^2 + 2u + 1)$
2	$(5u^2 + 4)/(2u^2 + 3u + 4)$
3	$(2u^3 + 3u^2 + 4u + 1)/(4u^3 + 5u^2 + 3u + 1)$
4	$(2u + 1)/(7u^2 + 5u + 1)$
5	$(8u^2 + 10u + 5)/(15u^3 + 8u^2 + 9u + 3)$
6	$(2u^3 + 4u + 7)/(8u^3 + 2u^2 + 7u + 6)$
7	$(12u^3 + 38u^2 + 74u + 10)/(4u^4 + 5u^3 + 9u^2 + 5u + 7)$
8	$(24u + 11)/(25u^2)$
9	$(45u + 5)/(7u^2 + 5)$
10	$(27u + 71)/(7u^2 + 54u + 1)$

6. Создать м-файл следующего содержания:

```
U=[u1 u2 ... un];  
Y=[y1 y2 ... yn];  
plot(U,Y)
```

где u_i, y_i – показания блоков Constant и Display соответственно.
Выполнить этот м-файл в командной строке MatLab.

7. Проанализировать график и сделать выводы, к какому классу относится исследуемый объект.

8. Проверить полученные результаты, сравнив их с характеристикой, полученной аналитически. Для этого создайте м-файл вида

```
u=-50:5:50;  
y=f(u) ; (f(u) задать в явном виде по варианту)  
plot(u,y)
```

и выполните его из командной строки MatLab.

Если графики не совпадают, то в работе допущены ошибки, которые следует устранить.

9. Оформить отчет по работе.

Лабораторная работа № 4

ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цель работы – с помощью пакета MatLab с расширениями Control System Toolbox и Simulink построить переходную характеристику объекта, заданного передаточной функцией.

Основные сведения

Для оценки динамических свойств системы и отдельных звеньев принято исследовать их реакцию на типовые входные воздействия. Это позволяет сравнивать отдельные элементы между собой с точки

зрения их динамических свойств, а также, зная реакцию системы на типовые воздействия, можно судить о том, как она будет вести себя при сложных изменениях входной величины.

Переходная характеристика

Зависимость изменения реакции системы от времени при подаче на ее вход единичного ступенчатого воздействия $I(t)$ при нулевых начальных условиях называется переходной характеристикой и обозначается $h(t)$.

Ступенчатое воздействие $I(t)$ определяется в следующей форме:

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

Рассмотрим типовую одноконтурную систему регулирования (рис.4.1).

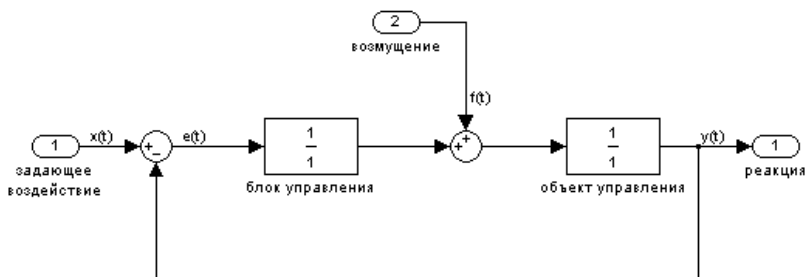


Рис. 4.1. Типовая структура СУ

Примеры переходных характеристик системы, при подаче на входы 1 и 2 ступенчатых сигналов, приведены на рис.4.2 – 4.3.

На графиках переходных процессов, вызванных ступенчатым изменением задающего воздействия $x(t)=I(t)$ и возмущения $f(t)=I(t)$, за начало отсчета для управляемой величины $y(t)$ принято значение $x(-0)$, которое было до подачи ступенчатого воздействия.

Переходная характеристика является основой для оценок показателей качества систем по быстродействию и точности. Их можно получить непосредственно из переходной характеристики.

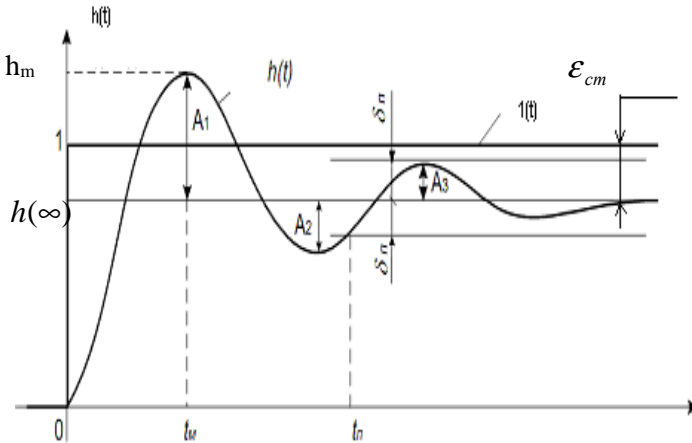


Рис. 4.2. Пример переходной характеристики системы по задающему воздействию.

Перерегулирование σ - величина, равная отношению первого максимального отклонения h_m от ее установившегося значения $h(\infty)$ к этому установившемуся значению:

$$\sigma = \frac{|h_m - h(\infty)|}{h(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_1}{h(\infty)} \cdot 100, \%$$

Качество управления считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает 30...40 %.

Степень затухания:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1}$$

Интенсивность затухания колебаний в системе считается удовлетворительной, если $\psi = 0,75 \dots 0,95$.

Логарифмический декремент колебаний D – характеризует скорость затухания колебаний и определяется по формуле

$$D = \ln \left| \frac{A_1}{A_2} \right|.$$

Длительность переходного процесса (время регулирования) t_n – интервал времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, после которого отклонения управляемой величины $h(t)$ от ее нового установившегося значения $h(\infty)$ становятся меньше некоторого заданного числа δ_n , т. е. до момента, после которого выполняется условие $\text{abs} [h(t) - h(\infty)] \leq \delta_n$, при $t > t_n$.

В промышленной автоматике величину δ_n обычно принимают равной 2% от установившегося значения $h(\infty)$ [$\delta_n = 0,02 h(\infty)$].

Колебательность N – число переходов $h(t)$ через ее установившееся значение $h(\infty)$ за время переходного процесса t_n .

Статическая ошибка для рассматриваемой структуры

$$\varepsilon_{cm} = \text{abs} [I(t) - h(\infty)].$$

Для переходных процессов $h_f(t)$, вызванных возмущающим воздействием $f(t)$ (см. рис. 4.3) вводятся аналогичные показатели качества.

Перерегулирование σ_f – величина, равная отношению первого максимального отклонения $h_{f,max}$ от ее установившегося значения $h_f(\infty)$ к этому установившемуся значению:

$$\sigma_f = \frac{h_{f,max} - h_f(\infty)}{h_f(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_1}{h_f(\infty)} \cdot 100, \%$$

Колебательность N_f – число переходов $h_f(t)$ через ее установившееся значение $h_f(\infty)$ за время переходного процесса t_n .

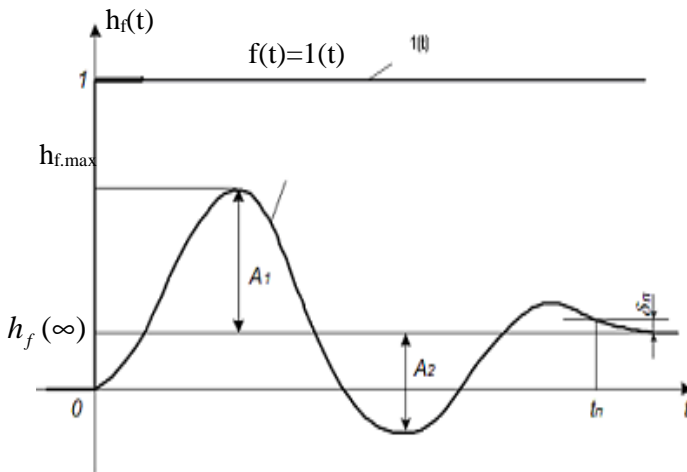


Рис. 4.3. Переходная характеристика системы по возмущению

Аналогично оцениваются остальные вышеперечисленные показатели и, дополнительно, коэффициент демпфирования возмущений R_d

$$R_d = 20 \lg \left| \frac{k_{o.f}}{h_f(\infty)} \right|, \text{ (db)}$$

Где $k_{o.f}$ – статический коэффициент передачи объекта по возмущению.

Три главных показателя качества – перерегулирование, длительность переходного процесса и статическая ошибка – тесно связаны между собой. Они зависят от всех параметров системы, но наиболее сильно – от статического коэффициента k разомкнутой части системы. Причем, с увеличением этого коэффициента максимальное отклонение по каналу возмущения всегда уменьшается (рис. 4.4,а), максимальное отклонение по каналу задающего воздействия обычно увеличивается (рис. 4.4,б), а статическая ошибка уменьшается. Отыскание оптимального компромисса между все-

ми, часто противоречивыми тенденциями, является одной из задач синтеза СУ.

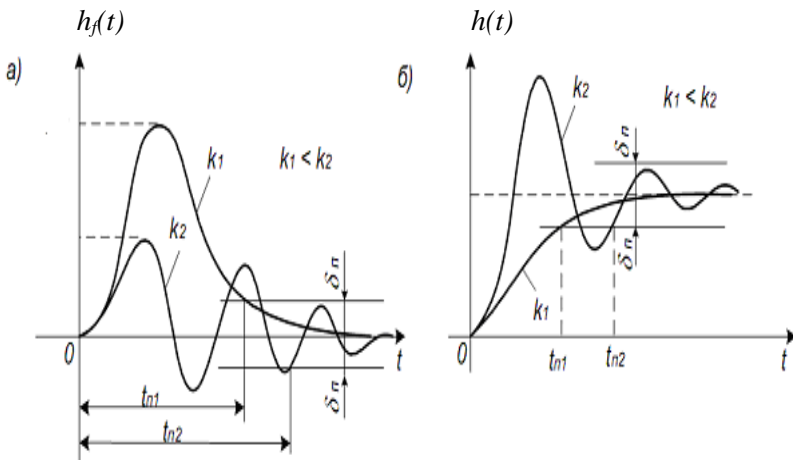


Рис. 4.4. Влияние передаточного коэффициента разомкнутой части системы на показатели переходного процесса: а – по возмущающему воздействию, б – по задающему воздействию

Порядок выполнения работы

1. Запустить MatLab Simulink и в новом окне модели собрать схему вида (рис.4.5) с учетом варианта задания.

Исходные данные по вариантам для выполнения работы приведены в табл.4.1

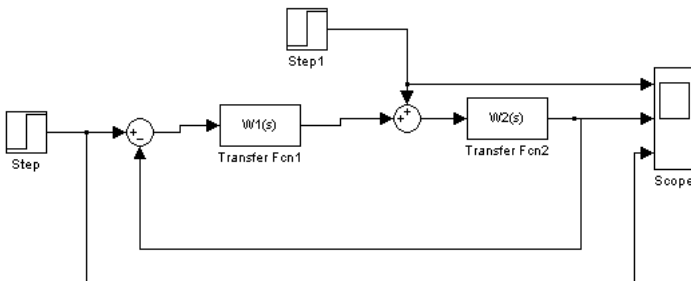


Рис. 4.5. Окно модели

Таблица 4.1

№ варианта	$W_1(s)$	$W_2(s)$
1	10	$1/(5s^2 + 3s + 1)$
2	20	$1/(87s^2 + 5s + 1)$
3	25	$1/(21s^2 + 17s + 1)$
4	30	$1/(2s^2 + s + 2)$
5	35	$1/(7s^2 + 3s + 1)$
6	40	$1/(5s^2 + s + 1)$
7	5	$1/(15s^2 + 30s + 1)$
8	45	$5/(25s^2 + 7s + 5)$
9	2	$3/(3s^2 + 2s + 1)$
10	50	$1/(0.5s^2 + 2s + 1)$
11	80	$1/(0.05s^2 + 0.2s + 1)$
12	100	$1/(0.1s^2 + s + 1)$

2. Установить возмущение равным нулю и снять переходную характеристику по задающему воздействию. По полученному графику оценить показатели качества системы. Изменить значение статического коэффициента $Wl(s)$ в 10 раз в большую и меньшую стороны и для каждого измененного значения получить переходные характеристики и оценки показателей качества. Результаты сравнить и сделать выводы.

3. Установить задающее воздействие равным нулю. Снять переходную характеристику системы по возмущению. По полученному графику оценить показатели качества системы по возмущению. Изменить значение статического коэффициента $Wl(s)$ в 10 раз в большую и меньшую стороны и для каждого измененного значения получить переходные характеристики и оценки показателей качества. Результаты сравнить и сделать выводы.

4. Оформить отчет по работе.

Лабораторная работа № 5

ИМПУЛЬСНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цель работы – с помощью пакета MatLab с расширениями Control System Toolbox и Simulink построить импульсные переходные характеристики объектов, заданных передаточными функциями.

Основные сведения

Импульсная переходная характеристика (ИПХ) описывает реакцию системы на импульсное воздействие в виде дельта-функции при нулевых начальных условиях. Дельта-функция представляет из себя очень узкий импульс, ширина которого стремится к нулю, а высота – к бесконечности, ограничивающий единичную площадь, т.е.

$$\int \delta(t) dt = 1.$$

Существует следующая связь между единичной ступенчатой функцией и дельта-функцией:

$$\frac{d I(t)}{dt} = \delta(t)$$

Переходная и импульсная переходная характеристики называются временными характеристиками. Каждая из них является исчерпывающей характеристикой системы и любого ее звена при нулевых начальных условиях.

Формально ИПХ является оригиналом к передаточной функции, поэтому она неотъемлемая часть временных уравнений системы или элементов.

Экспериментально получить ИПХ довольно затруднительно, т.к. физически реализовать входное воздействие в виде $\delta(t)$ невозможно. Однако, для экспериментального получения оценки ИПХ, можно использовать имитацию $\delta(t)$ в виде очень короткого импульса, который генерируют с помощью импульсного источника сигналов, или дифференцируя единичный ступенчатый сигнал. В результате, на практике можно говорить лишь о приближении реакции системы к ИПХ, т.е. $IХ \approx \text{ИПХ}$.

Исходные данные для выполнения работы приведены в таблице 4.1 к лаб. раб. №4.

Порядок выполнения работы

1. Запустить MatLab Simulink и в новом окне модели собрать схемы вида (рис.5.1)
2. Для блоков Pulse Generator установить параметры (рис.5.2), сформировав таким образом очень короткий импульс.
3. Используя исходные данные к лаб. работе №4, получить графики импульсных характеристик для системы с вариантами передаточных функций $W_1(s)$ и $W_2(s)$, как для задающего воздействия, так и возмущения.
4. Сравнить полученные импульсные характеристики для двух методов получения входного импульса. Подобрать параметры блока Pulse Generator таким образом, чтобы графики были похожи друг на друга.

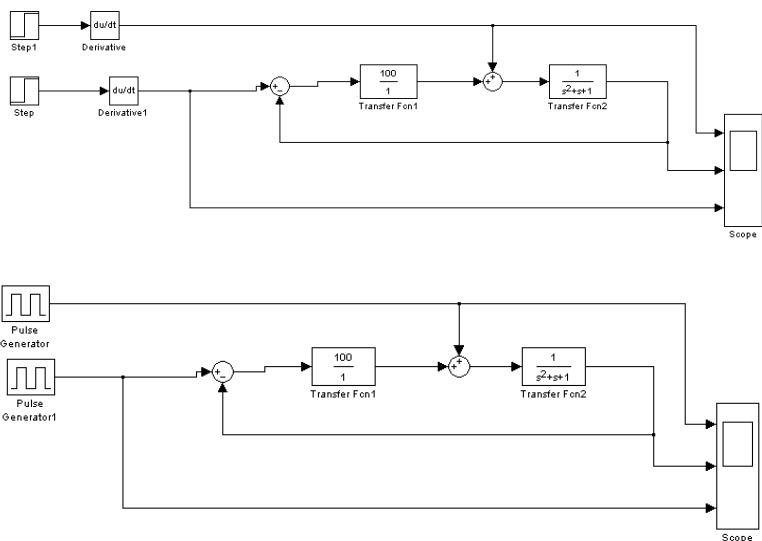


Рис. 5.1. Окно модели с двумя вариантами задания импульсного сигнала

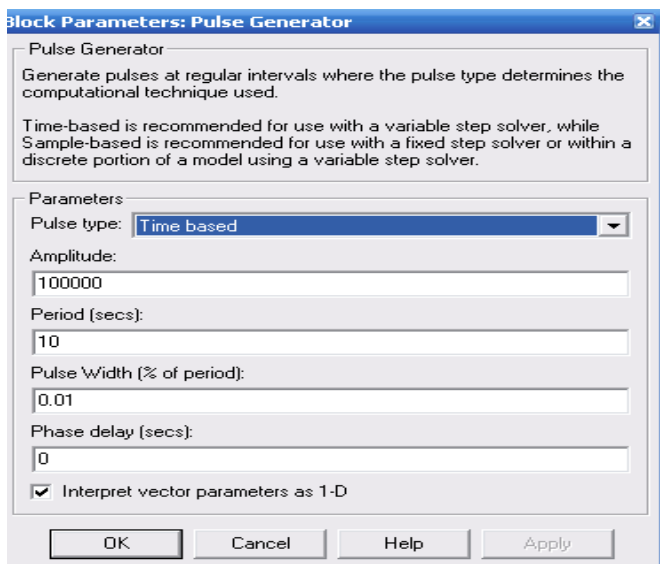


Рис. 5.2. Окно параметров блока Pulse Generator (Period=Time simulation)

5. Изменить значение статического коэффициента $W(s)$ в 10 раз в большую и меньшую стороны и для каждого измененного значения получить импульсные характеристики. Результаты сравнить и сделать выводы.

6. Оформить отчет по работе.

Лабораторная работа № 6

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цель работы – С помощью пакета MatLab с расширениями Control System Toolbox и Simulink экспериментально определить частотные характеристики объектов, заданных передаточными функциями.

Основные сведения

Реакция систем на периодические сигналы определяется различными видами частотных характеристик. Частотные характеристики могут быть получены экспериментальным или аналитическим путем.

При аналитическом определении они могут быть получены из передаточных функций (по управлению или по возмущению), или из соответствующих дифференциальных уравнений. Если задана передаточная функция $W(s)$, то путём подстановки $s=j\omega$ получаем частотную передаточную функцию $W(j\omega)$ или комплексную частотную характеристику т.е.

$$W(j\omega) = W(s) \Big|_{s = j\omega},$$

или

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_0} = \frac{B_{re}(\omega) + jB_{im}(\omega)}{A_{re}(\omega) + jA_{im}(\omega)} = \\ &= U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \end{aligned}$$

где:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{\sqrt{B_{re}^2(\omega) + B_{im}^2(\omega)}}{\sqrt{A_{re}^2(\omega) + A_{im}^2(\omega)}}$$

- амплитудная частотная характеристика, а

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)} = \arctg \frac{B_{im}(\omega)}{B_{re}(\omega)} - \arctg \frac{A_{im}(\omega)}{A_{re}(\omega)}$$

- фазовая частотная характеристика,

Функции $U(\omega)$ и $V(\omega)$ называют соответственно вещественной и мнимой частотными характеристиками.

Частотная передаточная функция $W(j\omega)$ может быть представлена в графическом виде на комплексной плоскости. В этом случае для каждой из частот в диапазоне от 0 до ∞ производится определение вектора на комплексной плоскости и строится его годограф. Годограф будет представлять собой амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ). Таким образом, для определенной частоты, имеем вектор на комплексной плоскости, который характеризуется модулем A и аргументом φ . Модуль представляет собой численное отношение амплитуды выходного гармонического сигнала к амплитуде входного. Аргумент представляет собой сдвиг по фазе выходного сигнала по отношению к входному. При этом отрицательный фазовый сдвиг представляется вращением вектора на комплексной плоскости по часовой стрелке относительно вещественной положительной оси, а положительный фазовый сдвиг представляется вращением против часовой стрелки.

Для упрощения графического представления частотных характеристик, а также для облегчения анализа процессов в частотных областях используются логарифмические частотные характеристики: логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ) и логарифмическая фазовая частотная характеристика (ЛФЧХ). При построении логарифмических характеристик используется логариф-

мическая шкала частот. Пример системы координат для логарифмических характеристик представлен на рис.6.1.

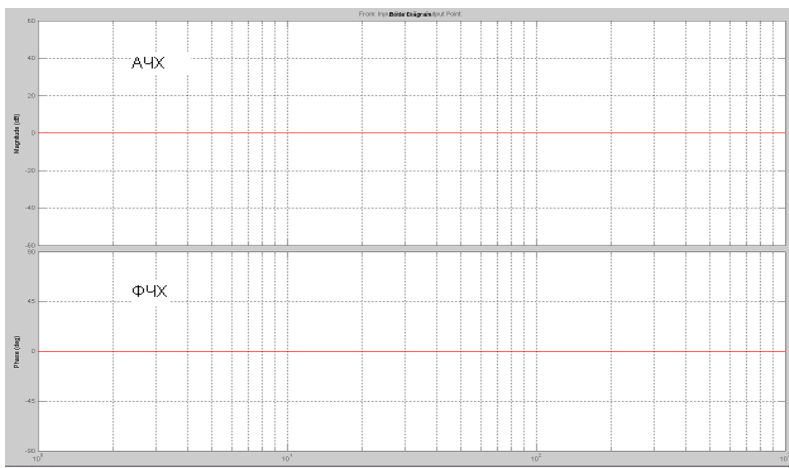


Рис. 6.1. Пример системы координат для логарифмических характеристик

Единицей измерения частоты может служить Герц или рад/с. Для удобства построения графиков на оси частот отмечают интервалы, которые называют декадами. Декада – это интервал частот, соответствующий изменению частоты в 10 раз. На оси ординат для ЛАЧХ откладываются значения $L=20 \lg A(\omega)$. Единицей измерения ординат ЛАЧХ является децибел.

На оси ординат для ЛФЧХ откладываются значения углов в радианах или градусах.

Частотные характеристики широко используются в инженерной практике при анализе и синтезе систем автоматического регулирования.

Особым их достоинством является то, что они могут быть получены экспериментальным путем. Это особенно важно для систем не имеющих математических моделей из-за их сложности или недостаточности данных об этих системах.

Эксперимент по определению частотной характеристики заключается в том, что на вход объекта последовательно подают гармони-

ческие воздействия разных частот с одновременной фиксацией амплитуд и фаз, получая реакции объекта на эти воздействия.

Обработка записей входных и выходных гармонических колебаний позволяет определить значения частотных характеристик на каждой из частот ω_i .

Значения амплитудно-частотной характеристики $A(\omega)$, соответственно, определяются как множество точек отношений $A(\omega_i) = A_{\text{вых}i} / A_{\text{вх}i}$. Затем по точкам строится график АЧХ $A(\omega)$.

Для нахождения фазового сдвига определяют отрезок времени $\Delta T_{\text{пер}}$ между моментами пересечения входным и выходным сигналами оси абсцисс в одном и том же направлении. Тогда значение фазочастотной характеристики на данной частоте определяется по формуле $\varphi(\omega_i) = 2\pi * \Delta T_{\text{пер}i} / T_{\text{пер}i}$.

При разбросе отдельных значений АЧХ на разных частотах ее сглаживают. На практике для этого прибегают к выравниванию точек АЧХ от руки или осуществляют сглаживание частотных характеристик каким-либо аналитическим методом, например с помощью метода наименьших квадратов.

Выполнение работы

Провести экспериментальное определение частотных характеристик $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ двух динамических звеньев по вариантам (табл.6.1) на частотах $\omega_{\text{нач}} - \omega_{\text{кон}}$.

1) Запустить MatLab Simulink и в новом окне модели собрать схему вида (рис.6.2) для проведения эксперимента по снятию частотных характеристик.

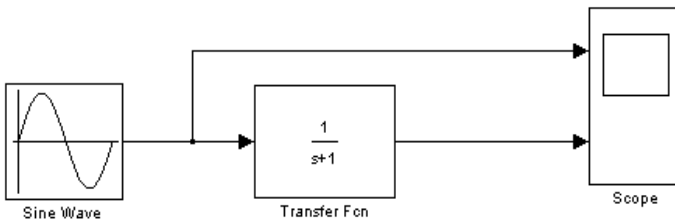


Рис. 6.2. Схема модели в окне Simulink

Таблица 6.1

№	W1(s)	W2(s)	Нач. частота	Кон. частота
1	$1.2/(5s + 1)$	$1.5s/(7s + 1)$	0.1	10
2	$2.7/(8s + 1)$	$5s/(10s + 1)$	0.01	10
3	$1.6/(5.2s + 1)$	$1.4s/(12s + 1)$	0.01	10
4	$0.4/(2s + 1)$	$5.8s/(4.3s + 1)$	0.05	50
5	$3/(5.1s + 1)$	$53.5s/(10s + 1)$	0.01	10
6	$10/(12s + 1)$	$4.5s/(18s + 1)$	0.01	5
7	$23/(14.5s + 1)$	$2.4s/(12.7s + 1)$	0.01	10
8	$9/(4.5s + 1)$	$0.3s/(0.12s + 1)$	0.1	100
9	$2/(5s + 1)$	$6.5s/(14.2s + 1)$	0.02	10
10	$10/(16.4s + 1)$	$6.1s/(45s + 1)$	0.01	10

2. Определить период колебаний $T_{пер}$ соответствующий частоте ω_i . Амплитуду входного сигнала принять равной единице.

3. Определить параметры блока Sine Wave, а именно установить ω_i по варианту из табл.6.1

4. Из анализа графиков $X_{вх}(t)$ и $X_{вых}(t)$ определить $A_{вых_i}$ и $\Delta T_{пер_i}$ (рис.6.3).

5. Вычислить значения $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ на частотах $\omega_{нач} - \omega_{кон}$.

6. Сохранить значения $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ в виде массивов в м-файле и построить графики, используя функцию plot.

7. Построить комплексную частотную характеристику АФЧХ на основании полученных результатов эксперимента.

8. Построить логарифмические частотные характеристики.
9. Оформить отчет.

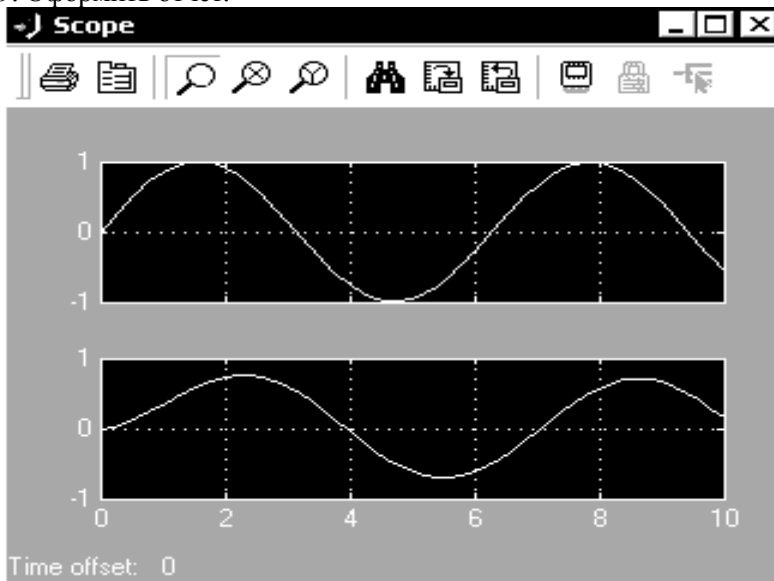


Рис. 6.3. Окно блока Scope с примером для одного воздействия.

Лабораторная работа № 7

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SIMULINK LTI-VIEWER ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ)

Цель работы – изучить инструмент пакета MatLab Simulink LTI-Viewer.

Исходные данные для выполнения работы приведены в табл.4.1(см. лаб. раб. №4).

Основные сведения

Инструмент Simulink LTI-Viewer входит в состав пакета прикладных программ Control System Toolbox и предназначен для анализа линейных стационарных систем. С помощью данного инструмента можно легко получить полный набор характеристик.

Краткий алгоритм работы с Simulink LTI-Viewer приведен ниже.

1. Выполнить команду Tools\Linear Analysis... окна Simulink-модели.

В результате выполнения команды откроется окно Model_Inputs_and_Outputs как это показано на рис. 7.1, а также пустое окно Simulink LTI-Viewer .

2. Установить блок Input Point на входе и блок Output Point на выходе исследуемой системы, как это показано на рис. 7.2.

3. В окне LTI Viewer выполнить команду Simulink\Get Linearized Model.

Данная команда выполняет линейризацию модели и строит реакцию системы на единичное ступенчатое воздействие. Пример результата выполнения данного пункта показан на рис. 7.3.

Если система имеет несколько входов и выходов и для всех них установлены блоки Input Point и Output Point, то на графике будет отображено несколько окон показывающих реакцию на каждом выходе при воздействии на каждый вход.

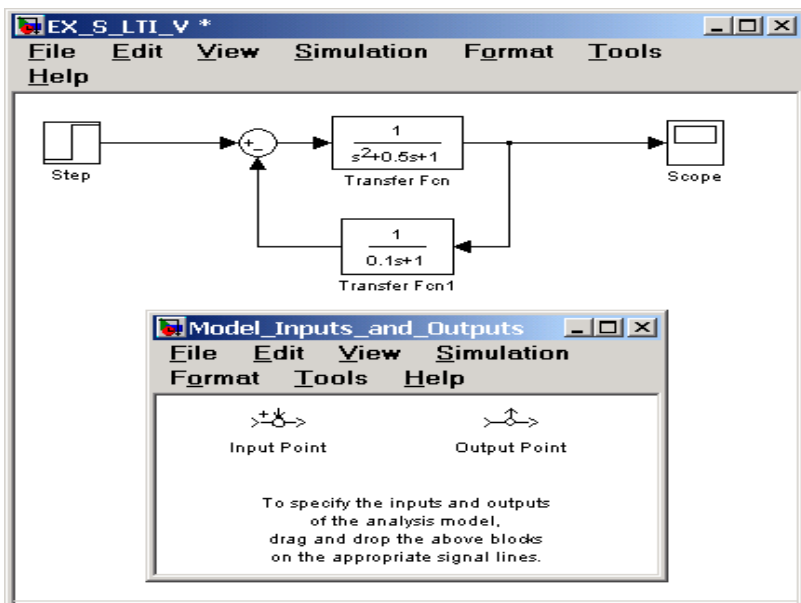


Рис. 7.1. Исследуемая модель и окно Model_Inputs_and_Outputs инструмента Simulink LTI-Viewer

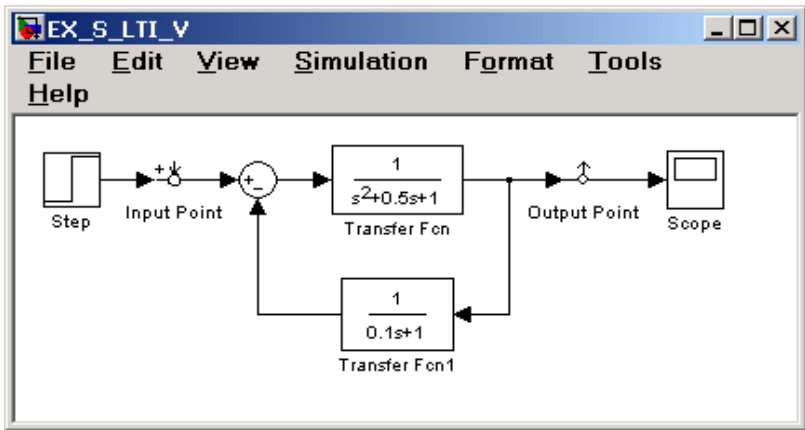


Рис. 7.2. Исследуемая модель с установленными блоками Input Point и Output Point

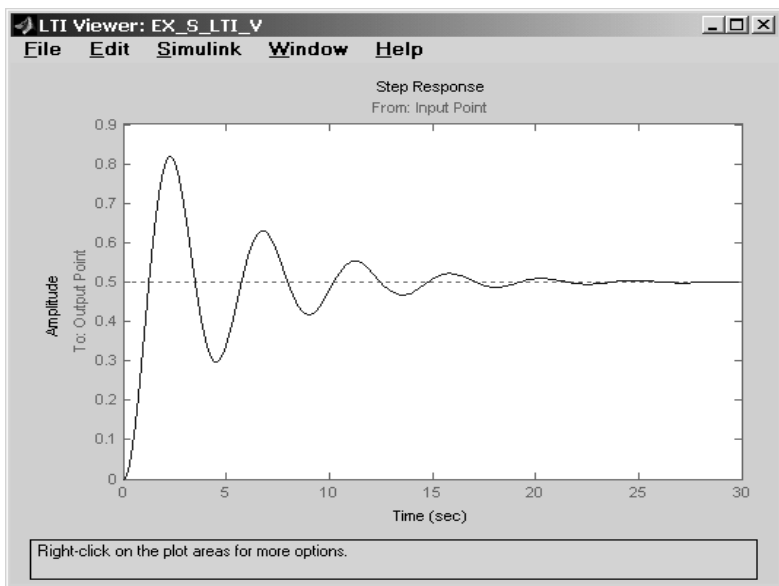


Рис. 7.3. Пример реакции системы на единичное ступенчатое воздействие (переходная характеристика)

4. Для получения остальных характеристик системы необходимо выполнить команду Edit\Plot Configuration... в окне LTI Viewer. В результате выполнения этой команды откроется окно Plot Configuration, показанное на рис. 7.4.

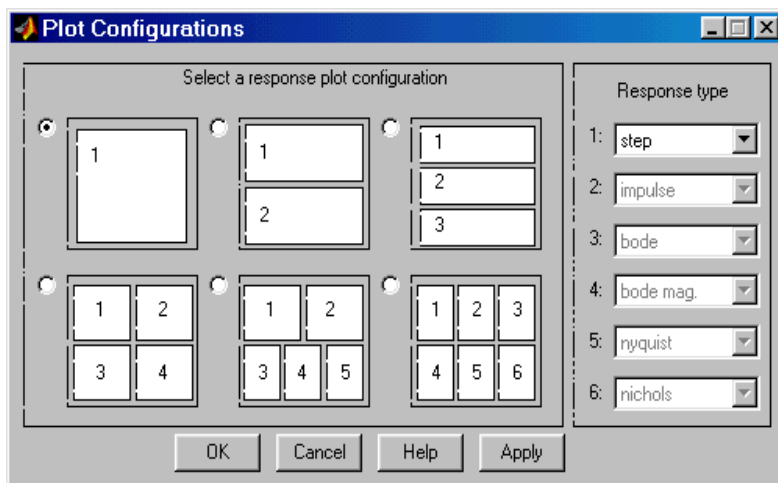


Рис. 7.4. Окно Plot Configuration

В открывшемся окне можно выбрать число отображаемых графиков (панель Select a response plot configuration) и вид отображаемых графиков (панель Response type).

Для построения доступны следующие графики (диаграммы):

- step – Реакция на единичное ступенчатое воздействие.
- impulse – Реакция на единичное импульсное воздействие.
- bode – Амплитудная и фазовая частотные характеристики.
- bode mag – Амплитудная частотная характеристика.
- nyquist – Диаграмма Найквиста.
- nichols – Годограф Николса.
- sigma – Сингулярные числа.
- pole/zero – Нули и полюса системы.

На рис.7.5 приведен пример окна Simulink LTI-Viewer с несколькими различными характеристиками исследуемой системы.

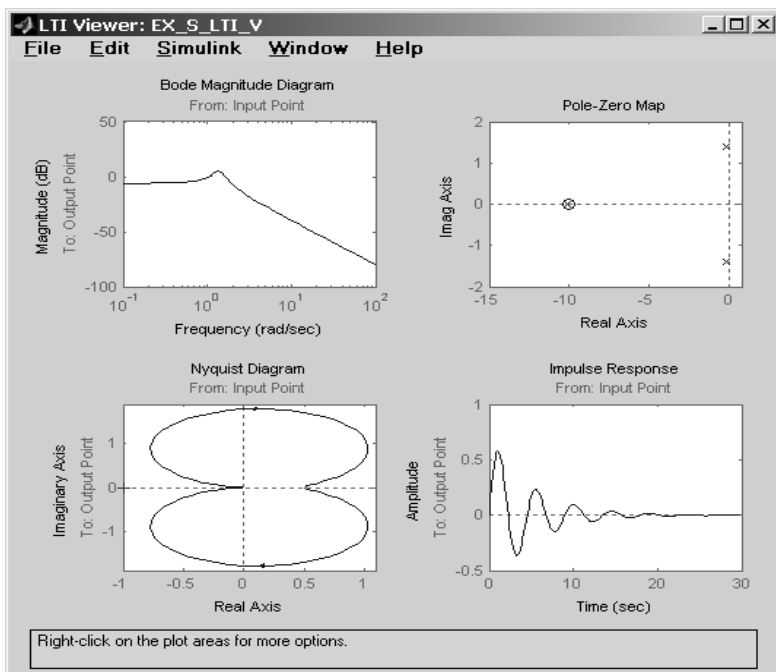


Рис. 7.5. Окно Simulink LTI-Viewer с несколькими графиками.

5. Настройку внешнего вида графиков можно выполнить с помощью команды `Edit\Line Styles...` (установка вида и цвета линий, вида маркеров).

2. Настройка Simulink LTI-Viewer

С помощью команды `Edit\Viewer Preferences...` выполняются следующие виды настройки:

1. Установка единиц измерения (вкладка `Units`). Вид окна при настройке единиц измерения показан на рис. 7.6.

Вкладка `Units` окна позволяет задать единицы измерения частоты (рад/с или Гц), уровня (dB или абсолютные единицы), фазы (градусы или радианы), а также установить вид шкалы частоты (логарифмический или линейный).

2. Установка стиля графиков (рис.7.7). На данной вкладке можно выполнить настройку шрифтов окна Simulink LTI-Viewer (панель

Fonts), выбрать цвет осей графиков (панель Colors), а также задать нанесение линий сетки на графики (флажок Show grids).

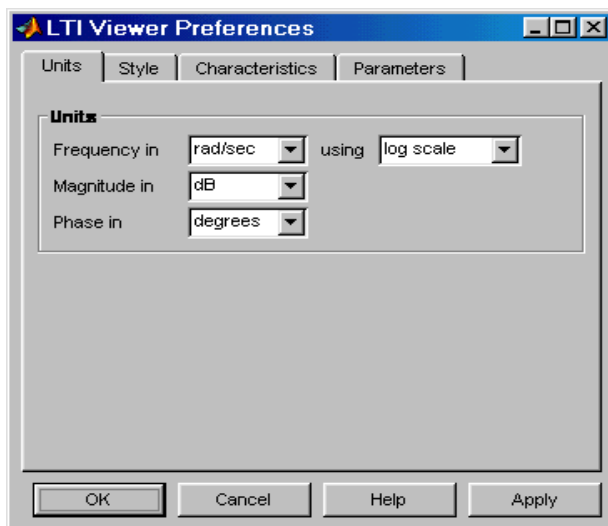


Рис. 7.6. Вкладка Units

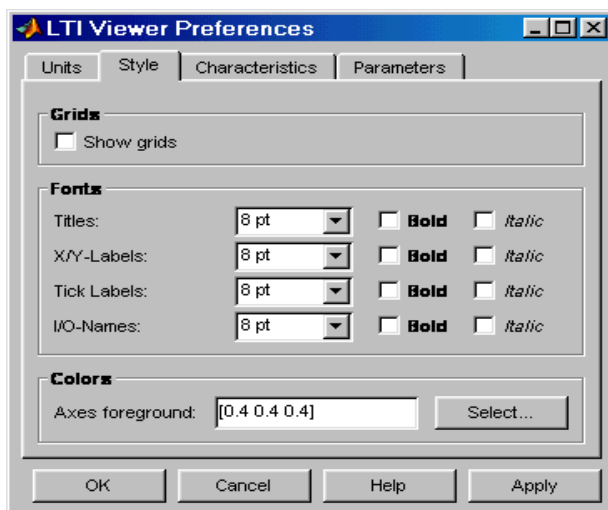


Рис. 7.7. Вкладка Style

3. Установка параметров расчета переходного процесса (вкладка Characteristics, рис. 7.8).

Данная вкладка позволяет задать параметры установленные по умолчанию для вычисления времени нарастания и времени переходного процесса. По умолчанию Simulink LTI-Viewer вычисляет время переходного процесса как время, когда переходная функция входит в 2 % зону относительно установившегося значения и больше не выходит из нее (параметр Show setting time within).

Изменить параметры для вычисления времени нарастания переходного процесса можно в окне «Show rise time from».

На данной вкладке имеется флажок Unwrap phase, установка которого позволяет избежать разрывов в фазо-частотной характеристике, связанных с областью определения функции arctg, вычисляющей фазовый сдвиг.

4. Установка интервалов времени и частоты (вкладка Parameters). На данной вкладке задается временной интервал для расчета переходного процесса (панель Time Vector), а также интервал частот для расчета частотных характеристик (панель Frequency Vector). Внешний вид вкладки Parameters показан на рис.7.9.

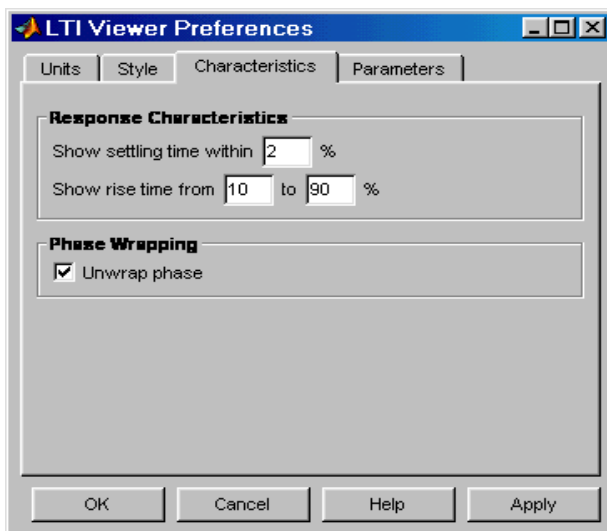


Рис. 7.8. Вкладка Characteristics

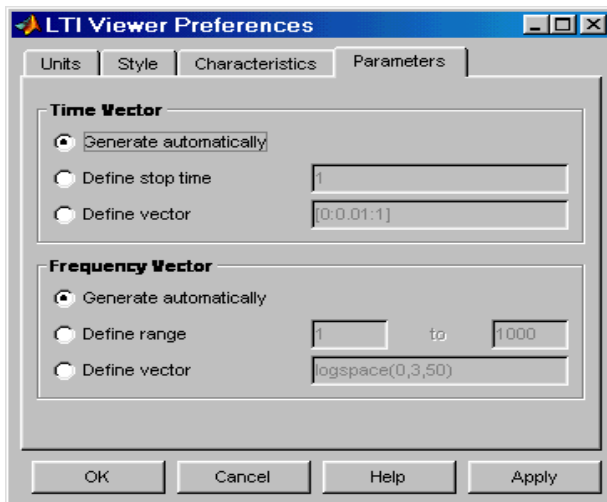
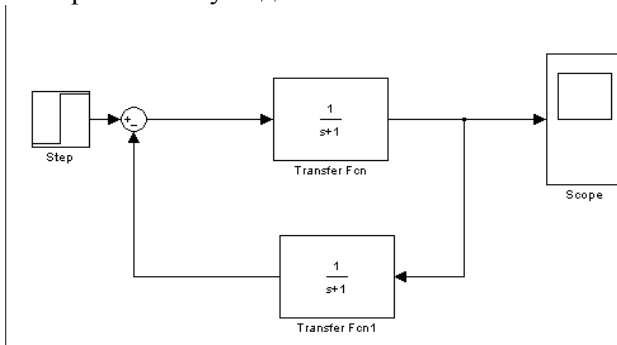


Рис 7.9. Вкладка Parameters

Векторы времени и частоты можно вычислять в автоматическом режиме (Generate automatically), ввести конкретное значение для времени окончания расчета (Define stop time) или диапазон значений по частоте (Define range), либо задать непосредственно вектор значений времени или частоты (Define vector).

Выполнение работы

1. Построить схему вида:



2. Вести значения коэффициентов для блоков TF и TF1 по варианту из табл.4.1.
3. Запустить «Линейный анализ».
4. Установить на схеме точки входа и выхода.
5. Получить линейную модель.
6. Создать несколько окон, в разных окнах расположить все возможные варианты характеристик выбранного участка схемы.
7. Изменить параметры для вычисления времени переходного процесса.
8. Форматировать модель, изменить надписи, изменить параметры вида и стиль графиков.
9. Найти особые точки переходных процессов.
10. Изменить вид шкал (логарифмический или линейный) для частотных характеристик, сравнить их графики.
11. Оформить отчет.

Лабораторная работа № 8

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

Цель работы – изучить правила преобразования структурных схем.

Основные сведения

Для наглядного представления сложной системы как совокупности элементов и связей между ними используются структурные схемы.

Структурной схемой называется схема САУ, изображенная в виде соединения составляющих ее звеньев. Структурная схема показывает строение автоматической системы, наличие внешних воздействий и точки их приложения, пути распространения воздействий и выходную величину. Динамическое или статическое звено изображается прямоугольником, в котором указывается ПФ звена или другая математическая модель.

Воздействия на систему и влияние звеньев друг на друга (сигналы) изображаются стрелками. В каждом звене воздействие передается только от входа звена к его выходу. На элементарное динамическое звено может воздействовать лишь одна входная величина, поэтому используются блоки суммирования и сравнения сигналов. Суммироваться и сравниваться могут лишь сигналы одной и той же физической природы.

При составлении структурной схемы удобно начинать с изображения задающего воздействия и располагать динамические звенья, составляющие прямую цепь системы, слева направо до регулируемой величины. Тогда основная обратная связь и местные обратные связи будут направлены справа налево.

Преобразование структурной схемы должно осуществляться на основании правил. Правила преобразования структурных схем можно найти в справочной литературе, основные из них приведены в табл.8.1.

При выполнении преобразований следует каждое имеющееся в схеме типовое соединение заменить эквивалентным звеном. Затем можно выполнить перенос точек разветвления и сумматоров, чтобы в преобразованной схеме образовались новые типовые соединения звеньев. Эти соединения опять заменяются эквивалентными звеньями, затем вновь может потребоваться перенос точек разветвления и сумматоров и т. д.

Пример.

Пусть необходимо получить эквивалентное представление для структуры, приведенной на рис.8.1

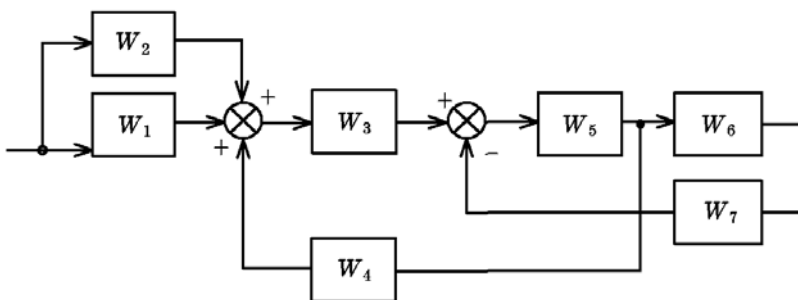


Рис. 8.1. Исходная структура САУ

Таблица 8.1

Преобразование	Структурная схема	
	Исходная	Эквивалентная
Свертывание последовательного соединения		$W = W_1 W_2 \dots W_n$
Свертывание параллельного соединения		$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n$
Свертывание обратной связи		$W = \frac{W_1}{1 \pm W_1 W_2}$
Перенос узла через звено вперед		$W_1 = \frac{1}{W}$
Перенос узла через звено назад		
Перенос сумматора через звено вперед		
Перенос сумматора через звено назад		$W_1 = \frac{1}{W}$

Преобразование включает несколько этапов, показанных на рис.8.2 – 8.4.

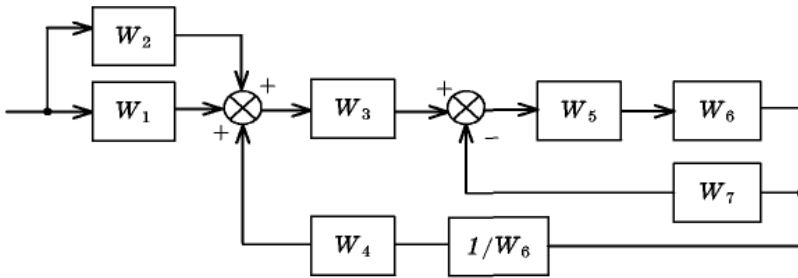


Рис. 8.2. Перенос точки съема через элемент W6

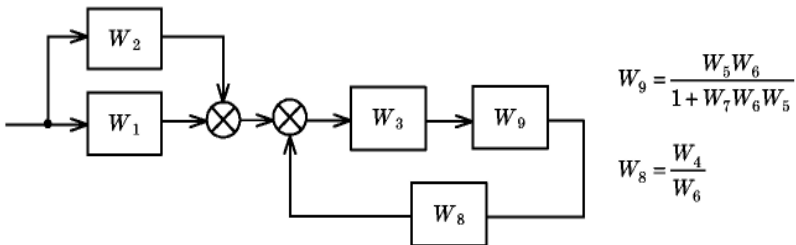


Рис. 8.3. Свертывание обратной связи и последовательного соединения

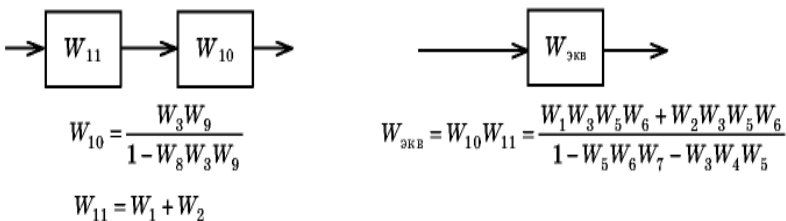


Рис. 8.4. Свертывание обратной связи и параллельного соединения и получение эквивалентной ПФ путем свертывания последовательного соединения

Использование пакета MatLab

В пакете MatLab имеется ряд функций, с помощью которых можно выполнять структурные преобразования:

`series(w1 ,w2)` — последовательное соединение динамических звеньев;

`parallel(w1,w2)` — параллельное соединение динамических звеньев;

`feedback(w1,w2)` — включение звена w_2 в контур отрицательной обратной связи к звену w_1 ;

`feedback(w1,w2,sign)` — включение звена w_2 в контур обратной связи звена w_1 с указанием знака.

Если параметр *sign* отсутствует, то по умолчанию считается, что задана отрицательная обратная связь, а если $sign = 1$, то обратная связь – положительная.

Примеры использования перечисленных функций в командной строке MatLab или в тексте М-файла.

1) `>>w=tf([1 2],[1 2 2])`

Transfer function:

$$\frac{s+2}{s^2+2s+2}$$

2) `>>w1=tf([1 2 3],[1 2 2])`

Transfer function:

$$\frac{s^2+2s+3}{s^2+2s+2}$$

3) `>>w2=series(w,w1)`

Transfer function:

$$\frac{s^3+4s^2+7s+6}{s^4+4s^3+8s^2+4}$$

4) `>>w3=parallel(w,w1)`

Transfer function:

$$\frac{s^4+5s^3+13s^2+16s+10}{s^4+4s^3+8s^2+8s+4}$$

5) $\gg w4 = \text{feedback}(w, w1)$

Transfer function:

$$\frac{s^3+4s^2+6s+4}{s^4+5s^3+12s^2+15s+10}$$

Для проверки правильности проведенных преобразований необходимо смоделировать исходную и конечную (после преобразований) структуры в MatLab Simulink.

Задача считается решенной, если при подаче на вход обеих структур одинаковых тестовых воздействий наблюдаются одинаковые выходные сигналы.

Задание

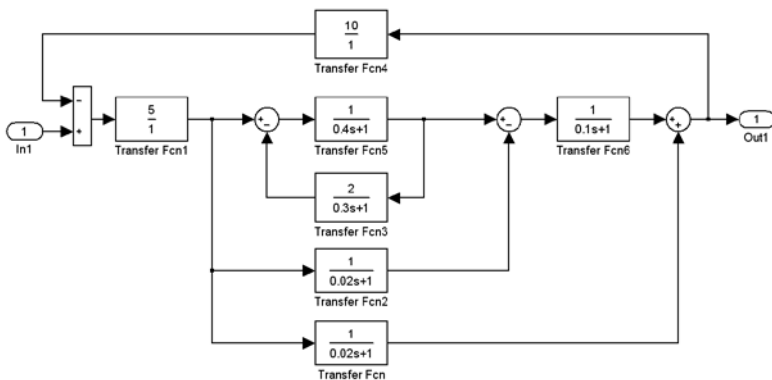
1. Выполнить преобразование заданного варианта структурной схемы рис.8.5 в эквивалентную ПФ, используя правила табл.8.1.
2. Исследовать временные характеристики исходной структуры и эквивалентной в процессе преобразований. Убедиться, что на каждом шаге преобразований характеристики не меняются.
3. Составить отчет по работе.

Содержание отчета по лабораторной работе

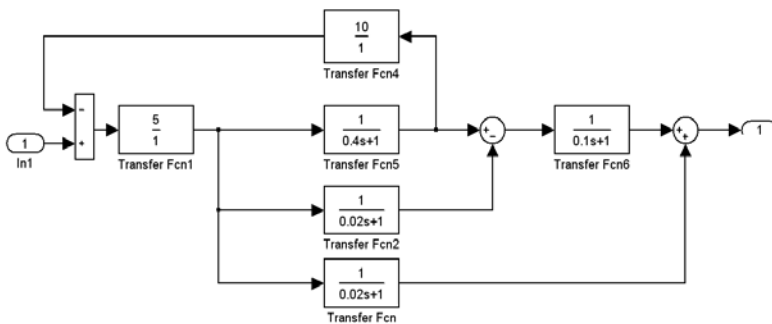
Описание всех этапов преобразования исходной схемы и получающихся промежуточных результатов, включающее моделирование реакции схемы на типовое единичное ступенчатое воздействие до и после преобразования.

Структуры моделей пошаговых преобразований в Simulink MatLab и протокол команд MatLab;

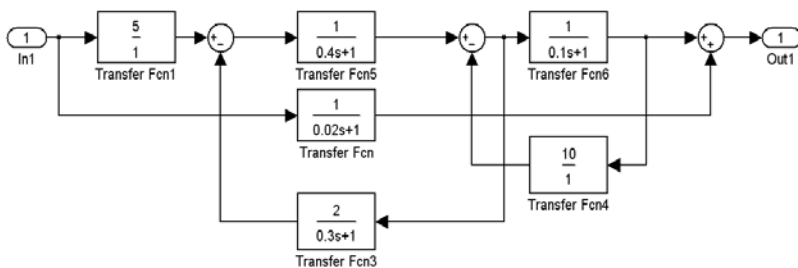
Графики процессов при подаче на вход исходной и эквивалентной схемы типовых тестирующих воздействий (импульсное, скачок, синусоида).



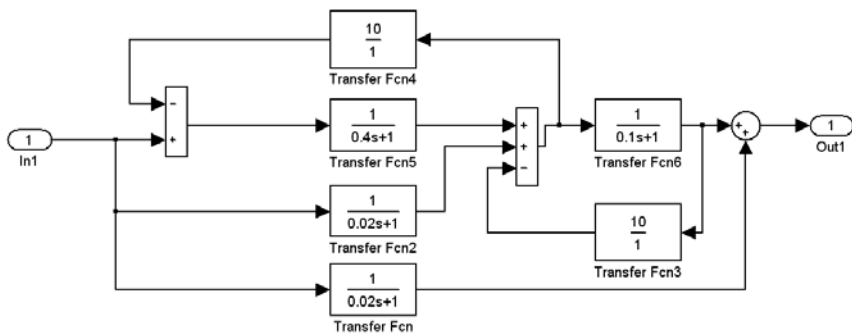
a)



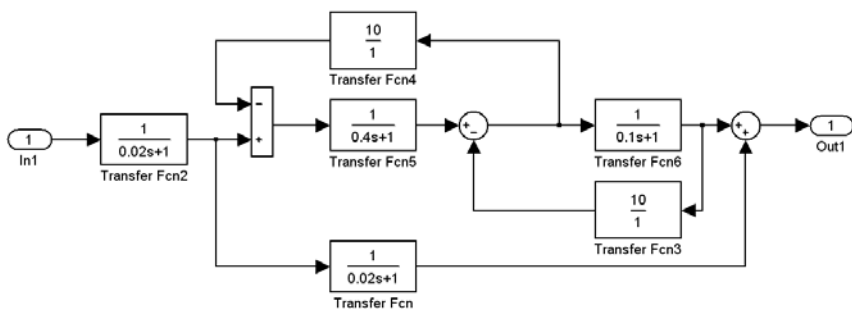
b)



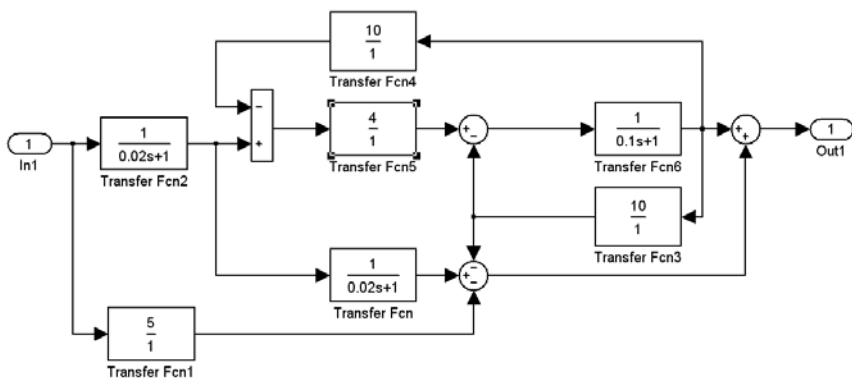
B)



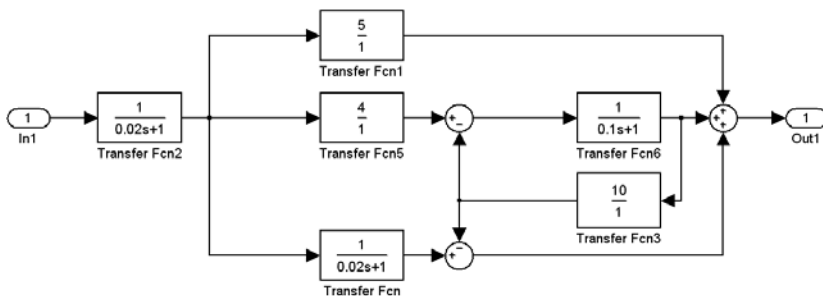
Г)



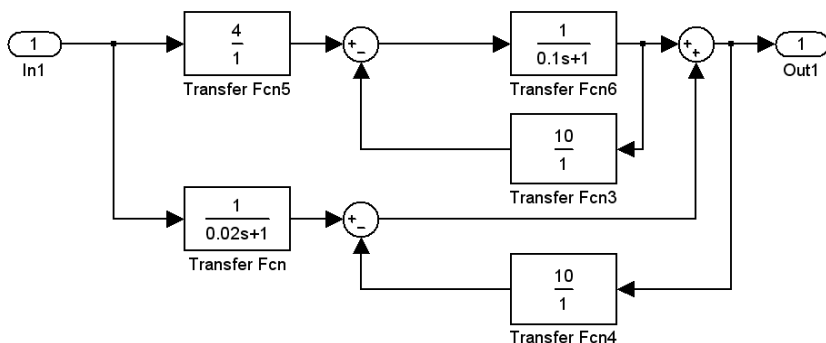
Д)



е)



ж)



з)

Рис. 8.5. Варианты исходных структурных схем

Лабораторная работа № 9

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ

Цель работы – изучить основные виды типовых динамических звеньев и их характеристики во временной области.

Основные сведения

К типовым звеньям систем автоматического управления и регулирования относят простейшие элементы с математическими моделями в виде дифференциальных уравнений не выше второго порядка.

Основные типы звеньев делятся на идеальные, которые физически не реализуются, и реальные.

Позиционными звеньями называются такие, в передаточной функции которых многочлены числителя и знаменателя имеют свободные члены, т. е. эти звенья обладают статической характеристикой $y=kx$ (при $s = 0$), определяющей их состояние равновесия (свойство позиционности).

У дифференцирующих звеньев в передаточной функции отсутствует свободный член числителя, а у интегрирующих – знаменателя.

Знание характеристик типовых звеньев столь же необходимо для расчетов систем управления, как знание таблицы умножения.

Существуют еще так называемые неминимально-фазовые звенья, к которым относят прежде всего неустойчивые звенья, у которых полином знаменателя передаточной функции имеет хотя бы один корень с положительной вещественной частью.

В табл. 9.1 приведены передаточные функции основных типовых динамических звеньев.

Использование пакета MatLab

В пакете MatLab имеется два основных варианта для исследования передаточных функций и моделирования САУ:

- использование команд пакета расширения Control System Toolbox;
- использование пакета Simulink.

Control System Toolbox предназначен для работы с ЛТИ-моделями (Linear Time Invariant Models – линейные модели с постоянными параметрами) систем управления.

Команда, создающая ЛТИ-систему с одним входом и одним выходом в виде передаточной функции, имеет следующий синтаксис:

$$TF([b_m, \dots, b_1, b_0], [a_n, \dots, a_1, a_0]),$$

где b_m, \dots, b_1, b_0 и a_n, \dots, a_1, a_0 – значения коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции.

Таблица 9.1

Название звена	Передаточная функция звена
Интегрирующее	$W(s) = \frac{K}{s}$
Дифференцирующее	$W(s) = Ks$
Пропорциональное (усилительное безинерционное)	$W(s) = K$
Апериодическое 1-го порядка	$W(s) = \frac{K}{Ts + 1}$
Апериодическое 2-го порядка	$W(s) = \frac{K}{a_2 s^2 + a_1 s + 1};$ $a_1 = T_1 + T_2, a_2 = T_1 T_2$
Колебательное	$W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}; 0 \leq \xi \leq 1,$ Где ξ – относительный коэффициент затухания
Реальное дифференцирующее	$W(s) = \frac{Ks}{Ts + 1}$
Форсирующее	$W(s) = K(Ts + 1)$
Запаздывания	$W(s) = e^{-\tau \times s}$

Например, если требуется задать в MatLab ПФ вида

$$W = (s + 1) / (2s^2 + 8s + 5)$$

и узнать значения ее нулей и полюсов, то в командной строке нужно набрать следующую последовательность:

```
>>w=tf([1 1],[2 8 5])
>>zero(w)
>>pole(w).
```

В результате появится окно с графиком распределения особых точек заданной передаточной функции.

Получить реакцию ЛТИ-модели на типовые входные воздействия можно с помощью команд:

```
>>step(w)
>>impulse(w)
```

В одном окне изобразить графики нескольких реакций одновременно можно командой

```
>>step(w,w1,w2)
```

где w , $w1$, $w2$ – передаточные функции звеньев, определенные ранее в соответствии с указанным выше синтаксисом.

Задание

1. С помощью пакета MatLab построить графики реакций каждого типового звена (см. табл. 9.1) на ступенчатое и импульсное входное воздействие.

2. Изменить значения параметров звеньев в большую и меньшую стороны в несколько раз и для звеньев с измененными параметрами также построить временные характеристики.

2. Оценить влияние значений параметров звеньев на вид переходных и импульсных переходных характеристик. Исходные параметры звеньев по вариантам приведены в табл. 9.2.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Передаточные функции и схемы моделирования исследуемых звеньев.
2. Временные характеристики звеньев с исходными параметрами и при их вариации для каждого звена.
3. Выводы, отражающие степень влияния значений параметров звеньев на вид временных характеристик по каждому звену.

Таблица 9.2

№ варианта/ тип.элемент		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
пропорциональный	K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
интегрирующий	K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
дифференц.	K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
форсирующий	K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
апериодический	K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
апериодич. 2-го пор.	K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	T_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	T_2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
колебательный	K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$\xi * 10$	1	2	3	4	5	6	7	3	2	1
запаздывания	τ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
реальн. диф-ий	K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Лабораторная работа № 10

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ

Цель работы – изучить частотные характеристики типовых динамических звеньев.

Основные сведения

Частотные характеристики типовых звеньев показывают, как они преобразуют входные гармонические сигналы разных частот. Частотные характеристики позволяют наглядно представить динамические свойства системы, состоящей из типовых элементов.

Полный набор частотных характеристик можно получить аналитически из известной передаточной функции

Например, построим частотные характеристики аperiodического звена первого порядка.

Передаточная функция звена

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

Комплексная частотная характеристика (АФЧХ) получится из передаточной функции заменой переменной s на $j\omega$, где ω - круговая частота.

$$W(j\omega) = W(s) \Big|_{s=j\omega} = \frac{k}{1 + j\omega T} = \frac{k(1 - j\omega T)}{1 + \omega^2 T^2}.$$

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

График АФЧХ строится на комплексной плоскости (Рис.10.1.), где по осям откладываются значения $U(\omega)$ и $V(\omega)$.

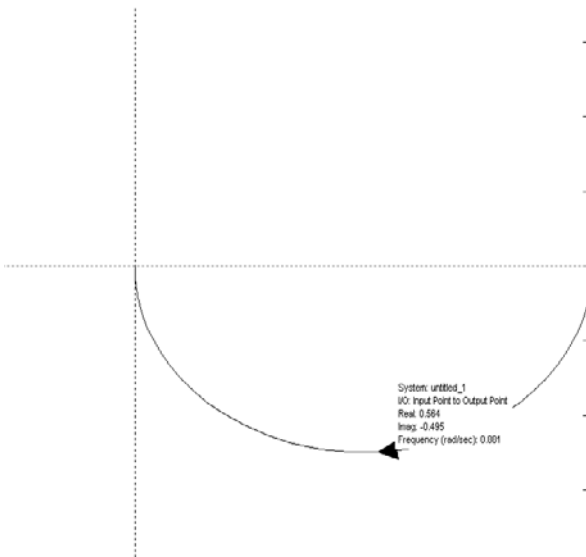


Рис. 10.1. АФЧХ аperiodического звена

Амплитудная частотная характеристика (АЧХ) является модулем, а фазовая (ФЧХ) аргументом комплексной частотной характеристики, т.е.

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

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} - \omega T .$$

Соответствующие графики показаны на рис.10.2.

Особо широко в инженерной практике используются логарифмические частотные характеристики.

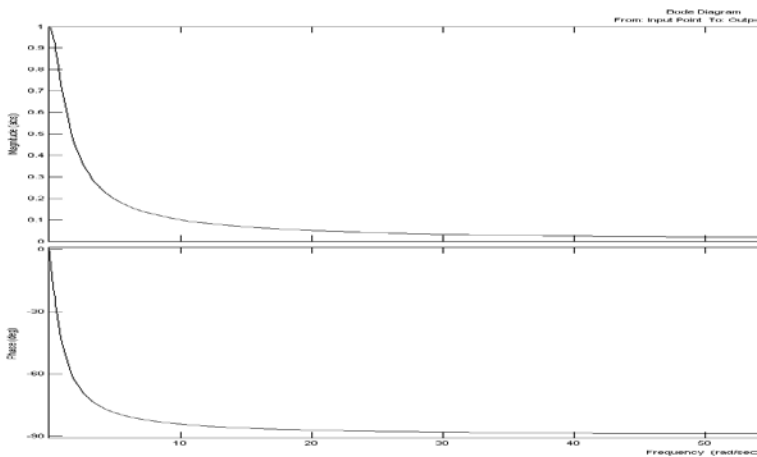


Рис.10.2. АЧХ и ФЧХ аperiodического звена

Для аperiodического звена ЛАЧХ определяется формулой

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

График ЛАЧХ строится в полулогарифмической системе координат, как показано на рис.10.3.

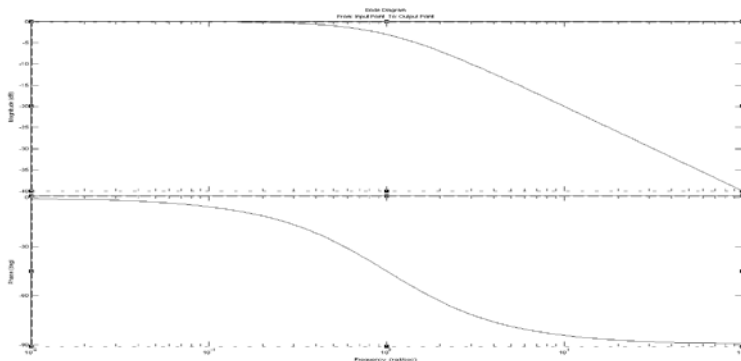


Рис.10.3. ЛАЧХ и ЛФЧХ аperiodического звена.

Использование пакета MatLab

В пакете MatLab частотные характеристики объекта, заданного с помощью ПФ, можно получить командой `bode`.

Пример:

```
>> w=tf([1 2],[3 4 5])  
>> bode(w)
```

Для нескольких вариантов передаточной функции можно использовать вариант команды вида:

```
>> bode(w,w1,w2)
```

Например, построим диаграмму Бode при различных параметрах колебательного звена (рис. 1):

```
>> w=tf([1],[2 0.3 1]);  
>> w1=tf([1],[2 0.5 1]);  
>> w2=tf([1],[2 0.1 1]);  
>> bode(w,w1,w2)
```

Задание.

С помощью пакета MatLab построить АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ, ЛФЧХ каждого типового звена (см. табл. лабораторной работы № 9).

Определить влияние коэффициентов, входящих в описание каждого звена, на вид частотных характеристик, в том числе:

- как меняется ширина асимптотических участков ЛАЧХ и ЛФЧХ;
- как меняется положение точек пересечения осей ЛАЧХ.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. В пакете MatLab сформировать проекты, соответствующие всем физически реализуемым типовым звеньям из таблиц 9.1 и 9.2.

2. Получить полный набор частотных характеристик для всех звеньев при вариации параметров каждого звена.

Лабораторная работа № 11

УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Цель работы – изучить различные критерии устойчивости и исследовать устойчивость замкнутой САУ.

Основные сведения

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.

Впервые свойства устойчивости были исследованы русским ученым А. М. Ляпуновым в 1892 г. в работе «Общая задача об устойчивости движения». 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 и критерий Михайлова.

Критерий Гурвица

Критерий Гурвица является алгебраическим критерием и применяется к коэффициентам характеристического уравнения замкнутой системы.

Пусть имеется характеристическое уравнение замкнутой системы:

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

Из коэффициентов характеристического уравнения составляют матрицу по правилу.

- 1) По диагонали записываются коэффициенты от a_{n-1} до a_0 .
- 2) Каждая строка дополняется коэффициентами с возрастающими индексами слева направо так, чтобы чередовались строки с нечетными и четными индексами.
- 3) В случае отсутствия индекса, а также, если он меньше 0 или больше n , на его место пишется 0.

Таким образом, матрица Гурвица приобретает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_2 & a_0 \end{bmatrix}.$$

Критерий устойчивости формулируется так:

Чтобы система была устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы, при положительности всех коэффициентов характеристического

многочлена, все n главных миноров, получаемых из матрицы Гурвица, где n – степень характеристического многочлена, были также положительны.

Первые три минора матрицы Гурвица имеют следующий вид:

$$\Delta_1 = a_{n-1}; \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix}; \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}.$$

Частотный критерий устойчивости Найквиста

Частотный критерий устойчивости Найквиста анализирует АФЧХ разомкнутой системы с целью определения устойчивости замкнутой системы с единичной обратной связью.

Пусть имеется комплексная частотная характеристика (АФЧХ) разомкнутой системы $W_p(j\omega)$.

Для нахождения вещественной и мнимой части АФЧХ нужно освободиться от мнимости в знаменателе путем умножения числителя и знаменателя на комплексную величину, сопряженную знаменателю, а затем выполнить деление на вещественную и мнимую частотные характеристики, т.е.

$$W_p(j\omega) = U_p(\omega) + jV_p(\omega).$$

Задаваясь различными значениями частоты, можно найти множество пар: $\{U_p(\omega_1); jV_p(\omega_1)\}$, $\{U_p(\omega_2); jV_p(\omega_2)\}$, ..., $\{U_p(\omega_{\max}); jV_p(\omega_{\max})\}$. Затем по этим парам строится годограф вектора АФЧХ на комплексной плоскости.

Если разомкнутая система не имеет в своей структуре последовательных интегрирующих звеньев, то при $\omega = 0$ ее АФЧХ начинается на вещественной оси в точке $U_p(0) = K$ (где K – коэффициент усиления разомкнутой системы). Заканчивается АФЧХ в начале координат при $\omega \rightarrow \infty$ (рис. 11.1, а).

Если разомкнутая система имеет одно последовательное 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. 11.1, б).

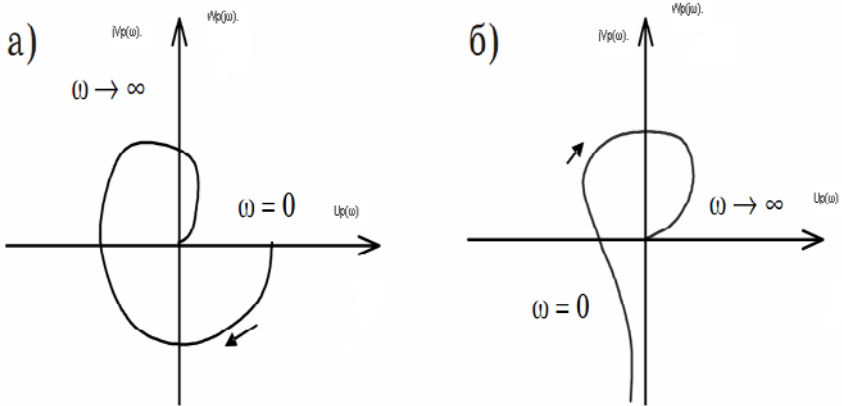


Рис.11.1. Примеры АФЧХ разомкнутой системы

Критерий устойчивости Найквиста формулируется в двух вариантах.

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 r полюсов справа от мнимой оси на комплексной плоскости, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы при изменении частоты ω от $-\infty$ до $+\infty$ охватывала $r/2$ 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 ($0 \leq \omega < +\infty$). При применении критерия Найквиста считается, что ветвь АФЧХ для отрицательных частот симметрична относительно вещественной оси.

Физический смысл критерия устойчивости Найквиста заключается в том, что система будет неустойчива, если фаза выходного сигнала противоположна фазе входного сигнала, а коэффициент усиления > 1 . Поэтому для анализа устойчивости можно использовать не АФЧХ, а ЛАЧХ разомкнутой 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 $-\pi$.

Критерий устойчивости Михайлова

Для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы годограф Михайлова (Рис.11.2) начинался на вещественной положительной полуоси и при изменении частоты от 0 до бесконечности последовательно проходил в положительном направлении (против часовой стрелки) нигде не обращаясь в нуль число квадрантов комплексной плоскости равно степени характеристического полинома замкнутой системы.

Для критерия Михайлова необходим характеристический полином, получаемый из знаменателя передаточной функции замкнутой системы.

$$Q(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0$$

Если подставить в этот полином чисто мнимое значение $s=j\omega$, то получим вектор Михайлова

$$M(j\omega) = a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_0 = U(\omega) + jV(\omega).$$

Практически годограф Михайлова (рис.11.2) строится по точкам. Задавая несколько разных значений ω от 0 до ∞ , по формулам для $U(\omega)$ и $V(\omega)$ вычисляют для каждого из них координаты точек годографа Михайлова по осям U и V . Поэтому вдоль кривой Михайлова обычно имеются отметки конкретных значений ω .

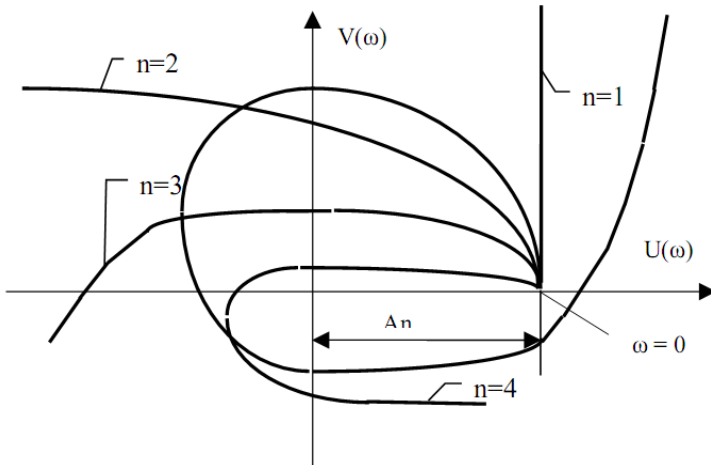


Рис. 11.2. Примеры годографа Михайлова

Использование пакета MatLab

1. Для проверки устойчивости САУ по **Гурвицу** необходимо построить матрицу Гурвица и найти ее детерминант (функция `det`). Затем, последовательно уменьшая размер матрицы, найдите значения всех диагональных миноров.

Пример:

```
>> A=[1 14 18; 2 5 2; 3 4 3]
```

```
A =
```

```

1 14 18
2 5 2
3 4 3
>> det(A)
ans = -119
>> A1=A(1:2, 1:2)
A1 =
1 14
2 5
>> det(A1)
ans = - 23

```

2. Для проверки устойчивости по **Найквисту** сначала нужно выяснить, является ли устойчивой разомкнутая система, что проще всего сделать по переходной характеристике.

Пример:

Пусть дана передаточная функция разомкнутой системы

$$W = \frac{2p + 1}{2p^4 + 3p^3 + 2p^2 + 3p + 1}$$

Получим переходную характеристику

```

>> w=tf([2 1],[2 3 2 3 1])
>> step(w)

```

График переходного процесса (рис.11.3) показывает, что разомкнутая система неустойчива. Тогда, согласно критерию Найквиста, для устойчивости замкнутой системы необходимо, чтобы АФЧХ разомкнутой системы охватывала точку $-1, j0$ столько раз, сколько полюсов имеется справа от мнимой оси.

Для построения АФЧХ достаточно вызвать команду `nyquist`

```

>> nyquist(w)

```

Соответствующая диаграмма Найквиста показана на рис. 11.4.

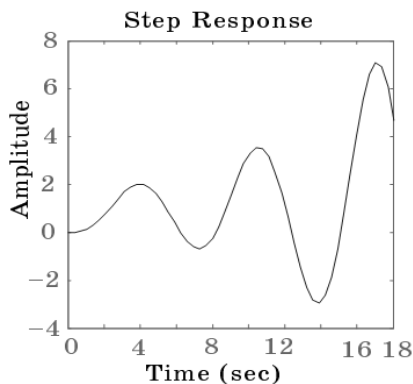


Рис. 11.3. Пример переходной реакции неустойчивой системы

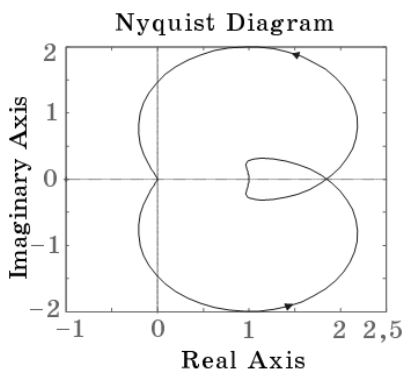


Рис. 11.4. Диаграмма Найквиста примера

Как показывает рис.11.4, АФЧХ разомкнутой системы ни разу не охватывает точку $-1, j0$, поэтому замкнутая система будет неустойчивой.

Частотный критерий Найквиста можно использовать и в том случае, когда рассматривается не АФЧХ, а ЛАЧХ разомкнутой системы:

Используя ЛАЧХ и ЛФЧХ, можно легко оценить запасы устойчивости системы по амплитуде и по фазе с помощью команды

```
>> margin(w)
```

Пример:

```
>> w=tf([10],[2 2 3 1]);
```

>> margin(w)

Соответствующий график показан на рис. 11.5.

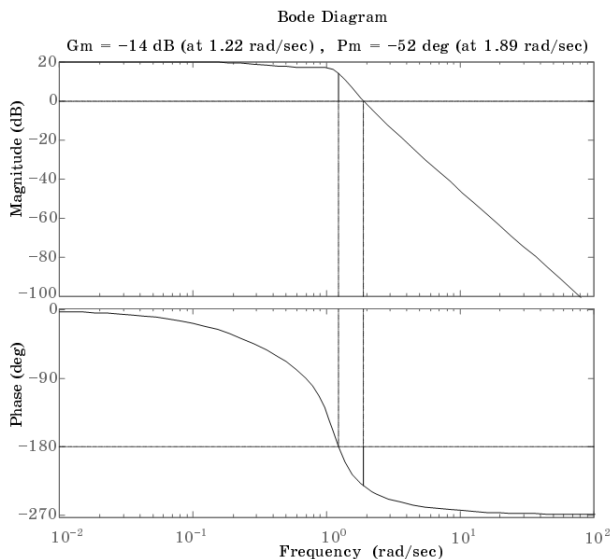


Рис. 11.5. Определение запасов устойчивости по амплитуде и по фазе

3. Для оценки устойчивости по критерию **Михайлова** необходимо иметь характеристическое уравнение замкнутой системы. Если дана ПФ разомкнутой системы, то ПФ замкнутой системы $W(s)$ вычисляется по формуле обратного соединения

$$W(s) = W_p(s) / (W_p(s) + 1),$$

где $W_p(s)$ – передаточная функция соответствующей разомкнутой системы.

Вектор Михайлова замкнутой системы получим из выражения для ПФ замкнутой системы, произведя подстановку $s = j\omega$

Пример:

$$W_p(s)=3/(s^4+3s^3+2s^2+6s+1)$$

$$W(s)=3/(s^4+3s^3+2s^2+6s+4)$$

$$Q=(j\omega)^4+3(j\omega)^3+2(j\omega)^2+6(j\omega)+4$$

Для построения вектора Михайлова можно создать М-файл вида:

```
w=0:1:1000;  
m=j^4*w.^4+3*j^3*w.^3+2*j^2*w.^2+6*j*w.+4;  
x=real(m);  
y=imag(m);  
>>plot(x,y)
```

При выполнении этого М-файла появится окно с графиком годографа, по виду которого и делается вывод об устойчивости системы.

Задание к работе

Выполнить исследование устойчивости замкнутой САУ с использованием различных критериев по заданной передаточной функции разомкнутой системы.

Варианты заданий приведены в табл. 11.1.

Содержание отчета по лабораторной работе

- переходную характеристику разомкнутой системы;
- расчет передаточной функции замкнутой системы;
- расчетные выражения для обоснования устойчивости замкнутой системы по алгебраическому критерию Гурвица;
- годограф Найквиста разомкнутой системы, на основании которого делается вывод об устойчивости замкнутой системы;
- годограф Михайлова замкнутой системы, на основании которого делается вывод об устойчивости системы;
- переходную характеристику замкнутой системы;
- распределения полюсов разомкнутой и замкнутой систем;

– проверку полученных результатов путем компьютерного моделирования переходных процессов разомкнутой и замкнутой системы в MatLab Simulink;

– выводы по всем полученным результатам.

Таблица 11.1

№	Передаточная функция разомкнутой системы
1	$W(s) = \frac{2}{s^4 + 5s^3 + 5s^2 + 3s + 1}$
2	$W(s) = \frac{1}{0.05s^4 + 0.1s^3 + s^2 + s + 1}$
3	$W(s) = \frac{1}{0.1s^3 + 0.1s^2 + s + 1}$
4	$W(s) = \frac{100}{5s^4 + 0.1s^3 + 2s^2 + 2s + 1}$
5	$W(s) = \frac{1}{8s^3 + 4s^2 + 2s + 1}$
6	$W(s) = \frac{10}{s^5 + 3s^4 + 2s^3 + 2s^2 + s + 1}$
7	$W(s) = \frac{3}{0.1s^3 + 0.01s^2 + 0.1s + 1}$
8	$W(s) = \frac{10}{2s^3 + 2s^2 + s + 1}$
9	$W(s) = \frac{1}{s^3 + 0.1s^2 + 0.1s + 1}$
10	$W(s) = \frac{2}{2s^5 + 3s^4 + 3s^3 + 0.5s^2 + 0.5s + 1}$

Лабораторная работа № 12

УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ С ЭЛЕМЕНТОМ ЧИСТОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Цель работы – исследовать устойчивость автоматической системы с элементом чистого запаздывания с помощью частотного критерия Найквиста в программной среде MatLab

Основные сведения

При решении задач автоматизации технологических процессов часто приходится иметь дело с инерционными статическими объектами управления (например, с электрическими двигателями), переходные характеристики $h_o(t)$ которых несколько отличаются от типовых. Например, многие объекты имеют специфическую s -образную форму переходной характеристики (рис. 12.1). Наклон, кривизна характеристики и ее расстояние от оси ординат зависят от динамических свойств конкретного объекта.

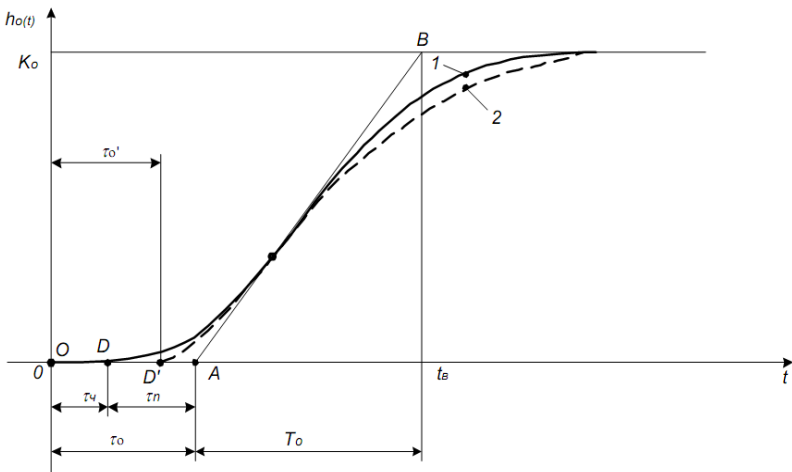


Рис 12.1. Переходные характеристики реального объекта (1) и его приближенной модели второго порядка (2) с запаздыванием

Для практических расчетов такими объектами каждую s -образную кривую, снятую при единичном ступенчатом воздействии, достаточно охарактеризовать следующими параметрами, определяемыми непосредственно по графику:

- статическим коэффициентом k_0 ;
- постоянной времени T_0 ;
- полным запаздыванием τ_0 , которое складывается из чистого запаздывания τ_u и переходного запаздывания τ_n , т. е. $\tau_0 = \tau_n + \tau_u$.

Параметры T_0 и τ_0 определяют проведением касательной

АВ к наиболее крутому участку переходной характеристики $h_0(t)$.

При расчете настроечных параметров системы с объектами, имеющими s -образные переходные характеристики, ориентируются либо непосредственно на указанные параметры, характеризуют статику и динамику реального объекта, либо используют упрощенные модели объекта, коэффициенты которых однозначно выражаются через указанные экспериментальные параметры.

Достаточно хорошее приближение к s -образным переходным характеристикам дает модель второго порядка с запаздыванием и одинаковыми постоянными времени.

$$W_0(p) = k_0 e^{-p\tau_0'} \frac{1}{(T_0'p + 1)^2},$$

$$\text{где } T_0' = 0,368T_0; \quad \tau_0' = \tau_0 - 0,107T_0 \quad .$$

Наиболее простой, но и менее точной является модель первого порядка

$$W_0(p) = k_0 e^{-p\tau_0'} \frac{1}{T_0'p + 1},$$

$$\text{где } T_0' = 0,64T_0; \quad \tau_0' = \tau_0 - 0,11T_0 \quad .$$

Существуют и более сложные модели, например, модель второго порядка с запаздыванием и разными постоянными времени

$$W_0(p) = k_0 e^{-p\tau_0} \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 + 1)},$$

Здесь параметры T_1 и T_2 определяются не через параметры T_0 и τ_0 , а по некоторым координатам характерных точек переходной характеристики.

Для систем с запаздыванием всегда существует некоторая величина запаздывания τ_{cp} , которая выводит систему на границу устойчивости.

Пример:

Рассмотрим систему со следующими параметрами:

Начальное значение k	k_2	T_1	T_2
1	10	1	1

Т.е.

$$W_1(p) = k; \quad W_2(p) = \frac{10}{p^2 + p + 1}.$$

Т.к. для разомкнутой части исходной системы соединение элементов последовательное, то ее эквивалентная передаточная функция:

$$W_p(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) = \frac{10k}{p^2 + p + 1}$$

и для замкнутой (рис.12.2)

$$W(p) = \frac{10k}{p^2 + p + 10k + 1}.$$

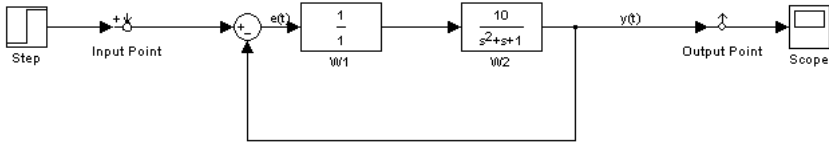


Рис. 12.2. Схема математической модели исходной замкнутой системы для линейного анализа

Исходная замкнутая система является системой второго порядка, следовательно – абсолютно устойчива при любых значениях k . В подтверждение этому – ее переходная характеристика, изображенная на рис. 12.3.

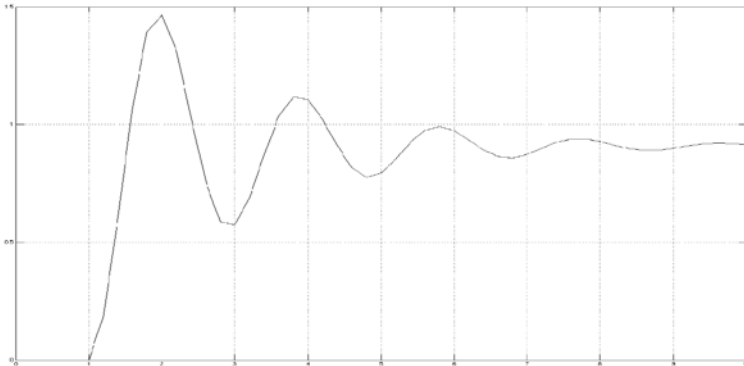


Рис. 12.3. Переходная характеристика исходной замкнутой системы при $k=1$

Для исследования устойчивости по критерию Найквиста система была дополнена звеном чистого запаздывания (рис. 12.4).

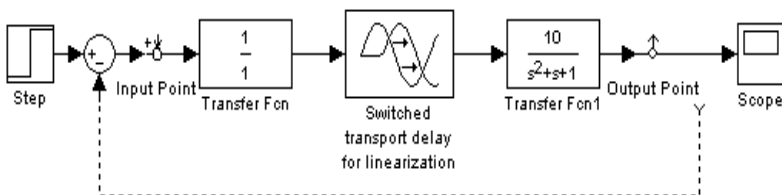


Рис. 12.4. Схема математической модели разомкнутой части системы с элементом чистого запаздывания

При исследовании годографа АФЧХ разомкнутой системы было установлено, что с увеличением τ_u устойчивость всей системы с элементом чистого запаздывания падает. Например, при $\tau_u = 0,01$ оценка запасов устойчивости составила по амплитуде $Ha = 20\text{дБ}$ и по фазе $H\phi = 17^\circ$ (рис. 12.5).

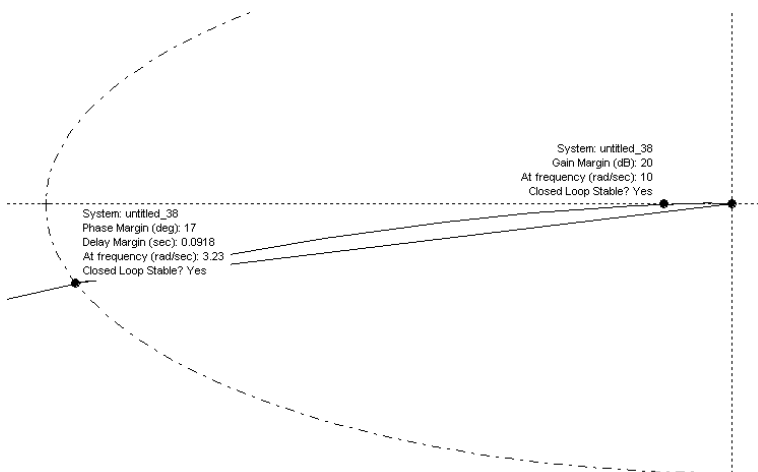


Рис. 12.5. Годограф частотного вектора для разомкнутой части системы с элементом чистого запаздывания при $\tau = 0,01$

При увеличении τ_u граничное значение τ_{zp} , при котором система выходит на границу устойчивости, составило 0,099 (рис. 12.6). Полученный результат зависит от значения k . Для рассматриваемого примера можно считать, что при $\tau_u = \tau_{zp} = 0,099$, $k = k_{zp} = 1$.

Изменяя один из указанных параметров, можно добиваться определенного значения другого при сохранении устойчивости, что важно при физической реализации систем исследуемого типа.

Например, уменьшая коэффициент передачи k в меньшую сторону от $k = k_{zp}$, можно обеспечить устойчивость замкнутой системы с требуемыми запасами устойчивости по амплитуде Ha и по фазе $H\phi$.

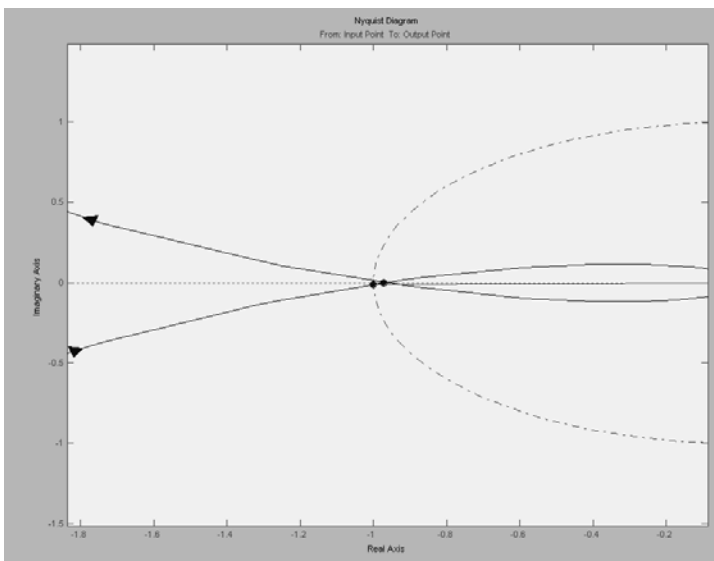


Рис. 12.6. Годограф частотного вектора для разомкнутой части системы с элементом чистого запаздывания при $\tau = 0.099$

Выполнение работы

Дана замкнутая система с единичной отрицательной обратной связью, элементы которой соединены последовательно и имеют следующие передаточные функции с параметрами по вариантам табл. 12.1.

$$W_1(p) = k; \quad W_2(p) = \frac{K_2}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}$$

- 1) Смоделировать структуру исходной системы в соответствии с рис. 12.2.
- 2) Исследовать характеристики и устойчивость исходной структуры.
- 3) Ввести в разомкнутую часть исходной системы элемент чистого запаздывания (Switched Transport Delay), как это показано на рис. 12.4.

4) Варьируя параметром τ , оценить устойчивость полученной системы по критерию Найквиста. Определить граничное значение τ_{zp} , при котором полученная система выходит на границу устойчивости.

5) При $\tau = \tau_{zp}$ изменить коэффициент k в большую и меньшую стороны. Оценить его влияние на устойчивость и запасы устойчивости.

6) Составить отчет по лабораторной работе с указанием варианта, переходных характеристик замкнутых систем (исходной и с элементом запаздывания), результатов оценок устойчивости и выводов по всем этапам.

Таблица 12.1

№ варианта	Начальное значение k	K_2	T_1	T_2
1	1	12	1.0	2.0
2	1	21	2.1	4.2
3	1	23	3.5	7
4	1	43	2.1	4.3
5	2	2	2.4	4.9
6	2	11	3.1	6.2
7	2	12	3.2	6.5
8	1	7	3.3	6.8
9	1	3	2.6	5.7
10	1	14	2.4	5.0

Список использованной литературы

1. Макаров, И.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал) / И.М. Макаров, Б.М. Менский. – М.: Машиностроение, 1982.
2. Ксенович, И.Л. Теория и проектирование автоматических систем / И.Л. Ксенович, В.П. Тарасик. – М.: Машиностроение, 1996.
3. Цыпкин, Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1977.
4. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования / Г.Т. Кулаков. – Минск: Вышэйшая школа, 1984.
5. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: справочное пособие / под ред. А. С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987.

Компьютерные программы и другие научно-методические материалы

Пакет программ для математических расчетов MATLAB.