

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

П. Г. Михайлова, А. Ф. Егоров

**Моделирование систем автоматического
управления с использованием программной
среды MATLAB/Simulink**

Лабораторный практикум

Утверждено Редакционным
советом университета
в качестве учебного пособия

Москва
2016

УДК 66.012-52.001.2:004.42(75)
ББК 22.18:22.19
М69

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор Белгородского государственного
технологического университета им. В. Г. Шухова

В. З. Магергут

Доктор технических наук, профессор Российского химико-
технологического университета имени Д. И. Менделеева

Э. М. Кольцова

Михайлова П. Г.

М69 Моделирование систем автоматического управления с использованием программной среды MATLAB/Simulink. Лабораторный практикум: учеб. пособие / П. Г. Михайлова, А. Ф. Егоров. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2016. – 76 с.
ISBN 978-5-7237-1347-5

Содержатся методические рекомендации по использованию Simulink – программы из пакета MATLAB для имитационного моделирования работы систем автоматического регулирования. Дано описание лабораторных работ, порядок их выполнения с использованием Simulink, примеры решения заданий и оформления результатов исследования.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Системы управления химико-технологическими процессами», относящуюся к базовой части программы бакалавриата по направлению подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования, и выполняющих лабораторные, учебные курсовые научно-исследовательские работы и проекты, выпускные квалификационные работы. Рекомендуется также студентам бакалавриата, магистратуры и аспирантуры других направлений подготовки, использующим для решения своих задач Simulink.

УДК 66.012-52.001.2:004.42(75)
ББК 22.18:22.19

ISBN 978-5-7237-1347-5 © Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, 2016
© Михайлова П. Г., Егоров А. Ф., 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Работа 1. Изучение функций программной среды MATLAB/Simulink для решения задач разработки и моделирования систем автоматического регулирования (САР). Типовые звенья, структурные преобразования. Передаточные функции. Частотные характеристики	6
1.1. Запуск программной среды MATLAB/Simulink.....	7
1.2. Обзор функциональных блоков	8
1.3. Создание модели системы автоматического регулирования в Simulink	12
1.5. Аппроксимация динамической характеристики объекта регулирования ...	34
1.6. Построение амплитудно-фазовой частотной характеристики САР с использованием Simulink и анализ устойчивости системы	36
1.7. Требования к отчету по работе	39
Работа 2. Моделирование одноконтурной САР. Задачи регулирования. Расчет параметров настроек. Оценка качества процесса регулирования..	40
2.1. Разработка структурной схемы моделирования замкнутой одноконтурной САР в среде Simulink	41
2.2. Определение настроек регуляторов по эмпирическим зависимостям.....	42
2.3. Моделирование одноконтурной САР.....	44
2.4. Определение настроек ПИД-регулятора по заданным показателям качества с использованием инструментального пакета Simulink Design Optimization библиотеки Simulink	47
2.5. Требования к отчету по работе	56
Работа 3. Разработка, моделирование и исследование многоконтурных САР. Комбинированная САР. Каскадная САР. Управление типовыми процессами химической технологии.....	57
3.1. Разработка структурной схемы и моделирование одноконтурной САР	58
3.2. Разработка структурной схемы и моделирование комбинированной САР.....	63
3.3. Разработка структурной схемы и моделирование каскадной САР	66
3.4. Сравнительный анализ одноконтурной и многоконтурных САР	71
3.5. Требования к отчету по работе	73
Заключение	74
Библиографический список.....	75

ВВЕДЕНИЕ

В данном практикуме рассматривается модуль **Simulink** – программа из пакета **MATLAB**, предназначенная для моделирования динамических процессов.

Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы [1].

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.

Интерактивная среда **Simulink** позволяет использовать уже готовые библиотеки блоков для моделирования динамических систем, а также применять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления, средств цифровой связи и устройств реального времени [1].

Дополнительные пакеты расширения **Simulink** позволяют решать весь спектр задач от разработки концепции модели до тестирования, проверки, генерации кода и аппаратной реализации. **Simulink** интегрирован в среду **MATLAB**, включая численные методы, визуализацию, анализ данных и графические интерфейсы, что позволяет использовать встроенные математические алгоритмы и мощные средства обработки данных [1].

Simulink является достаточно самостоятельным инструментом и при работе с ним не требуется знать сам **MATLAB** и остальные его приложения. С другой стороны, доступ к функциям **MATLAB** и другим его инструментам остается открытым, и их можно использовать в **Simulink**. При работе с **Simulink** пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков.

Simulink содержит [1] современные средства решения дифференциальных уравнений для непрерывных, дискретных, линейных и нелинейных объектов (в том числе с гистерезисом и разрывами). Позволяет проводить ими-

тационное моделирование нестационарных систем с помощью решателей с переменным и постоянным шагом или методом управляемого из MATLAB пакетного моделирования. Включает средства отладки и анализа моделей, а также удобные средства для интерактивной визуализации выходных сигналов, средства настройки и задания входных воздействий.

Преимущество **Simulink** заключается также в том, что он позволяет пополнять библиотеки блоков с помощью подпрограмм, написанных как на языке **MATLAB**, так и на языках C/C++, Fortran и Ada.

Лабораторный практикум содержит три работы, направленные:

- на освоение студентами основных функциональных возможностей автоматических систем управления технологическими процессами;
- освоение студентами методов анализа и синтеза систем управления химико-технологическими процессами (ХТП) во временной и частотных областях;
- освоение студентами методов повышения качества регулирования ХТП;
- приобретение навыков оптимизации работы систем автоматического регулирования;
- освоение студентами знаний в области управления типовыми процессами химической технологии.

В работе использованы следующие сокращения:

АФЧХ – амплитудно-фазовая частотная характеристика;

ЛК – левая кнопка;

ПК – правая кнопка;

САР – система автоматического регулирования;

ХТП – химико-технологический процесс.

РАБОТА 1. ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИЙ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ MATLAB/SIMULINK ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАЗРАБОТКИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ (САР). ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ, СТРУКТУРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цель работы:

- ознакомление с составом, структурой и функциональными возможностями модуля Simulink для моделирования систем автоматического управления;

- исследование динамических характеристик типовых звеньев.

Задачи работы:

- изучить характеристики типовых звеньев. Используя понятия передаточных функций, правила структурных преобразований и метод сигнальных графов определить передаточные функции автоматических систем регулирования в соответствии с вариантом задания на лабораторную работу;

- осуществить аналитический вывод временной и амплитудно-фазовой характеристики исследуемой САР;

- в соответствии с вариантом задания на лабораторную работу создать, используя модуль Simulink, модель САР и получить ее динамическую характеристику (кривую разгона);

- аппроксимировать полученную динамическую характеристику передаточной функцией инерционного звена первого порядка со звеном чистого запаздывания;

- построить амплитудно-фазовую частотную характеристику исследуемой САР с использованием Simulink и провести анализ устойчивости системы.

1.1. Запуск программной среды MATLAB/Simulink

Так как Simulink интегрирован в пакет прикладных программ **MATLAB**, то для его запуска необходимо запустить **MATLAB**. В операционной системе Windows – через главное меню **Пуск** или с помощью ярлыка программы на рабочем столе двойным нажатием левой кнопкой (ЛК) мыши. При запуске **MATLAB** открывается основное диалоговое окно программы (рис. 1.1).

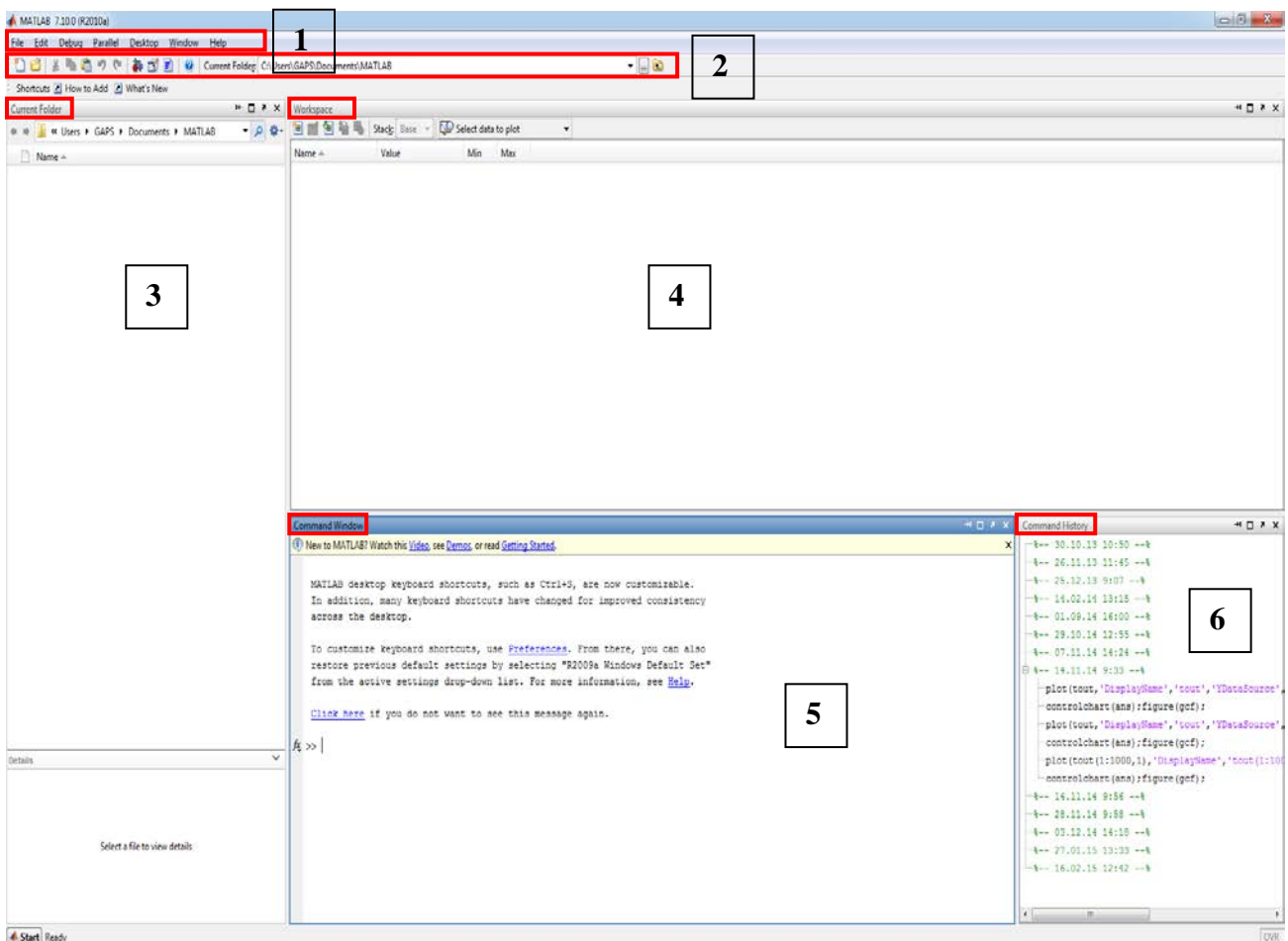



Рис. 1.1. Основное диалоговое окно MATLAB:

- 1 – меню; 2 – панель инструментов; 3 – текущая папка; 4 – рабочая область;
5 – командное окно; 6 – история команд

Это окно содержит строку меню, панель инструментов и четыре внутренних окна: **Current Folder** (Текущая папка), **Workspace** (Рабочая область), **Command Window** (Командное окно) и **Command History** (История команд).

После открытия основного окна программы MATLAB нужно запустить программу Simulink. Это можно сделать одним из трех способов:

- нажать кнопку  (**Simulink**) на панели инструментов командного окна **MATLAB**;
- в строке командного окна **MATLAB** напечатать **Simulink** и нажать клавишу **Enter** на клавиатуре;
- выполнить команду **Open** в меню **File** и открыть файл модели (mdl-файл).

Использование первого и второго способов приводит к открытию окна обозревателя разделов библиотеки **Simulink**.

1.2. Обзор функциональных блоков

Окно обозревателя библиотеки блоков содержит следующие элементы (рис. 1.2):

1. Меню с командами **File** (Файл), **Edit** (Редактирование), **View** (Вид), **Help** (Справка).
2. Панель инструментов с ярлыками наиболее часто используемых команд и строкой поиска по всем разделам библиотеки **Simulink**.
3. Список разделов библиотеки, реализованный в виде дерева.
4. Окно содержимого раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков).
5. Строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию.

На рисунке выделена основная библиотека **Simulink** (в левой части окна) и показаны ее разделы (в правой части). Библиотека **Simulink** в MATLAB 2010 содержит следующие основные разделы:

Commonly Used Blocks – часто используемые блоки из различных разделов основной библиотеки **Simulink**.

Continuous – блоки для моделирования систем в непрерывном времени.

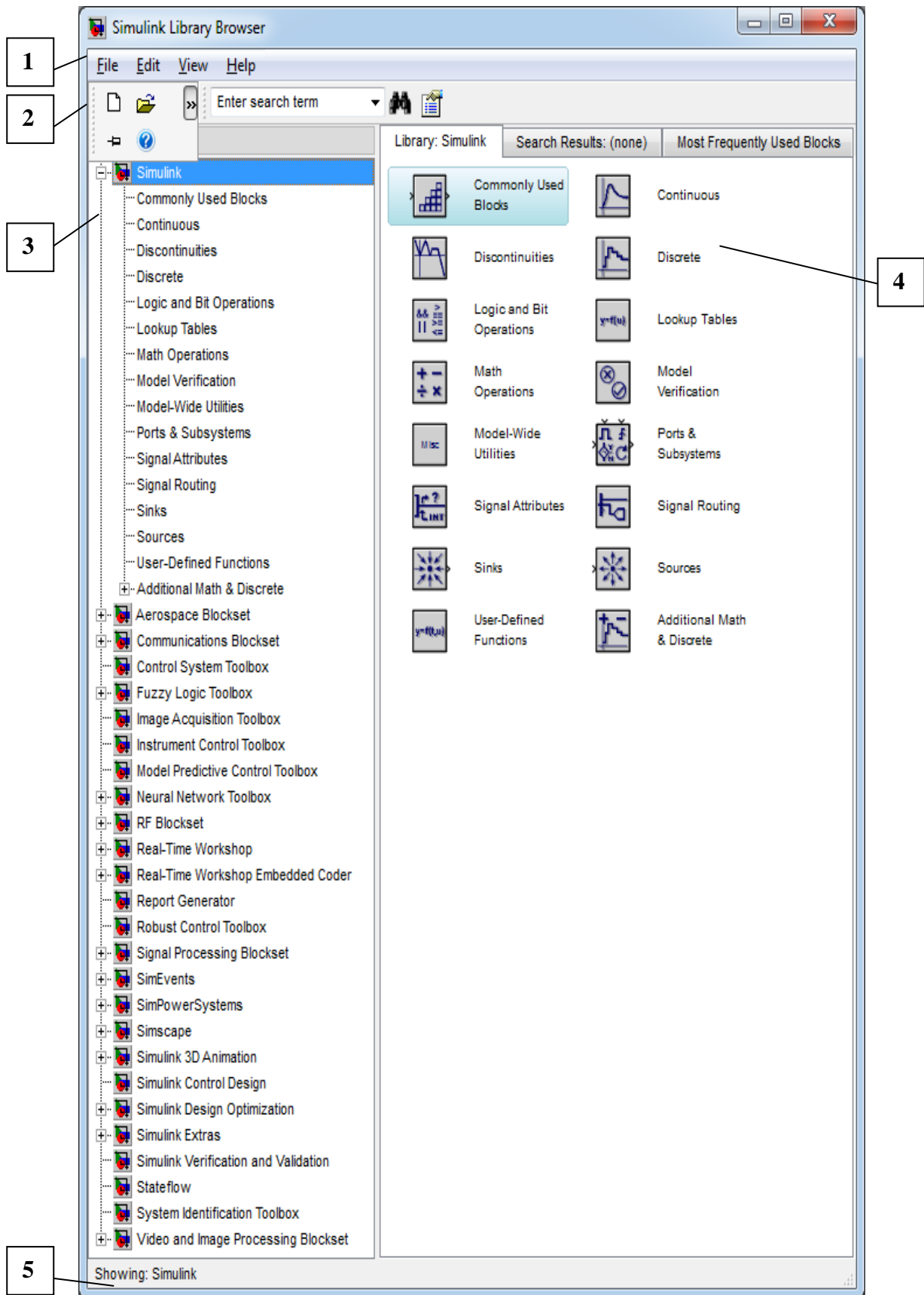


Рис. 1.2. Окно обозревателя разделов библиотеки **Simulink**

Discontinuities – блоки для моделирования негладких и разрывных нелинейных функций.

Discrete – блоки для моделирования систем в дискретном времени.

Logic and Bit Operations – блоки для моделирования логических (двоичных) операций.

Lookup Tables – блоки для моделирования функциональных и табличных зависимостей.

Math Operations – блоки для моделирования математических операций.

Model Verification – блоки для тестирования и верификации поведения моделей.

Model-Wide Utilities – вспомогательные блоки для документирования и линеаризации моделей.

Ports & Subsystems – блоки построения иерархических моделей и подсистем.

Signal Attributes – блоки для преобразования типов сигналов в моделях.

Signal Routing – блоки для коммутации и объединения/разъединения сигналов.

Sinks – блоки для отображения и сохранения сигналов.

Sources – источники сигналов и воздействий.

User-Defined Functions – блоки для создания пользовательских функций, реализованных на языке MATLAB.

Additional Math & Discrete – блоки дополнительных математических операций и дискретные блоки единичной задержки разного типа.

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

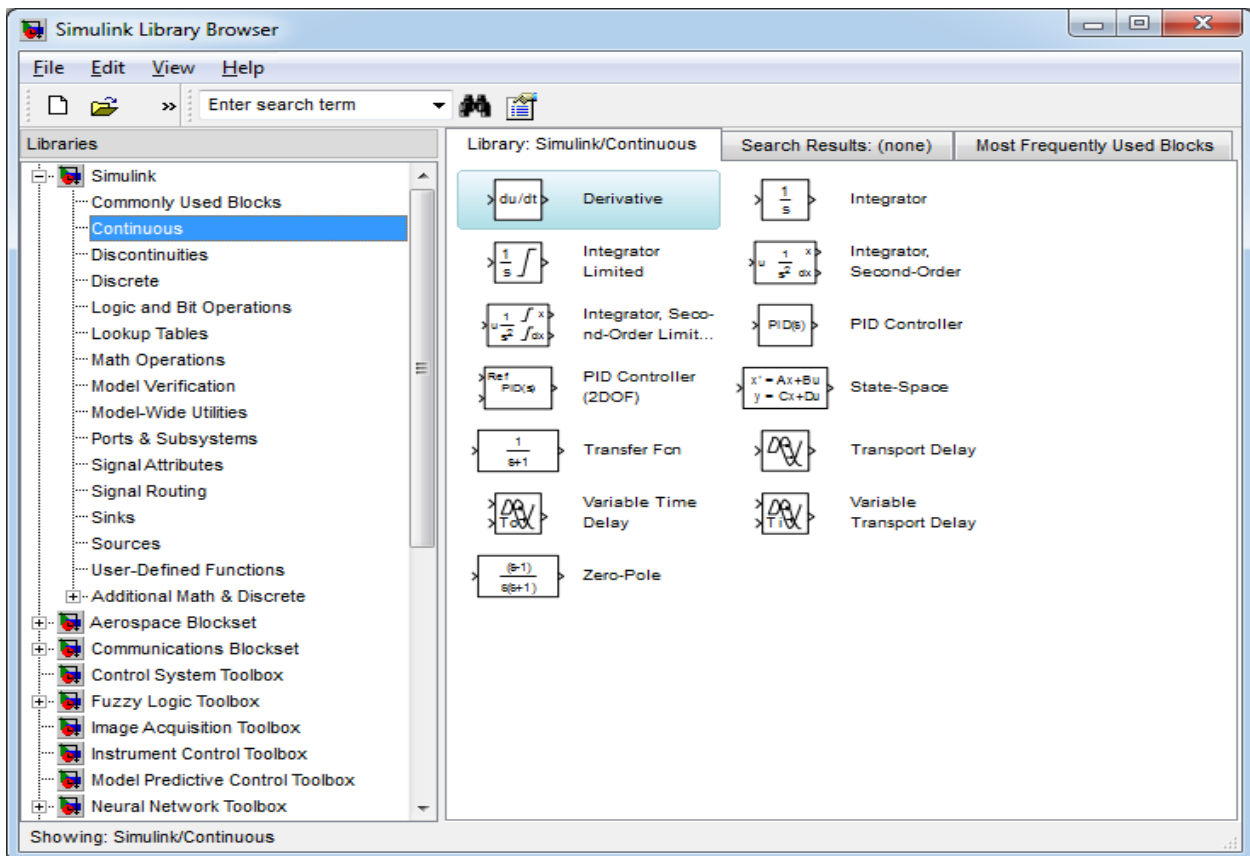


Рис. 1.3. Окно обозревателя с набором блоков раздела библиотеки

Для работы с окном обозревателя используются команды, собранные в меню (рис. 1.1, 1.4).



Рис. 1.4. Верхнее меню обозревателя библиотек **Simulink**

Меню обозревателя библиотек (рис. 1.4) 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. 1.5).

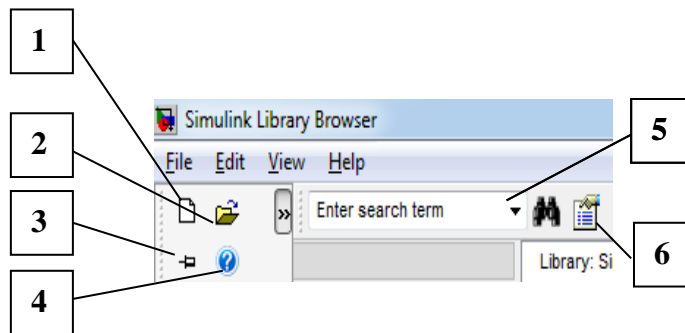



Рис. 1.5. Панель инструментов обозревателя разделов библиотек

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. Вызов справки.
5. 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).
6. Параметры поиска.

1.3. Создание модели системы автоматического регулирования в Simulink

Открыть окно модели можно с помощью команды **File/New/Model**, или используя кнопку  на панели инструментов (рис. 1.4, 1.5) (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. 1.6:

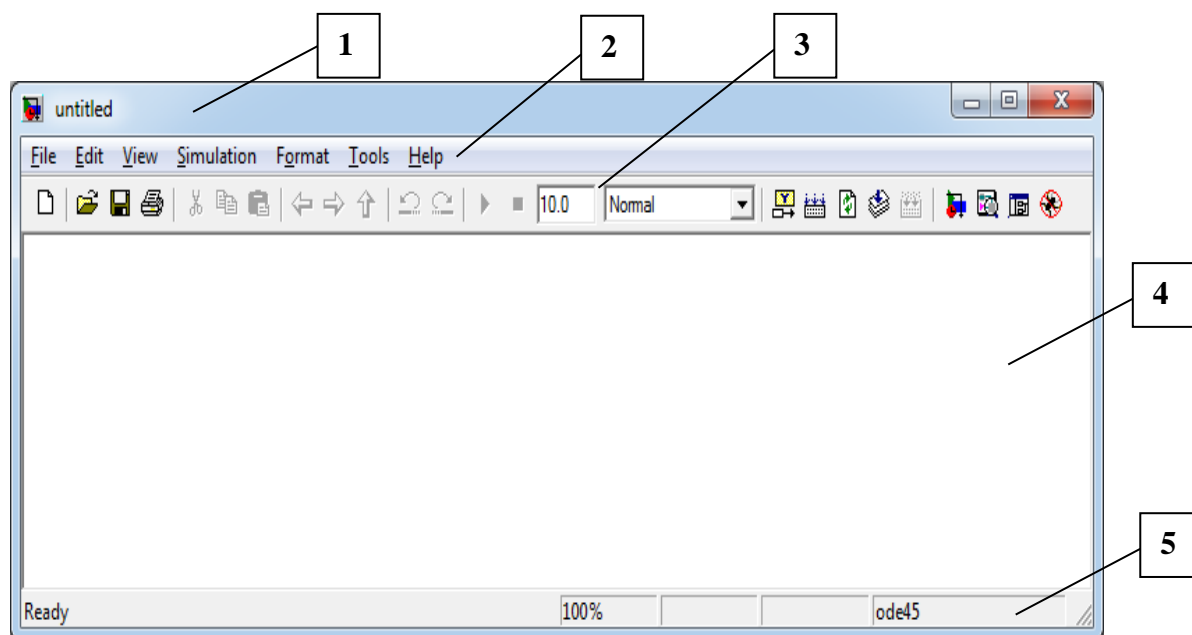


Рис. 1.6. Диалоговое окно создания новой модели

Окно модели содержит следующие элементы.

1. Заголовок, с названием окна. Вновь созданному окну 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. 1.6, 1.7).

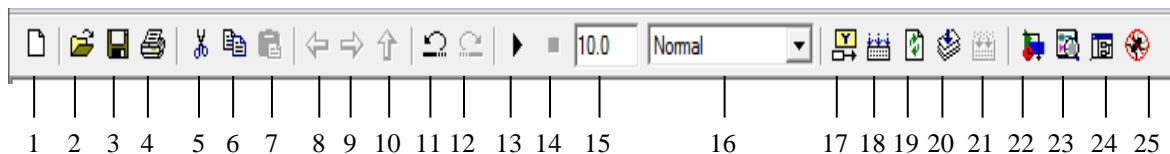


Рис. 1.7. Панель инструментов окна модели

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 обмена.
6. **Copy** – скопировать выделенную часть модели в буфер обмена.
7. **Paste** – вставить в окно модели содержимое буфера обмена.
8. **Navigate back** – вернуться обратно.
9. **Navigate forward** – перейти вперед.
10. **Go to parent system** – переход из подсистемы в систему высшего уровня иерархии («родительскую систему»). Команда доступна, только если открыта подсистема.
11. **Undo** – отменить предыдущую операцию редактирования.
12. **Redo** – восстановить результат отмененной операции редактирования.
13. **Start simulation** – запуск моделирования. **Start/Pause/Continue Simulation** – Запуск модели на исполнение (команда **Start**); после запуска модели на изображении кнопки выводится символ **||**, 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).
14. **Stop simulation** – остановка моделирования. Кнопка становится доступной после начала моделирования, а также после выполнения команды

Pause.

15. **Simulation stop time** – время остановки моделирования.

16. **Normal/Accelerator/Rapid Accelerator/SIL/PIL/External** – обычный/ускоренный/очень ускоренный режим расчета. **SIL** (Software in the-Loop) / **PIL** (Processor in the Loop) – моделирование с программой или процессором в контуре. **External** – работа в режиме реального времени с внешними источниками данных.

17. **Show port values when hovering** – показать значения портов при наведении.

18. **Incremental build** – последовательное создание.

19. **Refresh Model blocks** – обновить блоки модели.

20. **Update diagram** – изменить диаграмму.

21. **Build subsystem** – создать подсистему.

22. **Library Browser** – открыть окно обозревателя библиотек.

23. **Launch model explorer** – запуск обозревателя моделей.

24. **Toggle Model Browser** – открыть окно обозревателя модели.

25. **Debug** – запуск отладчика модели.

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 (рис. 1.6) отображаются также:



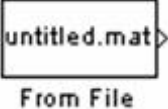
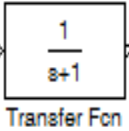
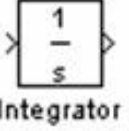

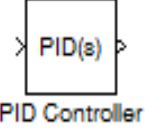

- масштаб отображения блок-диаграммы (в процентах, исходное значение равно 100%),
- индикатор степени завершенности сеанса моделирования (появляется после запуска модели),
- текущее значения модельного времени (выводится также только после запуска модели),
- используемый алгоритм расчета состояний модели (метод решения).

Рассмотрим все этапы моделирования и анализа свойств объекта.

Для создания модели нужно расположить требуемые блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки

(рис. 1.3). Внешний вид элементов, наиболее часто используемых при разработке систем автоматического регулирования, приведен в таблице.

Функциональные блоки, используемые для разработки моделей систем автоматического регулирования

№ п/п	Графическое изображение функционального блока	Название блока	Раздел библиотеки функциональных блоков Simulink	Назначение
1.		Источник постоянного сигнала <i>Constant</i>	Источники сигнала (Sources)	Задание постоянного сигнала по уровню сигнала
2.		Генератор ступенчатого сигнала <i>Step</i>	Источники сигнала (Sources)	Формирование ступенчатого сигнала
3.		Блок считывания данных из файла <i>From File</i>	Источники сигнала (Sources)	Получение данных из внешнего файла
4.		Блок передаточной функции <i>Transfer Fcn</i>	Аналоговые блоки (Continuous)	Задание передаточной функции в виде отношения полиномов
5.		Интегрирующий блок <i>Integrator</i>	Аналоговые блоки (Continuous)	Интегрирование входного сигнала
6.		Блок фиксированной задержки сигнала <i>Transport Delay</i>	Аналоговые блоки (Continuous)	Задержка входного сигнала на заданное время
7.		Блок непрерывного ПИД-регулятора <i>PID Controller</i>	Аналоговые блоки (Continuous)	Реализация передаточной функции непрерывного ПИД-регулятора
8.		Осциллограф <i>Scope</i>	Приемники сигнала (Sinks)	Отображение графиков генерируемых в процессе моделирования сигналов в зависимости от времени

Окончание таблицы

№ п/п	Графическое изображение функционального блока	Название блока	Раздел библиотеки функциональных блоков Simulink	Назначение
9.		Цифровой дисплей <i>Display</i>	Приемники сигнала (Sinks)	Отображение значения входного сигнала в виде числа
10.		Блок сохранения данных в рабочей области <i>To Workspace</i>	Приемники сигнала (Sinks)	Запись данных, поступающих на его вход, в рабочую область MATLAB
11.		Блок сохранения данных в файле <i>To File</i>	Приемники сигнала (Sinks)	Запись данных, поступающих на его вход, в файл
12.		Блок вычисления суммы <i>Sum</i>	Математические операции (Math Operations)	Вычисление суммы текущих значений сигналов
13.		Блок вычисления модуля <i>Abs</i>	Математические операции (Math Operations)	Вычисление абсолютного значения входного сигнала
14.		Усилительное звено <i>Gain</i>	Математические операции (Math Operations)	Умножение входного сигнала на константу
15.		Мультиплексор <i>Mux</i>	Маршрутизация сигнала (Signal Routing)	Объединение нескольких входных сигналов в вектор
16.		Демультимплексор <i>Demux</i>	Маршрутизация сигнала (Signal Routing)	Разделение входного векторного сигнала на отдельные составляющие

Затем, указав курсором на нужный блок в библиотеке функциональных блоков **Simulink** (рис. 1.3) и нажав ЛК мыши, «перетащить» блок в созданное окно (рис. 1.6). Кнопку мыши нужно держать нажатой. На рис. 1.8 представлено окно модели с выбранными блоками. Для удаления блока необходимо, указав курсором на его изображение и нажав ЛК мыши, выбрать блок, а затем нажать **Delete** на клавиатуре. Для изменения размеров блока требуется выбрать его, установить курсор в один из его углов и, нажав ЛК мыши, изменить размер (курсор при этом отображается в виде двухсторонней стрелки).

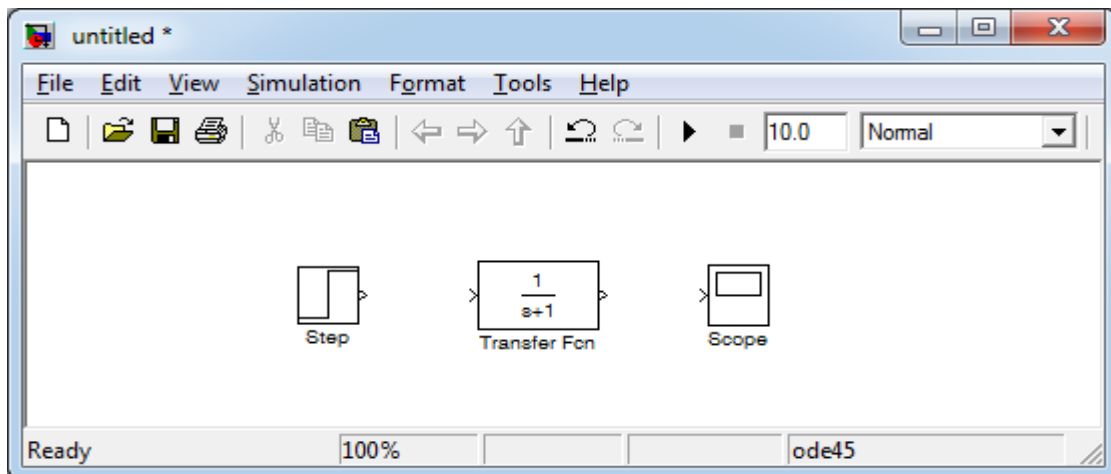


Рис. 1.8. Окно модели, содержащее функциональные блоки

Далее, для того чтобы изменить параметры блока, установленные программой по умолчанию, необходимо дважды щелкнуть ЛК 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**.

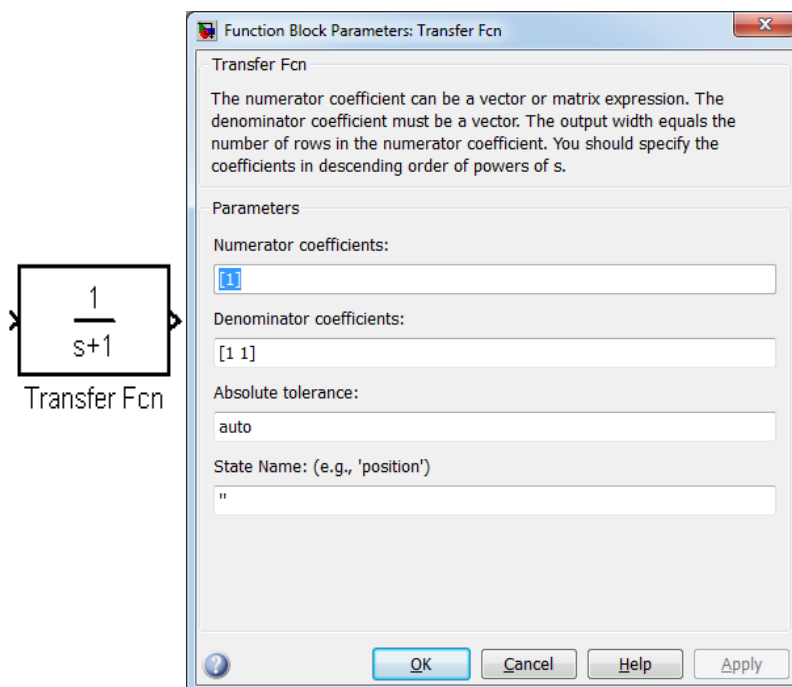


Рис. 1.9. Блок, моделирующий передаточную функцию, и окно редактирования параметров блока

На рис. 1.9 в качестве примера показаны блок, моделирующий передаточную функцию, и окно редактирования параметров данного блока.

После размещения в окне модели всех необходимых функциональных блоков нужно выполнить их соединение. Для этого указать курсором на выход блока, при этом указатель примет вид перекрестия, а затем нажать и, не отпуская ЛК мыши,

провести линию к входу другого блока. После чего отпустить кнопку. Система создаст связь между элементами и обозначит ее стрелкой по направлению сигнала.

Для создания точки разветвления в соединительной линии нужно подвести курсор к предполагаемому узлу и, нажав правую кнопку (ПК) мыши, протянуть линию. Для удаления линии – выбрать ее (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. 1.10.

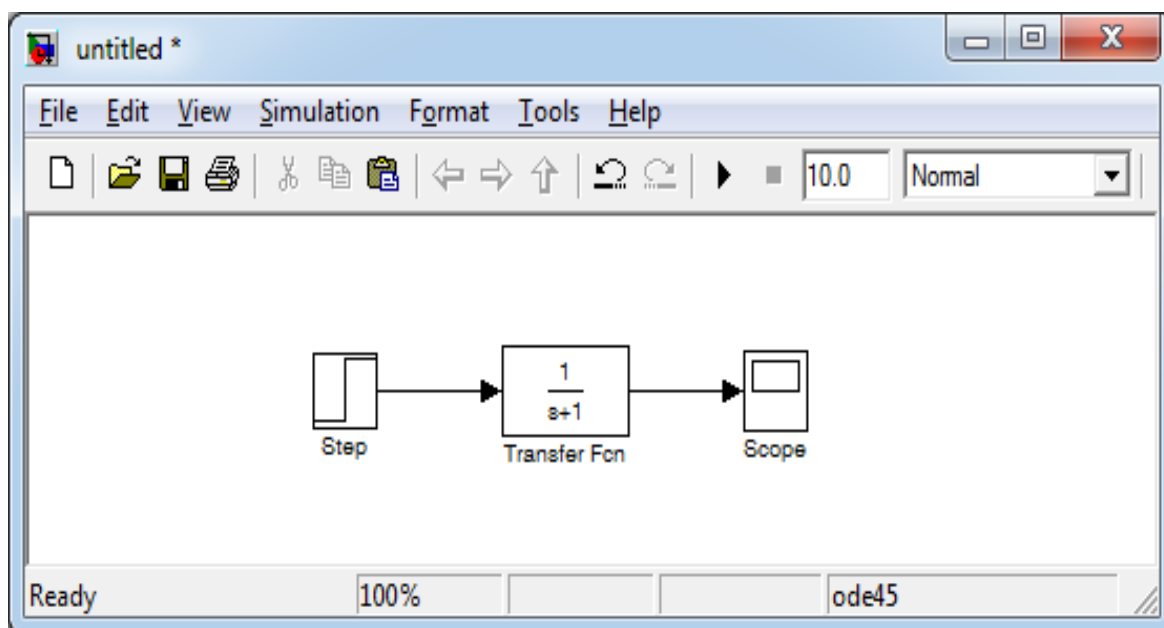


Рис. 1.10. Соединение функциональных блоков

После составления модели из функциональных блоков 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 не должно превышать 32 символов, должно начинаться с буквы и не может содержать символы кириллицы и спецсимволы. 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 (рис. 1.3) или из основного окна MATLAB (рис. 1.1).

Перед запуском модели на выполнение необходимо произвести настройку параметров моделирования.

1. **Задание длительности процесса моделирования.** Производится в меню **Simulation/Configuration Parameters** окна построения модели (рис. 1.6, 1.10). В этом меню в закладке **Solver** задается время начала моделирования (поле **Start time**) и его конца (поле **Stop time**) (рис. 1.11). Начальное время, как правило, задается равным нулю. Величина конечного времени задается пользователем, исходя из условий решаемой задачи [2].

2. **Задание шага моделирования.** **Simulink** автоматически преобразует блок-схему модели в систему дифференциальных уравнений. Выбор метода интегрирования этой системы можно произвести через меню **Simulation** (рис. 1.6, 1.10).

В разделе **Solver options** (рис. 1.11) 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 [2].

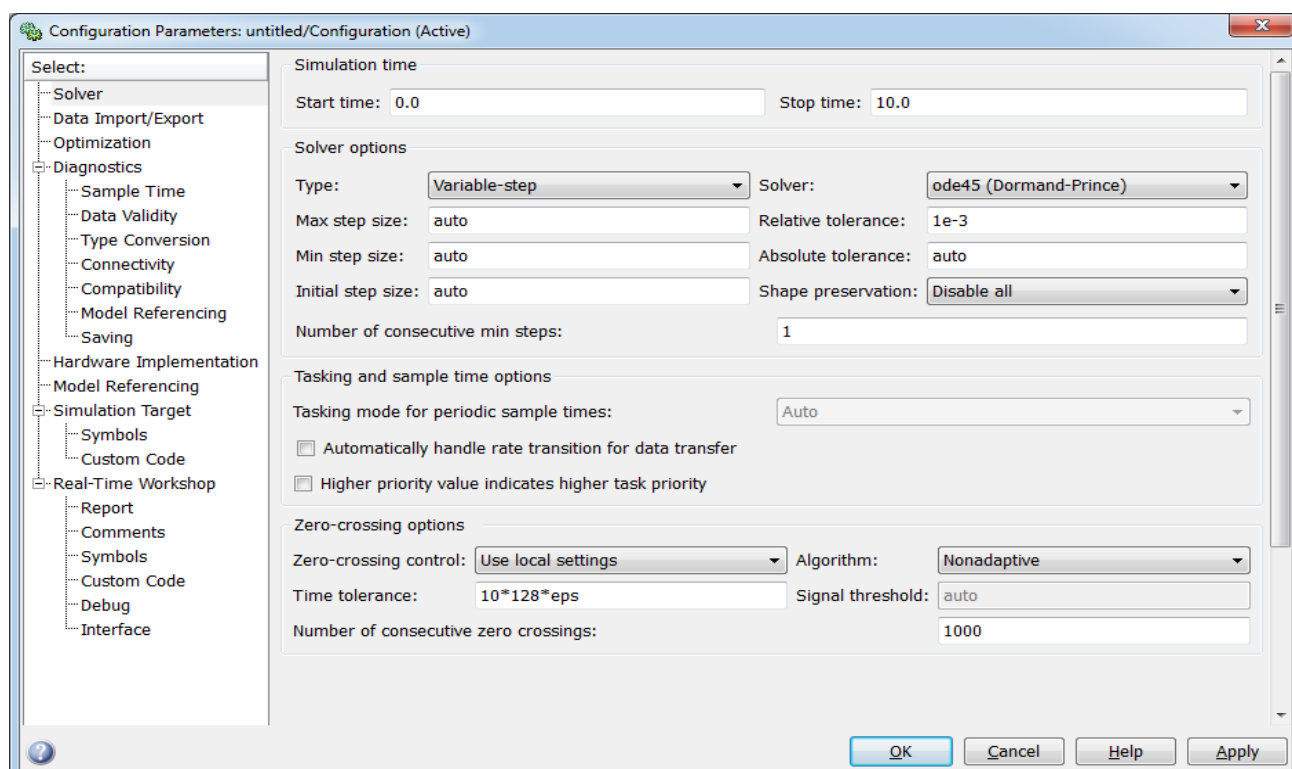


Рис. 1.11. Диалоговое окно настройки параметров моделирования

По умолчанию установлен переменный шаг (**Variable step**) и интегри-

рование методом Дорманда – Принца (**ode45 Dormand – Prince**) (рис. 1.11).

Там же можно задать допустимые **Абсолютную погрешность (Absolute tolerance)** и **Относительную погрешность (Relative tolerance)** интегрирования.

Список методов расчета нового состояния системы (**Solver**) (рис. 1.11) содержит несколько вариантов. Первый вариант (**discrete**) используется для расчета дискретных систем. Остальные методы – 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**.

Список методов расчета нового состояния системы **при переменном шаге времени (Variable-step Solvers)** (рис. 1.11):

- ode45 (Dormand – Prince) – Дорманда – Принца;
- discrete (no continuous states) – дискретный;
- ode23 (Bogacki – Shampine) – Богацкого – Шампайна;
- ode113 (Adams) – Адамса;
- ode15s (stiff/NDF – numerical differentiation formulas) – формулы численного дифференцирования (Гира);
- ode23s (stiff/Mod. Rosenbrock) – модифицированный метод Розенброка 2-го порядка;
- ode23t (Mod. stiff/Trapezoidal) – модифицированный метод трапеций;
- ode23tb (stiff/TR-BDF2 – Trapezoidal Rule with the second order Backward Difference Formula) – метод трапеций с методом Гира второго порядка.

При фиксированном шаге времени (Fixed-step Solvers) список методов расчета нового состояния системы включает (рис. 1.12):

- ode3 (Bogacki – Shampine) – Богацкого – Шампайна;
- discrete (no continuous states) – дискретный (не может быть использован для имитации моделей, которые имеют непрерывные состояния);

- ode5 (Dormand – Prince) – Дорманда – Принца;
- ode4 (Runge – Kutta) – Рунге – Кутты 4-го порядка;
- ode2 (Heun) – Гойна (Хойна);
- ode1 (Euler) – Эйлера;
- ode14x (extrapolation) – экстраполяция (комбинации метода экстраполяции и Ньютона).

Ниже двух раскрывающихся списков **Type** и **Solver** находится область, содержимое которой меняется зависимости от выбранного способа изменения модельного времени (рис. 1.11, 1.12).

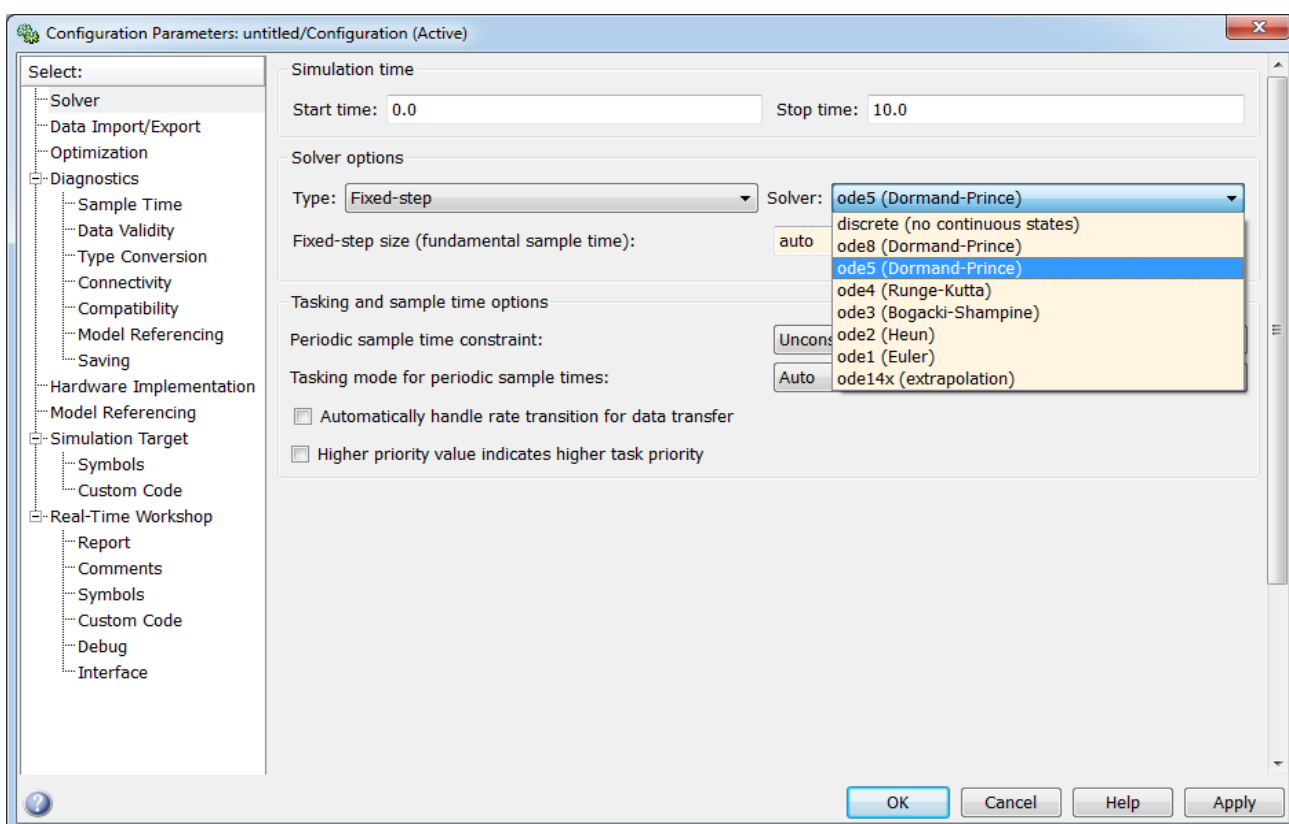


Рис. 1.12. Вид диалогового окна настройки параметров моделирования при фиксированном шаге модельного времени

При выборе **Fixed-step** в данной области появляется текстовое поле **Fixed-step size** (величина фиксированного шага), позволяющее указывать величину шага моделирования (рис. 1.12). Величина шага моделирования по умолчанию устанавливается системой автоматически (**auto**). Требуемая величина шага может быть введена вместо значения **auto** либо в форме числа, ли-

бо в виде вычисляемого выражения (то же самое относится и ко всем параметрам, устанавливаемым системой автоматически) [2]. Величина шага интегрирования (**Fixed step size**) не должна превышать $0,1 \cdot T_{об}$.

После настройки параметров моделирования можно запускать разработанную модель на выполнение, но прежде рекомендуется настроить параметры блока **Scope** (таблица с. 16).

3. **Настройка параметров блока Scope** осуществляется следующим образом. При двойном щелчке в окне модели (рис. 1.10) на иконке **Scope** появляется его экран с координатной разметкой (рис. 1.13).

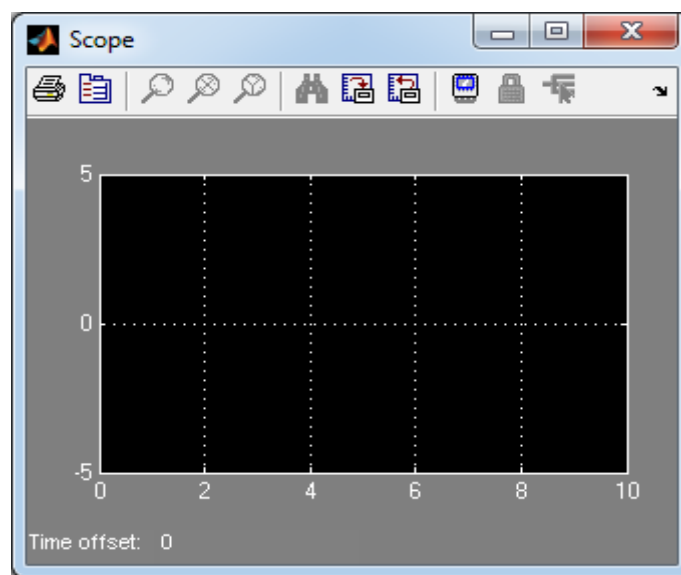


Рис. 1.13. Вид области построения графиков блока **Scope**

Настройка окна блока **Scope** выполняется с помощью панелей инструментов (рис. 1.14).

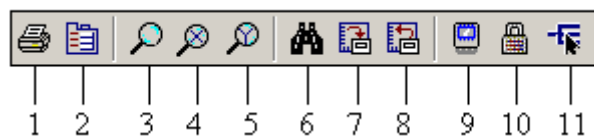



Рис. 1.14. Панель инструментов блока **Scope**

Панель инструментов содержит 11 кнопок:

1. **Print** – печать содержимого окна блока **Scope**.
2. **Parameters** – доступ к окну настройки параметров.
3. **Zoom** – увеличение масштаба по обеим осям.

4. **Zoom X-axis** – увеличение масштаба по горизонтальной оси.
5. **Zoom Y-axis** – увеличение масштаба по вертикальной оси.
6. **Autoscale** – автоматическая установка масштабов по обеим осям.
7. **Save current axes settings** – сохранение текущих настроек окна.
8. **Restore saved axes settings** – установка ранее сохраненных настроек окна.
9. **Floating scope** – перевод блока **Scope** в «свободный» режим.
10. **Lock/Unlock axes selection** – закрепить/разорвать связь между текущей координатной системой окна и отображаемым сигналом. Инструмент доступен, если включен режим **Floating scope**.
11. **Signal selection** – выбор сигналов для отображения. Инструмент доступен, если включен режим **Floating scope**.

При нажатии на вторую слева кнопку  на панели инструментов (рис. 1.14) появляется окно с двумя закладками **General** (общие параметры) и **Data History** (параметры сохранения сигналов в рабочей области MATLAB) (рис. 1.15).

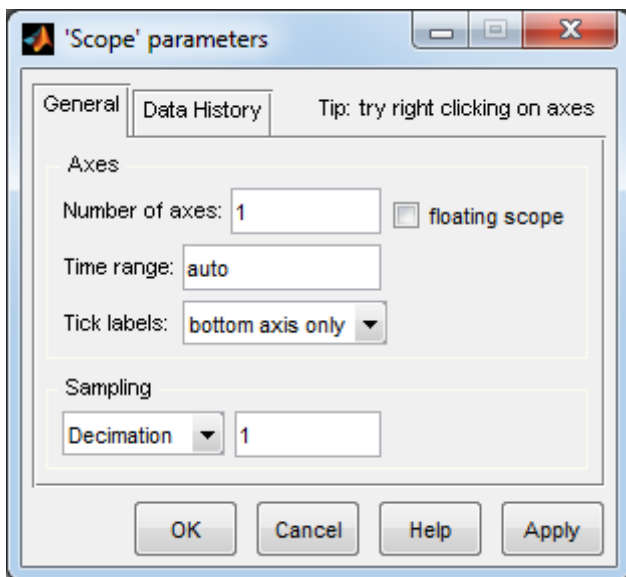


Рис. 1.15. Диалоговое окно настройки параметров блока **Scope**. Вкладка **General**

вывод графика производится частями, при этом интервал отображения каждой части графика равен заданному значению **Time range**.

Tick labels – вывод/скрытие осей и меток осей. Может принимать три

На вкладке **General** задаются следующие параметры [2]:

Number of axes – число входов (систем координат) блока **Scope**. При изменении этого параметра на изображении блока появляются дополнительные входные порты.

Time range – величина временного интервала, для которого отображаются графики. Если время расчета модели превышает заданное параметром **Time range**, то вы-

значения (выбираются из списка):

- **all** – подписи для всех осей,
- **none** – отсутствие всех осей и подписей к ним,
- **bottom axis only** – подписи горизонтальной оси только для нижнего графика.

Sampling – установка параметров вывода графиков в окне. Задаёт режим вывода расчетных точек на экран. При выборе **Decimation** кратность вывода устанавливается числом, задающим шаг выводимых расчетных точек.

Floating scope – перевод блока **Scope** в «свободный» режим (при установленном флажке).

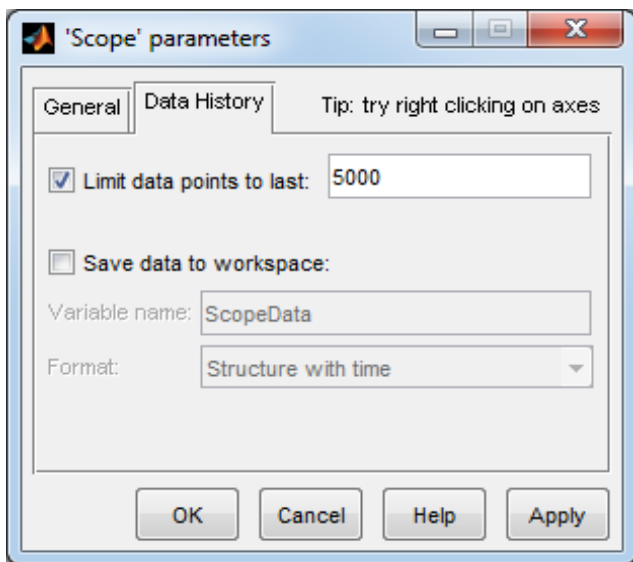


Рис. 1.16. Диалоговое окно настройки параметров блока **Scope**. Вкладка **Data history**

четных точек (рекомендуется).

Save data to workspace – сохранение значений сигналов в рабочей области **MATLAB**.

Variable name – имя переменной для сохранения сигналов в рабочей области **MATLAB**.

Format – формат данных при сохранении в рабочей области **MATLAB**. Может принимать значения:

- **Array** – массив,
- **Structure** – структура,

На вкладке **Data history** (рис. 1.16) задаются следующие параметры [2]:

Limit data points to last – максимальное количество отображаемых расчетных точек графика. При превышении этого числа начальная часть графика обрезается. В том случае, если флажок параметра **Limit data points to last** не установлен, то **Simulink** автоматически увеличит значение этого параметра для отображения всех расчетных точек (рекомендуется).

- **Structure with time** – структура с дополнительным полем «время».

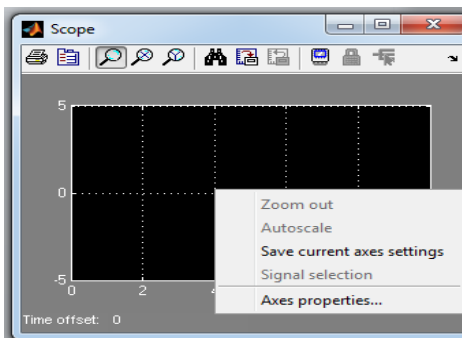
Разметка оси абсцисс (времени) устанавливается автоматически в соответствии с величинами **Start Time** и **Stop Time**, установленными в настройках модели (рис. 1.11).

Изменение масштабов отображаемых графиков можно выполнять несколькими способами [2]:

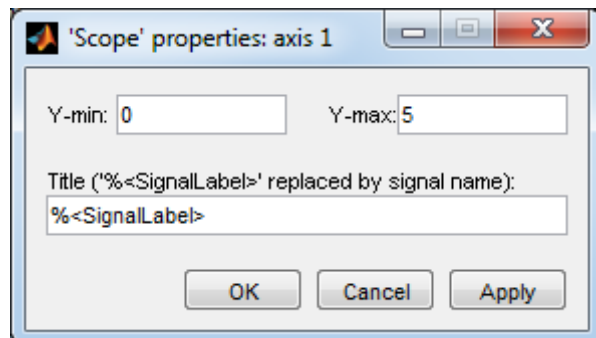
1. Нажать соответствующую кнопку (🔍, 🔍 или 🔍) и щелкнуть один раз ЛК мыши в нужном месте графика. Произойдет 2,5-кратное увеличение масштаба.

2. Нажать соответствующую кнопку (🔍, 🔍 или 🔍) и, нажав ЛК мыши, с помощью динамической рамки или отрезка указать область графика для увеличенного изображения.

3. Щелкнуть ПК мыши в окне графиков и выбрать команду **Axes properties...** в контекстном меню (рис. 1.17, а). Откроется окно настройки параметров (рис. 1.17, б), в котором с помощью параметров **Y-min** и **Y-max** можно указать предельные значения вертикальной оси. В этом же окне можно указать заголовок графика (**Title**), заменив выражение **%<SignalLabel>** в строке ввода.




а





б

Рис. 1.17. Настройка параметров вертикальной оси графика:

а – вызов контекстного меню графика; б – окно настройки параметров графика

Кнопкой «бинокль»  на панели инструментов блока **Scope** (рис. 1.14) можно автоматически подобрать степень увеличения, при которой на графике видны все участки уже полученных кривых. Сохранить эти настройки можно

кнопкой , расположенной там же, справа от «бинокля» (рис. 1.14).

4. **Запуск модели на выполнение**, т.е., собственно, начало моделирования производится нажатием кнопки  или через команду **Start** меню **Simulation** (рис. 1.10). Двойной щелчок на иконке блока **Scope** открывает его окно, в котором можно наблюдать изменение выходных переменных во времени (рис. 1.18).

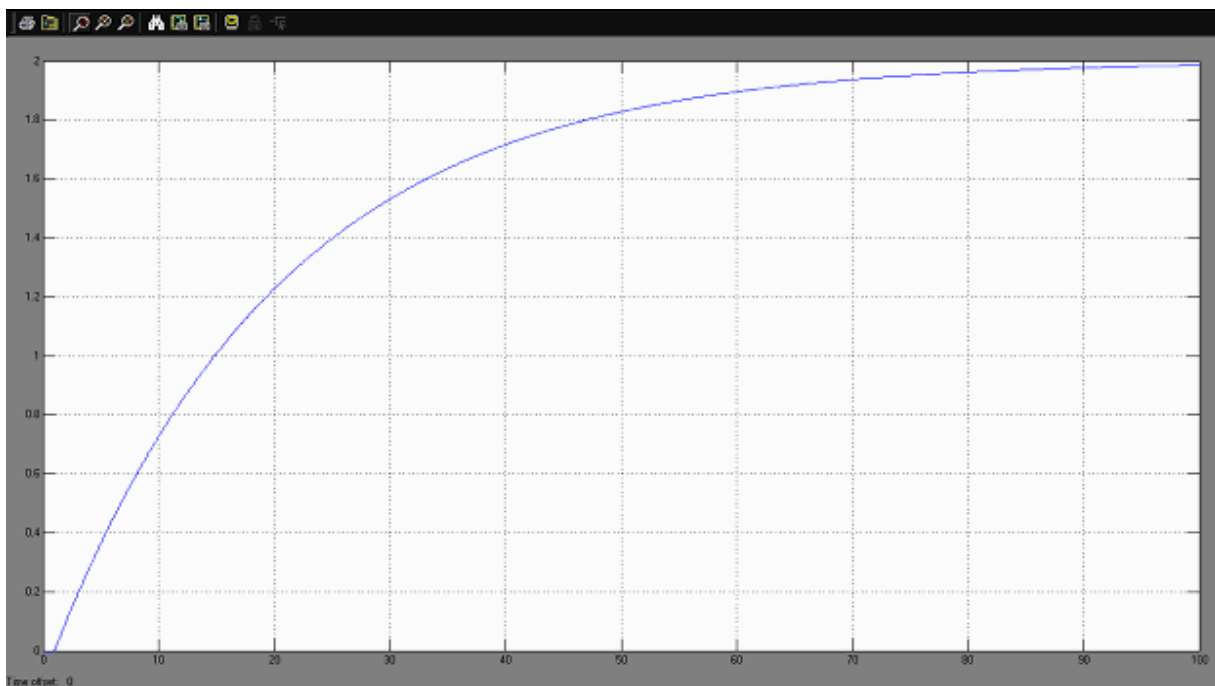



Рис. 1.18. Отображение результатов моделирования в блоке **Scope**

Работу модели можно приостановить кнопкой **Pause**, в которую превращается кнопка запуска моделирования  после ее нажатия. Рядом, справа расположена кнопка возврата в начальное состояние (рис. 1.6, 1.7).

5. **Отображение результатов моделирования.** Возможно несколько вариантов отображения результатов моделирования на графике блока **Scope**.

5.1. **Отображение одной кривой** (рис. 1.18).

5.2. **Отображение нескольких графиков в одном окне.** При изменении числа входов блока **Scope** в поле **Number of axes** (рис. 1.15). Например, при количестве входов, равном 2, блок **Scope** приобретает вид, представленный на рис. 1.19, а окно отображения результатов делится на две части, в

каждой из которых отображается отдельный график (рис. 1.20).

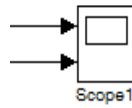


Рис. 1.19. Вид блока **Score** с двумя входами

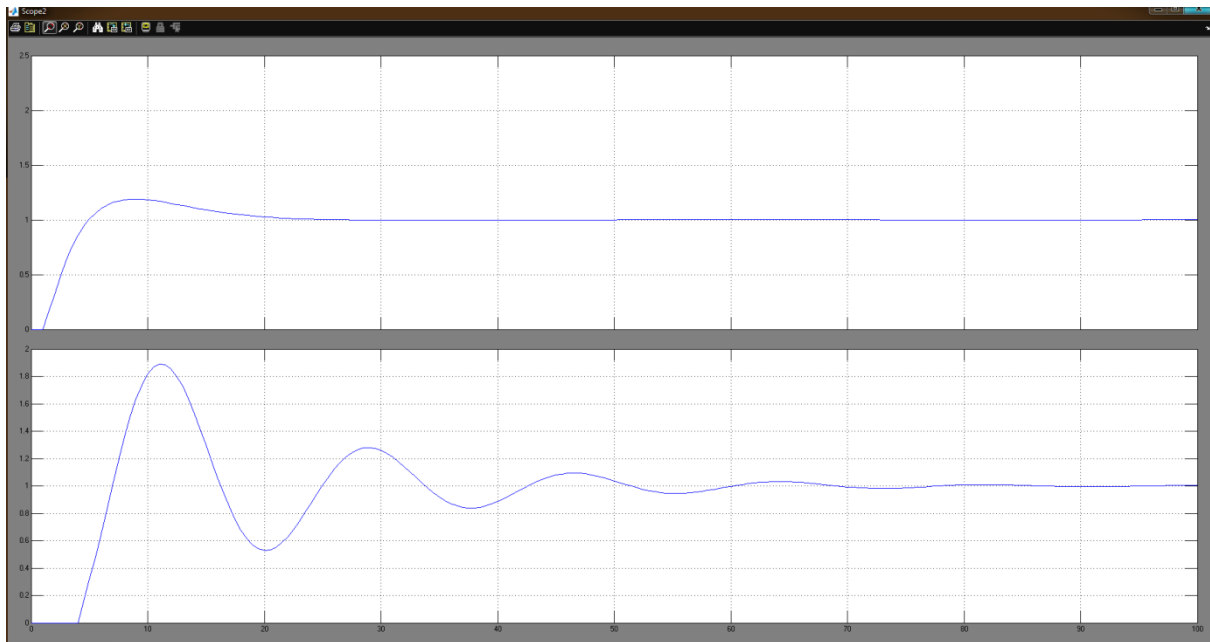


Рис. 1.20. Пример отображения графиков в одном окне

5.3. Отображение нескольких кривых на одном графике. Получение нескольких кривых на одном графике (рис. 1.21) возможно двумя способами:

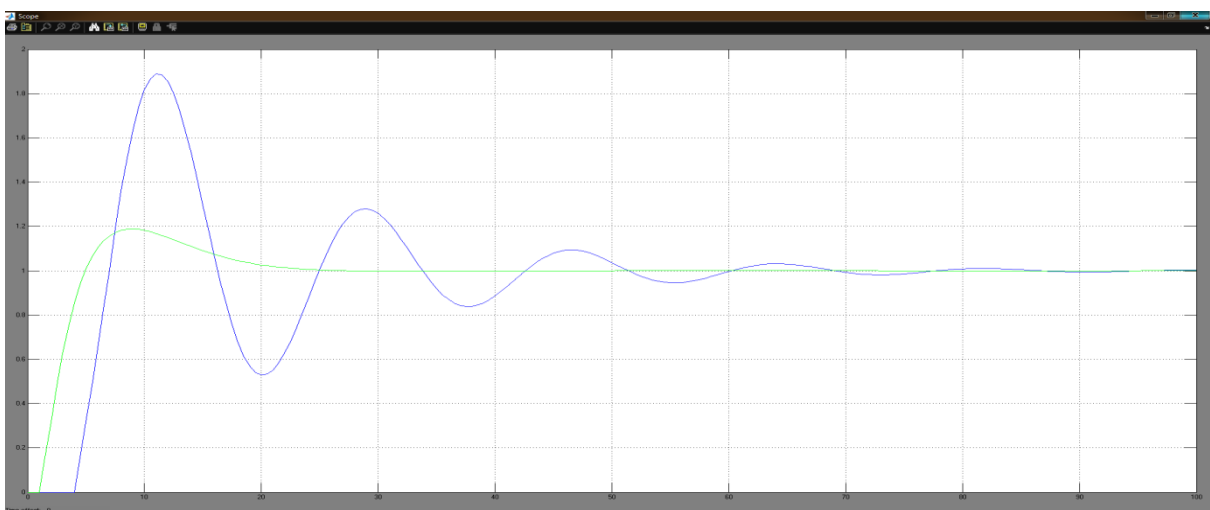


Рис. 1.21. Вывод нескольких кривых на одном графике блока **Scope**

а) с помощью блока **Мультиплексор Mux** (таблица с. 16, рис. 1.22). При использовании этого блока возможно объединение нескольких сигналов в окне одной S-модели (mdl-файла).

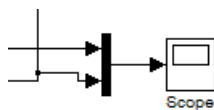


Рис. 1.22. Объединение сигналов с помощью блока **Mux**

б) с помощью блоков **To File** и **From File** (таблица с. 16). Этот способ используется, когда необходимо сравнить результаты моделирования, полученные в разных S-моделях (разных mdl-файлах). Запись кривых – результатов моделирования (для долговременного хранения и дальнейшего использования) осуществляется присоединенным на место блока **Scope**, или параллельно с ним, элементом **To File (В Файл)** (таблица с. 16, рис. 1.23). В свойствах элемента **To File** необходимо задать имя файла с расширением «.mat» (например, **outdata1.mat**, рис. 1.23), в который будет производиться запись данных.

Вывод сохраненных результатов в окне новой модели осуществляется с помощью блока **From File (Из Файла)** (таблица с. 16). Для этого в окне блок-схемы моделирования размещается элемент **From File** и в его настройках указывается имя файла с расширением «.mat», в котором сохранены полученные ранее кривые (рис. 1.24).

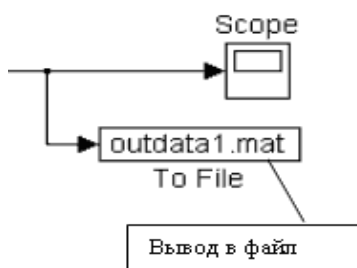


Рис. 1.23. Запись результатов в файл

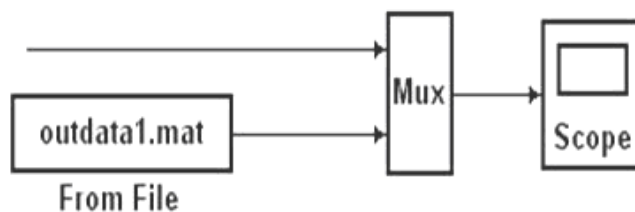


Рис. 1.24. Загрузка данных из файла

Моделирование работы САР в Simulink

Для создания модели САР из библиотеки функциональных блоков **Simulink** потребуются следующие блоки (таблица с. 16):

- генератор ступенчатого сигнала **Step**;
- блок вычисления суммы **Sum**;
- усилительное звено **Gain**;
- блок передаточной функции **Transfer Fcn**;
- осциллограф **Scope**.

После размещения указанных блоков в окне S-модели, между ними устанавливаются связи в соответствии с заданием, затем осуществляется настройка параметров каждого блока.

Параметрами настройки блока **Step** являются (рис. 1.25):

Step time – время наступления перепада сигнала.

Initial value – начальное значение сигнала.

Final value – конечное значение сигнала.

Блок передаточной характеристики **Transfer Fcn** задает передаточную функцию в виде отношения полиномов:

$$W(s) = \frac{num(s)}{den(s)} = \frac{a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n}{b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_mx^m},$$

где n и m – порядок числителя и знаменателя передаточной функции ($n \leq m$); num – вектор или матрица коэффициентов числителя; den – вектор коэффициентов знаменателя.

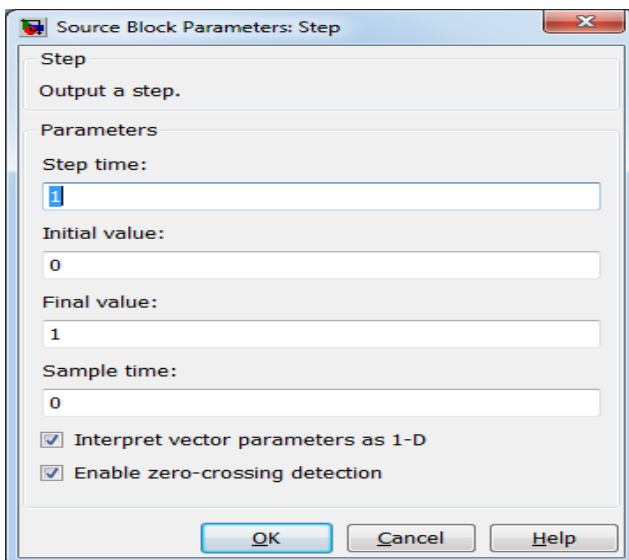


Рис. 1.25. Диалоговое окно настройки параметров блока **Step**

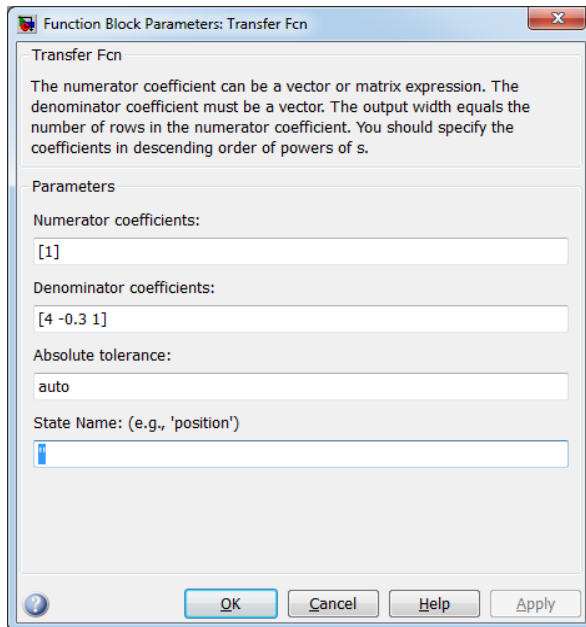
Параметры блока (рис. 1.9):

Numerator – вектор или матрица коэффициентов полинома числителя;

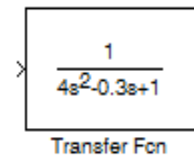
Denominator – вектор коэффициентов полинома знаменателя;

Absolute tolerance – абсолютная погрешность.

Например, для передаточной функции вида $W(s) = \frac{1}{4s^2 - 0.3s + 1}$ параметры настройки блока **Transfer Fcn** представлены на рис. 1.26, а. Вид блока – на рис. 1.26, б.



а



б

Рис. 1.26. Пример настройки блока **Transfer Fcn**:

а – диалоговое окно настройки блока с заданными коэффициентами полиномов; б – вид блока передаточной функции

Параметром настройки блока **Gain** (таблица с. 16) является коэффициент усиления, который задается в строке **Gain** диалогового окна настройки (рис. 1.27).

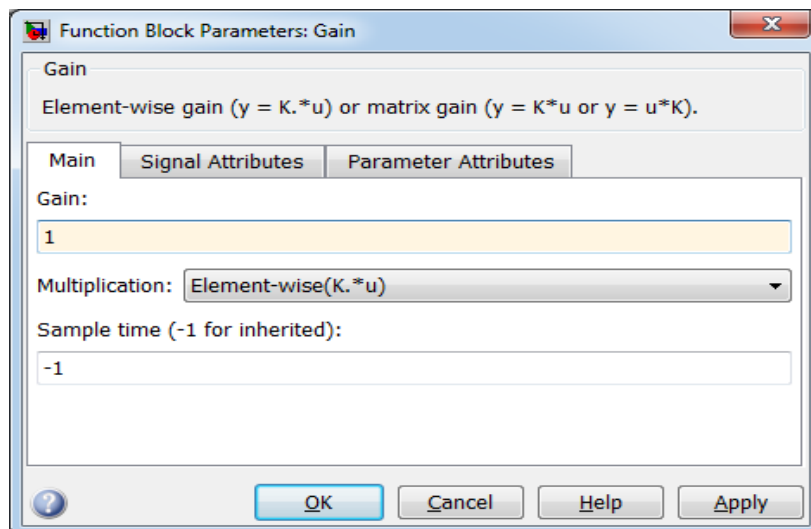


Рис. 1.27. Диалоговое окно настройки блока **Gain**

Вычисление суммы или разности текущих значений сигналов осуществляется с помощью блока **Sum** (таблица с. 16, рис. 1.28).

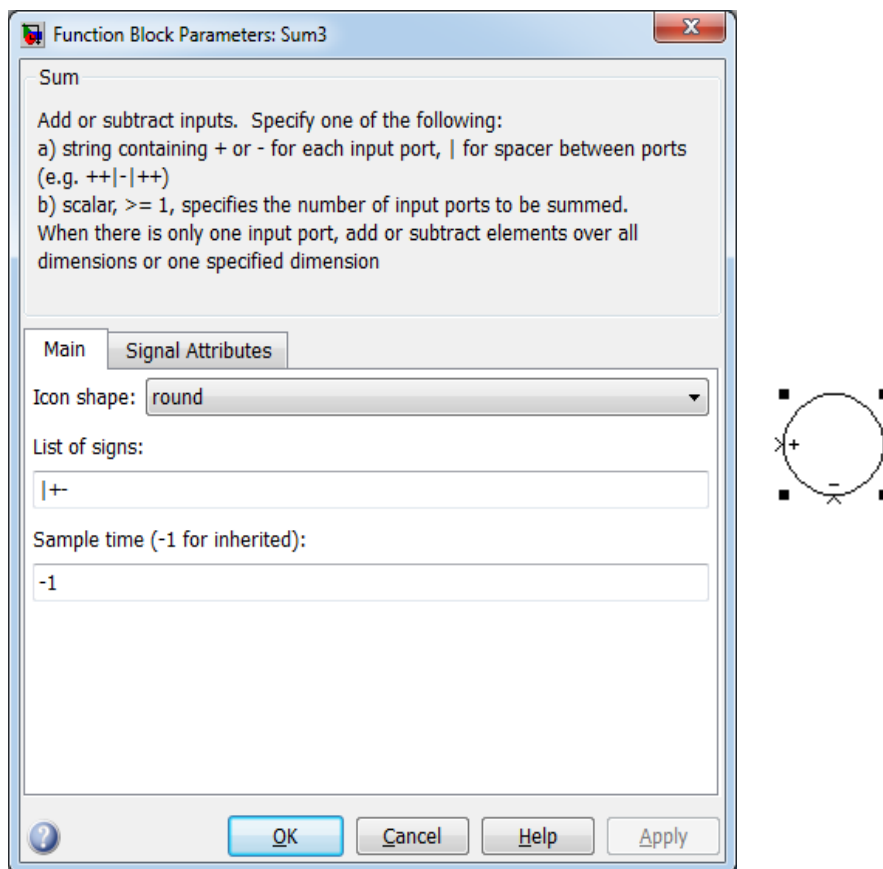


Рис. 1.28. Диалоговое окно настройки блока **Sum**

Его параметры (рис. 1.28):

Icon shape – форма блока. Выбирается из списка (**Round** – окружность; **Rectangular** – прямоугольник);

List of sign – список знаков. В списке используются следующие знаки: + (плюс), – (минус) и | (разделитель знаков).

Для построения графиков исследуемых сигналов в зависимости от времени используется блок **Scope**, настройка которого подробно рассмотрена на с. 23.

После составления полной схемы (рис. 1.29) и задания всех параметров настройки запускается процесс моделирования (см. с. 27). В результате получается временная (динамическая) характеристика моделируемой САУ (кривая разгона) (рис. 1.30).

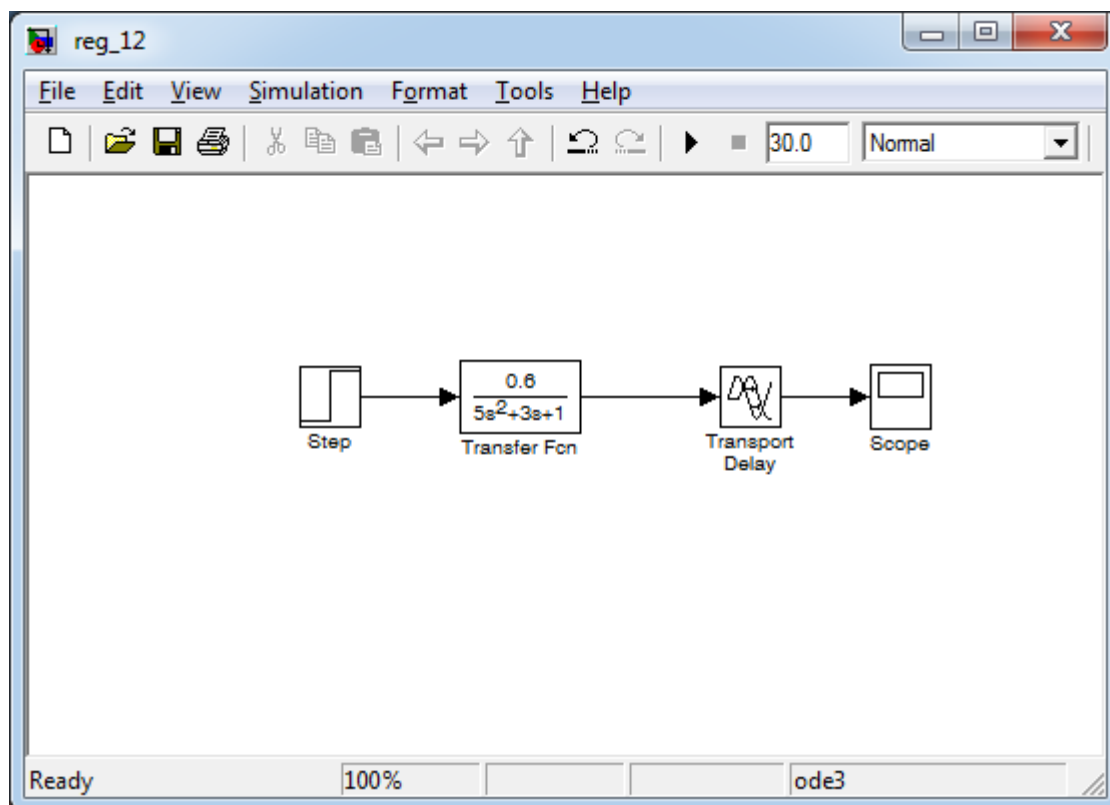


Рис. 1.29. Модель объекта регулирования в **Simulink**

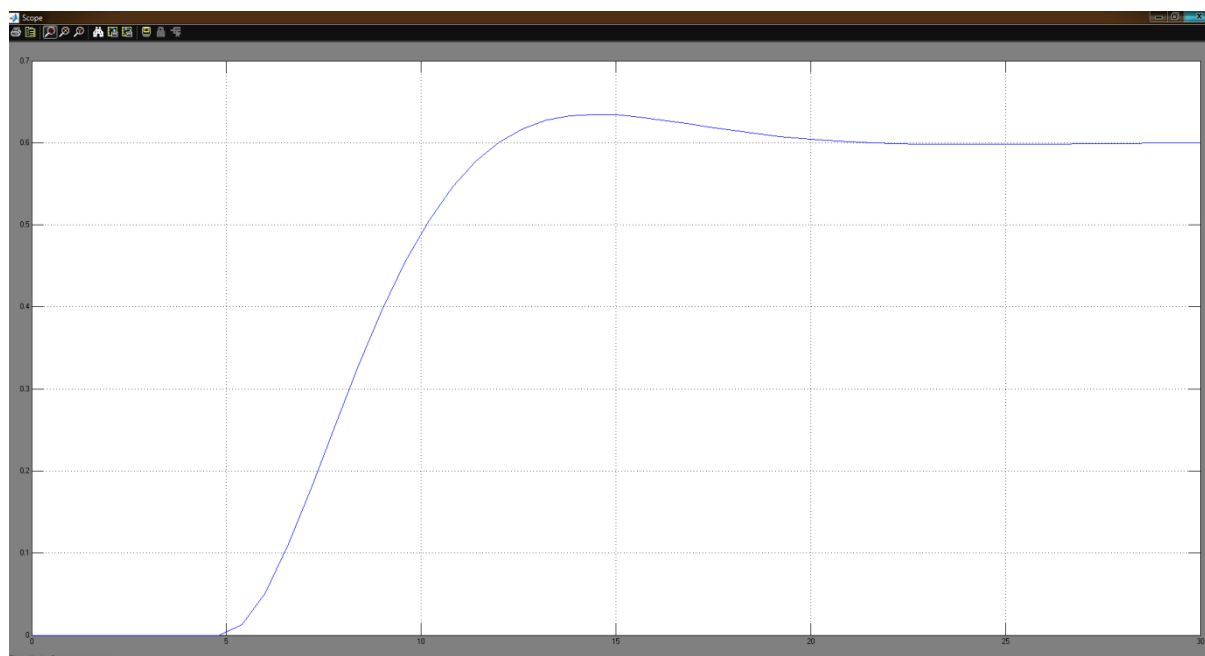


Рис. 1.30. Переходная характеристика объекта регулирования

1.5. Аппроксимация динамической характеристики объекта регулирования

Для расчета параметров настройки ПИД-регулятора с использованием эмпирических соотношений Циглера и Никольса [3] по настройке промышленных регуляторов необходимо получить реакцию объекта регулирования (переходную характеристику) на единичное ступенчатое воздействие (рис. 1.30). При этом объект регулирования должен описываться передаточной функцией инерционного звена первого порядка с запаздыванием.

$$W(p) = \frac{K_{об}}{T_{об}p + 1} e^{-\tau_{об}p}, \quad (1.1)$$

где $K_{об}$ – коэффициент усиления объекта; $T_{об}$ – постоянная времени объекта; $\tau_{об}$ – время запаздывания объекта.

Если объект регулирования описывается передаточной функцией другого вида, то его переходную характеристику можно аппроксимировать передаточной функцией инерционного звена первого порядка с запаздыванием.

Полученная кривая разгона (рис. 1.30) перестраивается в удобном масштабе. В точке перегиба проводится касательная. Затем по графику определяются (рис. 1.31): коэффициент усиления ($K_{об}$), постоянная времени ($T_{об}$) и время запаздывания объекта ($\tau_{об}$).

Соответственно: $K_{об} = 0,6$; $T_{об} = 6$ мин; $\tau_{об} = 5$ мин.

Подставляя полученные значения в выражение для передаточной функции инерционного звена 1 порядка с запаздыванием (1.1), получают следующую передаточную функцию и соответствующую ей кривую разгона (рис. 1.32):

$$W(p) = \frac{0,6}{6p + 1} e^{-5p}. \quad (1.2)$$

Параметры передаточной функции объекта регулирования, определенные по переходной характеристике (рис. 1.30, 1.31), используются для расчета оптимальной настройки регулятора в соответствии с табл. 2.1 [3].

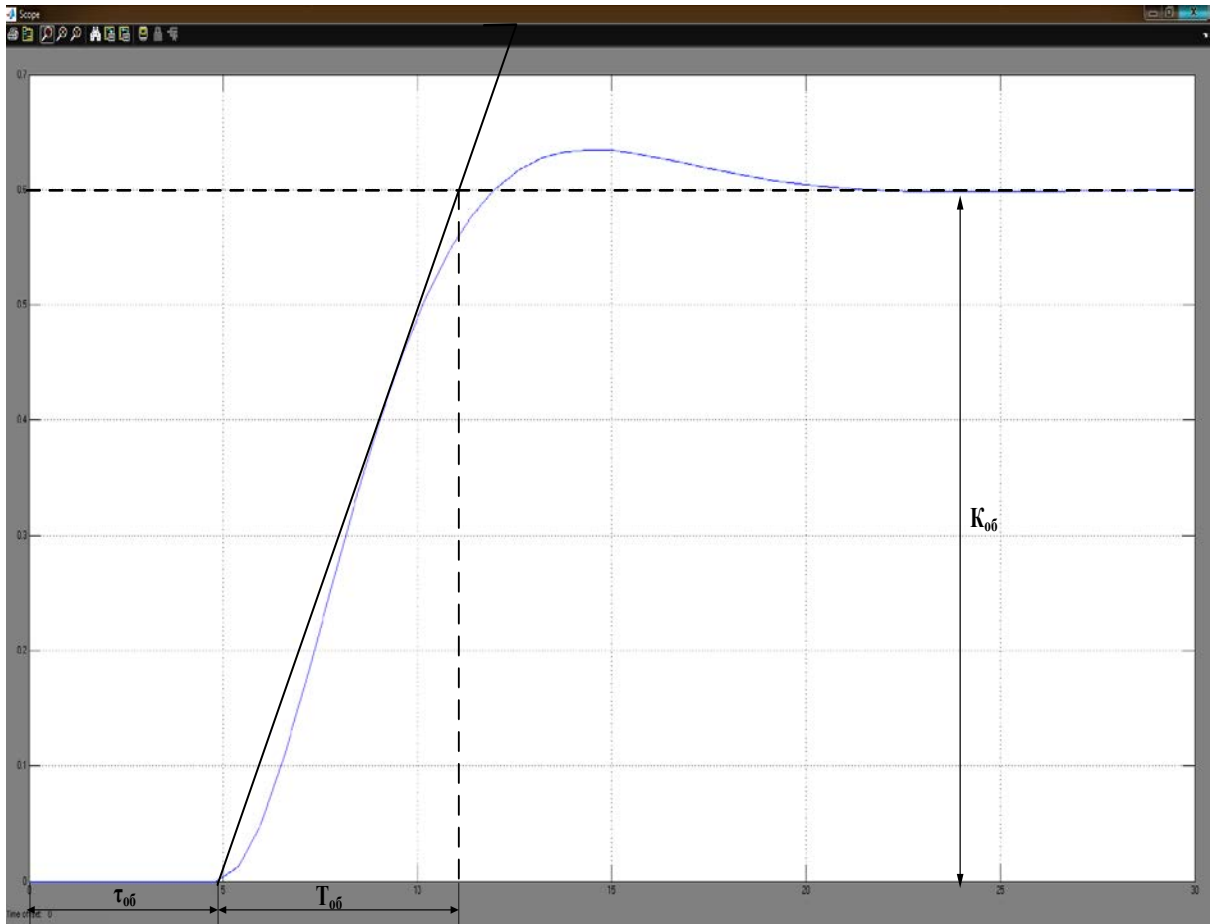


Рис. 1.31. Порядок аппроксимации

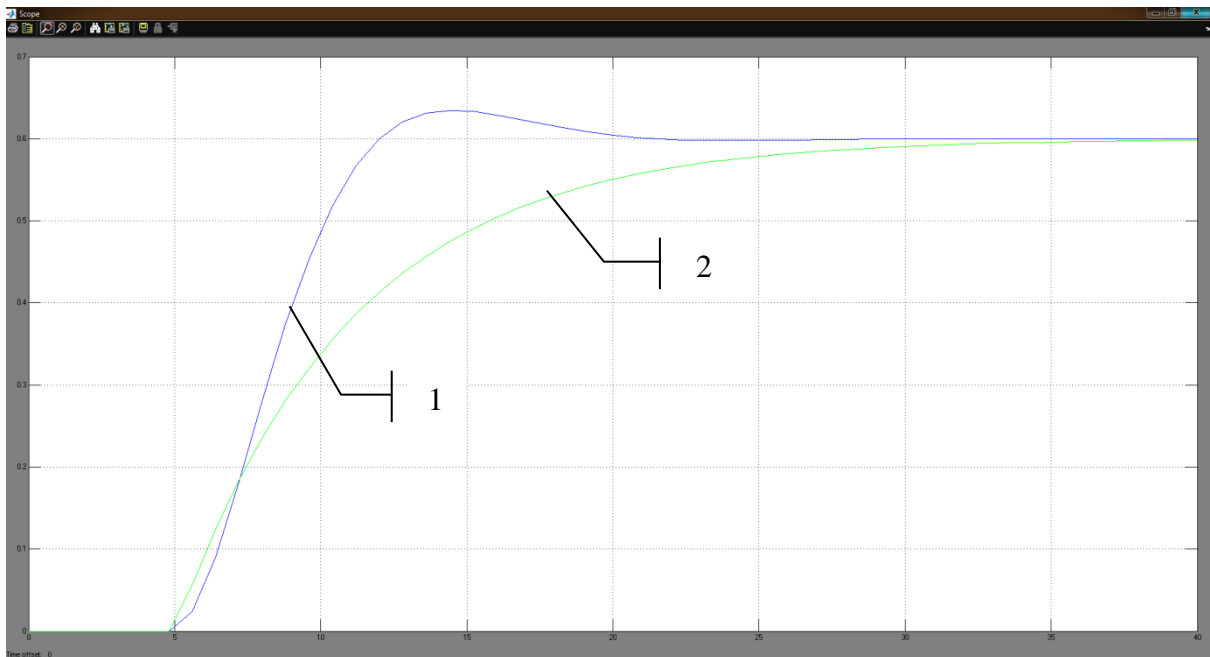


Рис. 1.32. Кривая разгона (1) и аппроксимирующая кривая 1-го порядка (2)

1.6. Построение амплитудно-фазовой частотной характеристики САУ с использованием Simulink и анализ устойчивости системы

Реакцию САУ или отдельных ее элементов на гармоническое входное воздействие выражают с помощью частотных характеристик. В отличие от временных характеристик, получаемых в переходных режимах, частотные характеристики определяют в установившихся колебательных режимах. Частотные характеристики связаны со структурой и свойствами системы управления и широко используются в инженерной практике, как при анализе, так и при синтезе САУ [3].

Исследование систем управления с использованием частотных характеристик называют исследованием в частотной области, а методы исследования, в которых используются частотные характеристики, – частотными методами [3].

Частотные характеристики можно получить как на основе математической модели САУ, так и экспериментально.

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ), называемая также диаграммой Найквиста, строится на комплексной плоскости и представляет собой годограф частотной передаточной функции при изменении частоты от нуля до бесконечности [3].

По АФЧХ судят об устойчивости САУ. Если годограф АФЧХ разомкнутой САУ не охватывает критическую точку $(-1; i0)$ в комплексной плоскости, значит, система устойчива. Иначе – система неустойчива.

Процедура построения АФЧХ системы автоматического регулирования с использованием программной среды MATLAB/Simulink включает следующие этапы.

1. Установка точек входа/выхода. Выделением в окне S-модели (рис. 1.6, 1.10) линии связи на входе в сумматор, щелчком правой кнопки мыши вызывается контекстное меню (рис. 1.33), в котором, при выборе **Linearization Points/ Input Point**, добавляется точка входа, а перед блоком **Scope** – **Output Point** (точка выхода) для линеаризации (рис. 1.34).

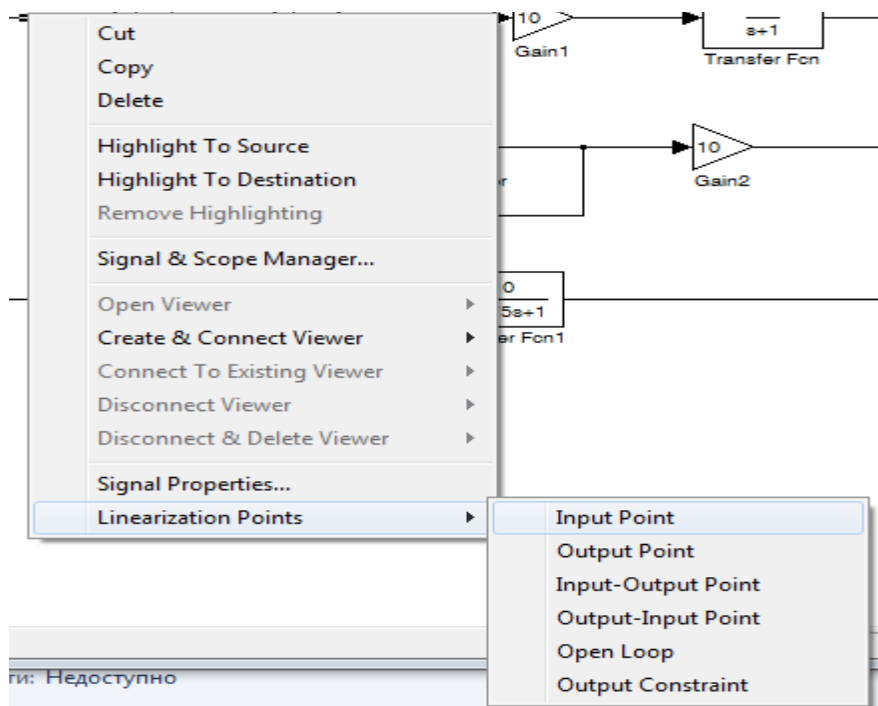


Рис. 1.33. Контекстное меню и добавление точек входа и выхода для построения АФЧХ

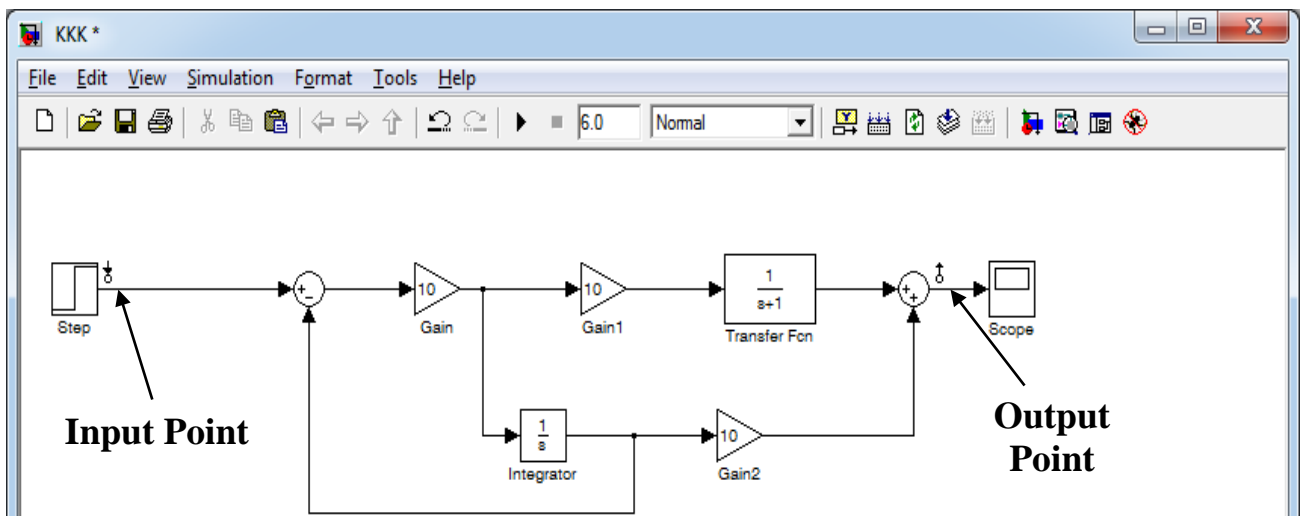


Рис. 1.34. Вид S-модели с добавленными точками входа и выхода для построения АФЧХ

2. Выбор вида графика. В окне S-модели (рис. 1.6, 1.10) в меню **Tools** выбрать **Control Design/Linear Analysis**. При этом откроется диалоговое окно **Control and Estimation Tools Manager**, представленное на рис. 1.35, в окне которого из выпадающего списка выбрать **Nyquist plot**.

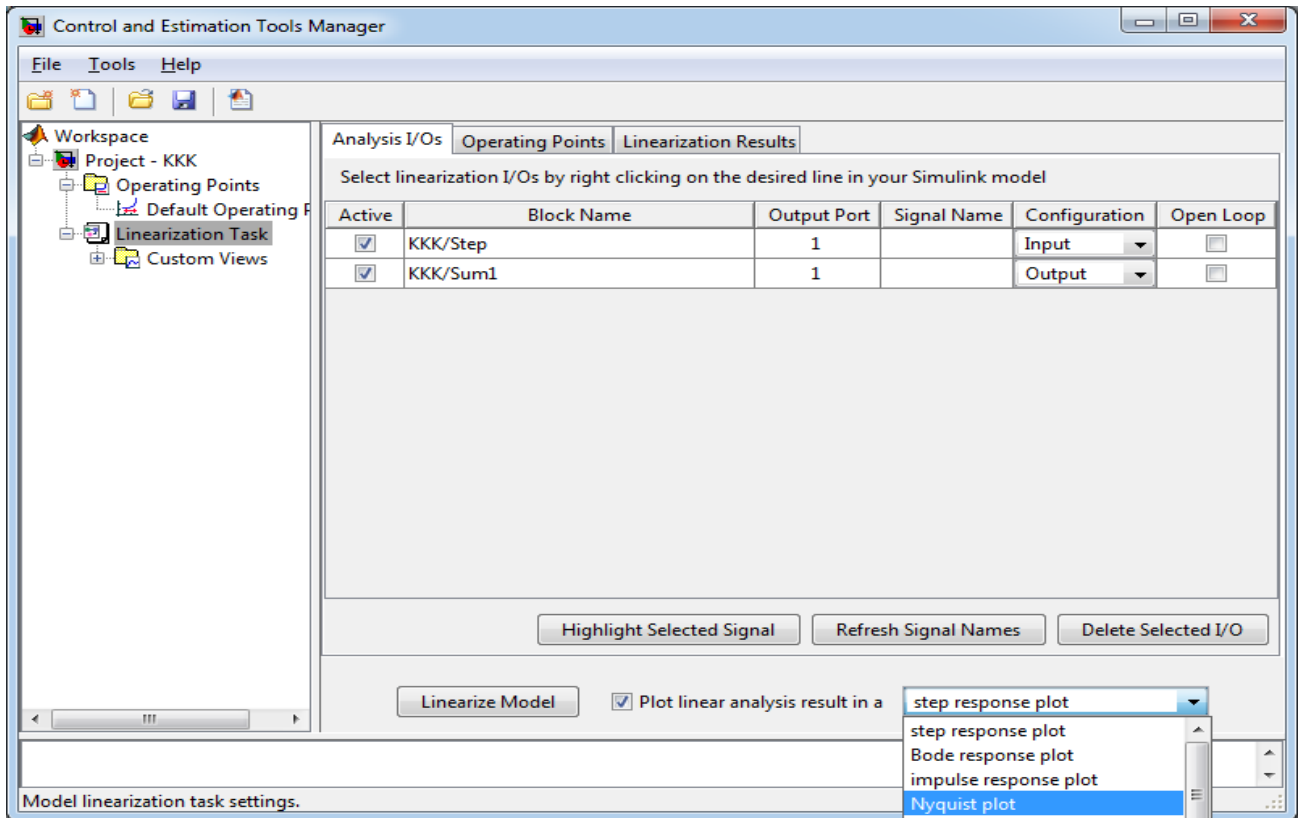


Рис. 1.35. Диалоговое окно **Control and Estimation Tools Manager**

Кроме диаграммы Найквиста в **Simulink** доступны следующие графики (диаграммы):

- **step response plot** – реакция на единичное ступенчатое воздействие;
- **Bode response plot** – логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики (диаграмма Боде);
- **impulse response plot** – реакция на единичное импульсное воздействие;
- **Nichols plot** – годограф Николса;
- **Bode magnitude plot** – логарифмическая амплитудная частотная характеристика;
- **singular value plot** – сингулярные числа;
- **pole zero map** – нули и полюса системы;
- **IO pole zero map** – нули и полюса системы для пар ввода/вывода.

При нажатии на кнопку **Linearize Model** (рис. 1.35) открывается окно **LTI (Linear System Analyzer) Viewer** (рис. 1.36), в котором отображается выбранный график (в данном случае – это диаграмма Найквиста).

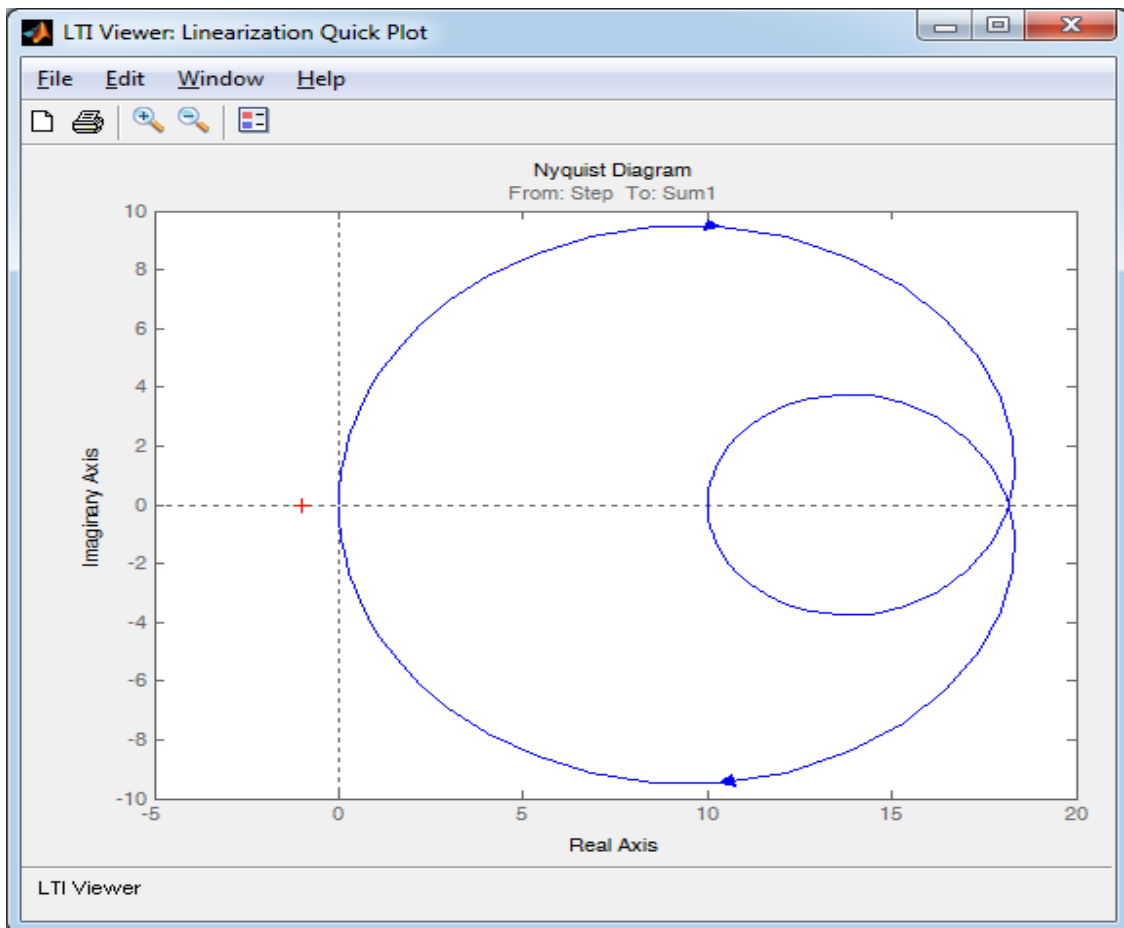


Рис. 1.36. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (диаграмма Найквиста)

Замкнутая САР устойчива, так как годограф АФЧХ при изменении частоты от $\omega = 0$ до $\omega = \infty$ не охватывает точку в комплексной плоскости с координатами $(-1, i0)$.

1.7. Требования к отчету по работе

Отчет по работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические положения о динамических характеристиках систем автоматического регулирования.
3. Определение передаточной функции автоматической системы регулирования различными методами: используя понятия передаточных функций, правила структурных преобразований и метод сигнальных графов.
4. Аналитический вывод временной и амплитудно-фазовой характери-

стики исследуемой автоматической системы регулирования.

5. Описание процедуры создания модели САР в Simulink.
6. Результаты моделирования работы САР в Simulink (график кривой разгона).
7. Аппроксимация динамической характеристики САР (кривой разгона).
8. Описание процедуры построения амплитудно-фазовой частотной характеристики САР с использованием Simulink и анализ устойчивости системы.
9. Выводы по результатам исследования с обоснованием полученных решений.
10. Список использованной литературы.

РАБОТА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОКОНТУРНОЙ САР. ЗАДАЧИ РЕГУЛИРОВАНИЯ. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЕК. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы:

- моделирование одноконтурной САР и изучение влияния параметров настройки регуляторов на качество переходных процессов.

Задачи работы:

- составить блок-схему одноконтурной САР с пропорционально-интегральным (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законами регулирования;
- рассчитать параметры настроек ПИ- и ПИД-регуляторов по эмпирическим соотношениям Циглера и Никольса по настройке промышленных регуляторов с использованием переходной характеристики объекта регулирования, полученной в работе 1;
- с использованием программной среды MATLAB/Simulink провести моделирование работы одноконтурной САР при ступенчатом изменении за-

данного значения регулируемой переменной;

- исследовать влияние на качество переходных процессов изменения параметров настроек ПИ- и ПИД-регуляторов.

2.1. Разработка структурной схемы моделирования замкнутой одноконтурной САР в среде Simulink

Одноконтурные САР можно представить в виде блок-схемы (рис. 2.1), состоящей из объекта регулирования, регулятора и элемента сравнения. Состояние объекта регулирования характеризуется текущим значением регулируемой величины $x_{\text{вых}}(t)$. Текущее значение сравнивается с заданным значением $x_3(t)$ в элементе сравнения, в котором вырабатывается рассогласование $\Delta x(t)$, являющейся ошибкой регулирования. Сигнал рассогласования преобразуется в соответствии с выбранным законом регулирования в регуляторе в регулирующее воздействие $u(t)$, которое поступает на объект. Свойства САР определяются свойствами ее отдельных элементов.

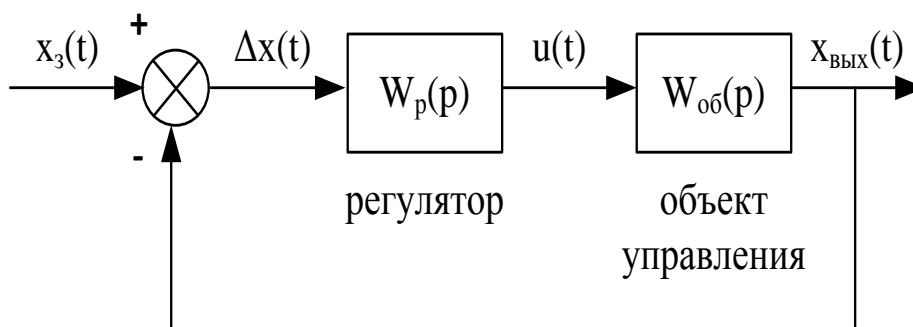


Рис. 2.1. Блок-схема одноконтурной САР:

$W_{\text{об}}$ – передаточная функция объекта по каналу управления;

W_p – передаточная функция регулятора

В качестве примера рассмотрим разработку одноконтурной САР, где объект управления описывается инерционным звеном первого порядка с звеном запаздывания (см. (1.1), (2.1)).

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{T_{об}p + 1} e^{-\tau_{об}p} = \frac{1}{10p + 1} e^{-3.5p} \quad (2.1)$$

В соответствии с блок-схемой одноконтурной САУ (рис. 2.1) в **Simulink** составляется модель из блоков (таблица с. 16): **Step**, **Sum**, **Transfer Fcn**, **PID Controller**, **Scope** и **Display** (рис. 2.2).

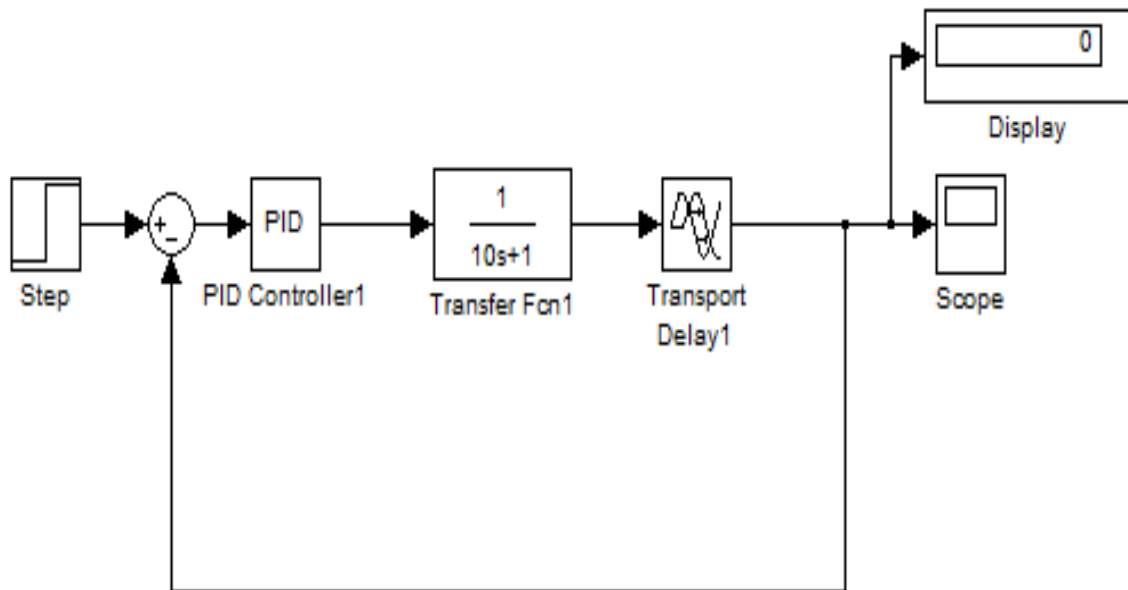


Рис. 2.2. Модель одноконтурной САУ в **Simulink**

2.2. Определение настроек регуляторов по эмпирическим зависимостям

Для выбора и расчета оптимальных настроек промышленных регуляторов существуют различные подходы и методы, например, систематизированные и рассмотренные в [4].

По эмпирическим соотношениям (табл. 2.1 [3]) рассчитываются параметры настроек ПИ- и ПИД-регуляторов для объекта управления, описываемого инерционным звеном первого порядка и звеном чистого запаздывания (2.1). Характеристики объекта были получены в результате выполнения лабораторной работы 1.

Таблица 2.1

Рекомендации Циглера и Никольса по настройке промышленных регуляторов с использованием переходной характеристики разомкнутой системы регулирования

Закон регулирования	Параметры настройки регулятора*			№ формулы
	K_p	T_u	T_n	
П	$\frac{1}{K_{об}} \cdot \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$			(2.2)
ПИ	$\frac{0,9}{K_{об}} \cdot \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$	$3,33 \cdot \tau_{об}$		(2.3)
ПИД	$\frac{1,2}{K_{об}} \cdot \frac{T_{об}}{\tau_{об}}$	$2 \cdot \tau_{об}$	$0,5 \cdot \tau_{об}$	(2.4)

* K_p – коэффициент усиления; T_u – время изодрома, T_n – время предварения

Для ввода настроек регулятора в параметры блока **PID Controller**, коэффициент усиления, время изодрома и время предварения, определенные по соотношениям (2.2) – (2.4), пересчитываются по следующим формулам:

$$P = K_p, \quad (2.5)$$

$$I = \frac{K_p}{T_u}, \quad (2.6)$$

$$D = K_p \cdot T_n, \quad (2.7)$$

где P , I , D – коэффициенты при пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей ПИД-регулятора (блока **PID Controller**).

По соотношениям (2.3) рассчитываются параметры настройки ПИ-регулятора:

$$K_p = \frac{0,9}{K_{об}} \cdot \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = \frac{0,9 \cdot 10}{1 \cdot 3,5} = 2,57,$$

$$T_u = 3,33 \cdot \tau_{об} = 3,33 \cdot 3,5 = 11,66.$$

По формулам (2.5), (2.6) вычисляются коэффициенты при пропорциональной и интегральной составляющих ПИД-регулятора (блока **PID Controller**):

$$P = K_p = 2,57,$$
$$I = \frac{K_p}{T_u} = \frac{2,57}{11,66} = 0,22.$$

Настройки ПИД-регулятора определяются по формулам (2.4).

$$K_p = \frac{1,2}{K_{об}} \cdot \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = \frac{1,2 \cdot 10}{1 \cdot 3,5} = 3,42,$$
$$T_u = 2 \cdot \tau_{об} = 2 \cdot 3,5 = 7,$$
$$T_n = 0,5 \cdot \tau_{об} = 0,5 \cdot 3,5 = 1,75.$$

По формулам (2.5) – (2.7) вычисляются коэффициенты при пропорциональной, интегральной и дифференциальных составляющих ПИД-регулятора (блока **PID Controller**):

$$P = K_p = 3,42,$$
$$I = \frac{K_p}{T_u} = \frac{3,42}{7} = 0,49,$$
$$D = K_p \cdot T_n = 3,42 \cdot 1,75 = 5,99.$$

2.3. Моделирование одноконтурной САР

После расчета всех настроек регуляторов, коэффициенты P , I , D заносятся в соответствующие поля диалогового окна параметров функционального блока **PID Controller** (рис. 2.3). В случае отсутствия какого-либо из коэффициентов, в соответствующем ему поле ставится «0» (ноль).

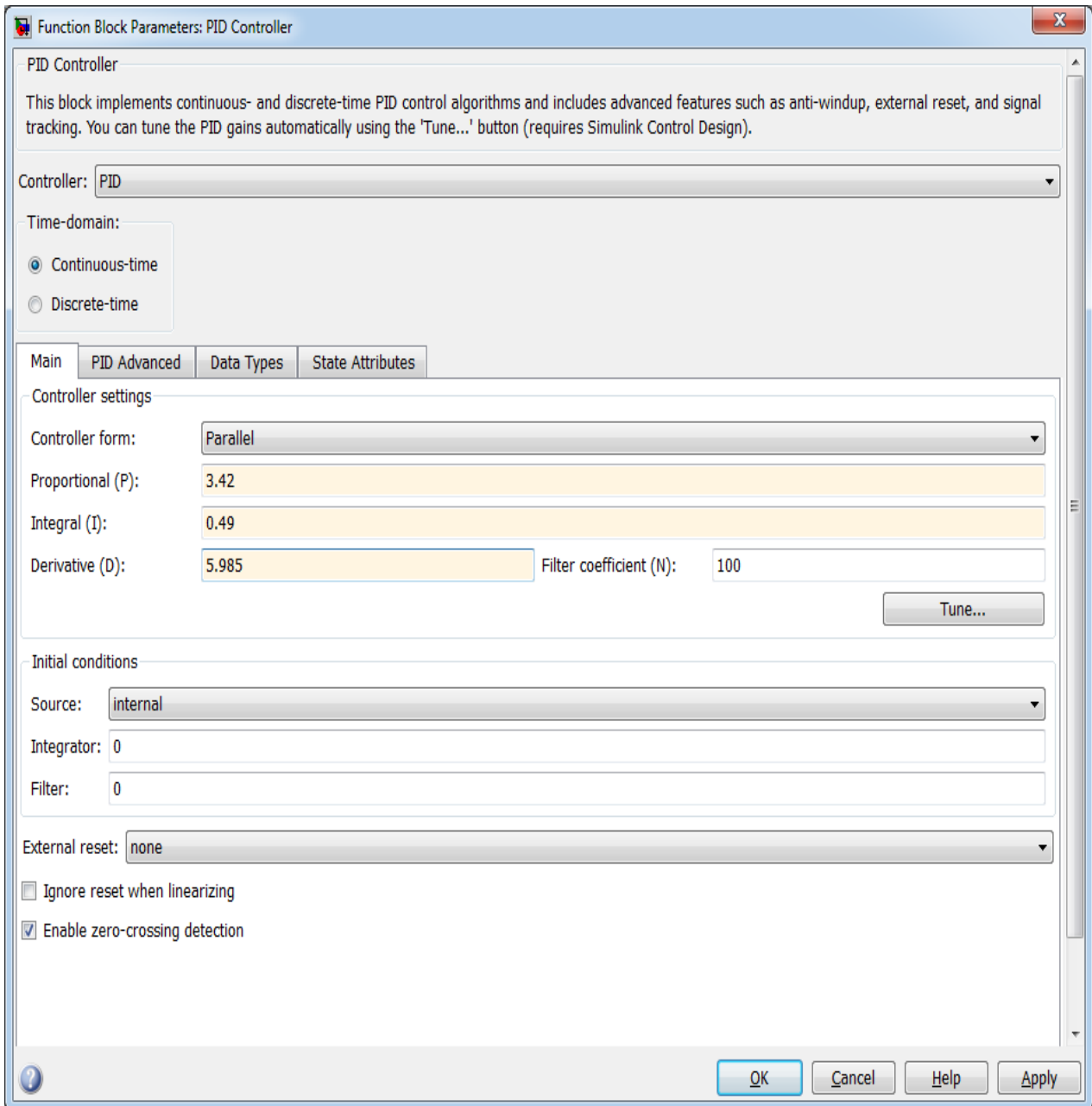


Рис. 2.3. Диалоговое окно настройки параметров функционального блока **PID Controller**

На вход SAP подается заданное значение регулируемой величины – 20. Для этого в настройках блока **Step** указываются следующие значения (рис. 1.25): **Step time** – 0, **Initial value** – 0, **Final value** – 20.

Затем задаются параметры моделирования (рис. 1.12): **Start time** – 0, **Stop time** – 50, **Type** – Fixed-step, **Solver** – ode5 (Dormand – Prince), **Fixed-step size** – 0.1.

Результаты моделирования представлены на рис. 2.4, 2.5.

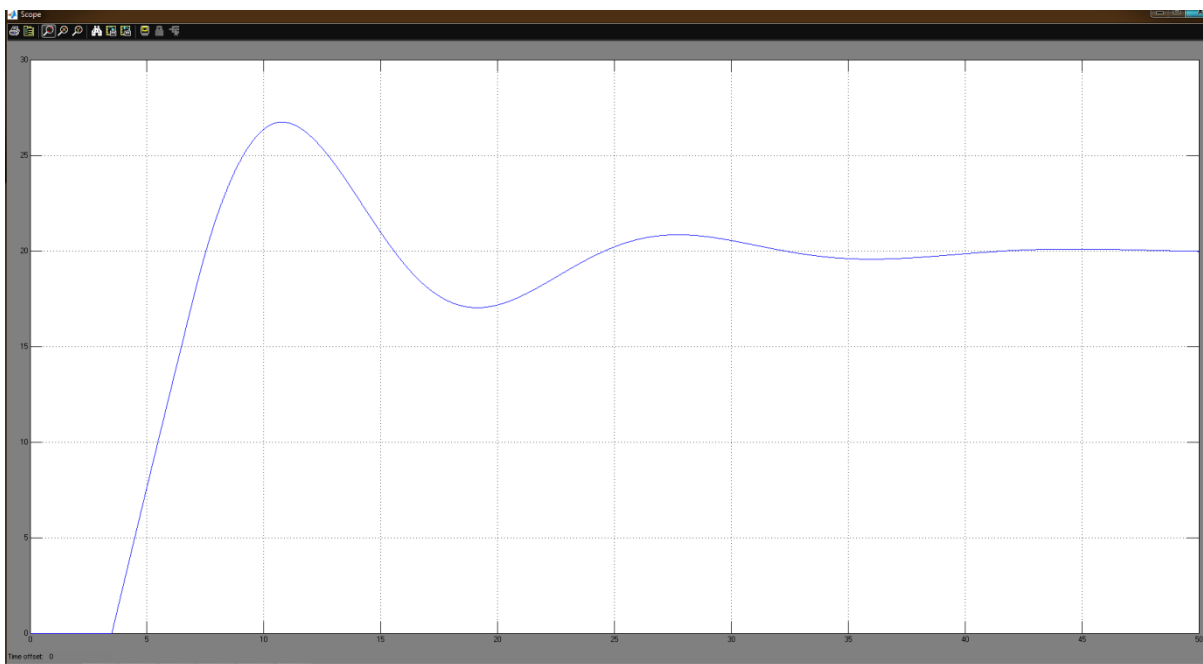


Рис. 2.4. График переходного процесса одноконтурной САР с ПИ-регулятором

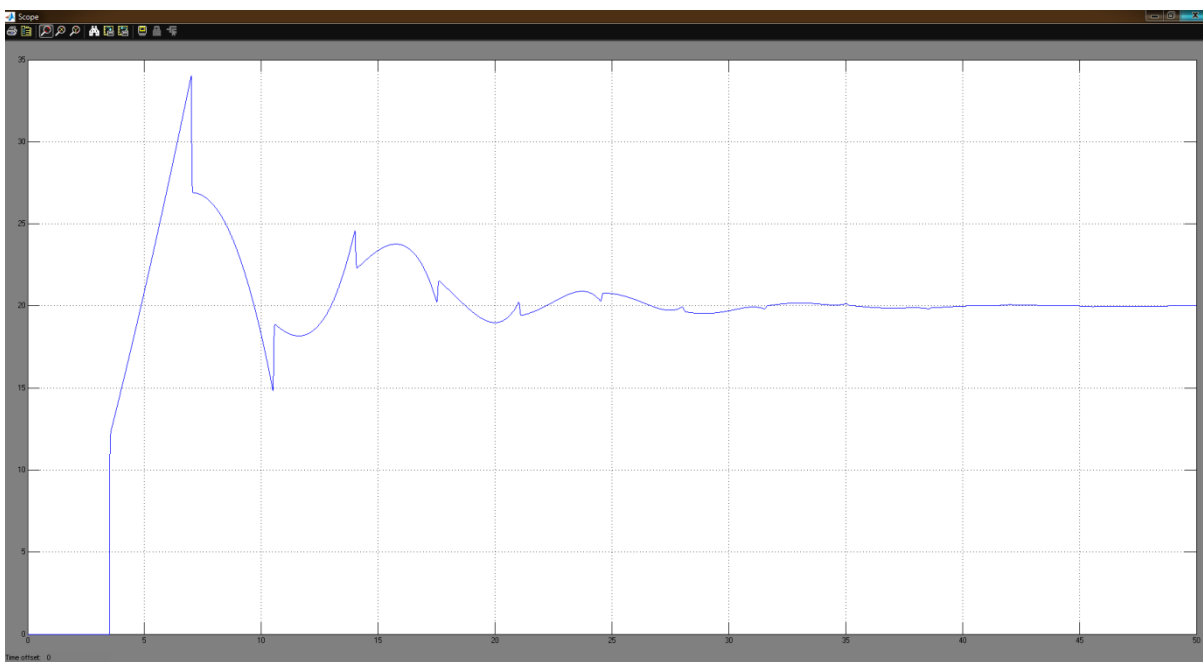


Рис. 2.5. График переходного процесса одноконтурной САР с ПИД-регулятором

По графикам переходных процессов (рис. 2.4, 2.5) определяются следующие показатели качества регулирования: динамическая ошибка Δ_d (в единицах измерения регулируемой величины), статическая ошибка Δ_{cm} (в единицах измерения регулируемой величины), время регулирования t_p (мин).

Результаты моделирования одноконтурных САР с ПИ- и ПИД-регуляторами представлены в табл. 2.2.

**Показатели качества регулирования для одноконтурных САР
с ПИ- и ПИД-регуляторами**

№ п/п	САР	Параметры настройки			Показатели качества регулирования		
		P	I	D	Динамическая ошибка Δ_{δ} , ед.	Статическая ошибка $\Delta_{ст}$, ед.	Время регулиро- вания t_p , мин
1	ПИ- регулятор	2,57	0,22	0	6,8	0,1	48
2	ПИД- регулятор	3,42	0,49	5,99	14	0,1	50

По результатам имитационного моделирования, представленным в табл. 2.2, можно сделать вывод, что наилучшее качество регулирования показывает САР с ПИ-регулятором.

В случае, если при рассчитанных параметрах настройки САР не обеспечивает требуемое качество, то в **Simulink** существует инструмент, позволяющий найти оптимальные параметры регулятора.

2.4. Определение настроек ПИД-регулятора по заданным показателям качества с использованием инструментального пакета **Simulink Design Optimization библиотеки **Simulink****

Пакет **Simulink Design Optimization** представляет графический интерфейс пользователя (Graphical User Interface – **GUI**) для проектирования систем управления во временной области. С помощью пакета **Simulink Design Optimization** можно найти оптимальные параметры настройки для нелинейной модели системы в **Simulink**, которые обеспечат требуемый переходной процесс по заданным графическим ограничениям в окне временной области. На базе этих ограничений **Simulink Design Optimization** автоматически генерирует задачу конечномерной оптимизации так, чтобы точка экстремума в пространстве настраиваемых параметров соответствовала выполнению всех требований, предъявляемых к качеству процесса. Ход оптимизации контро-

лируется на экране с помощью отображения графика контролируемого процесса и текущих значений минимизируемой функции. По завершении процесса его результат фиксируется в рабочем пространстве.

Любое число переменных **Simulink**, включая скалярные, векторные и матричные величины, могут быть объявлены настраиваемыми или оптимизируемыми. Для этого надо ввести имена переменных в соответствующем диалоговом окне [5].

Simulink Design Optimization предоставляет в распоряжение пользователя графический интерфейс для настройки параметров динамических объектов, обеспечивающих желаемое качество переходных процессов. Предоставляет интерактивные инструменты, функции и блоки для оценки и настройки параметров модели **Simulink** с помощью численной оптимизации [6].

Поиск оптимальных параметров настройки регулятора осуществляется с помощью блока **Signal Constraint** библиотеки **Simulink Design Optimization**. Указанный блок в S-модели САР присоединяется параллельно блоку **Scope** (рис. 2.6).

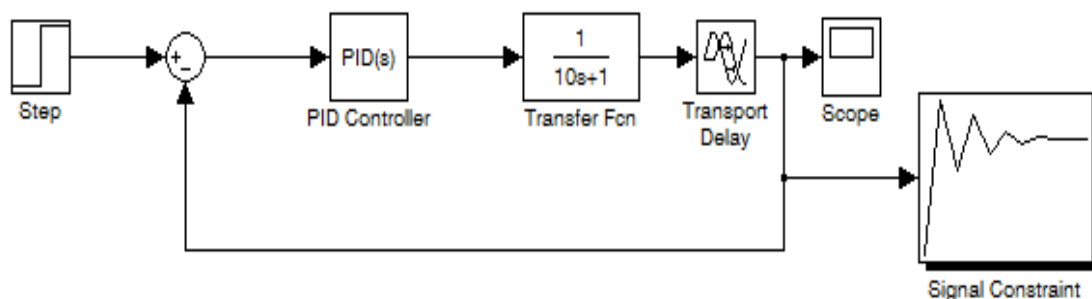


Рис. 2.6. Блок-схема одноконтурной САР с блоком **Signal Constraint**

При двойном щелчке левой кнопкой мыши на блоке **Signal Constraint** открывается диалоговое окно, представленное на рис. 2.7.

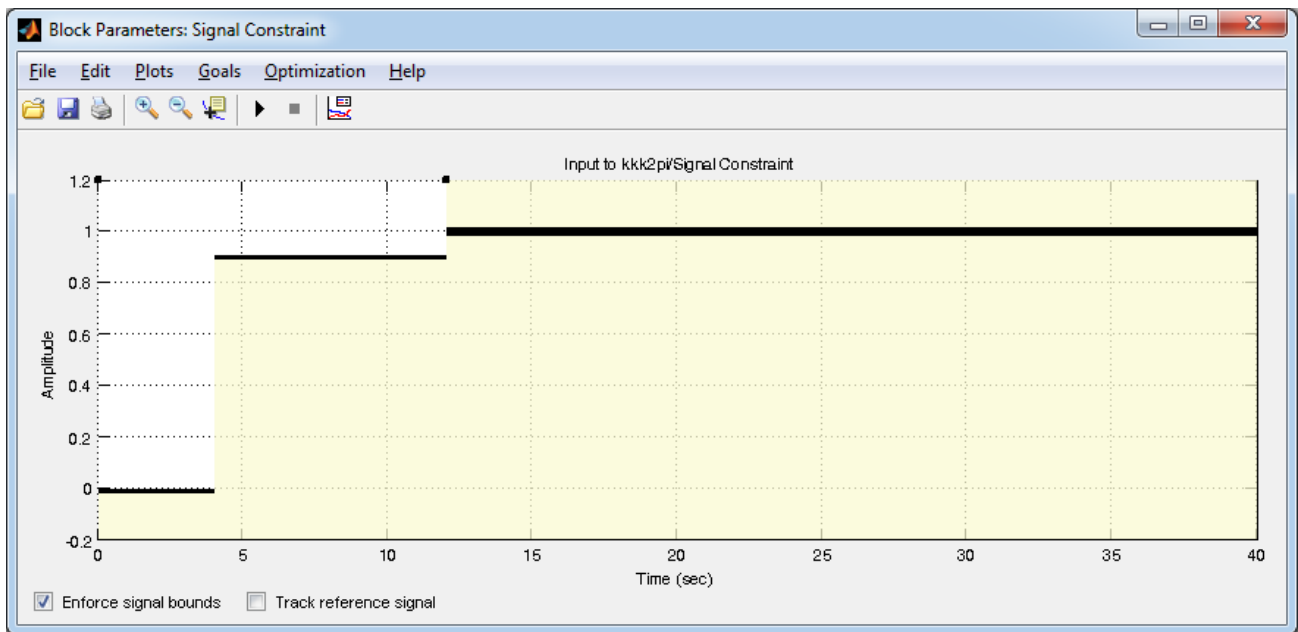


Рис. 2.7. Диалоговое окно настройки параметров блока **Signal Constraint**

Прежде чем начать с ним работу, необходимо в командном окне **MATLAB** (рис. 1.1, 2.8) задать начальные, наилучшие по предварительной оценке значения настраиваемых переменных, т.е. инициализировать переменные $P=3,42$; $I=0,49$; $D=5,99$, соответственно равные настройкам ПИД-регулятора, определенным по эмпирическим соотношениям (2.4) – (2.7) и представленным в табл. 2.2.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
Warning: The specified buffer for 'reg_11/Transport Delay' was too small. During simulation, the buffer size was temporarily increased to 4096. In order to use Real-Time Workshop, you need to update the buffer size parameter
Warning: The specified buffer for 'reg_11/Transport Delay1' was too small. During simulation, the buffer size was temporarily increased to 4096. In order to use Real-Time Workshop, you need to update the buffer size parameter
>> P=3.42

P =

    3.4200

>> I=0.49

I =

    0.4900

>> D=5.99

D =

    5.9900

f1 >>
  
```

```

Command History
12.10.15 15:35 -->
13.10.15 11:25 -->
14.10.15 12:36 -->
15.10.15 15:55 -->
15.10.15 15:56 -->
16.10.15 13:56 -->
19.10.15 12:22 -->
20.10.15 10:51 -->
21.10.15 10:56 -->
P=3.42
I=0.49
D=5.99
P=3.42
I=0.49
D=5.99
22.10.15 10:04 -->
P=2.57
I=0.22
P=3.42
  
```

Рис. 2.8. Инициализация переменных (коэффициентов P, I, D) в командном окне **MATLAB**

Затем в настройках блока **PID Controller** (рис. 2.9) в соответствующих полях вводятся имена переменных: в поле **Proportional** – переменная P, **Integral** – I, а в поле **Derivative** – D.

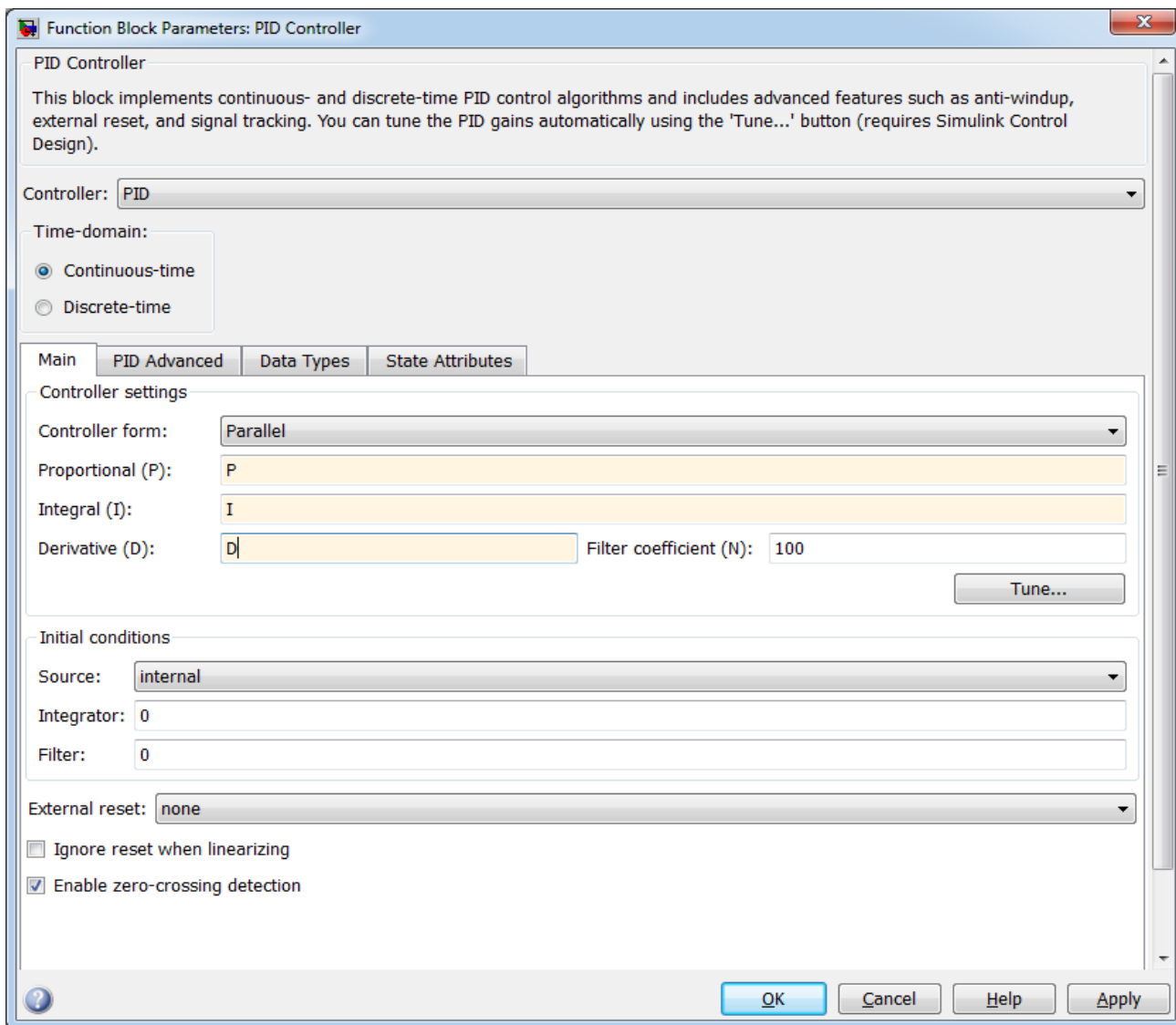


Рис. 2.9. Параметры настроек ПИД-регулятора

На следующем этапе в настройках блока **Signal Constraint** (рис. 2.7) (меню **Optimization/Tuned Parameters**) необходимо указать имена переменных – параметров настройки регулятора (P, I, D), по которым производится оптимизация переходной функции одноконтурной САР. Для этого в открывшемся диалоговом окне **Tuned Parameters** (рис. 2.10) нажать кнопку **Add** и выбрать переменные (рис. 2.11, 2.12), предварительно заданные в командном окне **MATLAB** (рис. 2.8).

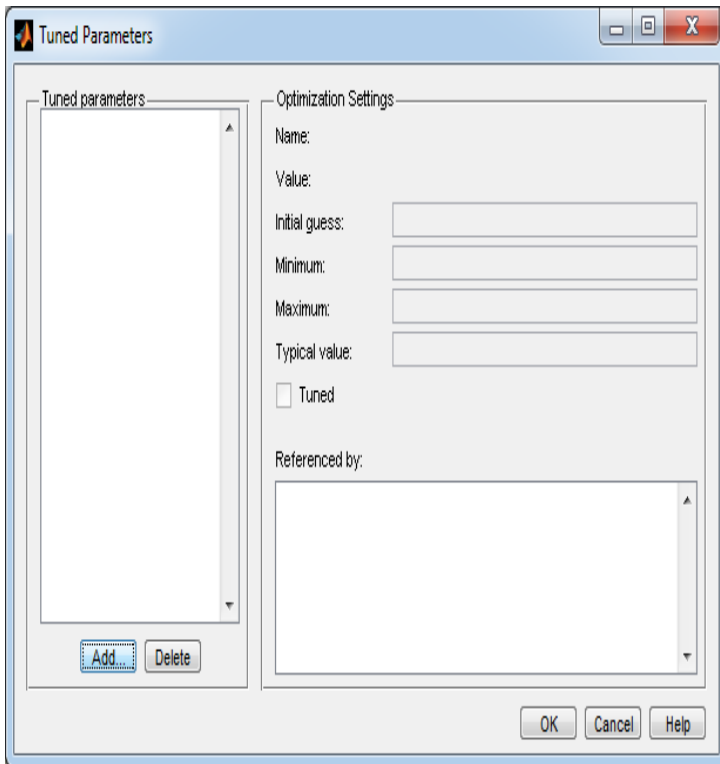


Рис. 2.10. Диалоговое окно **Tuned Parameters**

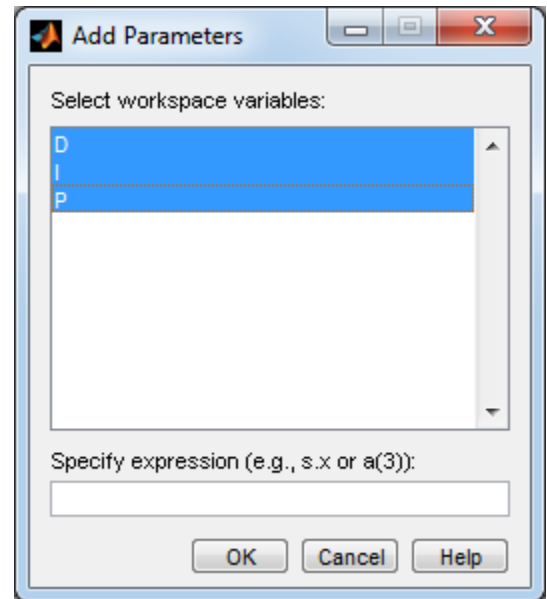


Рис. 2.11. Выбор переменных

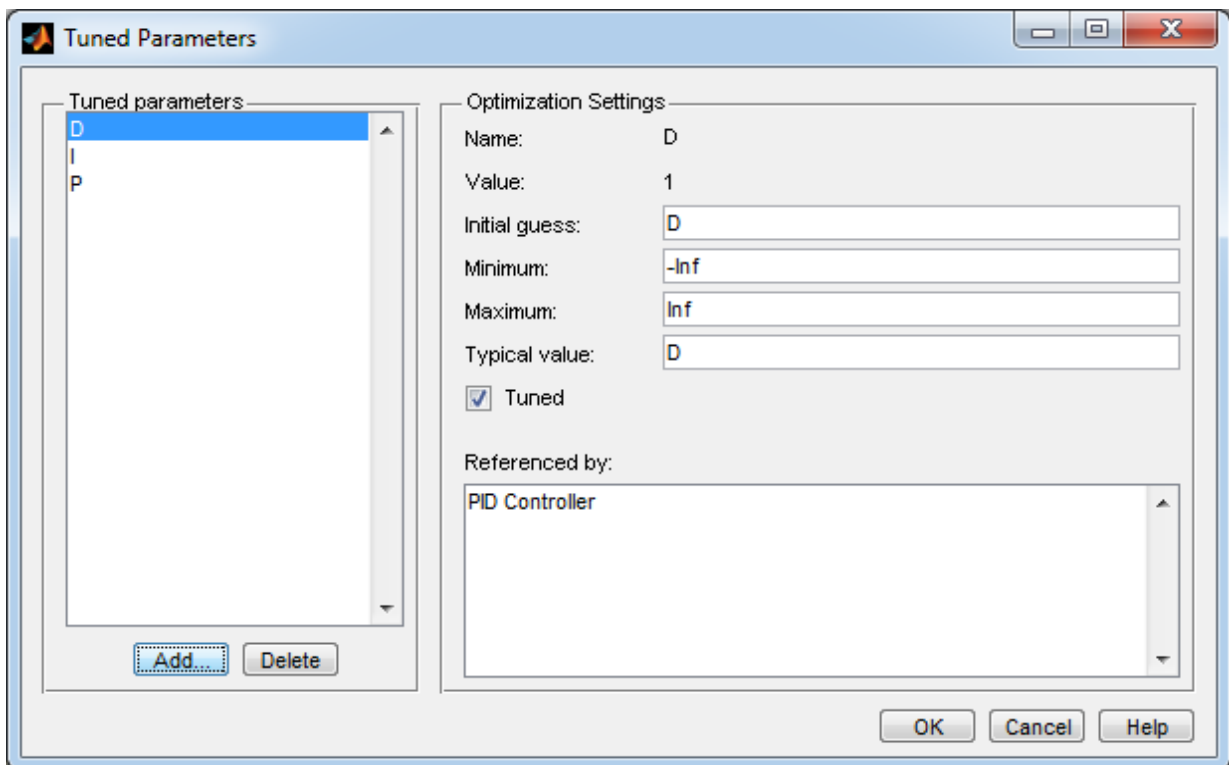


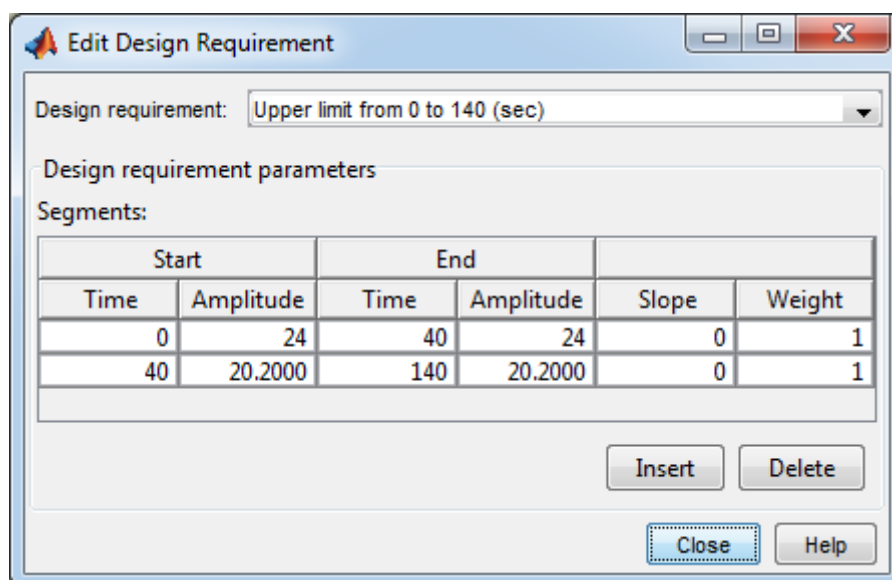
Рис. 2.12. Диалоговое окно **Tuned Parameters** с выбранными параметрами оптимизации

Следующим этапом является установка динамических ограничений на графике переходного процесса САР, осуществляемая в визуальном режиме в

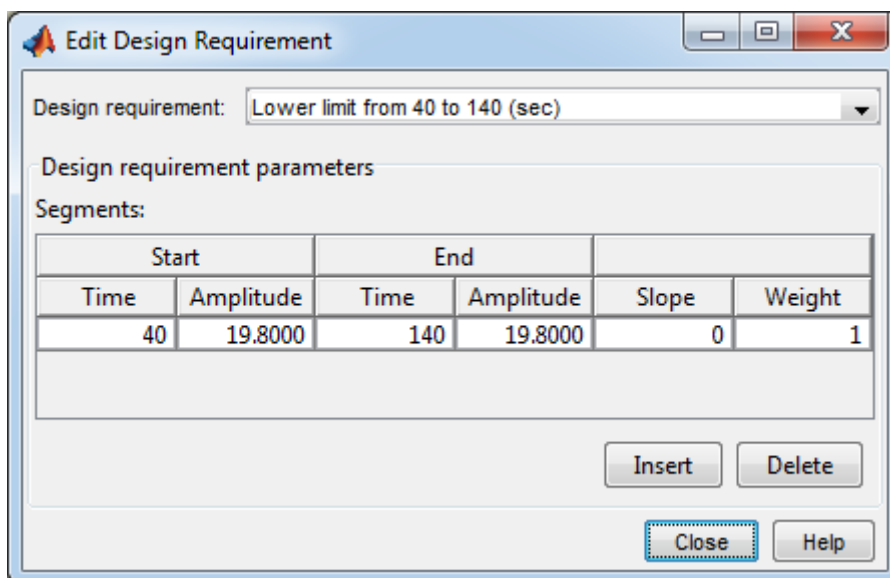
окне настройки параметров блока **Signal Constraint** (рис. 2.7). В соответствии с [3] для обеспечения требуемого качества регулирования, динамическая ошибка не должна превышать 20% от заданного значения регулируемого параметра, а статическая ошибка – 1%. Также устанавливается ограничение на время регулирования.

При заданном значении регулируемого параметра, равном 20 ед., динамическая ошибка и, соответственно, верхняя граница должна находиться на уровне 24 ед. (рис. 2.13,а, 2.14), а статическая ошибка и соответствующие ей верхняя и нижняя границы – на уровнях 20,2 ед. и 19,8 ед. (рис. 2.13,б, 2.14). С учетом ограничений на времена регулирования и моделирования, ограничительные линии блока **Signal Constraint** имеют координаты, представленные на рис. 2.13.

Установим ограничения, в пределах которых должен находиться входной сигнал блока **Signal Constraint** в соответствии с требованиями задачи. Это можно сделать, передвигая черные линии (рис. 2.7), являющиеся границами коридора, при помощи мыши. Местоположение этих линий можно установить точно при помощи диалогового окна **Edit Design Requirement** (рис. 2.13), открывающегося при щелчке ПК мыши по нужному сегменту ограничительной горизонтальной линии (рис. 2.7).



a



б

Рис. 2.13. Точная установка ограничений:

а – верхний предел от 0 до 140 с; б – нижний предел от 40 до 140 с

В итоге, ограничения входного сигнала блока **Signal Constraint** выглядят следующим образом (рис. 2.14).

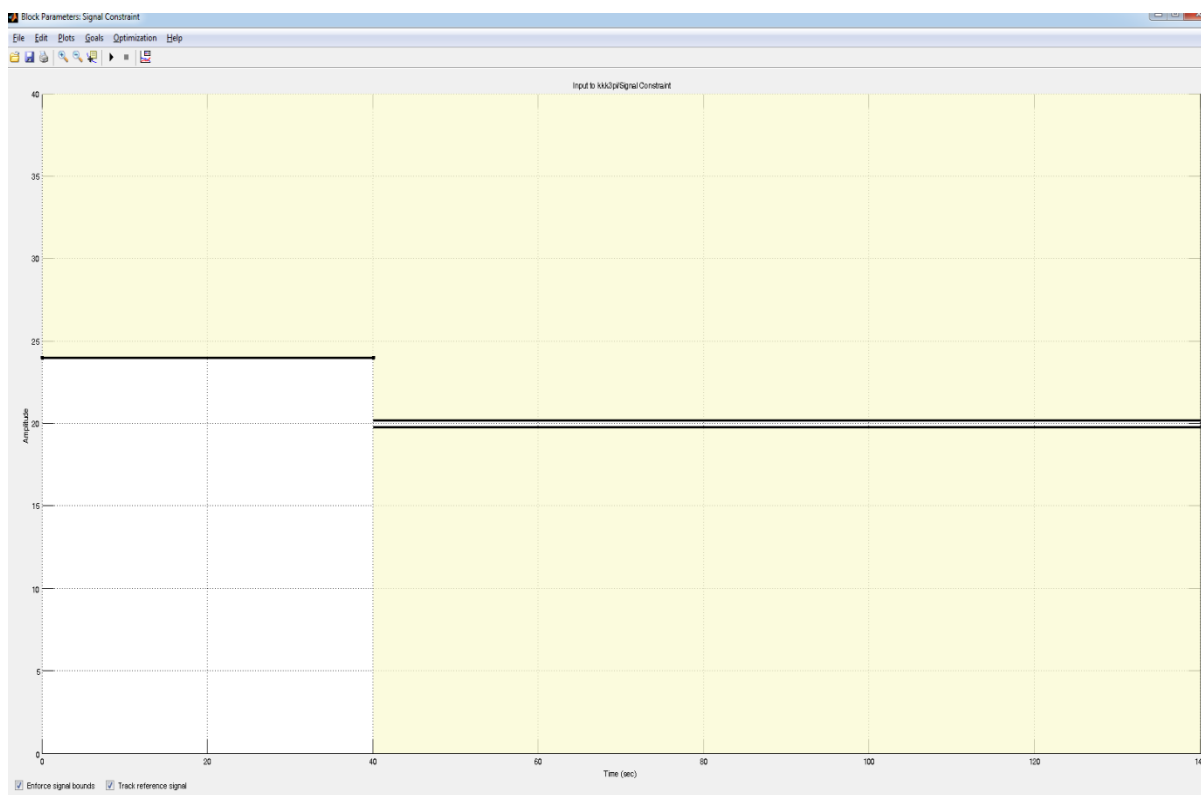


Рис. 2.14. Диалоговое окно настройки параметров блока **Signal Constraint** с заданными ограничениями

Для корректной работы блока **Signal Constraint** необходимо, чтобы точность поиска, задаваемая в строке **Parameter tolerance** (рис. 2.15) диалогового окна **Options**, открывающегося при выборе в меню **Optimization** блока **Signal Constraint** пункта **Optimization Options** (рис. 2.14), была больше или равна шагу интегрирования, заданному в строке **Fixed-step size** (величина фиксированного шага) при настройке параметров S-модели (рис. 1.12).

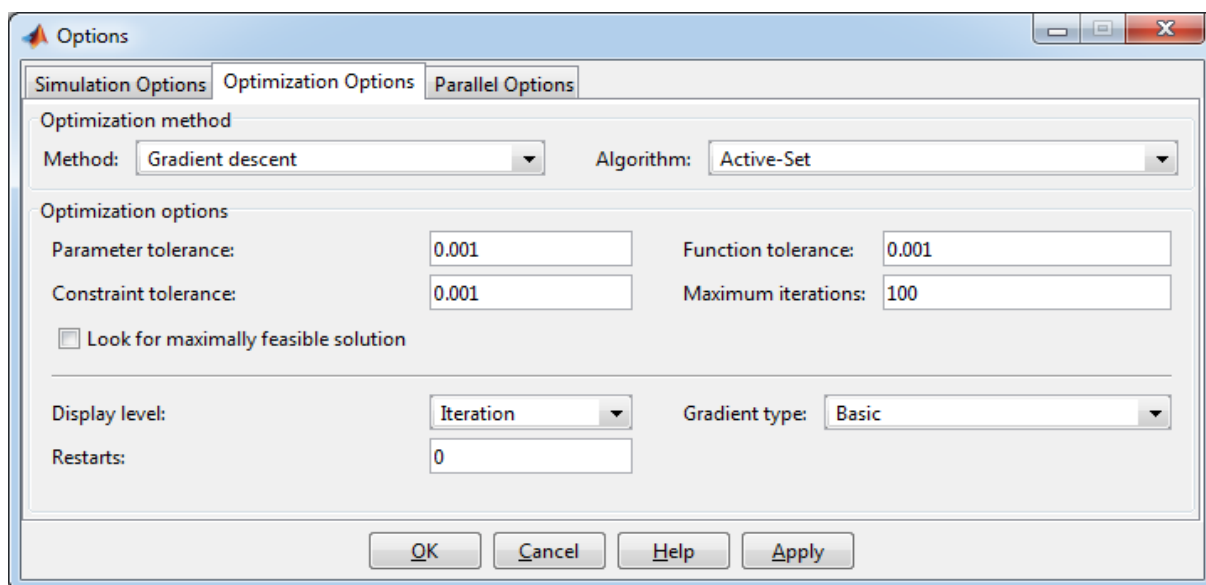


Рис. 2.15. Установка точности поиска

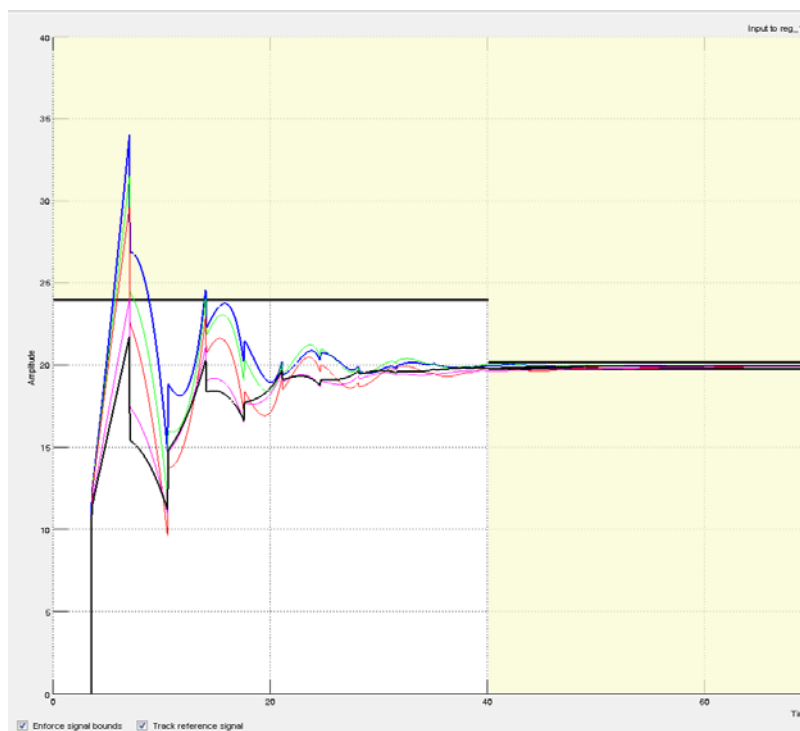



Рис. 2.16. Графическое отображение процесса оптимизации

После установки всех параметров запускается процесс оптимизации нажатием на кнопку  окна настройки параметров блока **Signal Constraint** (рис. 2.14). Для каждой итерации в этом окне отображаются графики сигнала, соответствующие начальным (синего цвета), текущим (зеленого и др. цветов) и конечным

(черного цвета) значениям настраиваемых параметров (рис. 2.16).

В командном окне **MATLAB** (рис. 1.1) и окне **Optimization Progress** (рис. 2.17) отображается информация о ходе оптимизации, и по окончании выводятся оптимальные значения переменных (P, I, D).

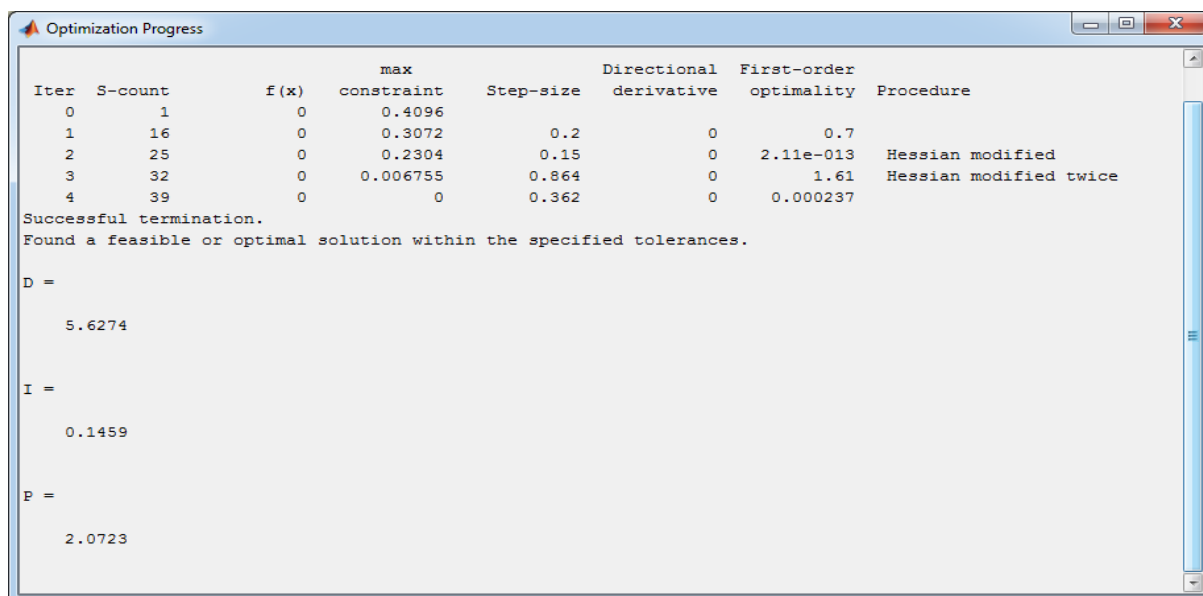


Рис. 2.17. Текущие значения параметров оптимизации

График переходного процесса для одноконтурной САР с ПИД-регулятором при оптимальных параметрах его настройки (P=2,07; I=0,15; D=5,63) представлен на рис. 2.18.

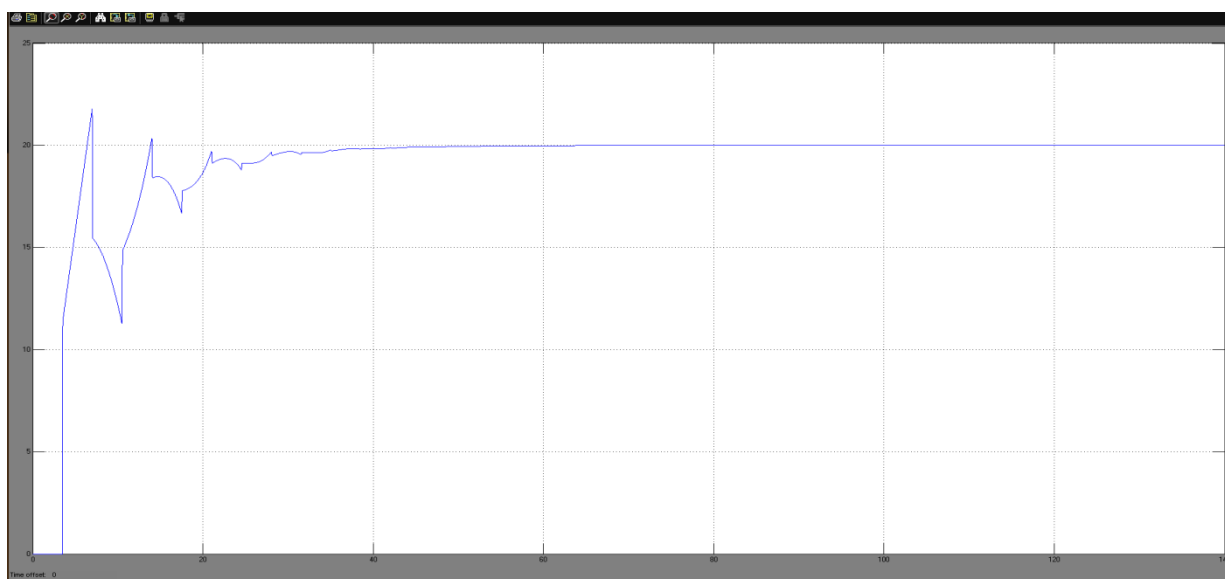


Рис. 2.18. Переходный процесс в САР с ПИД-регулятором при оптимальных параметрах настройки

В табл. 2.3 представлены результаты моделирования САР с ПИ- и ПИД-регуляторами при оптимальных параметрах их настройки.

Таблица 2.3

Показатели качества регулирования для одноконтурных САР с ПИ- и ПИД-регуляторами при оптимальных параметрах настройки

№ п/п	САР	Параметры настройки			Показатели качества регулирования		
		P	I	D	Динамическая ошибка Δ_d , ед.	Статическая ошибка $\Delta_{ст}$, ед.	Время регулирования t_p , мин
1	ПИ-регулятор	2,22	0,18	0	4	0,05	46
2	ПИД-регулятор	2,07	0,15	5,63	1,7	0,02	52

Таким образом, при оптимальных параметрах настроек регуляторов существенно уменьшаются динамическая и статическая ошибки.

2.5. Требования к отчету по работе

Отчет по работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические положения построения одноконтурных САР.
3. Блок-схемы одноконтурной САР с пропорционально-интегральным (ПИ-регулятором) и пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД-регулятор) законами регулирования.

4. Результаты расчета параметров настроек ПИ- и ПИД-регуляторов по эмпирическим соотношениям Циглера и Никольса по настройке промышленных регуляторов с использованием переходной характеристики объекта регулирования.

5. Описание процедуры создания модели одноконтурной САР в Simulink (в части функциональности блока, реализующего непрерывный ПИД-регулятор) и расчета оптимальных параметров настройки регуляторов;

6. Схему(ы) имитационного моделирования одноконтурной САР в

Simulink.

7. Результаты моделирования в виде графиков переходных процессов и сводной таблицы, содержащей показатели качества процесса регулирования (значения динамической, статической ошибок, времени регулирования).

8. Выводы по результатам исследования с обоснованием полученных решений.

9. Список использованной литературы.

РАБОТА 3. РАЗРАБОТКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКОНТУРНЫХ САР. КОМБИНИРОВАННАЯ САР. КАСКАДНАЯ САР. УПРАВЛЕНИЕ ТИПОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Цель работы: приобретение навыков разработки, моделирования и анализа многоконтурных САР.

Задачи работы:

- для полученного варианта работы составить структурную схему объекта управления;
- разработать одноконтурную, комбинированную и каскадную САР и составить соответствующие блок-схемы;
- провести расчет параметров настроек ПИ- и ПИД-регуляторов для одноконтурной САР по эмпирическим соотношениям, приведенным в работе 2 (табл. 2.1);
- провести расчет параметров компенсатора для комбинированной САР из условий абсолютной инвариантности и физически реализуемого компенсатора в виде пропорционального звена;
- провести расчет параметров основного и вспомогательного регуляторов в каскадной САР, используя приближенные эмпирические соотношения (табл. 2.1);
- провести имитационное моделирование работы синтезированных

САР с использованием среды **MATLAB/Simulink**;

- провести анализ качества работы синтезированных САР по основным показателям качества их переходных процессов.

3.1. Разработка структурной схемы и моделирование одноконтурной САР

Объектом регулирования является ректификационная колонна (рис. 3.1), в которой требуется стабилизировать температуру верха T_B .

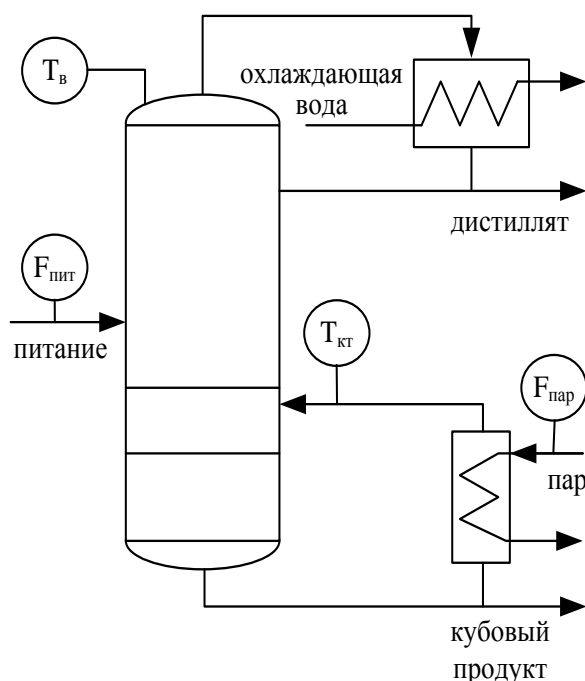


Рис. 3.1. Объект управления – ректификационная колонна

Для разработки САР необходимо проанализировать колонну как объект управления, т.е. определить управляемые переменные, управляющие и возмущающие воздействия и составить структурную схему. Основной регулируемой переменной является температура верха колонны (T_B , °C), управляющее воздействие – расход пара ($F_{пар}$, т/ч), расход питания ($F_{пит}$, м³/ч) – возмущающее воздействие и температура на контрольной тарелке ($T_{кт}$, °C) – вспомогательный параметр. Схема ректификационной

колонны как объекта управления, на которой обозначены входные, выходные переменные и передаточные функции по основным каналам представлена на рис. 3.2.

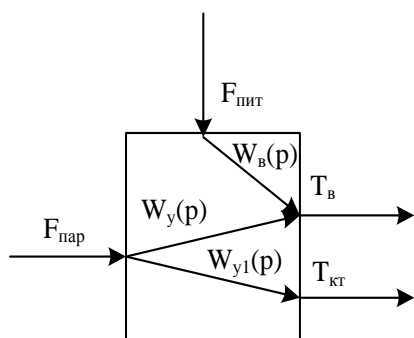


Рис. 3.2. Структурная схема ректификационной колонны как объекта управления:

$W_Y(p)$ – передаточная функция по каналу управления; $W_B(p)$ – передаточная функция по каналу возмущения; $W_{Y1}(p)$ – передаточная функция по вспомогательному каналу

Передаточные функции по соответствующим каналам имеют следующие значения.

Передаточная функция по каналу управления расход пара ($F_{\text{пар}}$) – температура верха колонны (T_B):

$$W_y(p) = \frac{K_y \cdot e^{-\tau_y p}}{(T_y^1 p + 1)(T_y^2 p + 1)} = \frac{2}{(20p + 1)(5p + 1)} e^{-5p}. \quad (3.1)$$

Передаточная функция по каналу возмущения расход питания ($F_{\text{пит}}$) – температура верха колонны (T_B):

$$W_\epsilon(p) = \frac{K_\epsilon}{T_\epsilon p + 1} e^{-\tau_\epsilon p} = \frac{2}{20p + 1} e^{-4p} \quad (3.2)$$

Передаточная функция по вспомогательному каналу расход пара ($F_{\text{пар}}$) – температура на контрольной тарелке ($T_{\text{КТ}}$):

$$W_{y1}(p) = \frac{K_{y1}}{T_{y1} p + 1} e^{-\tau_{y1} p} = \frac{2}{10p + 1} e^{-2p}. \quad (3.3)$$

В соответствии с теоретическими положениями построения одноконтурных САР [3, 7] разрабатывается блок-схема одноконтурной САР (рис. 3.3).

Соответствующая ей структурная схема одноконтурной САР в **Simulink** изображена на рис. 3.4. В данном примере реализуется управление по возмущающему воздействию (расходу питания $15 \text{ м}^3/\text{ч}$), поэтому в настройках блока **Step** (рис. 1.25) в поле **Final value** задается значение 15, а на вход САР подается константа, равная 0.

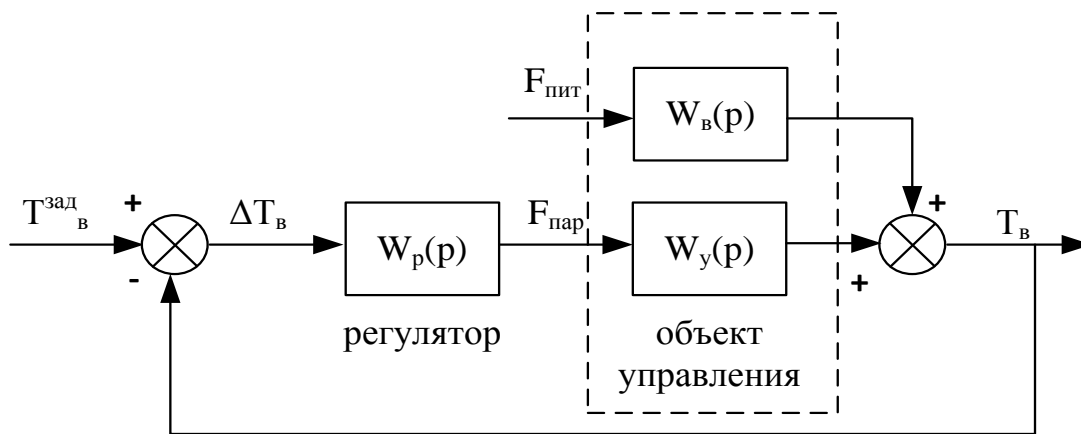


Рис. 3.3. Блок-схема одноконтурной САР температуры верха ректификационной колонны: $T_{\text{в}}^{\text{зад}}$ – заданное значение температуры верха колонны; $\Delta T_{\text{в}}$ – величина рассогласования между $T_{\text{в}}^{\text{зад}}$ и $T_{\text{в}}$ (ошибка регулирования)

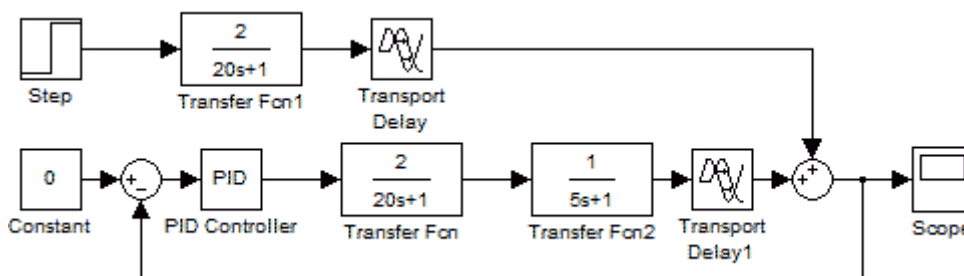


Рис. 3.4. Модель одноконтурной САР в **Simulink**

Так как передаточная функция по каналу управления описывается инерционным звеном второго порядка с запаздыванием (3.1), то для расчета параметров настройки регуляторов по эмпирическим соотношениям (табл. 2.1) необходимо аппроксимировать ее инерционным звеном первого порядка с запаздыванием (1.1). Для этого по алгоритму, изложенному в работе 1, в **Simulink** составляется схема объекта регулирования, на вход которой подается единичное ступенчатое возмущение (рис. 3.5).

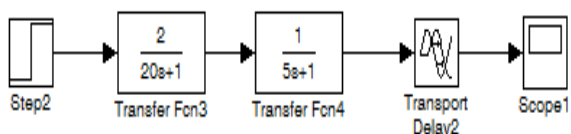


Рис. 3.5. Схема разомкнутой САР в **Simulink**
 $K_{об}=2 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{т/ч})$, $T_{об}=37 \text{ мин}$, $\tau_{об}=5 \text{ мин}$.

По полученной кривой разгона (рис. 3.6) определяются: коэффициент усиления ($K_{об}$), постоянная времени ($T_{об}$) и время запаздывания объекта ($\tau_{об}$). Соответственно:

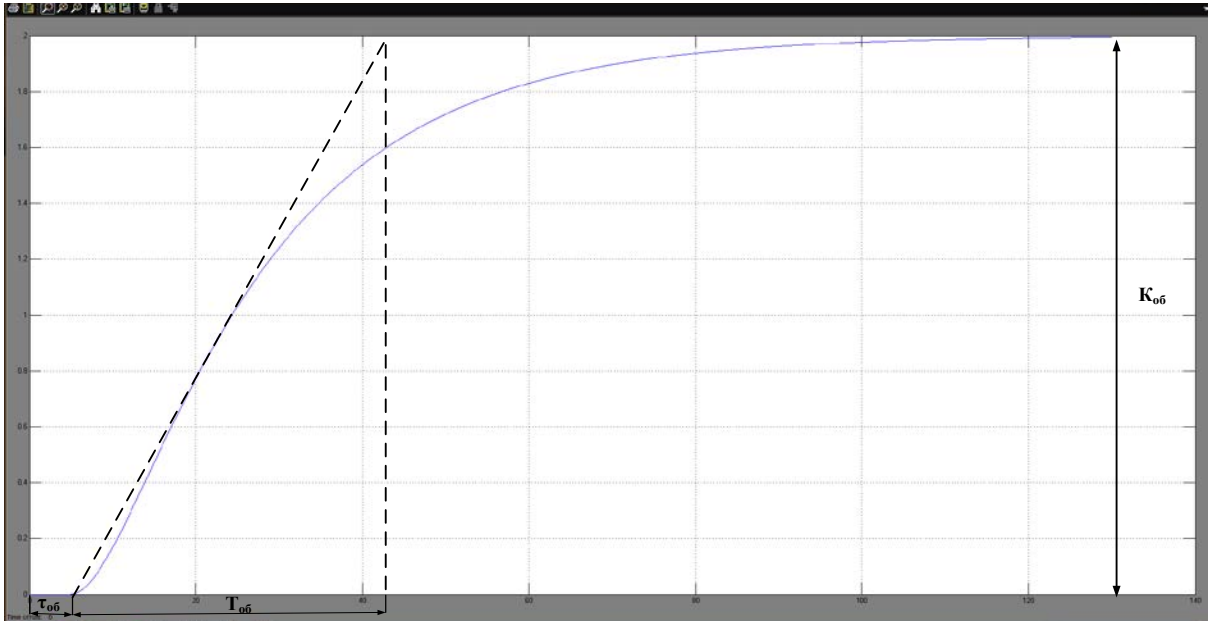


Рис. 3.6. Аппроксимация кривой разгона

Подставляя определенные таким образом значения в выражение для передаточной функции инерционного звена 1 порядка с запаздыванием (1.1), получают следующую передаточную функцию:

$$W_y(p) = \frac{2}{37p + 1} e^{-5p}. \quad (3.4)$$

По соотношениям (2.3) рассчитываются параметры настройки ПИ-регулятора:

$$K_p = \frac{0,9 \cdot T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}} = \frac{0,9 \cdot 37}{2 \cdot 5} = 3,33,$$

$$T_u = 3,33 \cdot \tau_{об} = 3,33 \cdot 5 = 16,65.$$

По формулам (2.5), (2.6) вычисляются коэффициенты при пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-регулятора:

$$P = K_p = 3,33,$$

$$I = \frac{K_p}{T_u} = \frac{3,33}{16,65} = 0,2.$$

Настройки ПИД-регулятора определяются по формулам (2.4).

$$K_p = \frac{1,2 \cdot T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}} = \frac{1,2 \cdot 37}{2 \cdot 5} = 4,44,$$

$$T_u = 2 \cdot \tau_{об} = 2 \cdot 5 = 10,$$

$$T_n = 0,5 \cdot \tau_{об} = 0,5 \cdot 5 = 2,5.$$

По формулам (2.5) – (2.7) вычисляются коэффициенты при пропорциональной, интегральной и дифференциальных составляющих ПИД-регулятора:

$$P = K_p = 4,44,$$

$$I = \frac{K_p}{T_u} = \frac{4,44}{10} = 0,44,$$

$$D = K_p \cdot T_n = 4,44 \cdot 2,5 = 11,1.$$

При моделировании САР с рассчитанными параметрами регуляторов графики переходных процессов расходятся (рис. 3.7), что требует подбора других параметров настройки.

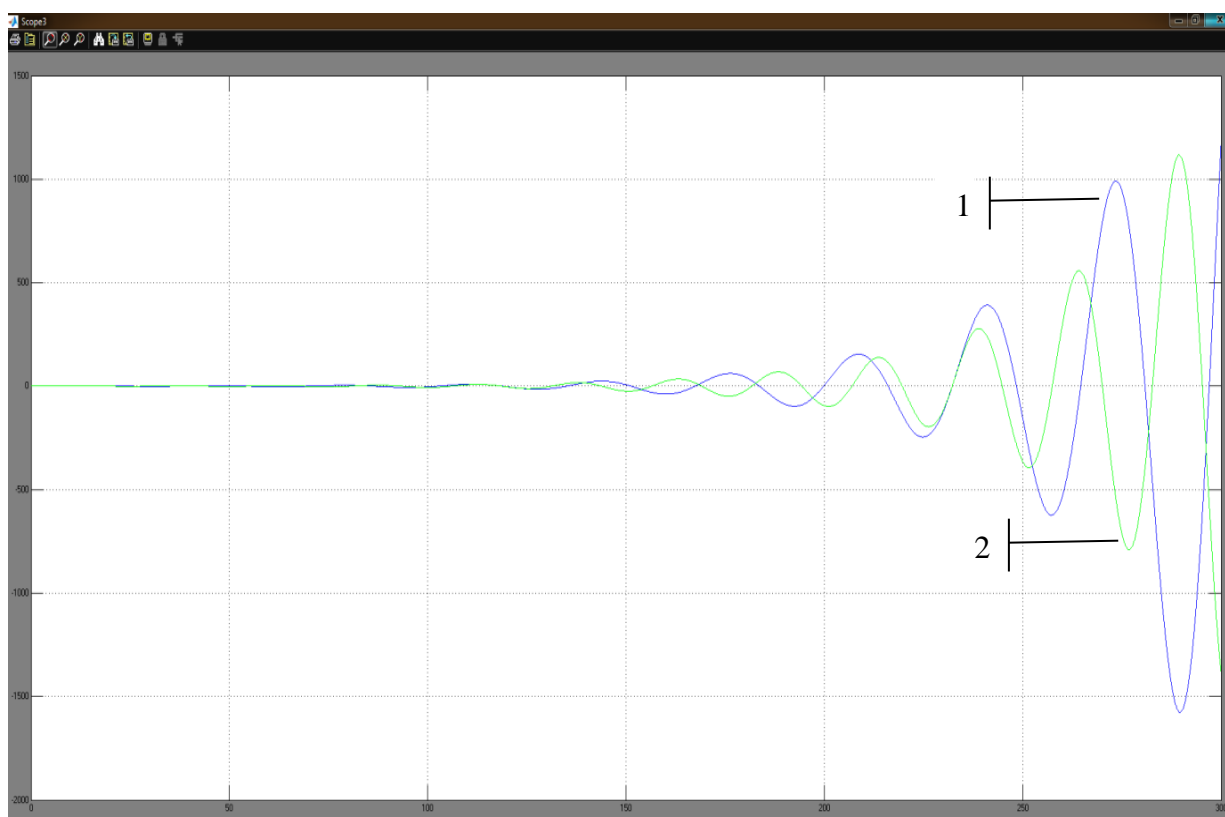


Рис. 3.7. Графики переходных процессов в САР при рассчитанных параметрах настройки:
1 – с ПИ-регулятором; 2 – с ПИД-регулятором

При подборе настроек регулятора необходимо обеспечить минимальные значения динамической, статической ошибок и времени регулирования. Для данного примера указанные требования выполняются при следующих настройках: для САР с ПИ-регулятором – $P=2,5$; $I=0,03$; с ПИД-регулятором – $P=2,8$; $I=0,7$; $D=23$. Результаты моделирования приведены на рис. 3.8 и в табл. 3.1.

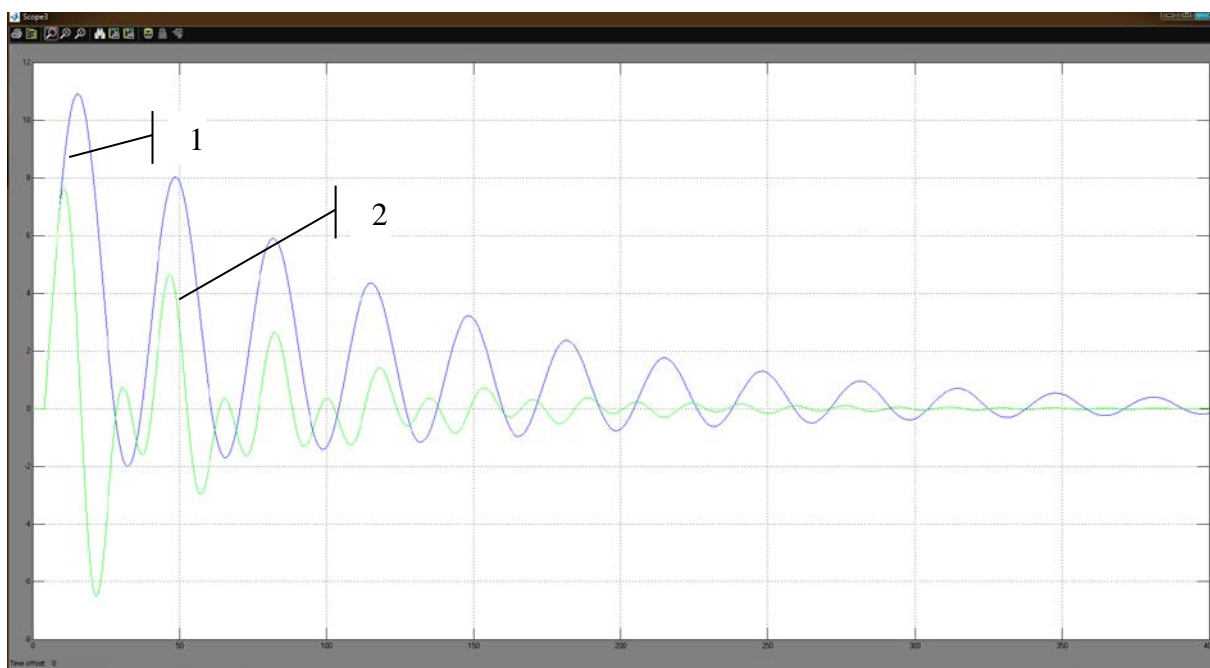


Рис. 3.8. Графики переходных процессов в САР при подобранных параметрах настройки:
 1 – с ПИ-регулятором ($P=2,5$; $I=0,03$); 2 – с ПИД-регулятором ($P=2,8$; $I=0,7$; $D=23$)

Таблица 3.1

Показатели качества регулирования для одноконтурных САР температуры верха ректификационной колонны с ПИ- и ПИД-регуляторами при оптимальных параметрах настройки

№ п/п	САР	Параметры настройки			Показатели качества регулирования	
		P	I	D	Динамическая ошибка Δ_0 , °С	Время регулирования t_p , мин
1	ПИ-регулятор	2,5	0,03	-	10,9	400
2	ПИД-регулятор	2,8	0,7	23	7,7	300

3.2. Разработка структурной схемы и моделирование комбинированной САР

Одноконтурная САР обладает предельным значением качества процесса. Повышение качества регулирования возможно за счет усложнения структуры САР.

Одной из наиболее эффективных схем является система с компенсацией возмущения, так называемая комбинированная САР. Такая САР позволяет повысить качество регулирования относительно известного основного возмущающего воздействия [8].

Комбинированная САР температуры верха ректификационной колонны представлена на рис. 3.9.

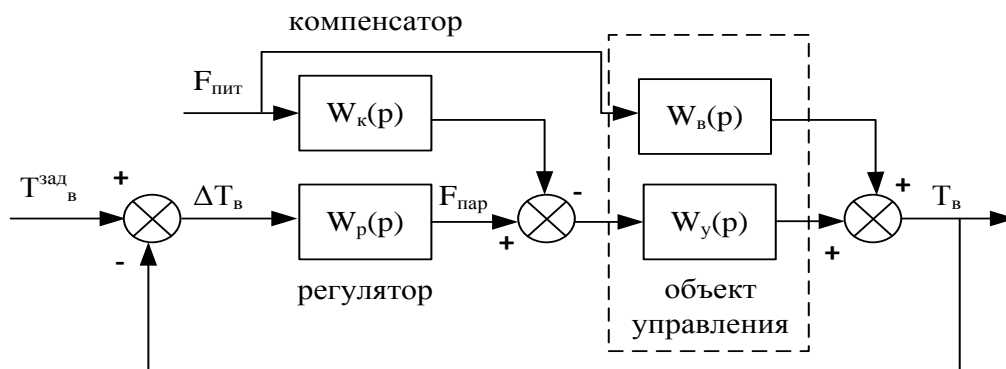


Рис. 3.9. Блок-схема комбинированной САР температуры верха ректификационной колонны. $W_k(p)$ – передаточная функция компенсатора

Для построения модели комбинированной САР необходимо определить передаточную функцию компенсатора $W_k(p)$, исходя из условия абсолютной инвариантности регулируемой величины относительно данного возмущающего воздействия.

Система инвариантна по отношению к возмущению при компенсаторе, передаточная функция $W_k(p)$ которого представляет собой отношение передаточных функций по каналу возмущения и управления [8]:

$$W_k(p) = \frac{W_g(p)}{W_y(p)} \quad (3.5)$$

Так как компенсатор не входит в замкнутый контур передачи сигнала, то устойчивость системы не зависит от его свойств. Расчет параметров настройки регулятора осуществляется как для обычной одноконтурной САР [8].

В соответствии с выражением (3.5) для рассматриваемого примера передаточная функция компенсатора вычисляется следующим образом:

$$W_k(p) = \frac{W_\epsilon(p)}{W_y(p)} = \frac{K_\epsilon \cdot e^{-\tau_\epsilon p} (T_y^1 p + 1)(T_y^2 p + 1)}{(T_\epsilon p + 1) K_y e^{-\tau_y p}} = \frac{\frac{K_\epsilon}{K_y} (T_y^1 p + 1)(T_y^2 p + 1)}{(T_\epsilon p + 1)} e^{(\tau_y - \tau_\epsilon)p} =$$

$$= \frac{2}{20p + 1} (20p + 1)(5p + 1) e^{(5-4)p} = 1 \cdot (5p + 1) e^{1p}$$

Ввиду того, что запаздывание по каналу управления больше, чем по каналу возмущения ($\tau_y > \tau_\epsilon$), физически нельзя реализовать инвариантную САР.

В таком случае применяют простейший компенсатор в виде пропорционального звена:

$$W_k(p) \cong \frac{K_\epsilon}{K_y} = \frac{2}{2} = 1. \quad (3.6)$$

Таким образом, расчет комбинированной САР включает следующие этапы [8]:

1. Расчет настроек регулятора в одноконтурной САР.
2. Вывод передаточной функции идеального компенсатора из условий абсолютной инвариантности по соотношению (3.5) и анализ его физической реализуемости.
3. Выбор реального компенсатора и определение его параметров из условий приближенной инвариантности.

После расчета параметров комбинированной САР в соответствии со схемой (рис. 3.9) в среде **Simulink** составляется ее модель. Для этого в новое окно S-модели копируется структура одноконтурной САР (рис. 3.4) и добавляется элемент в виде пропорционального звена (**Gain**) с $K_p=1$ (рис. 3.10).

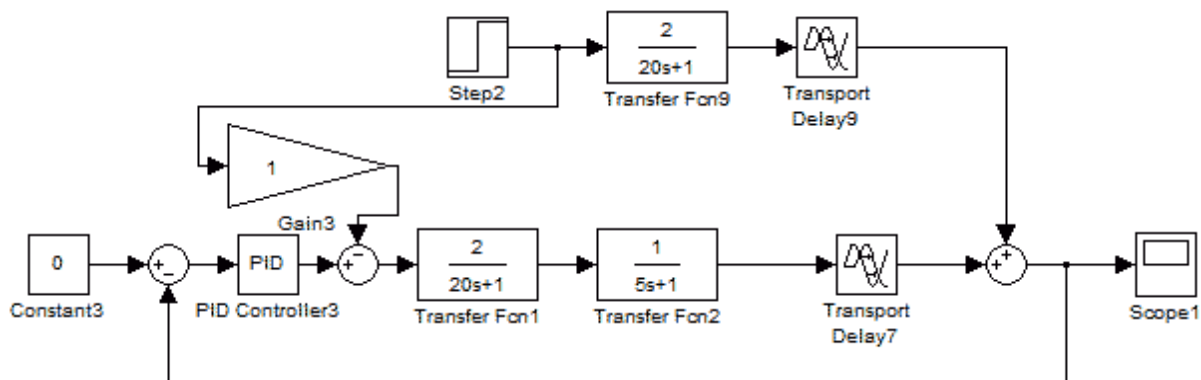


Рис. 3.10. Модель комбинированной САР в среде **Simulink**

Результаты моделирования приведены на рис. 3.11 и в табл. 3.2.

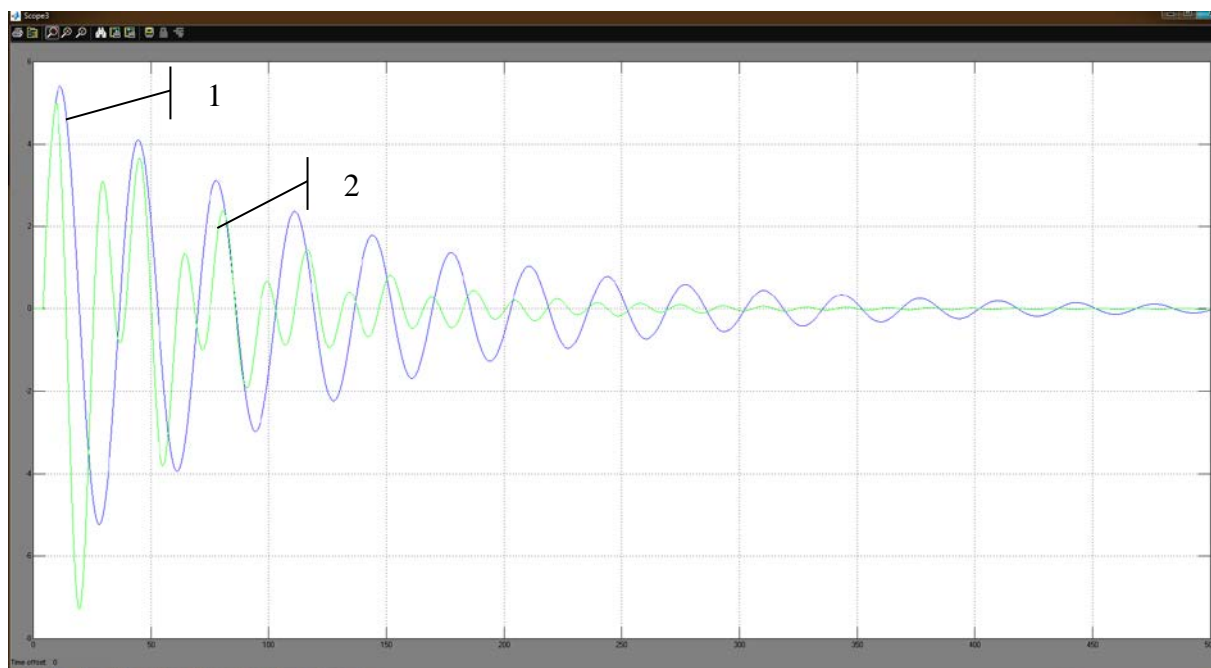


Рис. 3.11. Графики переходных процессов в комбинированной САР:
1 – с ПИ-регулятором ($P=2,5$; $I=0,03$); 2 – с ПИД-регулятором ($P=2,8$; $I=0,7$; $D=23$)

Таблица 3.2

**Показатели качества регулирования для комбинированных САР
температуры верха ректификационной колонны
с ПИ- и ПИД-регуляторами**

№ п/п	САР	Параметры настройки			Показатели качества регулирования	
		P	I	D	Динамическая ошибка Δ_0 , °C	Время регулирования t_p , мин
1	ПИ- регулятор	2,5	0,03	-	5,4	500
2	ПИД- регулятор	2,8	0,7	23	5,0	250

**3.3. Разработка структурной схемы и моделирование
каскадной САР**

Основной особенностью каскадной САР является то, что в системе действуют два регулятора (рис. 3.12) – основной, служащий для стабилизации

Определение настроек ПИД-регулятора каскадной САР

Расчет каскадной САР предполагает определение настроек основного и вспомогательного регуляторов. Расчет настроек регуляторов осуществляют сведением многоконтурной САР к одноконтурной путем введения определенных допущений.

Как видно из структурной схемы (рис. 3.12), эквивалентным объектом $W_{\text{зо}}(p)$ для основного регулятора $W_p(p)$ является основной канал управления объекта $W_y(p)$ и контур регулирования вспомогательного регулятора.

Для определения параметров настроек основного регулятора каскадной САР, необходимо рассчитать передаточную функцию эквивалентного объекта для основного регулятора.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{зо}}(p) &\cong \frac{W_y(p)}{W_{y1}(p)} = \frac{K_y(T_{y1}p+1)e^{-\tau_y p}}{(T_{y1}^1 p+1)(T_{y1}^2+1)K_y e^{-\tau_{y1} p}} = \frac{2e^{-5p}(10p+1)}{(20p+1)(5p+1)2e^{-2p}} = \\
 &= \frac{1 \cdot (10p+1)}{(20p+1)(5p+1)} e^{-3p}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Затем проводится аппроксимация (см. подраздел 1.5) полученной передаточной функции эквивалентного объекта инерционным звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W_{\text{зо}}(p) = \frac{K_{\text{зо}}}{T_{\text{зо}}p+1} e^{-\tau p} = \frac{1}{16p+1} e^{-3p}.$$

По соотношениям (2.3) рассчитываются параметры настройки **основного** ПИ-регулятора:

$$K_p = \frac{0,9}{K_{\text{об}}} \cdot \frac{T_{\text{об}}}{\tau_{\text{об}}} = \frac{0,9 \cdot 16}{1 \cdot 3} = 4,8,$$

$$T_u = 3,33 \cdot \tau_{\text{об}} = 3,33 \cdot 3 = 9,99.$$

По формулам (2.5), (2.6) вычисляются коэффициенты при пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-регулятора:

$$P = K_p = 4,8,$$

$$I = \frac{K_p}{T_u} = \frac{4,8}{9,99} = 0,48.$$

Настройки **основного** ПИД-регулятора определяются по формулам (2.4).

$$K_p = \frac{1,2}{K_{об}} \cdot \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = \frac{1,2 \cdot 16}{1 \cdot 3} = 6,4,$$

$$T_u = 2 \cdot \tau_{об} = 2 \cdot 3 = 6,$$

$$T_n = 0,5 \cdot \tau_{об} = 0,5 \cdot 3 = 1,5.$$

По формулам (2.5) – (2.7) вычисляются коэффициенты при пропорциональной, интегральной и дифференциальных составляющих ПИД-регулятора:

$$P = K_p = 6,4,$$

$$I = \frac{K_p}{T_u} = \frac{6,4}{6} = 1,07,$$

$$D = K_p \cdot T_n = 6,4 \cdot 1,5 = 9,6.$$

Параметры настроек **вспомогательного** регулятора в первом приближении определяются, рассматривая в качестве объекта вспомогательный канал.

$$W_{об}(p) = W_{y1}(p) = \frac{K_{y1}}{T_{y1}p + 1} e^{-\tau_{y1}p} = \frac{2}{10p + 1} e^{-2p}.$$

Тогда параметр настройки **вспомогательного** П-регулятора согласно (2.2) имеет следующее значение:

$$K_p = \frac{1}{K_{об}} \cdot \frac{T_{об}}{\tau_{об}} = \frac{1 \cdot 10}{2 \cdot 2} = 2,5.$$

Установим полученные значения параметров основного и вспомогательного регуляторов в настройках соответствующих функциональных блоков модели каскадной САР в **Simulink** (рис. 3.13). В результате переходные процессы как для САР с основным ПИ-, так и для САР с ПИД-регулятором

являются расходящимися (рис. 3.14).

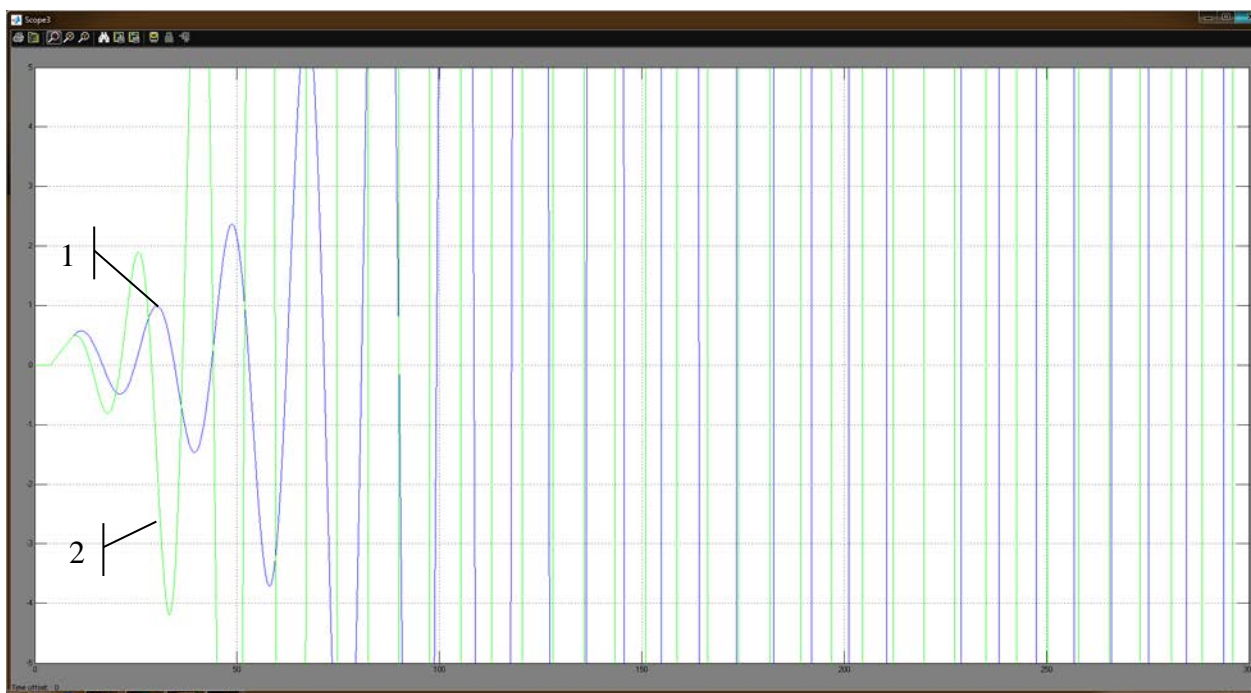


Рис. 3.14. Графики переходных процессов в каскадной САР:

1 – с основным ПИ-регулятором ($P=4,8$; $I=0,48$); 2 – с основным ПИД-регулятором ($P=6,4$; $I=1,07$; $D=9,6$)

При параметре настройки вспомогательного П-регулятора $K_p=0,1$ переходные процессы моделируемых каскадных САР становятся сходящимися (рис. 3.15).

Результаты моделирования приведены на рис. 3.15 и в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Показатели качества регулирования для каскадных САР температуры верха ректификационной колонны с ПИ- и ПИД-регуляторами

№ п/п	САР	Параметры настройки			Показатели качества регулирования	
		P	I	D	Динамическая ошибка $\Delta_0, ^\circ\text{C}$	Время регулирования $t_p, \text{мин}$
1	ПИ-регулятор	4,8	0,48	-	15	165
2	ПИД-регулятор	6,4	1,07	9,6	13	380

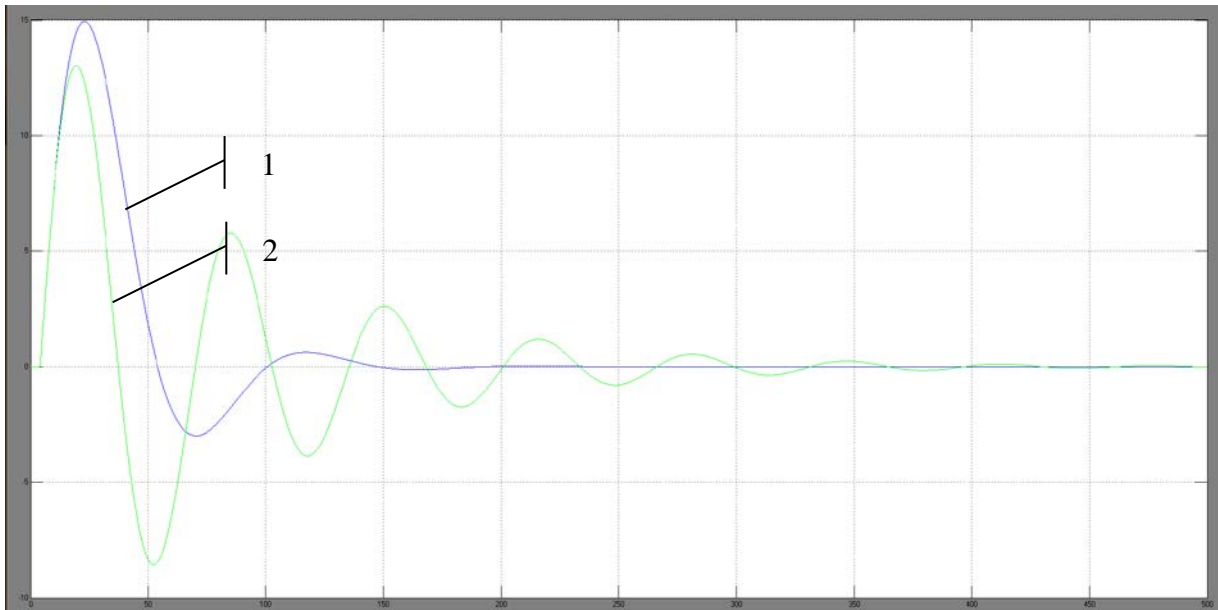
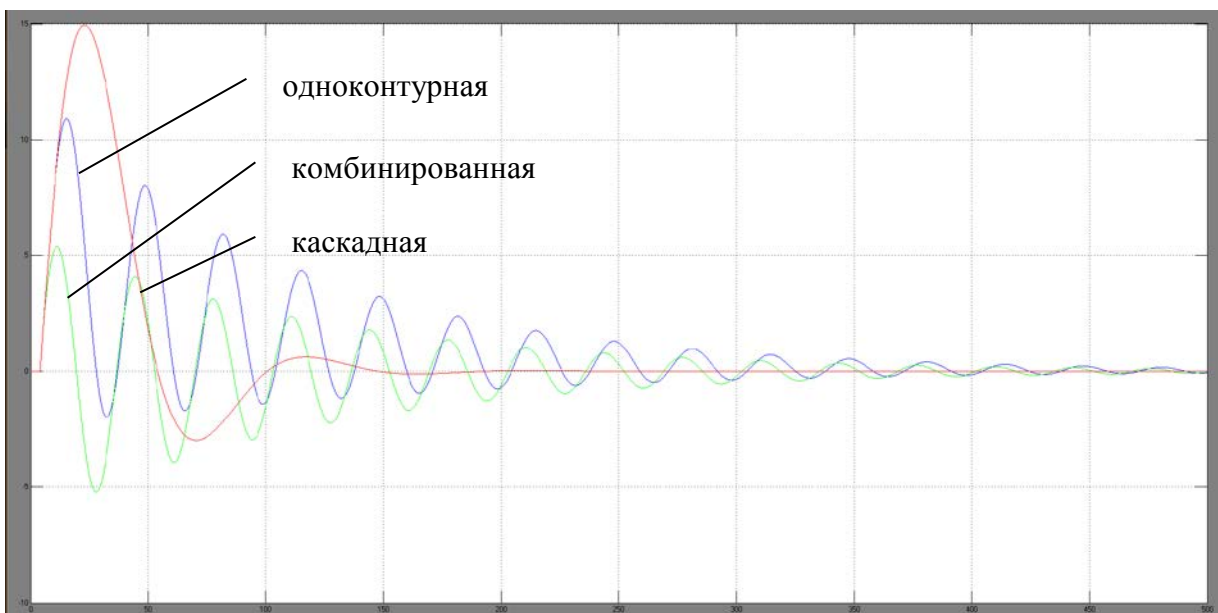


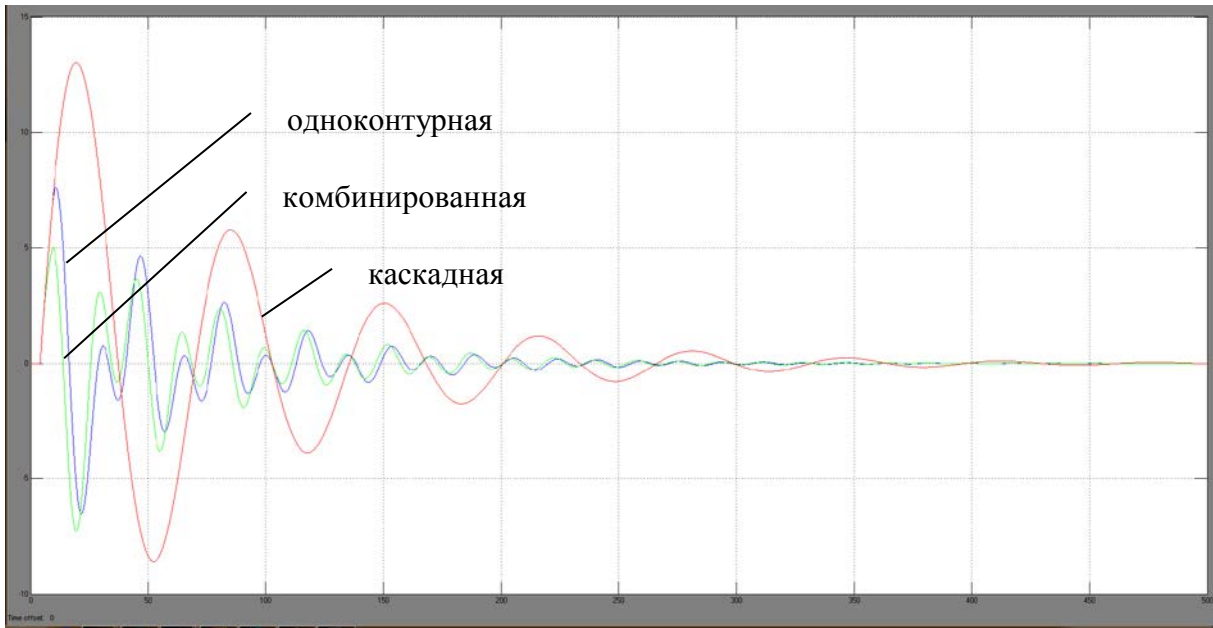
Рис. 3.15. Графики переходных процессов в каскадной САР:
1 – с основным ПИ-регулятором; 2 – с основным ПИД-регулятором

3.4. Сравнительный анализ одноконтурной и многоконтурных САР

Для того чтобы сравнить качество процесса регулирования каждой из САР, нужно вывести все три переходных процесса на один график (рис. 3.16) с помощью блока **Мультиплексор *Мух*** (рис. 1.22).



а



б

Рис. 3.16. Переходные процессы в системах автоматического регулирования:
а – с ПИ-регулятором; б – с ПИД-регулятором

В сводной табл. 3.4 представлены результаты моделирования одноконтурных, комбинированных и каскадных систем автоматического регулирования.

Таблица 3.4

Показатели качества регулирования для одноконтурных, комбинированных и каскадных САР

САР	Параметры настройки регуляторов			Показатели качества регулирования	
	P	I	D	Динамическая ошибка Δ_0 , °C	Время регулирования t_p , мин
ПИ-регулятор					
Одноконтурная	2,5	0,03	-	10,9	400
Комбинированная	2,5	0,03	-	5,4	500
Каскадная	4,8	0,48	-	15	165
ПИД-регулятор					
Одноконтурная	2,8	0,7	23	7,7	300
Комбинированная	2,8	0,7	23	5	250
Каскадная	6,4	1,07	9,6	13	380

Анализ полученных результатов показывает, что комбинированная САР и каскадная САР позволяют сократить время регулирования по сравнению с одноконтурной САР. Комбинированная САР обладает меньшей динамической ошибкой. При этом наилучшее качество получаем в комбинированной САР с ПИД-регулятором.

3.5. Требования к отчету по работе

Отчет по работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические положения построения многоконтурных (каскадных и комбинированных) САР.
3. Структурную схему объекта.
4. Блок-схемы одноконтурной, комбинированной и каскадной САР.
5. Результаты расчета параметров настройки ПИ- и ПИД-регуляторов для одноконтурной САР по эмпирическим соотношениям, перечисленным в работе 2.
6. Результаты расчета параметров компенсатора для комбинированной САР из условий абсолютной инвариантности и физически реализуемого компенсатора в виде пропорционального звена.
7. Результаты расчета параметров основного и вспомогательного регуляторов в каскадной САР с использованием приближенных эмпирических соотношений.
8. Схемы имитационного моделирования одноконтурной, комбинированной и каскадной САР в **Simulink**.
9. Результаты моделирования в виде графиков переходных процессов и сводной таблицы, содержащей показатели качества процесса регулирования (значения динамической, статической ошибок, времени регулирования). Сравнительный анализ полученных результатов.
10. Выводы по результатам исследования с обоснованием полученных решений.
11. Список использованной литературы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имитационное моделирование в настоящее время является одним из основных средств проектирования, анализа и оценки функционирования динамических систем различного уровня сложности.

Реализуемый в **Simulink** принцип визуального программирования, заключающийся в разработке программы для ЭВМ путем формирования алгоритма из настраиваемых функциональных блоков, дает возможность создавать, тестировать и анализировать достаточно сложные модели САР.

Представленная в настоящем пособии процедура разработки и моделирования САР с использованием программной среды **MATLAB/Simulink** позволяет получить знания и навыки, необходимые студентам для выполнения лабораторных, учебных научно-исследовательских работ, курсовых проектов и выпускных квалификационных работ, связанных с разработкой систем управления.

Изучив функциональные возможности и принципы работы программной среды **MATLAB/Simulink**, пользователь получает возможность решения своих задач с использованием **Simulink**.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Simulink // Softline – официальный дистрибьютор MathWorks на территории России и СНГ, 1993–2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.ru/products/simulink> (дата обращения: 09.09.2015).

2. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем // Образовательный математический сайт Exponenta.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php> (дата обращения: 27.10.2015).

3. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами: учебник для вузов. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 690 с.

4. Магергут В.З., Вент Д.П., Кацер И.А. Выбор промышленных регуляторов и расчет их оптимальных настроек: монография. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 239 с.

5. Лабораторная работа 3. Изучение пакета Simulink Response Optimization системы MATLAB 7 для расчета оптимальных настроек регуляторов. Дисциплина «Интегрированные системы проектирования и управления» // Институт цветных металлов и материаловедения СФУ. Кафедра автоматизации производственных процессов. – Красноярск, 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://icmim.sfu-kras.ru/app_umr (дата обращения: 15.10.2015).

6. Simulink Design Optimization // The MathWorks, Inc., 1994-2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/sldo/index.html> (дата обращения: 10.10.2015).

7. Перов В.Л. Основы теории автоматического регулирования химико-технологических процессов: учеб. пособие. – М. : Химия, 1970. – 352 с.

8. Проектирование систем управления. Автоматизированный лабораторный комплекс: учеб. пособие / А. Ф. Егоров [и др.]; под ред. А. Ф. Егорова. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2008. – 115 с.

Учебное издание

МИХАЙЛОВА Павла Геннадьевна
ЕГОРОВ Александр Федорович

**Моделирование систем автоматического
управления с использованием программной
среды MATLAB/Simulink
Лабораторный практикум**

Редактор: Е. В. Копасова

Подписано в печать 22.02.2016 г. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 4,4. Уч.-изд. л. 4,4. Тираж 100 экз.
Заказ

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
Издательский центр
Адрес университета и издательского центра:
125047 Москва, Миусская пл., 9