

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

---

**В.П. ЗВЕРЬКОВ, С.П. ПАВЛОВ**

***Моделирование динамических систем на ПЭВМ  
с использованием программы "20 - sim"***

Часть 1  
Одноконтурные системы

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по курсу  
"Системы автоматизации и управления"  
для студентов, обучающихся по специальности 21.02  
"Автоматизация технологических процессов и производств"

УДК  
621.398  
3-434  
УДК: 621.398.72.06.001.57(076)

*Утверждено учебным управлением МЭИ в качестве учебного пособия для студентов*

Подготовлено на кафедре автоматизированных систем управления тепловыми процессами.

Рецензенты:

докт. техн. наук, профессор Г.П. Плетнев,  
начальник сектора ЦАГИ Ю.Н. Петроченко

**Зверьков В.П., Павлов С.П.**

Моделирование динамических систем на ПЭВМ с использованием программы "20-sim". Ч.1. Одноконтурные системы: Лабораторный практикум – М.: Издательство МЭИ, 2003.– 68 с.

ISBN 5-7046-0929-5

Лабораторный практикум предназначен для выполнения работ, содержащих расчет динамики и анализ автоматических систем регулирования во временной области на основе программы моделирования динамических систем "20-sim". Приводится краткое описание возможностей программы и правила использования основных блоков и команд. Рассматриваются вопросы моделирования одноконтурных систем автоматического регулирования с типовыми нелинейностями и при наличии детерминированных и случайных возмущений.

Для студентов специальности 21.02 "Автоматизация технологических процессов и производств", а также специалистов, работающих в области автоматизации непрерывных технологических процессов.

ISBN 5-7046-0929-5

© Московский энергетический институт, 2003

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из этапов создания системы управления технологическим процессом является анализ применимости тех или иных алгоритмов управления, исследование поведения системы в различных ситуациях, учет многочисленных факторов, влияющих на работоспособность системы и т.д.

Решение таких задач целесообразно проводить с помощью моделирования динамических систем во временной области, используя средства вычислительной техники. Для моделирования динамических систем во временной области существует достаточное количество программ, отличающихся сервисом, представляемым пользователю.

Процесс моделирования динамических систем на ПЭВМ состоит из следующих этапов:

1. Формулировка задачи.
2. Представление моделируемой системы в одном из принятых в программе виде:
  - структуры типовых блоков из библиотеки пакета;
  - структуры, задаваемой в виде сигнального графа;
  - математических выражений, записанных по определенным правилам.
3. Ввод структуры модели, значений коэффициентов, начальных условий и параметров моделирования в ПЭВМ.
4. Задание информации о результатах моделирования, необходимой для выдачи на экран монитора или печать.
5. Собственно моделирование: запуск на решение, изменение параметров, анализ информации на экране, редактирование модели и т.д.
6. Документирование результатов моделирования и сохранение модели для последующей работы.

В цикле лабораторных работ используется программный комплекс для моделирования динамических систем **"20-sim Pro 2.3"**, разработанный в TWENTE UNIVERSITY of TECHNOLOGY, Enschede, The Netherlands ([www.20-sim.com](http://www.20-sim.com)).

Программный комплекс работает под управлением операционной системы Windows-9x, на компьютерах с процессором i486DX-4 и выше при объеме оперативной памяти не менее 16 Мб. Саморазархивирующийся файл **"20sim"** имеет объем 7,87 Мб и после запуска сам устанавливает программный комплекс на ПЭВМ. После завершения установки программный комплекс размещается в папке **"20-sim"** на выбранном пользователем диске. Одновременно в меню

рабочего стола (**Пуск** → **Программы** → **20-sim 2.3**) помещаются команды доступа к основным файлам программы, предназначенных для:

- помощи (**20-sim Help**)
- руководство пользователя (**20-sim Manual**),
- демонстрации работы программы (**20-sim Pro 2.3 demo**),
- работы (**20-sim Pro 2.3**),
- демонстрации примеров моделей (**Demo Models**),
- обучения пользователей (**Tutorial**).

Файл **Tutorial**, предназначенный для обучения работе с программным комплексом автоматически запускает видеоплеер и позволяет просмотреть видеоролики, объясняющие приемы задания структурных схем, ввода значений, исправлений, получение результатов для трех приведенных выше видов представлений моделируемой системы (структуры типовых блоков из библиотеки программного комплекса; структуры, задаваемой в виде сигнального графа; математических выражений). Технологию использования "**20-sim**" для структурного моделирования динамических систем с помощью типовых блоков показывает файл **Demoblk**.

Программный комплекс для моделирования динамических систем "**20-sim**" состоит из двух связанных между собой программ:

- 1.Графического редактора (**Graf Editor**),
- 2.Моделирующей системы (**Simulator**).

Этапы моделирования объединены в две стадии в соответствии с используемой программой: составление модели и подготовка и проведение эксперимента.

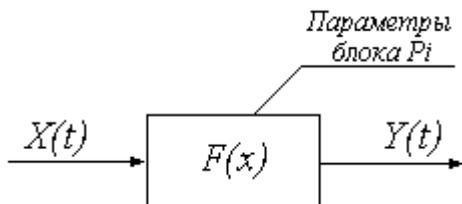
При описании моделируемой системы в цикле лабораторных работ по курсу "Системы автоматизации и управления" используется представление моделируемой системы в виде структуры типовых блоков из библиотек программного комплекса для моделирования динамических систем "**20-sim**".

Представление моделируемой системы в виде блоков требует некоторого навыка. Наиболее просто задача решается, если математическое описание объекта, регулятора и преобразователей задается в виде передаточных функций. Структурная схема системы для моделирования на ПЭВМ получается с помощью последовательного, параллельного или встречно-параллельного соединения блоков, входящих в библиотеку пакета.

В библиотеке "**20-sim**" входят различные блоки: статические и динамические звенья, нелинейные, логические и дискретные блоки, ис-

точники сигналов, типовые регуляторы и критерии, блоки математических функций и др.

Условное обозначение блока показано на рис. В.1.



**Рис. В.1. Условное обозначение блока**

$X(t)$  – входной сигнал ;  $Y(t)$  – выходной сигнал блока;  $P_i$  – изменяемые параметры блока;  $F(x)$  – функциональное преобразование сигнала  $X(t)$ , выполняемое блоком.

Запуск программы "20-sim" осуществляется из раздела меню рабочего стола операционной системы Windows командой **Пуск**→**Программы** →**20-sim 2.3** →**20-sim Pro 2.3**.

После запуска на экране появляется окно графического редактора (**Graf Editor**), в нижней части которого отражается состояние и выполняемые действия, а в верхней части - меню с выпадающими окнами и панели инструментов (главное меню).

Одновременно появляется вспомогательное окно (**GE: Draw**), предназначенное для выбора и соединения типовых блоков из библиотек программного комплекса "20-sim".

Основные приемы работы с окнами совпадают с типовыми приемами работы в Windows и не требуют специальных пояснений.

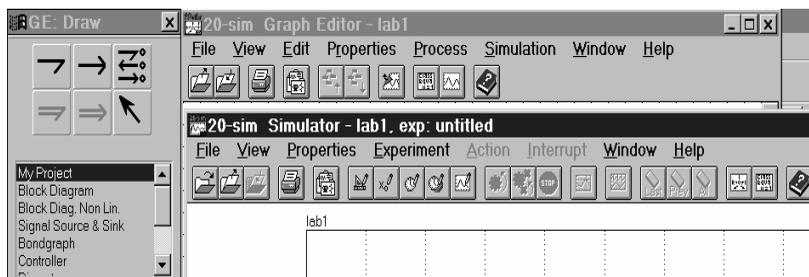
Набор структурной схемы модели решения задачи осуществляется в графическом редакторе с помощью панели **GE: Draw**. Набранную модель необходимо проверить с точки зрения формальной логики построения схем, заложенной в программном комплексе "20-sim" и сохранить. Эта операция осуществляется командой **Check & Save SIDOPS** ("Проверка и сохранение модели"), появляющейся в выпадающем окне при выборе пункта главного меню графического редактора **Process** ("Процесс"). Если в набранной модели нет ошибок, то разрешается доступ к моделирующей системе (пункт меню графического редактора **Simulation** ("Моделирование") становится активным).

Используя пункт главного меню графического редактора **Simulation**, необходимо открыть окно Simulator и в нем выбрать пункт главного меню **Experiment** ("Эксперимент"). В выпадающем меню этого пункта

необходимо последовательно задать значения коэффициентов командой **Parametr**s, начальных условий командой **Initial Conition**, параметров моделирования командой **Run Specifications** и вывода информации **Plot Specifications**.

Подготовленный эксперимент (модель с соответствующим интерфейсом и режимом моделирования) запускается на решение пунктом меню **Action** → **Start Simulation** ("Действия" → "Начало моделирования").

Фрагменты окон графического редактора и моделирующей системы с главными меню и панелями инструментов приведены на рис. В.2.



**Рис. В.2.** Меню основных окон "20-sim": графического редактора (Graf Editor) с панелью рисования (GE: Draw) и моделирования (Simulator)

Программный комплекс имеет большие возможности по моделированию динамических систем (неограниченное число линейных, нелинейных и др. блоков, используемых в модели, исследование поведения модели при различных входных сигналах, оптимизация значений параметров блоков по задаваемым критериям, наглядное представление результатов моделирования и пр.), что позволяет решать широкий круг задач исследования систем автоматического управления технологическими объектами в различных отраслях промышленности.

В первой части пособия рассматривается круг задач, связанный с исследованием одноконтурных систем регулирования. Приводится краткое описание возможностей программы и правила использования основных блоков и команд. Рассматриваются вопросы получения математических моделей объекта управления по его переходной характеристике, моделирования одноконтурных автоматических систем регулирования с ПИ и ПИД регуляторами, типовыми нелинейностями и при наличии детерминированных и случайных возмущений.

# ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

## *Динамические характеристики объектов управления*

### **Цель лабораторного занятия**

Целью лабораторного занятия является приобретение основных навыков работы с программой моделирования динамических систем "20-sim" на примерах построения переходных и частотных характеристик по заданной передаточной функции. Предполагается также освоение режима множественного решения задачи моделирования при изменении параметров модели.

### **Задание на работу**

1. Подготовить структурную схему модели объекта в соответствии с вариантом задания на лабораторно-практические занятия, приведенном в Приложении (последовательное соединение звена транспортного запаздывания и аperiodических звеньев).

2. Провести моделирование при подаче на вход модели объекта ступенчатого сигнала.

3. В режиме множественного решения получить переходные характеристики объекта при изменении с заданным шагом коэффициента передачи и одной из постоянных времени передаточной функции.

4. Провести моделирование при подаче на вход модели объекта сигнала в виде прямоугольного импульса.

5. Определить частотные характеристики модели объекта путем подачи на вход синусоидального сигнала.

### **Методические указания**

#### **1. Определение переходных характеристик**

Рассмотрим последовательность действий по проведению сеанса моделирования для всех шести этапов, указанных в разделе "Введение", на конкретном примере построения переходной характеристики модели объекта. Напомним, что переходной характеристикой называется реакция объекта на единичное ступенчатое входное воздействие.

## 1.1. Формулировка задачи

Построить переходную характеристику объекта, заданного передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-p\tau}}{(Tp + 1)^3},$$

где  $K = 3$ ,  $\tau = 5$  с,  $T = 10$  с в интервале времени  $t$  (0, 100 с).

## 1.2. Составление и набор структурной схемы модели

Из выражения передаточной функции видим, что модель может быть представлена в виде последовательного соединения трех аperiодических звеньев и звена чистого запаздывания. Для получения переходной характеристики необходимо на вход модели объекта подать единичный ступенчатый входной сигнал. Блок-схема решения поставленной задачи может быть представлена в виде, показанном на рис. 1.1.

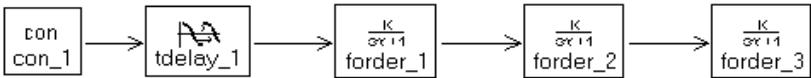


Рис. 1.1. Структурная схема модели для получения переходной характеристики объекта

con - блок формирования ступенчатого входного сигнала;  
tdelay - блок моделирования чистого запаздывания;  
forder - блок моделирования аperiодического звена.

Для набора структурной схемы модели в графическом редакторе программного комплекса "20-sim" необходимо выделить библиотеку **Blok Diagram** ("Модели блоков") в окне **GE: Draw**, затем выделить необходимый блок и далее щелкнуть левой клавишей мыши на поле графического редактора. Выбранный блок появится на поле графического редактора. Изменение названия блоков осуществляется щелчком правой клавиши мыши на выделенном блоке и перехода в открывающемся меню к пункту **Attributes** ("Атрибуты"). Соединение блоков в необходимой последовательности осуществляется после выбора наклоненной стрелки в правом верхнем поле редактора щелчком левой клавиши мыши на соединяемых блоках. Блок формирования ступенчатого входного сигнала con находится в библиотеке **Signal Source & Sink** ("Источники сигналов").

После набора модель необходимо сохранить на диске. В редакторе предусмотрены два способа сохранения модели.

Первый – с помощью команд главного меню редактора (**Process**→**Check & Save SIDOPS**).

Второй – обычным порядком с помощью команды **Save** раздела меню **Fail**.

В имени сохраняемого файла необходимо указывать номер (например, Lab1). По умолчанию модель сохраняется в каталоге **My Project**. При этом осуществляется проверка правильности соединения блоков и возможности использования ее в процессе моделирования.

Все неправильно используемые блоки и соединения автоматически зачеркиваются красным крестом.

В разделе главного меню редактора (**Process**) предусмотрена возможность просмотра текста программы на алгоритмическом языке "Си", соответствующей набранной модели (**C-Code Generation**).

### 1.3. Подготовка эксперимента

Для подготовки к проведению эксперимента необходимо открыть окно моделирования (пункт главного меню **Simulation**) и активизировать пункт **Experiment** ("Эксперимент"). В открывшемся меню этого пункта необходимо последовательно задать значения коэффициентов (пункт меню **Parameters**), начальных условий (пункт меню **Initial Condition**), параметров моделирования (пункт меню **Run Specifications**) и вывода информации (пункт меню **Plot Specifications**).

Окно пункта **Parameters** с необходимыми значениями коэффициентов показано на рис. 1.2.

Ввод значений коэффициентов модели осуществляется нажатием кнопки **Apply** ("Применить") или переходом на следующий коэффициент. После окончания набора нажать кнопку "OK".

Клавиша **Import** ("Импорт") предназначена для ввода

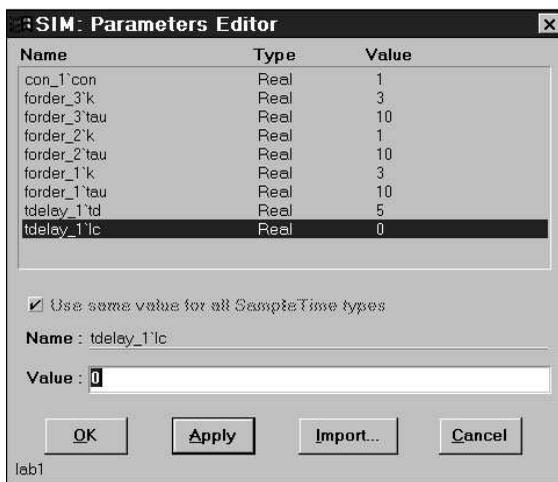


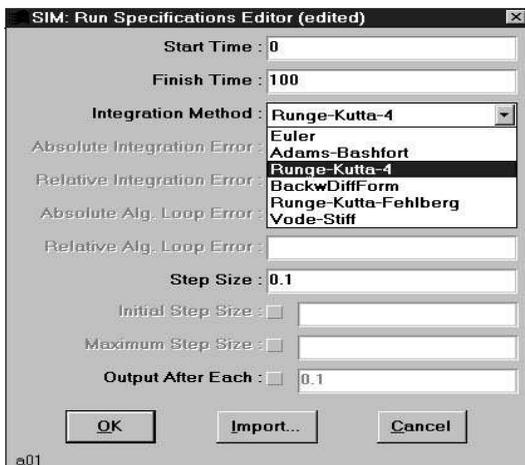
Рис. 1.2. Окно ввода значений коэффициентов модели

ранее сохраненных значений параметров модели.

Окно "Начальные условия" имеет аналогичный вид. В нем необходимо задать нулевые начальные условия для всех параметров.

Нулевые начальные условия одновременно для всех параметров задаются нажатием клавиши **States** ("Состояние") в открытом окне "Начальные условия".

Окно ввода значений параметров решения задачи моделирования



**Рис. 1.3.** Окно ввода значений параметров решения задачи моделирования

(**Run Specification**) предназначено для выбора метода интегрирования, задания времени и шага моделирования.

Это окно показано на рис. 1.3. Выбран метод интегрирования Рунге-Кутта 4 порядка и время моделирования 100 с. От величины шага моделирования (**Step Size**) зависит общее время решения задачи. Как правило, тысячи точек расчета вполне достаточно,

поэтому шаг задаем равным 0,1. Так как постоянные времени модели объекта заданы в секундах, то и размерность времени моделирования тоже будет секунды.

#### 1.4. Задание информации о выводе результатов

На экран необходимо вывести следующие графики:

- входного ступенчатого воздействия;
- переходной характеристики.

Для задания информации о выводе результатов моделирования необходимо вызвать окно **Plot specification**, нажать клавишу **Choose Name** ("Выбрать имя") и в списке блоков модели отметить выходы нужных блоков. В полосе **Label** ("Метка") необходимо написать обозначения выводимых на графики величин (Вход, Выход). Для каждого графика

необходимо выбрать режим установки масштаба по оси ординат **Scaling** (“Шкала”).

В программе "20-sim" реализован автоматический выбор масштабов выводимых графиков - **Auto**. Для задания масштабов вручную необходимо использовать режим **Manual** ("Ручной"), и для каждого выводимого графика задать нужные значения **From** и **To** (“От” и “До”).

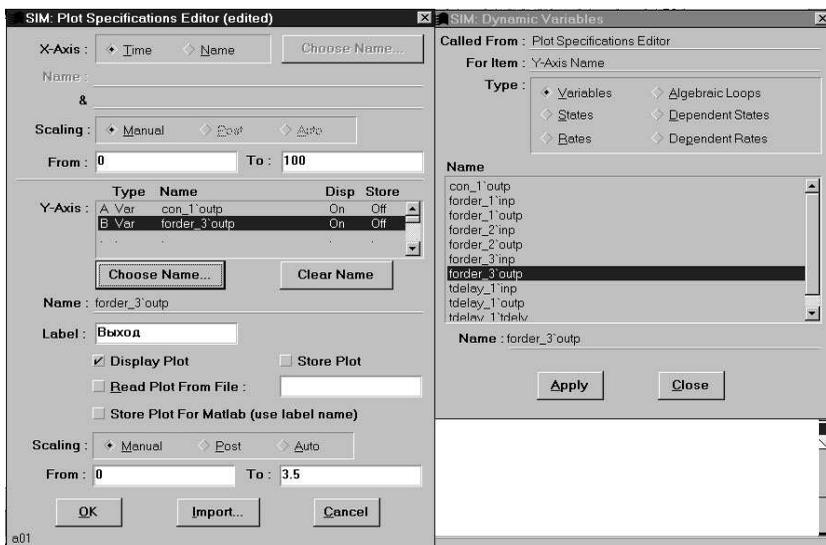


Рис. 1.4. Окно подготовки выводимой информации

Окно подготовки выводимой информации на экран монитора показано на рис. 1.4. Так как значение коэффициента передачи модели объекта известно и равно 3, то масштабы вывода графиков выбраны равными 0 ... 3.5 и заданы в режиме (**Manual**).

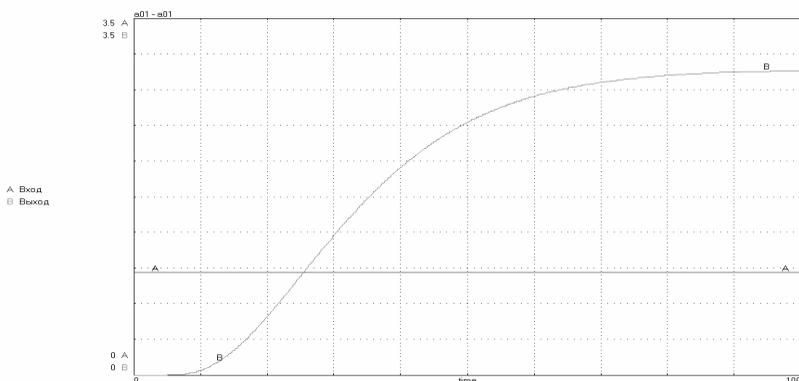
## 1.5. Проведение эксперимента

После того, как модель и необходимые параметры заданы, можно проводить эксперимент, т.е. осуществлять решение сформулированной задачи.

Подготовленный эксперимент (модель с соответствующим интерфейсом и режимом моделирования) запускается на решение пунктом меню **Action** → **Start Simulation** или соответствующей пиктограммой на панели инструментов. Полученный результат приведен на рис. 1.5.

Если необходимо изменить что-либо в условиях эксперимента, то при повторном решении задачи новые результаты будут наложены на

предыдущие. Если сравнение результатов не является Вашей целью, целесообразно произвести очистку экрана.



**Рис. 1.5. Пример изображения на экране результатов эксперимента**

Для завершения процесса моделирования полезно задокументировать полученные результаты. Процесс документирования предполагает прямую печать полученных результатов или отправку их в файл отчета.

Текущее окно печатается на принтере командой **Print Simulation** раздела главного меню **File**. В случае появления затруднений с прямой печатью результатов моделирования можно рекомендовать экспортировать файл в буфер **File** → **Export** → **Simulation to clipboard**, открыть его в графическом редакторе, подписать графики, а затем отправить на печать средствами графического редактора.

Прямая вставка результатов моделирования из буфера в отчет, выполняемый в текстовом редакторе Word, осуществляется с помощью команды **Специальная вставка** → **Рисунок** раздела **Правка** текстового редактора Word.

На этом эксперимент можно считать законченным.

## 1.6. Сохранение модели

В процессе решения поставленной задачи была создана модель, позволяющая воспроизвести результаты моделирования. Однако во многих случаях могут понадобиться дополнительные исследования той же модели или же ее использование в составе более сложных схем. В этих ситуациях целесообразно сохранить структуру модели в файле с помощью команды **Save** раздела меню **Fail** графического редактора. Имя

файла должно быть задано латинскими буквами (не более 5 символов) и обязательно иметь номер, например, LAB1.

Введенные данные о значениях коэффициентов отдельных блоков, начальных условий, параметров моделирования и вывода информации сохраняются отдельно командой **Save Experiment** ("Сохранить эксперимент") раздела меню **Fail** окна **Simulator**. При этом имя файла эксперимента будет соответствовать имени модели. Для одной модели можно иметь несколько вариантов исходных данных, используя команду **Save Experiment AS** ("Сохранить эксперимент как").

Сохраненные значения параметров модели могут быть импортированы для выбранной модели с помощью команды **Open Experiment** ("Открыть эксперимент") раздела меню **Fail** окна **Simulator**.

## 2. Определение импульсной переходной характеристики объекта

Для определения импульсной переходной характеристики объекта необходимо изменить структуру модели решения задачи (рис.1.1.), заменив блок ступенчатого входного воздействия **con**, на блок **pulsgen** - импульсное воздействие, выходом которого является прямоугольный импульс.

Для этого необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- В графическом редакторе изменить структуру модели решения задачи (см. рис.1.1.), заменив блок ступенчатого входного воздействия **con** на блок **pulsgen** - импульсное воздействие.
- При подготовке эксперимента задать параметры блока **pulsgen**: время начала импульса  $T_1$ , время окончания импульса  $T_2$  и высоту импульса  $P$ .
- Провести эксперимент, оставив условия проведения эксперимента прежними.

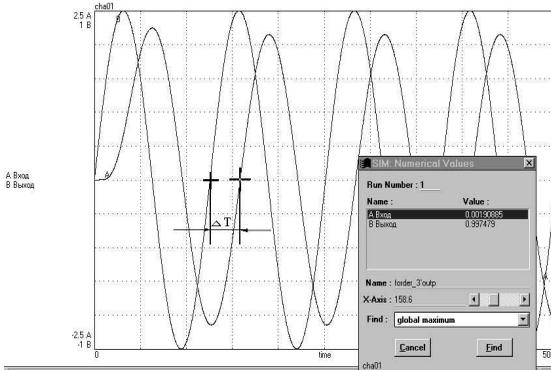
## 3. Определение частотных характеристик объекта

Для определения частотных характеристик объекта необходимо изменить структуру модели решения задачи (рис.1.1.), заменив блок ступенчатого входного воздействия **con** на генератор синусоидальных колебаний **sinwave**, выходом которого является функция  $\sin(2\pi ft)$ .

Частота колебаний **sinwave\_1`omega** в блоке задается в рад/с, т.е. при значении частоты равном, например,  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T = 0,0628$  рад/с, получим период колебаний синусоидального сигнала  $T = 100$  с.

Результаты эксперимента по определению частотных характеристик объекта для периода входных колебаний 100 с показаны на рис 1.6.

Для получения численных значений в любой точке графика необходимо в поле графика щелкнуть правой клавишей мыши и в открывшемся окне выбрать пункт **Numerical Values** ("Цифровые значения"). Окно **Numerical Values** также показано на рис.1.6. Щелкнув левой клавишей мыши на графике (в поле графика появится крестик), в окне **Numerical Values**



**Рис. 1.6. Определение частотных характеристик объекта**

**Values** можно прочитать численные значения графиков.

По оси X будет указано значение времени, соответствующее выбранной точке. В этом окне можно определять глобальное и локальные значения экстремумов полученных графиков. Для этого необходимо выбрать тип искомого экстремума и щелкнуть мышкой на

кнопке **Find** ("Найти").

#### 4. Режим множественного решения

Программа моделирования динамических систем "20-sim" предоставляет возможность множественного решения (**Multiple-RUN**) набранной задачи.

Этот режим позволяет выводить на экран результаты моделирования, автоматически изменяя каждый раз значение выбранного параметра на заданную величину.

Если, например, в рассматриваемой модели объекта решим проанализировать переходную характеристику при изменении коэффициента передачи объекта  $K$  от 3 до 5 с шагом 0.2, то для этого необходимо использовать режим множественного решения задачи моделирования.

Диалоговое окно **Multiple Run Editor**, вызванное последовательностью команд главного меню окна **Simulator: Experiment** → **Multiple-Run Specification** показано на рис. 1.7.

В этом окне необходимо задать режим **Multiple-RUN**, выбрать имя варьируемой переменной, задать предельный диапазон ее изменения и число шагов изменения параметра.

Очевидно, что при изменении значения коэффициента передачи объекта  $K$  от 3 до 5 с шагом 0.2 необходимо 10 шагов (**Steps**) изменения коэффициента, а изменяемый параметр – `forder_3k`.

Результаты использования режима множественного решения для этого случая показаны на рис. 1.8.

Запуск на решение режима **Multiple-Run** осуществляется командой **Start Multiple-Run Simulation** раздела **Action** главного меню окна **Simulator** или нажатием соответствующей пиктограммы на панели инструментов окна моделирования.

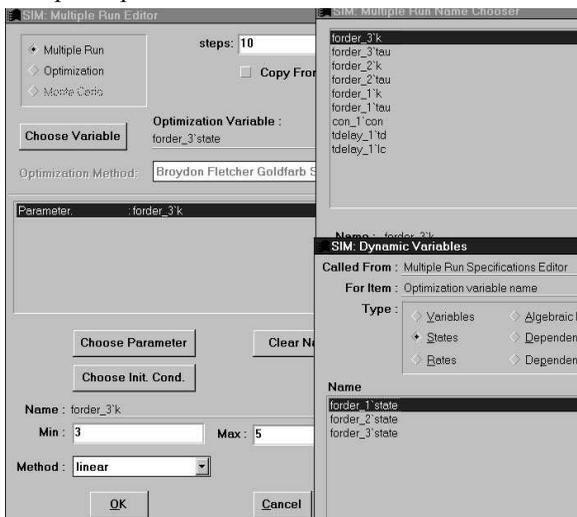


Рис. 1.7. Диалоговое окно Multiple Run Editor для режима множественного решения

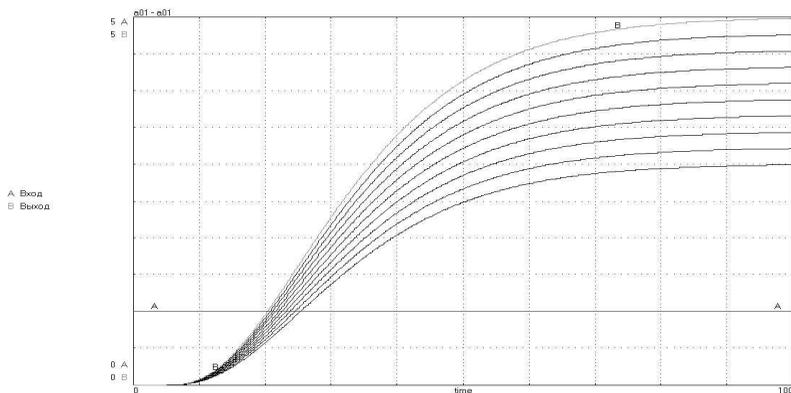


Рис. 1.8. Результаты использования режима множественного решения при изменении значения коэффициента передачи объекта  $K$  от 3 до 5 с шагом 0.2

## Порядок выполнения работы

Ниже приведена последовательность заданий, которые необходимо выполнить в процессе работы. Задания, помеченные звездочкой (\*) выполняются по указанию преподавателя.

### Задание 1. Исследование переходной характеристики объекта регулирования

1.1. Набрать в графическом редакторе "20-sim" модель объекта, подключить на вход блок входного ступенчатого воздействия и вызвать окно моделирования.

1.2. Подготовить эксперимент, задав коэффициенты модели объекта, начальные условия, параметры решения задачи и список графиков, выводимых на экран.

1.3. Провести процесс моделирования, сохранить полученные результаты на диске.

1.4. Провести исследование влияния изменения параметра модели (указанного преподавателем) на вид переходной характеристики в режиме **Multiple-Run**.

### Задание 2. Исследование импульсной переходной характеристики объекта

2.1. Вызвать из файла модель предыдущего задания. Изменить структуру модели, заменив первый блок **con** на блок **pulsgen** - импульсное воздействие.

2.2. Подготовить эксперимент, задав коэффициенты модели объекта, начальные условия, параметры решения задачи и список графиков, выводимых на экран.

Задать параметры блока **pulsgen**:

- начало импульса -  $T_1 = 0$ ;
- конец импульса -  $T_2 = 10$  с;
- высота импульса  $P = 1$ .

2.3. Провести процесс моделирования, сохранить полученные результаты на диске.

2.4. Исследовать влияние параметров импульса (при сохранении его площади) на вид импульсной переходной характеристики объекта.

### Задание 3. Определение частотных характеристик объекта

3.1. Вызвать из файла модель задания 1. Изменить структуру модели, заменив блок входного воздействия **con** на генератор синусоидальных колебаний **sinwave**.

3.2. Подготовить эксперимент, задав коэффициенты модели объекта, начальные условия, параметры решения задачи и список графиков, выводимых на экран.

3.3. Задать параметры блока **sinwave**. Значение амплитуды входного синусоидального сигнала **sinwave\_1`ampl** задать равным 1, а частоту колебаний **sinwave\_1`omega** равной 0,0628 (период  $T = 100$  с).

3.4. Провести эксперимент и зафиксировать точки экстремумов амплитуд входного и выходного сигналов и время переходов через ноль. Рассчитать значение модуля и фазы вектора комплексной частотной характеристики на заданной частоте.

3.5. Повторить эксперимент п.3.3 для определения 5 значений вектора комплексной частотной характеристики для фазового сдвига в диапазоне  $-50^\circ \dots -250^\circ$ . Результаты моделирования представить в виде таблицы.

$T, \text{с}$	$\omega = \frac{2\pi}{T}$	$A_{\text{вых}}$	$T_{\text{вх},0}$	$T_{\text{вых},0}$	$\Delta T = T_{\text{вх},0} - T_{\text{вых},0}$	$A(\omega) = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}}$	$\varphi(\omega) = 2\pi \frac{\Delta T}{T}$
100	0.0628						

**Отчет** выполняется в текстовом редакторе Word. Отчет должен содержать постановку задачи моделирования и выводы. По заданиям 1 – 3 приводятся структурные схемы решения задач моделирования и полученные графики (экспортировать в буфер, открыть в графическом редакторе, подписать, сохранить, а затем вставить в отчет). Структурные схемы и графики подписать. По результатам выполнения задания 3.4 построить вручную на миллиметровой бумаге комплексную частотную характеристику объекта.

## Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. При экспериментальном определении комплексной частотной характеристики (КЧХ) А-звена на частоте  $\omega_1 = 0,0785$  рад/с получено: амплитуда входных колебаний  $A_{\text{вх}} = 0,5$  ед; амплитуда выходных колебаний  $A_{\text{вых}} = 1,0$  ед.; колебания на выходе отстают от колебаний на входе на  $10$  с. Построить осциллограммы колебаний на входе и выходе звена, переходную характеристику и КЧХ звена для частот  $\omega_1$ ,  $\omega_2 = 0$ ,  $\omega_3 = \infty$  и частоты, при которой  $\varphi(\omega_4) = \pi/6$ .

2. При экспериментальном определении КЧХ И- звена на частоте  $\omega_1 = 0,157$  рад/с. получено: амплитуда входных колебаний  $A_{\text{вх}}=1,5$  ед; амплитуда выходных колебаний  $A_{\text{вых}} = 3,0$  ед.. Построить осциллограммы колебаний на входе и выходе звена, переходную характеристику и КЧХ звена для частот  $\omega_1$ ,  $\omega_2 = 2\omega_1$  и  $\omega_3 = 3\omega_1$ .

3. Как изменится переходная характеристика и кривая разгона объ-  
екта, заданного передаточной функцией  $W(p) = \frac{2,5 \cdot e^{-8p}}{(15 \cdot p + 1)^3}$ , если:

- а) увеличить величину коэффициента передачи в 2 раза;
- б) уменьшить величину коэффициента передачи в 2 раза;
- в) увеличить величину транспортного запаздывания в 2 раза;
- б) уменьшить величину транспортного запаздывания в 2 раза.

## ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

### *Аппроксимация переходных характеристик объектов управления*

#### Цель лабораторного занятия

Целью лабораторного занятия является освоение возможностей работы с программным комплексом моделирования динамических систем "20-sim" в режиме поиска минимума целевой функции на примерах аппроксимации экспериментально полученных переходных характеристик математической моделью в виде передаточной функции заданной структуры.

#### Задание на работу

1. Аппроксимировать значения экспериментальной переходной характеристики объекта с самовыравниванием моделью в виде последовательного соединения звена транспортного запаздывания и трех аperiodических звеньев.

2. Аппроксимировать значения экспериментальной переходной характеристики объекта без самовыравнивания ("с набуханием") моделью в виде параллельного соединения аperiodического и интегрирующего звеньев.

3. Заменить заданную структуру модели другой подходящей моделью из условия наилучшего совпадения их переходных характеристик.

Значения коэффициентов определить из условия минимума интеграла квадрата ошибки между экспериментальной переходной характеристикой и переходной характеристикой заданной модели, используя режим поиска минимума функции  $n$ -переменных.

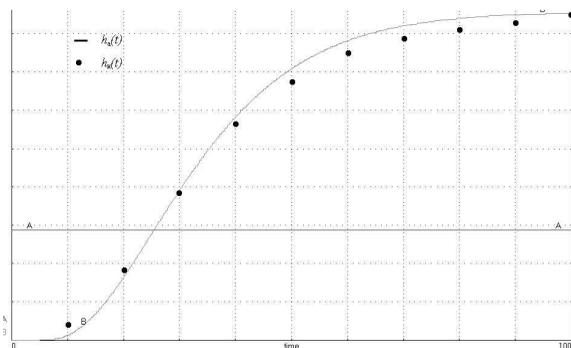
#### Методические указания

##### 1. Понятие аппроксимации

Модель объекта, необходимая для синтеза системы автоматического регулирования этим объектом может быть получена либо расчетным (аналитическим), либо экспериментальным путем.

Наиболее простым является эксперимент по определению кривой разгона объекта как реакции на ступенчатое воздействие произвольной величины с последующим пересчетом полученной кривой в переходную характеристику.

В этом случае экспериментальные переходные характеристики



**Рис 2.1. Аппроксимация переходных характеристик объекта**

обычно представляются в виде таблиц или графиков. Для упрощения последующих расчетов синтеза системы автоматического регулирования, модель объекта целесообразно представить в виде аналитических зависимостей.

Такая замена графика переходной характеристики аналитическим выражением называется аппроксимацией. Это положение иллюстрирует рис. 2.1, на котором точками показана экспериментально определенная переходная характеристика объекта  $h_n(t)$ , а сплошной линией – переходная характеристика, полученная по аналитическому выражению  $h_a(t)$ .

Аппроксимация экспериментальных графиков переходных характеристик объектов регулирования обычно включает в себя два этапа:

Первый - по виду графика переходной характеристики осуществляется выбор общей аналитической формулы для модели объекта.

Второй - определяются значения коэффициентов модели из условия минимума принятого критерия приближения характеристик.

Получение приемлемой модели объекта зависит как от выбора аналитического выражения, так и от задаваемого критерия приближения, который, в свою очередь, определяется целью аппроксимации. Очевидно, что одной переходной характеристике можно поставить в соответствие множество различных моделей объекта, каждая из которых в той или иной степени будет отражать его свойства.

Модель объекта, используемая для последующего синтеза системы автоматического регулирования, должна обеспечивать наименьшее отличие моделей систем регулирования с аппроксимированной и исходной динамическими характеристиками объекта [1].

На практике применяются различные критерии приближения [2], наиболее простым из которых является минимум суммы квадратов отклонений динамических характеристик объектов в точках аппроксимации.

## 2. Режим поиска минимума целевой функции

Программа моделирования динамических систем "20-sim" предоставляет возможность оптимизации значений коэффициентов выбранной модели по заданному критерию.

Формирование критерия предполагает получение в каком-либо блоке значения целевой функции, минимум которой необходимо найти. Таким критерием может быть линейный, модульный или квадратичный интегральный критерии и т.д. Например, чтобы получить значение целевой функции  $J$  на конечном интервале времени  $[0, T]$ , соответствующее модульному интегральному критерию от некоторой функции вре-

мени  $y(t)$   $J = \int_0^T |y(t)| dt$ , необходимо в структурную схему модели объ-

екта добавить блок **critne\_1**, находящийся в библиотеке **Controller**.

Диалоговое окно **Multiple Run Editor**, вызванное последовательно команд **Experiment** → **Multiple Run Specification** показано на рис. 2.2.

В этом окне необходимо задать режим **Optimization** ("Оптимизация"), выбрать блок оптимизируемого критерия (целевой функции) **Optimization Variable**, метод оптимизации, варьируемые параметры и предельный диапазон их изменения.

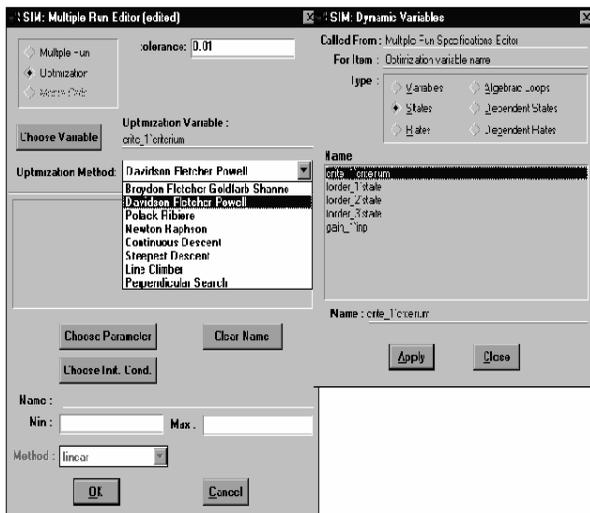


Рис. 2.2. Диалоговое окно Multiple Run Editor для режима поиска минимума заданного критерия

Для выбора блока оптимизируемого критерия (кнопка **Choose Variable**) необходимо в появившемся окне **Dynamic Variables** указать тип (**States**) и в раскрывшемся списке отметить имя блока критерия. Ввод выбранных значений осуществляется нажатием кнопки **Apply** (“Применить”), после чего окно можно закрыть (**Close**).

Поиск минимального значения заданного критерия (целевой функции) осуществляется одним из методов поиска экстремума функции  $n$  переменных (например, Davidon Fletcher Powell), входящих в библиотеку методов оптимизации (**Optimization Method**). Выбор варьируемых параметров (кнопка **Choose Parameter**) происходит в окне **Multiple Run Name Chooser**, после чего для каждого из них устанавливаются минимальные и максимальные значения, ограничивающие область изменения значений параметра. Диапазон изменения значений параметров обычно задается с большим запасом для области возможных значений параметра.

Запуск на решение режима **Multiple Run** осуществляется командой **Start Multiple Run Simulation** раздела главного меню **Action** или нажатием соответствующей пиктограммы на панели инструментов окна моделирования.

Ход поиска минимума выбранного критерия будет отражаться на экране в соответствии с заданными условиями отображения информации в окне **Plot Specification** для каждого шага последовательных приближений.

Для получения численного значения критерия (целевой функции) необходимо в поле графика щелкнуть правой клавишей мыши и в открывшемся окне выбрать пункт **Numerical Values** (“Цифровые значения”). Щелкнув левой клавишей мыши на графике (в поле графика появится крестик), в окне **Numerical Values** можно прочесть численные значения графика в этой точке. Выбрав нужную кривую, можно определить численное значение в любой точке, а также глобальные и локальные значения экстремумов полученных графиков. Для этого необходимо выбрать тип искомого экстремума (минимум или максимум) и щелкнуть мышкой на кнопке **Find** (“Найти”).

### 3. Аппроксимации переходной характеристики объекта с самовыравниванием

Рассмотрим поэтапно последовательность действий по проведению сеанса моделирования на конкретном примере аппроксимации переходной характеристики объекта с самовыравниванием.

### 3.1. Формулировка задачи

Задать структуру передаточной функции и получить значения ее коэффициентов, если переходная характеристика объекта задана в виде массива значений.

В качестве критерия приближения модели  $h_a(t)$  к исходной кривой  $h_n(t)$  рекомендуется использовать минимум интеграла квадрата ошибки на интервале времени, на котором заданы исходные данные:

$$J = \int [h_a(t) - h_n(t)]^2 dt \rightarrow \min. \quad (2.1)$$

Осуществить по указанному критерию поиск значений коэффициентов передаточной функции, обеспечивающих наилучшее приближение переходной характеристики заданной модели объекта к исходной переходной характеристике объекта.

### 3.2. Составление и набор структурной схемы модели

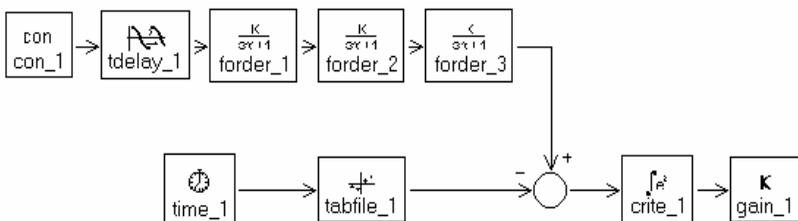
Модель объекта, имеющего переходную характеристику с самовыравниванием, можно представить в виде последовательного соединения звена транспортного запаздывания и апериодических звеньев. Передаточная функция модели такого объекта имеет вид

$$W(p) = \frac{K}{T_1 p + 1} \cdot \frac{1}{T_2 p + 1} \cdot \frac{1}{T_3 p + 1} \cdot e^{-p\tau}, \quad (2.2)$$

где  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $\tau$  – коэффициенты модели, значения которых необходимо определить из условия (2.1).

Структурная схема модели для решения задачи аппроксимации переходной характеристики объекта с самовыравниванием (2.2) имеет вид, показанный на рис. 2.3.

Для блоков сложения и вычитания сигналов (**Plus** и **Minus**) необходимо указать знаки отдельных слагаемых. Это осуществляется щелчком правой клавиши мыши на выделенном блоке и перехода в открывающемся меню к пункту **Connection** ("Соединение"). Выбрав тот или иной вход блока, необходимо обратить внимание на то, какой блок находится с другой стороны (**other side**) входа и с каким знаком его следует применить. Далее каждому входу необходимо присвоить значение плюс или минус, выбрав его из нижней части окна.



**Рис 2.3. Структурная схема модели для решения задачи аппроксимации переходной характеристики объекта с самовыравниванием**

- con – блок формирования ступенчатого входного сигнала;
- tdelay – блок моделирования чистого запаздывания;
- forder – блок моделирования аperiодического звена;
- time – блок моделирования времени;
- tabfile – блок моделирования данных, заданных таблично;
- crite – блок формирования критерия приближения (2.1);
- gain – блок умножения входного сигнала на постоянное значение К

Блок gain предназначен для вывода на экран значения критерия ( $K=1$ ).  
 Блок tabfile предназначен для ввода данных из файла в "20-sim".

### 3.3. Подготовка эксперимента

Для подготовки к проведению эксперимента необходимо открыть окно моделирования (раздел главного меню **Simulation**), и открыв пункт **Experiment**, последовательно ввести необходимые значения коэффициентов, начальных условий, параметров моделирования и вывода информации.

В качестве примера рассмотрим процедуру ввода исходных данных для объекта с самовыравниванием, экспериментальная переходная характеристика которого задана в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Значения переходной характеристики объекта с самовыравниванием

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t, c	0	6	9	12	15	18	21	24	27
h(t)	0	0	0.15	0.5	1.3	2.0	2.7	3.3	3.8

N	10	11	12	13	14	15	16	17	18
t, c	30	33	36	39	42	48	60	80	100
h(t)	4.2	4.55	4.7	4.9	5.0	5.2	5.25	5.28	5.3

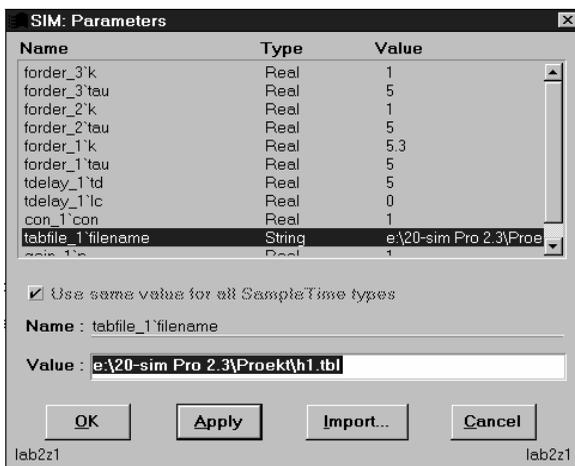


Рис. 2.4. Окно задания коэффициентов модели

ответствовать правилам написания имен в MS DOS.

По данным табл. 2.1 можно принять, что установившееся значение переходной характеристики равно 5.3, поэтому коэффициент передачи аппроксимирующей передаточной функции модели искать не требуется, а можно принять равным 5.3. Тогда в диалоговом окне **Parameters** для одного из блоков моделирования аperiodического звена **forder** (например, **forder\_1**) необходимо установить значение параметра **forder\_1k** = 5.3, а для других блоков **forder** значения коэффициентов передачи аperiodических звеньев будут равны единице.

Для задания значений экспериментальной переходной характеристики блока **tabfail** необходимо в диалоговом окне (см. рис. 2.4) указать полный путь к файлу **h1.tbl** (диск, каталог, имя файла).

В диалоговом окне **Multiple Run Editor** (см. рис. 2.2) выбирается режим **Optimization**; оптимизируемый блок **States** (для рассматриваемого примера **crite\_1' criterion**); метод оптимизации (**Davidson Fletcher Powell**); варьируемые переменные (**Choose parameter**) – запаздывание и постоянные времени аperiodических звеньев) и диапазон их изменения.

### 3.4. Задание информации о результатах моделирования

На экран необходимо вывести следующие графики:  
– график исходной переходной характеристики;

Значения переходной характеристики заносятся в файл **h1.tbl**, созданный любым редактором, например Norton Commander, вне пакета "20-sim". При подготовке файла названия переменных не указываются, в строке записываются два значения (время и ордината) через пробел. Имя файла должно со-

- график аппроксимирующей переходной характеристики;
- график, показывающий текущее значение критерия приближения для каждого шага поиска коэффициентов аппроксимирующей модели.

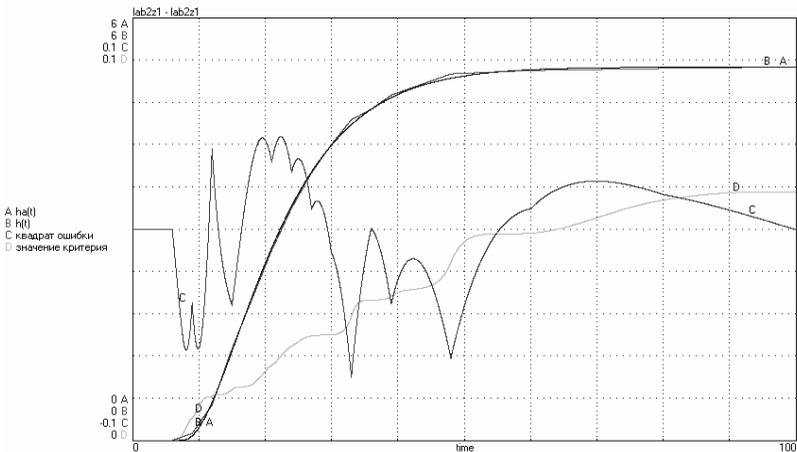
Для задания информации о выводе результатов моделирования необходимо вызвать окно **Plot Specification**, нажать клавишу **Choose Name** ("Выбрать имя") и в списке блоков модели отметить выходы нужных блоков. В полосе **Label** ("Метка") необходимо написать обозначения выводимых на графики величин.

### 3.5. Проведение эксперимента

После того, как модель и необходимые параметры заданы, можно проводить эксперимент, т.е. осуществлять решение сформулированной задачи.

Подготовленный эксперимент (модель с соответствующим интерфейсом и режимом моделирования) запускается на решение командой **Action** → **Start Multiple Run Simulation** или соответствующей пиктограммой на панели инструментов. Ход поиска отражается на экране в соответствии с заданными условиями отображения информации в окне **Plot Specification** для каждого шага последовательных приближений.

Результаты решения задачи аппроксимации приведены на рис. 2.5.



**Рис. 2.5. Результаты решения задачи аппроксимации переходной характеристики объекта**

A – переходная характеристика модели; B – исходная переходная характеристика объекта; C – ошибка аппроксимации в каждый момент времени; D – интеграл от квадрата ошибки аппроксимации по времени

На рис.2.5 дополнительно выведен график отклонения аппроксимирующей кривой от исходной для каждого момента времени.

После окончания поиска минимума заданного критерия необходимо открыть окно **Parameters** и записать значения коэффициентов, полученных в результате решения задачи аппроксимации и передаточную функцию модели объекта. Щелкнув правой клавишей мыши в поле графика, в окне **Numerical Values** можно определить численное значение критерия приближения.

На этом задачу аппроксимации переходной характеристики выбранным аналитическим выражением и по принятому критерию приближения исходной и аппроксимирующей характеристик можно считать решенной.

### 3.6. Сохранение модели

Сохранение структуры модели в файле осуществляется командой **Save** раздела меню **Fail** графического редактора. Имя файла должно быть задано латинскими буквами (не более 5 символов) и обязательно иметь номер, например, LAB2.

Введенные данные о значениях коэффициентов отдельных блоков, начальных условий, параметров моделирования и вывода информации сохраняются отдельно командой **Save Experiment** ("Сохранить эксперимент") раздела меню **Fail** окна моделирующей системы (**Simulator**). При этом имя файла эксперимента будет соответствовать имени модели.

Сохраненные значения параметров модели могут быть импортированы для выбранной модели с помощью команды **Open Experiment** ("Открыть эксперимент") раздела меню **Fail** окна **Simulator**.

## 4. Аппроксимация переходной характеристики объекта без самовывравнивания

Характерным примером переходной характеристики объекта без самовывравнивания является переходная характеристика изменения уровня в барабане котла при возмущении расходом пара (по нагрузке котла).

Таблица 2.2  
Значения переходной характеристики объекта "с набуханием"

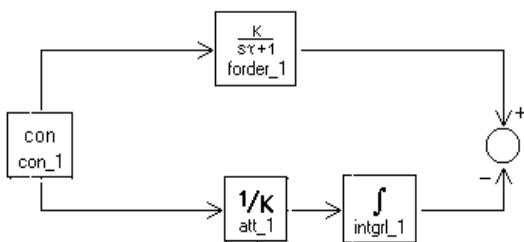
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t, c	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
h(t)	0	2	3	2	0	-2	-4	-7	-11	-15	-19

Примерный вид переходной характеристики объекта без самовыравнивания, построенный по значениям, приведенным в табл.2.2, показан на рис. 2.7 (график D).

Модель объекта, имеющего переходную характеристику без самовыравнивания ("с набуханием"), можно представить в виде параллельного соединения интегрирующего и аperiodических звеньев. Передаточная функция модели такого объекта имеет вид

$$W(p) = \frac{K_a}{T_a p + 1} - \frac{1}{T_i p}, \quad (2.3)$$

где  $K_a$ ,  $T_a$ ,  $T_i$  – коэффициенты модели, значения которых необходимо определить из условия (2.1).



**Рис. 2.6. Структура модели объекта для переходной характеристики "с набуханием"**

att\_1 – блок деления на постоянный коэффициент;  
intgrl\_1 – блок интегрирования входного сигнала;  
forder\_1 – блок моделирования аperiodического звена

Структурная схема модели объекта, соответствующая передаточной функции (2.3), приведена на рис. 2.6.

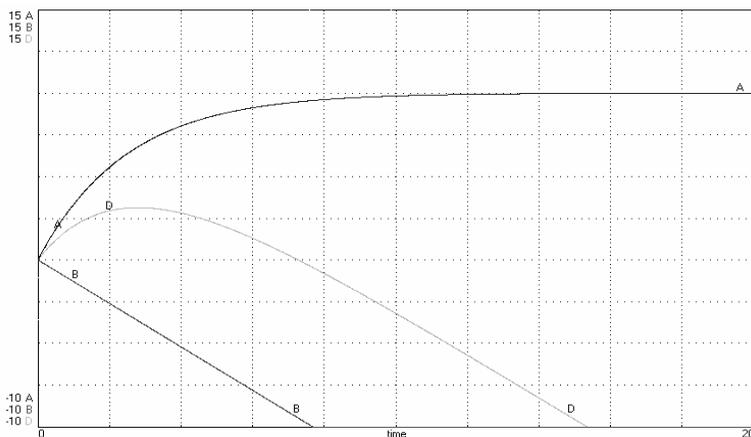
На рис. 2.7 приведен пример формирования переходной характеристики объекта "с набуханием" как разность переходных характеристик аperiodического и интегрирующего

(график B) звеньев. Блок att\_1 предназначен для задания значения постоянной времени интегрирующего звена.

Заменяв в структурной схеме модели решения задачи аппроксимации переходной характеристики (рис.2.3) модель объекта и файл экспериментальной переходной характеристики и запустив режим поиска минимума значения критерия приближения, нетрудно получить искомые значения коэффициентов и численное значение критерия приближения.

Время и сходимость алгоритма поиска во многом зависит от начальных значений искомых коэффициентов. Если процесс поиска минимума затягивается, то рекомендуется остановить процесс поиска и задать новые начальные значения искомых параметров.

После окончания поиска минимума заданного критерия необходимо открыть окно "Параметры" и записать значения коэффициентов, полученных в результате решения задачи аппроксимации и передаточную функцию модели объекта.



**Рис. 2.7. Пример формирования переходной характеристики объекта "с набуханием"**

График (D) – разность переходных характеристик аперийодического (A) и интегрирующего звеньев (B)

Щелкнув правой клавишей мыши в поле графика, в окне **Numerical Values** можно определить численное значение критерия приближения.

## **5. Аппроксимация колебательной переходной характеристики объекта**

Модель объекта (или системы регулирования), имеющую переходную характеристику колебательного звена можно представить в виде встречно-параллельного соединения интегрирующего и аперийодических звеньев. В общем случае в модель может быть добавлено звено транспортного запаздывания.

Структурная схема такой модели показана на рис. 2.8.

Аппроксимируемая (исходная) переходная характеристика в данном задании представляется не таблицей переходной характеристики, а формируется типовой моделью колебательного звена (sorder\_1) библиотеки **Blok Diagram** графического редактора "20-sim".

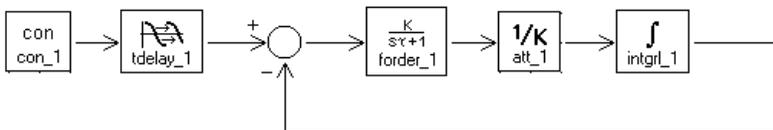


Рис. 2.8. Модель колебательного звена с запаздыванием

Задача аппроксимации имеет следующую формулировку: необходимо аппроксимировать колебательную переходную характеристику объекта (типového колебательного звена) моделью, представленной в виде встречно-параллельного соединения интегрирующего и аperiodического звеньев.

В этом случае не используется блок моделирования времени (Time\_1), а входное ступенчатое воздействие подается одновременно на исходную и аппроксимирующую модели, формирующие переходные характеристики.

Необходимо определить значения времени транспортного запаздывания  $\tau$ , коэффициента передачи  $K_a$ , постоянной времени  $T_a$  аperiodического звена и постоянной времени  $T_{и}$  (блок att) интегрирующего звена.

Структурная схема модели для решения задачи аппроксимации переходной характеристики такого объекта представлена на рис. 2.9.

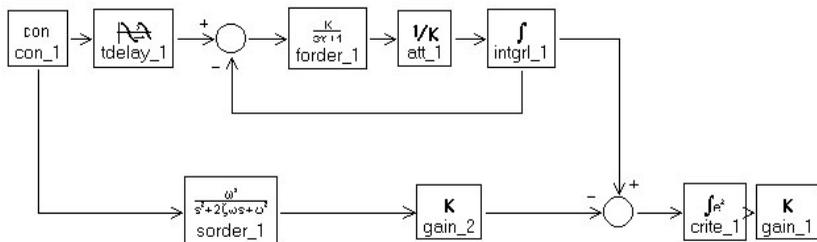


Рис. 2.9. Структурная схема аппроксимации колебательной переходной характеристики объекта

После того, как модель и необходимые параметры заданы, можно проводить эксперимент, т.е. осуществлять решение сформулированной задачи.

Запустив процесс поиска минимума, нетрудно получить искомые значения коэффициентов.

Процесс поиска минимума значения критерия приближения запускается на решение командой **Action** → **Start Multiple Run Simulation** или соответствующей пиктограммой на панели инструментов. Ход поиска

отражается на экране в соответствии с заданными условиями отображения информации в окне **Plot Specification** для каждого шага последовательных приближений.

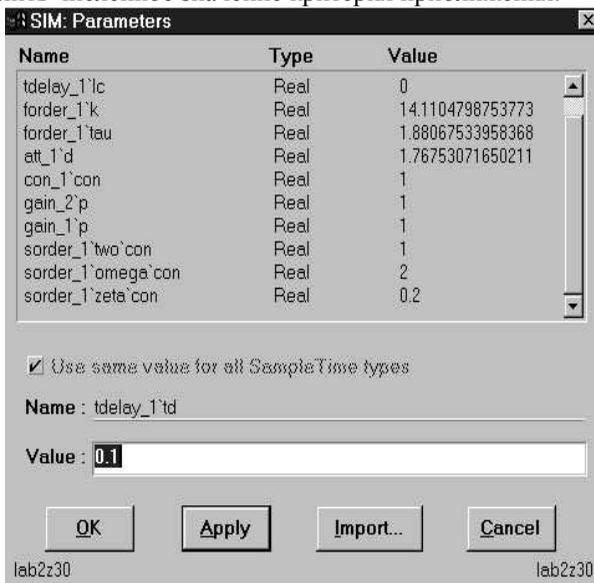
После окончания поиска минимального значения заданного критерия приближения переходных характеристик объекта и модели необходимо открыть окно **Parameters** ("Параметры") и записать значения коэффициентов, полученных в результате решения задачи аппроксимации и передаточную функцию модели объекта.

Щелкнув правой клавишей мыши в поле графика, в окне **Numerical Values** можно определить численное значение критерия приближения.

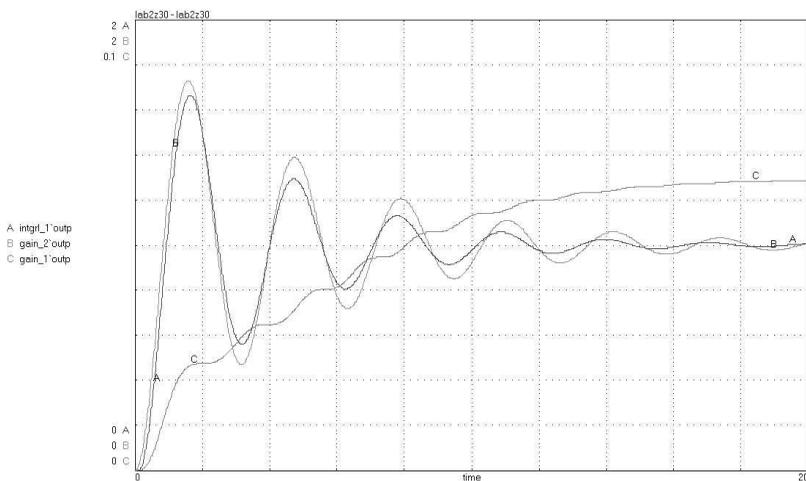
Окно "Параметры" после окончания процесса поиска минимума критерия приближения показано на рис. 2.10. В нем отображены значения параметров исходной модели колебательного звена и полученные значения коэффициентов аппроксимирующей модели.

Примерный вид графиков, полученных в результате аппроксимации переходной характеристики объекта моделью колебательного звена представлен на рис. 2.11.

При отсутствии звена транспортного запаздывания в аппроксимирующей модели можно получить практически полное совпадение переходных характеристик объекта и модели.



**Рис. 2.10. Исходные данные и значения коэффициентов колебательного звена и аппроксимирующей модели**



**Рис. 2.11. Результаты аппроксимации объекта, имеющего колебательную переходную характеристику**

А – переходная характеристика модели; В – исходная переходная характеристика объекта; С – интеграл от квадрата ошибки аппроксимации по времени

## Порядок выполнения работы

### Задание 1. Аппроксимация переходной характеристики объекта с самовывравниванием

1.1. Создать вне программы **"20-sim"** файл в кодах ASCII с расширением .tbl (например, h1.tbl) и записать в него экспериментально полученные значения переходной характеристики (получить у преподавателя). Сохранить файл в своей папке.

1.2. Набрать в графическом редакторе **"20-sim"** структуру модели решения задачи аппроксимации переходной характеристики объекта в соответствии со схемой приведенной на рис. 2.2 и вызвать окно моделирования.

1.3. Подготовить эксперимент, задав начальные значения коэффициентов модели, начальные условия, параметры моделирования и список графиков, выводимых на экран. Провести контрольное моделирование экспериментальной и аппроксимирующей характеристик при начальных значениях параметров модели.

1.4. Провести процесс поиска оптимальных значений коэффициентов аппроксимирующей модели при четырех искомым параметрах (постоянные времени запаздывающего и аperiodических звеньев) по критерию приближения (2.1). Определить численное значение критерия приближения.

1.5. Записать значения коэффициентов, полученных в результате решения задачи аппроксимации, а затем полученную передаточную функцию аппроксимирующей модели.

1.6. \*Провести исследование влияния значения начального приближения по величине постоянной времени запаздывающего звена на быстроту и качество аппроксимации.

1.7. Сохранить модель, эксперимент и результаты решения задачи на диске.

## **Задание 2. Аппроксимация переходной характеристики объекта без самовывравнивания**

2.1. Создать вне программы "20-sim" файл в кодах ASCII с расширением .tbl (например, h2.tbl) и записать в него экспериментально полученные значения переходной характеристики объекта без самовывравнивания (получить у преподавателя). Сохранить файл в своей папке.

2.2. Осуществить ввод структуры модели, *заменяв модель объекта* параллельным соединением аperiodического и интегрирующего (со знаком минус) звеньев согласно рис. 2.7. Ввести начальные значения коэффициентов модели и параметры моделирования (шаг и интервал расчета, перечень выводимых графиков и их масштабы). Провести контрольное моделирование при начальных значениях параметров модели.

2.3. Провести процесс поиска оптимальных значений коэффициентов аппроксимирующей модели при трех искомым параметрах (коэффициент передачи аperiodического звена и постоянные времени интегрирующего и аperiodического звеньев) по заданному критерию приближения (2.1). Определить численное значение критерия приближения.

2.4. Записать значения коэффициентов модели, полученных в результате решения задачи аппроксимации, а затем полученную передаточную функцию аппроксимирующей модели.

2.5. Сохранить модель, эксперимент и результаты решения задачи на диске.

### **Задание 3. Аппроксимация колебательной переходной характеристики объекта**

3.1. Набрать в графическом редакторе "20-sim" структуру модели решения задачи аппроксимации переходной характеристики колебательного звена в соответствии со схемой приведенной на рис. 2.8 и вызвать окно моделирования.

3.2. Подготовить эксперимент, задав начальные значения коэффициентов модели, начальные условия, параметры моделирования и список графиков, выводимых на экран. Провести контрольное моделирование исходной и аппроксимирующей характеристик при начальных значениях параметров модели.

3.3. Провести процесс поиска оптимальных значений коэффициентов аппроксимирующей модели при трех искомым параметрах (коэффициент передачи апериодического звена и постоянные времени интегрирующего и апериодического звеньев) по заданному критерию приближения (2.1). Определить численное значение критерия приближения.

3.4. Записать значения коэффициентов модели, полученные в результате решения задачи аппроксимации, а затем полученную передаточную функцию аппроксимирующей модели. Передаточную функцию привести к типовому виду звена второго порядка и определить корни характеристического уравнения модели.

3.5. \*Провести исследование влияния значения начального приближения по величине постоянной времени запаздывающего звена на быстроту и качество аппроксимации.

3.6. Сохранить модель, эксперимент и результаты решения задачи на диске.

**Отчет** выполняется в текстовом редакторе Word. Отчет должен содержать постановку задачи моделирования и выводы. По заданиям 1 – 3 необходимо привести структурные схемы решения задач аппроксимации, графики результатов поиска значений параметров передаточных функций, значение критерия приближения и полученные выражения для передаточных функций. Структурные схемы решения задач и полученные графики экспортировать в буфер, открыть в графическом редакторе, подписать, сохранить, а затем вставить в отчет.

### **Контрольные вопросы к защите лабораторной работы**

1. Нарисовать примерный вид КЧХ и переходной характеристики для параллельного соединения интегрирующего и реально-дифференцирующего звеньев.
2. Нарисовать примерный вид КЧХ и переходной характеристики для параллельного соединения аperiodического и пропорционального звеньев.
3. Нарисовать примерный вид КЧХ и переходной характеристики для параллельного соединения аperiodического и интегрирующего звеньев.
4. Нарисовать примерный вид КЧХ и переходной характеристики для последовательного соединения аperiodического звена и звена транспортного запаздывания.

## ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

### *Одноконтурная автоматическая система регулирования с идеальным ПИ-регулятором и нелинейностями*

#### Цель лабораторного занятия

Целью лабораторного занятия является исследование одноконтурной АСР с ПИ-законом регулирования, люфтом и ограничением на перемещение регулирующего органа с использованием программы моделирования динамических систем "20-sim".

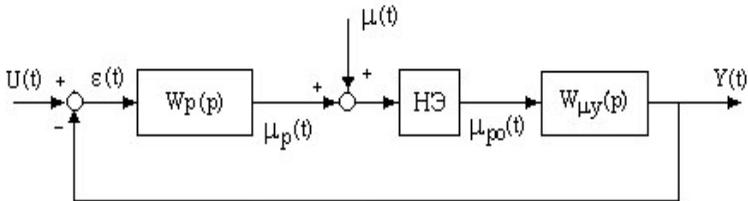
#### Задание на работу

При подготовке к лабораторному занятию необходимо разработать структурную схему модели системы регулирования, определить значения вводимых коэффициентов модели объекта (в соответствии с заданием на моделирование динамики систем регулирования, приведенном в Приложении), рассчитать оптимальные значения параметров настройки регулятора и оценить длительность процесса регулирования.

На занятии провести моделирование одноконтурной системы с ПИ-регулятором, а также системы с ПИ-регулятором и с типовыми нелинейностями и сделать вывод об их влиянии на вид переходных характеристик в замкнутой системе регулирования.

#### Методические указания

Структурная схема одноконтурной АСР, используемая на занятии, приведена на рис 3.1.



**Рис. 3.1.** Структурная схема одноконтурной АСР

$\mu(t)$  – возмущающее воздействие по каналу регулирующего органа;

$U(t)$  – задающее воздействие;

$\mu_p(t)$ ,  $\mu_{po}(t)$ , – выходная величина регулятора и регулирующее воздействие;

$Y(t)$  – регулируемая величина;

$W_{\mu}(p)$  – передаточная функция объекта относительно регулирующего воздействия;

$W_p(p)$  – передаточная функция регулятора;

НЭ – нелинейный элемент.

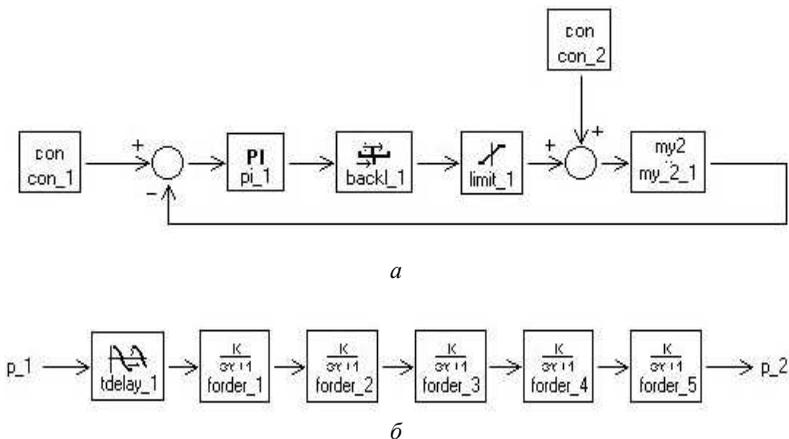
## 1. Моделирование объекта

Моделирование одноконтурной автоматической системы с типовыми законами регулирования обычно не вызывает затруднений. В пакете "20-sim" при моделировании объекта, состоящего из большого количества элементарных динамических звеньев, целесообразно использовать подмодели (**Submodels**), чтобы модель всей системы целиком умещалась на экране. Для этого, после набора в графическом редакторе модели канала объекта, необходимо на ее вход и выход добавить блоки связи **PIO**, которые обеспечивают связь с родительской (**parent**), т.е. основной моделью системы и сохранить в библиотеке (**My Project**) под каким-либо именем.

Добавление блоков связи **PIO** осуществляется следующим образом. Необходимо выбрать кнопку с тремя стрелками в правом верхнем углу окна **GE:Draw**, щелкнуть левой клавишей мыши перед первым и за последним блоком модели) и соединить появившиеся блоки P\_1 и P\_2 с соответствующими блоками подмодели. Сохранение подмодели осуществляется с помощью команды **Process** → **Check & Save SIDOPS**. В открывшемся окне вводится имя подмодели. Затем необходимо нажать кнопку **Update** в окне выбора библиотек стандартных модулей окна **GE:Draw**. Имя сохраненной подмодели появится в перечне подмоделей библиотеки. При наборе основной модели системы регулирования подмодель вызывается из библиотеки (**My Project**) как обычный блок. Исходные данные для подмодели как и прежде задаются при проведении эксперимента.

Для открытия в графическом редакторе структуры подмодели, необходимо выделить блок подмодели, щелкнуть правой клавишей мышки и в открывшемся меню выбрать пункт **Show Submodels** ("Показать подмодели"). Основная (родительская) модель при этом предварительно должна быть сохранена. Для возврата в основную модель из подмодели в этом же меню необходимо выбрать пункт перехода к исходной модели (**Show parent**).

Структурная схема моделирования одноконтурной системы регулирования с ПИ-законом регулирования, люфтом и ограничением на перемещение регулирующего органа приведена на рис. 3.2.



**Рис. 3.2. Структурная схема моделирования одноконтурной системы регулирования с ПИ-законом регулирования, люфтом и ограничением на перемещение регулирующего органа**

*a* – модель одноконтурной системы регулирования с ПИ-законом регулирования, люфтом и ограничением на перемещение регулирующего органа;  
*б* – подмодель my2

На рис. 3.2 изображены следующие блоки:

- PI – блок формирования ПИ закона регулирования;
- backl – блок моделирования люфта;
- limit – блок моделирования ограничения;
- my2 – подмодель объекта регулирования.

Назначение остальных блоков было рассмотрено ранее.

## 2. Моделирование регулятора

В пакете "20-sim" идеальный ПИ закон регулирования можно моделировать двумя способами:

1. Как параллельное соединение пропорционального и интегрирующего звеньев с нулевыми начальными условиями;
2. С использованием динамического блока **PI** из библиотеки **Controllers**.

Оба способа позволяют моделировать идеальный ПИ закон регулирования, оптимальные значения параметров настройки которого рассчитываются известными методами по частотным характеристикам объекта.

Оптимальные значения параметров настройки регулятора можно определить в пакете "20-sim" поиском минимума принятого критерия оп-

тимальности. Для этого необходимо добавить к модели системы регулирования блок формирования критерия оптимальности, задать начальные значения параметров настройки и с помощью процедуры поиска минимального значения критерия (**Multiple Run** → **Optimization**) определить параметры настройки регулятора. В качестве критерия оптимальности можно рекомендовать модульный интегральный критерий качества процесса регулирования (блок **Cretne1** из библиотеки **Controller**). Использование этого критерия во многих случаях позволяет получить приемлемые результаты без ввода дополнительного ограничения на запас устойчивости системы.

### 3. Моделирование типовых нелинейностей

Одной из распространенных нелинейностей, встречающейся в реальных системах автоматизации, является нелинейность типа "**ограничение**", появляющаяся вследствие ограничения диапазона перемещения регулирующего органа концевыми выключателями. Достижение регулирующим органом одного из крайних положений приводит к отклонению процесса регулирования от оптимального.

Статическая характеристика нелинейности типа "ограничение" показана на рис.3.3,а. Входной величиной является выход регулятора  $\mu_p$ , а выходной – перемещение регулирующего органа  $\mu_{p.o}$ . Ограничения диапазона перемещения регулирующего органа в большую и меньшую стороны обозначены соответственно  $\mu_{max}$  и  $\mu_{min}$ .

Ограничение выходного сигнала в пакете "**20-sim**" моделируется блоком **Limit1** из библиотеки нелинейных блоков, в параметрах которого устанавливаются минимальное  $Limit\_1\ min$  и максимальное  $Limit\_1\ max$  значения выходной величины блока.

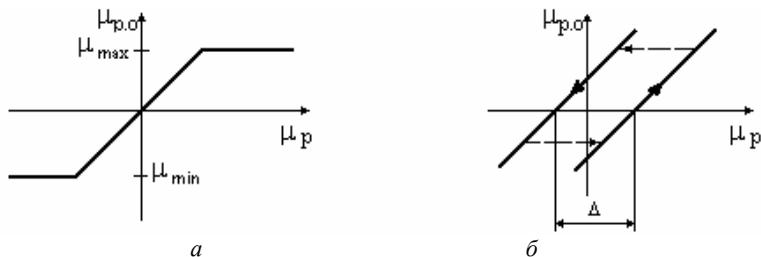


Рис. 3.3. Статические характеристики типовых нелинейностей:

а – "ограничение"; б – "люфт"

Другой распространенной нелинейностью является нелинейность типа "люфт". Действие этой нелинейности проявляется в том, что изменение регулирующего воздействия в "мертвой" зоне не приводит к перемещению регулирующего органа, что также ухудшает качество регулирования. Здесь люфт можно рассматривать как дополнительное запаздывание в объекте регулирования.

Статическая характеристика нелинейности типа "люфт" показана на рис. 3.3,б. Величина "мертвой" зоны обозначена символом  $\Delta$ .

Нелинейность типа "люфт" в пакете "20-sim" моделируется блоком **backl1** (backflash) из библиотеки нелинейных блоков **Block Diagram Non Lin**. Параметрами блока backl1 являются: ширина "мертвой" зоны **backl $\Gamma$ zone** и значение положения люфта в начальный момент времени **backl $\Gamma$ initoutp** в "мертвой" зоне.

Результаты исследования одноконтурной АСР с ПИ-законом регулирования и ограничением на перемещение регулирующего органа в виде, рекомендуемом при оформлении отчета приведены на рис. 3.4.

Результаты моделирования экспортированы в буферную память ПЭВМ (**Export**→**Simulation To clipboard**), открыты в графическом редакторе, преобразованы в режим "градации серого", подписаны, сохранены в формате \*.jpg, а затем вставлены в документ Word.

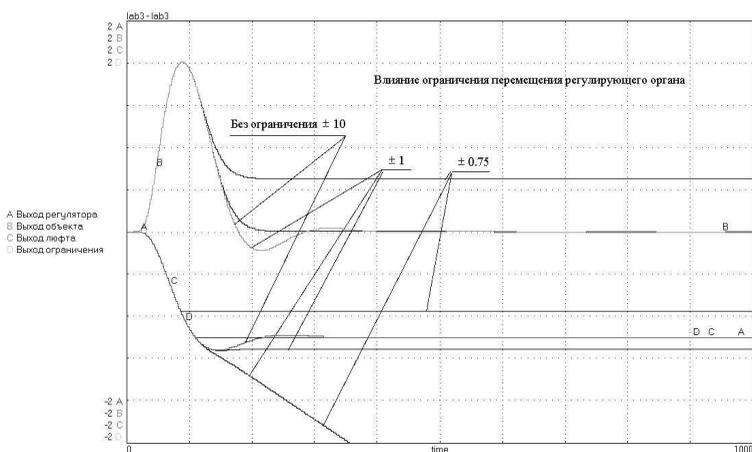


Рис. 3.4. Результаты исследования одноконтурной АСР с ПИ-законом регулирования и ограничением на перемещение регулирующего органа

## Порядок выполнения работы

### Задание 1. Моделирование динамики одноконтурной системы регулирования

1.1. Разработать структурную схему модели системы регулирования, определить значения вводимых коэффициентов модели объекта (в соответствии с заданием на моделирование динамики систем регулирования, приведенном в Приложении) и рассчитать оптимальные значения параметров настройки ПИ-регулятора.

1.2. Набрать в графическом редакторе "20-sim" подмодель объекта и сохранить ее в библиотеке **My Project**.

1.3. Набрать в графическом редакторе "20-sim" подготовленную модель одноконтурной АСР с "идеальным" ПИ-регулятором, люфтом и ограничением на перемещение регулирующего органа в соответствии со схемой приведенной на рис. 3.2 и вызвать окно моделирования.

1.4. Подготовить эксперимент, задав значения коэффициентов модели, начальные условия, параметры моделирования и список графиков, выводимых на экран. Установить рассчитанные по модели объекта оптимальные значения параметров настройки ПИ-регулятора. Установить значения параметров блоков  $Limit1$  и  $back11$ , исключая влияние нелинейных элементов ( $Limit1\_max = 10$ ,  $Limit1\_min = -10$ ,  $back1\_zone = 0$ ,  $back1\_initoutp = 0$ ). На экран вывести графики:

A – ступенчатого возмущения;

B – выходной величины регулятора  $\mu_p(t)$ ;

C – изменения выходной величины объекта  $Y(t)$ .

1.5. Провести процесс моделирования при ступенчатом воздействии по заданию регулятору и по каналу регулирующего органа. Сохранить полученную модель системы и параметры эксперимента.

1.6. Добавить к модели АСР блок формирования модульного интегрального показателя качества процесса регулирования (блок **Cretnel1** из библиотеки **Controller**) и с помощью процедуры поиска минимального значения критерия (**Multiple Run** → **Optimization**) определить параметры настройки регулятора без ограничения на запас устойчивости системы. Сравнить полученные результаты с результатами, полученными в п.1.2 и сделать выводы.

1.7. В **отчете** по этому заданию представить распечатку модели системы с ПИ-регулятором, графики процессов регулирования  $\mu(t)$  и  $Y(t)$  для двух вариантов настройки регулятора (графики для каждого входного воздействия на одном рисунке), рисунки подписать.

## Задание 2. Исследование влияния ограничения диапазона перемещения регулирующего органа на вид переходного процесса

2.1. Установить новые параметры эксперимента в блоке формирования ограничений на перемещение регулирующего органа **Limit1** (значения нижнего и верхнего пределов перемещения регулирующего органа  $\mu_{p.o}(t)$   $\min$  и  $\max = \pm 1,5$ ). Добавить при выводе на экран результатов моделирования график перемещения регулирующего органа  $\mu_{p.o}(t)$ . Провести процесс моделирования работы системы с ПИ-регулятором при ступенчатом воздействии на вход регулятора и по каналу регулирующего органа.

2.2. Провести исследование влияния величины ограничения перемещения регулирующего органа на вид переходного процесса в системе с ПИ-регулятором для  $\Delta\mu(t) = \pm 0,75$  и  $\pm 1,0$ . Представить результаты моделирования работы системы с ограничением перемещения регулирующего органа и без него (п.1.2.) на одном графике.

2.3. В **отчете** по этому заданию представить графики изменения выходного сигнала системы  $Y(t)$ , регулятора  $\mu_p(t)$  и регулирующего органа  $\mu_{p.o}(t)$  для рассмотренных случаев (графики для каждого входного воздействия на одном рисунке). Рисунки подписать. Сделать вывод о влиянии ограничения перемещения регулирующего органа на вид переходного процесса.

## Задание 3. Исследование влияния "люфта" на качество регулирования

3.1. Установить новые параметры эксперимента. В блоке **limit1** задать значения нижнего и верхнего пределов ограничения перемещения регулирующего органа  $\mu_{p.o}(t)$   $\min$  и  $\max = \pm 10$ , исключив тем самым влияние ограничения на процесс регулирования.

3.2. Провести исследование влияния величины "мертвой" зоны на качество процесса регулирования при ступенчатом воздействии на вход регулятора и по каналу регулирующего органа.

Для исследования использовать значения **backl\_zone** = 0 (идеальный ПИ регулятор), 0,5, 1. Значение положения люфта в начальный момент времени **initoutp** задать равным 0. Сопоставить полученные результаты с идеальным ПИ регулятором наложением результатов моделирования системы с люфтом регулирующего органа и без него на одном графике.

3.3. В отчете представить графики изменения выходного сигнала системы  $Y(t)$ , регулятора  $\mu_p(t)$  и регулирующего органа  $\mu_{p.o}(t)$  для рассмотренных случаев (графики для каждого входного воздействия на одном рисунке). Рисунки подписать. Сделать вывод о влиянии "люфта" на качество регулирования.

**Отчет** выполняется в текстовом редакторе Word. Отчет должен содержать постановку задачи моделирования, модель одноконтурной АСР с "идеальным" ПИ-регулятором, люфтом и ограничением на перемещение регулирующего органа, необходимые графики и выводы.

### **Контрольные вопросы к защите лабораторной работы**

1. Для системы регулирования с И-регулятором и объектом в виде трех последовательно соединенных апериодических звеньев с одинаковыми постоянными времени определить диапазон изменения значения  $T_{II}$ , обеспечивающий устойчивость системы.

2. Для системы регулирования с П-регулятором и объектом в виде трех последовательно соединенных апериодических звеньев с одинаковыми постоянными времени определить диапазон изменения значения  $K_{II}$ , обеспечивающий устойчивость системы.

В одноконтурной системе регулирования с ПИ-регулятором был устранен люфт в сочленении исполнительного механизма (ИМ) с регулирующим органом достигавший 20% по указателю положения (скорость перемещения регулирующего органа исполнительным механизмом  $S = 2,5\%/с$ ). Передаточная функция объекта, определенная до ремонта АСР, имела вид

$$W(p) = \frac{2,5 \cdot e^{-8p}}{(15 \cdot p + 1)^3}.$$

Как изменится вид переходного процесса на выходе системы, если до ремонта степень затухания процесса была равна  $\psi = 0,9$  ?

3. Как изменятся вид переходных процессов на выходе одноконтурной АСР с ПИ-регулятором при изменении значений параметров настройки регулятора?

## ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

### *Одноконтурная автоматическая система регулирования с ПИД регулятором*

#### Цель лабораторного занятия

Целью лабораторного занятия является исследование одноконтурной автоматической системы регулирования с ПИД-регулятором при ступенчатом и случайных возмущениях с использованием программы моделирования динамических систем "20-sim".

#### Задание на работу

При подготовке к лабораторному занятию необходимо разработать структурную схему модели системы регулирования, определить значения вводимых коэффициентов модели объекта (в соответствии с заданием на моделирование динамики систем регулирования, приведенном в Приложении) и формирующего фильтра случайного возмущения, рассчитать оптимальные значения параметров настройки регулятора.

На занятии провести моделирование одноконтурной системы с ПИД регулятором при случайном входном воздействии и сделать вывод об эффективности регулятора при различных частотных свойствах случайных возмущений. Исследовать поведение системы регулирования при различных способах задания модели регулятора.

#### Методические указания

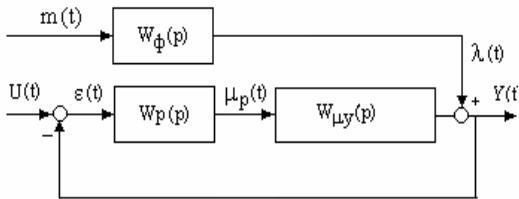
##### 1. Моделирование регулятора

Моделирование одноконтурной автоматической системы с типовыми законами регулирования обычно не вызывает затруднений. Структурная схема одноконтурной АСР, используемая на занятии, приведена на рис. 4.1.

Известно, что передаточная функция идеального ПИД-регулятора имеет вид

$$W_p(p) = k_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_{иp}} + T_{дp} \right). \quad (4.1)$$

В пакете "20-sim" ПИД закон регулирования можно моделировать двумя способами:



**Рис. 4.1. Структурная схема одноконтурной АСР с формирующим фильтром случайного входного воздействия**

$\lambda(t)$ ,  $\mu_p(t)$ ,  $U(t)$  – возмущающее, регулирующее и задающее воздействия;

$Y(t)$ ,  $\varepsilon(t)$  – регулируемая величина и рассогласование;

$W_{\lambda y}(p)$ ,  $W_{\mu y}(p)$  – передаточные функции объекта относительно возмущающего и регулирующего воздействий;

$W_p(p)$ ,  $W_\phi(p)$ , – передаточная функция регулятора и формирующего фильтра случайного возмущения;

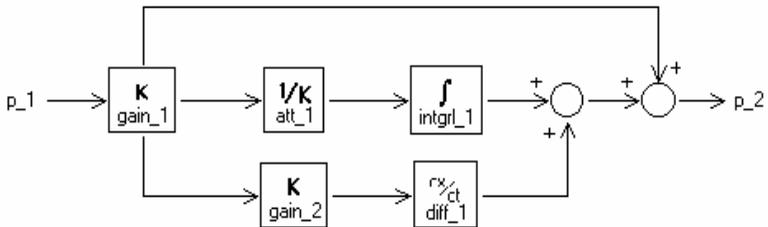
$m(t)$  – "белый" шум.

1. Как параллельное соединение пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего звеньев.

2. С использованием динамического блока ПИД.

*Первый способ* позволяет моделировать идеальный ПИД закон регулирования, оптимальные значения параметров настройки которого, рассчитываются известными методами по частотным характеристикам объекта.

Структурная схема модели такого регулятора приведена на рис. 4.2.



**Рис. 4.2. Структурная схема модели идеального ПИД – регулятора**

$p_1$  – блок РИО: вход регулятора (рассогласование);

$gain_1$  – блок для установки значения коэффициента передачи регулятора  $k_p$ ;

$att_1$  – блок для установки значения постоянной интегрирования регулятора  $T_i$ ;

$integr_1$  – блок интегрирования входного сигнала;

$gain_2$  – блок для установки значения постоянной дифференцирования регулятора  $T_d$ ;

$diff_1$  – блок формирования производной от входного сигнала;

$p_2$  – блок РИО: выход регулятора (перемещение регулирующего органа).

Второй способ моделирования ПИД-закона регулирования предполагает использование типового динамического блока "pidser1" из библиотеки **20-sim version 1.0** графического редактора. Этот блок реализует передаточную функцию регулятора в следующем виде:

$$W_p(p) = k_p \cdot \left( \frac{1}{T_{и}p} + \frac{1 + T_{д}p}{1 + beta \cdot T_{д}p} \right), \quad \text{где } 0 < beta < 1.$$

Нетрудно заметить, что приведенная передаточная функция регулятора отличается от идеального наличием фильтра в виде аperiodического звена с постоянной времени  $beta \cdot T_{д}$ , ограничивающего значения пропорциональной и дифференциальной составляющих при резких изменениях входной величины. Такой регулятор часто называют "реальным" и при моделировании значение параметра "beta" подбирается экспериментально.

Введение в закон регулирования фильтра в виде аperiodического звена фактически изменяет динамические характеристики объекта, что, естественно, влияет на качество процесса регулирования.

Значения  $beta$  равные 0,05÷0,2 дают выигрыш по сравнению с ПИ-регулятором, а при  $beta = 0$  и  $T_{д} \neq 0$ , блок **PID** не работает.

Если задать значения  $T_{д} = 0$  или  $beta = 1$ , то блок **PID** будет моделировать обычный ПИ-закон регулирования. а при условии  $T_{и} \gg 1$  – ПД закон регулирования.

## 2. Расчет настройки ПИД-регулятора

Значения параметров настройки ПИД-регулятора, близкие к оптимальным, можно получить по передаточной функции объекта регулирования из условия равенства интегральной и дифференциальной составляющих ПИД закона регулирования [ 1 ]:

$$\alpha \cdot T_{и} \cdot \omega = \frac{1}{T_{и} \cdot \omega}, \quad \text{где } \alpha = \frac{T_{д}}{T_{и}} \quad (4.2)$$

Последовательность расчета значений  $k_p$ ,  $T_{и}$ ,  $T_{д}$ , удовлетворяющих условию (4.2) приводится ниже:

1. По фазочастотной характеристике объекта определяем частоту  $\omega$ , при которой комплексная частотная характеристика объекта пересекает луч, проведенный из начала координат к отрицательной действительной полуоси под углом

$$\gamma = \arcsin(1/M),$$

где  $M$  – заданное значение показателя колебательности (рис. 4.3).

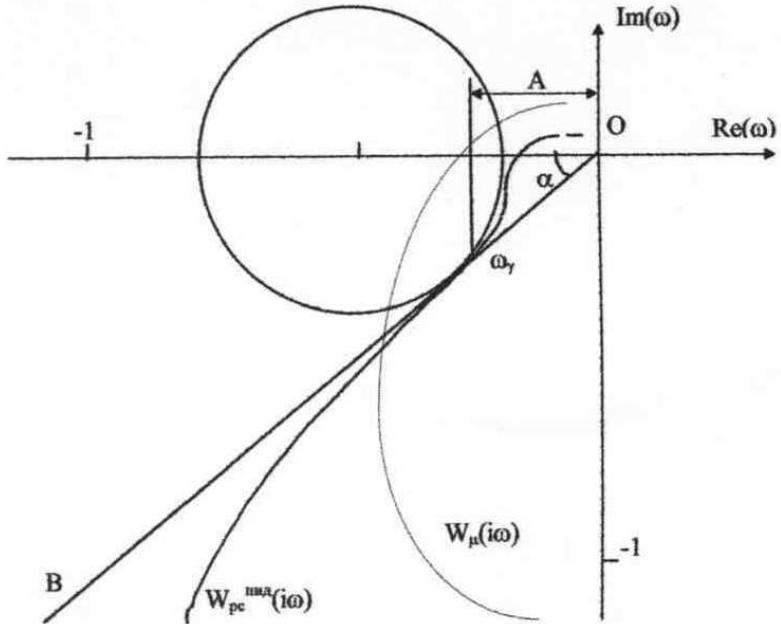


Рис. 4.3. Определение параметров настройки ПИД-регулятора по КЧХ объекта

Решив уравнение

$$\varphi_{\mu}(\omega) = -\pi + \arcsin\left(\frac{1}{M}\right),$$

определим частоту  $\omega_{\gamma}$  (При  $M = 1.55$   $\varphi_{\mu}(\omega_{\gamma}) \approx 2.439$  рад).

2. Формула для определения оптимального значения  $T_{и}$  имеет следующий вид:

$$T_{и}^{\text{опт}} = \frac{2}{\omega_{\gamma}^2 \cdot \varphi'_{\mu}(\omega_{\gamma})} \quad (4.3)$$

где  $\varphi'_{\mu}(\omega_{\gamma})$  – значение производной от фазочастотной характеристики объекта на частоте  $\omega_{\gamma}$ .

Напомним, что если передаточная функция объекта задана выражением

$$W_{\mu}(p) = \frac{K \cdot e^{-p\tau}}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1) \cdot (T_3 p + 1)},$$

то ее фазочастотная характеристика определяется формулой

$$\varphi_{\mu}(\omega) = -\omega\tau - \arctg(T_1\omega) - \arctg(T_2\omega) - \arctg(T_3\omega),$$

а производная от фазочастотной характеристики соотношением

$$\varphi'_{\mu}(\omega) = -\tau - \left[ \frac{T_1}{1 + (T_1\omega)^2} \right] - \left[ \frac{T_2}{1 + (T_2\omega)^2} \right] - \left[ \frac{T_3}{1 + (T_3\omega)^2} \right].$$

Подставив в последнее выражение значение частоты  $\omega_{\gamma}$ , получим значение  $\varphi'_{\mu}(\omega_{\gamma})$ , модуль которого подставляется в (4.3).

3. Из условия (4.2) определяем значение  $\alpha^{\text{опт}}$  и  $T_{\text{д}}^{\text{опт}}$

$$\alpha^{\text{опт}} = \frac{1}{(\omega_{\gamma} \cdot T_{\text{и}}^{\text{опт}})^2}; \quad T_{\text{д}}^{\text{опт}} = \alpha^{\text{опт}} \cdot T_{\text{и}}^{\text{опт}} \quad (4.4)$$

3. Определяем оптимальное значение коэффициента передачи регулятора  $K_p$ . Так как при выполнении условия (4.2) комплексная частотная характеристика разомкнутой системы касается в точке  $\omega_{\gamma}$  луча ОВ и окружности заданного значения  $M_{\text{доп}}$ , а перпендикуляр из точки касания к отрицательной части действительной оси пересекает ее в точке  $(-1, 0)$ , то значение  $K_p^{\text{опт}}$  можно определить по формуле

$$K_p^{\text{опт}} = \frac{1}{A_{\text{р.с.}}(\omega_{\gamma}) \cdot \cos \gamma} = \frac{M}{A_{\mu}(\omega_{\gamma}) \cdot \sqrt{(M^2 - 1)}}. \quad (4.5)$$

Таким образом, зная выражение для передаточной функции объекта, по формулам (4.3), (4.4), (4.5) нетрудно определить значения параметров настройки ПИД-регулятора, обеспечивающие заданный запас устойчивости и удовлетворяющие условию (4.2).

### 3. Моделирование случайных возмущений

Случайные возмущения в ПЭВМ формируются обычно с использованием функции **randomize()** в различной интерпретации ее имени. В

программе "20-sim" для моделирования таких возмущений используется блок **randgen1** из библиотеки **Signal Source & Sink**, который генерирует случайную последовательность чисел с равномерным законом распределения вероятности в интервале ( - ampl, + ampl). Эта последовательность близка к "белому шуму" и для получения случайного сигнала с заданными свойствами ее необходимо пропустить через фильтр, который и формирует эти свойства.

Для моделирования случайных помех, приведенных к выходу объекта можно использовать формирующий фильтр, состоящий из трех соединенных последовательно аperiodических звеньев. Передаточная функция формирующего фильтра в этом случае имеет вид

$$W_{\Phi}(p) = \frac{K_v}{(T_v p + 1)^3}.$$

Спектральная плотность  $S_v(\omega)$  и дисперсия  $D_v$  случайного сигнала  $v(t)$  на выходе формирующего фильтра определяется через квадрат модуля комплексной частотной характеристики фильтра известными выражениями:

$$S_v(\omega) = |W_{\Phi}(j\omega)|^2 \cdot a; \quad D_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_v(\omega) d\omega, \quad (4.6)$$

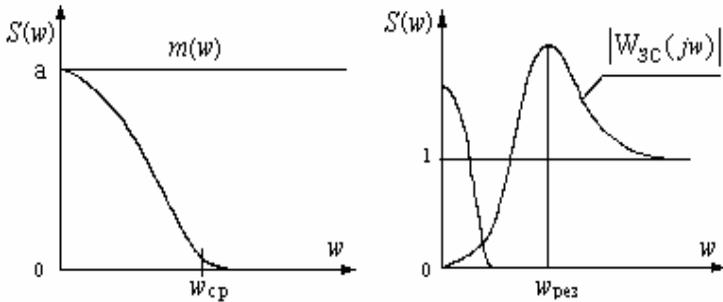
где  $W_{\Phi}(j\omega)$  – комплексная частотная характеристика формирующего фильтра;

$a$  – спектральная плотность "белого шума".

Эти же выражения позволяют определить спектральную плотность  $S_y(\omega)$  и дисперсию  $D_y$  случайного сигнала  $y(t)$  на выходе системы регулирования. Графики, поясняющие формирование случайных возмущений заданной спектральной плотности из "белого шума", приведены на рис. 4.3.

Одна из гипотез, принимаемая при динамической настройке регуляторов, состоит в предположении о низкочастотном характере случайных возмущений, действующих на объект управления.

Другими словами частота "среза"  $\omega_{cp}$  спектральной плотности случайных возмущений должна быть значительно меньше резонансной частоты автоматической системы регулирования, чтобы выполнялась гипотеза о низкочастотности случайных возмущений.



**Рис. 4.3. Спектральная плотность случайных возмущений, формируемых из "белого" шума**

В работе необходимо оценить эффективность системы регулирования при двух значениях постоянной времени формирующего фильтра, найденных из условий:

$$\omega_{cp} = \omega_{arez}; \quad (4.7)$$

$$\omega_{cp} = 0,2 \omega_{arez}. \quad (4.8)$$

Значения постоянной времени формирующего фильтра находятся решением уравнения  $S(\omega_{cp}) = 0.01 \cdot S(0)$ , при  $K_v = 1$ .

$$0.01 = \frac{1}{[1 + (T_v \cdot \omega_{cp})^2]^3};$$

откуда нетрудно получить  $T_v \approx \frac{1,9}{\omega_{cp}}$ .

Оценку дисперсии случайного процесса можно определить из графика изменения случайной величины (реализации случайного процесса) по формуле:

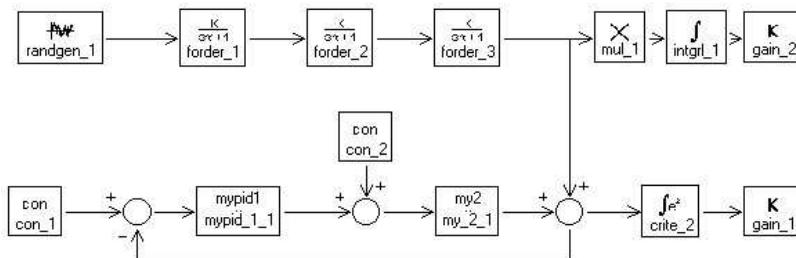
$$D_x = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt, \quad (4.9)$$

где  $T$  – длительность реализации случайного процесса  $x(t)$ .

Добавив в модель системы регулирования блоки вычисления оценки дисперсии в соответствии с приведенным выражением, нетрудно полу-

читать искомые оценки и сделать вывод об эффективности автоматической системы регулирования. Отношение оценок дисперсии случайного процесса на входе системы и на ее выходе может служить количественным показателем эффективности.

Структурная схема модели исследования эффективности регулятора при наличии случайных возмущений приведена на рис. 4.4.



**Рис. 4.4. Структурная схема модели исследования эффективности регулятора при наличии случайных возмущений**

Блок `mypid1` реализует модель идеального ПИД регулятора (см. рис. 4.2), а блок `my2` – модель объекта регулирования. Оба блока представлены подмоделями.

В блоке умножения `mul` выходная величина формирующего фильтра для возведения ее в квадрат в соответствии с (4.9) умножается сама на себя. Поэтому блок `foder_3` необходимо соединить с блоком `mul_1` два раза. Коэффициенты  $1/T$  перед интегралами не поставлены, так как при определении эффективности АСР (отношение дисперсий) они сокращаются.

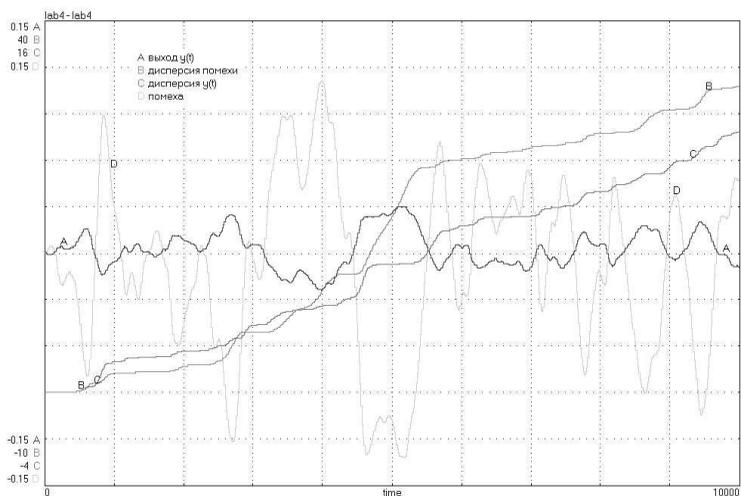
Результаты моделирования одноконтурной системы с ПИД-регулятором для частотных свойств помехи, определенных из условия (4.7), приведены на рис. 4.5.

## Порядок выполнения работы

### Задание 1. Моделирование динамики одноконтурной системы регулирования

1.1. Разработать структурную схему модели системы регулирования, определить значения вводимых коэффициентов модели объекта (в соответствии с заданием на моделирование динамики систем регулирования, приведенном в Приложении) и формирующего фильтра случайного

возмущения, рассчитать оптимальные значения параметров настройки ПИ и ПИД-регуляторов.



**Рис. 4.5.** Результаты моделирования одноконтурной системы с ПИД-регулятором для частотных свойств случайных возмущений, определенных из условия (4.7)

1.2. Набрать в графическом редакторе "20-sim" подмодели объекта и "идеального" регулятора и сохранить их в библиотеке **My Project** (см. описание лабораторной работы № 3).

1.3. Набрать в графическом редакторе подготовленную структуру модели одноконтурной АСР с "идеальным" ПИД-регулятором в соответствии со схемой приведенной на рис. 4.4 и вызвать окно моделирования.

1.4. Подготовить эксперимент, задав значения коэффициентов модели, начальные условия, параметры моделирования и список графиков, выводимых на экран. Установить рассчитанные по модели объекта оптимальные значения параметров настройки ПИД-регулятора. На экран вывести графики:

- А – входного ступенчатого возмущения;
- В – выходной величины регулятора  $\mu_p(t)$ ;
- С – выходной величины объекта  $Y(t)$ .

1.5. Провести процесс моделирования при ступенчатом воздействии по заданию регулятору и со стороны регулирующего воздействия. Сохранить полученную модель системы и параметры эксперимента.

1.6. Добавить к модели АСР блок формирования модульного интегрального показателя качества процесса регулирования (блок **Cretne1** из библиотеки **Controller**) и с помощью процедуры поиска минимального значения критерия (**Multiple Run → Optimization**) определить параметры настройки регулятора без ограничения на запас устойчивости системы. Сравнить полученные результаты с результатами, полученными в п.1.3 и сделать выводы.

1.7. Повторить пункт 1.3 для оптимальных значений параметров настройки ПИ-регулятора. Графики переходных процессов совместить с графиками, полученными в п. 1.1. Сравнить полученные переходные процессы в системе с ПИ и ПИД регуляторами и сделать выводы.

В **отчете** по этому заданию представить модель системы с ПИД-регулятором, графики процессов регулирования  $\mu(t)$  и  $Y(t)$  в системе с ПИ и ПИД регуляторами (все графики на одном рисунке), рисунки подписать. Сделать вывод об эффективности регуляторов при ступенчатом возмущении.

### \* Задание 2. Исследование влияния способа реализации ПИД алгоритма регулирования на вид переходного процесса

2.1. Изменить структуру модели системы регулирования, используя в качестве регулятора типовой блок **"pidser1"** из библиотеки **20-sim version 1.0**.

2.2. Провести процесс моделирования работы системы при ступенчатом возмущении на вход объекта и значениях параметра **"beta"** блока **"pidser1"** равных 0,1 и 0,3.

В отчете по этому заданию представить передаточные функции различных вариантов реализации ПИД-регулятора, графики процессов регулирования  $\mu(t)$  и  $Y(t)$  (все графики на одном рисунке), рисунки подписать. Сделать вывод о влиянии способа реализации алгоритма регулирования и величины параметра **"beta"** блока **"pidser1"** на вид переходного процесса.

### Задание 3. Исследование одноконтурной АСР с ПИД - регулятором при случайных возмущениях

3.1. Добавить в модель одноконтурной АСР с "идеальным" ПИД-регулятором блоки формирования случайного сигнала и вычисления оценок дисперсии случайного процесса на входе и выходе системы.

3.2. Подготовить эксперимент, задав значения коэффициентов модели, начальные условия, параметры моделирования и список графиков, выводимых на экран. Установить значения:

- постоянной времени формирующего фильтра, рассчитанное при подготовке к занятию из условия  $\omega_{\text{ср}} = 0,2 \omega_{\text{рез}}$ ;
- общего коэффициента передачи  $K_v = 10$ ;
- спектральной плотности "белого" шума  $a = 1$ .
- оптимальные значения параметров настройки ПИД-регулятора.

Изменить продолжительность моделирования до 5000 ... 10000 с. На экран вывести графики:

- A – входного случайного возмущения  $\lambda(t)$ ;
- B – выходной величины регулятора  $\mu_p(t)$ ;
- C – выходной величины объекта  $Y(t)$ .
- D, E – вычисления текущих оценок дисперсии случайного процесса на входе и выходе системы.

Сохранить полученную модель системы и параметры эксперимента.

3.3. Провести процесс моделирования работы системы с ПИД-регулятором при наличии случайных помех, приведенных к выходу объекта.

3.4. Провести исследование влияния величины постоянной времени формирующего фильтра на величину дисперсии регулируемой величины в системе с ПИД-регулятором для двух значений постоянных времени формирующего фильтра, рассчитанных из условий (4.7), (4.8).

**В отчете** по этому заданию представить распечатку модели системы с ПИД-регулятором, графики процессов регулирования  $\mu(t)$  и  $Y(t)$  (графики для каждого входного воздействия на одном рисунке), рисунки подписать. Рассчитать значения дисперсии случайного сигнала на входе и выходе системы регулирования по формуле (4.6.). Сравнить полученные результаты. Сделать вывод об эффективности регулятора при наличии случайных возмущений по отношению оценок дисперсии случайного процесса на входе и выходе системы.

## Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Нарисовать примерный вид КЧХ по каналу возмущения (приведенного к выходу объекта)  $\lambda \rightarrow Y$  для одноконтурной системы регулирования с ПИ-регулятором и объектом в виде трех последовательно соединенных апериодических звеньев.

2. Теоретическое и экспериментальное определение дисперсии случайного сигнала на выходе АСР.

3. Определение значений параметров настройки ПИ-регулятора по его кривой разгона.

4. Нарисовать примерный вид переходных процессов на выходе одноконтурной системы регулирования с типовыми законами регулирования для одного и того же объекта.

## ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

### *Комбинированная автоматическая система регулирования*

#### **Цель лабораторного занятия**

Целью лабораторного занятия является моделирование комбинированной системы регулирования с оптимизацией значений параметров командного блока и устройства ввода возмущений по минимуму интегрального критерия с использованием программы моделирования динамических систем "20-sim".

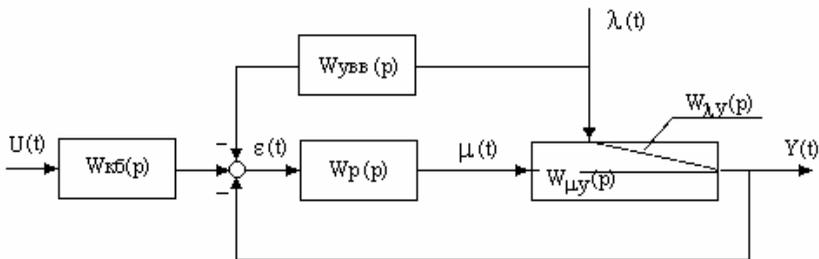
#### **Задание на работу**

Подготовить структурную схему модели комбинированной АСР с объектом (в соответствии с заданием на моделирование динамики систем регулирования, приведенном в Приложении) и ПИ-регулятором, командным блоком в виде интегродифференцирующего звена и устройством ввода возмущения в виде реального дифференцирующего звена. Провести моделирование и, используя режим поиска, определить значения параметров настройки устройства компенсации и командного блока из условия минимума интеграла от модуля ошибки регулирования.

#### **Методические указания**

Известно, что комбинированная АСР реализует принципы регулирования по отклонению и возмущению. При этом оптимальные значения параметров динамической настройки регулятора рассчитываются из условия заданного запаса устойчивости и требуемого качества процесса регулирования, а значения параметров командного блока и устройства ввода возмущения - из условия минимума ошибки регулирования, возникающей при изменении задания или внешнего контролируемого возмущения.

Структурная схема комбинированной АСР, используемая на занятии, приведена на рис 5.1.



**Рис. 5.1. Структурная схема комбинированной АСР**

$\lambda(t)$  – контролируемое (измеряемое) возмущение;

$U(t)$ ,  $\mu(t)$  – задающее и регулирующее воздействия;

$Y(t)$  – регулируемая величина;

$W_{\lambda\gamma}(p)$ ,  $W_{\mu\gamma}(p)$  – передаточные функции объекта относительно возмущающего и регулирующего воздействий;

$W_p(p)$ ,  $W_{увв}(p)$ ,  $W_{кб}(p)$  – передаточные функции регулятора, устройства ввода возмущения и командного блока.

## 1. Определение структуры устройства ввода возмущения

Из условия инвариантности системы к контролируемому возмущению

$$Y(t) \equiv 0 \Big|_{\lambda(t) \neq 0} \quad (5.1)$$

нетрудно получить передаточную функцию идеального устройства ввода возмущения  $W_{увв}(p)$  для рассматриваемой системы

$$W_{увв}^{ид}(p) = \frac{W_{\lambda\gamma}(p)}{W_{\mu\gamma}(p) \cdot W_p(p)}. \quad (5.2)$$

Построив комплексную частотную характеристику идеального устройства ввода возмущения, можно определить какими элементарными динамическими звеньями или их соединением оно может быть реализовано. То есть, по виду КЧХ идеального устройства ввода возмущения выбирается структура реального (физически реализуемого) устройства ввода возмущения. Для одноконтурной системы с ПИ-регулятором устройство ввода возмущения часто может быть реализовано в виде типового реального дифференцирующего звена.

В программе "20-sim" реальное дифференцирующее звено можно реализовать с помощью параллельного соединения пропорционального и аperiodического звеньев.

Структурная схема модели реально-дифференцирующего звена и графики, иллюстрирующие формирование его переходной характеристики приведена на рис. 5.2.

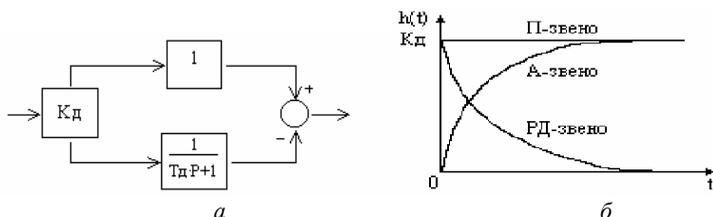


Рис. 5.2. Моделирование реально-дифференцирующего звена  
 а – структурная схема, б – переходные характеристики

## 2. Определение структуры командного блока

Командный блок предназначен для оптимального управления системой регулирования при изменении задания регулятору. Передаточная функция идеального командного блока, также определяемая из условия инвариантности системы к изменению задания, должна удовлетворять условию [1]:

$$W_{кб}^{ид}(p) = 1 + \frac{1}{W_p(p) \cdot W_{\mu}(p)}. \quad (5.3)$$

Передаточная функция идеального командного блока  $W_{кб}^{ид}(p)$ , как правило, не может быть реализована, особенно, если в управляющем канале объекта имеется запаздывание.

Передаточная функция реального (физически реализуемого) командного блока  $W_{кб}^p(p)$  принимается в виде интегродифференцирующего звена

$$W_{кб}^p(p) = 1 + K_{кб} \cdot \frac{p \cdot (T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)}. \quad (5.4)$$

В программе "20-sim" интегродифференцирующее звено можно взять из библиотеки **Controller** (блок **Leadlag1**). Тогда структурная схема подмодели реального командного блока будет иметь вид, показанный на рис 5.3.

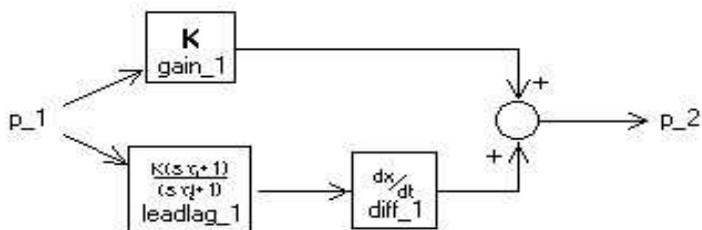


Рис. 5.3. Структурная схема подмодели реального командного блока ( $K = 1$ )

### 3. Критерий оптимальности

После выбора структурной схемы реальных устройств ввода возмущений необходимо определить значения коэффициентов этих устройств, наилучшим образом обеспечивающих выполнение условий инвариантности системы к контролируемым возмущениям.

Одним из возможных критериев оптимальности значений параметров устройства ввода возмущений является линейный модульный интегральный показатель  $J = \int_0^T |\varepsilon(t)| dt$ , который характеризует площадь

под кривой модуля процесса регулирования. Очевидно, что чем меньше площадь под кривой переходного процесса при воздействии по каналу внешнего контролируемого возмущения, тем эффективнее устройство компенсации.

Интегрируемая величина в критерии оптимальности должна стремиться к нулю при бесконечном увеличении времени. Необходимо убедиться, что это условие выполняется. Такой величиной при воздействии на АСР по любому каналу является рассогласование на входе в регулятор  $\varepsilon(t)$ . Интеграл от модуля рассогласования и целесообразно выбирать в качестве показателя оптимальности.

Определить оптимальные значения параметров устройства ввода возмущения ( $K_d$ ,  $T_d$ ) в программе "20-sim" можно с помощью процедуры поиска минимального значения критерия. Для решения этой задачи необходимо добавить в структурную схему комбинированной АСР блок формирования модульного интегрального показателя качества процесса регулирования (блок **Cretne1** из библиотеки **Controller**) и запустить процедуру оптимизации (**Multiple Run** → **Optimization**).



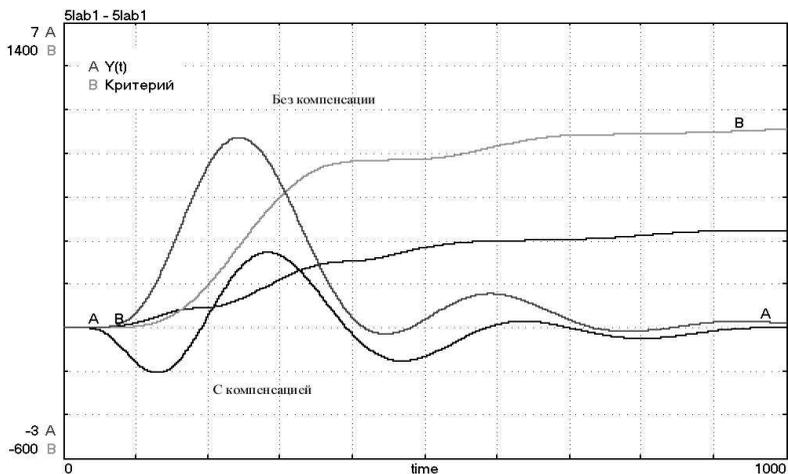


Рис. 5.5. Переходные процессы на выходе комбинированной АСР с ПИ-регулятором при воздействии по каналу контролируемого возмущения без устройства ввода возмущения и с устройством ввода возмущения при оптимальных значениях параметров настройки

Примерный вид переходных процессов на выходе комбинированной АСР с ПИ-регулятором с командным блоком и без него при ступенчатом воздействии по каналу задания регулятора показан на рис. 5.6.

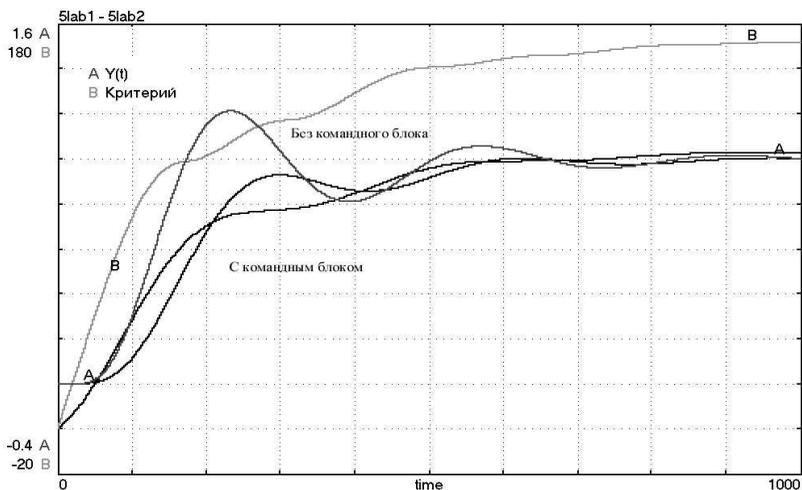


Рис. 5.6. Переходные процессы на выходе комбинированной АСР с ПИ-регулятором при воздействии по каналу задания без командного блока и с командным блоком при оптимальных значениях параметров настройки

## Порядок выполнения работы

### Задание 1. Моделирование комбинированной АСР

1.1. Подготовить подмодели для моделирования комбинированной АСР, реализующие:

-  $W_{\lambda y}(p)$ ,  $W_{\mu y}(p)$  – передаточные функции объекта относительно возмущающего и регулирующего воздействий;

-  $W_{увв}(p)$ ,  $W_{кб}(p)$  – передаточные функции устройства ввода возмущения и командного блока.

Передаточные функции объекта выбираются в соответствии с заданием на моделирование динамики систем регулирования, приведенном в Приложении.

Рассчитать оптимальные значения параметров настройки ПИ-регулятора и оценить длительность процесса регулирования.

Подготовить структурную схему для моделирования комбинированной АСР с ПИ-регулятором.

1.2. Набрать в графическом редакторе "20-sim" подмодели объекта, устройства ввода возмущения и командного блока и сохранить их в библиотеке **My Project** (см. описание лабораторной работы № 3).

1.3. Набрать в графическом редакторе подготовленную структурную схему для моделирования комбинированной АСР с ПИ-регулятором в соответствии со схемой приведенной на рис. 5.4 и вызвать окно моделирования.

1.4. Подготовить эксперимент, задав необходимые значения коэффициентов модели (для РД и ИД-звеньев начальные значения принять равными  $K_d = K = 1$ ,  $T_d = T_1 = T_2 = T_{об}$ ), нулевые начальные условия, параметры моделирования и список графиков, выводимых на экран. Установить рассчитанные по модели объекта оптимальные значения параметров настройки ПИ-регулятора. На экран вывести графики:

А – выход объекта регулирования,

В – рассогласование на входе в регулятор  $\epsilon(t)$ ,

С – текущее значение критерия оптимальности.

1.5. Провести процесс моделирования работы системы без командного блока и устройства ввода возмущения, задавая равными нулю соответствующие коэффициенты блоков gain. Определить переходные процессы на выходе АСР при ступенчатом воздействии по заданию и по возмущающему каналу.

1.6. С помощью блока CON\_2 сформировать входное воздействие по каналу контролируемого возмущения  $\lambda(t)$ . Установить начальные значения параметров устройства ввода возмущения и запустить процесс поиска оптимальных значений его параметров. Получить переходный процесс для регулируемой величины при ступенчатом воздействии по каналу действия возмущения  $\lambda(t)$  при найденных оптимальных значениях устройства ввода возмущений.

В **отчете** по первому пункту задания привести условие инвариантности выходной величины  $Y(t)$  к возмущению  $\lambda(t)$ , передаточные функции идеального устройства ввода возмущений, реального устройства ввода возмущений с найденными значениями параметров, переходные процессы в системе с устройством ввода возмущения и без него и значения критерия оптимальности. Сделать вывод об эффективности устройства ввода возмущения.

## **Задание 2. Исследование эффективности командного блока**

2.1. С помощью блока CON\_1 сформировать входное воздействие по каналу задания. Установить начальные значения параметров командного блока и запустить процесс поиска его оптимальных значений по минимуму интеграла от модуля рассогласования на входе в регулятор.

2.2. Получить переходный процесс для регулируемой величины при возмущении по заданию при найденных оптимальных значениях параметров командного блока.

В **отчете** по второму пункту задания приводятся передаточные функции идеального командного блока, реального командного блока с найденными значениями параметров, переходные процессы на выходе АСР при изменении задающего воздействия с командным блоком и без него, значения критерия оптимальности. Сделать вывод об эффективности командного блока.

## Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Нарисовать примерный вид переходного процесса на выходе системы регулирования с П-регулятором при ступенчатом воздействии по каналу регулирования ( $\mu$ ). Определить начальное и установившееся значения переходного процесса, если  $K_n = 2$  и  $W(p) = \frac{2,5 \cdot e^{-8p}}{(15 \cdot p + 1)^3}$ .

2. Нарисовать примерный вид переходного процесса на выходе системы регулирования с ПИ-регулятором при воздействии по каналу задания. Определить начальное и установившееся значения переходного процесса, если  $K_n = 2$ ,  $T_n = 15$  с и  $W(p) = \frac{1,5 \cdot e^{-8p}}{(25 \cdot p + 1)^3}$ .

3. Определение структуры и значений коэффициентов реального устройства ввода возмущений в одноконтурной системы регулирования с компенсацией внешнего контролируемого возмущения.

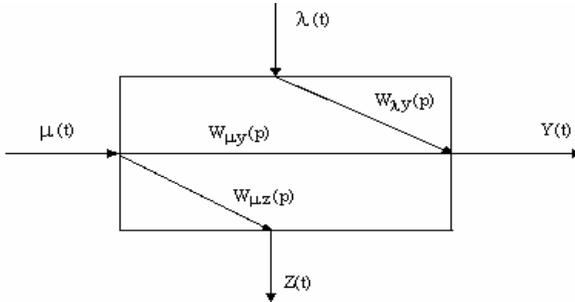
4. Пояснить назначение и структуру командного блока одноконтурной системы регулирования.

## Библиографический список

1. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: Учебник для вузов. – М: Энергоатомиздат. 1985.– 296 с.
2. **Стефани Е.П.** Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М: Энергия. 1972. – 376 с.

Задание на лабораторно-практические занятия  
по дисциплине "Системы автоматизации и управления"

Структурная схема объекта, используемая при моделировании систем управления на занятиях имеет следующий вид.



$$W_{\mu y}(p) = \frac{K_{\mu} e^{-p\tau_{\mu}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)^3}, \quad \begin{array}{l} \% \text{ УС} \\ \% \text{ УП} \end{array};$$

$$\tau_{\mu} = 10 + 0,1 \cdot N; \quad K_{\mu} = 1 + 0,2 \cdot N.$$

$$W_{\mu z}(p) = \frac{K_z e^{-p\tau_z}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad \begin{array}{l} \% \text{ УС} \\ \% \text{ УП} \end{array};$$

$$\tau_z = 3 + 0,1 \cdot N; \quad K_z = 2 + 0,1 \cdot N.$$

$$W_{\mu \lambda}(p) = \frac{K_{\lambda} e^{-p\tau_{\lambda}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)^3 (T_4 p + 1)^2}, \quad \begin{array}{l} \% \text{ УС} \\ \% \text{ УП} \end{array};$$

$$\tau_{\lambda} = 15 + 0,1 \cdot N; \quad K_{\lambda} = 3 + 0,2 \cdot N; \quad T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = 5 + N.$$

$N$  – порядковый номер студента в группе.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
<i>Лабораторное занятие № 1. Динамические характеристики объектов управления .....</i>	<i>7</i>
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы .....	18
<i>Лабораторное занятие № 2. Аппроксимация переходных характеристик объектов управления .....</i>	<i>19</i>
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы .....	34
<i>Лабораторное занятие № 3. Одноконтурная автоматическая система регулирования с идеальным ПИ-регулятором и нелинейностями ...</i>	<i>35</i>
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы .....	43
<i>Лабораторное занятие № 4. Одноконтурная автоматическая система регулирования с ПИД регулятором .....</i>	<i>44</i>
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы .....	55
<i>Лабораторное занятие № 5. Комбинированная автоматическая система регулирования .....</i>	<i>56</i>
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы .....	64
Библиографический список .....	64
Приложение .....	65

*Учебное издание*

**Зверьков Владимир Петрович  
Павлов Сергей Павлович**  
***Моделирование динамических систем на ПЭВМ  
с использованием программы "20 - sim"***

Часть 1.

Одноконтурные системы

Лабораторный практикум  
по курсу  
"Системы автоматизации и управления"  
для студентов, обучающихся по специальности 21.02  
"Автоматизация технологических процессов и производств"

Редактор издательства О.М. Горина  
ЛР № 020528 от 05.06.97

---

Темплан издания МЭИ

Подписано к печати 10.04.03 Печать офсетная

Формат 60×84/16 Физ. печ. л. 4,25

Тираж 300 экз. Изд. № 118 Заказ Цена 13 руб.

---

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14  
Отпечатано в типографии ЦНИИ «Электроника»,  
117415, Москва, просп. Вернадского, д. 39