

УДК
621.398
М 744

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА
ПЭВМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ «20 – SIM»**

Часть 2

СИСТЕМЫ ПОВЫШЕННОЙ СЛОЖНОСТИ

Лабораторный практикум

Учебное пособие

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА
ПЭВМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ «20 – SIM»**

Часть 2

СИСТЕМЫ ПОВЫШЕННОЙ СЛОЖНОСТИ

Лабораторный практикум

Учебное пособие
по курсу

«Системы автоматизации и управления»
для студентов, обучающихся по специальности
«Автоматизация технологических процессов и производств»

УДК
621.398
М 744

Утверждено учебным управлением МЭИ(ТУ) в качестве учебного пособия для студентов

Подготовлено на кафедре автоматизированных систем управления тепловыми процессами.

Рецензенты:

докт. техн. наук, профессор Г.П. Плетнев,
начальник лаборатории устойчивости и регулирования РНЦ «Курчатовский институт»,
канд. техн. наук. П.А. Леппик

В.П. Зверьков, В.Ф. Кузицин, С.П. Павлов, Ю.Н. Петроченко

Моделирование динамических систем на ПЭВМ с использованием программы «20-sim». Ч.2. Системы повышенной сложности: Учеб. пособие - Лабораторный практикум – М.: Изд. МЭИ, 2007.– 104 с.

ISBN 5

В первой части практикума было приведено краткое описание возможностей программы моделирования динамических систем «20-sim» и правила использования основных блоков и команд при решении задач исследования одноконтурных систем автоматического регулирования. Вторая часть лабораторного практикума предназначена для выполнения работ, содержащих оптимизацию настройки и анализ во временной области динамики автоматических систем регулирования повышенной сложности. Здесь рассматриваются задачи моделирования двухконтурных, двухсвязных систем, систем автоматического регулирования с нелинейными регуляторами и систем с переменной структурой при наличии детерминированных и случайных возмущений.

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

ISBN 5-7046-0929-5 © Московский энергетический институт (технический университет), 2007

ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие является второй частью лабораторного практикума [1] «Моделирование динамических систем на ПЭВМ с использованием программы «20-sim». В первой части пособия было приведено краткое описание возможностей программы и правила использования основных блоков и команд в задачах исследования во временной области одноконтурных систем автоматического регулирования. Вторая часть лабораторного практикума предназначена для выполнения работ, содержащих оптимизацию настройки и анализ динамики автоматических систем регулирования повышенной сложности: двухконтурных и двухсвязных систем, систем автоматического регулирования с нелинейными регуляторами и систем с переменной структурой при наличии детерминированных и случайных возмущений на основе программы моделирования динамических систем «20-sim».

Как известно, при решении задач создания системы управления технологическим процессом необходимо осуществлять параметрический синтез систем, анализ применимости тех или иных алгоритмов управления, исследование поведения систем 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.

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).

Программный комплекс работает под управлением операционной системы Windows. Саморазархивирующийся файл «20sim.exe» имеет объем 7,87 Мб и после его 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 демонстрации работы программы (20-sim Pro 2.3 demo), для запуска программы (20-sim Pro 2.3) и для обучения пользователей (Tutorial).

Файл **Tutorial**, предназначенный для обучения работе с программным комплексом, автоматически запускает видеоплеер и позволяет просмотреть видеоролики, объясняющие приемы моделирования динамических систем, в частности: задания структурных схем, ввода значений констант и параметров, исправлений, получение и оформления результатов для различных видов представления моделируемой системы (структуры типовых блоков из библиотеки программного комплекса; структуры, задаваемой в виде сигнального графа или 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». Структурная схема системы для моделирования на ПЭВМ получается с помощью последовательного, параллельного или встречно-параллельного соединения блоков, входящих в библиотеку пакета.

В библиотеки «20-sim» входят различные блоки: статические и динамические звенья, нелинейные, логические и дискретные блоки, источники сигналов, типовые регуляторы, интегральные критерии, блоки математических функций и др. Программа позволяет оптимизировать значения параметров элементов структурной схемы по заданному критерию, а также исследовать поведение системы при изменении какого-либо параметра в заданном диапазоне.

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 вы-

полняемые 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».

При моделировании динамической системы, состоящей из большого количества статических, динамических, нелинейных и других блоков в пакете «20-sim», целесообразно использовать подмодели (**Submodels**), чтобы модель всей системы целиком умещалась на экране. Для этого, после набора в графическом редакторе некоторой модели, 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 (входом) и за последним (выходом) 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**).

После набора и проверки структурной схемы модели решения задачи с точки зрения формальной логики построения схем, заложенной в программном комплексе «20-sim», осуществляемой в графическом редакторе командой **Process** → **Check & Save SIDOPS**, разрешается

доступ к моделирующей системе. При этом пункт меню графического редактора **Simulation** ("Моделирование") становится активным.

Используя пункт **Simulation** главного меню графического редактора, необходимо открыть окно Simulator и подготовить эксперимент: задать значения коэффициентов, начальных условий, параметров моделирования и оформить вывод информации на экран. Для одной модели системы можно задать и сохранить несколько вариантов эксперимента, что позволяет достаточно просто совмещать результаты моделирования различных вариантов.

Структурные схемы моделей и результаты моделирования можно экспортировать в MS Word и MathLab или сохранить в собственном проекте для дальнейших исследований.

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

В первой части пособия рассматривался круг задач, связанный с исследованием одноконтурных систем регулирования. Там же на примерах показаны основные приемы решения поставленных задач:

Режим множественного решения, позволяющий исследовать влияние конкретного параметра на вид переходных процессов на выходе системы (Лабораторно-практическое занятие № 1).

Поиск минимума выбранного показателя качества работы системы в области заданной пределами изменения значений параметров настройки регулятора (Лабораторно-практическое занятие № 2).

Использование подмоделей для наглядности представления сложных моделей отдельных частей моделируемой системы (Лабораторно-практическое занятие № 3).

Определение эффективности системы автоматического регулирования с типовыми законами при наличии детерминированных и случайных возмущений (Лабораторно-практическое занятие № 4).

Во второй части пособия рассматривается круг задач, связанный с исследованием типовых систем регулирования повышенной сложности, применяемых на тепловых и атомных электростанциях, таких как:

- двухконтурная система регулирования температуры острого пара с регулятором и дифференциатором;

- каскадная система регулирования экономичности котла с корректирующим и стабилизирующим регуляторами;
- трехимпульсная система регулирования уровня в барабане котла;
- реализация релейно-импульсного регулятора на основе сервомотора постоянной скорости;
- двухсвязная система регулирования мощности и температуры в промежуточной точке пароводяного тракта прямоточного котла;
- нелинейная система переменной структуры для регулирования давления в первом контуре энергоблока АЭС с водоводяным реактором.

Целью практикума является приобретение навыков работы с переносными системами, включающее в себя составление структурных схем моделирования, оптимизацию настройки и анализ динамики автоматических систем регулирования во временной области на основе программы моделирования динамических систем «20-sim».

Программный комплекс «20-sim» имеет большие возможности по моделированию динамических систем во временной области (неограниченное число линейных, нелинейных и других типовых блоков, используемых в модели, исследование поведения модели при различных входных сигналах и ограничениях, 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.

ДВУХКОНТУРНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ С РЕГУЛЯТОРОМ И ДИФФЕРЕНЦИАТОРОМ

Цель лабораторного занятия

Целью лабораторного занятия является моделирование двухконтурной системы регулирования с регулятором и дифференциатором, определение оптимальных настроек регулятора и дифференциатора, получение переходных процессов по основной и вспомогательной регулируемым величинам при воздействиях по различным каналам.

Задание на работу

Подготовить структурную схему модели двухконтурной АСР с ПИ-регулятором и дифференциатором, рассчитав необходимые значения параметров динамической настройки системы. Провести моделирование системы с ПИ-регулятором. Сделать вывод об эффективности двухконтурной системы регулирования.

Методические указания

1. Краткое описание АСР температуры перегретого пара на выходе из котла

Известно, что двухконтурные системы регулирования обеспечивают высокую эффективность в тех случаях, когда вспомогательные регулируемые величины систем быстрее, чем основные, реагирует на возмущения, идущие по каналам регулирующих воздействий. К таким системам относится система автоматического регулирования температуры перегретого пара на выходе из котла.

Основной регулируемой величиной в системе является температура перегретого пара $T_{п.п.}$, которая измеряется за поверхностью пароперегревателя с помощью термоэлектрического преобразователя. Непосредственно за впрыском размещается дополнительный термоэлек-

трический преобразователь, с помощью которого измеряется температура пара $T_{пр}$ после пароохладителя перед поверхностью второй ступени пароперегревателя.

Эта температура является вспомогательной регулируемой величиной, позволяющей при определенных условиях повысить качество регулирования, в частности значительно уменьшить влияние возмущений, идущих по каналу регулирующего воздействия. Для обеспечения равенства нулю дополнительного сигнала в статическом режиме ввод его в регулятор осуществляется через дифференциатор. На рис. 6.1. приведена функциональная схема регулирования температуры перегрева острого пара в барабанных котлах.

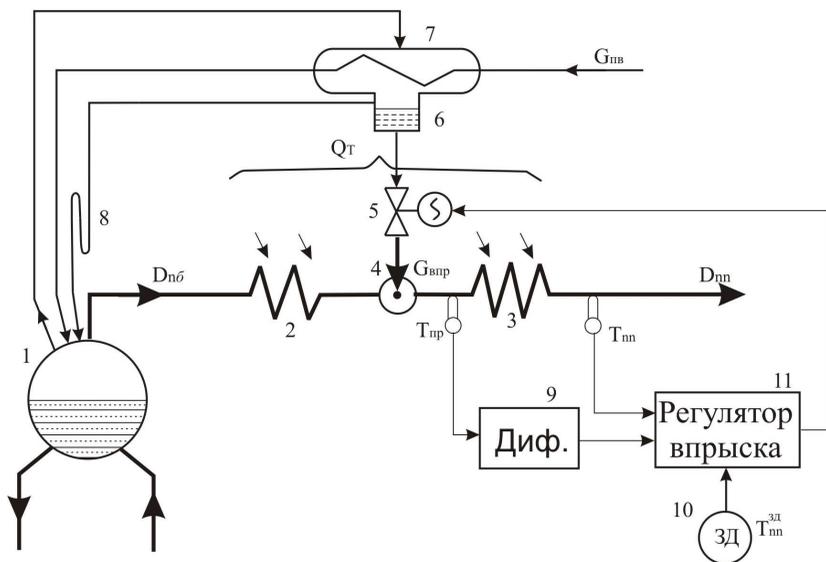


Рис. 6.1. Функциональная схема регулирования температуры перегрева острого пара

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 1 – барабан парогенератора; | 2, 3 – ступени пароперегревателя; |
| 4 – пароохладитель; | 5 – регулирующий клапан впрыска; |
| 6 – сборник конденсата; | 7 – конденсационная установка; |
| 8 – гидрозатвор; | 9 – дифференцирующий блок; |
| 10 – датчик; | 11 – регулятор. |

Регулирование температуры перегретого пара на прямоточных котлах осуществляется за счет впрыска в пароохладители питатель-

ной воды, отбираемой из трубопровода после питательного насоса перед регулирующими питательными клапанами (РПК).

На барабанных котлах в качестве регулирующего воздействия используется впрыск собственного конденсата, образующегося за счет конденсации насыщенного пара, поступающего из барабана в специальный теплообменник.

2. Структурная схема двухконтурной автоматической системы регулирования

Структурная схема двухконтурной автоматической системы регулирования с регулятором и дифференциатором приведена на рис. 6.2.

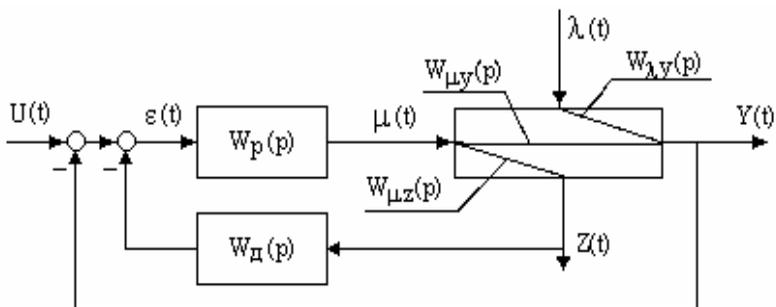


Рис. 6.2. Структурная схема двухконтурной АСР с регулятором и дифференциатором

$y(t), z(t)$ – основная и вспомогательная регулируемые величины;

$\lambda(t)$ – внешнее неконтролируемое возмущение;

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

$W_{\lambda y}(p)$, – передаточная функция объекта по каналу возмущающего воздействия;

$W_{\mu z}(p), W_{\mu y}(p)$ – передаточные функции объекта по вспомогательной и основной регулируемым величинам;

$W_p(p), W_d(p)$ – передаточные функции регулятора и дифференциатора.

Структурная схема моделирования двухконтурной АСР с использованием программы «20-sim» приведена на рис.6.3. Передаточные

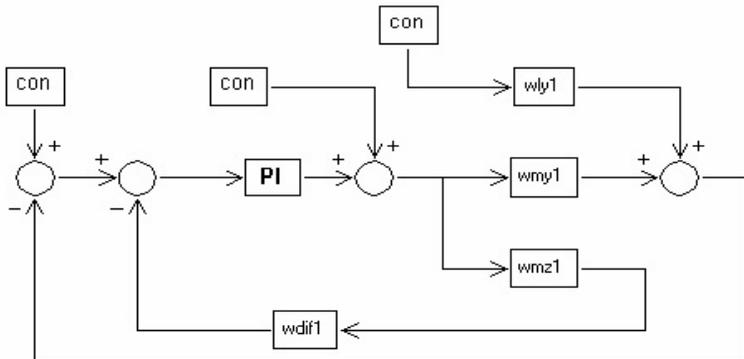


Рис. 6.3. Структурная схема модели двухконтурной АСР с регулятором и дифференциатором

функции объекта $W_{\lambda y}(p)$, $W_{\mu y}(p)$, $W_{\mu z}(p)$, а также передаточная функция дифференциатора $W_d(p)$ реализованы в виде подмоделей ($Wly1$, $Wmy1$, $Wmz1$ и $Wdif1$ соответственно). ПИ-закон регулирования моделируется динамическим блоком “PI” из библиотеки **Controller**.

3. Определение оптимальных значений параметров настройки регулятора и дифференциатора

Задача определения оптимальных значений параметров настройки двухконтурной системы регулирования достаточно сложна и может решаться различными способами в зависимости от инерционных свойств объекта по вспомогательной и основной регулируемым величинам.

В лабораторном занятии изучаются два наиболее распространенных метода динамической настройки:

1. Настройка системы с использованием гипотезы о частотной развязке контуров, если инерционность объекта по вспомогательной регулируемой величине значительно меньше инерционности объекта по основной регулируемой величине.

2. Настройка системы методом заполнения («компенсированная настройка»), если инерционность объекта по вспомогательной регу-

лируемой величине близка к инерционности объекта по основной регулируемой величине.

3.1 Динамическая настройка двухконтурной системы с использованием гипотезы о частотной развязке контуров

Динамическая настройка двухконтурной системы с использованием гипотезы о частотной развязке контуров предполагает разбиение исходной системы регулирования на две независимые одноконтурные системы, представляющие собой внешний и внутренний контуры:

Внешний контур, состоящий из эквивалентного регулятора с передаточной функцией

$$W_{\text{ЭП}}(p) = \frac{1}{W_D(p)} = \frac{1}{K_D} \cdot \frac{T_D \cdot P + 1}{T_D \cdot P} \quad (6.1)$$

и эквивалентного объекта с передаточной функцией $W_{\text{Э1}}(p)$

$$W_{\text{Э1}}(p) = \frac{W_{\mu y}(p)}{W_{\mu z}(p)}, \quad (6.2)$$

где $W_{\mu z}(p)$, $W_{\mu y}(p)$ – передаточные функции объекта по вспомогательной и основной регулируемым величинам, а $W_D(p)$ – передаточная функция дифференциатора.

Очевидно, что передаточная функция эквивалентного регулятора соответствует передаточной функции ПИ регулятора.

Внутренний контур, состоящий из ПИ-регулятора и эквивалентного объекта $W_{\text{Э2}}(p)$ с передаточной функцией

$$W_{\text{Э2}}(p) = W_{\mu z}(p) \cdot W_D(p) + W_{\mu y}(p). \quad (6.3)$$

Динамическая настройка двухконтурной автоматической системы регулирования с регулятором и дифференциатором осуществляется в два этапа.

1 этап. **Настройка дифференциатора** исходной системы определяется поиском оптимальных значений параметров настройки одно-

контурной АСР с ПИ-регулятором и эквивалентным объектом $W_{Э1}(p)$ с передаточной функцией (6.2).

В соответствии с заданием на моделирование (см. Приложение) передаточные функции объекта по вспомогательной $W_{\mu}(p)$ и основной $W_{\mu y}(p)$ регулируемым величинам представляют собой последовательное соединение соответственно двух и пяти аperiодических звеньев с одинаковыми значениями постоянных времени и звена транспортного запаздывания. Поэтому передаточная функция эквивалентного объекта $W_{Э1}(p)$ будет представлять собой последовательное соединение трех аperiодических звеньев и звена транспортного запаздывания.

Структурная схема моделирования одноконтурной системы для определения оптимальных значений параметров настройки ПИ-регулятора по минимуму модульного интегрального критерия для эквивалентного объекта $W_{Э1}(p)$ приведена на рис. 6.4, а результаты

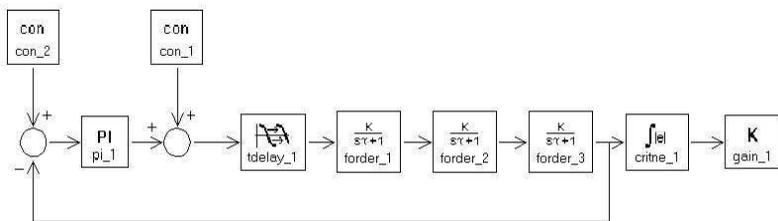


Рис. 6.4. Структурная схема моделирования для определения настроек ПИ-регулятора по эквивалентному объекту $W_{Э1}(p)$

моделирования первого этапа на рис. 6.5.

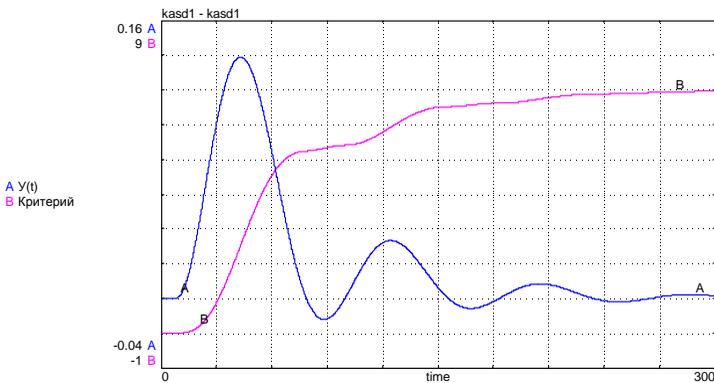


Рис. 6.5. Изменение величины $Y(t)$ при оптимальных значениях параметров настройки одноконтурной АСР с ПИ-регулятором и эквивалентным объектом $W_{Э1}(p)$ при возмущении по $\mu(t)$

Определив значения $K_P^{\text{опт}}$ и $T_I^{\text{опт}}$ в этой системе для заданного критерия оптимальности, получим значения $K_D^{\text{опт}}$, $T_D^{\text{опт}}$:

$$K_D^{\text{опт}} = 1/K_P^{\text{опт}} = 1/7,85 = 0,127 \quad T_D^{\text{опт}} = T_I^{\text{опт}} = 49,81 \text{ с.}$$

Необходимо отметить, что, как видно из рис.6.5, найденные значения параметров настройки дифференциатора, обеспечивающие минимум модульного интегрального показателя качества процесса регулирования без ограничения на запас устойчивости системы дают относительно большую колебательность переходного процесса (степень затухания $\Psi \approx 0,71$).

2 этап. Настройка регулятора исходной системы определяется поиском оптимальных значений параметров настройки одноконтурной АСР с ПИ-регулятором и эквивалентным объектом $W_{32}(p)$ с передаточной функцией (6.3).

Структурная схема моделирования одноконтурной системы для определения оптимальных значений параметров настройки ПИ-регулятора по минимуму модульного интегрального критерия для эквивалентного объекта $W_{32}(p)$ приведена на рис. 6.6.

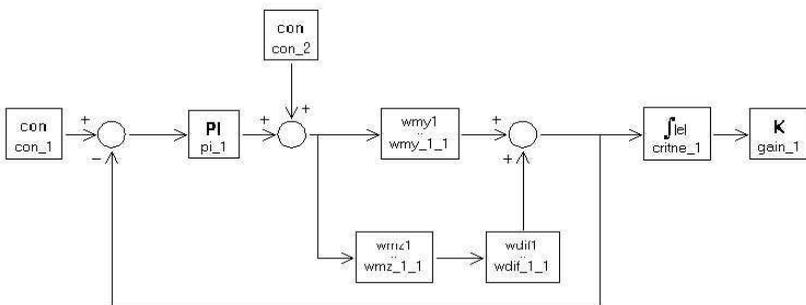


Рис. 6.6. Структурная схема модели для определения настроек ПИ-регулятора по эквивалентному объекту $W_{32}(p)$

После выполнения второго этапа настройки получены оптимальные значения параметров регулятора $K_P^{\text{опт}}$ и $T_I^{\text{опт}}$ для заданного критерия (минимум модульного интегрального показателя качества процесса регулирования без ограничения на запас устойчивости системы). Результаты моделирования представлены на рис. 6.7 ($K_P^{\text{опт}} = 0,877$; $T_I^{\text{опт}} = 26,36 \text{ с.}$).

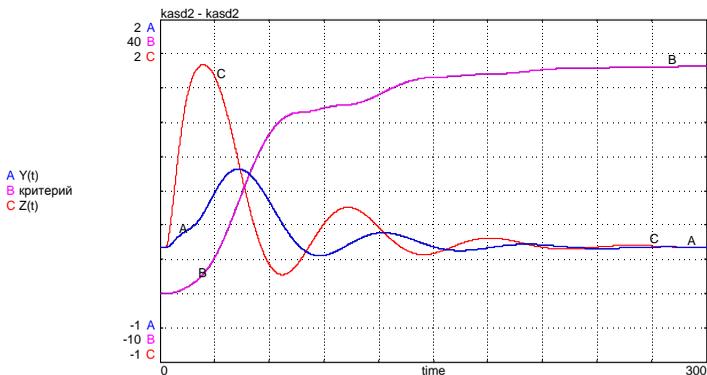


Рис. 6.7. Изменение величины $Y(t)$ при оптимальных значениях параметров настройки одноконтурной АСР с ПИ-регулятором и эквивалентным объектом $W_{\Sigma 2}(p)$ при возмущении по $\mu(t)$.

Структурная схема моделирования двухконтурной АСР с использованием программы “20-sim 2.3 Pro” была приведена на рис.6.3. Результаты моделирования двухконтурной АСР представлены на рис.6.8.

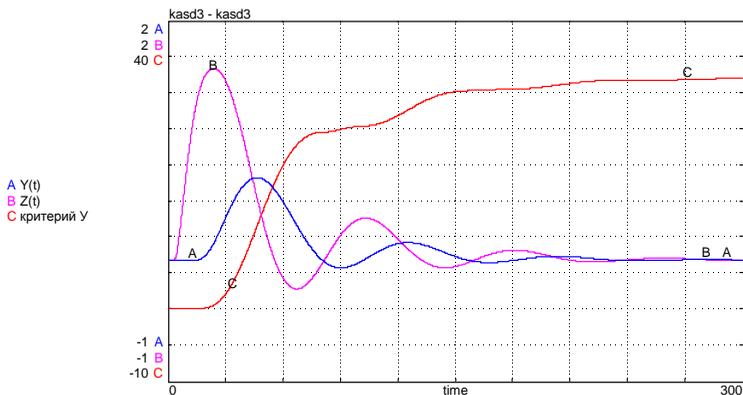


Рис. 6.8. Изменение величин $Y(t)$ и $Z(t)$ при возмущении по $\mu(t)$ в двухконтурной АСР с регулятором и дифференциатором

На нем приведены процессы изменения вспомогательной $Z(t)$ и основной $Y(t)$ величин.

Необходимо отметить, что коэффициент передачи регулятора внутреннего контура двухконтурной АСР является произведением коэффициента передачи самого регулятора K_p и коэффициента передачи дифференциатора K_d . При изменении параметров настройки дифференциатора K_d^H или регулятора K_p^H необходимо оставить неизменным значение произведения $K_p^H K_d^H = K_p^{opt}$.

3.2 Динамическая настройка двухконтурной системы с использованием метода «компенсированной» настройки

Сущность метода «компенсированной» настройки сводится к подбору параметров настройки дифференциатора таким образом, чтобы при ступенчатом входном воздействии со стороны регулирующего органа сумма выходных сигналов основного канала $Y(t)$ и дифференциатора $Y_d(t)$ приближалась по динамике к реакции на такое же воздействие малоинерционного канала $Z(t)$, а в статике к реакции основного канала

$$Y(t) + Y_d(t) = K_Y Z(t)/K_Z.$$

Это условие строго соблюдается лишь в том случае, если эквивалентный объект $W_{э1}(p) = \frac{W_{\mu y}(p)}{W_{\mu z}(p)}$ описывается передаточной функ-

цией аperiodического звена. Тогда значения параметров настройки дифференциатора принимаются равными соответствующим значениям коэффициента передачи и постоянной времени аperiodического звена. В противном случае значения параметров настройки дифференциатора определяются из условия наилучшего приближения сравниваемых переходных характеристик.

Динамическая настройка системы регулирования с регулятором и дифференциатором осуществляется в два этапа.

1 этап. Настройка дифференциатора. В общем случае значения параметров настройки дифференциатора определяются из условия наилучшего приближения сравниваемых переходных характеристик (например, по минимуму интеграла квадрата разности сравниваемых переходных характеристик)

$$\int_0^{\infty} [K_d Z(t) - (Y(t) + Y_d(t))]^2 dt \Rightarrow \min.$$

Структурная схема модели для определения настроек дифференциатора методом «компенсированной» настройки приведена на рис. 6.9.

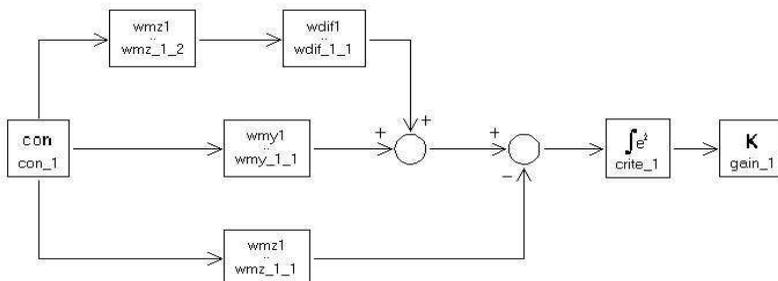


Рис. 6.9. Структурная схема модели для определения настроек дифференциатора методом «компенсированной» настройки

В качестве начальных значений параметров настройки дифференциатора при поиске минимума можно принять

$$K_D = \frac{K_Y}{K_Z}, \quad T_D = T_{OC} - T_{BC},$$

где T_{OC} и T_{BC} – постоянные времени объекта по основной и вспомогательной регулируемым величинам, определяемые из графиков переходных характеристики объекта по условию равенства площадей заключенных между кривой разгона и линиями нулевого и установившегося значений.

Результаты моделирования при найденных настройках дифференциатора (K_D и T_D), приведены соответственно на рис. 6.10.

2 этап. Настройка регулятора. Таким образом, если удастся реализовать идею «компенсированной» настройки, то рассматриваемая система при возмущении по каналу регулирующего воздействия становится одноконтурной системой, состоящей из эквивалентного объекта

$$W_{\Sigma 2}(p) = W_{\mu z}(p) \cdot W_D(p) + W_{\mu y}(p)$$

и ПИ-регулятора. Оптимальные значения параметров настройки регулятора теперь могут быть определены любым известным методом.

Определение настроек регулятора можно провести по минимуму модульного интегрального критерия качества процесса регулирования

ния (critne). Поскольку изменение коэффициента усиления регулятора одновременно влияет как на основную $y(t)$, так и на вспомогательную $z(t)$ регулируемые величины, минимизировать целесообразно сумму отклонений этих величин:

$$J = \min \int_0^{\infty} (|y(t)| + |z(t)|) dt .$$

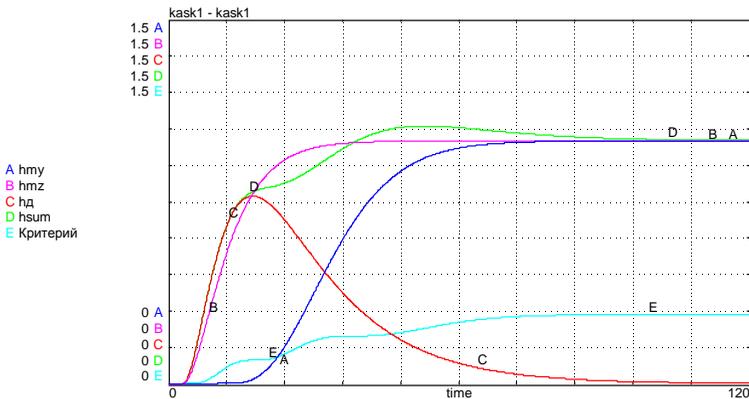


Рис. 6.10. Выходные сигналы основного ($h_{\mu y}$) и малоинерционного ($h_{\mu z}$) каналов, сигнал на выходе дифференциатора (h_d) и суммарный сигнал (h_{sum})

Структурная схема для моделирования двухконтурной АСР и определения настроек ПИ-регулятора таким методом приведена на рис.6.11.

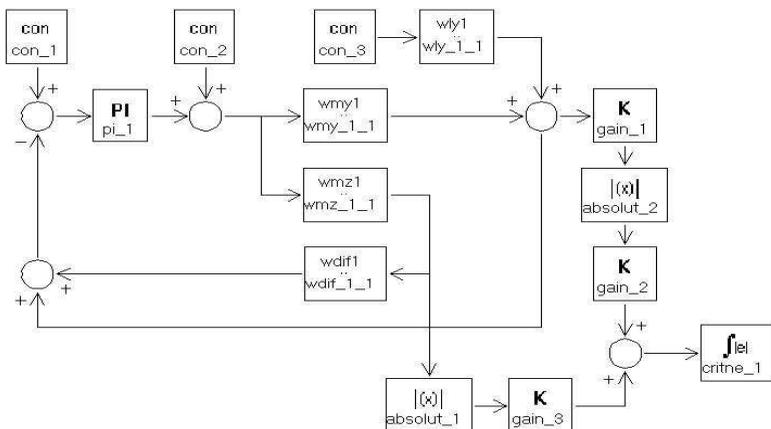


Рис. 6.11. Структурная схема модели АСР для определения параметров регулятора методом компенсированной настройки

Результаты моделирования двухконтурной АСР при возмущении по регулирующему воздействию представлены на рис. 6.12 при $K_P = 0.65$, $T_I = 5.35$ с.

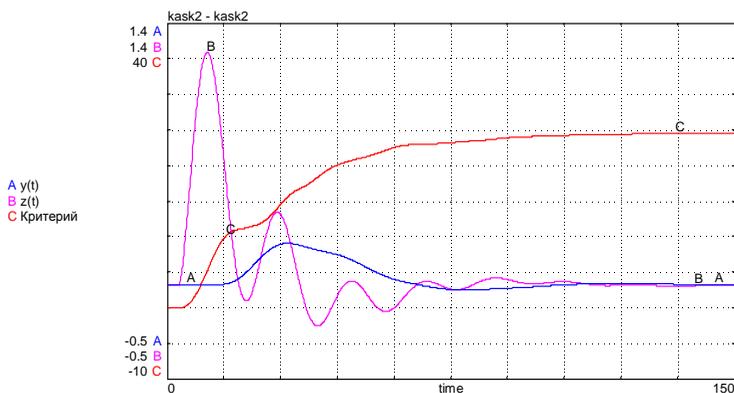


Рис. 6.12. Изменение основной $Y(t)$ и вспомогательной $Z(t)$ регулируемых величин при возмущении со стороны регулирующего органа $\mu(t)$ для параметров настройки регулятора, найденных по методу «компенсированной» настройки

Порядок выполнения работы

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

Задание 1. Подготовка исходных данных к выполнению исследований.

1.1. Записать передаточные функции модели объекта для вспомогательной $Z(t)$ и основной $Y(t)$ регулируемых величин в соответствии с заданным в Приложении вариантом.

1.2. Записать передаточную функцию эквивалентного объекта $W_{Э1}(p)$, для определения оптимальных значений параметров настройки дифференциатора при использовании гипотезы о частотной раз-

вязке контуров и передаточную функцию эквивалентного объекта $W_{\Sigma 2}(p)$, для расчета значения параметров настройки ПИ-регулятора.

1.3. Набрать модели объекта и дифференциатора и сохранить их в виде подмоделей.

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

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

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

В отчете по заданию 1 привести передаточные функции и графики переходных характеристик объекта (все переходные характеристики расположить на одном рисунке).

Задание 2. Моделирование двухконтурной АСР с регулятором и дифференциатором. Определение оптимальных настроек дифференциатора и регулятора с использованием гипотезы о частотной развязке контуров.

2.1. Набрать модель одноконтурной системы с ПИ-регулятором и эквивалентным объектом $W_{\Sigma 1}(p)$ (рис.6.4).

2.2. Подготовить эксперимент, задав коэффициенты модели объекта, начальные условия, параметры решения задачи и список графиков, выводимых на экран. На экран вывести графики изменения вспомогательной величины $Y(t)$ во внутреннем контуре при возмущении по регулируемому воздействию и значение критерия оптимальности.

2.3. Провести процесс моделирования работы системы при ступенчатом воздействии по каналу $\mu(t)$. Определить параметры настройки регулятора при возмущении по $\mu(t)$, используя критерий минимума модульного интегрального показателя качества. По полученным значениям параметров настройки регулятора рассчитать значения параметров настройки дифференциатора.

2.4. Набрать модель одноконтурной системы с ПИ-регулятором и эквивалентным объектом $W_{\Sigma 2}(p)$ (рис.6.6).

2.5. Подготовить эксперимент, задав коэффициенты модели объекта, начальные условия, параметры решения задачи и список графиков, выводимых на экран. На экран вывести графики изменения основной $Y(t)$ и вспомогательной величин $Z(t)$ при возмущении по регулирующему воздействию, значение критерия оптимальности, сигнал на выходе ПИ-регулятора.

2.6. Провести процесс моделирования работы системы при ступенчатом воздействии по каналу $\mu(t)$. Определить параметры настройки регулятора при возмущении по $\mu(t)$, используя критерий минимума модульного интегрального показателя качества.

2.7. Привести схему двухконтурной АСР к традиционному виду (рис.6.3.), добавив модель объекта по каналу внешнего возмущения $\lambda(t)$. Провести процесс моделирования работы системы при ступенчатом воздействии по каналу внешнего возмущения $\lambda(t)$.

В отчете по заданию 2 привести графики изменения основной $Y(t)$ и вспомогательной величин $Z(t)$ при возмущении по регулирующему воздействию, при ступенчатом воздействии по каналу внешнего возмущения $\lambda(t)$ (все переходные характеристики на одном рисунке), значения критериев оптимальности для каждого пункта, значения параметров настройки дифференциатора и регулятора.

Задание 3. Моделирование двухконтурной АСР с регулятором и дифференциатором. Определение оптимальных настроек дифференциатора и регулятора методом компенсированной настройки

3.1. Набрать модель для определения настроек дифференциатора методом заполнения (рис. 6.9). Определить параметры настройки дифференциатора из условия минимума интегрального квадратичного критерия. На экран вывести графики изменения основной $Y(t)$ и вспомогательной величин $Z(t)$, сигнал на выходе дифференциатора, суммарный сигнал основного канала и дифференциатора и значения критерия.

3.2. Повторить пункты 2.4 ÷ 2.6 и определить параметры настройки регулятора для найденных методом заполнения параметров дифференциатора.

3.3. Провести процесс моделирования работы системы при ступенчатом воздействии по каналу внешнего возмущения $\lambda(t)$.

В отчете по заданию 3 привести графики изменения основной $Y(t)$ и вспомогательной величин $Z(t)$ при возмущении по регулирующему воздействию, значения критериев оптимальности для каждого пункта, значения параметров настройки дифференциатора и регулятора.

Задание 4. Сравнение методов настройки двухконтурной АСР

4.1. Набрать структурную схему для моделирования двухконтурной АСР и определения настроек ПИ-регулятора, приведенную на рис.6.11. Определить параметры настройки регулятора и дифференциатора при возмущении по $\mu(t)$, минимизируя сумму отклонений основной $y(t)$ и вспомогательной величин $z(t)$. На экран вывести графики изменения основной $y(t)$ и вспомогательной величины $z(t)$ при возмущении по регулирующему воздействию, значение критерия оптимальности, сигнал на выходе ПИ-регулятора. Записать полученные значения параметров настройки регулятора и дифференциатора.

4.2. Установить последовательно значения параметров настройки регулятора и дифференциатора полученные в заданиях 2, 3, 4 и провести моделирование работы системы при ступенчатом воздействии по каналу регулирующего, а затем внешнего возмущения $\lambda(t)$. Сделать вывод о влиянии параметров настройки дифференциатора на вид переходных процессов изменения вспомогательной и основной регулируемых величин. По результатам экспериментов заполнить таблицу 6.1.

4.3. *Провести моделирование работы одноконтурной системы с ПИД регулятором и объектом $W_{\mu y}(p)$ при ступенчатом воздействии по каналу регулирующего, а затем внешнего возмущения $\lambda(t)$ и сделать вывод об эффективности двухконтурной системы по сравнению с одноконтурной системой, использующий сигнал по производной регулируемой величины.

В отчете по заданию 4 привести графики изменения основной $y(t)$ и вспомогательной величин $z(t)$ для рассмотренных методов настройки. Переходные процессы для каждого возмущения на одном рисунке. Составить таблицу сравнения методов настройки двухконтурной АСР, поместив в нее значения параметров настройки регулятора и дифференциатора и максимальных отклонений вспомогательной и основной регулируемых величин для каждого возмущения.

Сделать вывод об эффективности используемых методов настройки регулятора и дифференциатора в двухконтурной АСР.

Сравнение методов настройки двухконтурной АСР

Параметр	Гипотеза о частотной развязке	Метод «компенсированной» настройки	Оптимизация по минимуму интеграла суммы модулей отклонений	Одноконтурная АСР с ПИД-регулятором
Кр				
Тн				
Кд				-
Тд				
$\max Z_{\mu}$				-
$\max Y_{\mu}$				
$\max Z_{\lambda}$				-
$\max Y_{\lambda}$				

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Нарисовать на одном графике примерный вид переходных характеристик объекта по каналам основной и вспомогательной регулируемых величин. Как изменится переходная характеристика объекта по каналу вспомогательной регулируемой величины и эффективность системы регулирования, 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;
- г) уменьшить величину транспортного запаздывания в 2 раза.

2. Получить выражение для передаточной функции эквивалентного объекта, используемое для настройки дифференциатора.

3. Получить выражение для передаточной функции эквивалентного объекта, используемое для настройки регулятора.

4. Как изменится переходный процесс на выходе системы регулирования, если:

а) увеличить или уменьшить величину коэффициента передачи регулятора в 2 раза;

б) увеличить или уменьшить величину постоянной времени интегрирования регулятора в 2 раза;

в) увеличить или уменьшить величину коэффициента передачи дифференциатора в 2 раза;

б) увеличить или уменьшить величину постоянной времени дифференцирования дифференциатора в 2 раза.

5. Получить выражение для передаточной функции эквивалентного регулятора, используемое при настройке дифференциатора.

6. С помощью эквивалентных преобразований представить исходную структурную схему системы в виде двухконтурной.

7. Написать выражение для комплексной частотной характеристики внутреннего контура, по которой можно определить значение показателя колебательности M .

8. Написать выражение для комплексной частотной характеристики внешнего контура, по которой можно определить значение показателя колебательности M .

9. Пояснить сущность метода «компенсированной» настройки дифференциатора.

10. Как определить значения параметров настройки дифференциатора в методе «компенсированной» настройки, если эквивалентный объект описывается передаточной функцией апериодического звена?

КАСКАДНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ С КОРРЕКТИРУЮЩИМ И СТАБИЛИЗИРУЮЩИМ РЕГУЛЯТОРАМИ

Цель лабораторного занятия

Целью лабораторного занятия является моделирование двухконтурной (каскадной) системы регулирования с корректирующим и стабилизирующим регуляторами, определение оптимальных настроек регуляторов, получение переходных процессов по основной и вспомогательной регулируемым величинам при воздействиях по различным каналам. В результате должна быть получена оценка эффективности каскадной системы регулирования по сравнению с одноконтурной.

Задание на работу

Подготовить структурную схему модели каскадной АСР с двумя идеальными ПИ-регуляторами. Определить необходимые значения параметров динамической настройки системы. Провести моделирование процессов в системе при воздействиях по каналам регулирующего органа и внешнего возмущения. Параметрически перестроить модель каскадной АСР в модель одноконтурной АСР. Получить переходные процессы в одноконтурной АСР при тех же возмущениях. Сделать вывод об эффективности изучаемой двухконтурной системы регулирования по сравнению с одноконтурной системой при регулировании заданного объекта

Методические указания

1. Краткое описание АСР экономичности процессов горения

Одной из наиболее распространенных в теплоэнергетике каскадных систем регулирования является система регулирования экономичности режима горения топлива в котлоагрегате тепловых элек-

2. Структурная схема каскадной системы регулирования с корректирующим и стабилизирующим регуляторами

На рис.7.2 приведена типовая каскадная схема системы регулирования с корректирующим и стабилизирующим регуляторами.

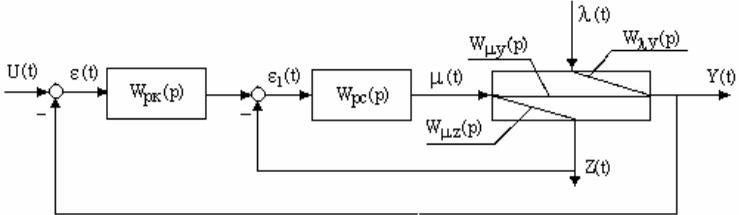


Рис. 7.2. Структурная схема каскадной АСР с корректирующим и стабилизирующим регуляторами

$Y(t)$, $Z(t)$ - основная и вспомогательная регулируемые величины;

$\lambda(t)$ - внешнее неконтролируемое возмущение;

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

$W_{\lambda y}(p)$, - передаточная функция объекта по каналу внешнего возмущающего воздействия;

$W_{\mu z}(p)$, $W_{\mu y}(p)$ - передаточные функции каналов объекта, связывающих регулирующее воздействие с основной и вспомогательной регулируемыми величинами;

$W_{рс}(p)$, $W_{рк}(p)$ - передаточные функции стабилизирующего и корректирующего регуляторов.

Динамические свойства технологического объекта управления по каналам λ - Y , μ - Y и μ - Z представлены переходными характеристиками $h(t)$, показанными на рис.7.3.

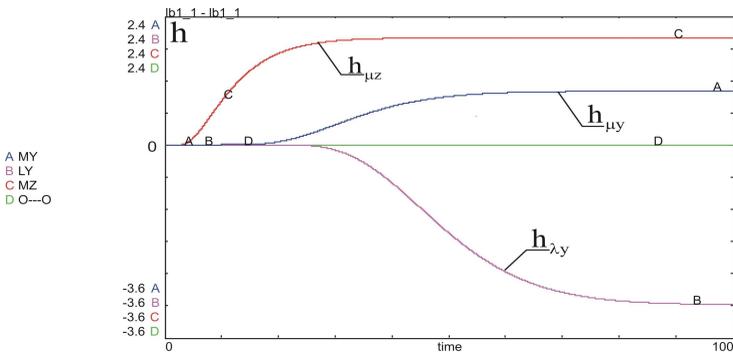


Рис.7.3. Переходные характеристики объекта управления

Criet3 – для настройки регулятора одноконтурной АСР.

Оптимальные параметры настройки каждого регулятора будем получать на модели путем минимизации соответствующего интегрального критерия при подаче характерных для настраиваемого регулятора единичных ступенчатых возмущающих воздействий.

В отличие от линейного $I = \int_0^t \varepsilon(t)dt$ и квадратичного $I = \int_0^t \varepsilon^2(t)dt$ ин-

тегральных критериев, применяемых в частотных методах расчета настройки регуляторов, получение минимума нелинейного интегрального критерия повышенной сложности, приведенного выше (7.1.), позволяет одновременно решить проблемы устойчивости и качества переходных процессов при выборе оптимальных параметров регулятора.

3. *Определение оптимальных значений параметров настройки стабилизирующего и корректирующего регуляторов*

Настройка стабилизирующего регулятора $W_{pc}(p)$ в предположении, что корректирующий регулятор отключен, определяется расчетом одноконтурной АСР с ПИ-регулятором по передаточной функции объекта $W_{\Sigma 1} = W_{\mu z}(p)$.

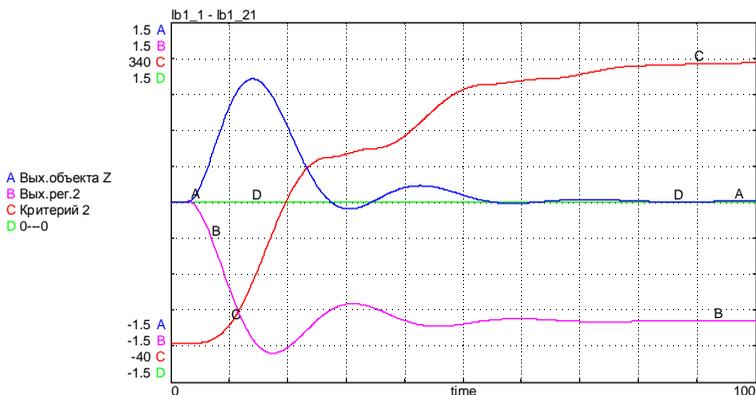


Рис.7.5 Процессы в оптимально настроенном контуре стабилизации

Настройка корректирующего регулятора $W_{pk}(p)$ определяется расчетом одноконтурной АСР с ПИ-регулятором и эквивалентным объектом

$$W_{\Sigma 2} = \frac{W_{\mu y}(p) \cdot W_{pc}(p)}{1 + W_{\mu z}(p) \cdot W_{pc}(p)},$$

где $W_{pc}(p)$ передаточная функция стабилизирующего регулятора с полученными выше оптимальными параметрами настройки.

На рис.7.6 показаны переходные процессы в системе после оптимизации параметров настройки регулятора во внешнем контуре настраиваемой каскадной АСР. Настройка производилась при подаче единичных ступенчатых воздействий по заданию $U(t)$ корректирующему регулятору (рис.7.2).

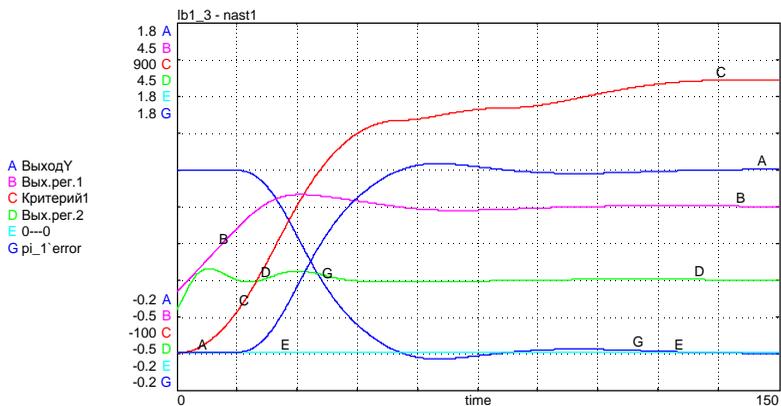


Рис.7.6 Оптимальные процессы после настройки корректирующего регулятора при ступенчатом воздействии по заданию $U(t)$

На рис.7.7 и рис.7.8 приведены графики изменения основной $Y(t)$ и вспомогательной $Z(t)$ регулируемых величин и графики регулирующих воздействий в двухконтурной АСР с корректирующим и стабилизирующим регуляторами при оптимальных значениях параметров настройки.

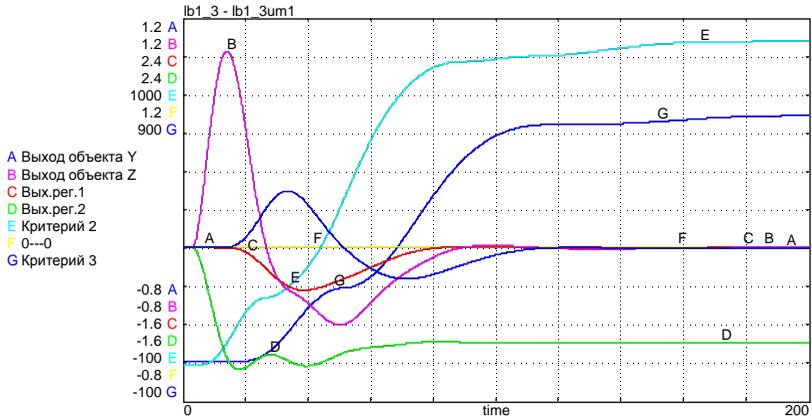


Рис.7.7. Переходные процессы в оптимально настроенной каскадной АСР при возмущении по каналу регулирующего воздействия $\mu(t)$

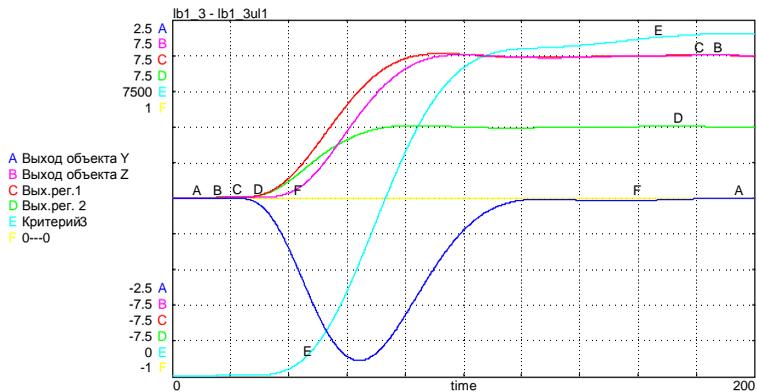


Рис.7.8. Переходные процессы в оптимально настроенной каскадной АСР при возмущающем воздействии $\lambda(t)$

Для оценки эффективности каскадной системы регулирования по сравнению с одноконтурной проводится моделирование переходных процессов в этих системах при возмущениях по $\mu(t)$ и по $\lambda(t)$. Результаты моделирования представлены на рис. 7.9 и рис. 7.10.

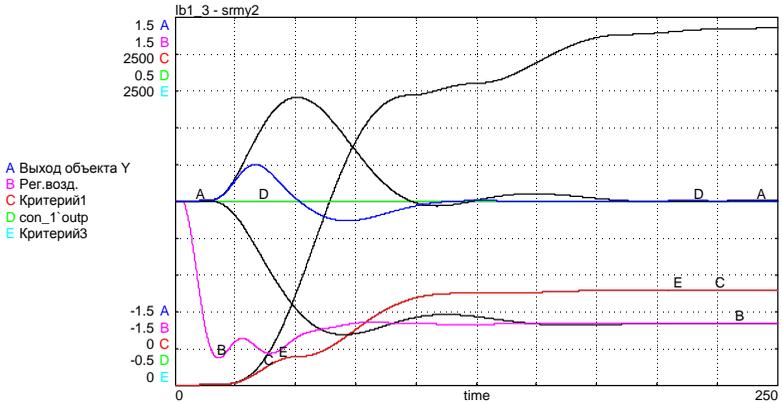


Рис.7.9. Переходные процессы в каскадной и одноконтурной системах регулирования при возмущении по $\mu(t)$

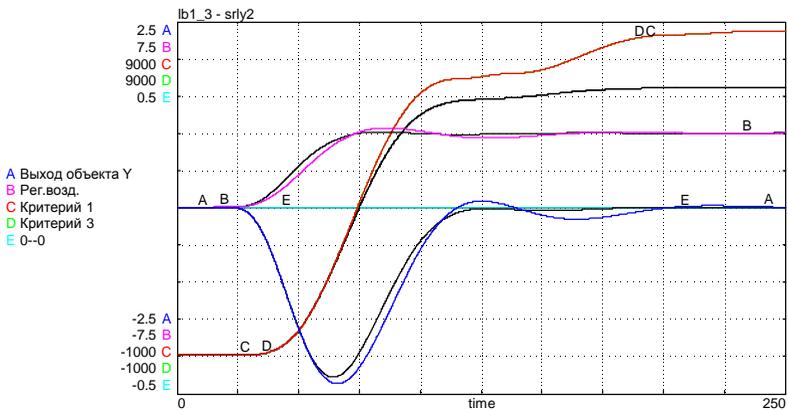


Рис.7.10. Переходные процессы в каскадной и одноконтурной системах регулирования при возмущении по $\lambda(t)$

Учитывая, что наилучшему по качеству переходному процессу соответствует минимум интегрального критерия, эффективность каскадной АСР по отношению к возмущениям μ и λ будем оценивать соотношением:

$$\mathcal{E} = \frac{I_{одн}}{I_{кас}}, \quad (7.2)$$

для которого интегральные критерии качества переходных процессов в одноконтурной $I^{\text{одн}}$ и каскадной $I^{\text{кск}}$ системах регулирования берутся при одинаковых возмущениях.

Необходимо отметить, что структурная схема каскадной АСР с корректирующим и стабилизирующим регуляторами в динамическом плане эквивалентна схеме двухконтурной АСР с регулятором и дифференциатором, приведенной на рис. 6.2. При использовании ПИ-законов регулирования и выполнении условия "частотной развязки" внутреннего и внешнего контуров, графики изменения основной и вспомогательной регулируемых величин в этих системах при возмущениях по аналогичным каналам практически не должны отличаться, если для настройки систем применялись одинаковые критерии качества переходных процессов.

Схема модели АСР, приведенная на рис.7.4, позволяет исследовать каскадные системы регулирования при различных свойствах объекта по каналам основной и вспомогательной регулируемых величинах, и при различных законах регулирования. Нетрудно ввести нелинейности типа "ограничение" и "люфт" и исследовать эффективность схемы при различных значениях параметров нелинейностей. Добавив модель устройства ввода возмущений, можно получить оптимальные значения параметров его настройки и т.д.

Порядок выполнения работы

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

Задание 1. Подготовка исходных данных к выполнению исследований

1.1. Записать передаточные функции модели объекта для вспомогательной $z(t)$ и основной $y(t)$ регулируемых величин в соответствии с заданным в Приложении вариантом.

1.2. Записать передаточную функцию эквивалентного объекта $W_{\Sigma 2}(p)$, для определения оптимальных значений параметров настройки корректирующего регулятора при использовании гипотезы о частотной развязке контуров, и передаточную функцию эквива-

лентного объекта $W_{Э1}(p)$, для расчета значений параметров настройки стабилизирующего регулятора.

1.3. *Рассчитать частотным методом оптимальные значения параметров настройки стабилизирующего и корректирующего ПИ-регуляторов по передаточным функциям объекта ($M = 1.55$).

1.4. Набрать модели динамических каналов объекта и сохранить их в виде подмоделей.

1.5. Набрать модель двухконтурной АСР с корректирующим и стабилизирующим регуляторами (рис.7.4).

1.6. Провести моделирование исходных переходных характеристик объекта, установив на модели АСР значение коэффициента передачи стабилизирующего регулятора равным нулю и подав единичные возмущения одновременно на входы модели, соответствующие входам воздействий μ и λ на структуре системы (рис.7.2).

В отчете по заданию 1 привести структуру системы, схему ее модели, передаточные функции и графики переходных характеристик объекта (все переходные характеристики расположить на одном рисунке).

Задание 2. Моделирование двухконтурной АСР с корректирующим и стабилизирующим регуляторами

2.1. Определить оптимальные значения параметров настройки стабилизирующего регулятора при возмущении по $\mu(t)$, используя критерий минимума модульного интегрального показателя качества Critet2. На экран вывести графики изменения вспомогательной регулируемой величины $Z(t)$ и критерия оптимальности.

2.2. Определить оптимальные значения параметров настройки корректирующего регулятора при возмущении по заданию $U(t)$, используя критерий минимума модульного интегрального показателя качества Critet1. На экран вывести графики изменения основной регулируемой величины $y(t)$, рассогласование на входе в регулятор и критерия оптимальности.

2.3. Определить оптимальные значения параметров настройки регулятора в одноконтурной системе при возмущении по $\mu(t)$, используя критерий минимума модульного интегрального показателя качества Critet3. Для этого установить значения коэффициента передачи и

постоянной интегрирования стабилизирующего регулятора равными $K_{p2} = 1$ и $T_{и2} = 100000$ (превратить регулятор в пропорциональное звено) и отключить в объекте канал μ -Z, установив нулевое значение коэффициента передачи в одном из его звеньев. На экран вывести графики изменения основной регулируемой величины $Y(t)$ и значения критерия оптимальности.

В отчете по заданию 2 приводятся: оптимальные значения параметров настройки стабилизирующего и корректирующего регуляторов, параметров настройки ПИ-регулятора в одноконтурной системе, переходные процессы и значения критериев качества переходных процессов.

Задание 3. Моделирование двухконтурной АСР с корректирующим и стабилизирующим регуляторами и сравнение с одноконтурной системой

3.1. Провести процессы моделирования работы каскадной системы при найденных оптимальных значениях параметров настройки корректирующего и стабилизирующего ПИ-регуляторов при возмущениях по $\mu(t)$ и по $\lambda(t)$, подавая их отдельно.

3.2. Провести процессы моделирования работы одноконтурной системы при найденных оптимальных значениях параметров настройки ПИ-регулятора при воздействиях по $\mu(t)$ и по $\lambda(t)$, подаваемых отдельно.

3.3. *Повторить процесс моделирования работы системы при рассчитанных по частотным характеристикам объектов оптимальных значениях параметров настройки регуляторов.

3.4. Совместить графики для одинаковых воздействий и сделать выводы об эффективности рассмотренных систем регулирования. Полученные оптимальные значения параметров настройки и результаты моделирования свести в таблицу, форма которой приведена ниже.

В отчете по заданию 3 приводятся: графики переходных процессов для п. 3.1 - 3.3, таблица значений критериев качества переходных процессов, оценка эффективности (7.2) и выводы.

Показатели качества переходных процессов

Схема	АСР с корректирующим и стабилизирующим регуляторами	Одноконтурная АСР с ПИ регулятором		
Значения параметров настройки	$K_{p1} =$ $T_{n1} =$ $K_{p2} =$ $T_{n2} =$	$K_p =$ $T_n =$		
Воздействие	$\mu(t)$	$\lambda(t)$	$\mu(t)$	$\lambda(t)$
Y_{max}				
μ_{max}				
Степень затухания, ψ				
Значение критерия				

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Нарисовать на одном графике примерный вид переходных характеристик объекта по каналам основной и вспомогательной регулируемых величин. Как изменится переходная характеристика объекта по каналу вспомогательной регулируемой величины и эффективность системы, если:

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

2. Получить выражение для передаточной функции эквивалентного объекта, используемой для настройки корректирующего регулятора.

3. Как изменится переходный процесс на выходе системы регулирования, если:

- а) увеличить или уменьшить величину коэффициента передачи стабилизирующего регулятора в 2 раза;
- б) увеличить или уменьшить величину постоянной интегрирования стабилизирующего регулятора в 2 раза;
- в) увеличить или уменьшить величину коэффициента передачи корректирующего регулятора в 2 раза;

г) увеличить или уменьшить величину постоянной интегрирования корректирующего регулятора в 2 раза.

4. С помощью эквивалентных преобразований представить исходную структурную схему системы в виде двухконтурной.

5. Написать выражение для комплексной частотной характеристики внутреннего контура, по которой можно определить значение показателя колебательности M .

6. Написать выражение для комплексной частотной характеристики внешнего контура, по которой можно определить значение показателя колебательности M .

7. Нарисовать на одном рисунке примерные графики амплитудно-частотных характеристик внутреннего и внешнего контуров по каналу задания.

8. Как изменится переходный процесс на выходе системы регулирования, если разорвать связь между выходом вспомогательной регулируемой величины и входом стабилизирующего регулятора?

ТРЕХИМПУЛЬСНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В БАРАБАНЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА

Цель лабораторного занятия

Целью лабораторного занятия является моделирование и исследование трехимпульсной автоматической системы регулирования на примере регулирования уровня в барабане парогенератора с использованием программы моделирования динамических систем "20-sim 2.3 Pro".

Задание на работу

При подготовке к лабораторному занятию необходимо подготовить структурную схему модели трехимпульсной автоматической системы регулирования уровня в барабане парогенератора в соответствии с методическими указаниями. Подготовить необходимые значения параметров объекта и динамической настройки регуляторов системы.

На занятии провести моделирование системы и получить переходные характеристики объекта регулирования, исследовать влияние закона регулирования и структуры устройства компенсации на качество процессов регулирования. Сделать вывод об эффективности рассмотренных вариантов систем регулирования.

Методические указания

1. Краткое описание АСР уровня в барабане

Автоматическая система регулирования уровня в барабане парогенератора (котла) является одной из наиболее важных систем регулирования. Типовая структурная схема регулирования уровня в барабане парогенератора АЭС или котла на ТЭС приведена на рис. 8.1.

На АЭС в корпусе парогенератора находится вода второго контура. Нагрев воды осуществляется трубчатым теплообменником, через

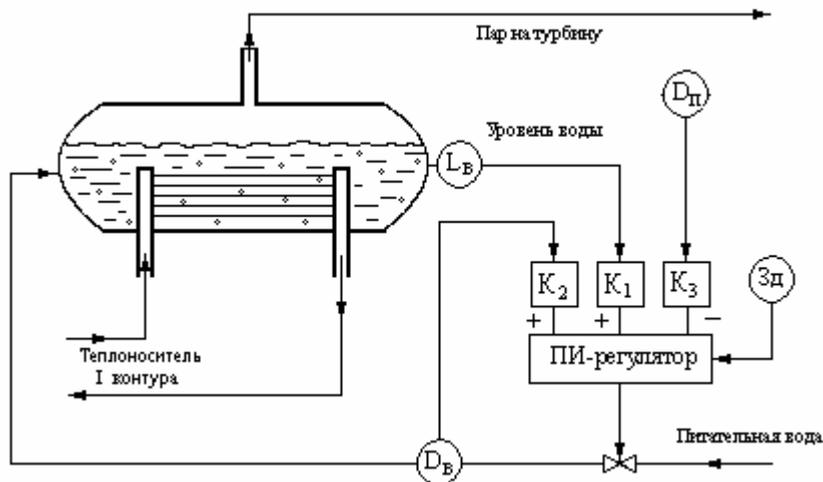


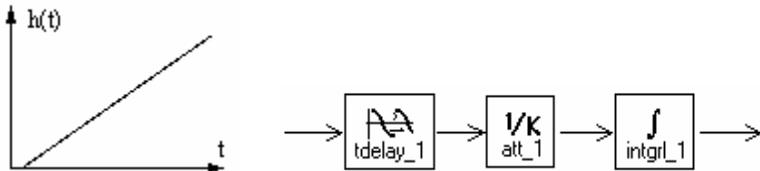
Рис. 8.1. Структурная схема регулирования уровня в барабане парогенератора

трубки которого прокачивается горячий теплоноситель первого контура. Образующийся в корпусе насыщенный пар сепарируется от влаги в паровом пространстве парогенератора и направляется на турбину. Подъем уровня воды в парогенераторе может привести к забросу воды в турбину, а снижение уровня приводит к оголению верхней части теплообменника, уменьшению поверхности теплообмена и нежелательному повышению температуры теплоносителя первого контура на входе в реактор.

Основной регулируемой величиной в этой системе является уровень воды в барабане, который необходимо поддерживать на значении, предусмотренном правилами технической эксплуатации. Уровень воды в барабане является показателем материального баланса между расходом пара из парогенератора и поступающей в него питательной водой. Регулирующим воздействием в АСР уровня является расход питательной воды на парогенератор, изменяемый с помощью регулирующего питательного клапана.

2. Динамические характеристики объекта регулирования

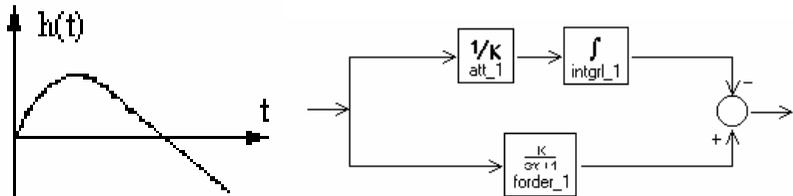
Динамические характеристики каналов регулирования имеют некоторые специфические особенности. Во-первых, переходные характеристики по уровню воды в барабане парогенератора при возмущении расходом питательной воды или пара относятся к характеристикам объектов без самовыравнивания, и, во-вторых, при резком изменении давления в барабане происходит явление “набухания” уровня, что



$$W_{D_b-L} = \frac{e^{-p\tau}}{T_3 p}$$

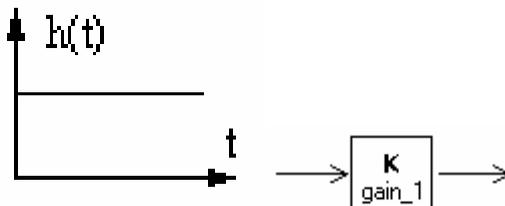
а) расход питательной воды - уровень воды в

барабане



$$W_{D_{п-L}}(p) = \frac{K_L}{T_2 p + 1} - \frac{1}{T_1 p}$$

б) расход пара - уровень воды в барабане



$W_{\mu-D_b} = K_{D_b}$ в) перемещение регулирующего органа - расход питательной воды

Рис. 8.2. Переходные характеристики, передаточные функции и структурные схемы моделей каналов объекта регулирования

значительно усложняет работу системы регулирования.

Для учета явления “набухания” уровня в систему вводят два дополнительных сигнала (импульса): сигнал по расходу питательной воды и сигнал, эквивалентный расходу насыщенного пара, вычисляемый через разность температур теплоносителя горячей и холодной ниток и давление в барабане парогенератора.

Расход перегретого пара $D_{п}$ на ТЭС измеряется без особых проблем. Коэффициенты передачи каналов K_3 по расходу пара $D_{п}$ и K_2 по расходу питательной воды $D_{в}$ необходимо выбирать такими, чтобы одинаковые изменения расходов приводили к одинаковой величине изменения сигналов на входе в регулятор.

В установившемся режиме работы системы (в статике) введенные импульсы должны компенсировать друг друга и не создавать дополнительный сигнал на входе регулятора во всем диапазоне изменения нагрузки (расхода пара) энергоблока. Поэтому они вводятся в регулятор с разными знаками.

На рис. 8.2 приведены типовые переходные характеристики, передаточные функции и схемы моделей каналов объекта регулирования без учета динамики измерительных преобразователей.

Следует отметить, что при моделировании реальных схем регулирования необходимо учитывать инерционность измерительных каналов, по которым поступает сигнал, характеризующий значение измеряемой величины (импульсные трубки, уравнивательные и компенсационные сосуды, жесткость мембран и т.д.). Хотя эта инерционность невелика и составляет доли секунды, она накладывается на динамические характеристики собственно объекта и ее необходимо учитывать при настройке систем регулирования и их моделировании, особенно для малоинерционных каналов объекта.

Для подавления высокочастотных помех, поступающих с сигналом от измеряемой величины, часто вводят демпфер (RC -цепочка), что также влияет на динамические свойства каналов регулирования.

В настоящем лабораторном занятии динамика измерительных преобразователей и демпфера учитывается введением апериодического звена с единичным значением коэффициента передачи.

3. Настройка системы регулирования

Рассматриваемая динамическая система регулирования является двухконтурной системой с компенсацией внешнего контролируемого возмущения, структурная схема которой, приведена на рис. 8.3.

Первым (внутренним) контуром является система стабилизации расхода воды ПИ-регулятором. В силу малоинерционности объекта по каналу «перемещение регулирующего органа – расход питательной воды», его динамику можно представить в виде апериодического звена с постоянной времени измерительного преобразователя.

В этом случае любые значения параметров настройки ПИ-регулятора обеспечивают устойчивую работу внутреннего контура. На практике значения параметров настройки ПИ-регулятора зависят от конкретных особенностей объекта (люфты в исполнительном механизме, инерция расходомера и т.п.). Поэтому этот контур настраивается непосредственно на объекте без предварительных расчетов. При моделировании системы можно принять следующие значения параметров регулятора $K_p = 10$, $T_n = 2$ с.

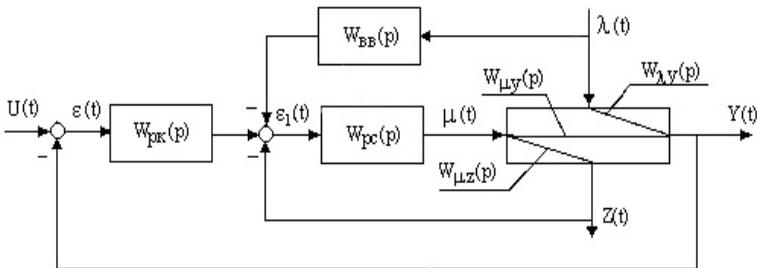


Рис. 8.3. Структурная схема двухконтурной системы регулирования с компенсацией внешнего возмущения

$Y(t)$, $Z(t)$ - основная и вспомогательная регулируемые величины;

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

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

$W_{\lambda y}(p)$, – передаточная функция объекта по каналу внешнего возмущающего воздействия;

$W_{\mu z}(p)$, $W_{\mu y}(p)$ – передаточные функции каналов объекта, связывающих регулирующее воздействие с основной и вспомогательной регулируемыми величинами;

$W_{pc}(p)$, $W_{pk}(p)$, $W_{vb}(p)$ – передаточные функции стабилизирующего регулятора, корректирующего регулятора и устройства ввода возмущения.

Вторым контуром является система стабилизации уровня воды в барабане корректирующим регулятором с коэффициентом передачи. В качестве корректирующего регулятора на практике часто используется П-регулятор, роль которого выполняет коэффициент K_1 передачи канала по уровню воды в барабане парогенератора (рис.8.1.). Оптимальное значение параметра настройки этого регулятора определяется методами теории автоматического регулирования в соответствии с принятым критерием оптимальности. Именно это значение определяет устойчивость системы регулирования уровня воды в барабане парогенератора.

Необходимо отметить, что при реализации алгоритмов управления в микропроцессорных контроллерах могут применяться и другие законы регулирования для корректирующего регулятора (в частности, ПД-закон регулирования).

Канал объекта «расход пара – уровень воды в барабане» не является каналом передачи регулирующего воздействия, а является каналом внешнего контролируемого возмущения и никакие воздействия, поступающие по этому каналу, не могут нарушить устойчивость системы. Поэтому блок K_3 на рис. 8.1 необходимо рассматривать как устройство ввода возмущения.

Очевидно, что структура устройства ввода возмущения определяется из условия инвариантности системы по отношению к входному сигналу и зависит от передаточных функций объекта по каналам возмущающего и регулирующего воздействий. Частным случаем устройства ввода возмущения может быть и пропорциональное звено.

4. Структурная схема модели автоматической системы регулирования уровня в барабане парогенератора

Структурная схема модели автоматической системы регулирования уровня в барабане парогенератора приведена на рис. 8.4. Пунктирными линиями обведены модели объекта и устройства ввода возмущения. Модели измерительных преобразователей выделены темным цветом.

Модели объекта по различным каналам, приведенные на схеме, соответствуют моделям, показанным на рис. 8.2.

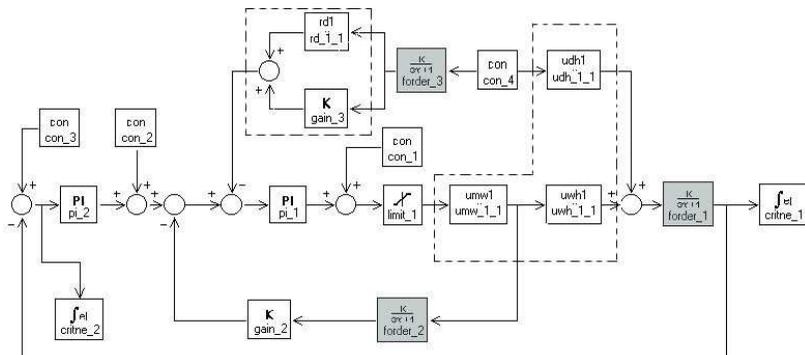


Рис. 8.4. Структурная схема модели автоматической системы регулирования уровня в барабане парогенератора

umw1 – модель объекта по каналу «перемещение регулирующего органа – расход питательной воды»;

uwh1 – модель объекта по каналу «расход питательной воды – уровень в барабане»;

udh1 – модель объекта по каналу «расход пара – уровень в барабане»;

rd1 – модель реально-дифференцирующего звена.

В работе предлагается использовать структуру устройства ввода возмущения в виде параллельного соединения пропорционального звена с отрицательным значением коэффициента $K_3 = -T_3/T_1$ и реального дифференцирующего звена. Структурная схема модели устройства ввода возмущения

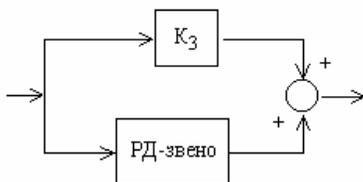


Рис. 8.5. Структурная схема модели устройства ввода возмущения

приведена на рис.8.5.

В программе моделирования динамических систем "20-sim 2.3 Pro" отсутствует стандартный блок модели реально-дифференцирующего звена. Поэтому в работе предлагается сформировать такой блок как параллельное соединение пропорционального и аperiodического звеньев. То есть, из переходной характеристики пропорционального звена с коэффициентом передачи равным едини-

це.

це необходимо вычсть переходную характеристику аperiodического звена также с единичным коэффициентом передачи.

Значение коэффициента передачи реально-дифференцирующего звена K_D устанавливается отдельно, а значение постоянной дифференцирования T_D задается постоянной времени аperiodического звена.

На рис. 8.6 приведена структурная схема модели реально-дифференцирующего звена и графики, иллюстрирующие формирование его переходной характеристики.

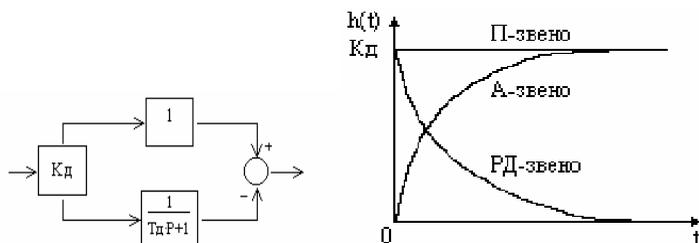


Рис. 8.6. Структурная схема модели реально-дифференцирующего звена

На рис. 8.7 приведены графики переходных характеристик объекта, полученные на выходе измерительных преобразователей. а на рис. 8.8 – результаты исследования системы регулирования уровня в паро-

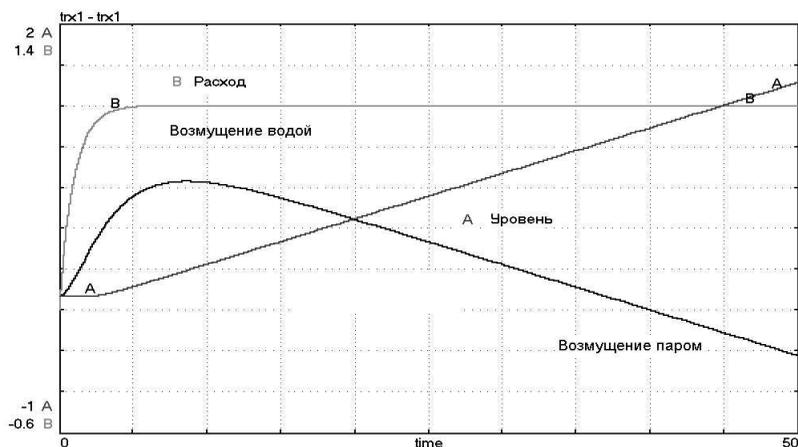


Рис. 8.7. Графики переходных характеристик объекта, полученные на выходе измерительных преобразователей

генераторе с корректирующим П-регулятором как с компенсацией, так и без компенсации возмущения по расходу пара.

При моделировании использовались следующие исходные данные.

Объект:

а) расход питательной воды – уровень в барабане

$$W_{D_{в-L}}(p) = \frac{e^{-p\tau}}{T_3 p} \left[\frac{\text{мм}}{\text{кг/с}} \right], \quad \text{где } T_3 = T_1, \tau = 2 \text{ с.}$$

б) расход пара – уровень в барабане

$$W_{D_{п-L}}(p) = \frac{K_L}{T_2 p + 1} - \frac{1}{T_1 p} \left[\frac{\text{мм}}{\text{кг/с}} \right], \quad \text{где } K_L = 1.2, T_2 = 3 \text{ с.}, T_1 = 30 \text{ с.}$$

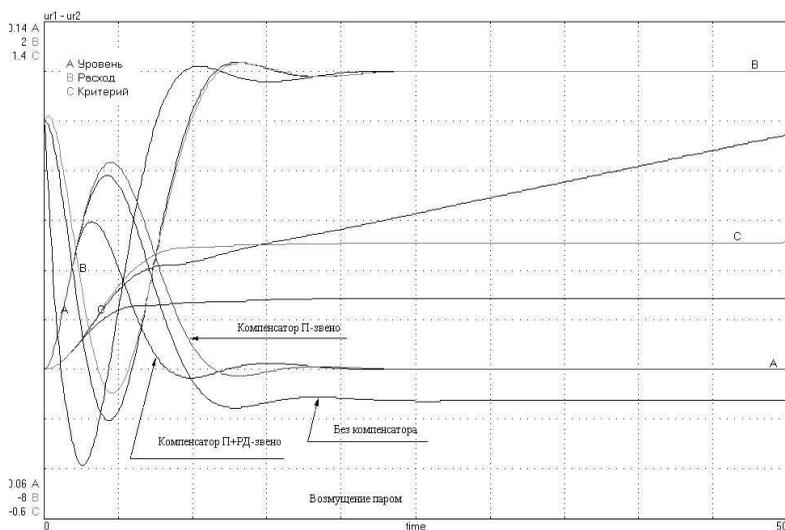


Рис. 8.8. Результаты исследования системы регулирования уровня в парогенераторе с корректирующим П-регулятором с компенсацией и без компенсации возмущения по расходу пара

в) перемещение регулирующего органа – расход питательной воды

$$W_{\mu-D_B}(p) = K_{D_B} \left[\frac{\text{кг/с}}{\% \text{УУ}} \right], \text{ где } K_{D_B} = 0,9.$$

Измерительные преобразователи $W_{\text{ин}}(p) = \frac{1}{T_4 p + 1}$, где $T_4 = 1 \text{ с}$.

Ограничение $\min = -10, \max = 10$.

Регуляторы: ПИ - регулятор - $K_p = 10, T_i = 2 \text{ с}$.

П - регулятор - $K_p = K_1 = 3$.

Коэффициенты ввода сигналов по питательной воде и пару $K_2 = 1$;
 $K_3 = -1$.

Порядок выполнения работы

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

Задание 1. Моделирование динамических характеристик объекта

1.1. Набрать модели объекта управления по каналам:

- расход пара – уровень воды в барабане;
- расход питательной воды – уровень воды в барабане;
- перемещение регулирующего органа – расход питательной воды,

Набрать модель реально-дифференцирующего звена.

Полученные модели сохранить в виде подмоделей.

Исходные данные для моделей динамических характеристик объекта задаются преподавателем.

1.2. Набрать модель автоматической системы регулирования уровня воды в барабане парогенератора в соответствии со структурной схемой моделирования, приведенной на рис. 8.4.

1.3. Подготовить эксперимент для моделирования переходных характеристик объекта, задав необходимые значения параметров моделей объекта, регуляторов и измерительных преобразователей. Значения постоянных времени измерительных преобразователей принять

равными $T_4 = 1$ с., $K = 1$, а параметры ограничения **limit** – $\min = -10$, $\max = 10$. При этом стабилизирующий ПИ регулятор должен быть отключен. Для отключения регулятора достаточно установить значение коэффициента передачи K_p регулятора равным нулю.

1.4. Провести моделирование переходных характеристик объекта, подав последовательно ступенчатые возмущения по расходу питательной воды и пара. Вывести на экран графики изменения регулируемых величин (уровень и расход воды) на выходе измерительных преобразователей (все переходные характеристики на одном рисунке).

В отчете по первому пункту задания привести:

- схему моделирования трехимпульсной АСР уровня в барабане парогенератора;
- передаточные функции каналов объекта регулирования и структурные схемы их моделей;
- графики переходных характеристик объекта (все переходные характеристики расположить на одном рисунке).

Задание 2. Исследование системы регулирования уровня с корректирующим П – регулятором

2.1. Включить в работу внутренний контур АСР – стабилизации расхода питательной воды. Установить $K_2 = 1$, ПИ – регулятор: $K_p = 10$, $T_i = 2$ с. Провести моделирование работы системы при воздействии по каналу расхода питательной воды, предусмотрев вывод на экран графиков регулирующего воздействия на выходе блока ограничения и регулируемых величин (уровень воды в парогенераторе и расход питательной воды).

2.2. Включить в работу внешний контур АСР – регулятор стабилизации уровня воды в барабане парогенератора. Превратить используемый во внешнем контуре корректирующий ПИ-регулятор в П-регулятор, установив начальные значения его параметров: $K_p = 10$, $T_i = 10^6$. Убедиться в работоспособности системы регулирования и затем провести оптимизацию значения параметра настройки регулятора при ступенчатом возмущении по каналу задания (con_2) ПИ-регулятору внутреннего контура по критерию минимума интеграла от модуля изменения рассогласования на входе в П-регулятор (critne_2).

2.3. Провести моделирование работы системы при возмущении по расходу пара (con_4) без устройства ввода возмущения. В модели измерительного преобразователя на входе устройства ввода возмущения задать $K = 0$. Записать величину остаточного отклонения регулируемой величины (уровня воды в парогенераторе).

2.4. Включить в работу устройство ввода возмущения, задав в модели измерительного преобразователя на его входе $K = 1$. Найти оптимальные значения параметров настройки устройства ввода возмущения для системы с корректирующим П-регулятором по критерию минимума интеграла модуля изменения регулируемой величины (critne_1). При поиске минимума критерия изменяемыми параметрами являются K_2 , K_3 , K_d и T_d , причем K_3 имеет отрицательное значение. Сделать вывод об изменении качества процесса регулирования при включении в работу устройства ввода возмущения.

2.5. Изменить структуру устройства ввода возмущения, превратив его в пропорциональное звено, для чего установить $K_d = 0$. Установить значение коэффициента $K_3 = -K_2$. Получить переходный процесс в системе регулирования с корректирующим П- и стабилизирующим ПИ-регуляторами при возмущении по расходу пара. Провести анализ изменения процесса регулирования.

В отчете по второму пункту задания привести:

- оптимальные значения параметров настройки регуляторов и устройства ввода возмущения и значения критериев оптимальности;
- графики переходных процессов в системе с корректирующим П- и стабилизирующим ПИ- регуляторами при возмущении по каналу расхода питательной воды;
- графики переходных процессов при возмущении по каналу расхода пара в системе с различными вариантами устройства ввода возмущения (без РД-звена и с РД-звеном) и без него (на одном рисунке);
- * рассчитать КЧХ идеального устройства ввода возмущения.

Задание 3. Исследование системы регулирования уровня с корректирующим ПИ- регулятором

3.1. Изменить закон регулирования корректирующего регулятора с П на ПИ, введя начальное значение T_i (например, $T_i = 20$ с.). Провести оптимизацию значений параметров настройки корректирующего регулятора при ступенчатом возмущении по каналу задания стабилизирующему ПИ-регулятору расхода питательной воды по критерию минимума интеграла от модуля изменения рассогласования на входе настраиваемого регулятора (см.п. 2.2). Повторить опыт с П-регулятором, совместить полученные результаты для корректирующего П- и ПИ-регуляторов и оценить изменения процесса регулирования уровня в парогенераторе. Сделать вывод о влиянии закона регулирования на вид переходного процесса.

3.2. Провести моделирование работы системы при возмущении по расходу пара без устройства ввода возмущения (в модели измерительного преобразователя на входе УВВ задать $K = 0$). Записать величину остаточного отклонения регулируемой величины (уровня воды в парогенераторе).

3.3. Включить в работу устройство ввода возмущения. В модели измерительного преобразователя на его входе задать $K = 1$). Найти оптимальные значения параметров настройки устройства ввода возмущения для системы с корректирующим ПИ-регулятором по критерию минимума интеграла модуля изменения регулируемой величины (уровня). При поиске минимума изменяемыми параметрами являются K_2 , K_3 , K_d и T_d , причем K_3 имеет отрицательное значение. Получить переходный процесс в системе при оптимальных значениях параметров настройки устройства ввода возмущения. Сделать вывод об изменении качества процесса регулирования.

3.4. Установить значение коэффициента измерительного преобразователя устройства ввода возмущения равным 1, $K_3 = -K_2$, $K_d = 0$ (без РД-звена) и получить переходный процесс в системе регулирования с корректирующим ПИ- и стабилизирующим ПИ-регуляторами при возмущении по расходу пара. Провести анализ изменения процесса регулирования.

В отчете по третьему пункту задания привести:

- оптимальные значения параметров настройки регуляторов и устройства ввода возмущения и значения критериев оптимальности.

- графики переходных процессов в системе с корректирующим и стабилизирующим ПИ- регуляторами при возмущении по каналу расхода питательной воды.
- графики переходных процессов при возмущении по каналу расхода пара в системе с различными вариантами устройства ввода возмущения и без него (на одном рисунке).

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Написать условие инвариантности выходной величины к возмущению по расходу пара и вывести передаточную функцию идеального устройства ввода возмущения с учетом внутреннего контура для исходных данных, использовавшихся в работе.

2. Для одноконтурной системы регулирования с ПИ-регулятором и объектом по регулирующему каналу в виде трех последовательно соединенных апериодических звеньев с одинаковыми постоянными времени, а по каналу контролируемого возмущения - в виде последовательного соединения апериодического звена и звена транспортного запаздывания определить передаточную функцию идеального устройства ввода возмущения

3. Как изменится вид переходных процессов на выходе одноконтурной АСР с П-регулятором при увеличении (уменьшении) значения коэффициента передачи регулятора в 2 раза, если объект задан передаточной функцией $W_{\mu y}(p)$, а $K_n = 2$?

4. Определить установившееся значение уровня в барабане, при изменении задания регулятору на 1%.

5. Как изменится закон регулирования, если ПИ-регулятор охватить жесткой отрицательной обратной связью по положению регулирующего органа?

6. Получить выражение для КЧХ идеального устройства компенсации и определить чему равно ее значение при частоте равной нулю.

7. Для одноконтурных систем регулирования с П и ПИ-регуляторами и объектом в виде апериодического звена нарисовать примерные виды переходных процессов при ступенчатых воздействиях со стороны:

- задания;
- регулирующего органа;
- возмущения, приведенного к выходу объекта.

ДВУХСВЯЗНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель лабораторного занятия

Целью лабораторного занятия является моделирование двухсвязной системы регулирования с ПИ-регуляторами: без учета перекрестных связей, с учетом перекрестных связей, с включением в систему компенсатора и получение переходных процессов на выходе системы при воздействиях по различным каналам.

Задание на работу

Подготовить структурную схему модели двухсвязной АСР с двумя ПИ - регуляторами. Определить оптимальные значения параметров настройки регуляторов и компенсатора по минимуму заданного критерия. Провести моделирование системы: без учета перекрестных связей, без компенсации перекрестных связей и с компенсатором. Сделать вывод об эффективности рассмотренных вариантов двухсвязной системы регулирования, а также по сравнению с эффективностью двух автономных одноконтурных систем.

Методические указания

1. Двухсвязная автоматическая система регулирования

К двухсвязным системам регулирования относятся такие, у которых имеются две регулируемые величины и два регулирующих воздействия, причем возмущение по одному из них вызывает изменение обеих регулируемых величин.

Рассмотрим двухсвязную систему регулирования на примере АСР подачи топлива и питательной воды прямоточного котла энергоблока ТЭС.

Прямоточный котел как объект регулирования температуры пара в промежуточной точке пароводяного тракта и электрической мощности энергоблока является объектом с перекрестными связями. При увеличении расхода топлива увеличивается генерация пара. При этом возрастают его температура, давление и расход по тракту котла и, следовательно, растет мощность энергоблока.

При увеличении расхода питательной воды температура по тракту котла уменьшается. Это обусловлено тем, что на нагрев большего количества воды требуется больше тепла, следовательно, длина испарительной зоны увеличивается, а зоны перегрева сокращается. Мощность энергоблока при этом сначала возрастет, но при постоянном расходе топлива влияние расхода питательной воды на мощность со временем уменьшается за счет работы регуляторов впрыска.

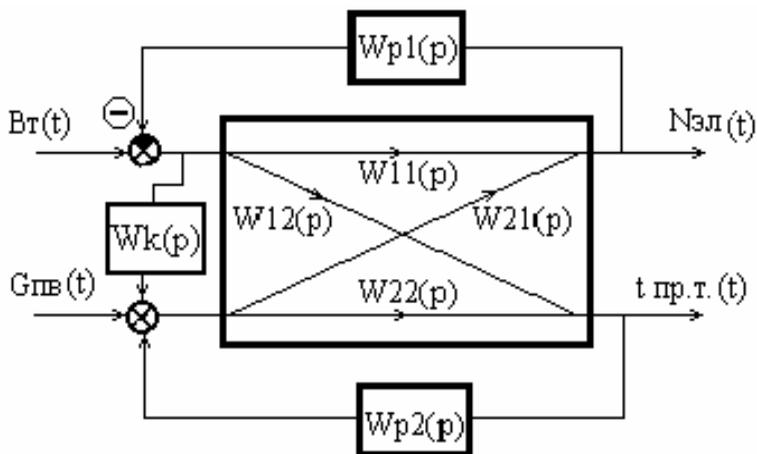


Рис. 9.1. Двухсвязная АСР подачи топлива и питательной воды

$B_T(t)$ – расход топлива, $G_{ПВ}(t)$ – расход питательной воды, $N_{эл}(t)$ – мощность энергоблока, $t \text{ пр.т.}(t)$ – температура в промежуточной точке пароводяного тракта. $W_{p1}(p)$, $W_{p2}(p)$, $W_k(p)$ – передаточные функции регуляторов и компенсатора, $W_{11}(p)$, $W_{22}(p)$, $W_{12}(p)$, $W_{21}(p)$ – передаточные функции объекта при воздействиях по каналам расхода топлива и питательной воды.

Расчетная схема двухсвязной АСР мощности энергоблока и температуры в промежуточной точке пароводяного тракта котла показана на рис. 9.1. Нетрудно видеть, что наличие перекрестных связей в объ-

екте приводит к появлению положительных обратных связей в двухсвязной системе регулирования и опасности потери устойчивости системы.

Изменение значений регулируемых величин из-за перекрестных связей в объекте можно рассматривать как результат внешнего контролируемого возмущения, действующего на регулируемую величину, которое можно компенсировать, введя соответствующее компенсирующее устройство от одной системы регулирования к другой системе. В то же время, ввод компенсирующего устройства изменяет динамические свойства замкнутого контура и его устойчивость, что приводит к необходимости применения сложной последовательной процедуры настройки регуляторов и компенсаторов.

Задачу динамической настройки таких систем можно несколько упростить, если в рассматриваемой двухсвязной системе использовать только один компенсирующий блок: от системы регулирования мощности к системе регулирования температуры в промежуточной точке (реализация принципа односторонней автономности). При достаточной точной компенсации воздействия одной системы регулирования на другую, системы как бы «развязываются», уменьшается количество замкнутых контуров, и соответственно уменьшается опасность потери устойчивости.

Кроме того, стабилизация температуры в промежуточной точке снижает влияние внешних возмущений на систему регулирования мощности.

2. Динамические характеристики объекта регулирования

Передаточные функции объекта при воздействии по каналам расхода топлива и питательной воды можно представить в следующем виде [4]:

$$1) \quad W_{11}(p) = 2,46 \cdot \frac{33,5 \cdot p + 1}{(35,6 \cdot p + 1)^4}, \left[\frac{\text{МВт}}{\% \text{УП(топл.)}} \right].$$

$$2) \quad W_{22}(p) = -2,97 \cdot \frac{1}{(98,5 \cdot p + 1)^2}, \left[\frac{^{\circ}\text{С}}{\% \text{УП(пит. воды)}} \right].$$

$$3) \quad W_{12}(p) = 2,89 \cdot \frac{46,2 \cdot p + 1}{(74,2 \cdot p + 1) \cdot (37,8 \cdot p + 1)^3}, \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{УП}(\text{топл.})} \right].$$

$$4) \quad W_{21}(p) = 1,52 \cdot \frac{480 \cdot p}{(240 \cdot p + 1)^2}, \left[\frac{\text{МВт}}{\% \text{УП}(\text{пит. воды})} \right].$$

Необходимо отметить, что коэффициент передачи в передаточной функции $W_{22}(p)$ имеет отрицательное значение, что отражает тот факт, что при увеличении расхода питательной воды температура по тракту котла уменьшается.

переходные характеристики объекта при возмущениях расходом топлива и питательной водой для приведенных передаточных функций показаны на рис. 9.2.

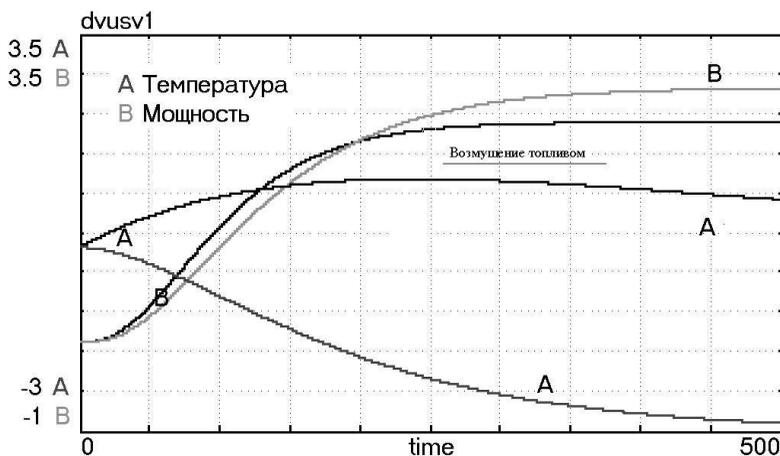


Рис. 9.2. Переходные характеристики объекта при возмущении по каналам расхода топлива и питательной воды

3. Структурная схема модели двухсвязной автоматической системы регулирования

Структурная схема модели двухсвязной автоматической системы регулирования подачи топлива и питательной воды, используемая в

работе, приведена на рис. 9.3. Здесь в качестве входных воздействий по каналам регулирующих органов используются импульсные воздействия. Это связано с необходимостью ограничения площади под кривой переходного процесса, которая используется в интегральном критерии оптимальности.

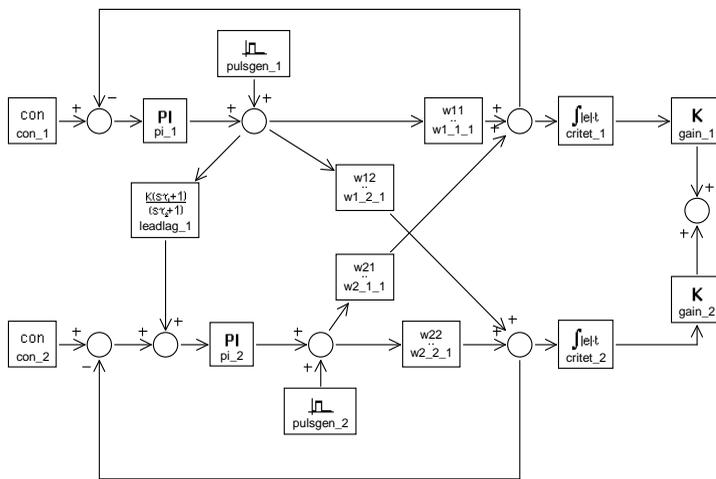


Рис. 9.3. Структурная схема двухсвязной АСР с компенсатором, используемая для уточнения настроек регуляторов

При поиске оптимальных значений параметров настройки регуляторов такие воздействия дают возможность устранить постоянную составляющую в воздействии по каналам перекрестных связей. Такое воздействие является следствием нового значения положения регулирующего органа при ступенчатом возмущении в настраиваемом контуре регулирования. При импульсном входном воздействии регулирующий орган возвращается в исходное положение после окончания импульса.

Для определения реакции системы на ступенчатое входное воздействие на модели необходимо установить время окончания импульса, превышающее длительность переходного процесса.

4. Исследование системы регулирования без учета перекрестных связей

В том случае, если взаимное влияние перекрестных связей в объекте на регулируемые величины мало и их можно не учитывать, двухсвязная система распадается на две независимые (автономные) одноконтурные системы. Эти системы показаны на рис. 9.4.

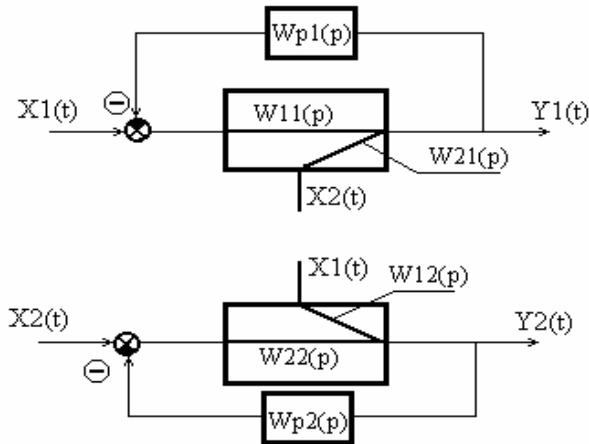


Рис. 9.4. Структурная схема двухсвязной АСР без учета перекрестных связей

Динамическая настройка таких автономных систем не представляет трудностей и может быть определена поиском минимума заданного критерия оптимальности.

Результатом моделирования систем без учета перекрестных связей являются процессы регулирования по каналам регулирующего и внешнего воздействия для каждого объекта (каналы $B_T - N_{эл}$, $G_{пв} - N_{эл}$, $G_{пв} - t_{пр.т}$, $B_T - t_{пр.т}$)

5. Определение настроек ПИ - регуляторов в двухсвязной системе регулирования

Расчет оптимальных значений параметров настроек ПИ - регуляторов в двухсвязной системе регулирования осуществляется по ком-

плексным частотным характеристикам эквивалентных объектов, передаточные функции которых имеют вид:

А. Для регулятора мощности

$$W_{p1}(p) = \frac{W_{11}(p) + W_{p2}(p) \cdot [W_{11}(p) \cdot W_{22}(p) - W_{12}(p) \cdot W_{21}(p)]}{1 + W_{22}(p) \cdot W_{p2}(p)}.$$

Б. Для регулятора питания

$$W_{p2}(p) = \frac{W_{22}(p) - W_{p1}(p) \cdot [W_{11}(p) \cdot W_{22}(p) - W_{12}(p) \cdot W_{21}(p)]}{1 + W_{11}(p) \cdot W_{p1}(p)}.$$

При расчете регуляторов на заданную степень колебательности $m = 0,366$ были получены следующие настройки:

$$\begin{aligned} \text{для } W_{p1}(p) &- K_{p1} = 0,54; & T_{и1} &= 122 \text{ с.}; \\ \text{для } W_{p2}(p) &- K_{p2} = -0,45; & T_{и2} &= 150 \text{ с.}; \end{aligned}$$

Поиск оптимальных значений параметров настроек ПИ-регуляторов в двухсвязной системе регулирования осуществляется минимизацией выбранного критерия оптимальности.

Так как в рассматриваемой системе регулирования необходимо минимизировать отклонения и мощности энергоблока и температуры в промежуточной точке пароводяного тракта, то общий критерий оптимальности системы J можно представить как сумму частных критериев по каждой регулируемой величине

$$J = K_1 \cdot J_1 + K_2 \cdot J_2,$$

где K_1 и K_2 коэффициенты, выравнивающие чувствительность общего критерия оптимальности системы к изменению частных критериев.

В качестве частного критерия оптимальности выберем модульный интегральный критерий с весовой функцией времени, т. е. в подынтегральной функции модуль значения ординаты кривой процесса регулирования умножается на соответствующее ей значение времени

$$J = \int |Y(t)| \cdot t \, dt.$$

Поскольку коэффициенты передачи объекта по каналам $B_T - N_{эл}$ и $G_{пв} - t_{пр.т}$ примерно равны, то оба процесса имеют примерно одинаковое значение частных критериев и одинаково влияют на изменение общего критерия оптимальности системы при варьировании значений параметров настройки каждого регулятора. Поэтому значения коэффициентов K_1 и K_2 можно принять равными единице. Тогда общий критерий оптимальности системы будет иметь вид

$$J = J_1 + J_2 = \int |N_{эл}(t)| \cdot t \, dt + \int |t_{пр.т.}(t)| \cdot t \, dt.$$

Поиск оптимальных значений параметров настроек ПИ – регуляторов осуществляется в разделе меню **Multiple Run Editor**. Здесь необходимо выбрать режим **Optimization**, задать блок, где формируется значение критерия (**Choose Variable**), указать метод поиска экстремума, например, метод деформируемого многогранника (Davidson Fletcher Powell), задать варьируемые параметры и диапазоны изменения их значений. Максимальное число варьируемых параметров модели – восемь.

Из рис. 9.3 видно, что минимизируемый общий критерий оптимальности J формируется в блоке **plus** и является суммой частных критериев по каждой регулируемой величине.

В нашем случае необходимо варьировать четыре параметра: K_{p1} , $T_{и1}$, K_{p2} , $T_{и2}$. Допускается (для грубой настройки) сначала варьировать отдельно коэффициенты пропорциональности, затем отдельные постоянные времени (с другим начальным шагом), и уже на последнем этапе варьирование 4-х настроек одновременно (для точной настройки).

В качестве начальной точки для настройки регуляторов можно установить K_p из условия $K_p \cdot K_{об} = 1,5$, а T_i равное сумме постоянных времени знаменателя и транспортного запаздывания.

На рис. 9.5 приведены графики процессов, полученные при моделировании двухсвязной АСР без компенсации перекрестных связей.

6. Выбор структуры и расчет параметров компенсирующего устройства

Расчетная схема двухсвязной АСР с односторонней компенсацией перекрестных связей показана на рис. 9.1. Идеальный компенсатор рассчитывается из условия инвариантности:

$$W_k(p) = -\frac{W_{12}(p)}{W_{22}(p)}.$$

Так как в нашем случае передаточная функция идеального компенсатора получается очень сложной, то можно ограничиться выполнением условия компенсации на резонансной частоте замкнутого контура с регулятором питания $W_{p2}(p)$, которая для приведенных исходных данных равна: $\omega_{рез} = 0,018$ рад/с.

При выборе компенсирующего устройства надо учитывать так же инвариантность на нулевой частоте. Поэтому выберем компенсатор в виде параллельного соединения двух звеньев: пропорционального с коэффициентом:

$$K = -\frac{K_{12}}{K_{22}}$$

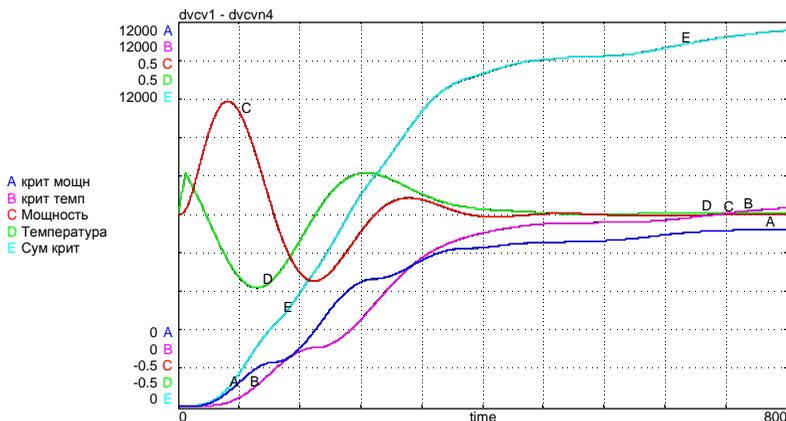


Рис. 9.5. Графики процессов, полученные при моделировании двухсвязной АСР без компенсации перекрестных связей

и динамического, вектор которого на резонансной частоте имеет координаты:

$$W_d(\omega_{pez}) = \operatorname{Re}(W_k(\omega_{pez}) - K) + i \cdot \operatorname{Im}(W_k(\omega_{pez}))$$

Передаточная функция компенсирующего устройства будет иметь следующий вид:

$$W_k(p) = K + W_d(p).$$

Для реализации $W_d(i\omega)$ выберем реально - дифференцирующее звено со следующими параметрами:

$$W_d(p) = K_d \cdot \frac{T_d \cdot p}{T_d \cdot p + 1},$$

где:

$$T_d = \frac{1}{\omega_{pez} \cdot \operatorname{tg}[\varphi(\omega_{pez})]}; \quad K_d = \frac{A_d(\omega_{pez})}{\cos[\varphi(\omega_{pez})]}.$$

В нашем случае параметры настройки компенсирующего устройства имеют следующие значения:

$$K = 0,973; \quad K_d = -1,47; \quad T_d = 147,8 \text{ с.}$$

Моделирование реально-дифференцирующего звена рассмотрено в предыдущих работах (см. рис.8.6.).

После добавления в схему устройства компенсации необходимо уточнить настройки обоих регуляторов в связи с изменением передаточных функций эквивалентных объектов. Для этого необходимо вновь воспользоваться оптимизацией параметров по заданному критерию.

В результате процедуры уточнения были получены следующие настройки:

$$K_{p1} = 4,51; \quad T_{i1} = 6,6 \text{ с.} \quad K_{p2} = 1,73; \quad T_{i2} = 194,8 \text{ с.}$$

На рис. 9.6 приведены графики процессов, полученные при моделировании двухсвязной АСР с односторонней компенсацией перекрестных связей.

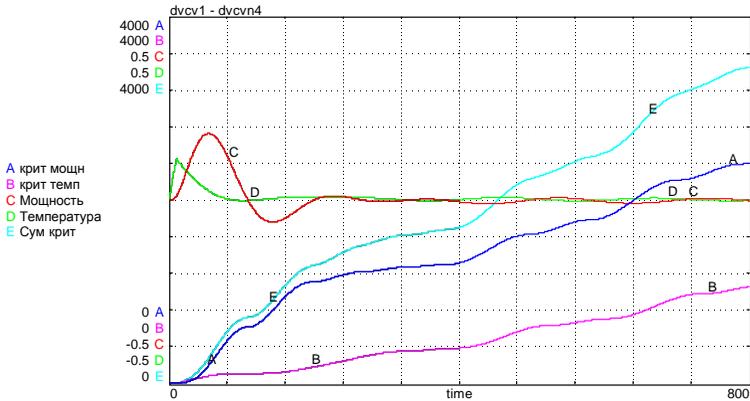


Рис. 9.6. Графики процессов, полученные при моделировании двухсвязной АСП с компенсацией перекрестных связей

Порядок выполнения работы

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

Задание 1. Подготовка исходных данных к выполнению исследований

1.1. Записать передаточные функции модели объекта для прямых и перекрестных связей объекта в соответствии с заданным вариантом. Исходные данные по вариантам получить у преподавателя.

1.2. Записать передаточные функции эквивалентных объектов $W_{Э1}(p)$, $W_{Э2}(p)$ для определения оптимальных значений параметров настройки регуляторов с учетом перекрестных связей объекта.

1.3. Рассчитать оптимальные значения параметров настройки ПИ-регуляторов по передаточным функциям объекта с учетом перекрестных связей объекта. Определить резонансные частоты каждого контура.

1.4. Рассчитать и построить КЧХ идеального компенсатора $W_k(i\omega)$. По виду КЧХ предложить структуру реального компенсатора и определить значения его параметров настройки.

1.5. Набрать модели динамических каналов объекта и сохранить их в виде подмоделей.

1.6. Набрать модель двухсвязной АСР с ПИ-регуляторами (рис.9.3).

1.7. Подготовить эксперимент, задав необходимые значения параметров моделей объекта, регуляторов, нулевые начальные условия, время моделирования. Вывести на экран графики изменения регулируемых величин.

1.8. Не включая в работу регуляторы, провести моделирование переходных характеристик по всем каналам объекта, подав последовательно ступенчатые возмущения по расходу топлива и питательной воды. Для отключения регуляторов достаточно установить значение коэффициентов передачи K_p регуляторов равным нулю.

В отчете по заданию 1 привести передаточные функции основных каналов объекта и эквивалентных объектов для каждого регулятора и графики переходных характеристик объекта расположить на одном рисунке.

Задание 2. Настройка и моделирование АСР без учета перекрестных связей в объекте

2.1. Определить параметры настройки регуляторов в одноконтурных системах при возмущении каналу регулирующего воздействия, используя заданный критерий оптимальности. Для отключения перекрестных связей достаточно установить значения коэффициентов передачи соответствующих передаточных функций равными нулю. На экран вывести графики изменения регулируемых величин и значения критериев оптимальности.

2.2. Провести моделирование работы автономных систем при найденных оптимальных значениях параметров настройки ПИ-регуляторов при возмущениях по каналам регулирующего и внешнего воздействий для обоих объектов без учета перекрестных связей.

В отчете по заданию 2 приводятся распечатки коэффициентов модели системы, полученные значения параметров настройки регуляторов, значения критериев оптимальности и графики изменения регулируемых величин при возмущениях по каналам регулирующего и внешнего воздействий.

Задание 3. Настройка и моделирование двухсвязной АСР с учетом перекрестных связей в объекте

3.1. Внести в предыдущую модель изменения, превратив ее в модель двухсвязной АСР. Для этого восстановить значения коэффициентов передачи соответствующих передаточных функций, ранее заданные равными нулю.

3.2. Провести моделирование работы системы при найденных оптимальных значениях параметров настройки ПИ-регуляторов для объекта без учета перекрестных связей. На экран вывести графики изменения регулируемых величин, частных и суммарного критериев оптимальности. Убедиться, что при настройках, рассчитанных в пренебрежении перекрестными связями, реальная двухсвязная АСР не работоспособна.

3.3. Провести процесс оптимизации параметров настройки регуляторов по заданному критерию.

3.4. Провести моделирование работы системы при найденных оптимальных значениях параметров настройки ПИ-регуляторов при раздельном и одновременном возмущениях по обоим каналам регулирующих воздействий.

В отчете по заданию 3 приводятся: значения параметров настройки ПИ-регуляторов, частных и суммарного критериев оптимальности, графики изменения регулируемых величин и выводы.

Задание 4. Моделирование двухсвязной АСР с односторонней компенсацией перекрестных связей

4.1. Провести оптимизацию значений параметров настройки компенсирующего устройства по заданному критерию при возмущении

расходом топлива. Выходную информацию о результатах моделирования оставить прежней.

4.2. Провести уточнение значений параметров настройки регуляторов и компенсирующего устройства, минимизируя заданный критерий оптимальности при вариации сразу всех настраиваемых параметров.

4.3. Провести моделирование работы системы при найденных оптимальных значениях параметров настройки ПИ-регуляторов и компенсирующего устройства при раздельном и одновременном возмущении по обоим каналам регулирующих воздействий. Сравнить процессы регулирования для всех рассмотренных случаев и сделать выводы.

В отчете по заданию 4 приводятся: уточненные значения параметров настройки ПИ-регуляторов, компенсирующего устройства, суммарного критерия оптимальности, графики изменения регулируемых величин и выводы.

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Сформулировать понятие устойчивости динамической системы и пояснить его на графиках переходных процессов в системе регулирования.
2. Получить выражение для передаточной функции эквивалентного объекта, используемое для настройки регулятора мощности котла.
3. Пояснить влияние перекрестных связей в объекте на качество работы двухсвязной системы регулирования.
4. Определение передаточной функции и КЧХ идеального компенсирующего устройства из условия инвариантности.
5. Определение структуры и значений коэффициентов реального компенсирующего устройства.
6. 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.
7. Нарисовать примерный вид переходного процесса на выходе системы регулирования с П-регулятором при ступенчатом воздействии.

вии по каналу регулирования (μ). Определить начальное и установившееся значения переходного процесса, если $K_{\Pi} = 2$, а

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

8. Показать последовательность взаимодействий элементов и каналов объекта двухсвязной системы регулирования, приводящей к образованию положительной обратной связи в системе.

ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАНЯТИЕ № 10

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КОМПЕНСАТОРЕ ОБЪЕМА РЕАКТОРА ВВЭР

Цель лабораторного занятия

Целью лабораторного занятия является моделирование и исследование системы регулирования давления в компенсаторе объема первого контура энергоблока АЭС с реактором ВВЭР с нелинейным регулятором при различных возмущениях с использованием программы моделирования динамических систем "20-sim 2.3 Pro".

Задание на работу

При подготовке к лабораторному занятию необходимо разработать структурную схему модели системы регулирования, определить значения вводимых коэффициентов модели объекта и параметры статических характеристик нелинейных элементов, реализующих диаграмму многопозиционного управления.

На занятии провести моделирование объекта, нелинейного регулятора, системы регулирования с переменной структурой при сложном входном воздействии и сделать вывод об эффективности регулятора при различных уровнях возмущений. Исследовать поведение системы регулирования при изменениях коэффициентов модели объекта.

Методические указания

1. Краткое описание АСР давления в компенсаторе объема

Автоматическая система регулирования давления в компенсаторе объема (КО) первого контура реактора ВВЭР является одной из наиболее важных систем регулирования. Она имеет два регулирующих воздействия.

1. При повышении давления в первом контуре в компенсаторе объема осуществляется впрыск теплоносителя из холодной нитки контура, что приводит к конденсации пара над уровнем теплоносителя и быстрому падению давления. Подача воды осуществляется вследствие разности давлений в холодной и горячей нитках, определяемой гидравлическим сопротивлением активной зоны.

2. При понижении давления в первом контуре в компенсаторе объема осуществляется включение мощных электронагревателей, за счет чего в нём происходит повышение температуры воды и ее частичное испарение. При повышении температуры воды в контуре часть ее поступает в КО, сжимает пар и давление повышается.

Типовая структурная схема регулирования основных параметров в компенсаторе объема первого контура энергоблока АЭС приведена на рис. 10.1 Логическое устройство 4, является, фактически, не-

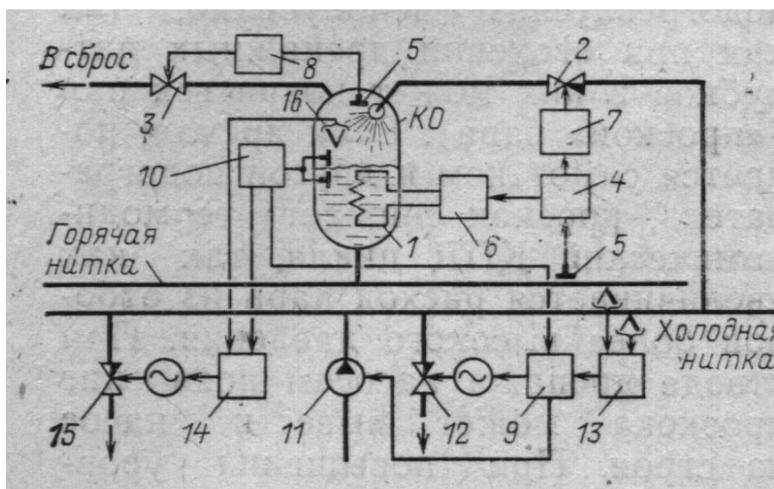


Рис. 10.1. Типовая структурная схема регулирования параметров в компенсаторе объема первого контура энергоблока АЭС

линейным многопозиционным регулятором, который реализует логическое управление нагревателями или клапанами впрыска при регулировании давления в компенсаторе объема.

Для реализации закона управления сигнал давления в первом контуре, измеряемый манометром 5, подается в логическое устройство 4, вырабатывающее дискретные сигналы, управляющие силовыми устройствами 6 нагревателей 1 или пусковыми устройствами 7 клапанов впрыска 2. Управление клапаном сброса 3 осуществляется независи-

мым логическим устройством 8, получающим сигнал от собственного манометра, что повышает надежность всей системы в аварийных ситуациях, так как сброс давления осуществляется и при отказе логического устройства 4.

Логическое устройство 4 воздействует на нагреватели или клапаны впрыска в соответствии с жесткой зависимостью от величины давления в компенсаторе объема. На рис. 10.2 приведена диаграмма много-

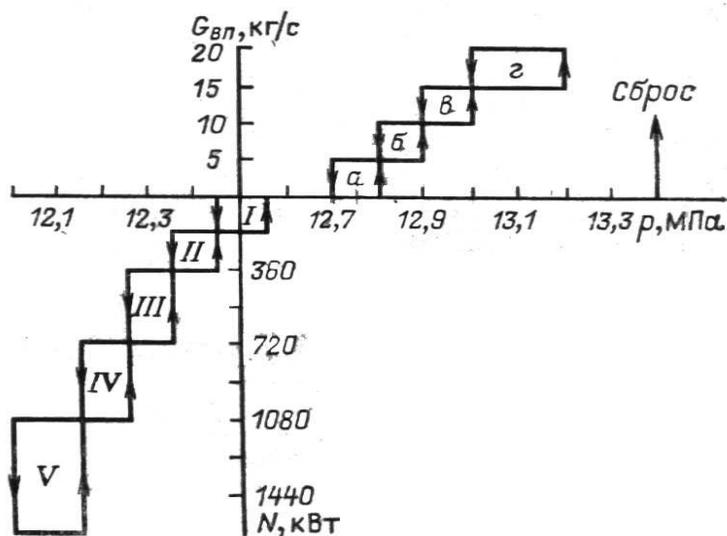


Рис 10.2. Диаграмма многопозиционного управления электронагревателями и клапанами впрыска для КО ВВЭР-440

позиционного управления электронагревателями и клапанами впрыска для КО ВВЭР-440.

Из рис. 10.2 видно, что группа I нагревателей мощностью 180 кВт включается при $P = 12,45$ МПа и выключается при $P = 12,55$ МПа; группа II мощностью также 180 кВт включается при $P = 12,35$ МПа и выключается при $P = 12,45$ МПа и т.д. Последняя группа V мощностью 720 кВт включается при больших падениях давления при $P = 12,0$ МПа и выключается при $P = 12,15$ МПа. Суммарная мощность нагревателей составляет 1800 кВт.

Клапан подачи охлаждающей воды на впрыск "а" открывается при $P = 12,8$ МПа, а закрывается при $P = 12,7$ МПа. Последний клапан

"з" открывается при $P = 13,2$ МПа, а закрывается при $P = 13,0$ МПа. Суммарный расход воды на впрыск при всех открытых клапанах составляет 20 кг/с.

2. Структурная схема автоматической системы регулирования давления в компенсаторе объема

Структурная схема автоматической системы регулирования давления в компенсаторе объема, приведена на рис. 10.3.

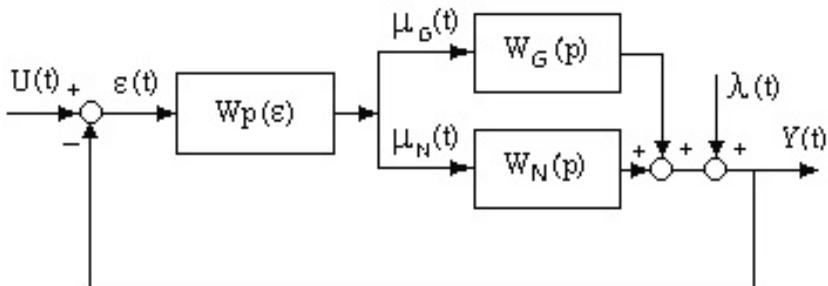


Рис. 10.3. Структурная схема автоматической системы регулирования давления в компенсаторе объема первого контура энергоблока АЭС
 $\lambda(t)$, $\mu(t)$, $U(t)$ - возмущающее, регулирующее и задающее воздействия;
 $Y(t)$, $\varepsilon(t)$ - регулируемая величина и рассогласование;
 $W_G(p)$, $W_N(p)$ - передаточные функции объекта относительно регулирующих воздействий;
 $W_p(\varepsilon)$ - логическое устройство (многопозиционный регулятор).

Индексом N отмечен канал «мощность нагревателей – давление в компенсаторе объема», а индексом G – канал «впрыск воды – давление в компенсаторе объема». Такая система, в которой регулятор, воздействуя на разные управляющие устройства, изменяет структуру управления, относится к системам с переменной структурой.

Динамические характеристики объекта регулирования в упрощенном виде могут быть представлены следующими передаточными функциями, отражающими различную инерционность каналов управления:

а) мощность нагревателей – давление в компенсаторе объема

$$W_N(p) = \frac{K_N}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}, \quad \text{где } K_N = 0.01; \quad T_1 = T_2 = 50 \text{ с.}$$

б) впрыск воды - давление в компенсаторе объема

$$W_G(p) = \frac{K_G}{(T_3 p + 1) \cdot (T_4 p + 1)}, \quad \text{где } K_G = -0.5, \quad T_3 = T_4 = 2 \text{ с.}$$

Регулятор формируется на базе типовых нелинейных элементов

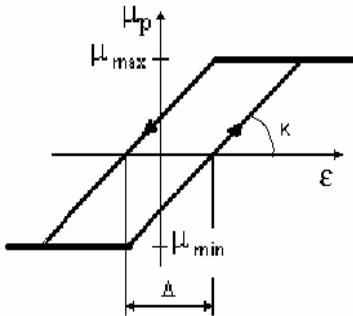


Рис. 10.4. Статическая характеристика реле с гистерезисом

типа реле с гистерезисом (hyst), каждый из которых реализует управление одной группой нагревателей или клапанов впрыска. Статическая характеристика реле с гистерезисом приведена на рис. 10.4. Она имеет четыре параметра настройки: зона возврата, величина верхнего и нижнего уровня выходного сигнала, коэффициент угла наклона характеристики. Для получения статической характеристики близкой к вертикальной значение коэффициента

угла наклона должно быть достаточно большим.

3. Структурная схема модели автоматической системы регулирования давления к компенсаторе объема

Структурная схема модели для исследования автоматической системы регулирования давления к компенсаторе объема приведена на рис. 10.5. Здесь показаны: модель объекта управления, регулятор (логическое устройство) и схема формирования входного возмущения.

Модель объекта регулирования выделена контурной линией.

Канал управления «мощность нагревателей – давление в компенсаторе объема» представлен двумя аperiodическими звеньями *forder1* и *forder2*, а канал управления «впрыск воды – давление в компенсаторе объема», соответственно – *forder3* и *forder4*.

Модель регулятора для дискретного управления давлением в компенсаторе объема в соответствии с диаграммой, приведенной на рис.10.3 содержит 9 типовых блоков реле с гистерезисом и индивидуальной настройкой каждого блока.

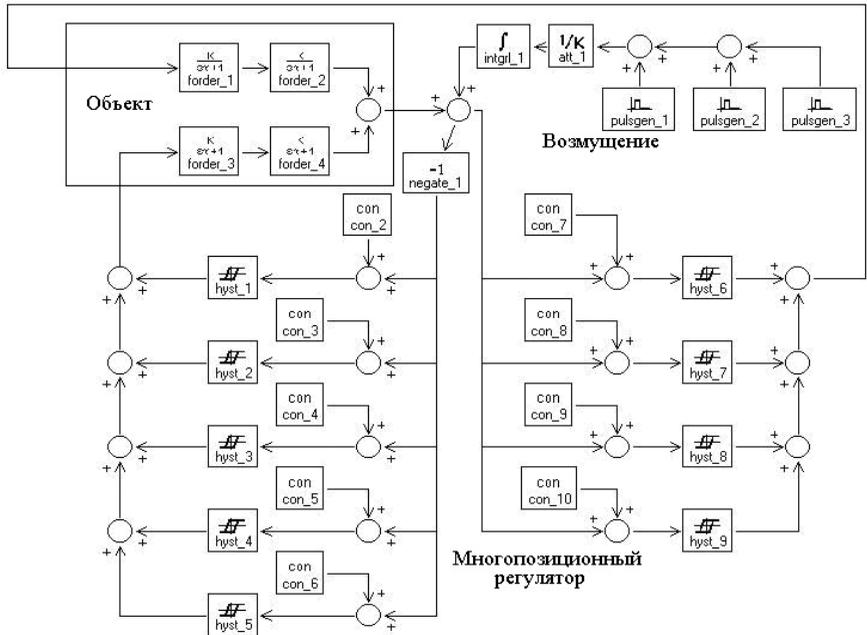


Рис. 10.5. Структурная схема модели для исследования системы регулирования в компенсаторе объема.

Для смещения нулевой точки статической характеристики нелинейного элемента относительно середины диаграммы дискретного управления электронагревателями и клапанами впрыска (12,6 МПа) используется сигнал в виде постоянной величины, задаваемый от источника входного воздействия (блок CON).

Параметры статической характеристики реле с гистерезисом $hyst_1$ для управления первой группой нагревателей имеют следующие значения: величина зоны возврата равна 0,1; величина верхнего уровня выходного сигнала 180; нижнего уровня выходного сигнала 0, угол наклона характеристики 100000; смещение (блок CON2) = - 0,1.

Аналогично настраиваются параметры статических характеристик других блоков реле с гистерезисом многопозиционного регулятора (логического устройства).

Для управления второй группой нагревателей $hyst_2$ изменяется только величина смещения (CON3 = - 0,2). Для управления третьей и четвертой группами нагревателей $hyst_3$ и $hyst_4$ изменяются соответственно: величина верхнего уровня выходного сигнала 360 и величина смещения (CON4 = - 0,3), (CON5 = - 0,4). Для управления пятой группой нагревателей $hyst_5$ изменяются: величина зоны возврата 0,15, величина верхнего уровня выходного сигнала 540 и величина смещения (CON6 = - 0,55).

Параметры статической характеристики реле с гистерезисом для управления группой «а» клапанов впрыска $hyst_6$ имеют следующие значения: величина зоны возврата равна 0,1; величина верхнего уровня выходного сигнала 5; нижнего уровня выходного сигнала 0, угол наклона характеристики 100000, смещение (блок CON7) = - 0,25. Для управления группами «б» и «в» клапанов впрыска $hyst_7$ и $hyst_8$ изменяется только величина смещения (CON8 = - 0,35), (CON9 = - 0,45). Для управления группой «г» клапанов впрыска $hyst_9$ величина зоны возврата равна 0,2, а величина смещения (CON10 = - 0,55).

Для исследования работы многопозиционного регулятора необходимо сформировать **входное возмущение**, обеспечивающее изменение давления на его входе во всем рабочем диапазоне. При моделировании системы регулирования можно ограничиться изменением давления относительно средней точки диаграммы дискретного управления электронагревателями и клапанами впрыска (рис. 10.2.), то есть не учитывать постоянную составляющую давления (12,6 МПа). Тогда входное возмущение, перекрывающее диапазон срабатывания логического элемента должно изменяться от +1 до -1. Такое возмущение можно сформировать с помощью импульсов с амплитудой ± 1 , подаваемых на вход интегратора. Скорость изменения входного воздействия определяется значением коэффициента на входе интегратора.

На рис.10.6 показана последовательность срабатывания клапанов впрыска и включения нагревателей для кусочно-линейного возмуще-

ния, подаваемого на вход многопозиционного регулятора (логического устройства).

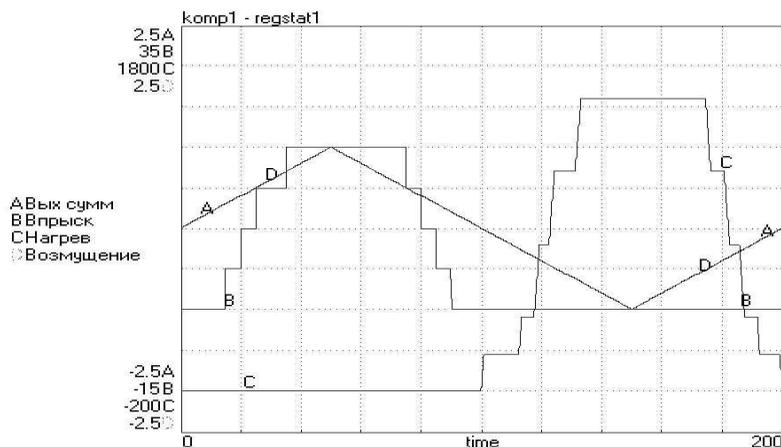


Рис. 10.6. Последовательность срабатывания клапанов впрыска и включения нагревателей для кусочно-линейного возмущения, подаваемого на вход логического элемента

На рис. 10.7. приведены результаты моделирования системы регулирования давления к компенсаторе объема для кусочно-линейного возмущения, подаваемого на вход логического устройства. Буквой А обозначен выход сумматора сигналов выхода объекта и входного возмущения (входной сигнал регулятора).

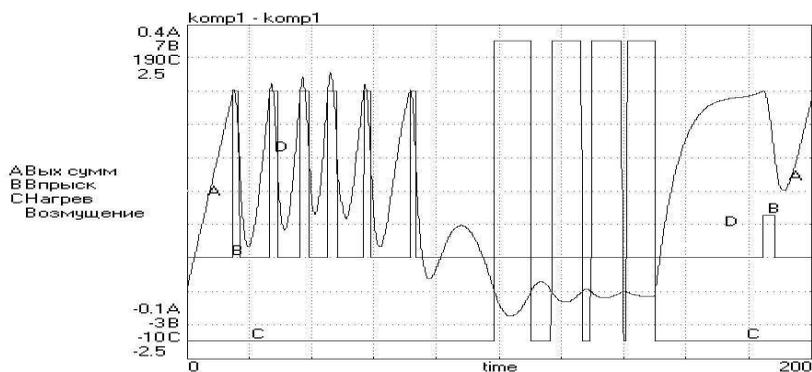


Рис. 10.7. Результаты моделирования системы регулирования давления в компенсаторе объема для кусочно-линейного возмущения, подаваемого на вход логического устройства

Если в качестве развертки графиков (ось X) вместо времени выбрать выход блока интегратора, то можно получить статическую характеристику многопозиционного регулятора, которая должна соответствовать диаграмме дискретного управления электронагревателями и клапанами впрыска для КО ВВЭР-440, приведенной на рис. 10.2. Для этого необходимо изменить в параметрах эксперимента **Plot Specification** параметр **X-Axis** → **Name** → **integr1_1outp**.

Порядок выполнения работы

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

Задание 1. Моделирование динамических характеристик объекта

1.1. Набрать модели объекта управления по каналам:

Мощность нагревателя – давление в компенсаторе объема;

Впрыск воды – давление в компенсаторе объема.

Сформировать ступенчатое возмущение по каждому из каналов регулирования.

1.2. Провести моделирование переходных характеристик объекта, подав последовательно единичное ступенчатое возмущение на вход каждого канала объекта. Вывести на экран графики изменения давления в компенсаторе объема.

В отчете по заданию 1 привести графики переходных характеристик объекта (на одном рисунке).

Задание 2. Моделирование многопозиционного регулятора

2.1. Набрать модель автоматической системы регулирования давления в компенсаторе объема в соответствии со структурной схемой моделирования, приведенной на рис. 10.5.

2.2. Подготовить статические характеристики нелинейных элементов, реализующих диаграмму дискретного управления электронагревателями и клапанами впрыска, задав для каждого элемента параметры статической характеристики реле с гистерезисом: величину зоны возврата, значения нижнего и верхнего уровня выходного сигнала, коэффициента угла наклона характеристики и смещение относительно середины диаграммы дискретного управления электронагревателями и клапанами впрыска, приведенной на рис. 10.2, т.е. 12,6 МПа.

2.3. Выбрать параметры импульсных воздействий и сформировать входное кусочно-линейное возмущение, подаваемое на выход объекта в виде линейного изменения сигнала от 0 до + 1 за 50 с., далее от + 1 до - 1 за следующие 100 с. и опять от - 1 до 0 за 50 с. Общее время действия возмущения – 200с. (рис 10.5)

2.4. Установить значения коэффициентов передачи объекта K_N и K_G равными нулю и провести моделирование работы регулятора во времени при сформированном возмущении, предусмотрев вывод на экран графиков:

А - входного возмущения;

В, С - управляющих воздействий.

2.5. Получить статическую характеристику многопозиционного регулятора, выбрав в качестве развертки графиков по оси X вместо времени выход блока интегратора. Для этого необходимо изменить в параметрах эксперимента **Plot Specification** параметр **X-Axis** → **Name** → **integr1_loutp**. Убедиться, что полученная статическая характеристика соответствует диаграмме дискретного управления электронагревателями и клапанами впрыска для КО ВВЭР-440, приведенной на рис.10.2.

В отчете по заданию 2 привести графики регулирующих воздействий, входного возмущения и статическую характеристику логического устройства.

Задание 3. Моделирование системы регулирования с многопозиционным регулятором

3.1. Установить значения коэффициентов передачи объекта (задаются преподавателем) и провести моделирование работы системы

регулирования при сформированном кусочно-линейном возмущении (п.2.3), предусмотрев вывод на экран графиков:

А - входного возмущения;

В, С - управляющих воздействий;

Д - выход сумматора сигналов выхода объекта и входного возмущения (входной сигнал регулятора).

3.2. Увеличить величину амплитуды импульсов, формирующих входное воздействие до 10 и повторить пункт 3.1.

3.3. Увеличить значение коэффициента передачи объекта по каналу мощность нагревателя – давление в компенсаторе объема в 5 раз и повторить пункт 3.2.

3.4. Сделать выводы о работе системы регулирования при различной скорости изменения давления в компенсаторе объема и влиянии величины коэффициента передачи объекта по каналу мощность нагревателя – давление в компенсаторе объема на точность поддержания давления на заданном уровне.

В отчете по заданию 3 привести графики изменения давления в компенсаторе объема (на входе в регулятор), управляющих воздействий и входного возмущения.

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Пояснить работу системы регулирования давления в компенсаторе объема.
2. Объяснить моделирование многопозиционного регулятора для управления давлением в компенсаторе объема в соответствии с диаграммой, приведенной на рис.10.2.
3. Пояснить формирование входного возмущения, обеспечивающего изменение давления в компенсаторе объема во всем диапазоне работы системы регулирования.
4. Объяснить получение на экране монитора статической характеристики логического устройства, соответствующей диаграмме дискретного управления электронагревателями и клапанами впрыска для компенсатора объема ВВЭР.
5. Нарисовать график изменения регулирующего воздействия при постоянном повышении давления от $P_{\text{мин}}$ до $P_{\text{макс}}$.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЛЕЙНО-ИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ СЕРВОМОТОРА ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

Цель лабораторного занятия

Целью лабораторного занятия является изучение принципа действия релейно-импульсного регулятора на основе сервомотора постоянной скорости с использованием программы моделирования динамических систем "20-sim 2.3 Pro".

Задание на работу

1. Реализация П-регулятора на основе сервомотора постоянной скорости.

Получить реакцию на ступенчатый входной сигнал для регулятора с сервомотором постоянной скорости и жесткой обратной связью. Определить экспериментальное значение коэффициента пропорциональности эквивалентного П-регулятора. Оценить влияние коэффициента обратной связи и скорости сервомотора на реакцию регулятора и его коэффициент пропорциональности.

2. Реализация релейно-импульсного ПИ-регулятора на основе сервомотора постоянной скорости.

Получить реакцию релейно-импульсного ПИ-регулятора на ступенчатый входной сигнал, провести ее аппроксимацию моделью идеального ПИ-регулятора, оценить экспериментальные значения параметров настройки. Выполнить анализ влияния уровня входного сигнала, параметров обратной связи, релейного элемента и скорости сервомотора на работу релейно-импульсного ПИ-регулятора и его параметры настройки.

3. Сравнение работы одноконтурной системы при различных способах задания модели регулятора.

Провести сравнение работы одноконтурной системы при различных способах задания модели регулятора и сделать вывод об их влиянии на вид переходных характеристик на выходе замкнутой системы регулирования.

Методические указания

1. Принцип действия релейно-импульсного регулятора

Большое количество объектов регулирования в энергетике, металлургии и других отраслях промышленности оснащено исполнительными механизмами (сервомоторами) на основе электропривода с постоянной скоростью перемещения. Такой исполнительный механизм может воспринимать сигнал управления, имеющий только три возможных значения: включить на «Больше», остановить, включить на «Меньше». При этом текущая скорость $S_m(t)$ перемещения выходного органа исполнительного механизма может иметь также только три значения, соответственно, $+S_m$; 0; $-S_m$, где S_m - номинальная скорость механизма. Величина S_m связана с паспортным значением T_m времени полного хода механизма (от 0 до 100 %) формулой

$$S_m = 100 / T_m, \quad (\%)/с.$$

Для приближенной реализации линейных законов регулирования в системах с исполнительными механизмами постоянной скорости используется плавное управление средней скоростью регулирующего воздействия с помощью импульсного сигнала управления, у которого амплитуда является постоянной, а изменяются временные характеристики, а именно, соотношение между длительностью импульсов и пауз.

Техническая реализация подобных регуляторов осуществляется с помощью регулирующих блоков с импульсным выходом в комплекте с механизмом постоянной скорости. На рис. 11.1 представлена структурная схема регулятора, содержащего исполнительный механизм постоянной скорости ИМ и регулирующий блок РБ с импульсным выходом.

Для реализации ПИ-закона регулирования типовая структура регулирующего блока с импульсным выходом содержит три основных узла: сумматор Σ , релейный элемент РЭ и функциональную инерционную обратную связь ИнОС, подключаемую с помощью перемычки I.

Релейный элемент имеет трехпозиционную характеристику с зоной нечувствительности Δ и зоной возврата Δ_v , приведенную на рис. 11.2, где $\sigma_{ср.}$ и $\sigma_{от}$ – пороги срабатывания и отпускания, причем $\Delta_v =$

$|\sigma_{cp} - \sigma_{от}|$, C – уровень выходного сигнала релейного элемента (принимаем $C=100\%$).

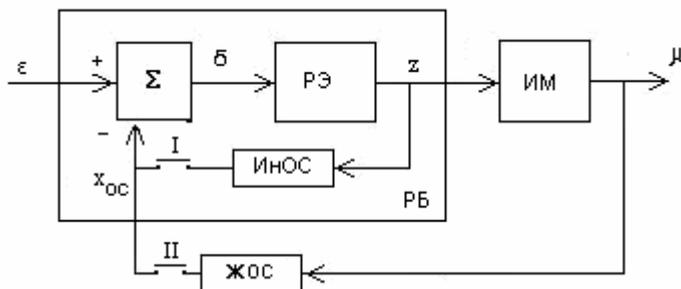


Рис. 11.1. Структурная схема регулятора с исполнительным механизмом постоянной скорости

Здесь: ИНОС - инерционная обратная связь; ЖОС - жесткая обратная связь; I – перемычка для ПИ- закона регулирования; II– перемычка для П- закона регулирования; ϵ - вход регулятора (расогласование между регулируемой величиной и ее заданным значением); x_{oc} – сигнал обратной связи; σ - выход сумматора, причем $\sigma = \epsilon - x_{oc}$; z – выход релейного элемента, μ – выход исполнительного механизма регулятора (регулирующее воздействие).

Формирование П-закона регулирования. Для формирования П-закона регулирования при использовании механизма постоянной скорости применяется схема с жесткой обратной связью (ЖОС) по положению регулирующего органа. Для этого сигнал от датчика положения исполнительного механизма $\mu(t)$ подается на вход сумматора Σ через пропорциональное звено с коэффициентом передачи K_{oc} с инверсией. Перемычка II замкнута, перемычка I разомкнута.

На рис.11.2. показана реакция регулятора с механизмом постоянной скорости и жесткой обратной связью на ступенчатый входной сигнал $\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot 1(t)$. После подачи сигнала при $\epsilon_0 > \sigma_{cp}$ релейный элемент включает сервомотор, который изменяет положение регулирующего органа $\mu(t)$ с постоянной скоростью $|\mu'(t)| = S_m$. Одновременно изменяется сигнал отрицательной обратной связи (от звена ЖОС) пропорционально перемещению регулирующего органа:

$$x_{oc}(t) = \Delta\mu(t) \cdot K_{oc}.$$

Вследствие этого на входе релейного элемента сигнал будет уменьшаться: $\sigma(t) = \varepsilon(t) - x_{oc}(t)$. Как только он уменьшится до порога отпускания $\sigma_{от}$, релейный элемент выключит сервомотор.

При условии $\sigma_{от} \ll |\varepsilon(t)|$ можно принять, что $x_{oc}(t) \approx \varepsilon(t)$. Подставляя $\varepsilon(t)$ вместо $x_{oc}(t)$, получим $\Delta\mu(t) = \varepsilon(t) / K_{oc} = K_{п} \cdot \varepsilon(t)$ или $K_{п} = 1 / K_{oc}$, (11.1)

где $K_{п}$ - коэффициент пропорциональности регулятора.

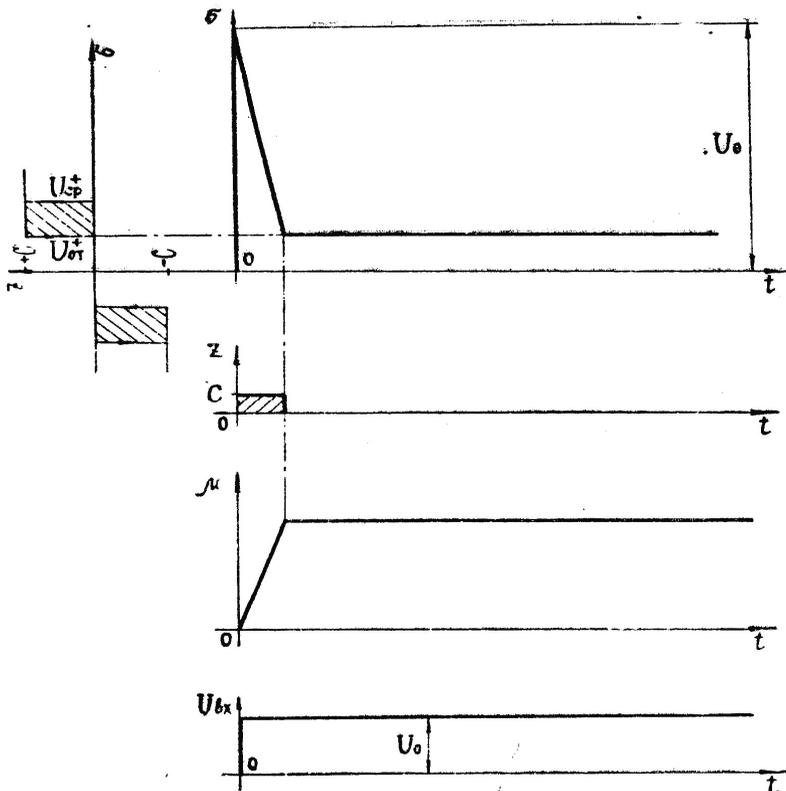


Рис.11.2. Реакция регулятора с жесткой обратной связи на ступенчатый входной сигнал

Таким образом, зависимость между выходом и входом такого регулятора приблизительно соответствует П-закону регулирования (при

условии, что обратная связь успевает компенсировать входной сигнал).

При реализации регулятора с жесткой обратной связью значение K_{oc} определяется заданным значением K_n по формуле

$$K_{oc} = 1 / K_n, \quad (11.2)$$

а параметры релейного элемента Δ и Δ_b рекомендуется задавать с учетом ограничения минимальной продолжительности включения сервомотора t_n (минимальной длительности импульса) и недопущения автоколебаний в контуре «реле – сервомотор – обратная связь» по формулам:

$$\Delta_b = S_m \cdot t_n \cdot K_{oc} = t_n \cdot K_{oc} \cdot 100 / T_m; \quad \Delta = 2 \cdot \Delta_b. \quad (11.3)$$

Схема моделирования релейно-импульсного П-регулятора, соответствующего рис. 11.1, с использованием типовых блоков программы моделирования динамических систем "20-sim 2.3 Pro" представлена на рис. 11.3.

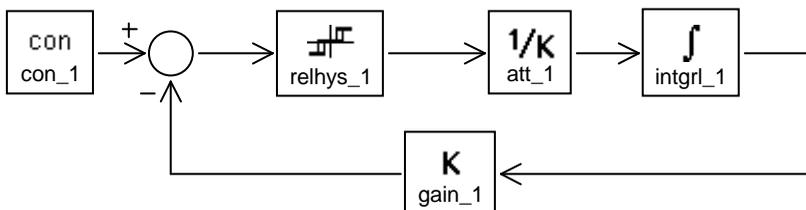


Рис. 11.3. Схема модели регулятора с жесткой обратной связью

Блок **relhys** формирует характеристику трехпозиционного релейного элемента РЭ; его параметрами являются: максимальный и минимальный уровни выходного сигнала ($z = \pm C$), зона нечувствительности Δ и зона возврата Δ_b . С помощью блока **att** задается скорость перемещения исполнительного механизма $S_{им}$.

Блок **con** формирует входной сигнал регулятора (расогласование), а блок **minus** - сигнал на входе релейного элемента.

Блоки **att** и **intgrl** моделируют исполнительный механизм. С учетом постоянства уровня сигнала релейного элемента ($|z| = C$) скорость исполнительного механизма $S_{им}$ также оказывается постоянной. При этом параметр K блока **att** определяется из условия

$$S_m = 100 / T_m = C / K, \quad \text{откуда следует:} \quad K = C / S_{им} = T_m \cdot C / 100.$$

Реакция регулятора с жесткой обратной связью на ступенчатый входной сигнал $\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot 1(t)$ имеет вид, показанный на рис. 11.4.

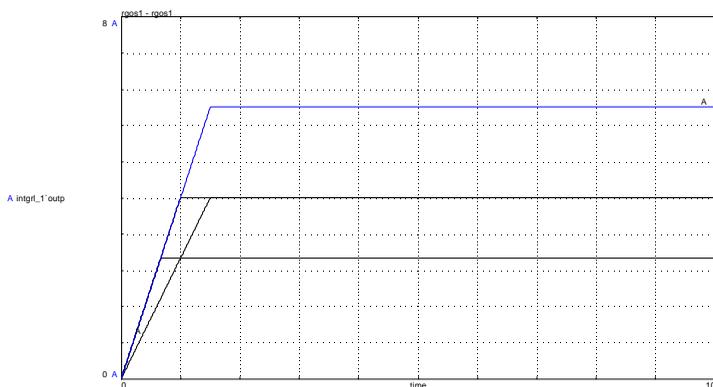


Рис. 11.4. Примерный вид результатов моделирования регулятора с жесткой обратной связью при ступенчатом входном сигнале

По графикам $\mu(t)$ можно оценить экспериментальные значения $K_{п.э}$ для параметров П – закона регулирования по формуле:

$$K_{п.э} = \Delta\mu_{уст} / \epsilon_0, \quad (11.4)$$

где $\Delta\mu_{уст}$ – установившееся изменение $\mu(t)$, т.е. когда жесткая обратная связь компенсирует входной сигнал и релейный элемент отключится.

Формирование ПИ-закона регулирования. При реализации ПИ-закона регулирования с механизмом постоянной скорости типовая структура регулирующего блока (см. рис. 11.1) представляет собой замкнутый контур, который содержит сумматор, трехпозиционный релейный элемент и инерционную обратную связь. Перемычка I замкнута, а перемычка II разомкнута. Инерционная обратная связь имеет передаточную функцию аperiodического звена

$$W_{oc}(p) = K_{oc} / (T_{oc} \cdot p + 1).$$

Такую структуру регулирующего блока можно рассматривать как управляемый генератор импульсов, у которого в зависимости от уровня входного сигнала изменяется соотношение между длительностью импульсов и пауз (точнее, скважность импульсного сигнала).

Реакция релейно-импульсного регулятора на ступенчатый входной сигнал $\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot 1(t)$ будет иметь вид, показанный на рис. 11.5.

Формирование управляющих импульсов в регулирующем блоке происходит следующим образом.

После подачи сигнала $\varepsilon(t)$ при $\varepsilon_0 > \sigma_{\text{ср}}$ релейный элемент срабатывает, на его выходе возникает ступенчатый сигнал $Z(t) = C \cdot 1(t)$, который поступает на вход инерционной обратной связи. Сигнал $x_{\text{ос}}(t)$ на выходе обратной связи увеличивается по экспоненте с постоянной времени $T_{\text{ос}}$ и предельным значением $x_{\text{ос}}(\infty) = C \cdot K_{\text{ос}}$.

Начальная скорость изменения сигнала обратной связи характеризуется параметром $V_{\text{св}}$ (скорость связи), причем

$$V_{\text{св}} = C \cdot K_{\text{ос}} / T_{\text{ос}}. \quad (11.5)$$

Увеличение $x_{\text{ос}}(t)$ приводит к уменьшению сигнала $\sigma(t)$ на входе релейного элемента:

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) - x_{\text{ос}}(t).$$

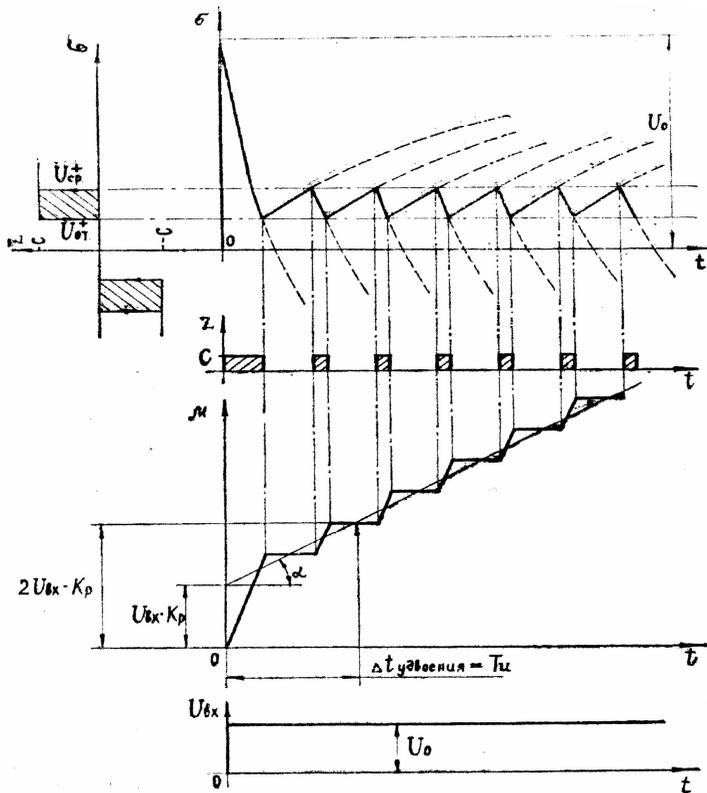


Рис. 11.5. Типовой вид сигналов в структурной схеме при определении переходной характеристики релейно-импульсного ПИ-регулятора

Как только $\sigma(t)$ уменьшится до порога отпускания $\sigma_{от}$, реле перейдет в нулевое состояние, сигнал $Z(t)$ на входе обратной связи исчезнет. Этому соответствует момент времени t_1 , определяющий длительность первого включения.

Затем сигнал обратной связи $x_{oc}(t)$ начнет уменьшаться по экспоненте с постоянной времени T_{oc} и предельным значением $x_{oc}(\infty) = 0$, а сигнал $\sigma(t)$ на входе релейного элемента – соответственно увеличиваться. Как только $\sigma(t)$ возрастет до порога срабатывания $\sigma_{ср}$, релейный элемент вновь включается и подает ступенчатый сигнал $Z(t) = C \cdot 1(t)$ на вход инерционной обратной связи.

Далее будет происходить периодическое повторение рассмотренных процессов, а именно, поочередное уменьшение и увеличение сигнала $\sigma(t)$ в пределах зоны возврата релейного элемента Δ_B , т.е. между порогами $\sigma_{ср}$ и $\sigma_{от}$. Это будет сопровождаться периодическими включениями и отключениями РЭ в одном направлении (пульсирую-

щий режим), характеризуемыми длительностью импульсов $t_{и}$ и длительностью пауз $t_{п}$.

Во время действия каждого импульса исполнительный механизм создает приращение регулирующего воздействия $\Delta\mu(t)$ с постоянной скоростью, равной $S_{м}$, т.е.

$$|\Delta\mu(t)| = S_{м} \cdot t_{и},$$

а во время паузы $\Delta\mu(t) = 0$.

График регулирующего воздействия $\mu(t)$ показан на рис 11.5. Реализуемый при этом закон регулирования приблизительно соответствует линейному ПИ-алгоритму, для которого реакция на сигнал $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot 1(t)$ имеет вид

$$\Delta\mu_{пи}(t) = \varepsilon_0 \cdot K_{п} \cdot (1 + t / T_{и}).$$

На рис 11.5 для графика $\mu(t)$ участок первого включения соответствует П-составляющей, а участок пульсирующего режима – И-составляющей закона регулирования.

На основе сопоставления этих участков для релейно-импульсного регулятора (РИР) и ПИ-алгоритма можно получить формулы, связывающие параметры $K_{п}$ и $T_{и}$ с параметрами элементов РИР.

Для **П-составляющей** реакции РИР на участке первого включения можно приближенно записать

$$\Delta\mu_{п} \approx S_{м} \cdot t_1 \approx S_{м} \cdot (\varepsilon_0 - \sigma_{от}) / V_{св} \approx S_{м} \cdot \varepsilon_0 / V_{св}. \quad (11.6)$$

Это справедливо, если уровень входного сигнала ε_0 составляет малую часть предельного значения сигнала инерционной обратной связи, т.е. $\varepsilon_0 \ll x_{ос}(\infty) = K_{ос} \cdot C$, и, кроме того, если $\sigma_{от} \ll \varepsilon_0$.

Для ПИ-алгоритма П-составляющая выражается формулой

$$\Delta\mu_{п} = K_{п} \cdot \varepsilon_0. \quad (11.7)$$

Из условия равенства (11.6) и (11.7) получается выражение для $K_{п}$:

$$K_{п} = S_{м} / V_{св} \quad (11.8)$$

или с учетом формулы (11.5):

$$K_{п} = S_{м} \cdot T_{ос} / (C \cdot K_{ос}). \quad (11.9)$$

Для **И-составляющей** реакции РИР (на участке пульсирующего режима) можно определить *среднюю скорость* регулирующего воздействия следующим образом:

$$S_{пер}(t) = S_{м} \cdot \gamma(t), \quad (11.10)$$

где $\gamma(t)$ – скважность управляющих импульсов, определяемая формулой

$$\gamma(t) = t_{и} / (t_{и} + t_{п}) = 1 / (1 + t_{п} / t_{и}) = f(t_{п} / t_{и}). \quad (11.11)$$

При указанных выше допущениях можно записать:

$$t_{и} = \Delta_{в} / V_{св} ; \quad (11.12)$$

$$t_{п} = \Delta_{в} / V_{от} = \Delta_{в} / (\epsilon_0 / T_{ос}),$$

где $V_{от} \approx \epsilon_0 / T_{ос}$ – скорость изменения сигнала $x_{ос}(t)$ после отключения РЭ.

С учетом формулы (11.5) получим:

$$t_{п} / t_{и} = V_{св} / V_{от} = V_{св} / (\epsilon_0 / T_{ос}) = K_{ос} \cdot C / \epsilon_0 \gg 1.$$

Тогда выражение (11.11) для $\gamma(t)$ можно упростить:

$$\gamma(t) \approx t_{и} / t_{п} = \epsilon_0 / (V_{св} \cdot T_{ос}). \quad (11.13)$$

Из формул (11.13) и (11.10) получается выражение *средней скорости* изменения И-составляющей для РИР:

$$S_{пер}(t) = S_{м} \cdot \epsilon_0 / (V_{св} \cdot T_{ос})$$

или с учетом формулы (11.8):

$$S_{пер}(t) = \epsilon_0 \cdot K_{п} / T_{ос} . \quad (11.14)$$

Для ПИ-алгоритма изменение И-составляющей имеет вид

$$\Delta\mu_{и}(t) = \epsilon_0 \cdot K_{п} \cdot t / T_{и},$$

а скорость изменения И-составляющей выражается формулой

$$S_{пер}(t) = d\mu(t)/dt = \epsilon_0 \cdot K_{п} / T_{и} . \quad (11.15)$$

Из условия равенства (11.14) и (11.15) получается выражение для $T_{и}$:

$$T_{и} = T_{ос}. \quad (11.16)$$

Формулы (11.8) и (11.16) приближенно выражают связь между параметрами элементов РИР и ПИ-алгоритма.

Близость РИР к идеальному ПИ закону и его работоспособность (длительность и скважность импульсов, отсутствие "переброски" и др.) определяются параметрами релейного элемента, параметрами звена инерционной обратной связи и скоростью исполнительного механизма.

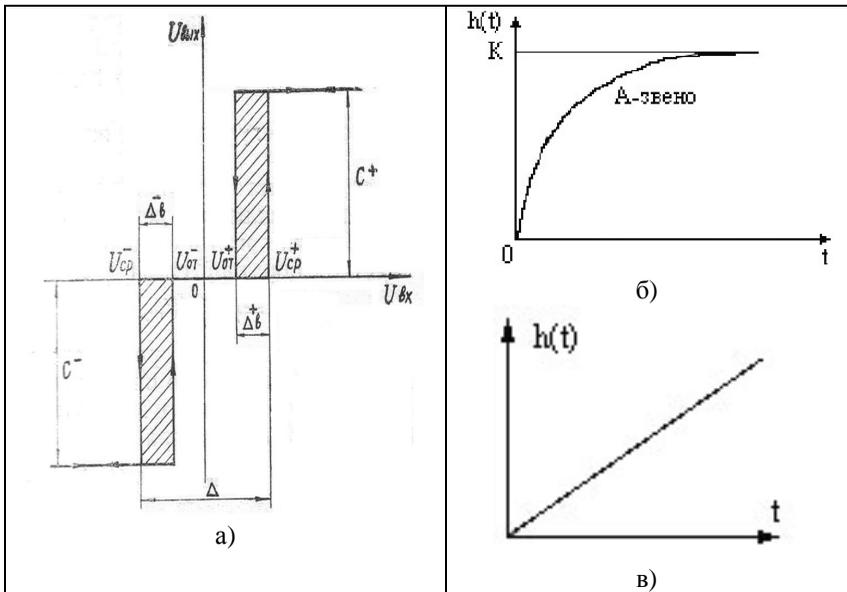


Рис. 11.6. Характеристики элементов релейно-импульсного ПИ-регулятора:

- а) - статическая характеристика релейного элемента,
 б) и в) - переходные характеристики ОС и ИМ.

Если заданы значения K_{Π} и T_{Π} теоретического ПИ-алгоритма, а требуется найти параметры элементов релейно-импульсного регулятора, то из формул (11.8) и (11.16) следует

$$T_{ос} = T_{\Pi}; \quad V_{св} = \frac{S_M}{K_{\Pi}}; \quad \text{или} \quad K_{ос} = \frac{S_M \cdot T_{\Pi}}{C \cdot K_{\Pi}}, \quad (11.17)$$

Параметр t_{Π} определяет минимальную длительность управляющих импульсов. Его значение следует задавать в пределах ограничений по нижнему $t_{\Pi, \text{мин}}$ и верхнему $t_{\Pi, \text{макс}}$ пределам. При этом $t_{\Pi, \text{мин}}$ должно быть таким, чтобы реальный механизм успел обработать управляющий импульс. Для большинства серийных исполнительных механизмов значение $t_{\Pi, \text{мин}}$ находится в диапазоне $t_{\Pi, \text{мин}} = 0.15 \dots 0.3$ с.

Наличие верхнего предела $t_{\Pi, \text{макс}}$ связано, в первую очередь, с возможностью возникновения «переброски» - знакопеременных *высоко-частотных* автоколебаний в замкнутом контуре «сумматор – реле –

обратная связь», что происходит, если $t_{и} \cdot V_{св} \geq \Delta$. Для предотвращения «переброски» необходимо при вводе $t_{и}$ выполнять условие

$$t_{и} \cdot V_{св} < \Delta \cdot (0.5 \dots 1). \quad (11.18)$$

Кроме того, при выборе $t_{и}$ следует учитывать возможность возникновения знакопеременных автоколебаний в замкнутом контуре АСР «регулирующий блок – исполнительный механизм – объект регулирования», что происходит, если $t_{и} \cdot S_{м} \cdot K_{об} \geq \Delta$. Для предотвращения низкочастотных автоколебаний требуется выполнять условие

$$t_{и} \cdot S_{м} \cdot K_{об} < \Delta. \quad (11.19)$$

Однако это условие не является необходимым, т.к. НЧ-автоколебания не являются опасными для исполнительного механизма, а иногда они даже полезны. Кроме того, условие (11.19) в некоторых случаях не представляется возможным выполнить (для интегрирующих объектов).

Реализуемое значение $t_{и}$ конструктивно определяется параметрами $V_{св}$ и $\Delta_{в}$ по формуле (11.12).

С учетом приведенных соотношений рекомендуется задавать параметры релейного элемента следующим образом:

$$\Delta_{в} = V_{св} \cdot t_{и}; \quad \Delta = 2 \cdot \Delta_{в}. \quad (11.20)$$

Схема моделирования релейно-импульсного ПИ-регулятора, соответствующего рис.11.1, с использованием типовых блоков программы моделирования динамических систем "20-sim 2.3 Pro" представлена на рис. 11.7. Описание схемы модели соответствует рис 11.3, отличие представляет функциональная обратная связь, реализуемая с помощью блока моделирования аperiodического звена **forder_1** и звена задержки на один такт **delay_1**, используемого для правильного моделирования сигнала обратной связи.

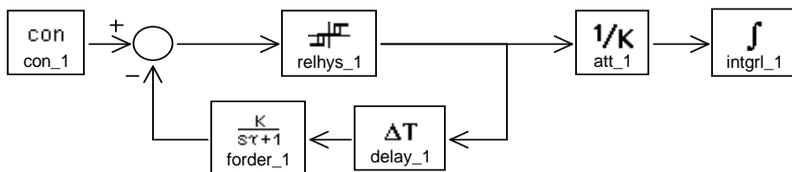


Рис. 11.7. Структурная схема модели релейно-импульсного ПИ-регулятора

На рис.11.8 показан примерный вид результатов моделирования релейно-импульсного ПИ-регулятора при ступенчатом входном сигнале.

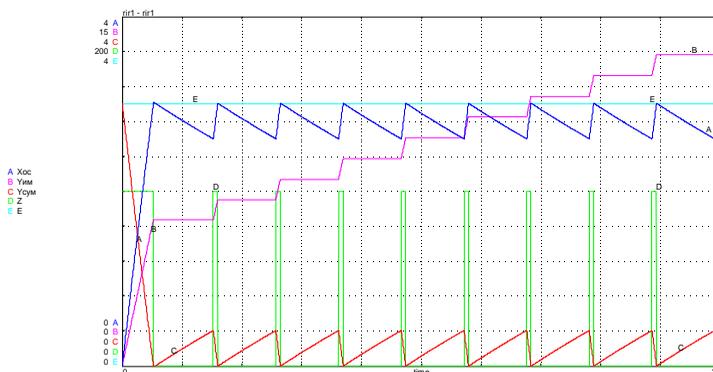


Рис. 11.8. Примерный вид результатов моделирования РИР при ступенчатом входном сигнале

E – входной сигнал; D – пусковые импульсы $z(t)$; A – сигнал инерционной обратной связи $x_{oc}(t)$; C – сигнал на входе релейного элемента $\sigma(t)$; B – перемещение исполнительного механизма $\mu(t)$.

3. Моделирование системы регулирования

Структурная схема моделирования системы регулирования с релейно-импульсным ПИ регулятором приведена на рис. 11.9.

Оптимальные значения параметров настройки регулятора можно определить поиском минимума принятого критерия оптимальности. Для этого следует добавить к модели системы регулирования блок формирования критерия оптимальности, задать начальные значения параметров настройки и вызвать процедуру поиска минимума (**Multiple Run** → **Optimization**). В качестве критерия оптимальности ре-

комендуется использовать интегральный модульный критерий J , т.е. интеграл по времени от модуля ошибки регулирования (блок **Cretet** из библиотеки **Controller**).

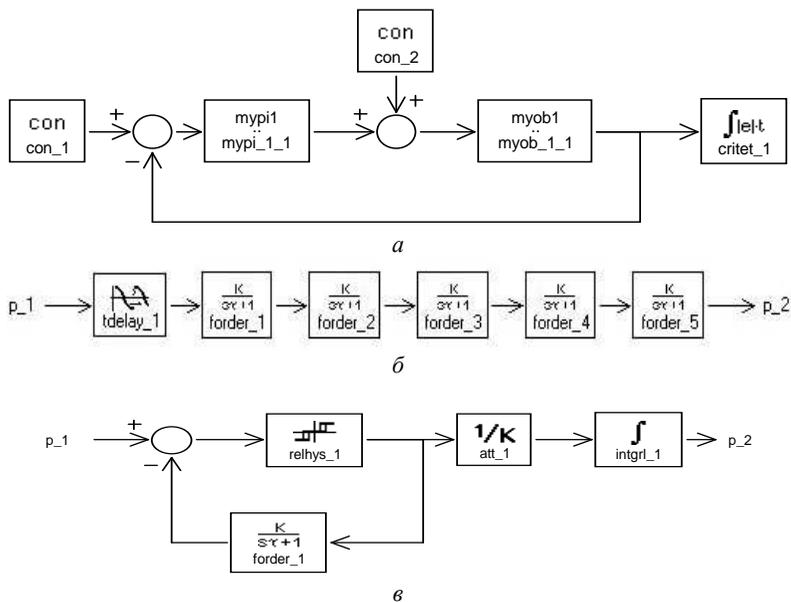


Рис. 11.9. Структурная схема моделирования системы регулирования с релейно-импульсным ПИ регулятором
a – основная модель системы; *b* – подмодель объекта тубоб; *v* – подмодель релейно-импульсного ПИ регулятора турп1.

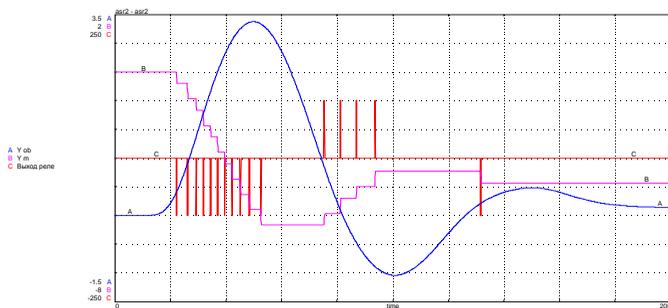


Рис.11.10. Результаты моделирования системы с релейно-импульсным ПИ – регулятором

На рис.11.10 приведены примеры результатов моделирования системы регулирования с релейно-импульсным, а на рис.11.11 – с идеальным ПИ-регулятором. Модель объекта реализована в виде последовательного соединения пяти аperiodических звеньев и звена запаздывания.

Параметры объекта соответствуют Прил. при $N = 0$. Параметры других элементов: $K_{oc} = 2,28$; $T_{oc} = 61,6$ с.; $T_M = 50$ с.; $\Delta = 0,8$; $\Delta_B = 0,4$; $C = 100$. Входной сигнал $\varepsilon_0 = 4$ (CON2).

На рис.11.7 приведены результаты моделирования этой же системы регулирования с идеальным ПИ-регулятором. Минимуму критерия оптимальности соответствуют $J = 12141,6$; $K_{П} = 0,76$; $T_{и} = 60,8$ с.

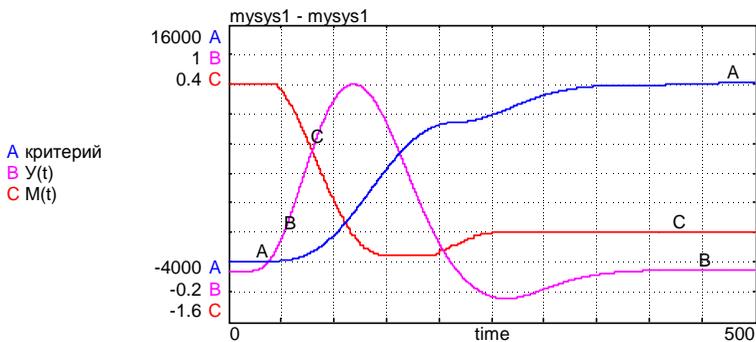


Рис.11.11. Результаты моделирования системы с идеальным ПИ – регулятором

Заметим, что идеальный ПИ закон регулирования можно моделировать с помощью динамического блока **PI** из библиотеки **Controllers**.

Порядок выполнения работы

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

Задание 1. Реализация П-регулятора на основе сервомотора постоянной скорости.

Цель задания 1 – анализ влияния уровня входного сигнала, коэффициента обратной связи и скорости сервомотора на работу П-регулятора, реализованного на основе сервомотора постоянной скорости с жесткой обратной связью.

1. Определить исходные значения параметров (с индексом «0») для заданного варианта N лабораторной работы по следующим формулам:

$$K_{п.0} = 2.0 + 0.1 \cdot N; \quad T_{м.0} = 15.0 + N; \quad t_{и.0} = 0.1 + 0.01 \cdot N.$$

2. Рассчитать параметры элементов регулятора $K_{ос.0}$, Δ_0 , $\Delta_{в.0}$ для реализации исходных параметров П - регулятора по формулам (11.2), (11.3); принять $C = 100\%$.

3. Сформировать таблицу параметров (ввести значения) для n вариантов моделирования с целью анализа их влияния на работу регулятора с жесткой обратной связью по форме табл. 11.1 (индексы *т и *э соответствуют теоретическим и экспериментальным значениям параметра *).

Таблица 11.1

n	ε_0	$K_{ос}$	$T_{м}$	$K_{п.т}$	$K_{п.э}$
1	2.0	$K_{ос.0}$	$T_{м.0}$		
2	3.0	$K_{ос.0}$	$T_{м.0}$		
3	2.0	$K_{ос.0} \cdot 1.5$	$T_{м.0}$		
4	2.0	$K_{ос.0}$	$T_{м.0} \cdot 1.5$		

4. Подготовить в графическом редакторе модель **регулятора с жесткой обратной связью** (рис. 11.3) и, сохранив ее, перейти к моделированию (**Simulation**).

5. Подготовить эксперимент для исходных значений параметров, отмеченных индексом «0». На экран вывести сигналы во всех точках структурной схемы модели. Время моделирования принять равным примерно $0,5 \cdot T_{м.0}$.

6. Получить на модели регулятора (без модели объекта) процессы, отображающие реакцию на ступенчатый входной сигнал $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot 1(t)$ для всех вариантов табл. 11.1.

7. По графикам $\mu(t)$ оценить экспериментальные значения $K_{п.э}$ для параметров П – закона регулирования по формуле (11.4).

8. Оценить соответствие $K_{п.э}$ теоретическим значениям $K_{п.э}$, определяемым по формуле (11.1).

9. Представить модель регулятора с жесткой обратной связью, охватывающей сервомотор, в виде подмодели, добавив блоки связи **РЮ** на входе и выходе и сохранить ее под именем *ту_р*.

Задание 2. Реализация ПИ-регулятора на основе сервомотора постоянной скорости

Цель задания 2 – анализ влияния уровня входного сигнала, параметров обратной связи и скорости сервомотора на работу релейно-импульсного ПИ-регулятора при ступенчатом входном сигнале.

1. Определить исходные значения параметров для заданного варианта N лабораторной работы по следующим формулам:

$$K_{п.0} = 2.0 + 0.1 \cdot N; \quad T_{и.0} = 20.0 + N; \quad T_{м.0} = 15.0 + N; \quad t_{и.0} = 0.1 + 0.01 \cdot N.$$

1. Рассчитать параметры элементов релейно-импульсного регулятора $V_{св.0}$, $T_{ос.0}$, $K_{ос.0}$, Δ_0 , $\Delta_{в.0}$ для реализации исходных параметров ПИ - регулятора по формулам (11.16), (11.19) при $C = 100\%$.

2. Сформировать таблицу параметров (ввести значения) для n вариантов моделирования с целью анализа их влияния на работу релейно-импульсного регулятора по форме табл. 11.2 (индексы *.т и *.э соответствуют теоретическим и экспериментальным значениям параметра *).

Таблица 11.2

n	ϵ_0	$K_{ос}$	$T_{ос} = T_{и.т}$	$T_{м}$	$K_{п.т}$	$K_{п.э}$	$T_{и.э}$
1	4.0	$K_{ос.0}$	$T_{ос.0}$	$T_{м.0}$			
2	6.0	$K_{ос.0}$	$T_{ос.0}$	$T_{м.0}$			
3	4.0	$K_{ос.0} \cdot 1.5$	$T_{ос.0}$	$T_{м.0}$			
4	4.0	$K_{ос.0}$	$T_{ос.0} \cdot 1.5$	$T_{м.0}$			
5	4.0	$K_{ос.0}$	$T_{ос.0}$	$T_{м.0} \cdot 1.5$			

3. Подготовить в графическом редакторе модель **релейно-импульсного ПИ - регулятора** (рис. 11.7) и, сохранив ее, перейти к моделированию (**Simulation**).

4. Подготовить эксперимент для исходных значений параметров, отмеченных индексом «0». На экран вывести сигналы во всех точках структурной схемы модели РИР. Получить на модели регулятора (без

модели объекта) процессы, отображающие реакцию РИР на ступенчатый входной сигнал $\epsilon(t)$.

5. Получить на модели регулятора (без модели объекта) процессы, отображающие реакцию РИР на ступенчатый входной сигнал $\epsilon(t)$ для всех других вариантов табл. 11.2.

6. По графикам $\mu(t)$ оценить экспериментальные значения $K_{п.э}$ и $T_{и.э}$ для параметров ПИ – закона регулирования по формулам

$$K_{п.э} = \Delta\mu_{п} / \epsilon_0, T_{и.э} = t_{удв}, \quad (11.6)$$

где $\Delta\mu_{п}$ – изменение $\mu(t)$ для участка первого включения; $t_{удв}$ – время, за которое происходит удвоение $\mu(t)$ по сравнению с $\Delta\mu_{п}$, т.е. когда И- составляющая сравняется с П-составляющей.

7. Оценить соответствие $K_{п.э}$, $T_{и.э}$ теоретическим значениям $K_{п}$, $T_{и.}$, определяемым по формулам (11.8), (11.15).

8. Подготовить в графическом редакторе модель **идеального ПИ - регулятора** для исходных значений параметров. Получить на модели регулятора (без модели объекта) процессы, отображающие реакцию ПИ-регулятора на ступенчатый входной сигнал $\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot 1(t)$.

9. Совместить на одном графике процессы $\mu(t)$ и $\epsilon(t)$, полученные для релейно-импульсного и идеального ПИ - регуляторов.

10. Представить модель релейно-импульсного ПИ-регулятора в виде подмодели, добавив блоки связи **РЮ** на входе и выходе и сохранить ее под именем турі.

Задание 3. Исследование качества работы АСР с сервомотором постоянной скорости.

3.1. Подготовить в графическом редакторе модель замкнутой системы с **релейно-импульсным ПИ-регулятором**, предусмотрев источники ступенчатого воздействия на входе регулятора и входе объекта.

Модель объекта реализовать в виде последовательного соединения пяти аperiодических звеньев и звена запаздывания. Параметры объекта задать в соответствии с Приложением.

3.2. Определить оптимальные значения параметров настройки системы с идеальными П- и ПИ- регуляторами. Для **ПИ-регулятора** можно воспользоваться функцией поиска минимума интегрального модульного критерия программы моделирования динамических систем "20-sim 2.3 Pro". В этом случае необходимо добавить к модели системы регулирования блок формирования критерия (блок **Cretet** из

библиотеки **Controller**), задать начальные значения параметров и вызвать процедуру поиска минимума (**Multiple Run** → **Optimization**).

Для **П-регулятора** значение коэффициента пропорциональности можно принять $K_{п.п} = 1,3 K_{п.пи}$.

Кроме того, настройки регуляторов можно найти, выполнив расчет в среде MathCad при домашней подготовке к занятию.

3.3. Получить процессы, отображающие реакцию замкнутой системы с идеальным ПИ-регулятором при ступенчатом воздействии на входе регулятора и входе объекта (поочередно).

3.4. Рассчитать соответствующие параметры элементов регуляторов с сервомотором постоянной скорости (для П- и ПИ-алгоритмов) в соответствии с настоящими методическими указаниями.

3.5. Вызвав модель замкнутой системы с релейно-импульсным ПИ-регулятором, установить рассчитанные значения параметров элементов и провести процесс моделирования аналогично п. 3.3.

3.6. Заменить модель релейно-импульсного ПИ-регулятора на модель регулятора с жесткой обратной связью. Значение коэффициента пропорциональности П-регулятора принять $K_{п.п} = 1,3 K_{п.пи}$ и рассчитать соответствующее значение K_{oc} . Получить процессы, отображающие реакцию замкнутой системы при ступенчатом воздействии на входе регулятора и входе объекта для идеального П-регулятора и регулятора с сервомотором постоянной скорости и жесткой обратной связью.

В отчете представить:

- структурные схемы моделей П и ПИ-регуляторов на основе сервомотора постоянной скорости;
- теоретические и экспериментальные значения параметров в соответствии с табл.11.1 и 11.2 и графики процессов для отдельных регуляторов (без объекта);
- структурные схемы моделей системы с этими регуляторами;
- графики процессов регулирования $\mu(t)$ и $Y(t)$ в замкнутой системе с П и ПИ-регуляторами на основе сервомотора постоянной скорости;
- графики процессов регулирования $\mu(t)$ и $Y(t)$ в замкнутой системе с идеальными П и ПИ-регуляторами;
- сделать вывод об идентичности качества работы системы регулирования с рассмотренными регуляторами: на основе сервомотора постоянной скорости и с идеальными П и ПИ-регуляторами.

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Объяснить формирование регулирующего воздействия по графикам изменения сигналов в основных точках структурной схемы релейно-импульсного ПИ-регулятора.

2. Как определить значения параметров $K_{\text{п}}$ и $T_{\text{и}}$ по кривой разгона релейно-импульсного ПИ-регулятора?

3. Каково влияние параметров $K_{\text{ос}}$ и $T_{\text{ос}}$ инерционной обратной связи на характер управляющих импульсов релейно-импульсного ПИ-регулятора при ступенчатом входном воздействии?

4. Как изменится кривая разгона идеального ПИ-регулятора, если увеличить в 2 раза:

- уровень входного сигнала ϵ_0 ;
- коэффициент передачи регулятора $K_{\text{п}}$;
- постоянную времени интегрирования регулятора $T_{\text{и}}$;

5. Какие ограничения следует учитывать при выборе минимальной длительности импульсов $t_{\text{и}}$ для релейно-импульсного ПИ-регулятора?

6. Что необходимо предпринять, если возникла «переброска» при работе релейно-импульсного ПИ-регулятора?

7. Как влияет уровень входного сигнала ϵ_0 на длительность первого включения, длительность импульса и длительность паузы?

8. Какие требования следует учитывать при выборе скорости исполнительного механизма $S_{\text{м}}$?

9. Как изменится кривая разгона регулятора с жесткой обратной связью, охватывающей сервомотор, если:

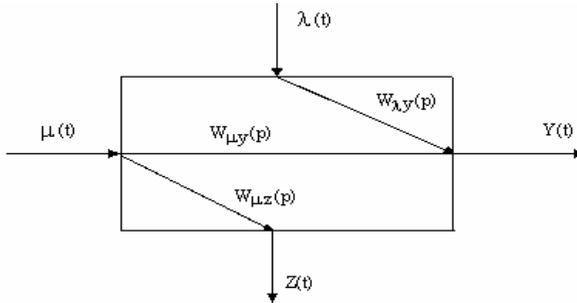
- уменьшить в 2 раза коэффициент обратной связи $K_{\text{ос}}$;
- увеличить в 2 раза скорость исполнительного механизма $S_{\text{м}}$?

Библиографический список

1. **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.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: Учебник для вузов. – М: Энергоатомиздат. 1985.– 296 с.
3. **Стефани Е.П.** Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М: Энергия. 1972. – 376 с.
4. **Ротач В.Я.** Расчет систем несвязного и автономного управления многомерными объектами. // Теплоэнергетика, № 10, 1996. – с. 8-15.
5. **Плютинский В.И., Погорелов В.И.** Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС: Учебник для энергетических и энергостроительных техникумов. – М: Энергоатомиздат. 1983.- 296 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 № 6. Двухконтурная автоматическая система регулирования с регулятором и дифференциатором.</i>	8
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы	23
<i>Лабораторное занятие № 7. Каскадная автоматическая система регулирования с корректирующим и стабилизирующим регуляторами</i>	25
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы	36
<i>Лабораторное занятие № 8. Трехимпульсная автоматическая система регулирования уровня в барабане парогенератора</i>	38
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы	51
<i>Лабораторное занятие № 9. Двухсвязная автоматическая система регулирования</i>	52
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы	64
<i>Лабораторное занятие № 10. Автоматическая система регулирования давления в компенсаторе объема первого контура АЭС с реактором ВВЭР</i>	66
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы	76
<i>Лабораторное занятие № 11. Реализация релейно-импульсного регулятора на основе сервомотора постоянной скорости.</i>	77
Контрольные вопросы к защите лабораторной работы	95
Библиографический список	96
Приложение	97

Учебное издание

**Зверьков Владимир Петрович
Кузищин Виктор Федорович
Павлов Сергей Павлович
Петроченко Юрий Николаевич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА
ПЭВМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ "20 - SIM"**

Часть 2.
Системы повышенной сложности

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

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

Темплан издания МЭИ

Подписано к печати

Печать офсетная

Формат 60×84/16 Физ. печ. л. 4,25

Тираж 200 экз. Изд. № 118 Заказ Цена руб.

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