

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ**

**Кафедра «Информатика,  
автоматизация и  
управления»**

# **МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

**к выполнению лабораторных работ по курсу**

**Теоретические Основы Построение Асу Тп**

**Ташкент – 2012**

Методическое пособие по проведению лабораторных работ по курсу «Теоретические основы построение автоматических систем управления технологических процессов» является основным методическим указанием по выполнению лабораторных работ студентам по направлению 5521800 - «Автоматизация и управления».

## Введение

Современные системы управления сложными объектами промышленной технологии строятся по иерархическому принципу. Это значит, что система управления такими объектами расчленяется на ряд систем, стоящие на разных уровнях подчинения. Система более высокого ранга, ориентируясь на общий (глобальный) критерий управления, выдает команды на включение или отключение отдельных локальных объектов, а также осуществляет выбор частных критериев управления этими объектами. Локальные системы управления осуществляют поддержание заданных оптимальных режимов как в пусковых, так и в нормальных эксплуатационных условиях. Являясь нижним иерархическим уровнем автоматических систем управления промышленными объектами локальные системы осуществляют функции измерения, контроля и регулирования основных технологических параметров, характеризующих состояние технологического процесса. Количество регулируемых параметров в отдельно взятой локальной системе управления невелико и составляет один или два параметра. Из общего числа систем управления современным производством локальные системы составляют около 80%. Качество работы локальных систем управления во многом определяет стабильность и качество выходного продукта, а следовательно и рентабельность производства.

Данное методическое пособие по проведению лабораторных работ по курсу «Теоретические основы построение автоматических систем управления технологических процессов» предусматривает закрепление теоретических знаний студентов, изученных на лекционных занятиях и самостоятельно решать задачи синтеза САР и оптимизация ее параметров с применением современных методов решения задач и освоение программного обеспечения для исследования.

**Целью** лабораторной работы по курсу «Теоретические основы построение автоматических систем управления технологических процессов» является получения начальные сведения о системе VisSim и навыки работы с ними и изучение методов синтеза САР и оптимизации ее параметров, экспериментальное определение оптимальных настроечных параметров САР и проверка работоспособности программы Vissim в режиме оптимизации параметров.

Общий порядок выполнения лабораторных работ:

1. Студент допускается к выполнению очередной лабораторной работы после сдачи коллоквиума на знание теоретического материала, цели и методики выполнения лабораторной работы.

2. После разрешения выполнять исследования студент собирает схему САВ в пакете Vissim на компьютере и самостоятельно ее настраивает. В случае если схема не работает или работает неправильно, он обязан найти причину неисправности и устранить ее.

3. Настроив схему и проверив правильность ее функционирования с помощью блоков наблюдения, студент приглашает преподавателя.

4. После этого выполняются необходимые измерения и расчеты, результаты которых предъявляются преподавателю. По разрешению преподавателя схема сохраняется в рабочем каталоге, сдается методическое руководство к лабораторным работам, рабочее место (на компьютере и физический рабочий стол) приводится в порядок.

5. К последующей работе окончательно оформляется отчет и производится его защита преподавателю.

Отчет о лабораторной работе должен содержать: титульный лист; цель работы и план исследований; исследуемые схемы САВ; необходимые расчеты и временные диаграммы сигналов; выводы и сопоставление полученных результатов с теоретически ожидаемыми. Если временные диаграммы связаны (например, входной и выходной сигналы звена), необходимо располагать их в проекционной связи, чтобы они находились одна под другой, были синхронизированы и являлись иллюстрацией процессов, протекающих в схеме устройства. Допустимо оформлять отчеты в редакторах различных назначений, в частности, путем импорта рисунков из пакета Vissim.

## Лабораторная работа № 1

### ОСВОЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Цель работы.** Получить начальные сведения о пакете **VisSim** и навыки работы с ними. Работа рассчитана на 8 часов работы в лаборатории (вычислительном зале) и 4 часа самостоятельной работы.

**Порядок выполнения работы.** Работа содержит описательную часть и несколько заданий для самостоятельного выполнения. Студенты выполняют задания непосредственно в ходе прочтения содержания. Отчет по работе не выполняется.

#### 1. Работа с командным окном.

Запуск пакеты **VisSim**.

Запустите **VisSim**. Значок **VisSim** находится на рабочем столе *Windows*. После запуска на экране появляется командное окно **VisSim**.

**Основное меню VisSim.**

**Пункт File.**

**New** - создание новой диаграммы,

**Open** - открытие диаграммы,

**Save** - сохранение на диске,

**Save as...** - сохранение на диске по каким-либо новым именем,

**Diagram Information...** - выдает окно с информацией о текущей диаграмме: Заголовок, автор, количество блоков и др.

**Page Setup...** - поля страницы,

**Print...** - печать диаграммы,

**Printer Setup...** - вызывает окно настроек драйвера принтера,

**Printer Preview...** - предварительный просмотр диаграммы перед печатью,

**Real Time Config** - изменение настроек драйвера реального времени,

**Exit** - выход из программы.



Далее в меню идет список диаграмм, которые были открыты недавно. Щелчок по каждой из них вызывает их на экран.

## Пункт Edit.

**Undo** - отмена последнего произведенного действия,

**Cut** - вырезание блока или группы блоков (блоки удаляются с диаграммы и помещаются в буфер),

**Copy** - копирование блоков в буфер (блоки не удаляются с листа),

**Paste** - вставка блоков из буфера,

**Clear** - удаление блоков (в отличие от «Cut» не помещает блоки в буфер),

**Flip Horizontal** - разворот блока на 180°,

**Create Compound Block** - объединение группы блоков в единый блок,

**Dissolve Compound Block** - действие, обратное «Create Compound Block»,

**Find...** - поиск переменной на диаграмме (в появляющемся окне необходимо ввести имя переменной, т.е. имя блока типа variable; после нажатия на «ОК» соответствующий блок будет выделен),

**Replace...** - поиск с заменой,

**Block Properties...** - изменение настроек какого-либо блока (после выбора этого пункта курсор мыши превращается в крест; если этот крест навести на какой-либо блок и нажать левую кнопку, то появится окно со списком настроек этого блока; команда аналогична нажатию правой кнопки мыши на блоке).

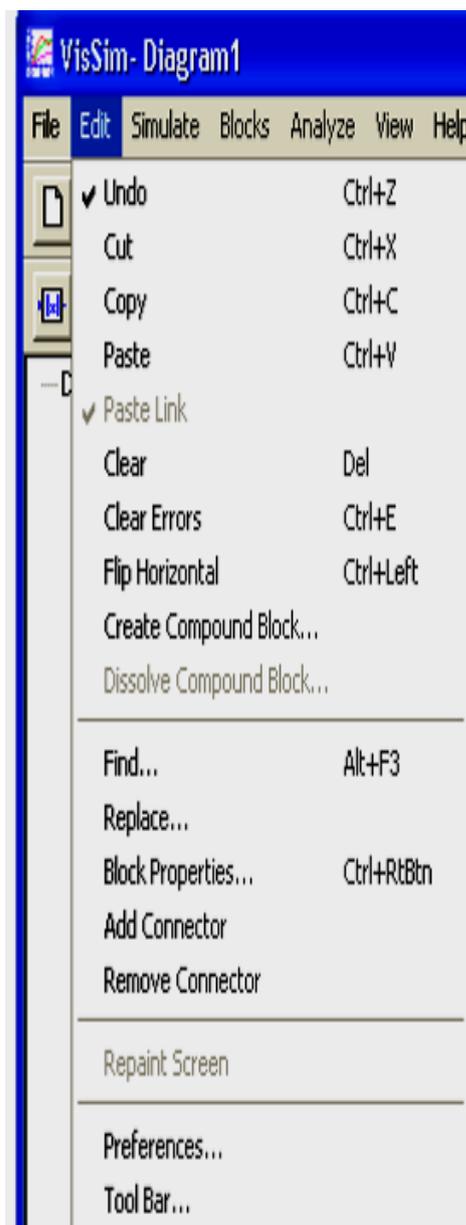
**Add Connector** - добавление еще одного входа (или выхода) к какому-либо блоку (после выбора курсор мыши превращается в крест, которым нужно указать на нужный блок и щелкнуть левой кнопкой; если функция блока позволяет это сделать, то у него появится новый вход или выход),

**Remove Connector** - команда, противоположная «Add Connector» (курсор также превращается в крест, которым нужно указать на блок с удаляемым входом)

**Repaint Screen** - перерисовка экрана (позволяет удалить графический «мусор», иногда появляющийся на диаграмме),

**Preferences...** - настройка внешнего вида окна программы (показывать ли линии прокрутки, привязывать ли блоки к сетке и т.д.),

**Toolbar...** - настройка панели инструментов (вызывается окно, в котором можно настроить несколько дополнительных кнопок панели, что позволяет облегчить и ускорить процесс создания диаграмм).



## Пункт Simulate.

Пункт содержит команды и настройки, используемые при расчете:

**Go** - запуск модели на исполнение (аналогично нажатию на кнопку с зеленой стрелкой на панели задач),

**Stop** - приостановить процесс расчета,

**Single Step** - выполнить один шаг расчета,

**Continue** - продолжить приостановленный расчет,

**Reset** - сброс результатов,

**Simulation Properties...** - выводит окно с настройками расчета. В окне можно задать следующие параметры:

На закладке **Range**:

**Start** - начальное значение времени,

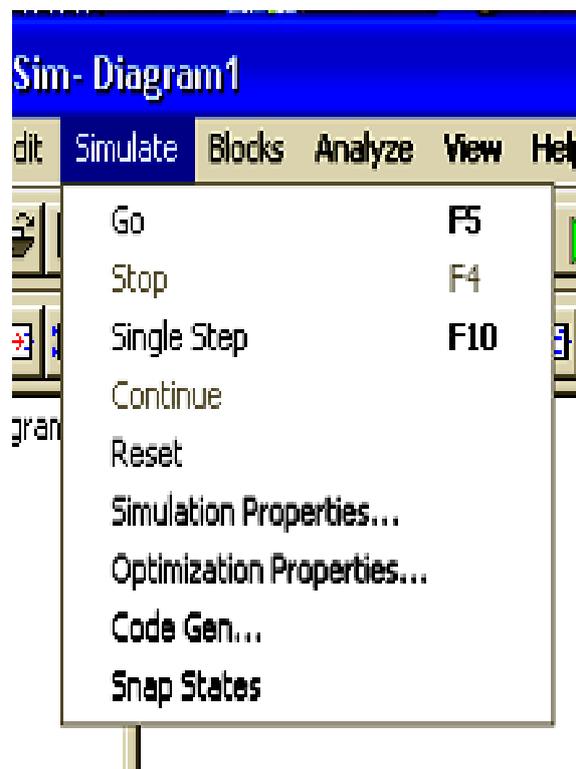
**Frequency** - частота выполнения шагов расчета,

**End** - конечное значение времени.

На закладке **Integration Method** - алгоритм интегрирования дифференциальных уравнений. В этой настройке нужно мышью щелкнуть на нужном алгоритме.

На закладке **Defaults** - настройки, принимаемые по умолчанию для вновь создаваемых диаграмм (**Range Start**, **Frequency**, **End**, **Integration Method**, **Max Plotted Points** - число выводимых на график точек).

**Optimization Properties...** настройки, используемые в процессе оптимизации (метод, число итераций, погрешность)



## Пункт Blocks.

Пункт содержит палитры функциональных блоков. Чтобы выбрать какой-либо блок, необходимо войти в это меню, найти нужный блок в какой-либо палитре и щелкнуть на нем. После этого можно щелчком указать на его место на диаграмме. Подробнее о палитрах см. п. 3.

## Пункт Analyze.

Пункт содержит команды, используемые при анализе сформированных систем: определение передаточных функций систем, полюсов (корней характеристических полиномов), нулей функций, частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ), устойчивости по Найквисту и др.

## Пункт View.

В этом пункте находятся настройки внешнего вида программы и диаграмм:

**Fonts...** - настройка используемого на диаграмме шрифта (размер, вид, кодировка и цвет).

В поле «Шрифт» можно выбрать вид шрифта щелчком левой кнопки мыши. В поле «Начертание» - тип начертания: обычный, курсив, полужирный, полужирный курсив.

Также можно выбрать размер, цвет и набор символов. Набор символов должен быть установлен как «Кириллица».

**Colors...** - настройка цветовой гаммы внешнего вида программы (цвета надписей, фона и др.),

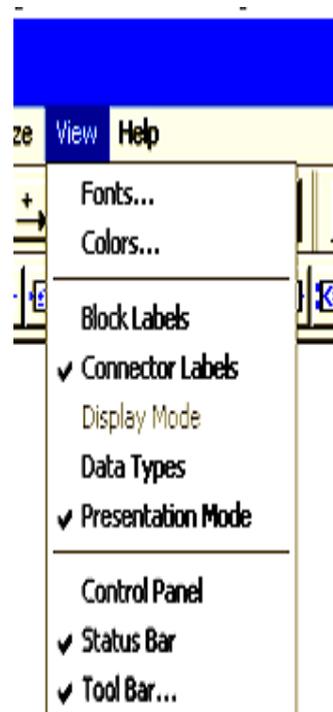
**Presentation Mode** - режим презентации (более нагляден),

**Display Mode** - если возле него стоит галочка, то на диаграмме все линии связи делаются невидимыми,

**Block Labels** и **Connector Labels** позволяют разрешать или запрещать отображение подписей к блокам и линиям связи.

**Status Bar** - отображает или запрещает отображение строки состояния внизу окна,

**ToolBar** - отображает или запрещает отображение панели инструментов.



## Пункт Help.

В этом пункте выводится помощь по программе:

**Contents** – содержание.

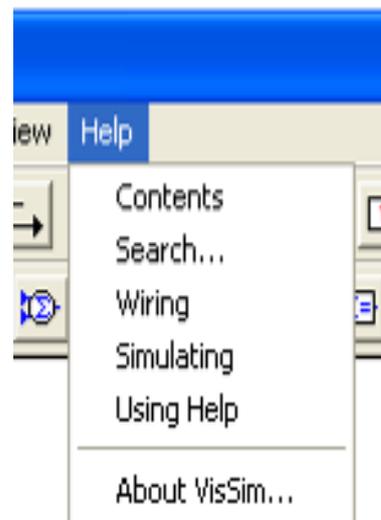
**Search...** - поиск.

**Wiring** - информация о работе с функциональными связями.

**Simulating** - информация о моделировании динамики.

**Using Help** - использование помощи.

**About VisSim** - информация о версии программы и др.



## Функциональные блоки VisSim.

В данном разделе функциональные блоки упорядочены по палитрам.

**Animation** – палитра блоков анимации:

*animate* блок анимации

*lineDraw*

**Annotation** – пояснения с диаграмме

*bezel* картинка из файла для вставки на лист диаграммы

*comment* пояснение на диаграмме (несколько строк)

*date* вставка текущей даты

*index*

*label* комментарий (одна строка)

*scalarToVec* перевод скалярной величины в векторный вид

*vecToScalar* перевод секторной величины в скалярный вид

*variable* переменная (применение переменных позволяет уменьшить загроможденность диаграммы линиями связи)

*wirePositioner* позиционер для формирования направления линий связи

**Arithmetic** – арифметические функции

*\** (*multiply*) умножение двух сигналов (имеет два входа и один выход)

*-X* (*negate*) инверсия знака

*/* (*divide*) деление

*abs* модуль

*gain* блок усиления сигнала (коэффициент усиления)

*pow*

*sign* знак сигнала (+ или -)

**summingJunction** сумматор

**Boolean** – логические функции

*<* меньше

*<=* меньше или равно

*==* равенство

*!=* не равно

*>* больше

*>=* больше или равно

*and* И (логическая конъюнкция)

*not* НЕ (логическое отрицание)

*or* ИЛИ (логическая дизъюнкция)

*xor* отрицание ИЛИ (XOR)

**DDE** – блоки для организации обмена между программами

*DDE* блок обмена данными с другой программой

*DDEreceive* блок приема данных из другой программы

*DDEsend* блок отсылки данных в другую программу

**Integration** – блоки интегрирования

*integrator* интегрирующее звено

*limitedIntegrator* ограниченный интегратор (имеет максимальное и минимальное значения выходного сигнала)

*resetIntegrator* сброс интегратора

**Linear System** – линейные системы

*stateSpace* пространство состояний

*transferFunction* передаточная функция

**Nonlinear** – нелинейные системы

*case* оператор варианта (имеет несколько входов плюс вход case, определяющий какой из входных сигналов подавать на выход)

*crossDetect* реле, определяющее сигналом какого-либо уровня

*deadband* реле с зоной нечувствительности

*int* целая часть числа

*limit* ограничитель сигнала

*map*

*max* определение максимального значения сигнала

*merge*

*min* определение минимального значения сигнала

*quantize* дискретизатор

*relay* реле (двух-) трехпозиционное с зоной нечувствительности

*sampleHold* «замораживатель» выходного сигнала (имеет два входа: x и b, при подаче на вход b сигнала на выходе блока устанавливается постоянный сигнал, равный мгновенному значению сигнала x).

**Optimization** – оптимизация систем

*constraint*

*cost* стоимость (для анализа)

*globalConstraint*

*parameterUnknown*

*unknown*

**Random Generator** – генераторы случайных сигналов

*gaussian* генератор случайно сигнала по Гауссу

*uniform*

**Real Time** – функции реального времени

*rt-DataIn*

*rt-DataOut*

**Signal Consumer** – блоки для отображения сигналов

*display* индикатор цифровой

*error*

*export*

*histogram* гистограмма

*light* лампочка (один вход)

*meter* стрелочный индикатор

<i>plot</i>	графики (выводит одновременно до 4-х графиков разными цветами)
<i>stop</i>	
<i>stripChart</i>	полосатая диаграмма
<b>Signal Producer</b>	– генераторы сигналов
<i>button</i>	кнопка (один выход)
<i>const</i>	константа
<i>import</i>	получение данных из файла
<i>parabola</i>	параболическое воздействие
<i>pulseTrain</i>	импульсное воздействие
<i>ramp</i>	линейное воздействие
<i>realTime</i>	
<i>sinusoid</i>	синусоидальный сигнал
<i>slider</i>	ползунок (для генерации входных сигналов)
<i>step</i>	
<b>Time Delay</b>	– запаздывания
<i>timeDelay</i>	запаздывание (два входа: задерживаемый сигнал и величина задержки)
<i>unitDelay</i>	
<b>Transcendental</b>	– тригонометрические функции
<i>acos</i>	арккосинус
<i>asin</i>	арксинус
<i>atan2</i>	арктангенс
<i>bessel</i>	бессель
<i>cos</i>	косинус
<i>cosh</i>	гиперкосинус
<i>exp</i>	экспонента
<i>log10</i>	десятичный логарифм
<i>ln</i>	натуральный логарифм
<i>sin</i>	синус
<i>sinh</i>	гиперсинус
<i>sqrt</i>	корень
<i>tan</i>	тангенс
<i>tanh</i>	гипертангенс
<b>UserFunction</b>	функция, определенная пользователем
<b>NeuralNet</b>	блок нейронной сети

### Примеры простых проектов.

#### 14.1. Построение переходной кривой.

Требуется построить переходную кривую объекта, заданного передаточной функцией:

$$W(s) = 2 \frac{5s + 1}{4s^2 + 3s + 1}.$$

**Решение.** Для построения переходной кривой создается схема, представленная на рис. 1.

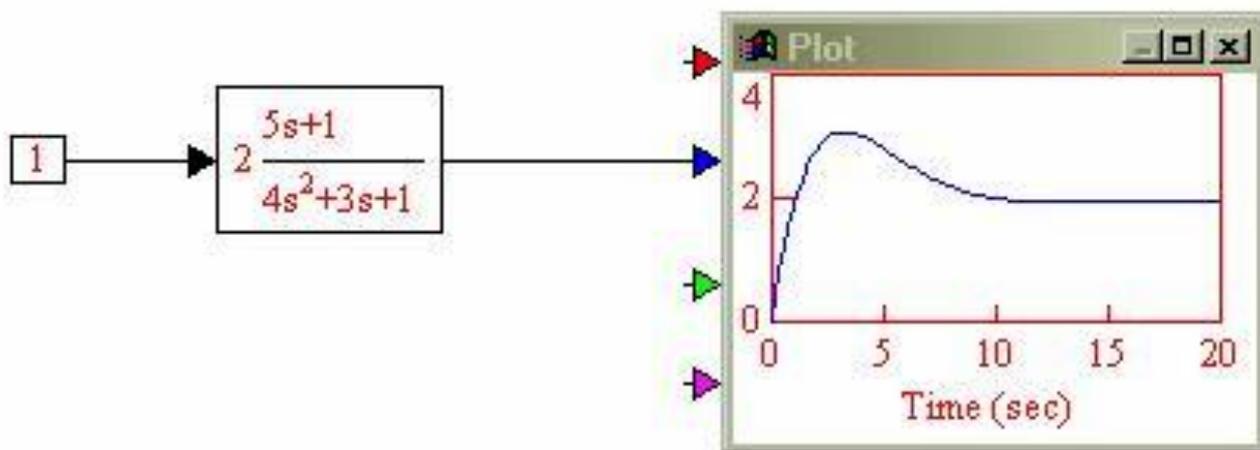


Рис. 1. Построение переходной кривой.

Для этого сначала из палитры «Signal Producer» выбирается блок «const» (по умолчанию его значение равно 1). Затем из палитры «Linear System» блок «transferFunction». После того, как блок расположен на листе диаграммы щелчком правой кнопки мыши вызывается окно настроек этого блока (см. рис. 2) и устанавливаются соответствующие значения.

Последний блок - блок графиков «plot» из палитры «Signal Consumer».

Расположенные блоки соединяются линиями функциональных связей. В настройках моделирования «Simulate -> Simulation Properties...» устанавливается время начала, конца моделирования и частота (соответственно: Start = 0, End = 20, Frequency = 5). Модель запускается на выполнение (командой «Simulation -> Go» или нажатием клавиши F5 клавиатуры или нажатием кнопки Go панели инструментов). Результат представлен на рис. 1.

Для распечатки переходных кривых на принтере следует увеличить окно графиков «plot» во весь экран и дать команду «File -> Print...» или нажать на кнопку «Print» панели инструментов.

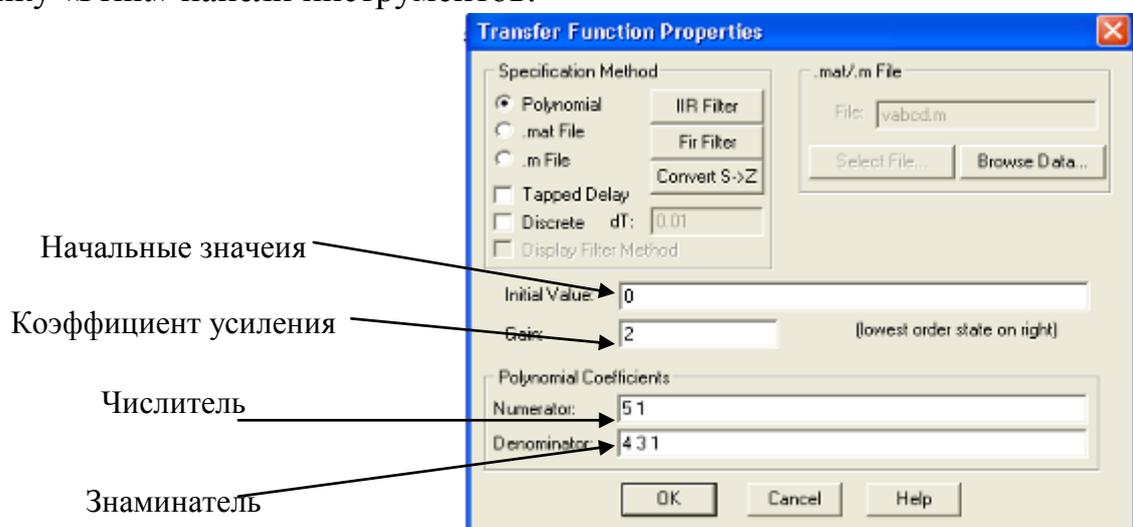


Рис. 2.

## Моделирование одноконтурной АСР.

**Задание.** Построить модель одноконтурной АСР с объектом, заданным передаточной функцией вида

$$W(s) = 2 \frac{5s + 1}{4s^2 + 3s + 1} e^{-5s}$$

и ПИ-регулятором с настройками  $K_0 = 0,08$  и  $K_1 = 0,1$ .

Построить переходные характеристики по заданию и по ошибке.

**Решение.** Строится модель, представленная на рис. 3.

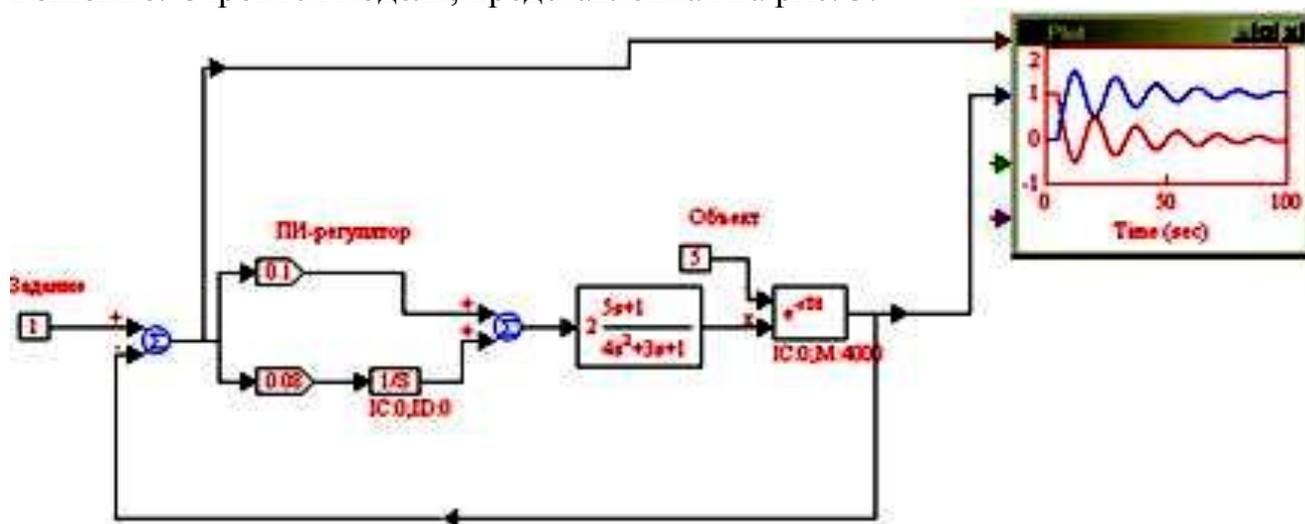


Рис. 3.

Для моделирования объекта управления были использованы блоки передаточной функции (transferFunction), запаздывания (timeDelay) и константы (const).

Сигнал задания определяется в блоке константы (const). Выходные сигналы регистрируются в блоке графика (plot).

Настройки ПИ-регулятора задаются усилительными блоками (gain). Также в модели регулятора использован интегратор (integrator) и сумматор (summingJunction).

Обратная связь реализована с помощью формирователя связи (wirePositioner) и сумматора (summingJunction). По умолчанию все сигналы, поступающие на вход сумматора, берутся с положительными знаками. Для смены знака на противоположный (например, для организации отрицательной обратной связи) необходимо нажать клавишу «Ctrl» и, удерживая ее в нажатом положении, щелкнуть правой кнопкой мыши по соответствующему входу.

После расположения блоков на диаграмме, соединения их линиями связи и настройки диаграмма запускается на исполнение (см. рис. 3.).

## Лабораторная работа №2.

# СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ (САР). СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ САР

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Работа рассчитана на 20 часов работы в лаборатории (вычислительном зале) и 10 часа самостоятельной работы.

**Техническая цель работы:** изучение методов синтеза САР и оптимизации ее параметров, экспериментальное определение оптимальных настроечных параметров САР и проверка работоспособности программы Vissim в режиме оптимизации параметров.

В результате выполнения работы следует сделать выводы о работоспособности программы Vissim в режиме оптимизации, областях и целесообразности его применения.

Польза от определения оптимальных настроечных параметров регулятора САР состоит в том, что это дает САР, имеющую при заданной структуре наилучшие характеристики качества.

**Методическая цель работы:** приобретение и закрепление навыков оптимизации параметров элементов линейных систем, а также совершенствование навыков работы в программах Vissim и Маткад.

#### **Задачи работы:**

Ознакомиться:

- с понятиями "синтез" и "структурно-параметрическая оптимизация" линейной САР;
- приближенными методами оптимизации настроечных параметров П-, ПИ- и ПИД - регуляторов с использованием частотных характеристик разомкнутой САР.
- с порядком автоматической оптимизации настроечных параметров П-, ПИ- и ПИД - регуляторов в программах Vissim и ПК "МВТУ".

Выполнить:

- построить виртуальные лабораторные стенды для оптимизации настроечных параметров регуляторов САР;
- оценить по ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура САР приближенные значения настроечных параметров регуляторов и методом проб уточнить эти значения;
- определить в программе Vissim в режиме автоматической оптимизации настроечные параметры регуляторов и сравнить результаты с полученными выше;
- сделать вывод о работоспособности программ Vissim и ПК "МВТУ" в режиме оптимизации.

Приобрести навыки:

- оптимизации настроечных параметров регуляторов САР приближенным методом с последующим экспериментальным уточнением;
- автоматической оптимизации параметров в программе Vissim.

## 2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ

Синтез (теоретическое конструирование) линейной системы автоматического регулирования (САР) для указанного объекта управления (ОУ) это построение модели САР отвечающей требованиям качества, предъявляемым к ней заказчиком в отношении плавности, быстродействия и точности регулирования.

Основы теории построение АСУ ТП изложены в многочисленных учебниках. Это изложение по традиции ориентируется на аналитическое описание систем управления, их элементов и аналитическое решение задач синтеза. При этом рассмотрение физического смысла описания и решений, принципа действия систем управления, как правило, остается за рамками изложения, затрудняя студенту глубокое понимание смысла изучаемых вопросов.

Ниже, для исправления указанного недостатка, при изложении вопросов оптимизации основное внимание уделяется физическому смыслу оптимизации. Она проводится с применением программ объектно-ориентированного моделирования Vissim и ПК "МВТУ", что позволяет свести к минимуму использование аналитического аппарата.

Известно множество методов и способов синтеза линейных САР, имеющих свои области применения. В данной лабораторной работе рассматриваются наглядные и простые в реализации методы, позволяющие с одной стороны легко настроить САР на оптимум функционирования, а с другой стороны понять и почувствовать смысл этих настроек и возможности программ моделирования динамических систем при решении задач оптимизации.

Отметим, что наличие в арсенале инструментов анализа инженера программы объектно-ориентированного моделирования, существенно повышает значение и область применения метода проб и ошибок при решении задач моделирования, исследования и оптимизации САР.

### 2.1. Принципы оптимизации настроечных параметров регулятора САР

**Оптимизация САР** это процедура модификации структуры и определения таких численных значений параметров заданной САР, при которых она имеет наилучшее, в определенном заранее смысле, качество регулирования (слежения и стабилизации). Оптимизация это частый случай синтеза САР.

Ниже рассматриваются принципы простого, но эффективного приближенного определения оптимальных настроечных параметров различных типов регуляторов линейной САР с использованием ЛАЧХ и ЛФЧХ ее разомкнутого контура, а также реализация классических методов оптимизации в программах моделирования динамических систем.

### 2.1.1. Законы регулирования, критерии и методы оптимизации САР

Ниже дается определение основных понятий, приводятся общие сведения о том, как оценивается и как обеспечивается хорошее качество САР.

#### 2.1.1, а. Определения

**Критерий оптимизации** задает численную меру качества САР и прямо или косвенно указывает такое ее значение, при котором качество САР считается наилучшим.

Критерий оптимизации САР позволяет в относительной мере судить и о степени приближения качества САР к некоторому идеалу, определяемому конкретным критерием.

Изменяя параметры и структуру САР, добиваются наилучшего численного значения меры качества САР, соответствующего выбранному критерию, т.е. оптимизируют САР.

**Метод оптимизации САР** это алгоритм, последовательность действий, которые следует осуществить для того, чтобы получить из исходной САР наилучшую, с точки зрения конкретного критерия качества, САР. Методы бывают аналитические, приближенные графо-аналитические и др. Они могут реализовываться исследователем «вручную» или программой моделирования.

Оптимизация САР может осуществляться и по совокупности критериев.

Идеального, абсолютно наилучшего критерия качества САР, а значит и метода оптимизации, не существует. Для одних объектов управления, например массивных механизмов, прежде всего требуется плавность регулирования, а уж потом минимизация времени регулирования. Для других объектов, например малоинерционных электронных систем слежения, более важным является минимизация времени регулирования, пусть даже и с повышенной, но допустимой колебательностью.

Если для оптимизации САР, т.е. достижения желаемого ее качества, оказывается достаточным только определения и задания наилучших значений настроечных параметров ее элементов (коэффициентов усиления и постоянных времени звеньев), прежде всего регулятора, то такая **оптимизация называется параметрической**.

**Параметрическая оптимизация САР** это определение таких значений ее параметров, при которых САР имеет наилучшие, в определенном заранее смысле, показатели качества.

Значимость решения такой задачи определяется тем, что в типичной рутинной ситуации, когда известна структура САР, и уже заданы типы и характеристики всех ее элементов и способ их соединения (т.н. неизменяемая часть), выбранных на этапе предварительного ее проектирования, остается лишь определить тип и наилучшие (оптимальные) настроечные параметры регулятора.

Невозможность достижения желаемого качества изменением параметров САР приводит к необходимости изменения не только параметров, но и структуры САР. В простейшем случае может потребоваться заменить П – регулятор на ПИ – или ПИД – регулятор, т.е. изменить структуру регулятора.

Оптимизация САР, требующая изменения структуры и настроечных параметров ее элементов называется **структурно-параметрической**.

Как правило, при решении задач оптимизации предполагается, что параметры объекта управления изменению не подлежат: объект задан. Но в некоторых, исключительных случаях для решения технологической задачи может потребоваться и изменение объекта управления, если при имеющемся задаче технологического процесса, обслуживаемого системой автоматического регулирования, не решаются с должным качеством.

**Смысл оптимизации** в узком смысле сводится к минимизации ошибок регулирования САР в переходном и установившемся режимах, а также ее времени регулирования путем определения и задания в САР наилучших значений настроечных параметров.

#### **Функция цены и ее минимизация**

**Функция цены** это математическое понятие, определяющее совокупную количественную относительную меру качества САР при некотором сочетании ее параметров. Функция цены задается исследователем так, чтобы при наилучшем в определенном смысле сочетании и значениях параметров эта функция имела минимум.

Функциями цены могут быть **среднеквадратическая ошибка (СКО)** регулирования в переходном режиме, **величина** колебательности или **перерегулирования** и др. (см. ниже).

Функция цены является относительной мерой качества в том смысле, что позволяет сравнивать качество одной и той же САР при разных значениях ее параметров, но разные САР эта мера не позволяет сравнивать, для такого сравнения она теряет смысл.

Из множества критериев качества САР для рассмотрения ниже выберем критерий минимума среднеквадратической ошибки (СКО), а также сформулируем простой и эффективный **критерий** качества САР, основанный на **близости** величины перерегулирования САР к **5%**.

В ряду других критериев качества отметим близость настройки САР к т.н. модульному (МО), т.е. приближение ее к фильтру Баттерворта, и симметричному (СО) оптимумам.

#### **Критерий минимума среднеквадратической ошибки (СКО)**

Этот критерий качества САР использует в качестве функции цены среднеквадратическую ошибку (СКО) слежения или стабилизации в переходном режиме. Наилучшей настройкой САР (значения и сочетание параметров ее элементов) при этом считается такая, при которой СКО регулирования достигает минимума.

Метод оптимизации по критерию минимума СКО состоит в выборе таких ее параметров САР, при которых СКО - среднеквадратическая ошибка переходного процесса (без учета ошибок установившегося режима) минимальна:

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{T_m} \int_0^{T_f} e^2(t) dt} \rightarrow \min \quad (2.1)$$

Формула (2.1) это не формулировка какого-то закона природы, она сконструирована человеком для получения удобной совокупной численной оценки как ошибок измерения САР в переходном режиме, так и ее быстродействия. Удобство критерия состоит в том, что значение СКО для конкретной модели САР в модулирующей программе определяется довольно легко, хотя аналитическое решение задачи по формуле (2.1) довольно трудоемко.

Смысл формулы (2.1) состоит в том, что чем короче переходный процесс, и чем меньше колебательность САР и ее ошибки перерегулирования, тем меньше получается значение СКО. Возведение в квадрат ошибки регулирования увеличивает вклад в СКО больших значений ошибки и не позволяет положительным и отрицательным значениям компенсировать друг друга при интегрировании.

Устремление СКО к минимуму приводит к САР, имеющей высокое, насколько это возможно для конкретной САР, быстродействие, но несколько завышенную, а иногда чрезмерную колебательность. Такая настройка может служить и исходной для ее последующего уточнения.

Время интегрирования для получения СКО с достаточной точностью в моделирующей программе следует выбирать большим, чем время регулирования САР. Для статических САР из ошибки  $e(t)$  в (2.1) следует вычесть ее установившееся значение  $e_{уст}$ .

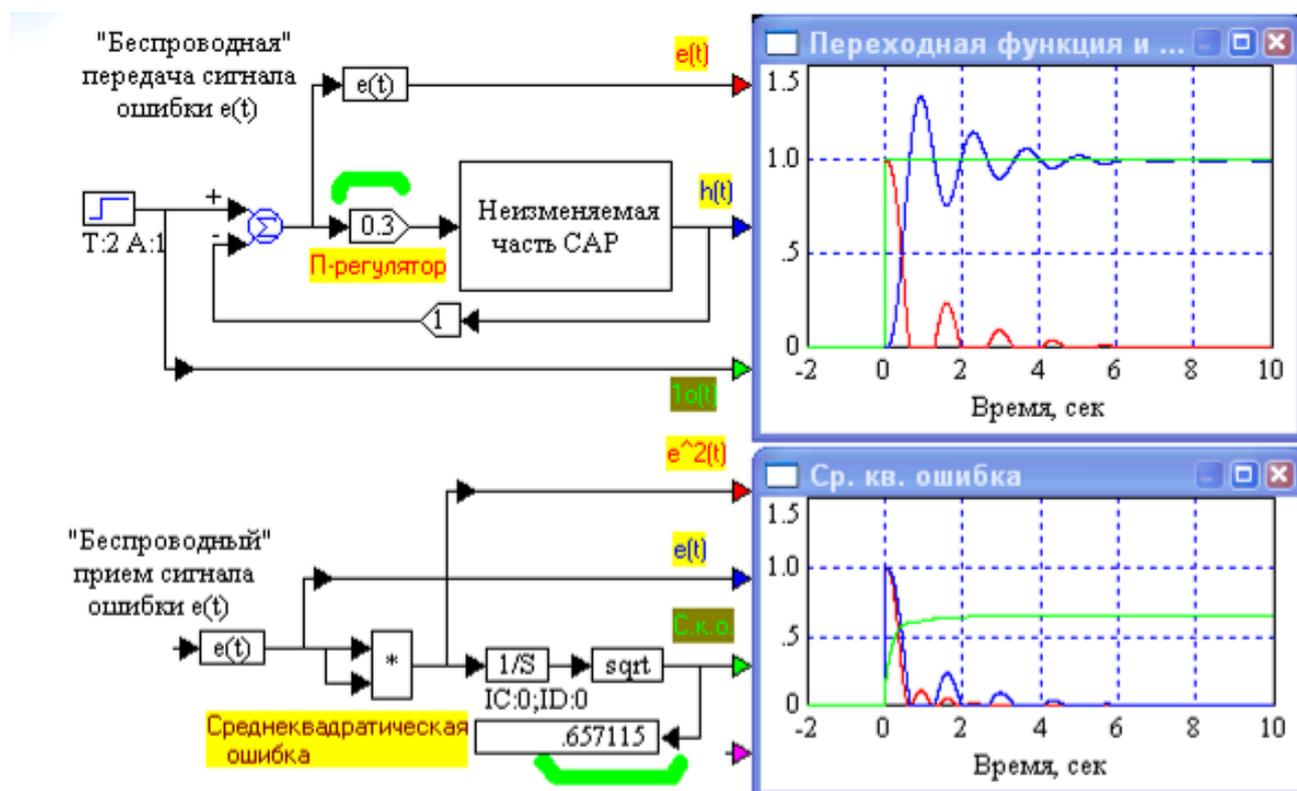
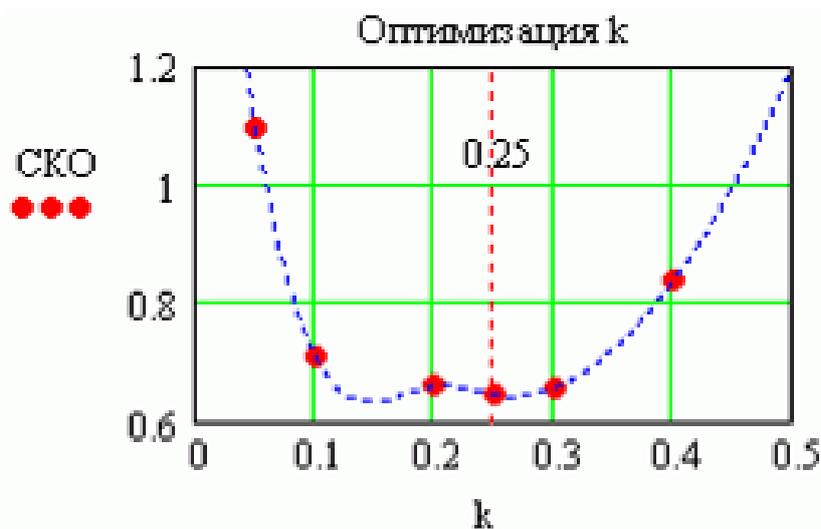


Рис.2.1.

Увеличение коэффициента усиления контура вначале улучшает качество САР, сокращая время регулирования, а затем ухудшает, увеличивая

колебательность САР и время регулирования. Лучшее значение коэффициента усиления  $\Pi$  – регулятора для данной САР равно 0.2.



*Рис.2.2. Зависимость (сглаженная в районе минимумов) среднеквадратической ошибки (СКО) переходного режима от коэффициента усиления  $\Pi$  – регулятора.*

Минимальное, а значит и оптимальное по критерию минимума СКО значение коэффициента усиления равно 0.25. Как видно на рис. 2.1, при таком значении колебательность САР несколько завышена, предпочтительнее иметь усиление 0.2

Отметим, что абсолютные значения СКО сами по себе не имеют никакого значения. Они служат лишь для сопоставления различных вариантов настройки одной и той же системы.

Итак, критерий минимума среднеквадратической ошибки позволяет приблизить САР к состоянию с наибольшим быстродействием, однако колебательность такой системы получается несколько завышенной. Такой критерий предпочтительнее использовать для минимизации времени регулирования, т.е. обеспечения максимального быстродействия САР, например в малоинерционных электронных системах слежения.

Критерий минимума среднеквадратической ошибки может быть модифицирован (см. [1]) для уменьшения колебательности САР.

#### **Критерий 5%-го перерегулирования (Сигма 5)**

Во многих задачах автоматического регулирования, например при управлении приводом поворота или подъема стрелы экскаватора, когда масса поворачиваемой электроприводом конструкции составляет десятки и сотни тонн, весьма нежелательно иметь излишнюю колебательность, вызывающую знакопеременные нагрузки на привод, сокращающие срок его службы. В таких случаях предпочтительнее иметь монотонную разгонную характеристику САР. При этом время регулирования, хотя и важный параметр, отступает на второй план. Тем не менее, если настроить САР, в частности ее регулятор, так, чтобы перерегулирование составило примерно 5%, то и знакопеременные нагрузки

будут отсутствовать, и быстродействие получится близким к максимально возможному для данного объекта управления.

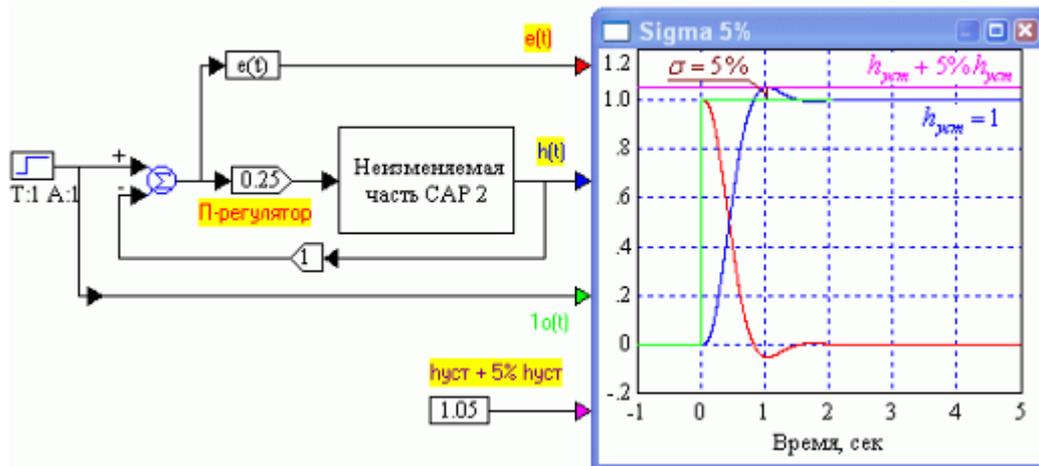


Рис. 2.3. Астатическая САУ, настроенная на оптимум качества по критерию Сигма 5 близости перерегулирования к 5%.

Настройка САУ на 5%-ое перерегулирование минимизирует время регулирования при одновременном обеспечении плавности изменения переходной характеристики.

### 2.1.1, б. Регуляторы и законы регулирования

#### Определения

Как это часто бывает в технике, да и в жизни вообще, понятие «Регулятор» имеет различную смысловую нагрузку в зависимости от области и контекста его применения, что вызывает у некоторых студентов путаницу и затруднения.

В технических курсах автоматики и в производственной практике **регулятором называют** полнофункциональное, конструктивно оформленное в виде отдельного блока физическое **устройство**. Это устройство имеет вход для получения сигнала с датчика управляемой величины объекта управления, выход для подачи сигнала управления на исполнительный механизм САУ, пульт для задания человеком-оператором требуемого поведения САУ или систему связи с компьютером, управляющим технологическим процессом. Наконец, такой физический регулятор имеет устройство, вырабатывающее сигнал управления на основе задания, текущего значения управляемой величины и, м.б. возмущения, и заданного алгоритма обработки этих сигналов. Многие технические регуляторы реализуются на основе микроконтроллеров.

Кроме того, бывает, что в состав технического регулятора включают и исполнительный механизм (ИМ), и регулирующий орган (РО). Такой регулятор достаточно подключить к объекту управления, чтобы получилась САУ.



Рис. 2.4. Примеры технических регуляторов. Автоматический регулятор напряжения APC Line-R 600 ВА. Система модульных компонентов LOVATO Electric (<http://hardware.bigmarket.ru/39175486.html> и <http://www.matic.ru/index.php?pages=172>)

В теории автоматического управления **регулятором** называют **структурный алгоритмический блок**, расположенный на функционально-структурной схеме сразу за устройством сравнения задания и управляемой величины (сумматором). Этот блок преобразует по заданному алгоритму сигнал ошибки в сигнал, подаваемый на модель исполнительного механизма (ИМ) для управления последней:

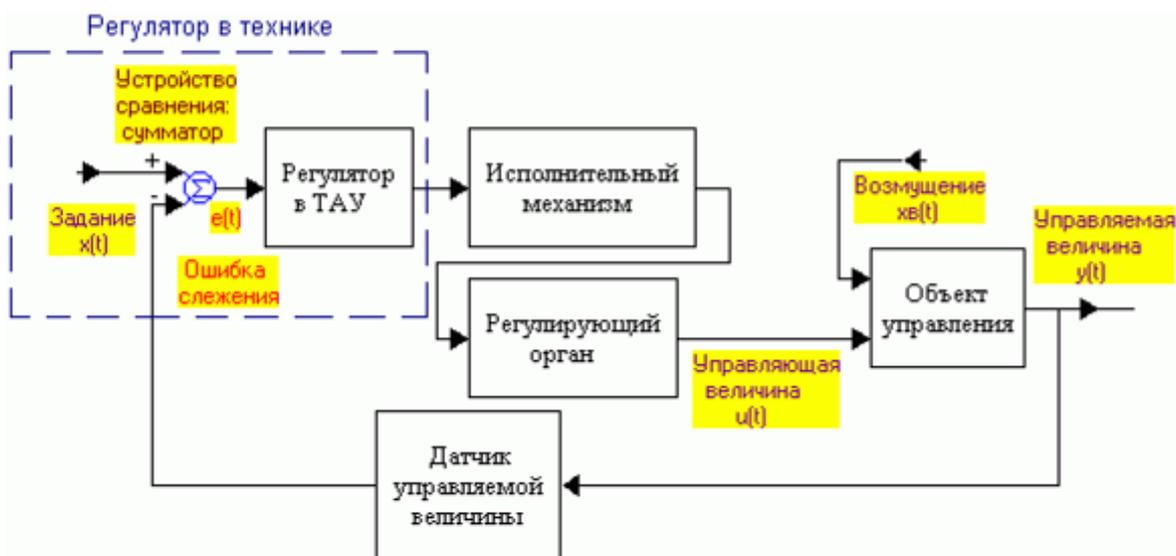


Рис. 2.5.

Регулятор САР с управлением по отклонению в ТАУ это часть технического регулятора. Т.е. в технике регулятор это физический функциональный блок, а в ТАУ в САР с управлением по отклонению регулятор это алгоритм преобразования сигнала ошибки в сигнал управления. В САР с комбинированным управлением по отклонению и возмущению регулятор реализует алгоритм преобразования сигналов ошибки и возмущения в сигнал управления.

## Законы регулирования

Законы регулирования это математические алгоритмы, в соответствии с которыми в САР с управлением по отклонению сигнал ошибки слежения (отклонение), преобразуется в сигнал управления, подаваемый на исполнительный механизм САР или непосредственно на объект управления, если ИМ и РО включены в состав модели последнего. Законы регулирования позволяют САР решать возложенные на нее задачи: осуществлять слежение и стабилизацию с требуемым качеством.

Наиболее часто используются на практике регуляторы, реализующие П-, ПИ- и ПИД- законы регулирования (пропорциональный, пропорционально-интегральный и пропорционально – интегрально - дифференциальный).

### П - регулятор

Это регулятор, реализующий простейший пропорциональный закон регулирования. Функционально он представляет собой безинерционный усилитель, а структурно – алгоритмически это пропорциональное звено:

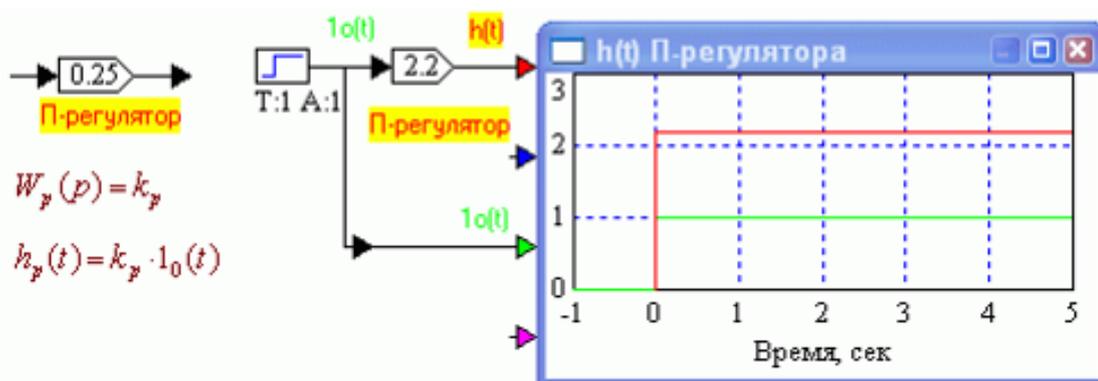


Рис. 2.6.

П - регулятор, его передаточная и переходная функции. Таким образом, П – регулятор просто усиливает сигнал ошибки в некоторое число раз. Важность П – регулятора определяется тем, что в статических САР, где он используется, изменяя его коэффициент усиления можно не только добиться устойчивости САР, но и оптимизируя значение этого коэффициента оптимизировать и качество всей САР. Однако, получить требуемые или просто хорошие показатели качества САР с помощью одного только П - регулятора удастся далеко не всегда.

### ПИ – регулятор

Выходной сигнал ПИ-регулятора пропорционален взвешенной сумме входного сигнала и интеграла от него (см. рис. 2.7). В соответствии с этим алгоритмом строится так называемая параллельная модель ПИ-регулятора. Часто используется и альтернативная эквивалентная модель, представляющая собой последовательное соединение интегратора и форсирующего звена (см. рис. 2.7).

ПИ – регулятор обладает двумя важными достоинствами. Во-первых, введение его в статическую САР вместо П - регулятора превращает САР в астатическую, что улучшает качество регулирования в установившемся

режиме. Во-вторых, ПИ – регулятор позволяет посредством форсирующего звена, входящего в его состав, в существенной мере компенсировать на высоких частотах инерционность, вносимую интегратором, и сохранить качество переходного режима исходной статической САР, в частности ее быстродействие.

Т.о. ПИ – регулятор простыми средствами одновременно улучшает качество установившегося режима работы исходной статической САР, и сохраняет качество переходного, чем и обусловлено широкое распространение таких регуляторов.

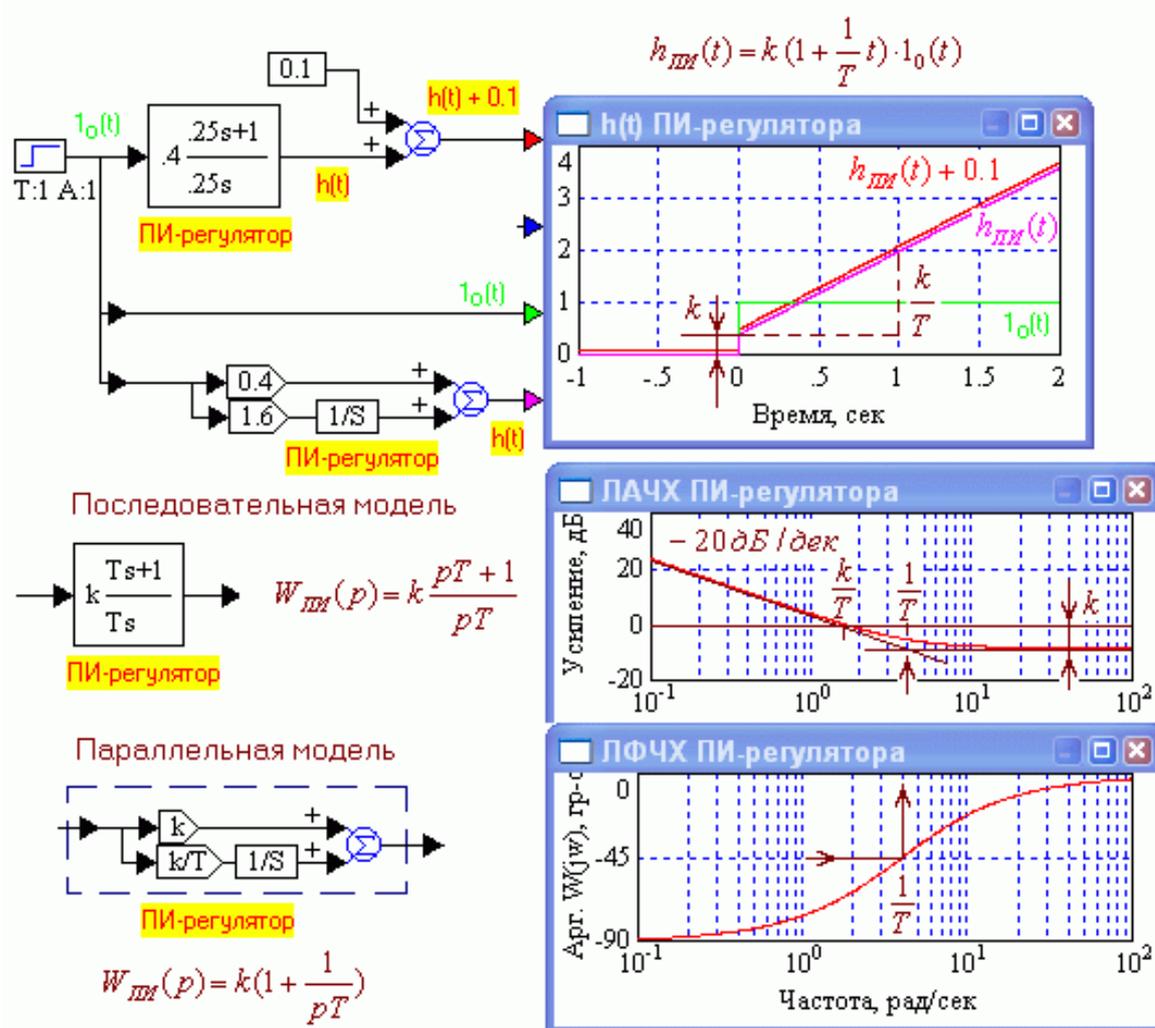


Рис. 2.7.

ПИ - регулятор, его эквивалентные структурные последовательная и параллельная формы представления, передаточные и переходные функции и частотные характеристики

Как видно на рис. 2.7, на низких частотах ПИ-регулятор ведет себя как интегратор, а на высоких – как пропорциональное звено. Тем самым при правильной настройке ПИ-регулятора улучшаются свойства САР в установившемся режиме и сохраняются свойства переходного режима, т.е. быстродействие и точность

ПИ – регулятор не только усиливает сигнал ошибки, как это делает П – регулятор, но и благодаря наличию интегратора накапливает его со временем. Это позволяет САР с ПИ – регулятором работать в установившемся режиме при отслеживании постоянных заданий с нулевой ошибкой. Другими словами, САР с ПИ-регулятором – астатическая.

### ПИД-регулятор

Выходной сигнал ПИД-регулятора пропорционален взвешенной сумме входного сигнала, интеграла от него и его производной (см. рис. 2.8). В соответствии с этим алгоритмом строится так называемая параллельная модель ПИ-регулятора. Часто используется и эквивалентная альтернативная модель, представляющая собой последовательное соединение интегратора и двух форсирующих звеньев (см. рис. 2.8). Назовем такие модели идеальными.

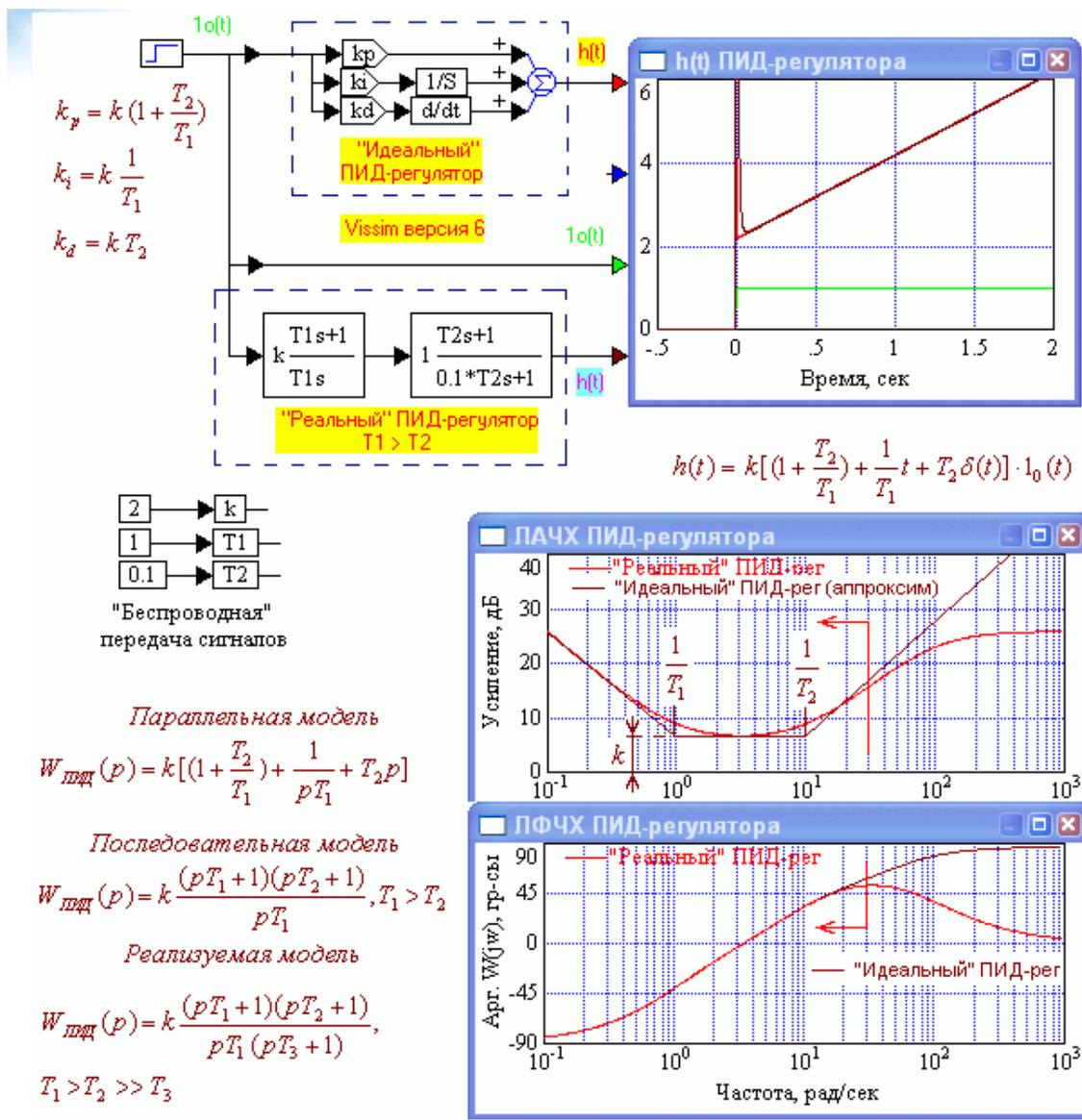


Рис. 2.8.

Три модификации ПИД - регулятора: «идеальные» параллельная, использующая не реализуемый на практике блок идеального дифференцирования, и последовательная со степенью числителя больше, чем

степень знаменателя, а также последовательная «реальная», реализуемая, поскольку последовательно с идеальным ПИД - регулятором включено апериодическое звено с малой, по сравнению с постоянными времени других элементов САР, постоянной времени. «Реальный» ПИД - регулятор выполняет свои функции только при сигналах, спектр которых ограничен сверху, т.е. для достаточно медленных сигналов (красные стрелки). Этот диапазон может быть расширен до требуемой величины уменьшением вспомогательной постоянной времени  $T_3$  ПИД – регулятор поднимает усиление одновременно на низких и на высоких частотах. Он более энергично, чем ПИ – регулятор реагирует на быстрые изменения входных сигналов, что видно на переходной функции. В результате улучшается и быстродействие САР, и качество ее установившегося и переходного режимов.

**Примечание.** Если рассматривать ПИД-регулятор как математический алгоритм обработки поступающего на него сигнала, то он, естественно, может быть реализован в виде вычислительной процедуры. Но если потребуется построить реальное устройство с такими динамическими характеристиками, то выяснится, что точная его реализация не возможна, поскольку реализуемость линейного динамического объекта требует, чтобы степень его характеристического полинома (знаменателя передаточной функции) была бы не меньше числителя передаточной функции.

Поэтому и Vissim не позволяет построить идеальную последовательную модель ПИД-регулятора только с помощью блока transferFunction (Передаточная функция). Если все-таки в Vissim'е требуется использовать именно реализуемую последовательную модель, то можно дополнить знаменатель передаточной функции сомножителем в виде полинома первого порядка с относительно малой постоянной времени, намного меньшей, чем постоянные времени ПИД-регулятора и, желательно, меньшей хотя бы на порядок, чем наименьшая постоянная времени неизменяемой части САР.

### ***2.1.1, в. Методы оптимизации САР***

Математически оптимизация САР сводится к минимизации функции стоимости путем определения (например, подбором) наилучших значений и сочетания параметров, характеризующих САР. Разработан целый ряд аналитических методов оптимизации, алгоритмов, которые сводятся к определению значений параметров, при которых функция стоимости становится минимальной. Например, в программе Vissim можно применить на выбор методы Пауэлла, Флетчера-Ривза, Полака-Рибейры и др., а в ПК "МВТУ" методы Поиск-2, Поиск-4, Стохастический и Симплекс.

Основная идея алгоритмических методов оптимизации состоит, во-первых, в таком малом изменении предварительно заданных приближенных значений параметров, при котором функция цены плавно и последовательно уменьшается, пока не достигает минимума (метод кратчайшего спуска). Так можно определить ближайший к начальным значениям параметров минимум. Но этот минимум цены в зависимости от выбора начальных значений параметров может оказаться вовсе не самым малым, глобальным, а локальным.

Во-вторых, если не только не известно приближенное значение параметров, близких к минимуму цены, но даже неизвестно, имеется ли минимум вообще, то приходится перебирать значения параметров в очень широких диапазонах, с последующим уточнением расположения минимума функции цены. Такой алгоритм в случае нескольких минимумов функции цены может случайным образом привести к любому из них.

Случается, что, при решении задач оптимизации исследователь не знает ни количество локальных минимумов, ни достаточно близких к разыскиваемому минимуму значений параметров. Для правильного решения задачи приходится применять метод проб и ошибок, задавая разные начальные значения параметров, определяя минимум функции цены и сравнивая получаемые результаты один с другим и с требованиями задания на проектирование САР.

Из методов оптимизации ниже рассмотрен приближенный метод, основанный на получении начальных значений настроечных параметров регуляторов посредством анализа ЛАЧХ разомкнутого контура САР, с последующим уточнением этих значений методом проб и ошибок [3], а также методы автоматической оптимизации в программах моделирования Vissim и ПК "МВТУ".

### **2.1.2. Определение и экспериментальное уточнение настроечных параметров регуляторов САР**

Общая идея предлагаемой ниже методики параметрической оптимизации, основывается на предварительном определении приближенных значений настроечных параметров регуляторов по ЛАЧХ неизменяемой части САР, с последующим уточнением их значений методом проб и ошибок (см. рис. 2.1). При таком методе оптимизации, будет ли она выполняться компьютером или экспериментально и вручную, важно для сокращения работы подобрать начальные значения параметров по возможности близкие к их оптимальным значениям, если такие существуют.

Метод оптимизации, сформулированный выше, предложен и апробирован в [3].

#### **2.1.2, а. Настройка П – регулятора**

##### **Предварительная коррекция**

Назовем приближенное определение коэффициента усиления П-регулятора статической САР ее предварительной коррекцией.

Первым шагом коррекции является проверка устойчивости и, при необходимости, стабилизация разомкнутого контура САР с получением запаса его устойчивости по амплитуде в 12 – 20 дБ [3].

**Примечание.** Если разомкнутый контур состоит из устойчивых звеньев (типовых звеньев до второго порядка включительно), что, как правило, и бывает, то причиной его неустойчивости является наличие внутренних контуров. Стабилизировать эти контура можно в моделирующих программах уменьшением коэффициента усиления этих контуров в 4 – 10 раз, после предварительного выведения их на границу устойчивости уменьшением коэффициента усиления контура. Установление факта приведения САР на границу устойчивости осуществляется по виду переходной функции, которая

на границе устойчивости содержит колебательную компоненту, амплитуда которой медленно увеличивается со временем на протяжении многих периодов этих колебаний.

Предварительная коррекция заключается в обеспечении путем варьирования коэффициента усиления контура исходной САР (т.н. неизменяемой части САР, см. например рис. 2.1 или 2.3) во-первых, запасов устойчивости

- по фазе  $45^{\circ} - 70^{\circ}$ , лучше всего  $60^{\circ}$  ;

- по амплитуде 12 – 20 дБ (4 – 10 раз), лучше 18 дБ, а также, если это окажется возможным, то и обеспечение усиления на нижних частотах в 20 – 40 дБ, лучше 40 дБ.

Для решения задачи предварительной коррекции удобнее всего воспользоваться ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура САР:

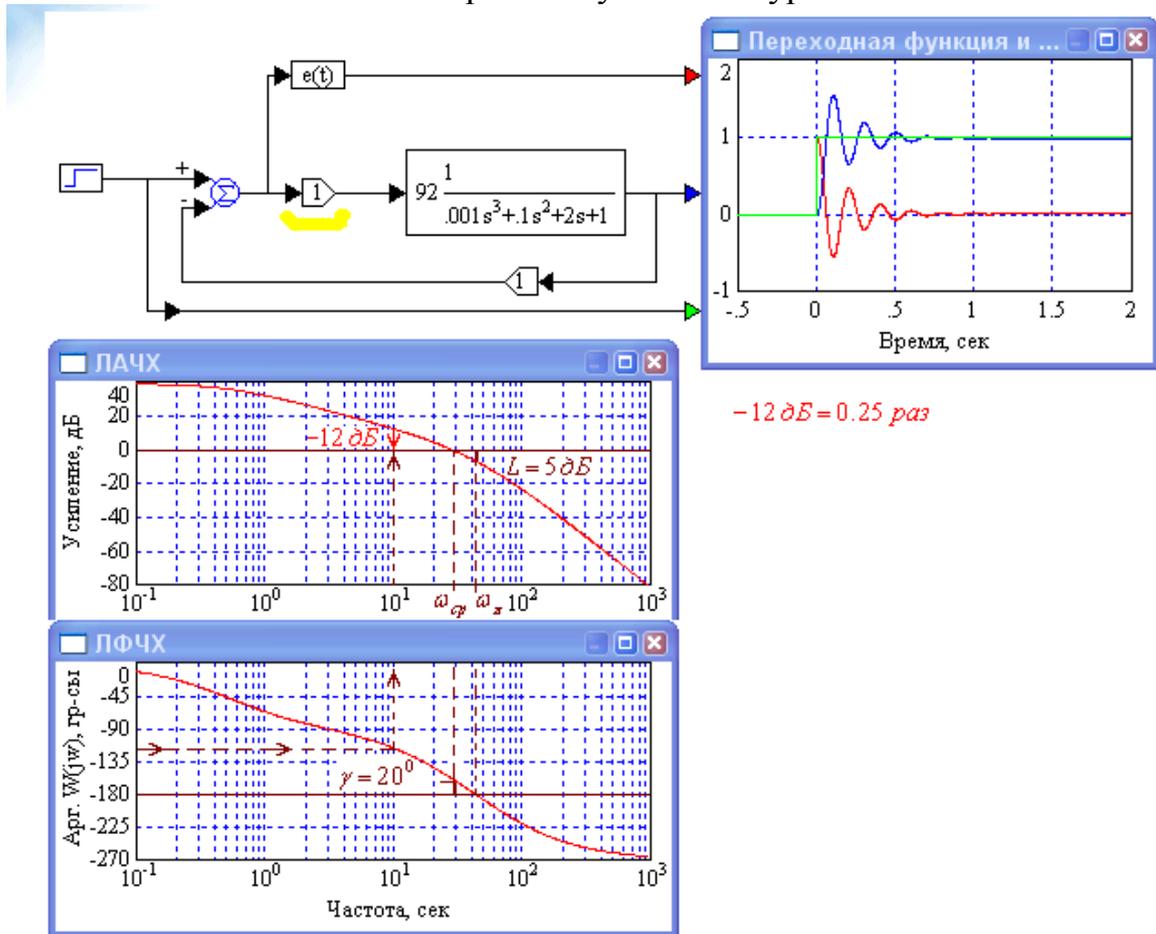


Рис. 2.9.

Увеличение запасов устойчивости САР до оптимальных значений путем опускания ЛАЧХ вниз устраняет ее повышенную колебательность. В данном случае потребовалось опускание на 12 дБ, что соответствует изменению усиления контура в  $10^{-20/12} = 0.25$ , т.е. уменьшению его в 4 раза. На осциллограммах показано как ведут себя переходные функции замкнутых САР, а ЛАЧХ и ЛФЧХ построены для их разомкнутых контуров.

Таким образом, для примера, рассмотренного на рис. 2.9, хорошим предварительным значением коэффициента усиления П-регулятора является

0.25, начиная с которого можно проводить окончательную оптимизацию его значения.

### **Оптимизация значения коэффициента усиления П–регулятора**

Остается методом проб и ошибок, слегка изменяя начальное значение коэффициента усиления П-регулятора подобрать такое, при котором перерегулирование САР составит 5%. Для схемы рис. 2.9 оптимальное значение П-регулятора получается равным 0.2.

**Примечание.** В принципе, можно было бы попробовать выразить математически перерегулирование замкнутой САР как функцию коэффициента усиления и отыскивать минимум этой функции. Но математические выкладки получаются чрезмерно громоздкими для инженерного решения задачи, поэтому экспериментальный метод последовательных приближений в моделирующей программе является на сегодня более легким и поэтому предпочтительным.

#### **2.1.2, б. Настройка ПИ – регулятора**

Если при оптимизации коэффициента усиления статической САР, рассмотренной в предыдущем пункте, не удастся получить САР с хорошими показателями качества (САР имеет большие ошибки в установившемся режиме вследствие малого усиления контура на нижних частотах), то приходится изменять структуру регулятора, заменяя П–регулятор на ПИ-регулятор.

#### **Приближенное определение настроечных параметров ПИ-регулятора**

Поскольку САР с ПИ-регулятором является астатической, то для предварительной ее коррекции достаточно обеспечить точно такие же, как и ранее, запасы устойчивости

- по фазе  $45^{\circ} - 70^{\circ}$ , лучше всего  $60^{\circ}$  и
- по амплитуде 12 – 20 дБ (4 – 10 раз), лучше 18 дБ,
- путем изменения коэффициента усиления контура.

Поскольку ПИ-регулятор содержит интегратор, то САР с ним обязательно является астатической. Поэтому требований к величине коэффициента усиления контура с точки зрения обеспечения качества работы САР в статике, в отличие от статической САР, не предъявляется.

Обеспечить требуемые запасы устойчивости можно в различной последовательности, но предпочтительнее сделать следующим образом:

- в исходной статической САР, варьируя коэффициент усиления П-регулятора обеспечить запас устойчивости по фазе в  $60^{\circ} - 70^{\circ}$  или больше в соответствии с рис. 2.9, и запас устойчивости по амплитуде не менее 12 дБ;
- по ЛАЧХ разомкнутого контура только что скорректированной САР определить оптимальное значение постоянной времени Т ПИ-регулятора:

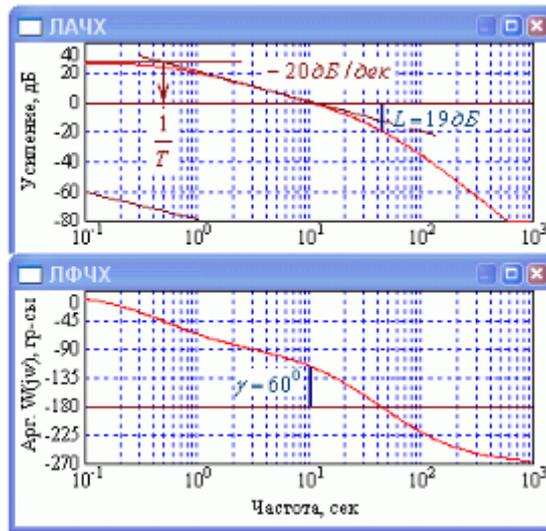


Рис. 2.10. Определение постоянной времени ПИ-регулятора по ЛАЧХ разомкнутого контура предварительно скорректированной статической САР.

Искомая постоянная времени обратно пропорциональна частоте сопряжения отрезков аппроксимации САР с наклонами 0 и  $-20$  дБ/дек. В данном примере  $T = 1/0.5 = 2.0$  сек

- начальное значение коэффициента усиления ПИ-регулятора выбрать равным  $k = 0.5$  (эмпирическое значение).

В результате, с учетом коэффициента усиления П-регулятора ( $k_p = 0.25$ ) передаточная функция ПИ-регулятора и схема САР примут вид:

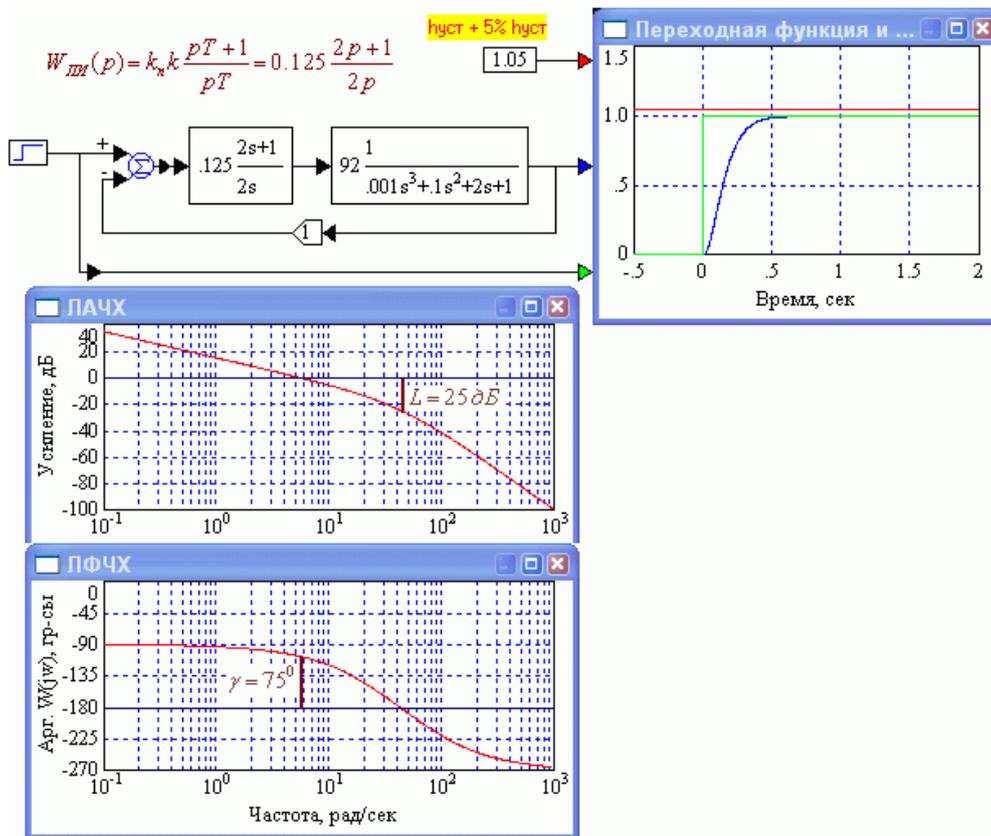


Рис. 2.11. Приближенная настройка ПИ-регулятора

Как видно, переходная характеристика довольно хороша, а запасы устойчивости слегка завышены, поэтому перерегулирование равно нулю. Исходное приближение вполне удовлетворительное, но быстродействие САР может быть несколько повышено

### Оптимизация значения коэффициента усиления ПИ-регулятора

В общем случае для ПИ-регулятора оптимизацию следует осуществлять по обоим его параметрам: коэффициенту усиления  $k$  и постоянной времени  $T$ . Это трудоемкая работа для выполнения вручную. Поэтому далее можно ограничиться лишь оптимизацией коэффициента усиления, считая, что постоянная времени  $T$  определена с удовлетворительной точностью.

Остается методом проб и ошибок, изменяя коэффициент усиления ПИ-регулятора добиться 5%-ого или чуть меньшего перерегулирования  $\sigma$ :

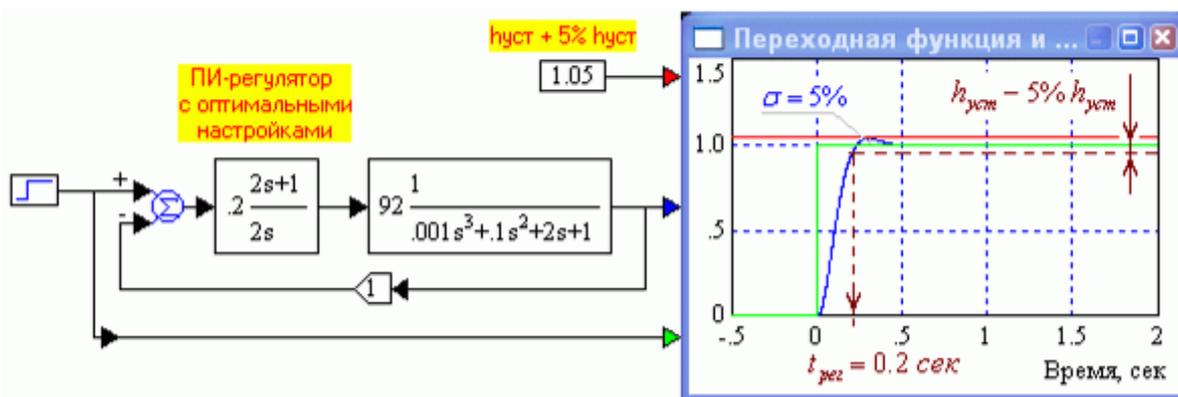


Рис. 2.12. Оптимизированная модель САР с ПИ-регулятором.

Перерегулирование составляет 5%. Это обеспечивает минимальное время регулирования для тех объектов, которым противопоказана излишняя колебательность, сопровождающаяся знакопеременными динамическими нагрузками

### 2.1.2, в. Настройка ПИД - регулятора

Использование ПИД-регулятора позволяет повысить быстродействие САР в переходном и установившемся режимах по сравнению с САР такой же неизменяемой частью, в которой используется ПИ-регулятор.

### Приближенное определение настроечных параметров ПИД-регулятора

Поскольку САР с ПИД-регулятором является астатической, то для предварительной ее коррекции достаточно обеспечить такие, как и ранее для ПИ-регулятора, запасы устойчивости

- по фазе  $45^{\circ} - 70^{\circ}$ , лучше всего  $60^{\circ}$  и
- по амплитуде 12 – 20 дБ (4 – 10 раз), лучше 18 дБ,
- путем изменения коэффициента усиления контура.

Определить постоянные времени регулятора:

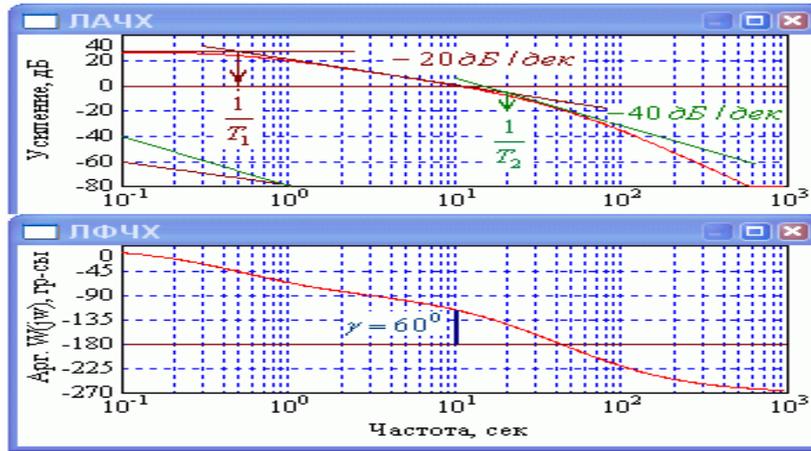


Рис. 2.13.

Постоянные времени ПИД-регулятора определяются по частотам точек сопряжения отрезков с наклонами 0, -20 и -40 дБ/дек линейной аппроксимации низкочастотной части ЛАЧХ разомкнутого контура предварительно скорректированной статической САР. В данном случае  $T_1 = 1/0.5 = 2.0$  сек и  $T_2 = 1/20 = 0.05$  сек

После определения постоянных времени ПИД-регулятора следует принять коэффициент усиления  $k = 0.5$  (значение получено эмпирическим путем), вычислить и задать коэффициенты усиления ветвей регулятора и построить переходную характеристику полученной САР:

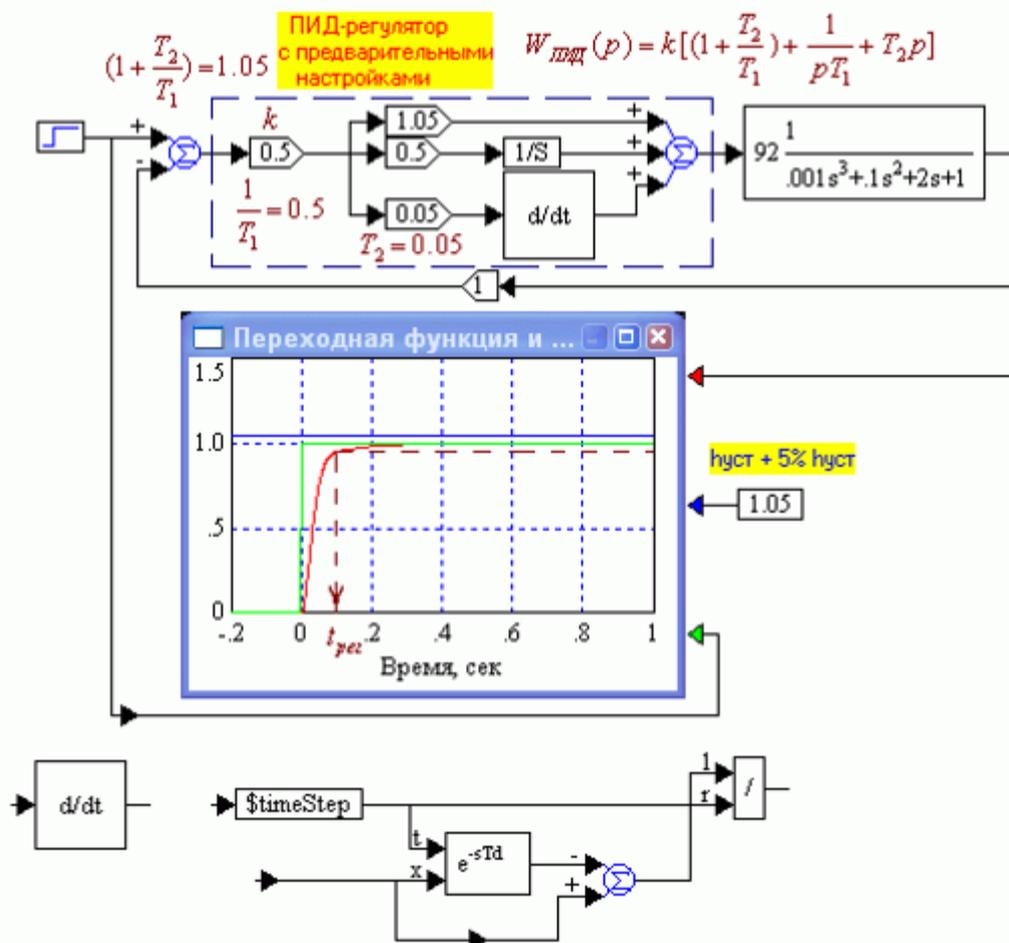


Рис. 2.14.

САР с предварительными настройками параметров ПИД-регулятора. Время регулирования составляет 0.09 сек, оно значительно меньше, чем на рис. 2.12, перерегулирование равно нулю. Как видно, качество САР уже неплохое. Внизу показан состав блока дифференцирования, собранного в программе Vissim

### Оптимизация значения коэффициента усиления ПИД-регулятора

Поскольку у предварительно скорректированной САР рис. 2.14 перерегулирование отсутствует, то это свидетельствует о потенциальной возможности повышения ее быстродействия без заметного ухудшения максимальных значений ошибок переходного режима. Для этого методом проб и ошибок изменением коэффициента усиления регулятора добьемся перерегулирования равного 5%:

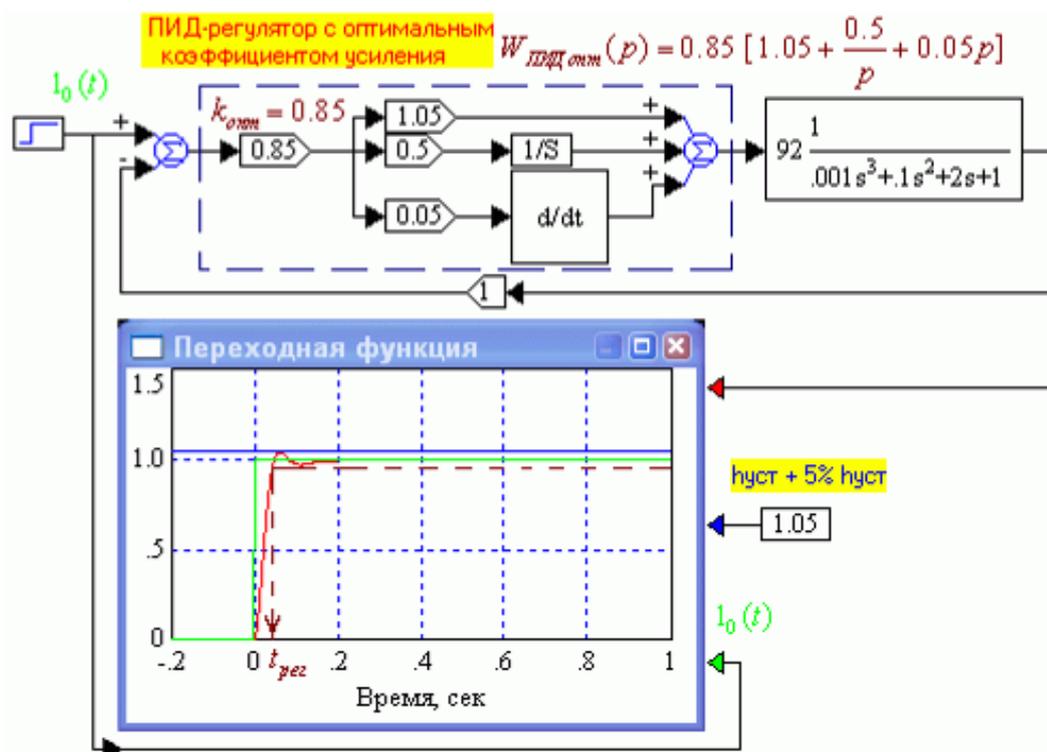


Рис. 2.15.

САР с оптимальной настройкой коэффициента усиления ПИД-регулятора, выполненной вручную. Оптимальное значение, подобранное вручную методом проб и ошибок равно  $k = 0.85$ . Время регулирования оптимизированной САР составляет 0.04 сек, что в два раза быстрее, чем у САР на рис. 2.14.

#### 2.1.2, г. Сравнение эффективности регуляторов

Рассмотрим переходные функции систем автоматического регулирования, имеющих одинаковые неизменяемые части и разные типы регуляторов с оптимальными настройками (Рис. 2.16).

Как видно, оптимальный ПИ-регулятор дает САР равную по быстродействию САР с П-регулятором, но превосходящую ее нулевой ошибкой слежения в статике (при отслеживании постоянной величины). ПИД-регулятор в данном случае дает САР намного, в пять раз, превосходящую обе других по быстродействию, хотя колебательность такой САР проявляется в большей

мере. Это, впрочем, при необходимости легко поправить небольшим уменьшением коэффициента усиления. Установившаяся ошибка САР с ПИД-регулятором, как и у САР с ПИ-регулятором, естественно, равна нулю.

Итак, ПИ-регулятор позволяет САР управлять объектом «мягче», а ПИД-регулятор – энергичнее. Оба они дают нулевую ошибку слежения в статике, в отличие от малой, но не нулевой ошибки САР с П-регулятором.

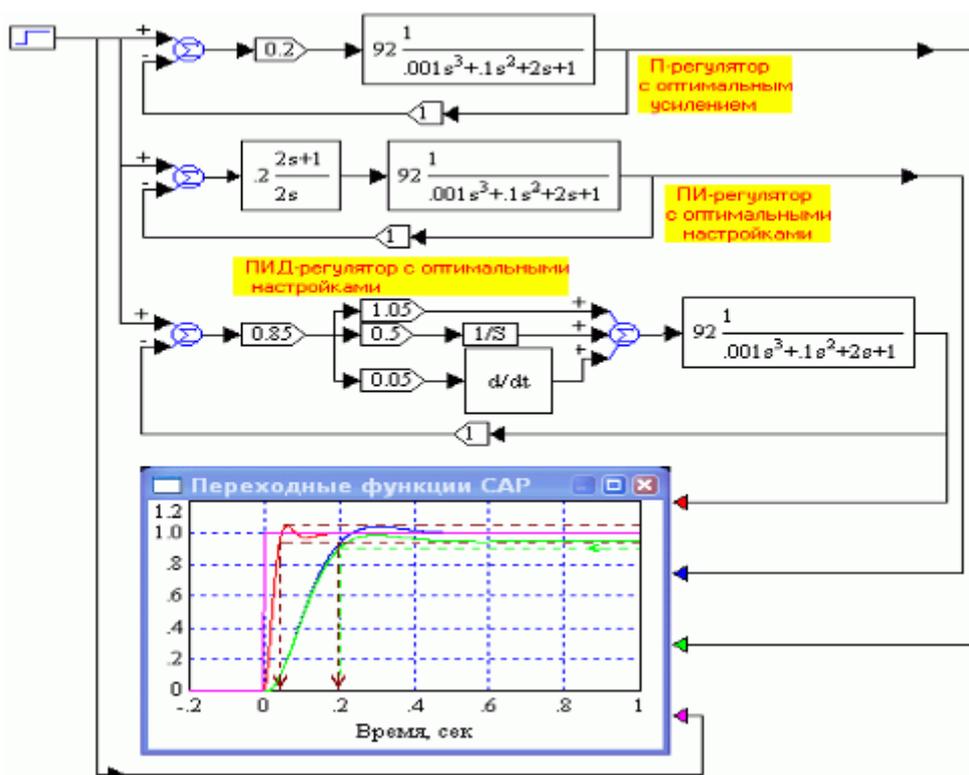


Рис. 2.16.

Сравнение систем автоматического регулирования с одинаковыми неизменяемыми частями и с оптимальными настройками П-, ПИ- и ПИД-регуляторов, полученными с использованием ЛАЧХ и метода проб и ошибок выше.

**Пояснение.** Формально время регулирования  $t_{\text{рег}}$  оптимизированной САР определяется частотой среза ее ЛАЧХ:  $t_{\text{рег}} = (1 - 5) / \omega_{\text{ср}}$ . При оптимальной настройке регулятора частота  $\omega_{20-40}$  сопряжения линейных отрезков аппроксимации ЛАЧХ с наклонами -20 и -40 дБ/дек близка к частоте среза  $\omega_{\text{ср}}$  и несколько, примерно на октаву, превышает ее. Поэтому фактически время регулирования САР косвенно определяется этой частотой сопряжения. Частота  $\omega_{20-40}$ , в свою очередь в случае оптимальной настройки П- и ПИ- регуляторов равна или близка к величине, обратной второй по величине постоянной времени неизменяемой части САР. В случае оптимальной настройки ПИД-регулятора частота  $\omega_{20-40}$  аналогично определяется третьей по величине постоянной времени неизменяемой части, поскольку ПИД-регулятор компенсирует две старшие инерционности своими форсирующими множителями.

Поэтому время регулирования оптимизированных САР с П- и ПИ-регуляторами примерно одинаково, а с ПИД-регулятором оно может быть

значительно меньше, если третья по величине постоянная времени значительно меньше второй. Это положение проиллюстрируем рисунком:

Комплексные коэффициенты передачи разомкнутых САР

$$W_{\Pi}(\omega) := 0.2 \cdot \frac{92}{0.001(j \cdot \omega)^3 + 0.1(j \cdot \omega)^2 + 2 \cdot j \cdot \omega + 1} \quad \text{С П-регулятором}$$

$$W_{\text{ПИ}}(\omega) := 0.2 \cdot \frac{2 \cdot j \cdot \omega + 1}{2 \cdot j \cdot \omega} \cdot \frac{92}{0.001(j \cdot \omega)^3 + 0.1(j \cdot \omega)^2 + 2 \cdot j \cdot \omega + 1} \quad \text{С ПИ-регулятором}$$

$$W_{\text{ПИД}}(\omega) := 0.85 \cdot \left( 1.05 + \frac{0.5}{j \cdot \omega} + j \cdot \omega \cdot 0.05 \right) \cdot \frac{92}{0.001(j \cdot \omega)^3 + 0.1(j \cdot \omega)^2 + 2 \cdot j \cdot \omega + 1} \quad \text{С ПИД-регулятором}$$

$$L_{\Pi}(\omega) := 20 \cdot \log(|W_{\Pi}(\omega)|) \quad \text{ЛАЧХ, дБ}$$

$$\phi_{W_{\Pi}}(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(W_{\Pi}(\omega)) \quad \text{ЛФЧХ, градусы} \quad \phi_{W_{\Pi}}(\omega) := \begin{cases} \phi_{W_{\Pi}}(\omega) & \text{if } \omega < 44.73 \\ (\phi_{W_{\Pi}}(\omega) - 360) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$st := -2, -1.95..3 \quad \omega(st) := 10^{st}$$

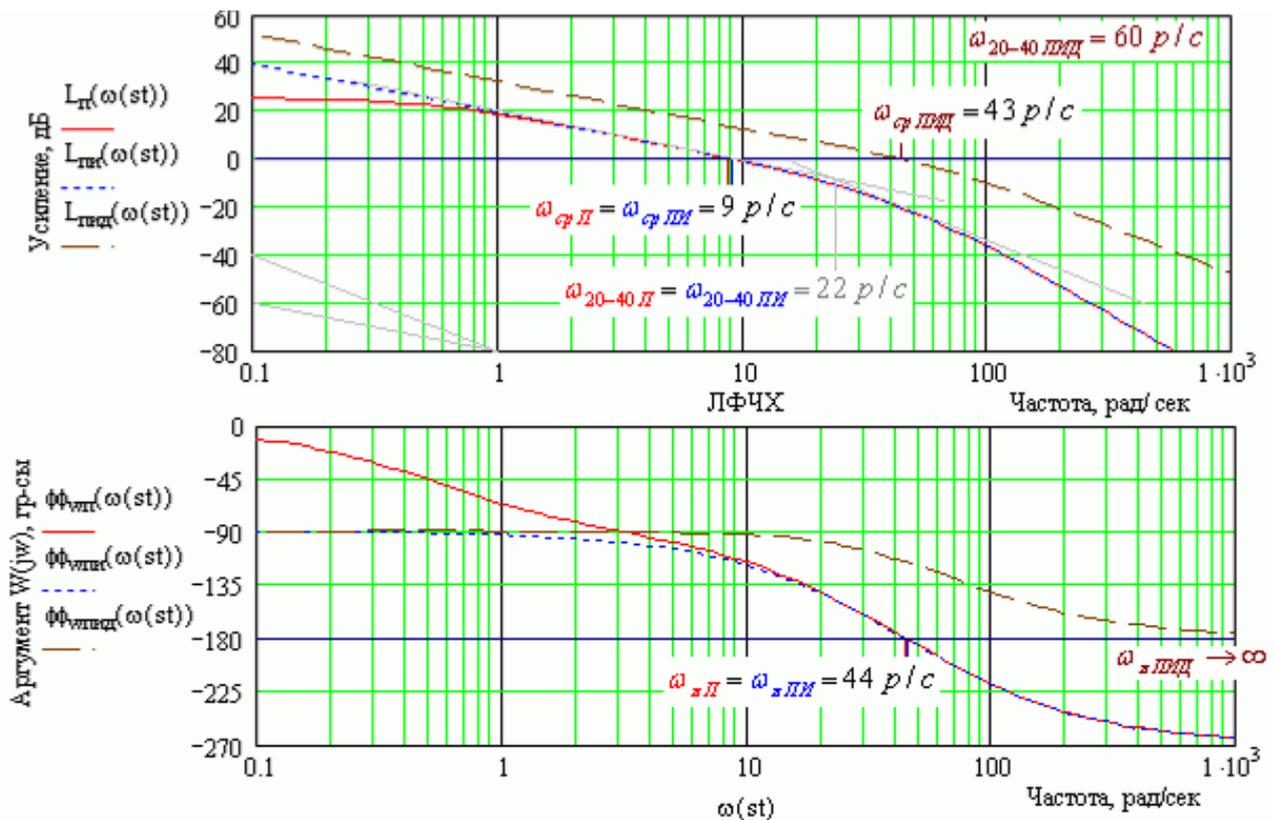


Рис. 2.16а.

ЛАЧХ и ЛФЧХ оптимизированных САР с П- ПИ- и ПИД-регуляторами. Быстродействие САР с П- и ПИ-регуляторами одинаково и определяется второй по величине постоянной времени неизменяемой части САР ( $t_{\text{рег}} = 1/\omega_{\text{ср ПИ}} = 2/\omega_{20-40 \text{ ПИ}} = 2 \cdot T_2$ ), а быстродействие САР с ПИД-регулятором выше и

определяется третьей по величине постоянной времени неизменяемой части САР ( $t_{рег} = 1/\omega_{ср\ ПИД} = 2/\omega_{20-40\ ПИД} = 2 \cdot T_3$ )

То же самое можно проиллюстрировать аналитически:

## Компенсация инерционности контура САР ПИД-регулятором

Передаточные функции разомкнутых оптимизированных САР

$$W_{\text{н}}(p) := 0.2 \cdot \frac{92}{0.001p^3 + 0.1p^2 + 2 \cdot p + 1} \quad \text{С П-регулятором}$$

$$0.001p^3 + 0.1p^2 + 2 \cdot p + 1 = (2p + 1)(0.05p + 1)(0.001p + 1) \quad \text{Факторизация знаменателя}$$

$T_1 = 2 \text{ с}, T_2 = 0.05 \text{ с}, T_3 = 0.001 \text{ с}$

$$W_{\text{н}}(p) := 0.2 \cdot \frac{92}{(2 \cdot p + 1) \cdot (0.05 \cdot p + 1) \cdot (0.001 \cdot p + 1)} \quad \text{С П-регулятором}$$

$$W_{\text{ии}}(p) := 0.2 \cdot \frac{2 \cdot p + 1}{2 \cdot p} \cdot \frac{92}{(2 \cdot p + 1) \cdot (0.05 \cdot p + 1) \cdot (0.001 \cdot p + 1)} \quad \text{С ПИ-регулятором}$$

$$W_{\text{пид}}(p) := 0.85 \cdot \left( 1.05 + \frac{0.5}{p} + 0.05 \cdot p \right) \cdot \frac{92}{(2 \cdot p + 1) \cdot (0.05 \cdot p + 1) \cdot (0.001 \cdot p + 1)} \quad \text{С ПИД-регулятором}$$

*Параллельная модель*

$$W_{\text{пид}}(p) = k \left[ \left( 1 + \frac{T_2}{T_1} \right) + \frac{1}{pT_1} + T_2 p \right]$$

*Последовательная модель*

$$W_{\text{пид}}(p) = k \frac{(pT_1 + 1)(pT_2 + 1)}{pT_1}, T_1 > T_2$$

$$1.05 + \frac{0.5}{p} + 0.05 \cdot p = \frac{(2 \cdot p + 1)(0.05p + 1)}{2p} \quad \text{ПИД-регулятор}$$

$$W_{\text{пид}}(p) := 0.85 \cdot \frac{(2 \cdot p + 1)(0.05p + 1)}{2p} \cdot \frac{92}{(2 \cdot p + 1) \cdot (0.05 \cdot p + 1) \cdot (0.001 \cdot p + 1)}$$

Рис. 2.16, б.

Форсирующий множитель ПИ-регулятора компенсирует наибольшую постоянную времени неизменяемой части САР (объекта управления), но одновременно вносит инерционность интегратора с той же постоянной времени. Поэтому длительность переходных процессов САР с П- и ПИ-регуляторами примерно одинакова, но САР с ПИ-регулятором становится астатической. Форсирующие множители оптимального ПИД-регулятора компенсируют две наибольшие инерционности неизменяемой части САР. В то же время, ПИД-регулятор вносит в контур инерционность интегратора с постоянной времени, равной наибольшей постоянной времени объекта управления. В итоге длительность переходного процесса САР с ПИД-регулятором значительно короче, чем у САР с П- и ПИ-регуляторами, при условии, что постоянные времени объекта управления значительно отличаются.

### 2.1.3. Об учете физической природы объекта управления

Формально, с математической точки зрения, решения, полученные выше, корректны и красивы. Соотнесем переходные характеристики полученных выше САР и переходную характеристику ее неизменяемой части:

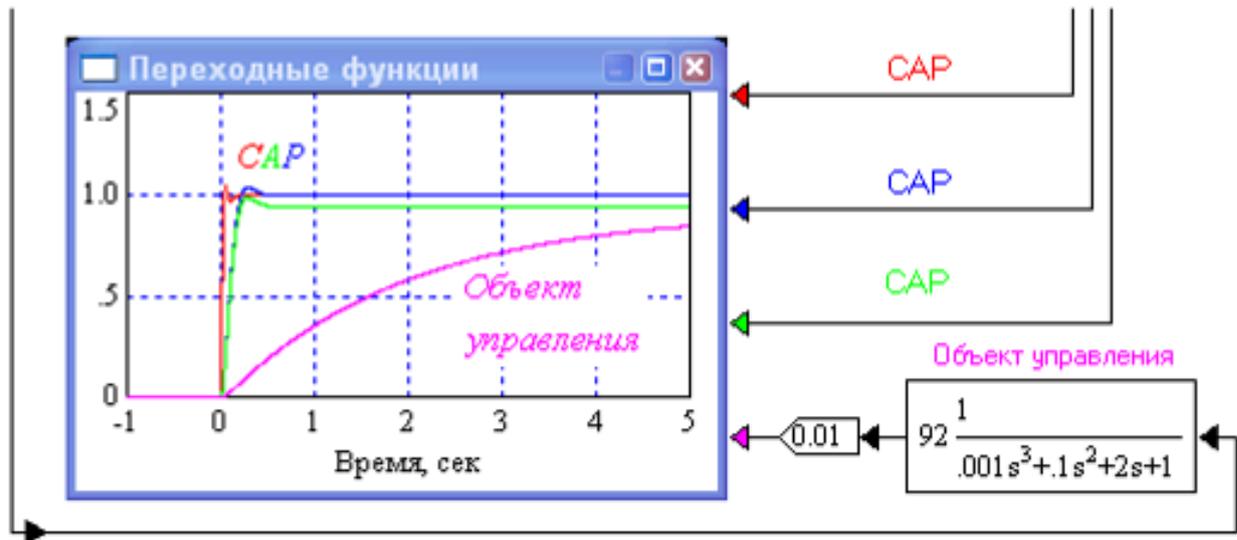


Рис.2.17 (анимация, 2 кадра)

Рис.2.17.

Переходные функции объекта управления и систем автоматического управления им (уменьшение масштаба времени рис. 2.16)

Невооруженным взглядом на рис. 2.17 видно, что быстродействие САР порядка на два лучше, чем время разгона объекта управления. Объясняется это сильным отличием главной и следующей за ней постоянных времени неизменяемой части, наличием контура управления и форсирующих множителей в ПИД-регуляторе.

Отметим, что структурные модели линейных САР, рассматриваемые в ТАУ, в частности, рассмотренные выше, как правило, не учитывают в явной форме **закон сохранения энергии**.

Конечно, модели предполагают, что она сохраняется, но откуда она берется и как преобразуется, какая мощность требуется для управления объектом, не рассматривается и в явном виде не описывается. Например, для работы усилительного (пропорционального) звена требуется подведение извне энергии, но на структурных схемах, как правило, это не показывается. Кроме того, линейные системы по определению не описывают такие явления, как ограничение мощностей, потребляемых и вырабатываемых элементами САР, в частности, объектами управления.

Поэтому рассмотренные выше модели в равной мере описывают реакцию линеаризованной модели САР как на относительно малое приращение задания, соответствующее единичному скачку на ее входе, так и на огромное изменение. В этом и состоит особенность, достоинство и ограниченность линейных моделей систем управления.

**Примечание.** При необходимости можно построить и модель, учитывающую в явном виде требуемые для управления мощности. Но такая

модель должна будет учитывать ограничение создаваемых и потребляемых в элементах САР мощностей, а следовательно она будет нелинейной, что выводит нас из класса рассматриваемых в данной работе линейных систем.

Однако обратимся к физической природе объекта управления (неизменяемой части САР).

Предположим, что основу неизменяемой части САР составляет инерционный объект управления, например, двигатель постоянного тока, приводящий в движение некоторую машину. По разгонной характеристике рис. 2.17 видно, что время его разгона составляет примерно 6 сек (в три раза больше, чем главная постоянная времени, равная 2 сек, см. знаменатель передаточной функции на рис. 2.17). Но как видно на рис. 2.17 синтезированная САР заставит двигатель разогнаться от нулевой до номинальной частоты, в зависимости от типа регулятора за 0.2 сек и даже за 0.04 сек, т.е. примерно в 100 раз быстрее! Бедный двигатель и система его электропитания!

Формально такую ситуацию, с подачей на двигатель мощностей, многократно больших его номинальной, представить можно, но на практике это наверняка приведет к перегрузке и выходу из строя, как системы электропитания, так и самого двигателя.

В то же время, если единичная ступенька на входе САР соответствует разгону двигателя на малую величину, например на 1 рад/сек, с частоты 500 рад/сек до 501 рад/сек, то такое незначительное увеличение может потребовать вовсе не запредельного увеличения мощности, подаваемой на двигатель. В этом случае САР действительно способна реагировать в сто раз быстрее.

Итак, следует различать **время разгона** объекта, когда его управляемая величина должна измениться от нуля до номинала и **время регулирования** САР, когда речь идет об относительно малых приращениях задающей, а следовательно и управляемой величин, не требующих подведения к объекту запредельных значений мощностей. Оценка времени регулирования при анализе САР и предполагает наличие относительно малых изменений задания.

Отметим, что объект управления работает в технологической цепочке, например на обогатительной фабрике. При этом, включение и выключение его из работы, а значит и остановка и разгон, проводятся относительно редко, в то время, как стабилизация и слежение осуществляются большую часть времени. Отсюда и значимость оценки и минимизации **времени регулирования**, в течение которого ошибка слежения и стабилизации может превышать допустимую, снижая качество продукции.

Таким образом, после теоретического синтеза модели САР, а еще лучше, до этого, следует определить и задать в ней ограничения на управляющие воздействия. Это приведет к тому, что время разгона от нуля до номинала управляемой величины будет определяться объектом управления, равно ему или слегка меньше, а реакция САР на малые изменения задающей величины будет значительно более быстрой.

Тем не менее, если на мощность управляющих величин не накладывается ограничений, результаты рис. 2.16 можно рассматривать как вполне корректные при любых значениях скачка задания от нуля до номинала: время разгона САР можно сделать таким же, как время регулирования. Это может

быть, например, в маломощных фотоэлектронных системах слежения, системах ФАПЧ, электрических схемах и т.п., где мощность этих сигналов мала.

#### 2.1.4. САР в режиме стабилизации

Выше основное внимание уделялось оптимизации САР в режиме слежения. САР при управлении типовыми промышленными объектами и процессами в соответствии с требованиями технологии чаще всего основную часть времени работают в режиме стабилизации, компенсируя влияние изменяющихся возмущений на управляемую величину объекта. Этим и определяется значимость режима стабилизации – именно в этом режиме производится продукция и обеспечивается ее должное качество.

Оптимизировав САР в режиме слежения, следует проверить качество ее работы в режиме стабилизации и при необходимости внести коррективы.

Для анализа САР в режиме стабилизации следует привести (пересчитать) возмущение ко входу или к выходу объекта управления. Сделать это можно либо аналитически, записав дифференциальные уравнения, связывающие управляемую величину с возмущением, либо практически, подав на объект управления дозированное возмущение и по разгонной характеристике управляемая величина – возмущение построить модель.

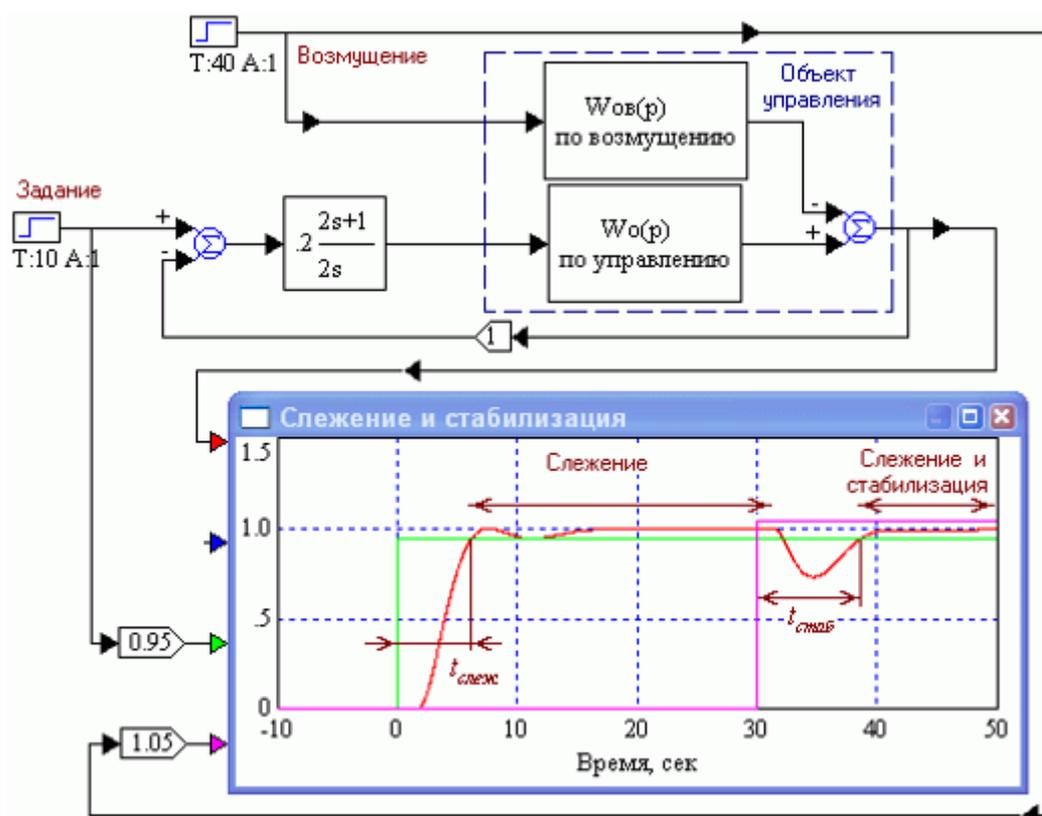


Рис. 2.18.

САР осуществляет слежение и стабилизацию. Во время переходных процессов, длящихся сравнительно недолго, ошибки недопустимо велики.

С шестой до 32-й секунды управляемая величина пропорциональна заданию – ступенчатой функции, поданной в нулевой момент времени (салатная линия). Слежение осуществляется с допустимой ошибкой.

Изменение возмущения, заданного в виде ступенчатой функции в момент времени 30 сек (фиолетовая линия), отклоняет на некоторое время управляемую величину от требуемого заданием значения, равного единице. САР, благодаря наличию контура обратной связи, через некоторое время компенсирует это отклонение, т.е. осуществляет стабилизацию. С 38-й по 50-ю секунды САР одновременно решает задачи слежения и стабилизации.

Остается справиться у технолога, достаточно ли быстродействие САР в режиме стабилизации и удовлетворяет ли его величина ошибки переходного режима при заданном нормированном возмущении.

## **2.2. Автоматическая оптимизация настроечных параметров регулятора САР в программах Vissim и ПК «МВТУ»**

И Vissim, и ПК «МВТУ» позволяют автоматизировать рассмотренное выше экспериментальное уточнение значений параметров, полученных приближенным способом, например с помощью ЛАЧХ. Более того, оптимизация в этих программах может быть проведена сразу по нескольким параметрам, например для ПИД-регулятора сразу по всем трем. Выполнение этой работы вручную довольно трудоемкое занятие.

### **2.2.1. Принцип оптимизации параметров в программе Vissim**

Принцип оптимизации в программе Vissim состоит в автоматическом поиске сочетания значений параметров, непосредственно влияющих на качество САР, и опосредованно влияющих на заданную исследователем функцию цены, такого, который приводит к минимальному ее значению.

Функция цены выбирается исследователем в соответствии с некоторым критерием качества САР так, чтобы при наилучшем, в определенном смысле, качестве она достигала минимального значения.

Для автоматической оптимизации в Vissim'е применяется специальный режим «Оптимизация» с использованием блока `parameterUnknown` (Неизвестный параметр) с помощью которого задаются исходные значения параметров и получаются их оптимальные значения, а также блока `cost` (Цена), с помощью которого формируется функция цены.

В режиме оптимизации Vissim последовательно автоматически, в соответствии с выбранным исследователем алгоритмом, выбирает значения переменных, вычисляет функцию цены, сравнивает ее значение с предыдущими, изменяет значения параметров, вновь находит значение цены, стремясь найти такое сочетание параметров, при которых функция цены станет минимальной.

Принцип работы ПК «МВТУ» в режиме оптимизации в общих чертах тот же.

#### **2.2.1, а. Блоки Vissim'a `parameterUnknown` и `Cost`**

Определение наилучших значений параметров в программе Vissim осуществляется при помощи блоков искомого параметра `parameterUnknown` (Неизвестный параметр) и цены `cost` в режиме проведения оптимизации **Perform Optimization:**

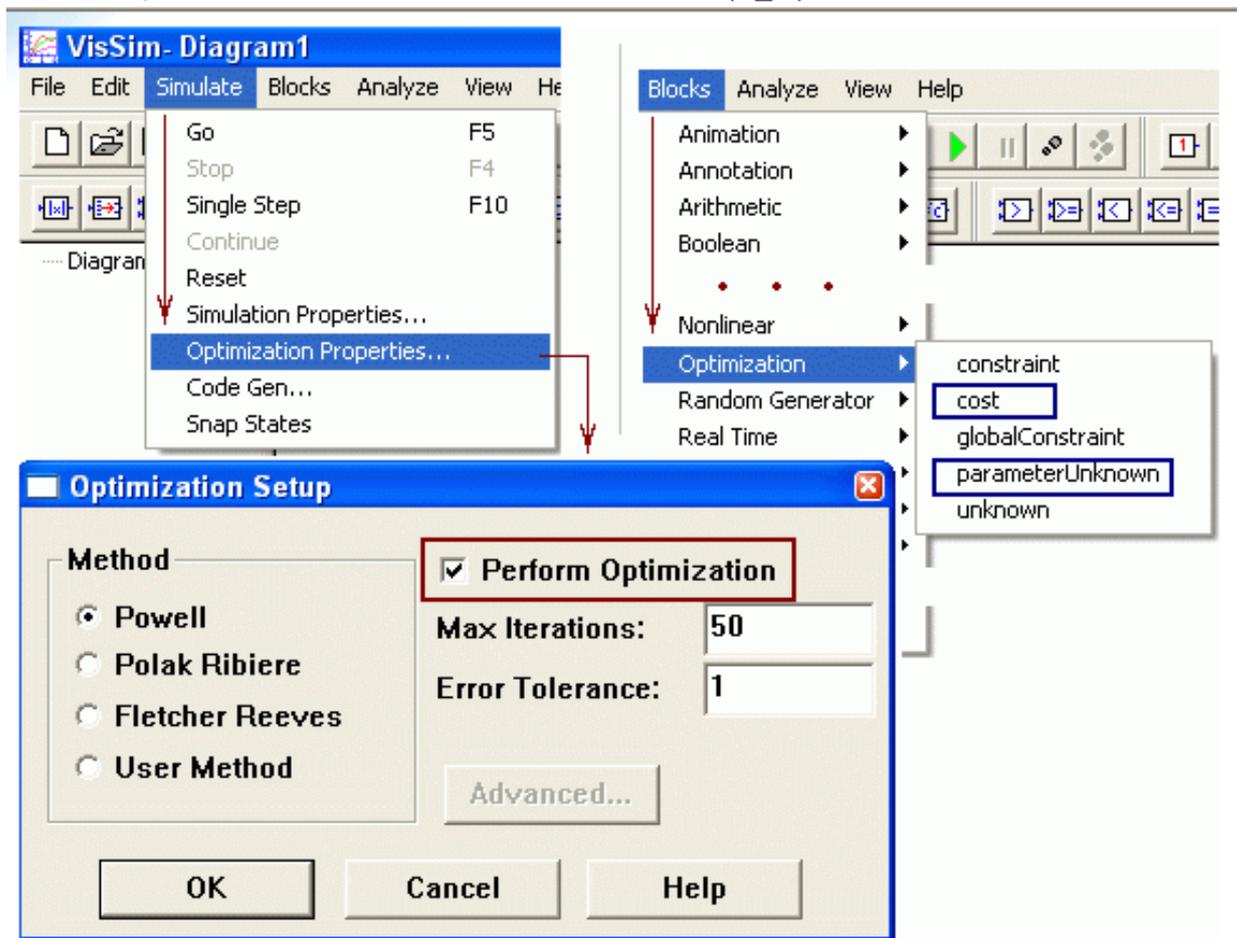


Рис. 2.19.

Меню перехода в режим параметрической оптимизации и вынесения на рабочее поле Vissim'a блоков искомого параметра **parameterUnknown** и цены **cost**

Значение параметра оптимизации **Error Tolerance** (Допустимая ошибка) в окне установок свойств оптимизации Optimization Setup следует выбирать равным 1 -10, если исходные значения оптимизируемых параметров известны весьма приближенно, а затем, получив первое приближение значений оптимизируемых параметров, его следует уменьшить, сделав равным 0.1 – 0.001.

Блок **parameterUnknown** (Неизвестный параметр) служит для задания исходного значения параметра, наилучшее значение которого отыскивается, и задания имени этого параметра. Если оптимизируемых параметров несколько, то используется столько же блоков **parameterUnknown**.

Блок **cost** (Цена) используется для задания алгоритма вычисления **функции цены**, минимизацию которой по варьируемому параметру должен выполнить Vissim, и передачи ее значения в конце каждой итерации Vissim'у.

### 2.2.1, б. Порядок построения модели и оптимизации САР в Vissim'e

Для оптимизации параметров САР на рабочем поле Vissim'a нужно построить три основных фрагмента модели:

- ввести обозначения оптимизируемых параметров и их исходные значения. Это делается с помощью блоков **parameterUnknown**, например:

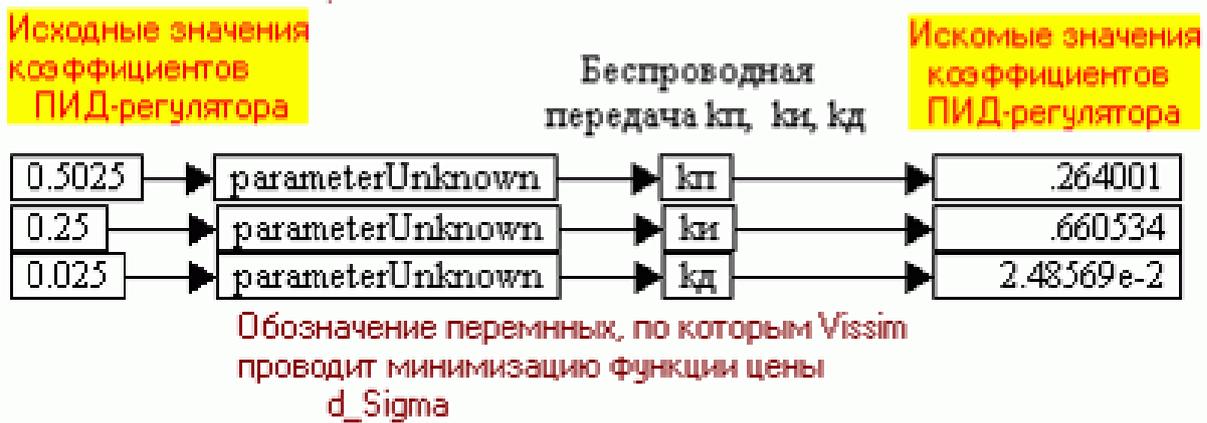


Рис. 2. 20.

Задание названий оптимизируемых параметров ПИД-регулятора  $k_p$ ,  $k_i$  и  $k_d$  помощью блоков `parameterUnknown` и `variable`, начальных значений параметров с помощью блоков `const` (генераторов постоянных сигналов) и индикация их оптимальных значений на цифровых дисплеях (`display`). Блоки `variable` используются и для «беспроводной» передачи параметров в схему модели САР. Искомые значения определяются в результате проведения Vissim'ом оптимизации, осуществляемой многократными итерациями (вычислением промежуточных результатов при пробных значениях оптимизируемых параметров, число которых может достигать сотен и длиться несколько секунд).

Показан результат оптимизации

- собрать модель САР, используя в ней только что заданные переменные. Например, в случае одной переменной:

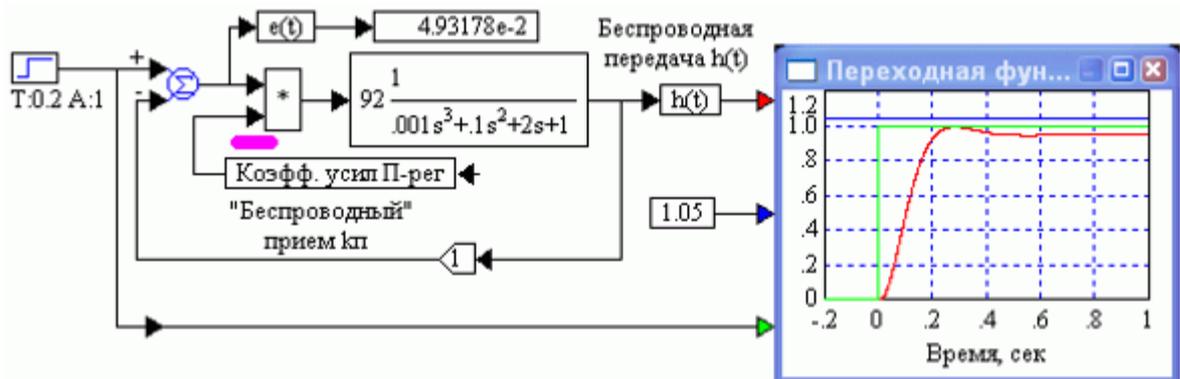


Рис. 2.21.

Модель САР для оптимизации одного параметра, названного «Козэфф. Усил. П-рег». Этот параметр передается с помощью беспроводного соединения из фрагмента задания оптимизируемого параметра (см. например, рис. 2.20). В этой модели использовано еще два блока беспроводной передачи `variable`: для  $e(t)$  – мгновенного, текущего значения ошибки слежения, и для  $h(t)$  – мгновенного значения переходной функции оптимизируемой САР. Схема показана после проведения оптимизации

Отметим, что П-регулятор, представляющий собой усилитель, т.е. пропорциональное звено, в рассматриваемой модели представлен как множитель сигнала ошибки на переменную, равную коэффициенту усиления, наилучшее значение которого отыскивается при оптимизации. Это сделано для того, чтобы ввести в схему переменную «Коэфф. Усил. П-рег», по которой будет проведена оптимизация. С математической точки зрения такой множитель выполняет те же функции, что и усилитель.

- сформировать из блоков Vissim'a фрагмент вычисления целевой функции или функции цены. Это функция каких-либо переменных модели САР, например, ошибки слежения или времени регулирования, и т.п., которые могут быть взяты из модели САР. Вид функции цены определяется критерием оптимизации. А критерий оптимизации формулируется исследователем так, чтобы эта функция имела минимум при таких значениях оптимизируемых параметров, при которых САР имеет наилучшее, с точки зрения конкретного критерия, качество. Например:

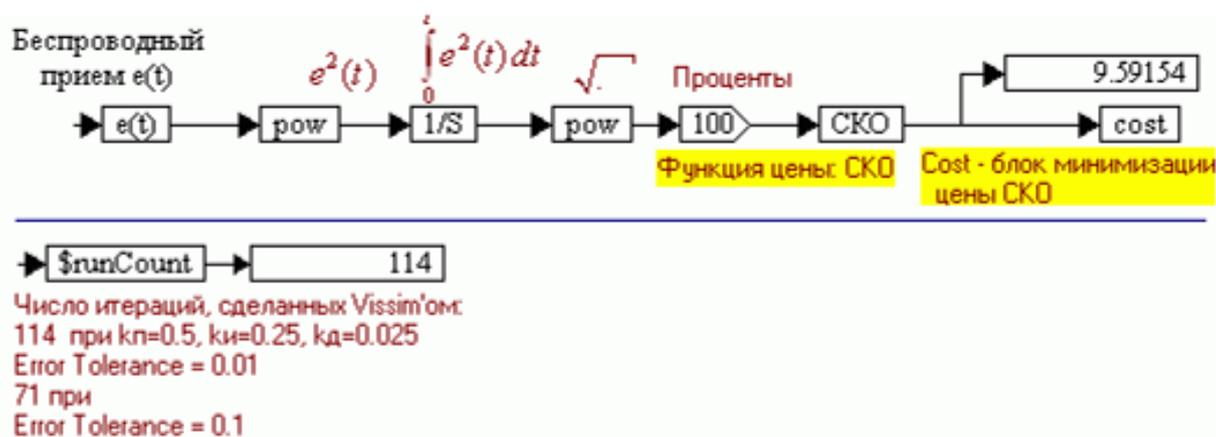


Рис.2. 22.

Фрагмент модели с вычислением функции цены и сообщения ее значения Vissim'у с помощью блока cost (вверху). Внизу показан необязательный фрагмент, позволяющий определять число итераций, сделанных Vissim'ом при оптимизации, с помощью внутренней переменной \$runCount (Число запусков: блок variable) Vissim'a и цифрового индикатора

В данном случае в качестве функции цены вычисляется среднеквадратическая ошибка (СКО) слежения астатической САР в переходном режиме. В каждый момент времени величина ошибки слежения возводится в квадрат, который интегрируется с течением времени. К концу очередной итерации переменная СКО получает значение, пропорциональное среднеквадратической ошибке слежения. Это значение поступает на блок cost, который передает его в конце каждой итерации Vissim'у для сравнения со значением, полученным ранее. Если очередное значение цены получается меньше предыдущего, то Vissim запоминает его и вновь меняет оптимизируемые параметры по некоторому правилу, определяемому методом оптимизации. Когда Vissim находит наименьшее, по его мнению, значение цены, процесс оптимизации завершается и на индикаторах параметров (см. рис. 2.20) отображаются их оптимальные значения, отыскиваемые исследователем.

Как видно, оптимизируемые параметры могут влиять на функцию цены не явно, опосредованно, через ошибки слежения, которые они определяют. Этот подход позволяет не определять в явном виде, в виде некоторой функции, зависимость показателей качества САР от величины параметров, с последующим нахождением ее минимума, что часто является трудоемкой аналитической задачей. В этом смысл и достоинство реализованных в Vissim'e методов оптимизации.

Для запуска оптимизации достаточно щелкнуть по кнопке «Пуск» (Go) на панели инструментов Vissim'a. Пойдет быстро сменяющийся друг друга расчет итераций, по окончании каждой изменяются показания цифровых индикаторов и переходные функции на осциллографе. После прекращения расчета на индикаторах рис. 2. 20 отображаются оптимизированные значения параметров, а на осциллографе – переходная функция САР с этими настроенными параметрами, по которой можно судить о качестве полученной САР.

Отметим, что если функция цены имеет несколько минимумов, то Vissim может найти вовсе не тот, что требуется исследователю. В качестве полученного результата следует убедиться непосредственно по переходной характеристике.

Если переходная функция по мнению исследователя соответствует качественной САР, то остается построить модель оптимизированной САР, заменив в схеме, например рис. 2.21, блоки перемножения и «Коэфф. Усил. П-рег» на усилитель gain (П-регулятор) и задать для него полученное значение усиления.

Оптимизация закончена.

Проиллюстрируем применение блоков и проведение оптимизации примерами.

## **2.2.2. Оптимизация параметров П – регулятора**

### **Пример 1**

#### **2.2.2, а. Настройка по критерию Sigma 5**

Для рассмотренного ранее примера (см. п. 2.1.2,а, рис.2.9) построим схему и зададим начальное значение оптимизируемого параметра (коэффициента усиления П-регулятора), полученное ранее по ЛАЧХ, равным 0.25, и схему вычисления функции цены  $d\_Sigma$  – отклонение перерегулирования Sigma от 5 % (рис.2.23).

Исходное значение коэффициента усиления 0.25, полученное ранее с помощью ЛАЧХ неизменяемой части САР, задается исследователем вручную и подается блоком const (генератором константы) на блок parameterUnknown.

Оптимизируемая переменная должна быть названа в подключаемом к блоку parameterUnknown блоке variable (Blocks - Annotation). В данном случае, для удобочитаемости схемы переменная названа в соответствии с ее смыслом «Коэфф. усил. П-рег». С помощью этой переменной должен быть выражен оптимизируемый параметр САР. В данном случае для этого в схеме САР использован блок умножения, умножающий выходной сигнал сумматора (ошибку  $e(t)$ ) на переменную «Коэфф. усил. П-рег», что эквивалентно усилителю с коэффициентом усиления, равным значению «Коэфф. усил. П-рег».

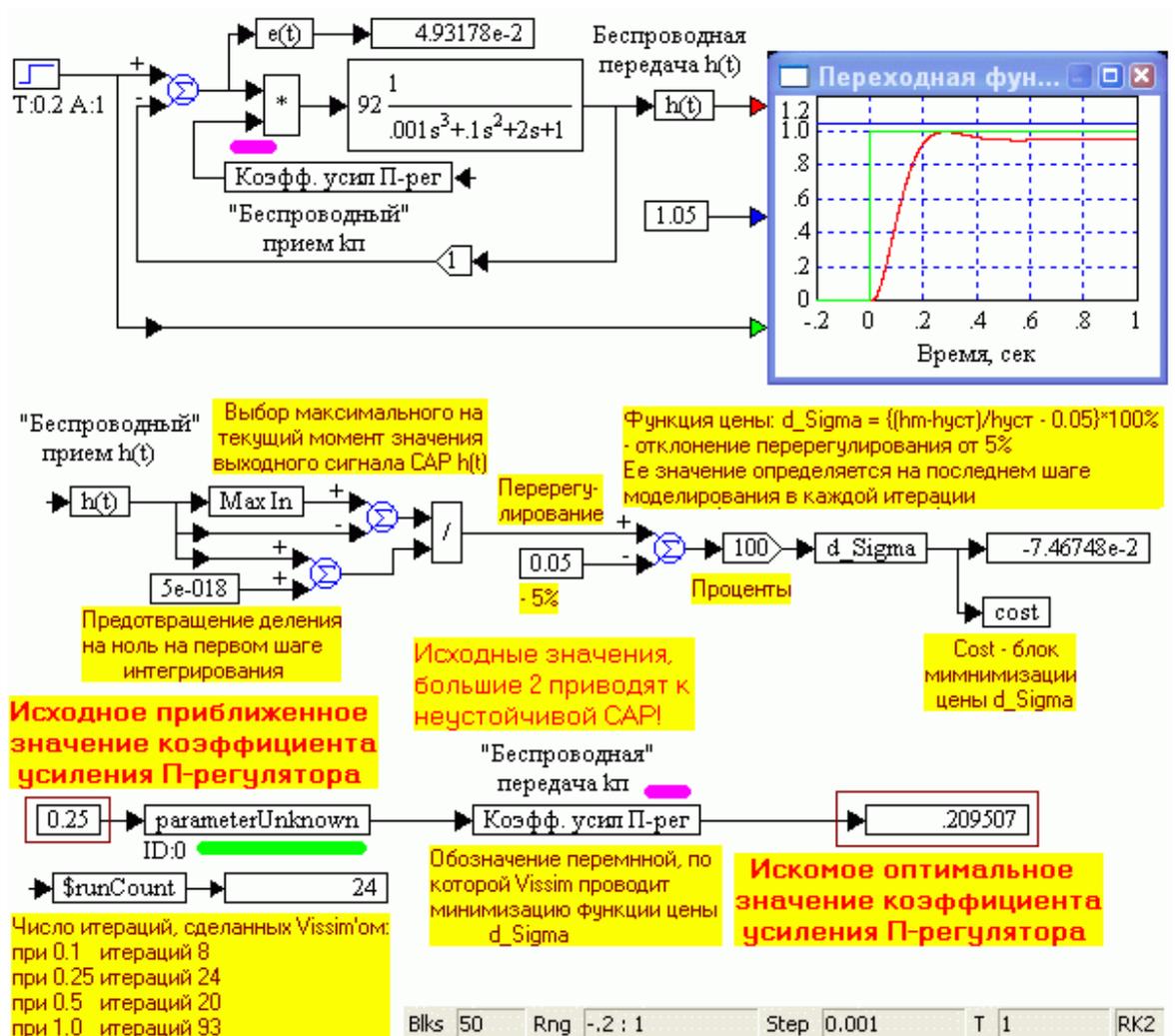


Рис. 2.23.

Модель Vissim'a для оптимизации значения коэффициента усиления П-регулятора CAP по критерию 5 %-ого перерегулирования и результаты оптимизации. Оптимальное значение коэффициента усиления, полученное Vissim'ом, равно 0.2095. На рабочем поле три основных области: модель CAP, в которую вводится с помощью блока variable посредством беспроводной передачи оптимизируемый параметр, названный «Кэфф. Усил. П-рег», область формирования функции стоимости с блоком cost и область обозначения оптимизируемого параметра с блоком parameterUnknown, работающим в паре с блоком cost.

**Функция цены** в рассматриваемом примере формируется как отклонение  $d\_Sigma$  перерегулирования Sigma от 5%.

**Примечание.** В приведенной схеме CAP статическая, датчик включен в ее неизменяемую часть, поэтому обратная связь единичная и установившееся значение ее переходной функции близко, но несколько меньше единицы. А на него нужно разделить абсолютное значение перерегулирования, чтобы получить его относительное значение и выразить в процентах.

Установившееся значение переходной функции астатической САР в точности равно единице и схема может быть упрощена исключением операции деления.

При расположении модели датчика в обратной связи, статический коэффициент усиления САР будет обратно пропорционален статическому коэффициенту усиления датчика, а значит в общем случае существенно отличаться от единицы, и установившееся значение переходной функции придется устанавливать как для статической, так и для астатической САР вручную.

Перерегулирование Sigma определяется к концу итерации, когда значение переходной функции достигает уже установившейся величины. Осуществляется это путем вычитания из максимального значения переходной функции, определяемого специальным блоком Max In, текущего значения переходной функции и деления на него разности. Для предотвращения деления на ноль на первом шаге интегрирования, к текущему значению переходной функции добавлена очень маленькая постоянная  $5 \cdot 10^{-18}$ , которая не повлияет на точность последующих расчетов.

В результате оптимизации получается оптимальное значение коэффициента усиления, соответствующее минимуму функции цены d\_Sigma. Значение коэффициента можно прочесть на цифровом индикаторе (display), подключенном к блоку «Коэфф. усил. П-рег».

**Примечание.** С помощью блоков переменных variable (Blocks - Annotation) можно осуществлять т.н. «беспроводную» передачу сигналов из одного места схемы в другое, не загромождая ее лишними линиями связи. В данном случае осуществляется беспроводная передача переменных «Коэфф. усил. П-рег» - значения коэффициента усиления П-регулятора, определенного и поименованного на выходе блока parameterUnknown, к П-регулятору САР и «h(t)» - мгновенного значения переходной функции ко входу модели формирования функции стоимости d\_Sigma. Кроме того, для удобочитаемости схемы функция цены обозначается с помощью блока переменной d\_Sigma.

Функция цены d\_Sigma сообщается Vissim'у с помощью блока cost. В данном случае функцией цены d\_Sigma является отличие перерегулирования от значения 5%.

При запуске моделирования, щелчком по кнопке «Пуск» с зеленым треугольником, Vissim перебирает в некотором, довольно широком, диапазоне значения коэффициента усиления, каждый раз проводя моделирование в заданном исследователем диапазоне времени. По смыслу решаемой задачи ясно, что необходимо задать время моделирования значительно большим, чем время регулирования САР.

Vissim начинает с заданного исходного значения, в данном случае 0.25, последовательно изменяя его так, чтобы функция цены d\_Sigma, т.е. отличие перерегулирования от 5%, была как можно меньше. На приведенном примере

это происходит за 24 итерации. Количество итераций, как видно, зависит от исходного значения оптимизируемого параметра.

На рис. 2.23, полученное перерегулирование отличается от 5 % меньше, чем на 0.1% ( $d\_Sigma = -7.47 \cdot 10^{-2} \%$ ), а оптимальное значение усиления П-регулятора составляет 0.2095. Это значение практически не отличается от полученного ранее вручную значения 0.2 (см. рис. 2.16 вверху). Тем самым взаимно подтверждается правильность работы графоаналитического метода и Vissim'a в режиме оптимизации.

Остается взять модель с П-регулятором и задать там оптимальное значение его усиления.

**Примечание.** Здесь не должно возникнуть ложное чувство исключительной простоты решения задач в рассмотренном режиме. Инструмент оптимизации, используемый в Vissim'e, довольно сложный и при решении задачи может потребоваться привлечь инженерную интуицию, с тем, чтобы получить требуемый правильный результат. Например, в рассмотренной выше схеме Vissim дает решение и при задании начального коэффициента усиления, большего 2, однако переходная функция в этом случае недвусмысленно показывает, что это приводит к явно не устойчивой САР и, следовательно, такое решение не годится.

### **Пример 2**

#### **2.2.2, б. Настройка П-регулятора на минимум СКО**

Реализовать аналитически, а тем более, вручную, критерий оптимизации САР по минимуму среднеквадратической ошибки (СКО) переходного режима довольно трудоемкая задача. В то же время в программе объектно-ориентированного моделирования, например в Vissim'e, эта задача решается довольно просто (рис.2.24).

Функция цены в этом критерии – среднеквадратическая ошибка (СКО) переходного режима.

Модель Vissim'a для оптимизации значения коэффициента усиления П-регулятора САР по критерию минимума среднеквадратической ошибки (СКО). Кроме того, справа внизу показана схема определения перерегулирования оптимизированной САР. Как видно, перерегулирование составляет 39 %

Установившееся значение ошибки слежения для статических САР в схеме рис. 2.22 вводится вручную. Поэтому оптимизация осуществляется в два этапа: сначала запускается моделирование при значении близком к нулю, например, полученном в предыдущей процедуре оптимизации, или равном нулю, а затем значение установившейся ошибки из показаний индикатора наверху модели переносится в генератор константы в схеме вычисления функции цены и повторно запускается моделирование.

При оптимизации астатической САР следует один раз ввести установившееся значение ошибки слежения, равное нулю.

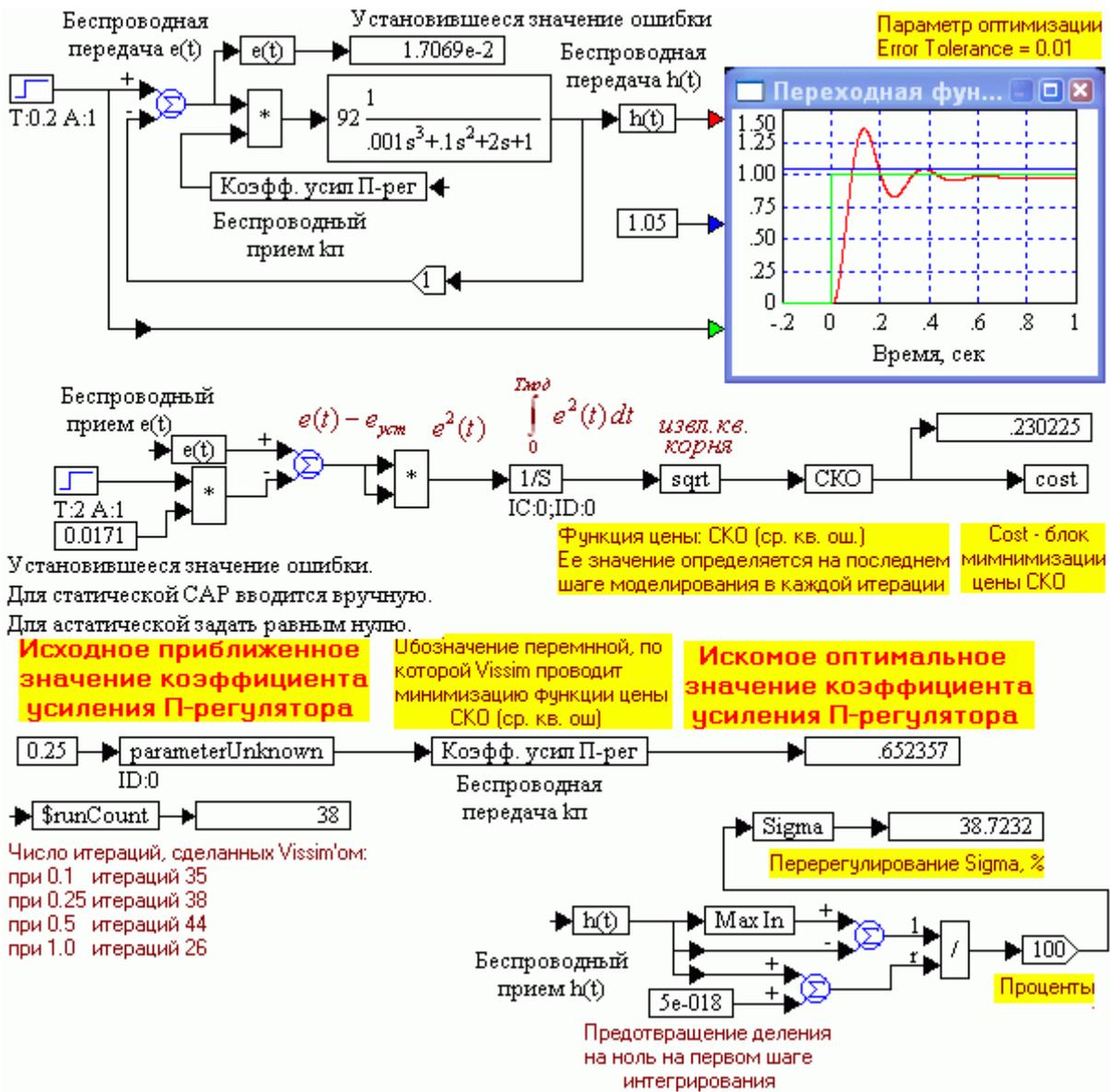


Рис. 2.24.

### 2.2.2, в. Сравнение результатов, даваемых оптимизацией по критериям 5%-го перерегулирования и минимума СКО

Оптимизация САР по разным критериям приводит к САР, отличающимся по своим характеристикам (рис.2.25).

Сравнение показателей качества переходного режима статической САР, коэффициент усиления П-регулятора которой автоматически оптимизирован в программе Vissim по критериям Sigma 5% и минимума СКО (среднеквадратической ошибки). Как видно, оптимальные по разным критериям значения коэффициента усиления П-регулятора отличаются в три раза. Отметим, что полученное вручную значение оптимального по критерию Sigma 5% коэффициента усиления (см. рис. 2.16) составило 0.2, оно мало отличается от  $k_{П\text{ опт}} = 0.209$

Слева перерегулирование мало (5%) и время регулирования  $t_{\text{рег}}$  совпадает со временем нарастания – 0.2 сек, что в полтора раза быстрее, чем у САР, настроенной по критерию минимума СКО. В то же время, у последней время нарастания в два раза короче, чем у САР, настроенной по критерию Sigma 5%.

Это быстродействие достигается увеличением коэффициента усиления в ущерб перерегулированию, которое увеличивается в восемь раз и становится равным 39%.



Рис. 2.25.

Оба критерия оптимизации имеют право на существование, но области их применения отличаются. Если критерий Sigma 5 целесообразно использовать для достижения максимального быстродействия САР, в которых весьма нежелательно иметь знакопеременные нагрузки на объект управления, например в мощных электроприводах механизмов большой массы и инерции, то критерий минимума СКО полезен в маломощных САР, где скорость реакции выступает на первый план, например в электронных системах слежения за «электронным» объектом, когда несколько повышенная колебательность не вредит.

Отметим, что оценку коэффициента усиления, полученную при оптимизации по минимуму СКО слежения и приводящую к САР с завышенной колебательностью, можно рассматривать как приближенную и теперь уточнить, как и ранее, подбором ее значения до получения перерегулирования равного 5%.

### 2.2.3. Оптимизация параметров ПИД – регулятора

#### Пример 1

#### 2.2.3, а. Настройка по критерию Sigma 5

Для рассмотренного ранее примера (см. п. 2.1.2.,а, рис.2.14) построим схему и зададим начальные значения оптимизируемых параметров (коэффициентов усиления) и функцию цены  $d\_Sigma$  – отклонение перерегулирования Sigma от 5 %:

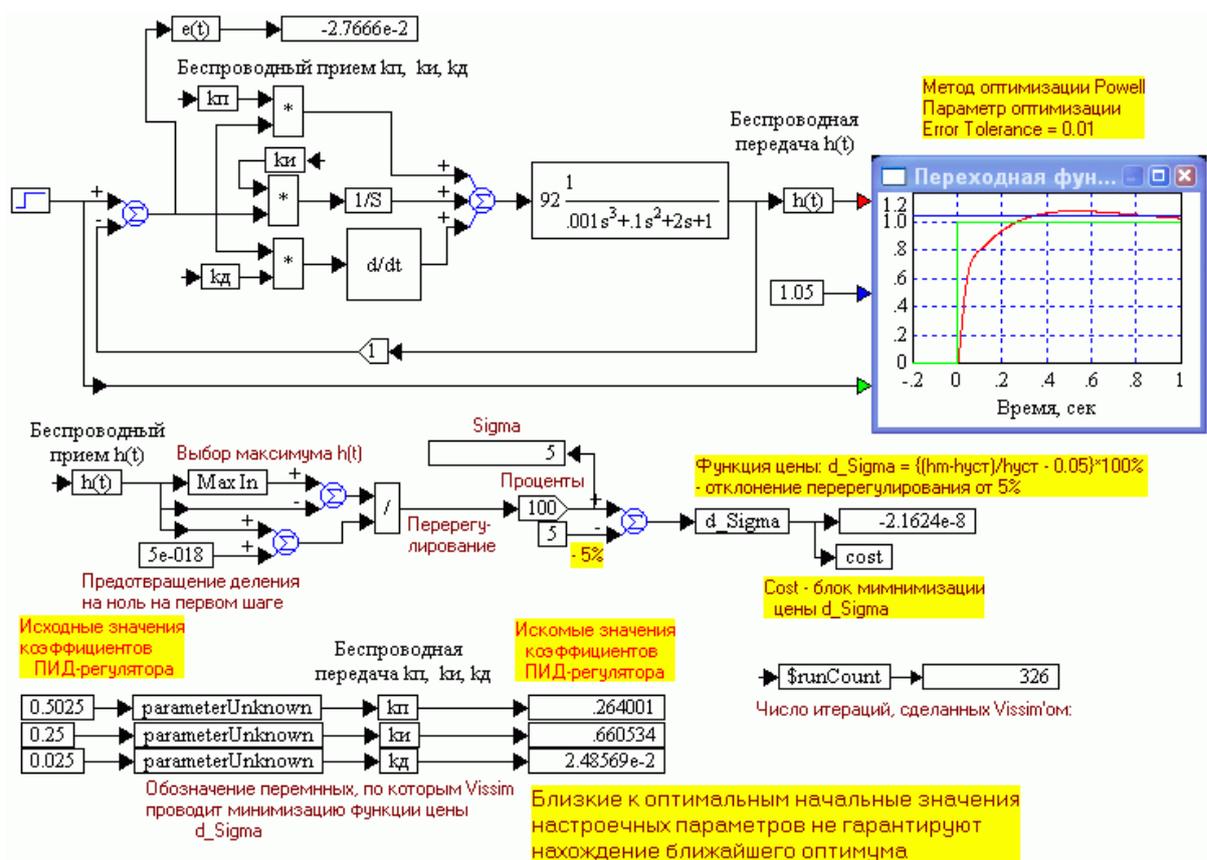


Рис. 2.26. Результаты оптимизации параметров ПИД-регулятора методом Пауэлла по критерию Sigma 5%.

Результаты несколько разочаровывают: Vissim за 326 итераций нашел оптимум не рядом с заданными исходными значениями параметров, как на рис. 2.15, 2.16, а другой, при котором время регулирования велико (ввиду занижения коэффициента  $k_p = 0.264$  и завышения коэффициента  $k_i = 0.660$ ). Да и вид характеристики не очень-то красивый.

Как видно на рис. 2.23, найденный Vissim'ом оптимум достигнут за счет уменьшения коэффициента усиления пропорциональной компоненты в два раза и увеличения усиления интегральной компоненты в 2.5 раза. Это повысило инерционность САР и привело к существенному увеличению времени регулирования.

Изменение исходных значений параметров (отнесение их в сторону от желательного минимума целевой функции) несколько улучшает результаты оптимизации в отношении быстродействия:

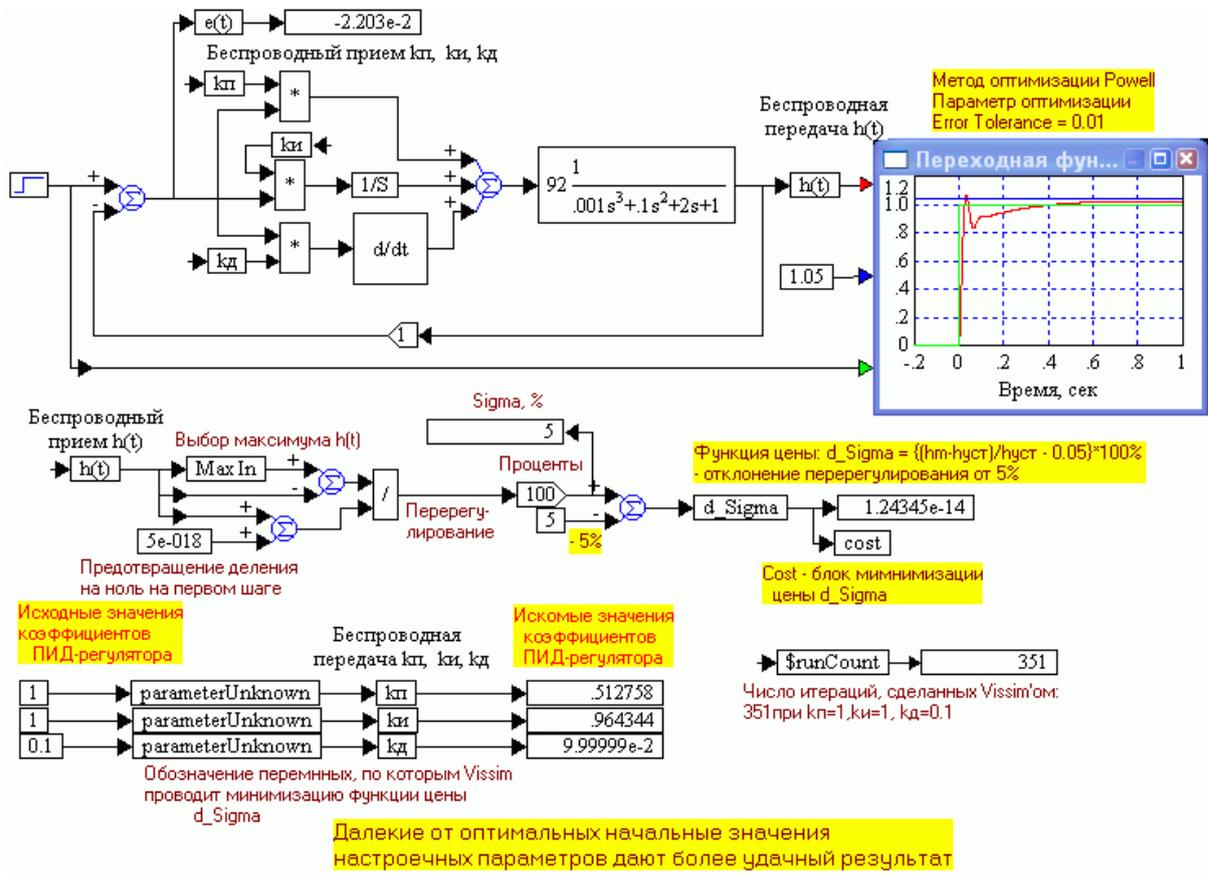


Рис. 2.27.

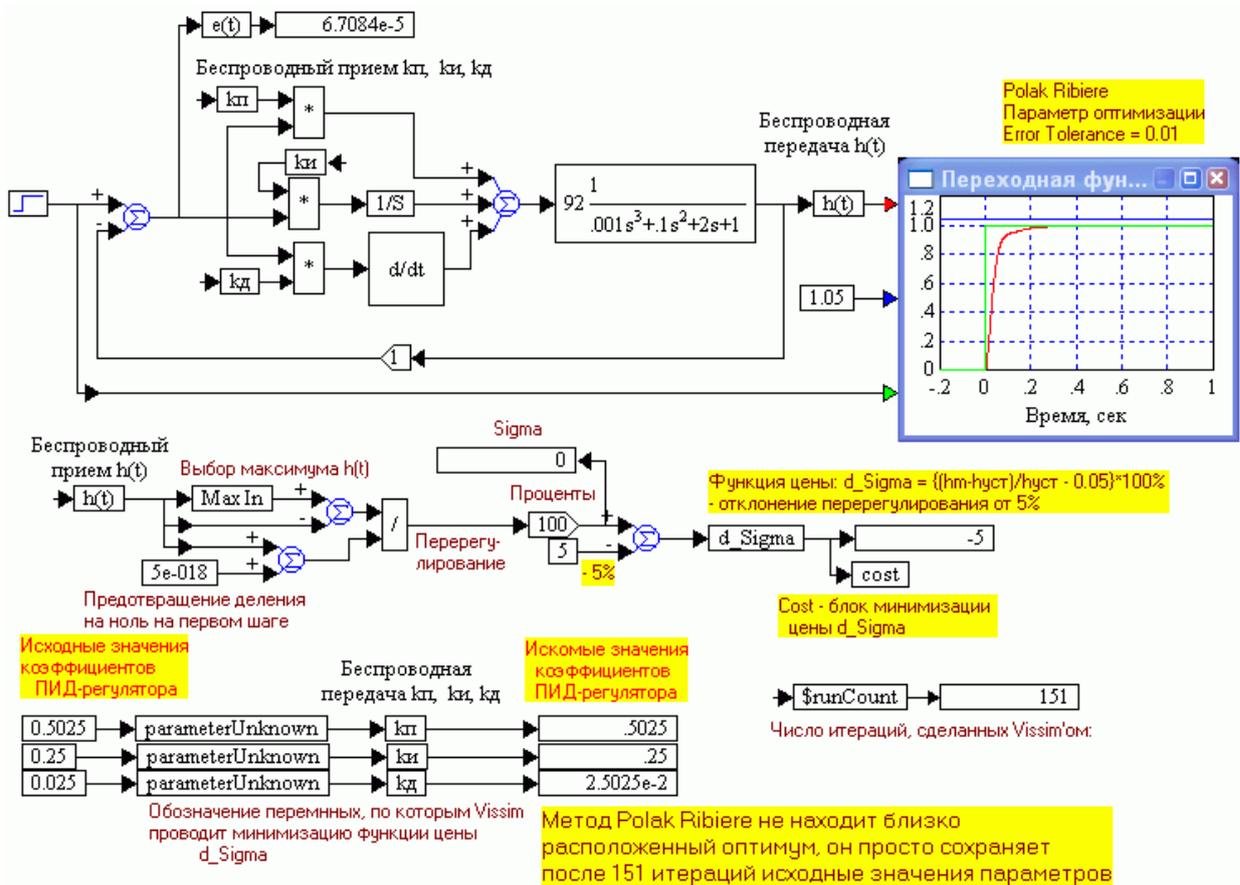


Рис. 2.28.

Vissim нашел другое соотношение коэффициентов, удовлетворяющее условию Sigma 5%, быстродействие повысилось, однако это далеко не столь хорошее решение, как полученное ранее экспериментально, подбором вручную (см. рис. 2.15).

Вариация методов оптимизации (Simulate – Optimization Properties) также не добавляет оптимизма (рис. 2.28.).

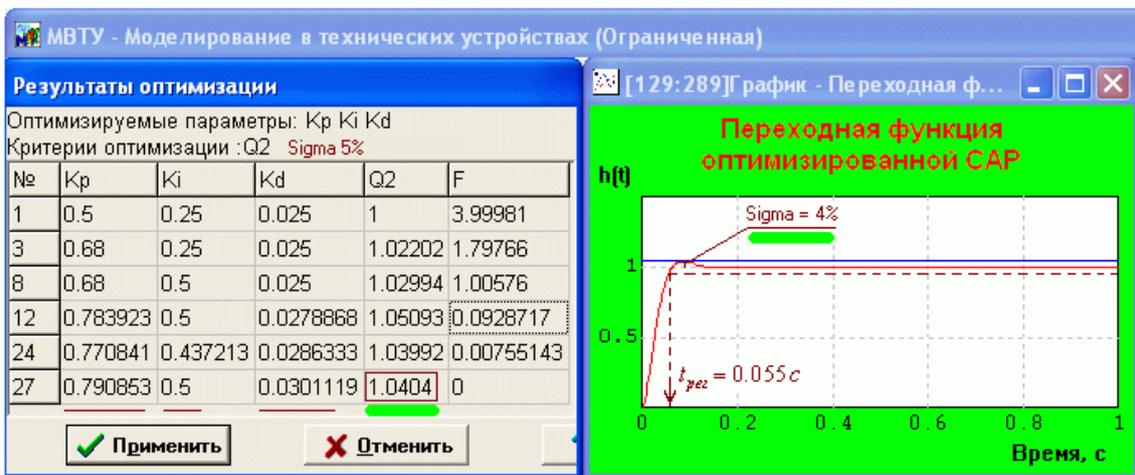
Метод Полака – Рибейры в Vissim'e после 151-й итерации просто сохраняет исходные приближенные значения

Приведенные иллюстрации показывают, что не получится просто перепоручить решение задачи оптимизации Vissim'у. Для его использования нужно чувствовать задачу и отыскивать «правильный» минимум цены, по крайней мере, для оптимизации по критерию Sigma 5%.

Посмотрим, как эту задачу решит ПК «МВТУ»

### 2.2.3, б. Оптимизация параметров ПИД-регулятора по критерию Sigma 5 в ПК «МВТУ»

За основу модели примем пример оптимизации ПИД-регулятора из приложения к ПК «МВТУ» (папка МВТУ 3.5\Demo\Оптимизация, файл Opt\_pid.mrj). Исключим два критерия (Q1 - времени регулирования и Q3 - максимума абсолютного значения выходного сигнала объекта управления) и изменим второй критерий Q2 так, чтобы требовалось попадание максимума переходной функции в коридор 1.04 – 1.05, т.е., чтобы перерегулирование оптимизированной САП попадало в диапазон 4% - 5%. Задав исходные значения параметров, полученные ранее с помощью ЛАЧХ и ограничив диапазон изменения параметров (см. рисунки 2.29 и 2.30 ниже), получим:



### Синтез оптимального ПИД-регулятора

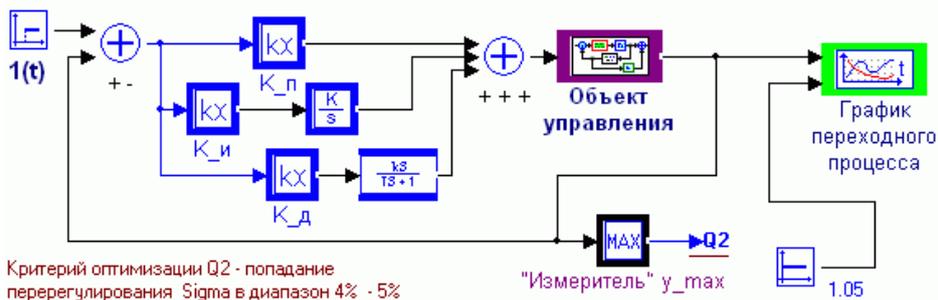


Рис. 2.29.

Схема модели и результаты оптимизации ПИД-регулятора в ПК «МВТУ». Результаты значительно ближе к хорошим значениям, полученным вручную (см. рис. 2.15), нежели найденным в Vissim'e (см. рис. 2.23 – 2.25). Это удалось сделать потому, что в ПК «МВТУ» можно ограничить диапазон изменения оптимизируемых параметров (см. рис. 2.25 ниже)

Как видно на рис. 2.29, полученные оптимальные значения коэффициентов регулятора близки к значениям, полученным вручную (рис. 2.15), а вид переходной характеристики даже несколько лучше. ПК «МВТУ» слегка уменьшил пропорциональный и дифференциальный коэффициенты и слегка увеличил интегральный по сравнению с найденными методом проб и ошибок.

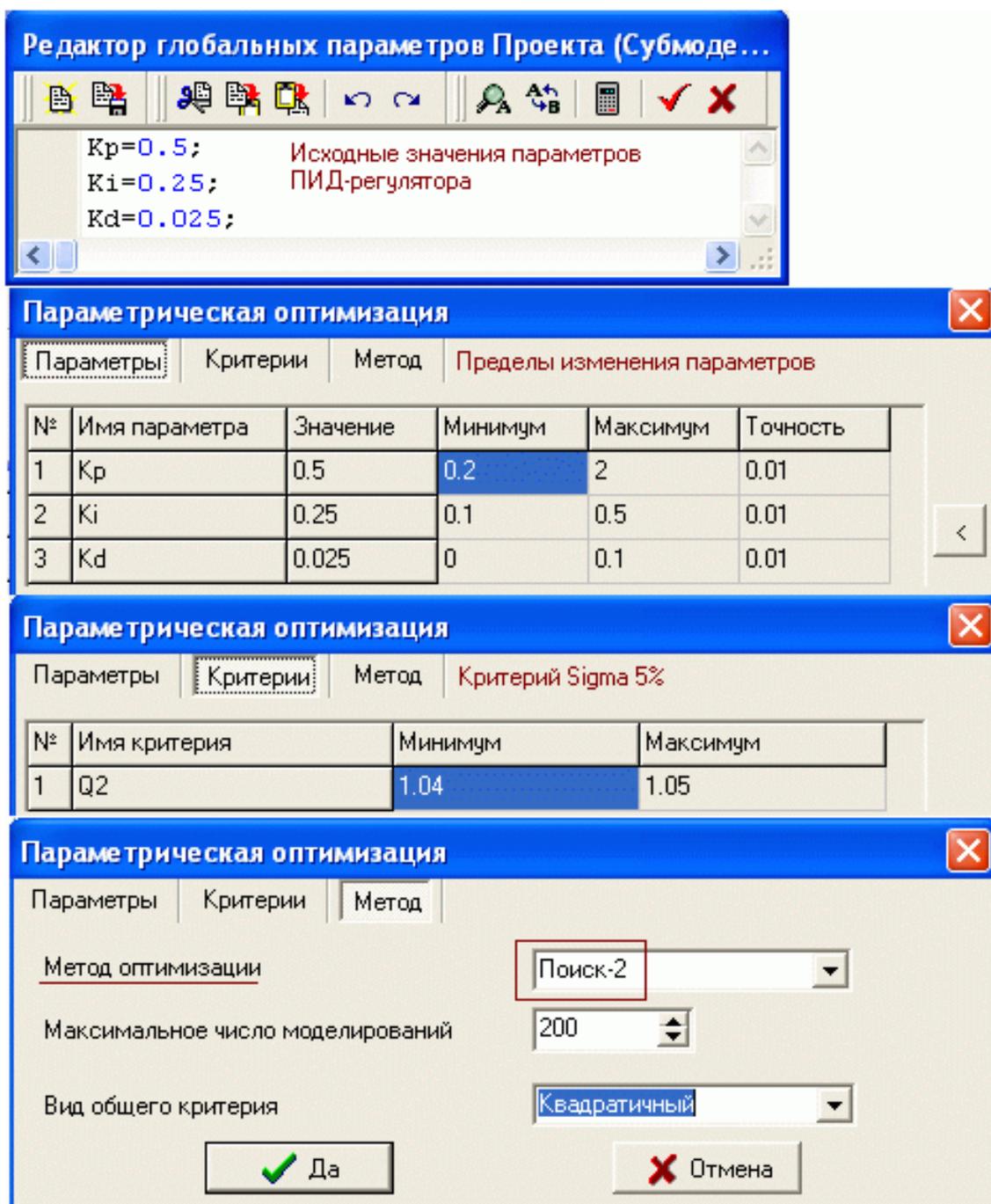


Рис. 2.30. Настройка параметров оптимизации ПИД-регулятора по критерию Sigma 5%.

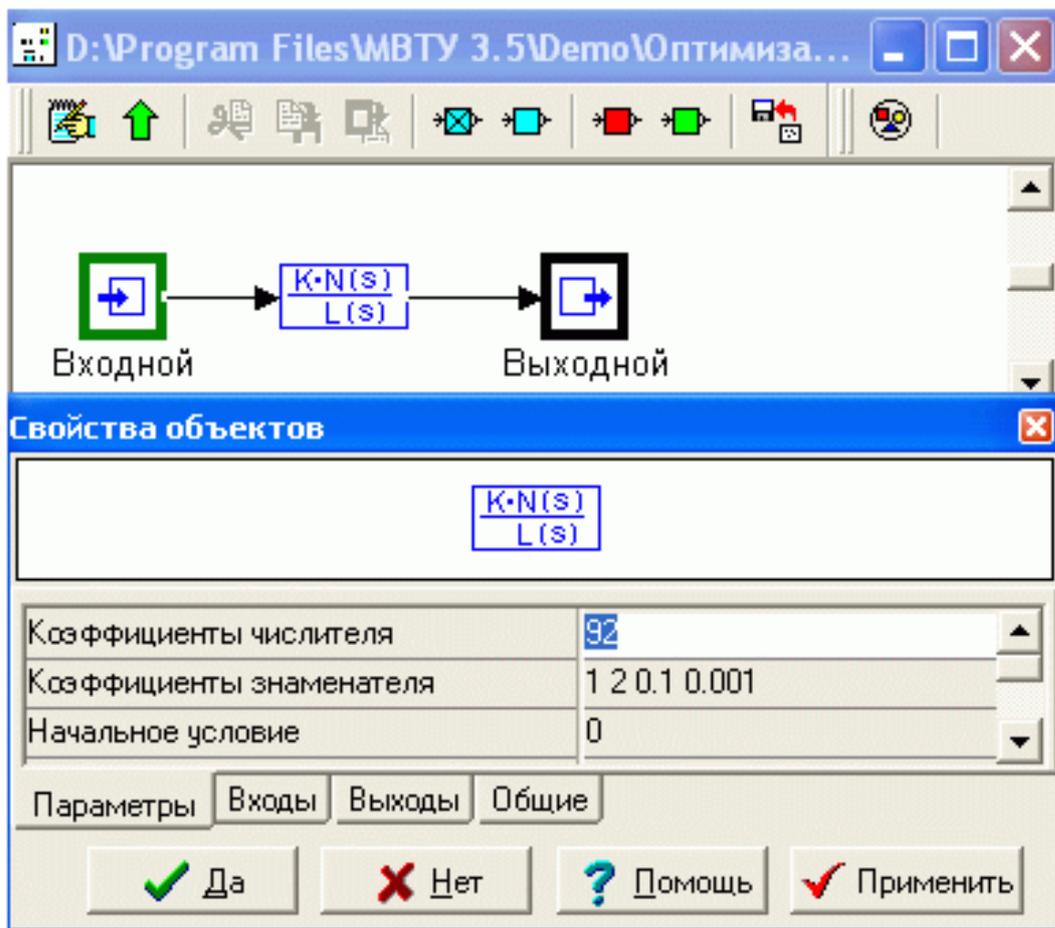


Рис. 2.31.

Свойства объекта управления (неизменяемой части САУ) такие же, как и на рис. 2.15, 2.23 – 2.25

ПК "МВТУ" справился с задачей.

### 2.2.3, в. Задание ограничений на диапазоны в Vissim'e

Как было показано выше, если функция цены имеет несколько минимумов, то Vissim может найти не тот минимум, что требуется исследователю.

Внимательный читатель отметит, что при оптимизации в ПК «МВТУ» диапазон изменения параметров был сужен. Чтобы поставить программы в равные условия нужно и в Vissim'e уменьшить диапазон изменения параметров! И он окажется прав.

#### Поиск требуемого минимума функции цены

Минимум может быть локализован ограничением диапазона изменения оптимизируемых параметров, как это только что было сделано в ПК «МВТУ» или такой коррекцией функции цены, при которой она приобретает всего один минимум, который располагается в требуемом диапазоне.

#### Локализация минимума функции цены

Формально в Vissim'e также можно изменять диапазон изменения оптимизируемых параметров (двойной щелчок по блоку paramertUnknown):

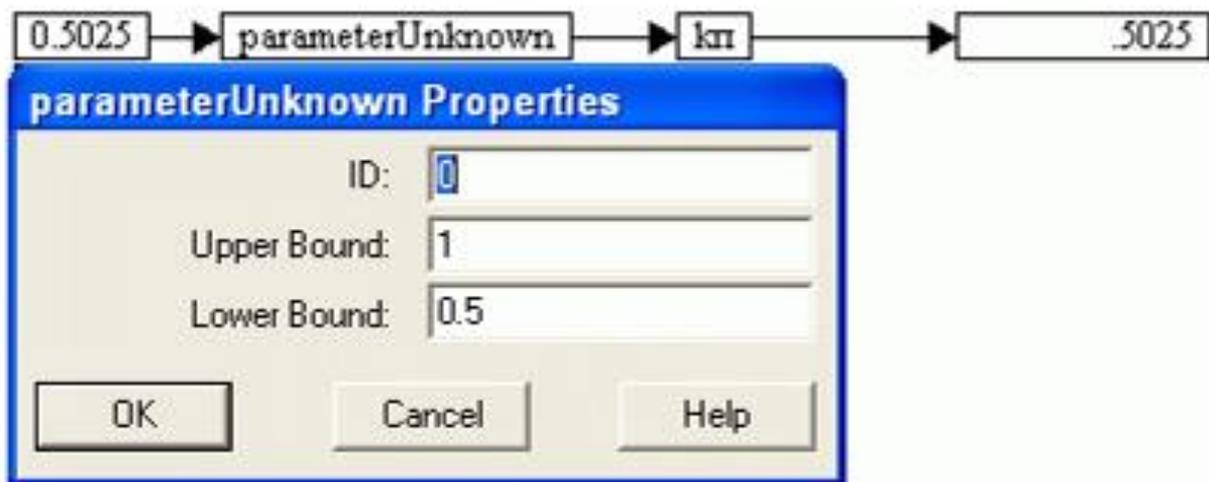


Рис. 2.32.

Задание верхней (Upper Bound) и нижней (Lower Bound) границ диапазона изменения оптимизируемого параметра в Vissim'e

Однако если это сделать, Vissim проигнорирует заданное ограничение и продолжает искать минимумы в самом широком диапазоне, не находя ближайший. Это определенная недоработка программы.

Тем не менее, с решением задачи настройки ПИД-регулятора методом проб и ошибок, как это было показано выше, Vissim позволяет справиться успешно.

Т.о. конкретная задача оптимизации по критерию Sigma 5% в ПК «МВТУ» решена более качественно, чем в Vissim'e. Но произошло это не автоматически, решить ее правильно позволило понимание сути задачи, того, что искомый минимум функции цены находится близко к начальным значениям параметров, а ПК «МВТУ» позволил ограничить диапазон их изменения при поиске оптимума.

### **Коррекция функции цены**

Попробуем устранить недостаток Vissim'a, связанный с невозможностью ограничивать диапазоны поиска оптимальных значений параметров. Это перегрузит схему, но важно, что принципиально такую задачу – ограничение диапазона, можно решить, используя имеющиеся в распоряжении исследователя стандартные блоки.

Возвратимся к схеме рис. 2.22 и дополним ее фрагментами, заставляющими быстро возрастать функцию цены при выходе оптимизируемых параметров за устанавливаемые пределы. Тем самым, минимум (ы) функции цены останется только в задаваемом сравнительно малом диапазоне изменения параметров:

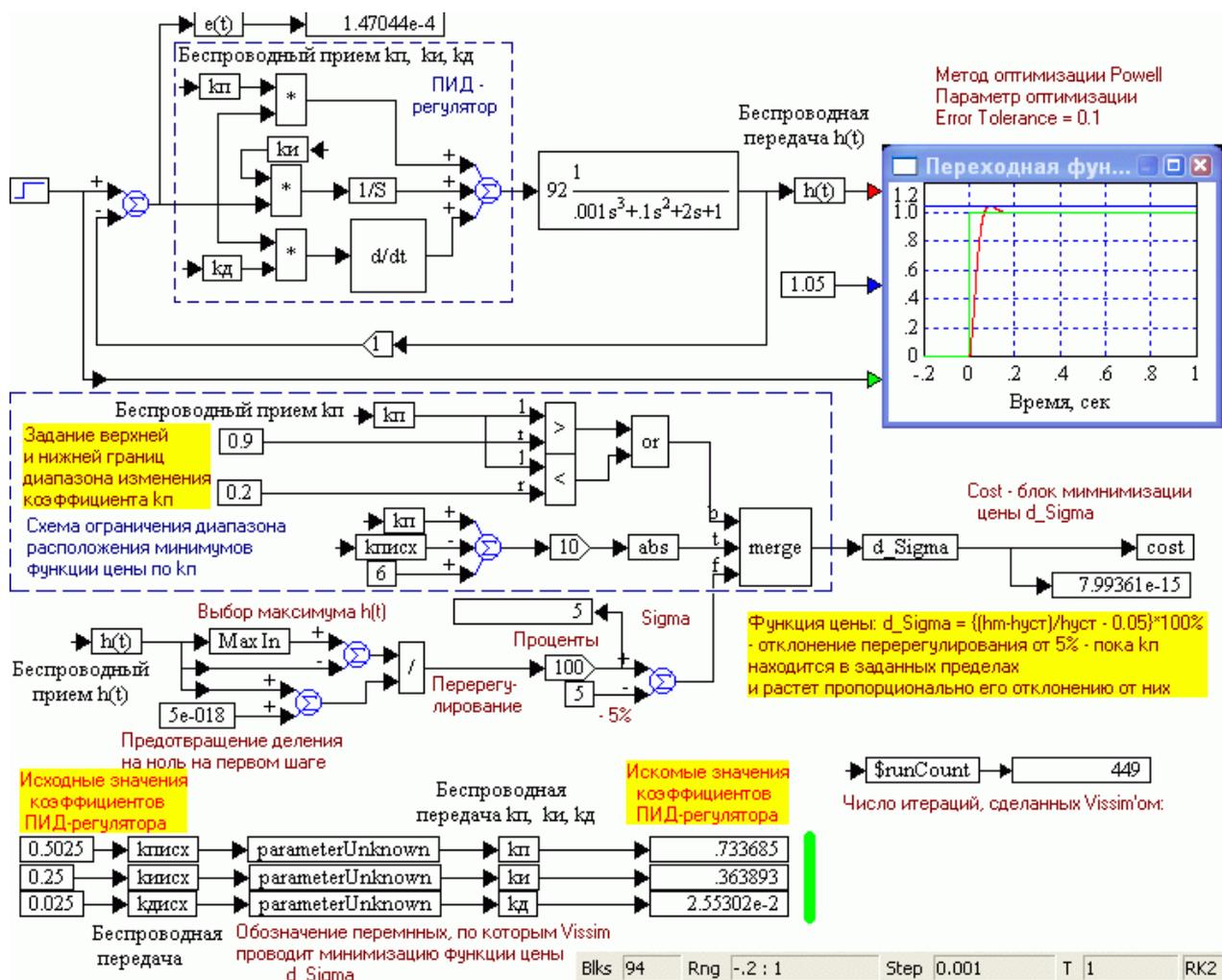


Рис. 2. 33. Схема оптимизации параметров ПИД-регулятора с модифицированным алгоритмом определения функции цены.

Добавлен фрагмент, ограничивающий диапазон изменения пропорциональной компоненты регулятора  $k_p$ , в котором следует искать минимум функции цены. Результаты близки к полученным вручную, а также в программе ПК «МВТУ»

На схеме рис. 2.33 осуществлено ограничение диапазона изменения только одного параметра – коэффициента усиления  $k_p$  пропорциональной компоненты ПИД-регулятора для того, чтобы уменьшить размер рисунка и сделать схему удобочитаемой. Точно также можно осуществить ограничение диапазонов и для остальных параметров регулятора.

**Примечание.** Для экономии места в рабочих моделях целесообразно поместить фрагменты ограничения диапазонов, а также схему вычисления функции цены в составные блоки.

Итак, знание близких к оптимальным значений оптимизируемых параметров и ограничение диапазонов их изменения позволяет и программам моделирования получать результаты, близкие к полученным методом проб и ошибок.

Это означает, с одной стороны, что моделирующие программы при рациональном задании функции цены или при должном ограничении диапазонов изменения параметров правильно решают задачи оптимизации.

С другой стороны это указывает на то, что работа «вручную», методом проб и ошибок на основе графоаналитической оценки по ЛАЧХ приближенных значений настроечных параметров проста, эффективна, дает хорошие результаты и не требует создания алгоритмов формирования функции цены из блоков на рабочем пространстве.

Таким образом, рассмотренные методы взаимно подтверждают состоятельность друг друга.

## Пример 2

### 2.2.3, г. Настройка ПИД-регулятора на минимум СКО

Как известно, оптимизация по минимуму среднеквадратической ошибки (СКО) приводит к САР с завышенной колебательностью. Действительно:

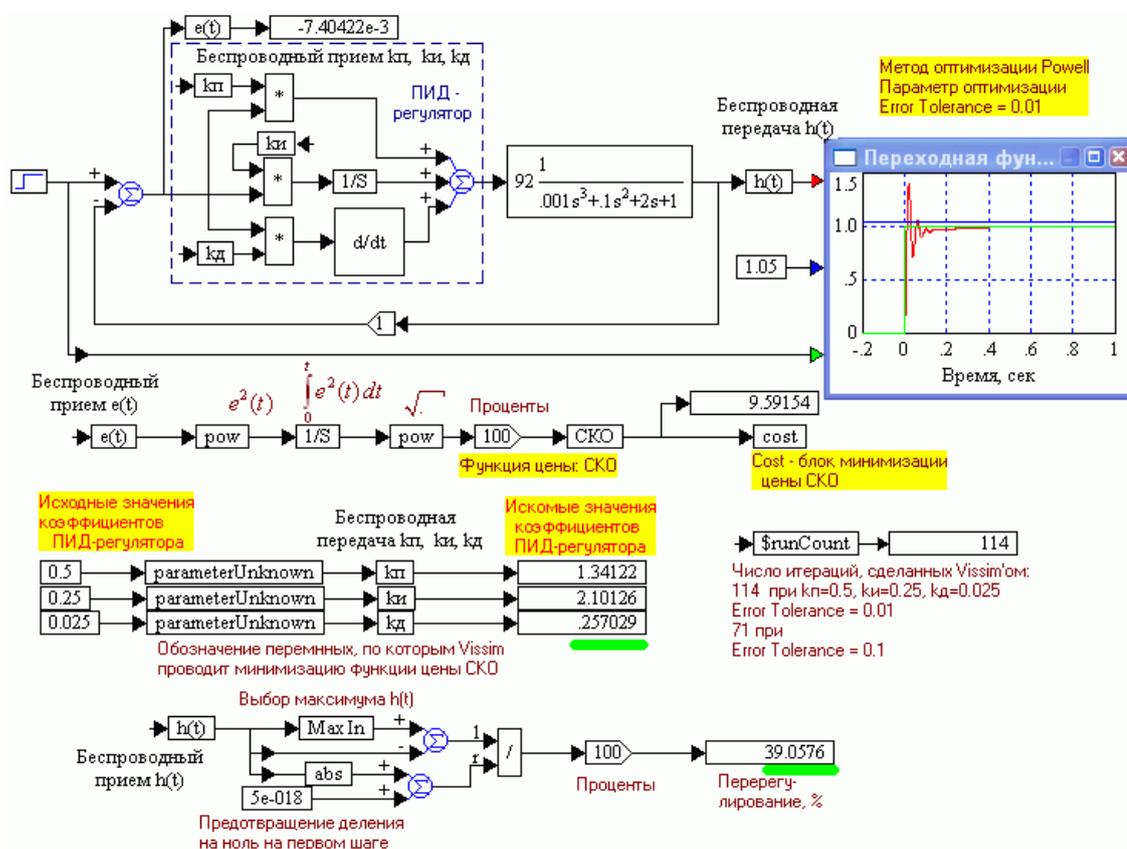


Рис. 2.34.

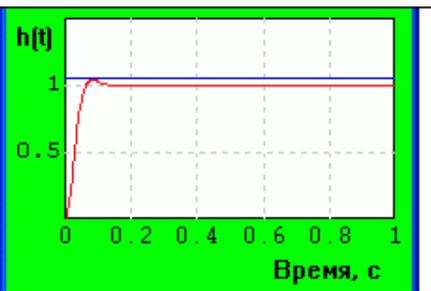
Оптимизация параметров ПИД-регулятора по минимуму СКО приводит к САР с завышенной колебательностью

Полученные оценки значений параметров могут теперь быть уточнены методом проб и ошибок по критерию Sigma 5% уменьшением коэффициента усиления

Отметим, что целевую функцию (функцию цены) в виде интегральной оценки можно модифицировать, учитывая с весами под интегралом, например, скорость и ускорение изменения мгновенного значения ошибки слежения, и другими способами [1]. Это приводит к более удачным переходным функциям САР, в итоге повышает ее качество.

### 2.2.3, д. Сравнение критериев и методов оптимизации

В таблице ниже приведены способы, критерии оптимизации, значения настроечных коэффициентов ПИД-регулятора, а также вид соответствующих переходных функций, полученных выше.

Схема рис. Программа моделирования Критерий и способ оптимизации	Оптимальные настроечные параметры ПИД-регулятора			Переходная функция оптимизированной САР
	$k_{PI}$	$k_{PD}$	$k_{ID}$	
рис. 2.15 Vissim, ручная оптимизация Sigma 5%  Качество САР хорошее	0.89	0.42	0.042	
рис. 2.27 Vissim, автомат. оптимизация простой Sigma 5% Качество САР почти удовлетворительное	0.51	0.96	0.1	
рис. 2.29 ПК «МВТУ», автоматическая оптимизация Sigma 5%  Качество САР хорошее	0.79	0.50	0.03	
рис. 2.33 Vissim, автоматическая оптимизация Модифицированный Sigma 5%  Качество САР хорошее	0.734	0.364	0.026	
рис. 2.34 Vissim, автоматическая оптимизация (min SKO) Качество САР почти удовлетворительное Колебательность завышенная	1.34	2.1	0.25	

Как видно, три способа оптимизации (ручной и автоматические с ограничением диапазонов изменения коэффициента усиления в Vissim'e и ПК "МВТУ") по критерию Сигма 5% дают приблизительно одинаковые, хорошие результаты со значениями параметров, близких к  $k_p = 0.8$ ,  $k_i = 0.4$  и  $k_d = 0.03$ .

Критерий минимума СКО приводит к САР с существенно завышенной колебательностью.

### 2.2.4. Оптимизация параметров ПИ – регулятора

#### 2.2.4, а. ПИ-регулятор частный случай ПИД-регулятора

ПИ-регулятор можно рассматривать как частный случай ПИД-регулятора при коэффициенте усиления дифференциальной компоненты равном нулю.

Казалось бы, для оптимизации достаточно в схемах рис. 2.33 или рис. 2.34 убрать дифференциальную компоненту в регуляторе и все в порядке. Но не тут-то было!

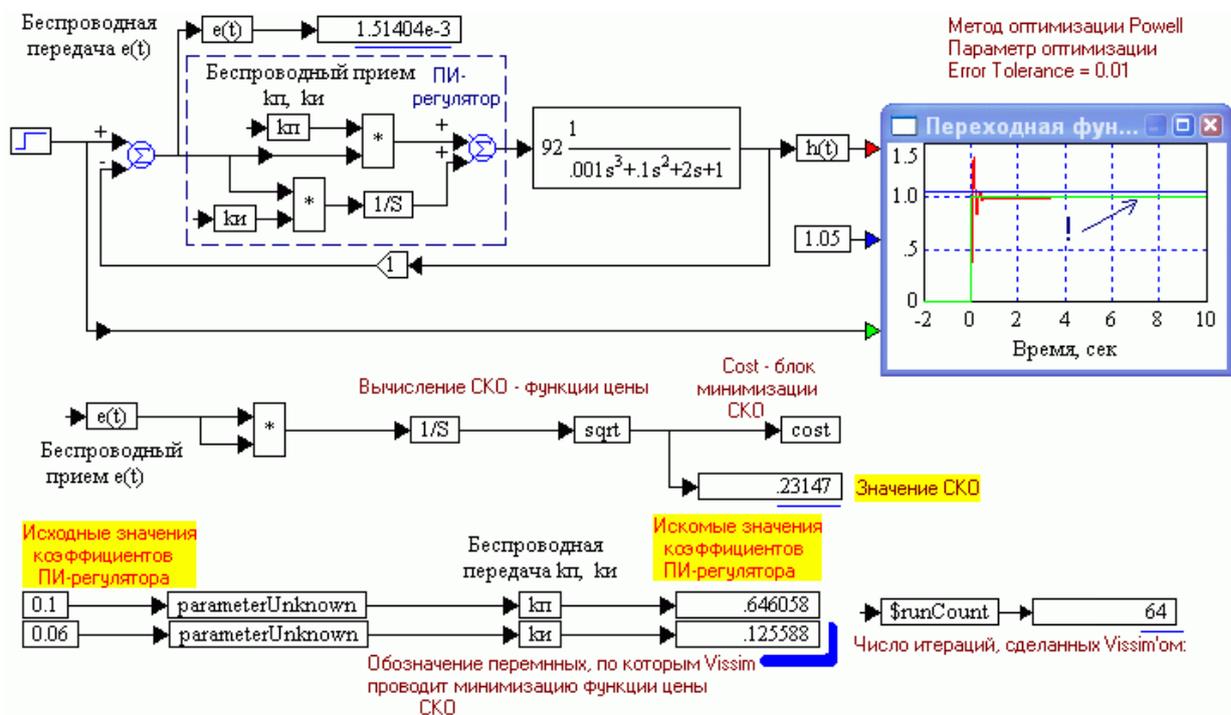


Рис. 2.35. Оптимизация параметров ПИ-регулятора в Vissim'e

Как видно на первом кадре рис. 2.35, оптимизация при времени моделирования равном 1 сек приводит к отрицательному значению коэффициента усиления интегрирующей компоненты  $k_i$  регулятора, что не приемлемо. Отметим, что при отрицательном значении коэффициента  $k_i$  САР, как кажется, потеряла астатизм, стала статической: переходная функция устанавливается на уровне, меньшем единицы.

Увеличение времени моделирования в десять раз до 10 сек приводит к приемлемому результату, на рис. 2.35.

Выбор других методов оптимизации (Simulate – Optimization Properties): Флетчера – Ривза и Полака – Ребейры приводит практически к тем же результатам.

Таким образом, для получения правильного и нужного результата необходимо либо ограничить снизу диапазон изменения коэффициента  $k_n$  нулем, либо модифицировать функцию цены так, чтобы она резко возрастала при отрицательных значениях  $k_n$  по примеру рис. 2.33. Но для начала лучше всего следует задать по возможности большое время моделирования.

Поневоле подумаешь, что куда как проще реализовать в Vissim'е при наличии хорошего начального приближения метод проб и ошибок, чем возиться с выбором времени моделирования и заданием пределов с помощью специальной схемы!

#### ***2.2.4, б. Красивое решение - неформальный критерий качества***

##### **ПИ-регулятор**

Выполнив к настоящему времени пять лабораторных работ, студент уже уяснил, что изменение коэффициента усиления контура САР от нуля до бесконечности вначале делает САР работоспособной, затем последовательно улучшает, делает оптимальным и ухудшает ее качество, и наконец, делает САР не устойчивой, т.е. не работоспособной. Такая взаимосвязь коэффициента усиления контура и качества САР делает коэффициент одним из наиболее значимых параметров, тем более что на практике именно его достаточно легко изменять. Наглядность и простота это достоинство, а "одномерность" это недостаток описания и задания свойств САР с помощью одного параметра, коэффициента усиления контура.

ПИ-регулятор задается двумя параметрами, коэффициентом усиления и постоянной времени. Понимание их взаимовлияния при оптимизации САР позволяет лучше понять цель и смысл настроек, воспринять красоту наилучших из них.

Как было показано выше, функции цены, соответствующие критериям оптимальности могут иметь несколько формально "равноценных" минимумов. У разных критериев минимумы функций цены не совпадают. Какую же настройку предпочтительнее выбрать из нескольких?

Дадим почувствовать ответ на этот вопрос, рассмотрев переходные функции САР с оптимальными по критерию Сигма 5% настройками при различных соотношениях параметров ПИ-регулятора. "Двумерное" рассмотрение позволяет лучше понять, какое решение более приемлемо, а значит и более красиво.

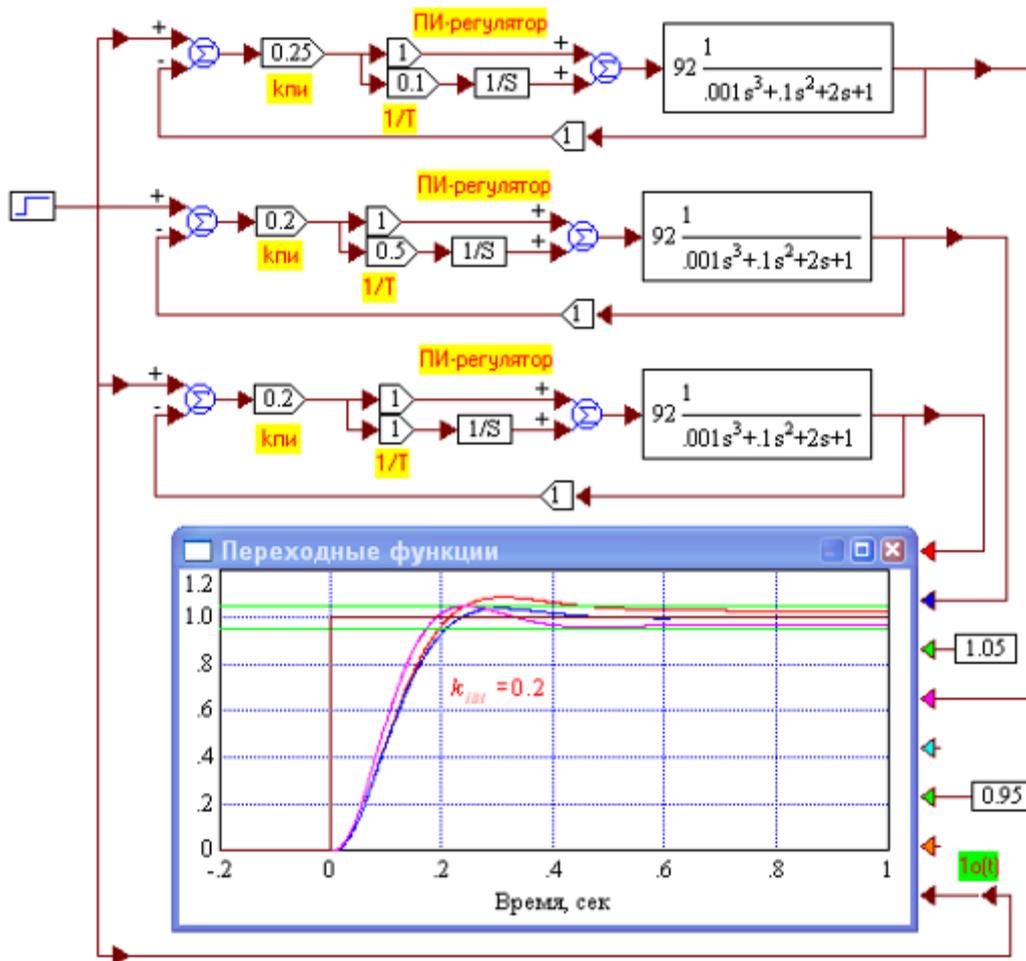


Рис. 2.36. Переходные функции САР с оптимальными коэффициентами усиления ПИ-регулятора при разных значениях постоянных времени.

Отметим, что интегральные компоненты регуляторов обеспечивают компенсацию старшей инерционности неизменяемой части ( $T_1=2$  сек), поэтому длительность переходного процесса определяется утроенным значением второй по величине постоянной времени  $T_2 = 0.1/T_1 = 0.1/2 = 0.05$  сек.

Как видно, изменение постоянных времени ПИ-регулятора в широком диапазоне от 1 сек до 10 сек слабо сказывается на оптимальном значении коэффициента усиления и на времени регулирования рассматриваемой САР. В то же время на втором кадре (кнопка "Стоп" браузера позволяет останавливать анимацию) видно, что в отличие от оптимального значения постоянной времени ПИ-регулятора, равной 2 сек, другие постоянные времени приводят к существенно затянутому во времени выравниванию, которое не столько влияет на качество переходного процесса, поскольку происходит внутри 5%-го коридора, сколько на качество установившегося режима.

Наилучшее, оно же и наиболее красивое решение, достигаемое при постоянной времени  $T_{\text{пи}} = 2$  сек и  $k_{\text{пи}} = 0.2$  (синяя линия), дает сравнительно быстрое нарастание, 5%-е перерегулирование и быстрое выравнивание при переходе в установившийся режим.

## ПИД-регулятор

Проиллюстрируем влияние параметров и ПИД-регулятора на качество САР.

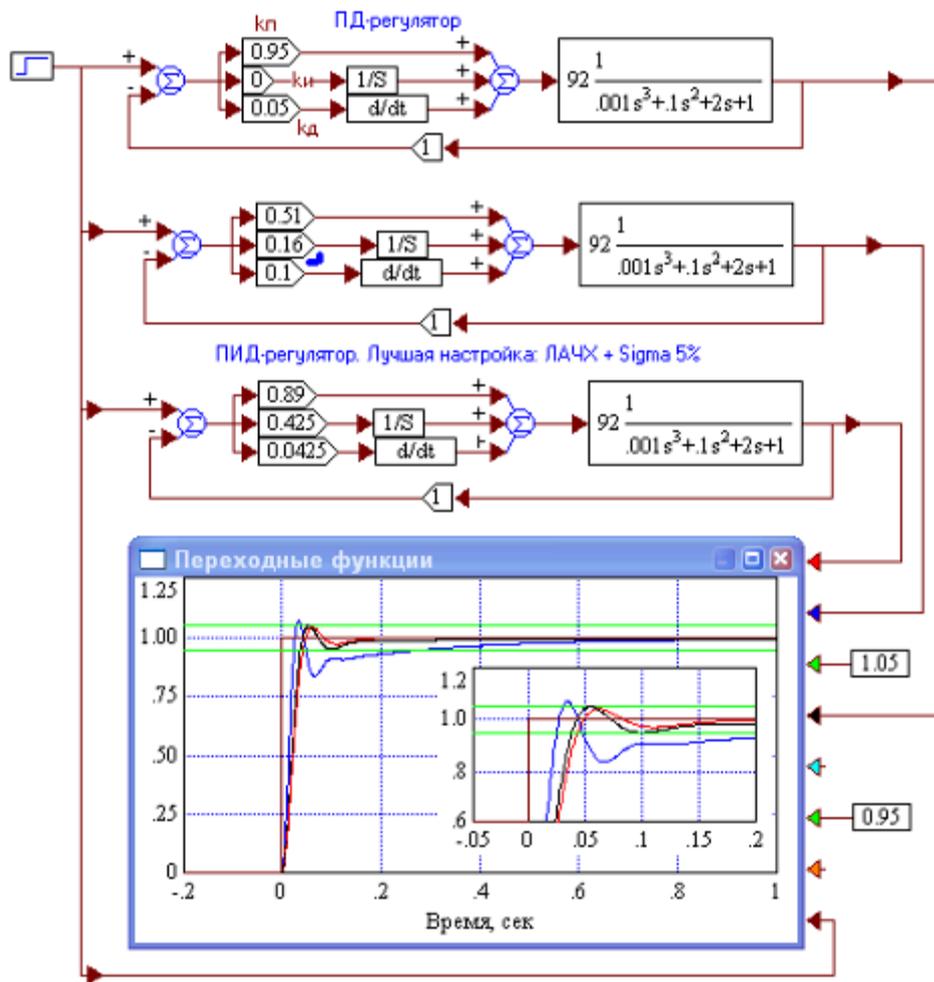


Рис. 2.36а. Переходные функции САР при различных настройках регулятора. Оптимальная – красная.

Как видно, формирование переднего фронта обеспечивают, наряду со второй во величине постоянной времени неизменяемой части САР, пропорциональная и дифференциальная компоненты ПИД-регулятора. Отсутствие интегральной ветви (верхняя схема, черная переходная функция) практически никак не сказывается на переднем фронте, но приводит к ненулевой установившейся ошибке.

Интегральная компонента определяет выравнивание переходной функции, асимптотическое ее приближение к плоской вершине. Изменение коэффициента усиления интегральной компоненты от оптимального значения  $k_i=0.425$  как в меньшую, так и в большую сторону приводит к затягиванию выравнивания. Уменьшение приводит к монотонному затягиванию, с предельным переходом от астатической системы к статической, а увеличение - к колебательному затягиванию.

Итак, время регулирования (нарастания) в первую очередь определяется пропорциональной и дифференциальной компонентами ПИД-регулятора, а

интегральная компонента, кроме того, определяет и качество, в частности, быстродействие САР в установившемся режиме работы.

В данной лабораторной работе основное внимание уделено оптимизации САР при работе в переходном режиме, но в полной мере оптимизацию следует осуществлять, добиваясь и требуемых показателей качества установившегося режима, задаваемого коэффициентами ошибок.

### 2.3. Об оценке параметрической чувствительности САР

Мало настроить регулятор оптимально. Нужно быть уверенным, что при изменении внешних условий (изменении температуры или давления воздуха, трения в подшипниках объекта управления, других внешних воздействий) САР будет работать в режиме, близком к оптимальному. Поэтому важно иметь оценки влияния внешних условий на параметры регулятора и всей САР, а также влияния изменения параметров САР на ее качество. Эти оценки позволят определить диапазон изменения внешних факторов, в котором САР будет сохранять требуемое качество.

Оценка влияния внешних факторов на параметры САР осуществляется на основании физических моделей, связывающих эти величины. Поэтому решение этой задачи определяется составом конкретной САР и условиями, в которых она работает.

Рассмотрим решение второй задачи – определение влияния изменения параметров САР на ее качество.

Системы, сохраняющие свои свойства при любых параметрических возмущениях, называют **робастными** или грубыми.

Показатели качества САР, т.е. время регулирования  $t_p$  и перерегулирование  $\sigma$  можно представить в общем виде как функции ее параметров или параметров ее элементов:

$$\begin{aligned} t_{peg} &= t_{peg}(k_1, k_2, \dots, k_n, T_1, T_2, \dots, T_m) \\ \sigma &= \sigma(k_1, k_2, \dots, k_n, T_1, T_2, \dots, T_m) \end{aligned} \quad (2.2)$$

где  $k_1, k_2, \dots, k_n$  - коэффициенты усиления отдельных звеньев, контуров и т.п.,  $T_1, T_2, \dots, T_m$  - постоянные времени.

Кроме названных, могут быть и другие параметры САР, через которые выражаются показатели ее качества, например, коэффициенты характеристического полинома.

**Чувствительность** показателя качества САР к изменению ее параметра естественным образом характеризует частная производная показателя качества по этому параметру, т.е. производная при зафиксированных остальных параметрах, например:

$$S_{k_1} = \frac{\partial t_{peg}}{\partial k_1} = \frac{d t_{peg}}{d k_1} \Big|_{k_2, \dots, k_n, T_1, T_2, \dots, T_m = const} \quad (2.3)$$

Смысл чувствительности в том, что она характеризует скорость изменения и равна величине, на которую изменяется показатель качества, в данном случае время регулирования, при единичном изменении некоторого параметра.

Представляется полезным для практики ввести относительную меру чувствительности, которая характеризует относительное изменение показателя качества, выраженное в процентах, при изменении параметра САР на 1 %, например:

$$S_{tk1} = \frac{\left(\frac{\Delta t_{рег}}{t_{рег}}\right)}{\left(\frac{\Delta k_1}{k_1}\right)} \quad (2.4)$$

где  $S_{tk1}$  - относительная чувствительность времени регулирования САР к изменению ее коэффициента усиления  $k_1$ .

Относительную чувствительность удобно определять экспериментально, и она более показательна, чем просто частная производная.

На рисунке ниже представлена схема для экспериментального определения влияния изменения коэффициента усиления П-регулятора на показатели качества статической САР:

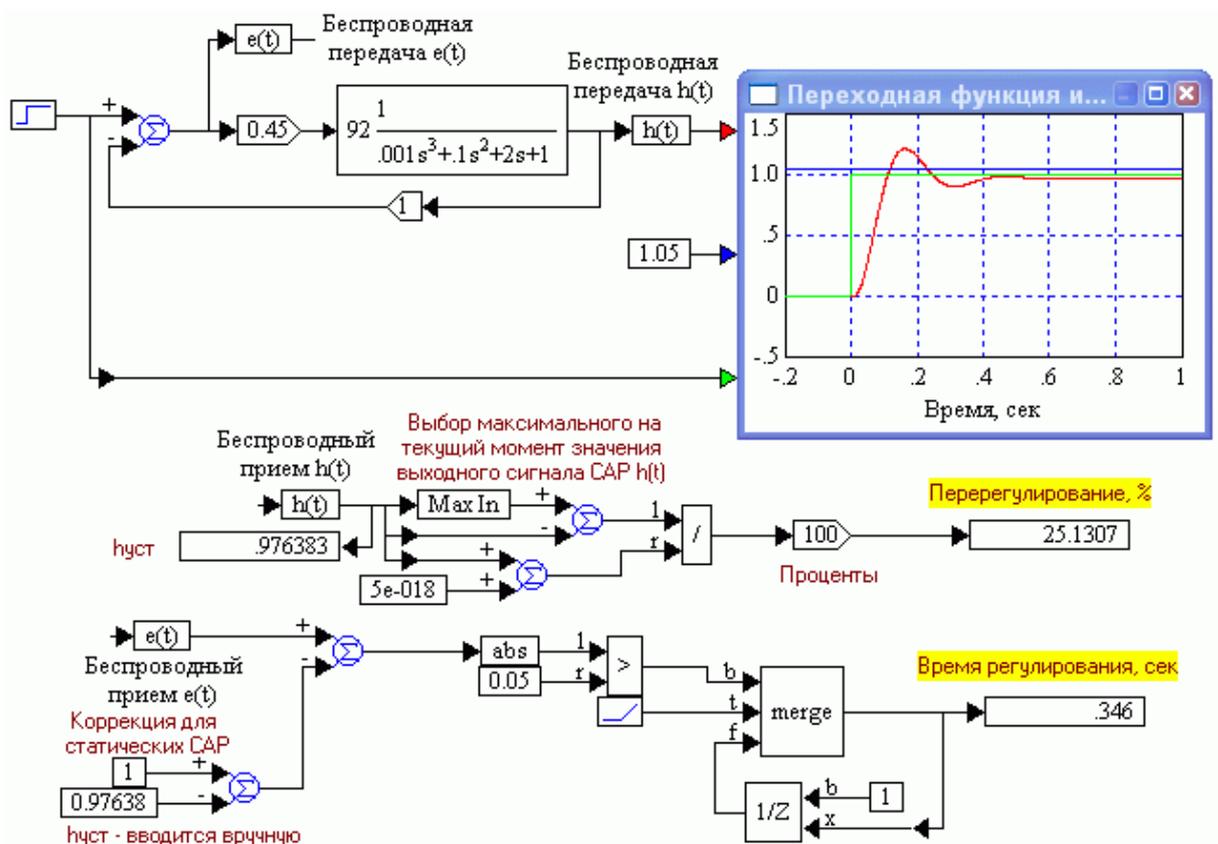


Рис. 2. 37. Схема для определения влияния приращения параметров САР на ее показатели качества: перерегулирование  $\sigma$  и время регулирования  $t_p$ .

Для астатической САР схема рис.2. 37 автоматическая (установившееся значение переходной функции принимается равным единице:  $h_{уст} = 1$ ).

Для статической САР эта схема «полуавтоматическая». После первого запуска моделирования при  $h_{уст} = 1$  определяется установившееся значение  $h_{уст}$  и вводится в левый нижний блок константы, а затем проводится второй запуск моделирования, в результате которого и определяются точные значения показателей качества

Эта схема подойдет и для определения чувствительности САР к изменению других параметров, например коэффициентов характеристического полинома неизменяемой части САР.

Для определения относительной чувствительности достаточно зарегистрировать значения времени регулирования и перерегулирования, изменить коэффициент усиления П-регулятора на 1% и вновь зарегистрировать значения показателей качества. Остается только определить разность значений, полученных во втором и первом измерениях и разделить их на исходные значения. Это и будет относительная чувствительность времени регулирования и перерегулирования на изменение коэффициента усиления на 1 %.

Для схемы рис. 2.37 экспериментально, непосредственными измерениями, можно получить:

- при  $k_n = 0.200$  перерегулирование  $\sigma = 4.1238\%$  и время регулирования  $t_p$  равно 0.199 сек;

- при  $k_n = 0.202$  перерегулирование  $\sigma = 4.2905\%$  и время регулирования  $t_p$  равно 0.201 сек.

Чувствительность времени регулирования к вариациям коэффициента усиления при  $k_n = 0.200$  равна:

$$S_{t_{пн}} = \frac{\frac{0.201 - 0.199}{0.199}}{\frac{0.202 - 0.200}{0.200}} = 1.005$$

Это значит, что при  $k_n = 0.200$  и изменении его величины на 1% время регулирования тоже изменяется в ту же сторону примерно на 1%. Другими словами, относительное изменение коэффициента усиления при  $k_n = 0.200$  на малую величину приводит к такому же относительному изменению времени регулирования.

Отметим, что при разных сочетаниях значений параметров САР, чувствительность ее к их изменениям разная.

С помощью схемы рис. 2.37 можно провести и более подробное исследование зависимости показателей качества САР от величины параметра, например от коэффициента усиления П-регулятора:

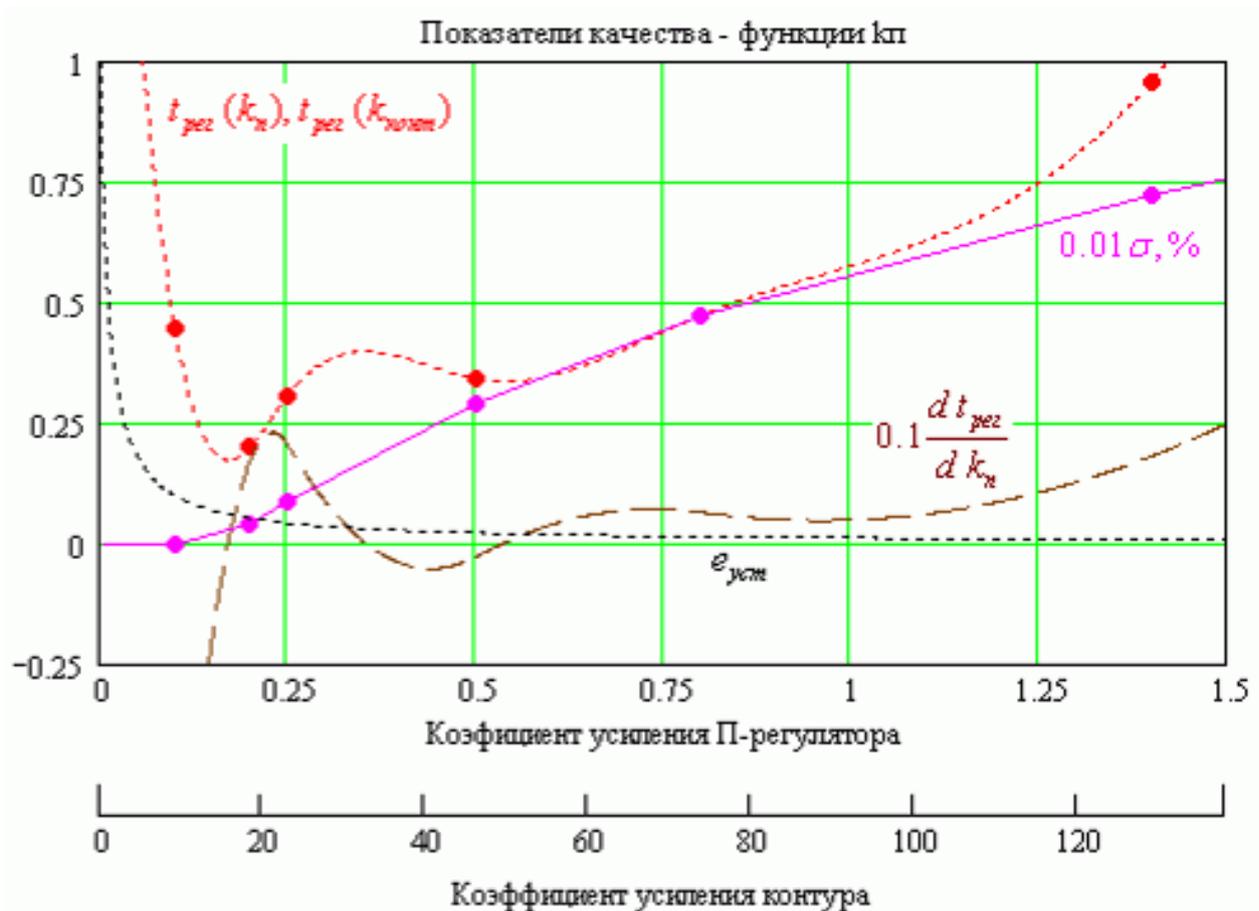


Рис. 2. 38. Зависимости времени регулирования, перерегулирования, скорости изменения времени регулирования и установившейся ошибки регулирования от коэффициента усиления  $k_p$  П-регулятора (коэффициента усиления контура, который равен  $k_{конт} = k_p \cdot 92$ .)

Как видно, при коэффициенте усиления П-регулятора равном 0.2, перерегулирование равно 4%, установившееся значение ошибки слежения равно 5%, а производная времени регулирования по коэффициенту усиления П-регулятора достигает относительного максимума. Малые относительные изменения коэффициента усиления П-регулятора приводят к значительным относительным изменениям времени регулирования. Если для исследуемой САР допустимы значения перерегулирования, меньшие 25%, то с точки зрения стабильности времени регулирования предпочтительнее установить значение коэффициента усиления П-регулятора в диапазоне 0.3 – 0.4

## 2.4. Об управлении объектами с запаздыванием

### 2.4.1. Классические законы регулирования

Многие типовые промышленные объекты управления содержат звено запаздывания с задержкой, равной или существенно превышающей наибольшую постоянную времени линейной части объекта.

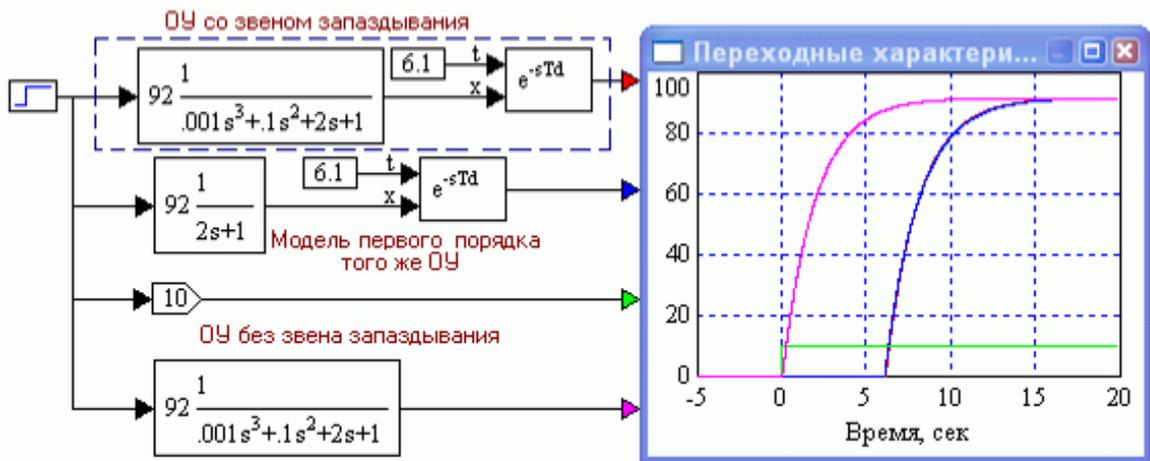


Рис. 2. 39.

Переходные характеристики объекта с запаздыванием (неизменяемой части САР), его модели первого порядка и объекта управления без запаздывания. Красная кривая практически полностью покрывается синей: для данного моделируемого объекта модель первого порядка подходит хорошо

При сравнительно больших задержках именно звено запаздывания определяет время регулирования САР. Оно может существенно, в десятки и сотни раз увеличить время регулирования САР с оптимально настроенным типовым регулятором по сравнению с оптимизированной САР, с той же самой линейной частью, но без звена запаздывания.

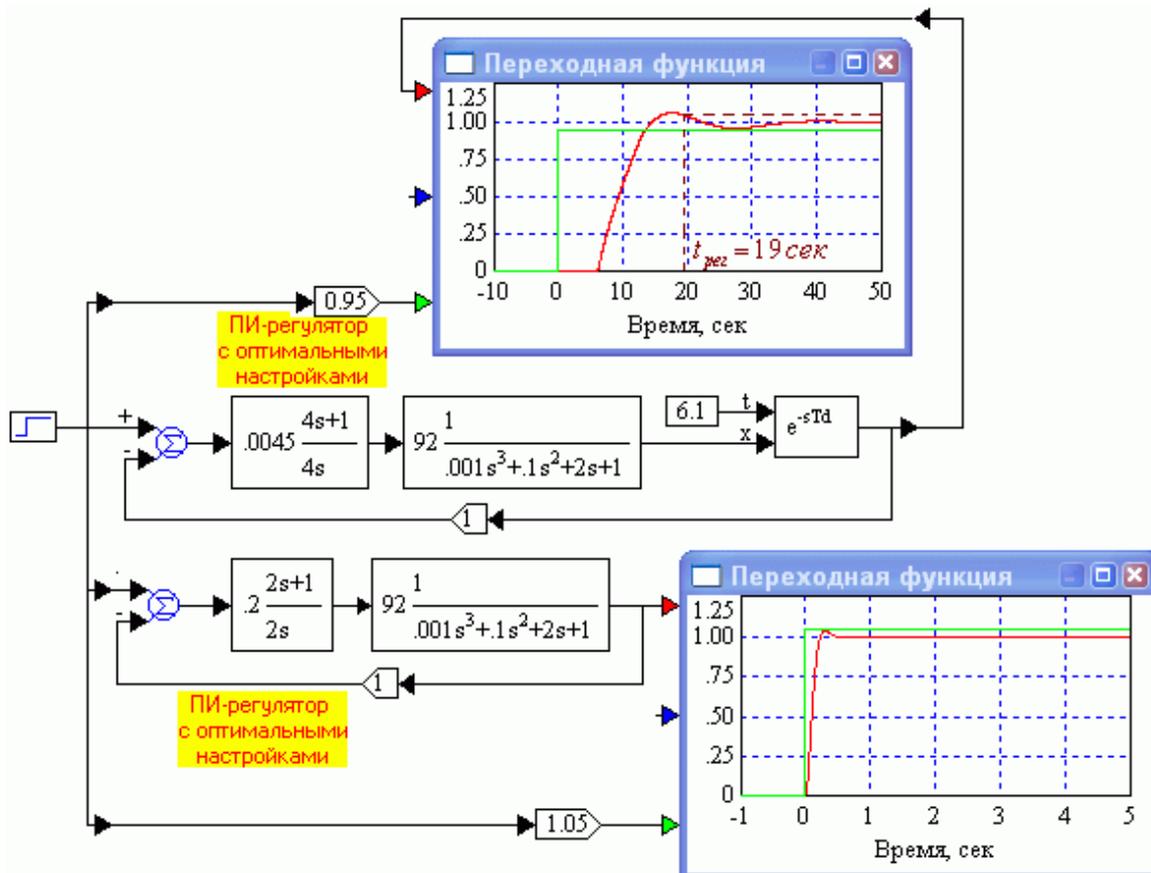


Рис. 2.40. Сравнение быстродействия САР со звеном и без звена запаздывания.

ПИ-регулятор с настройками, близкими к оптимальным для объекта со звеном запаздывания обеспечивает длительность переходного процесса САР, втрое превышающую время запаздывания, что является хорошим результатом для такого типа регулятора. В САР без звена запаздывания ПИ-регулятор позволяет в данном случае снизить время регулирования по сравнению со временем разгона объекта управления на два порядка. Быстродействие САР со звеном и без звена запаздывания отличается в сто раз

**Оптимизация** параметров ПИ-регулятора САР с объектом регулирования с запаздыванием сводится, как и ранее, к обеспечению запасов устойчивости:

- по фазе  $60^\circ - 70^\circ$  и более,
- по амплитуде 12 - 20 дБ (в 4 - 10 раз) и более
- путем изменения коэффициента усиления контура.

При сравнительно малых по отношению к наибольшей постоянной времени неизменяемой части задержках  $\tau$  постоянная времени  $T$  ПИ-регулятора в первом приближении определяется главной постоянной времени  $T_{ин}$  устойчивой линейной неизменяемой части САР ( $T_{пи} = T_{ин} + \tau$ ).

В таком случае постоянную времени  $T_{ин}$  следует находить, как и ранее, по частоте сопряжения отрезков с наклонами 0 и -20 дБ/дек линейной аппроксимации низкочастотной области ЛАЧХ неизменяемой части САР.

Отметим, что при запаздываниях больших, чем главная постоянная времени неизменяемой части, постоянная времени ПИ-регулятора во все большей мере определяется задержкой ( $T_{пи\text{ опт}} \rightarrow (\tau + T_{ин})/2.5$ ).

Т.о. можно рекомендовать следующий порядок определения предварительных параметров ПИ-регулятора для САР со звеном задержки в контуре:

- нормировать усиление инерционной части (поставить перед ПИ-регулятором П-регулятор с коэффициентом усиления обратным коэффициенту усиления инерционной части или, для простоты, задать усиление инерционной части равным единице);

- вычислить постоянную времени  $T_{пи}$  ПИ-регулятора по формуле:

$$T_{пи} = \begin{cases} T_{ин} + \tau, & \tau < T_{ин} \\ \frac{\tau + T_{ин}}{2.5}, & \tau > T_{ин} \end{cases}$$

- задать приближенное значение коэффициента усиления ПИ-регулятора:

$$k_{пи} = \begin{cases} 0.5, & \tau < T_{ин} \\ 0.3, & \tau > T_{ин} \end{cases}$$

Далее при необходимости коэффициент усиления контура следует уточнить, добиваясь 5%-го перерегулирования:

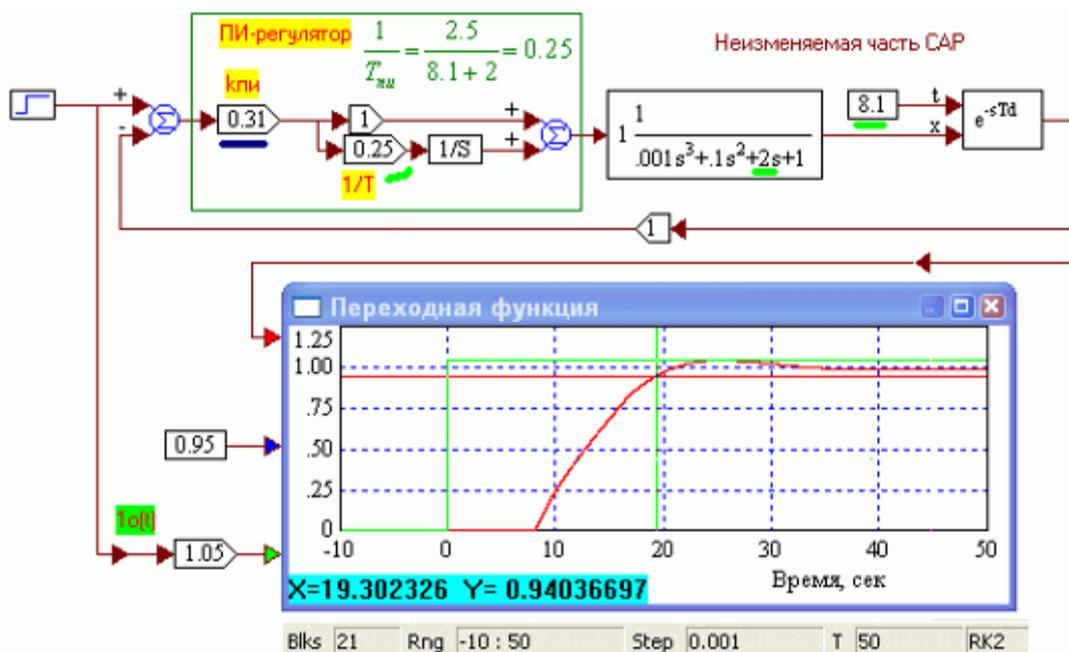


Рис. 2. 41.

Оптимизированная САР имеет хорошее качество. Время регулирования (19.3 сек) САР с оптимальным по критерию Сигма 5% ПИ-регулятором превышает время задержки (8.1 сек) звена запаздывания объекта управления только в 2.4 раза, что является вполне удовлетворительным результатом для такого типа регулятора. Статический коэффициент усиления неизменяемой части учтен в коэффициенте усиления ПИ-регулятора

Отметим, что и при не очень точном задании постоянной времени ПИ-регулятора, тем не менее, можно, изменяя его коэффициент усиления добиться 5%-го перерегулирования. Это приведет к затягиванию переходного режима, но обеспечит должную плавность регулирования. Собственно, так часто и поступают операторы на практике, настраивая реальные САР, когда не знают точного оптимального значения постоянной времени.

Приведем для схемы, изображенной рис. 2.41, ЛАЧХ и ЛФЧХ, построенные в Vissim'e (рис.2.42).

Запасы устойчивости САР, оптимизированной по критерию Сигма 5 без учета звена запаздывания (как известно, его Vissim «не замечает»). Видно, что для обеспечения устойчивости САР со звеном запаздывания запасы устойчивости ее инерционной части должны быть очень велики. На самом деле запас устойчивости всей оптимизированной САР с учетом звена запаздывания составляет 7.7 дБ (см. ниже). Коэффициент усиления контура  $k/T = 0.08$ , а частота  $\omega_{\pi} = 44.5$  рад/сек.

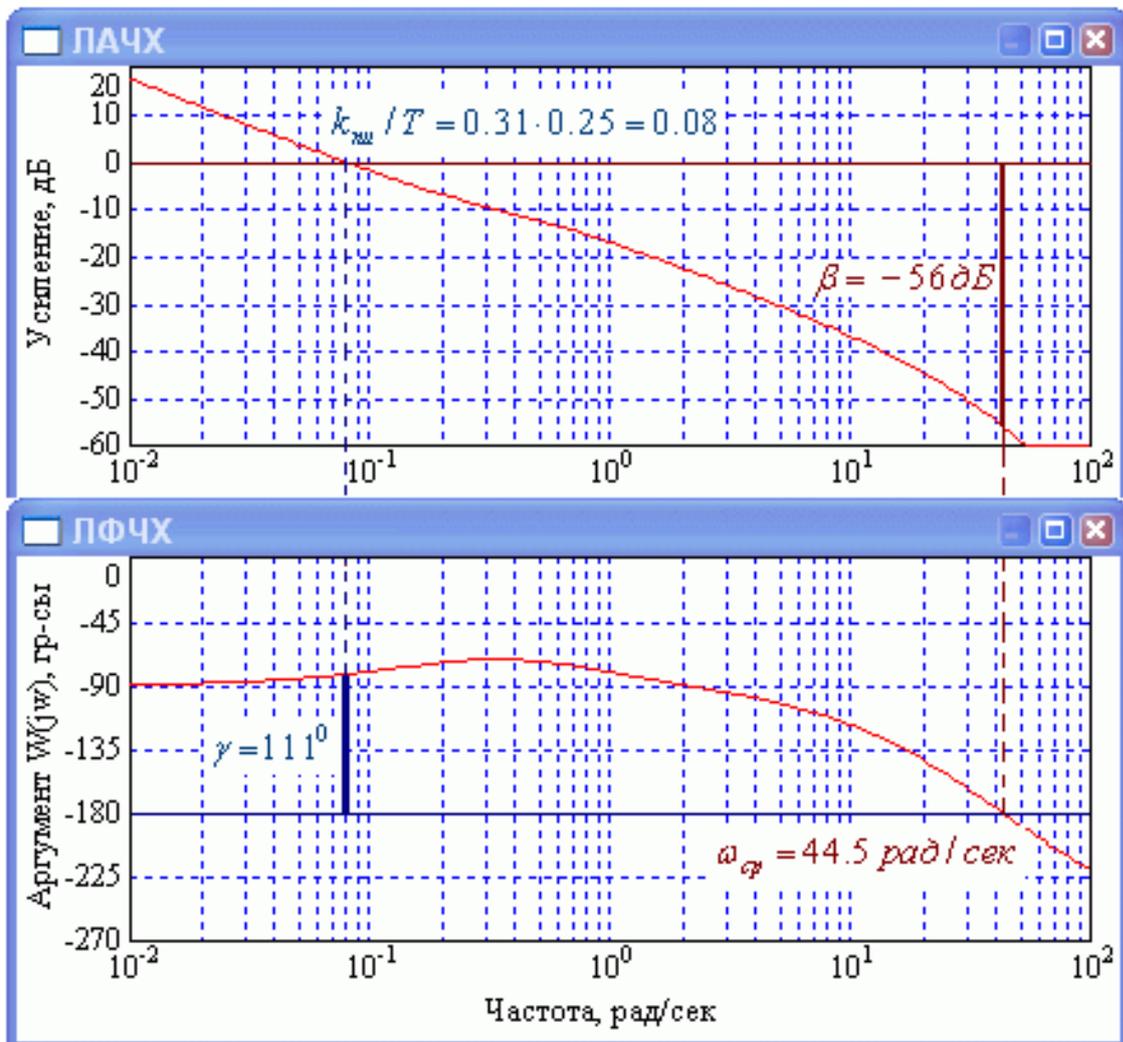


Рис. 2. 42.

Получим запасы оптимизированной САР в Маткаде:

Комплексный коэффициент  
передачи разомкнутой САР

$$W(\omega) := 0.31 \cdot \frac{4 \cdot j \cdot \omega + 1}{4 \cdot j \cdot \omega} \cdot \frac{1}{0.01(j \cdot \omega)^3 + 0.1(j \cdot \omega)^2 + 2 \cdot j \cdot \omega + 1} \cdot e^{-j\omega \cdot 8.1}$$

$$L(\omega) := 20 \cdot \log(|W(\omega)|) \text{ ЛАЧХ, дБ}$$

$$\phi_W(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(W(\omega)) \text{ ЛФЧХ, градусы}$$

$$\omega := 0.01, 0.015 \dots 100$$

$$\phi_{W'}(\omega) := \begin{cases} \phi_W(\omega) & \text{if } \omega < 0.233 \\ (\phi_W(\omega) - 360) & \text{otherwise} \end{cases}$$

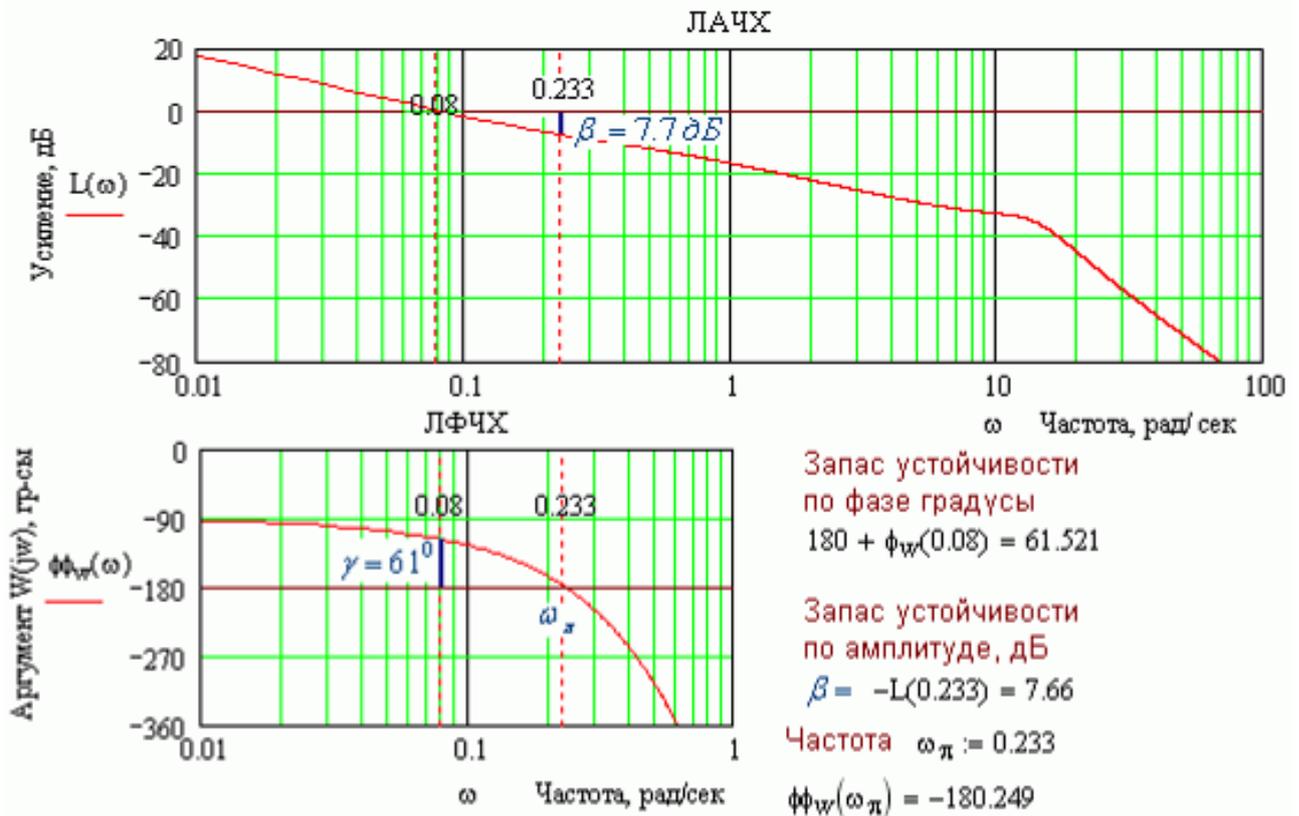


Рис. 2. 43. (Маткад).

Запасы устойчивости САР, оптимизированной по критерию Сигма 5, близки к рекомендуемым. ЛФЧХ САР, имеющей звено запаздывания в контуре, уходит вниз все быстрее, с ускорением

Как видно из сравнения рисунков 2.41 и 2.42 введение звена запаздывания в контур потребовало для сохранения устойчивости САР значительно уменьшить усиление контура, на 48 дБ (в  $10^{48/20} = 251$  раз) (ср. также с рис. 2.10 - 2.12). Это существенно и ухудшило быстродействие САР.

Итак, ПИ- и ПИД-регуляторы не способны заметно компенсировать запаздывание в контуре. Это обусловлено различной физической природой свойств инерционности и запаздывания. Лишь при относительно малых запаздываниях задержка может быть приближенно аппроксимирована инерционностью, т.е. звено запаздывания может быть заменено аperiodическим звеном.

### 2.4.2. Предельные случаи

Инженер-исследователь должен чувствовать решаемую задачу. При решении типовых, рутинных задач оптимизации это значит, что он должен понимать принцип работы исследуемой системы, представлять, как влияют ее параметры на ее свойства и приближенно интуитивно оценивать, хотя бы с точностью до порядка величин, искомые численные значения, характеризующие систему. Все это позволяет контролировать решение задачи на всем ее протяжении и приходиться к правильному результату.

Один из способов прийти к пониманию решаемой задачи состоит в исследовании т.н. предельных случаев, когда исключаются многие второстепенные параметры и факторы ввиду их малости, что упрощает анализ

исходных данных, приводит к относительно простым ответам и дает ориентиры для оценки свойств системы общего вида.

Рассмотрим два случая оптимизации параметров ПИ-регулятора:

- - в контуре, кроме ПИ-регулятора, имеется только одно звено запаздывания;
- - в контуре, кроме ПИ-регулятора, имеется только три одинаковых аperiodических звена.

Первый случай соответствует САР, в которой задержка в звене запаздывания много больше длительности переходного процесса инерционной части.

Второй случай соответствует САР с задержкой в контуре, стремящейся к нулю и наиболее «неудобному» для САР с точки зрения уменьшения времени регулирования сочетанию постоянных времени объекта управления – три равных по величине. Это частный случай так называемого звена Вышнеградского.

#### 2.4.2, а. Оптимальные параметры ПИ-регулятора для САР со звеном запаздывания в контуре

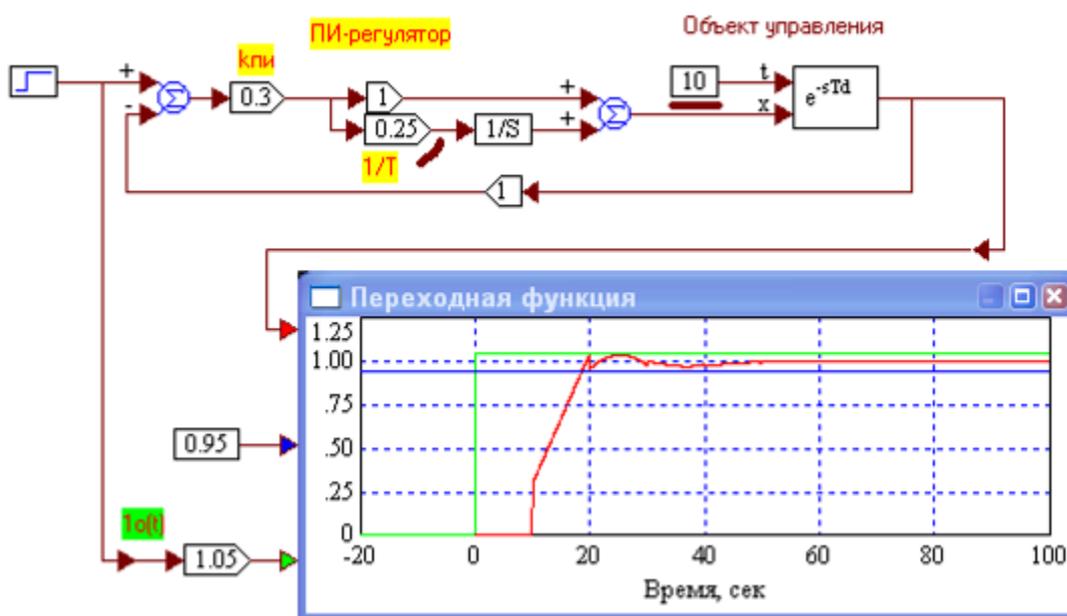


Рис. 2. 44. САР с ПИ-регулятором и звеном запаздывания, оптимизированная по критерию Сигма 5% при разных значениях запаздывания (1, 5, 10, 20 сек).

Оптимальное значение коэффициента усиления ПИ-регулятора, а значит, и контура САР, равно **0.3** и не зависит от времени задержки  $\tau$ . Оптимальная постоянная времени  $T_{\text{пи опт}}$  ПИ-регулятора определяется временем задержки и равна  $\tau/2.5$ . Время регулирования  $t_{\text{рег}} = 1.85 \tau$ . Обратим внимание на ступенчатые отсечки внутри 5%-го коридора

Таким образом, в случае, когда инерционность объекта управления пренебрежимо мала по сравнению с его запаздыванием, ПИ-регулятор позволяет обеспечить время регулирования, даже менее чем в два раза

превышающее задержку. Постоянная времени ПИ-регулятора и время регулирования САР определяются задержкой, а коэффициент его усиления не зависит от задержки, он всегда равен 0.3.

Эти значения могут служить ориентирами при оптимизации САР, содержащей в неизменяемой части одновременно как инерционность, так и звено запаздывания.

#### 2.4.2, б. Оптимальные параметры ПИ-регулятора для САР с тремя одинаковыми апериодическими звеньями в контуре

Объект управления, передаточная функция которого имеет вид:

$$W_o(p) = \frac{1}{(pT+1)^3} \equiv \frac{1}{T^3 p^3 + 3T^2 p^2 + 3T p + 1} \quad (2.7)$$

не позволяет сколько-нибудь значительно снизить время регулирования по сравнению со временем разгона объекта не только с помощью ПИ-регулятора, но даже и ПИД-регулятора. Это обусловлено тем, что эти регуляторы имеют только один и два форсирующих множителя в своих передаточных функциях соответственно. Эти множители могут компенсировать, сократить только одну или две инерционности из трех одинаковых, составляющих объект (2.7). Действительно:

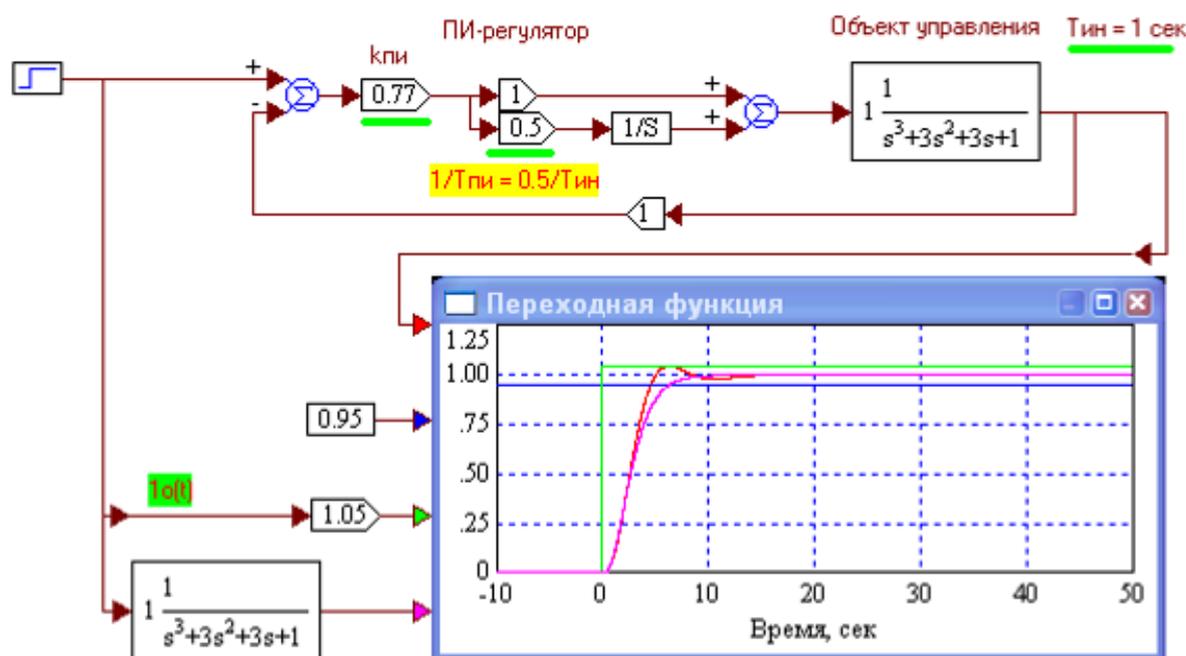


Рис. 2. 45.

Оптимальный по критерию Сигма 5% ПИ-регулятор позволяет сократить время регулирования по сравнению со временем разгона «неудобного» объекта всего на 25%

Оптимальное значение коэффициента усиления контура, а в данном случае и ПИ-регулятора, при управлении объектом, состоящим из трех одинаковых аperiodических звеньев, не зависит от постоянных времени звеньев и равен 0.77. Оптимальное значение постоянной времени ПИ-регулятора равно удвоенному значению постоянной времени звеньев.

**Примечание.** Если все-таки требуется существенно уменьшить время регулирования для объекта (2.7), то следует сделать его модель более подробной. Это позволит ввести, по крайней мере, еще одно аperiodическое звено с меньшей, чем у первых трех звеньев постоянной времени. В таком случае можно компенсировать все три старшие инерционности форсирующими множителями. Два из них, например, можно привлечь, используя ПИД-регулятор, а третий получить охватом гибкой, дифференцирующей обратной связью одного - двух аperiodических звеньев неизменяемой части САР.

В общем случае на практике постоянные времени неизменяемой части САР, в частности объекта управления, отличаются друг от друга, и часто отличаются значительно. Это и позволяет существенно уменьшить время регулирования по сравнению со временем разгона объекта управления.

### 2.4.3. Продвинутое законы регулирования

При наличии звена запаздывания с задержкой много большей, чем наибольшая из постоянных времени объекта, на практике в лучшем случае удастся снизить время регулирования примерно до двух времен запаздывания, путем применения продвинутых алгоритмов управления (законов регулирования) [4].

Одни из таких законов ПИП (пропорционально-интегральный по предыстории). Передаточная функция такого регулятора равна:

$$V_p(p) = k_p \left[ 1 - k_1 \frac{W_{os}(p)}{k_{os}} \right] + \frac{k_p}{pT} \left[ 1 - k_2 \frac{W_{os}(p)}{k_{os}} \right] \quad (2.8)$$

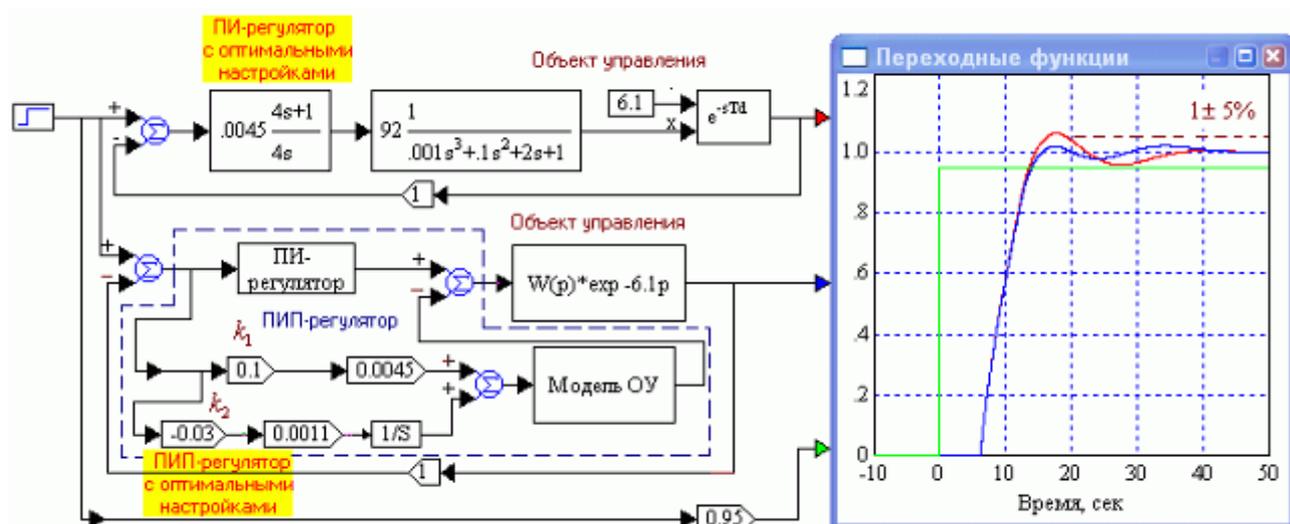


Рис. 2.46. Сравнение переходных функций САР содержащих звено запаздывания в контуре при оптимальных настройках ПИ- и ПИП-регуляторов.

## 2.5. СЛОВАРЬ

**Время разгона** объекта это время, в течение которого управляемая величина объекта изменяется от нуля до номинала при ступенчатой подаче номинального управляющего воздействия на его вход. Это время совпадает и со временем переходного процесса, вызываемого подачей на вход объекта ступенчатого воздействия, меньшего, чем номинальное.

**Время регулирования** это время, за которое заканчивается переходный процесс в САР при подаче на ее вход относительно малых приращений задающей величины, не требующих в течение переходного процесса подведения к объекту предельных, недопустимо высоких значений мощностей. Обычно время регулирования меньше и даже много меньше времени разгона объекта.

В то же время, если попытаться разогнать настоящий объект управления от нуля до номинального значения с помощью САР, подавая на нее соответствующее ступенчатое задание, длительность переходного процесса будет примерно равна или больше времени разгона, и вовсе не будет равна времени регулирования, ввиду ограничения подаваемых на объект мощностей в реальной САР.

**Закон регулирования** это математический алгоритм, в соответствии с которыми в САР с управлением по отклонению сигнал ошибки слежения (отклонение), преобразуется в сигнал управления, подаваемый на исполнительный механизм САР или непосредственно на объект управления. Применяются законы регулирования П, ПИ, ПИД и др.

**Инерционная часть** системы или объекта управления это модель, описываемая дробно-рациональной передаточной функцией. Инерционная часть не содержит звена запаздывания.

**Критерий** (по Ожегову С.И. – мерило оценки, суждения) **оптимизации** задает численную меру качества САР и прямо или косвенно указывает такое ее значение, при котором качество САР считается наилучшим.

**Метод оптимизации САР** это алгоритм, т.е. последовательность действий, которые следует осуществить для того, чтобы получить из исходной САР наилучшую, с точки зрения конкретного критерия качества, САР.

**Оптимизация САР** это процедура модификации структуры и определения таких численных значений параметров заданной САР, при которых она имеет наилучшее, в определенном заранее смысле, качество регулирования (слежения и стабилизации). Оптимизация это частый случай синтеза САР.

**Параметрическая оптимизация САР** это определение таких значений ее параметров, при которых САР имеет наилучшие, в определенном заранее смысле, показатели качества.

**Регулятор**<sup>1</sup> (в технике) это полнофункциональное, конструктивно оформленное в виде отдельного блока физическое устройство, формирующее сигнал управления объектом.

**Регулятор**<sup>2</sup> (в ТАУ) это структурно- алгоритмический блок, расположенный на схеме САР сразу за устройством сравнения задания и управляемой величины (сумматором). Этот блок преобразует по заданному

алгоритму сигнал ошибки в сигнал, подаваемый на исполнительный механизм (ИМ) САР, посредством которого управляется объект.

**Синтез** (теоретическое конструирование) линейной системы автоматического регулирования (САР) для указанного объекта управления (ОУ) это построение модели САР отвечающей требованиям качества, предъявляемым к ней заказчиком в отношении плавности, быстродействия и точности регулирования.

**Слежение** – одна из задач, решаемых системой автоматического регулирования (САР). Решая эту задачу САР принуждает выходную, управляемую величину объекта управления быть пропорциональной входной, задающей, отслеживаемой величине САР.

**Стабилизация** <sup>(1)</sup> – одна из задач, решаемых системой автоматического регулирования (САР). Решая эту задачу САР компенсирует влияние совокупности внешних факторов, т.е. возмущающей величины, на управляемую величину объекта управления.

**Стабилизация** <sup>(2)</sup> САР или ее фрагмента. Приведение САР из неустойчивого, или недостаточно устойчивого состояния, в устойчивое, с хорошими запасами устойчивости по амплитуде и фазе.

**Структурно-параметрическая оптимизация САР** состоит в поиске структуры и настроечных параметров ее элементов для достижения наилучшего в определенном смысле качества САР.

**Функция цены** это математическое понятие, определяющее совокупную количественную относительную меру качества САР при некотором сочетании ее параметров. Функциями цены могут быть среднеквадратическая ошибка (СКО) регулирования в переходном режиме, величина перерегулирования и др.

## 2.6. Заключение

Настройка САР на оптимум функционирования путем определения и задания наилучших настроечных параметров регуляторов это типичная задача, которую решает инженер-автоматчик при разработке и эксплуатации САР.

Программы моделирования существенно облегчают решение этой задачи. Но не следует думать, что программа осуществит оптимизацию за инженера сама. Программа только инструмент в его руках. И от того, насколько совершенно исследователь умеет ей пользоваться и знает ее особенности, а также назначение, существо и тонкости работы оптимизируемой САР зависит успешное решение задачи получения оптимальной ее модели.

Программы моделирования имеют особенности, знание которых позволяет получать правильные решения.

## 3. ЗАДАНИЯ К РАБОТЕ

Методическая цель лабораторной работы заключается в том, чтобы студент работал, осознавая свои действия. Поэтому еще до ее выполнения студент должен понять зачем, с какой целью он будет что-то делать и какие, хотя бы ориентировочно результаты, количественные, численные результаты он должен получить и почему именно такие результаты должны получиться. Другими словами, работа должна выполняться студентом осмысленно. А для

этого нужно знать и понимать теорию вопроса, хотя бы в объеме, изложенном в предыдущем разделе, существенно дополняющем литературные источники изложением физического смысла.

### **3.1. Оптимизация параметров ПИ-регулятора линейной САР**

3.1.1. Создание лабораторного стенда

3.1.2. Оптимизация по критерию Сигма 5 направленным подбором параметров ПИ-регулятора

3.1.3. Автоматическая оптимизация параметров ПИ-регулятора по критерию Сигма 5 в программе Vissim

3.1.4. Автоматическая оптимизация параметров ПИ-регулятора по критерию минимума СКО в программе Vissim

### **3.2. Оценка чувствительности САР по параметру**

3.2.1. Лабораторный стенд

3.2.2. Оценка чувствительности времени регулирования САР к изменениям коэффициента усиления контура

## **4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое синтез САР?

2. Что такое оптимизация САР, параметрическая оптимизация САР, структурно-параметрическая оптимизация САР?

3. Что такое критерий оптимизации? Какие критерии оптимизации вы знаете?

4. Что такое метод оптимизации? Какие методы оптимизации вы знаете?

5. Что такое функция цены? Какое у нее свойство? Связана ли она с параметрами САР?

6. Какие функции цены применяются в критериях оптимизации по минимуму СКО и 5%-го перерегулирования?

7. Что такое регуляторы в технике и в ТАУ? Для чего они служат?

8. Какие классические типы регуляторов, рассматриваемых в ТАУ, вы знаете? Каковы их передаточные и переходные функции?

9. Что такое слежение и стабилизация?

10. Чем отличаются время разгона объекта управления и время регулирования САР этим же самым объектом? Почему время регулирования может быть значительно меньше, чем время разгона? На что приводит это к энергетическим перегрузкам объекта управления и других элементов САР?

11. Как по ЛАЧХ и ЛФЧХ неизменяемой части САР приближенно определить оптимальное значение усиления П-регулятора?

12. Как по ЛАЧХ и ЛФЧХ неизменяемой части САР приближенно определить оптимальное значение усиления ПИ-регулятора?

13. Как по ЛАЧХ и ЛФЧХ неизменяемой части САР приближенно определить оптимальное значение усиления ПИД-регулятора?

14. Как, используя программу Vissim, вручную оптимизировать САР по критерию Сигма 5 (5% -го перерегулирования)?

15. В каком смысле критерий Сигма 5 обеспечивает наилучшее быстродействие САР?

16. Что такое предварительная коррекция САР? Какие запасы устойчивости и коэффициент усиления статической САР необходимо при этом получить?

17. Как определяется приближенное значение оптимального коэффициента усиления П-регулятора?
18. Как определяются приближенные значения оптимальных параметров ПИ-регулятора - коэффициента усиления и постоянной времени?
19. Как определяются приближенные значения оптимальных параметров ПИД-регулятора - коэффициента усиления и постоянных времени?
20. Как уточняется значение коэффициента усиления регуляторов по критерию Сигма 5% в программах Vissim и ПК "МВТУ"?
21. Как осуществить автоматическую параметрическую оптимизацию в программе Vissim?
22. Каковы особенности автоматической оптимизации в программах Vissim и ПК "МВТУ"? Почему в них нужно ограничивать диапазоны изменения оптимизируемых параметров?
23. Какой критерий оптимизации САР в большей мере отвечает требованиям эксплуатации типовых промышленных объектов управления?
24. Что такое чувствительность САР к изменению ее параметра? Зачем нужно знать численные оценки чувствительности?
25. Каковы особенности регулирования САР с объектом управления, содержащем звено запаздывания?
26. Чем в основном определяется время регулирования объектом с запаздыванием?

## 5. ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ РЕСУРСЫ

1. Лукас В.А. Теория автоматического управления. - М.: Недра, 1990. - с. 218. Рабочий учебник. Файл пособия: [TAU\_Un\_1\_v\_123.zip 1.04 МБ, 18.05.2005]. 3.6. Идентификация линейных САР и их элементов. [http://model.exponenta.ru/bt/TAU\\_Un\\_1\\_v\\_123.zip](http://model.exponenta.ru/bt/TAU_Un_1_v_123.zip)
2. Клиначёв Н. В. Теория систем автоматического регулирования и управления: Учебно-методический комплекс. - Offline версия 3.6. - Челябинск, 2005. - 652 файла, ил. [http://model.exponenta.ru/tau\\_lec.html](http://model.exponenta.ru/tau_lec.html), Файл пособия: tau\_knv.zip 1434 KB, V3.6, 19.06.2005. [http://online.download.ru/Download/\[ProgramID=11415\]](http://online.download.ru/Download/[ProgramID=11415]) или [http://model.exponenta.ru/tau\\_knv.zip](http://model.exponenta.ru/tau_knv.zip)
3. Федосов Б.Т. О синтезе САР как фильтра Баттерворта. Модульный оптимум. 2005 г. [http://model.exponenta.ru/bt/bt\\_00117.html](http://model.exponenta.ru/bt/bt_00117.html)
4. Федосов Б.Т. Задания и методические указания к выполнению лабораторной работы № 3 по курсам "ТАУ", "Системотехника" и "Теория линейных и нелинейных систем" на тему: "Исследование типовых звеньев линейных систем. Построение и изучение частотных характеристик.". П 6. О построении в Vissim'e ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура САР с объектом с запаздыванием. Электронный документ формата chm (1.26 МБ). Рудный, 2006 г. [http://model.exponenta.ru/bt/bt\\_Met\\_3203.html](http://model.exponenta.ru/bt/bt_Met_3203.html) файл TAU\_Lab\_3\_v23\_060406.zip, [http://model.exponenta.ru/bt/TAU\\_Lab\\_3\\_v23\\_060406.zip](http://model.exponenta.ru/bt/TAU_Lab_3_v23_060406.zip)
5. Федосов Б.Т. Создание блока пользователя для программы VisSim 5 в среде MS Visual C++6 с использованием мастера dllWizard. 2003 г. [http://model.exponenta.ru/bt/bt\\_0006.html](http://model.exponenta.ru/bt/bt_0006.html)
6. Н. В. Клиначёв. Моделирование систем в программе VisSim Справочная система на русском языке. 2001. <http://model.exponenta.ru/help/vissim.htm>.





