**ДИСЦИПЛИНА: УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*Козлов Олег Степанович,*

*Щекатуров Александр Михайлович*

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

**АНАЛИЗ В СРЕДЕ SIMINTECH**

**(В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ», ПК «МВТУ»)**

**ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗВЕСТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

**МЕТОДАМИ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Москва, 2013**

**СОДЕРЖАНИЕ**

ЦЕЛЬ РАБОТЫ 3

ВВЕДЕНИЕ 4

1 АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ 5

1.1 Блок *Идеальное запаздывающее звено* 5

1.2 Определение устойчивости линейных систем с запаздыванием 13

1.3 Блок *Переменное транспортное запаздывание* 14

2 САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ САР ЯР, ЗАДАННОЙ В ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ И В ФОРМЕ КОШИ 16

# ЦЕЛЬ РАБОТЫ

* изучение математического описания динамики особых линейных систем, включая:
  + математическое описание *Идеального запаздывающего звена*;
  + аппроксимация *Идеального запаздывающего звена* цепью последовательно соединенных *Апериодических звеньев 1-го порядка*;
  + определение критического значения постоянной запаздывания;
  + анализ влияния величины постоянной запаздывания на качество переходных процессов в линейной САР с запаздыванием;
* изучение математической модели блока Переменное транспортное запаздывание;
* самостоятельное исследование переходных процессов в известных динамических задачах с использованием методов структурного моделирования, включая:
  + исследование поведения нелинейных систем во временной области;
  + исследование поведения нелинейных систем на фазовой плоскости.

# ВВЕДЕНИЕ

В лабораторных работах, выполненных Вами в прошлом семестре, были рассмотрены основные процедуры работы в SimInTech применительно к моделированию и анализу динамических процессов в линейных системах автоматического управления (САУ). Выполнив в прошлом семестре самостоятельно также и домашнее задание, Вы “закрепили” полученные знания.

Поэтому в первом приближении можно считать, что Вы **умеете** (точнее обязаны) сформировать в SimInTech математическую модель относительно несложной динамической системы (САУ или САР), выполнить моделирование переходных процессов и анализ устойчивости линейной или линеаризованной системы.

Однако, известно, что математические модели динамики реальных технических систем являются, в основном, нелинейными, и во многих случаях не могут быть линеаризованы из-за возможности потерять характерные динамические свойства, обусловленные принципиальной нелинейностью уравнений динамики.

Кроме того, существует значительное количество методов моделирования и анализа динамических систем в SimInTech, пока не известных Вам.

Поэтому лабораторный практикум настоящего семестра направлен, во-первых, на изучение методов моделирования и анализа нелинейных динамических систем и, во-вторых, на освоение Вами новых процедур работы в SimInTech.

Одна из задач настоящей лабораторной работы посвящена анализу *динамических систем с запаздыванием*, которые в Теории Управления обычно относят к классу особых динамических систем.

Напомним, что линейная система считается особой, если уравнение динамики хотя бы одного звена в ней описывается линейным дифференциальным уравнением в частных производных.

Учитывая, что нестационарные процессы теплогидравлики в контурах ядерных энергетических установок протекают, в основном, при переменном расходе (скорости) циркуляции, Вам будет предложено изучить математическую модель динамики блока *Переменное транспортное запаздывание*, включая идею расчетного алгоритма.

# 1 АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

## 1.1 Блок *Идеальное запаздывающее звено*

Уравнение динамики идеального запаздывающего звена записывается в виде простейшего линейного дифференциального уравнения в частных производных:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

где – какая-то скалярная субстанция (например, температура потока), переносимая с постоянной скоростью *u*; *х* – продольная координата.

Если, например, рассматривается транспортный перенос скалярной субстанции в трубопроводе постоянного сечения и длиной *L*, то математическая модель динамики переноса может быть представлена в переменных “вход-выход” следующей трансцендентной передаточной функцией (передаточной функцией идеального запаздывающего звена):

(1.2)

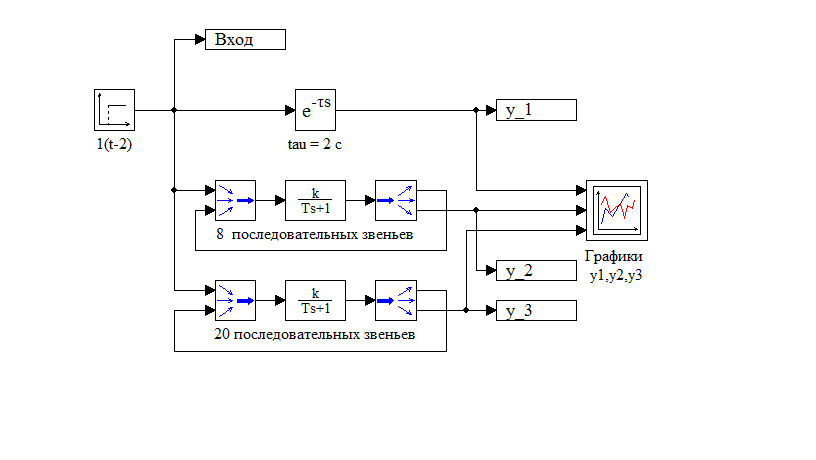
где – изображение по Лапласу сигнала на выходе из трубопровода;   
 – изображение по Лапласу сигнала на входе в трубопровода;  
– постоянная запаздывания (время транспортировки).

Часто передаточную функцию идеального запаздывающего звена аппроксимируют типовыми линейными звеньями, например, цепью из *n* последовательно соединенных апериодических звеньев 1-го порядка:

(1.3)

В учебной литературе нередко утверждается, что если *n*  6…8, то этого достаточно для аппроксимации передаточной функции идеального запаздывающего звена. Покажем, что это не совсем так.

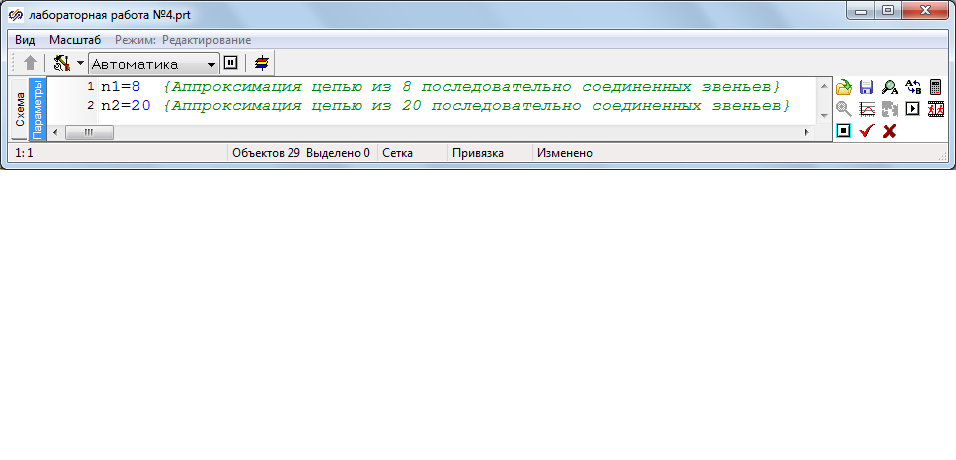
Используя полученный в прошлом семестре опыт работы в SimInTech, сформируйте “с чистого схемного окна” структурную схему, подобную рис. 1.1.



**Рис 1.1**

На 1-ом этапе перенесите из *“Линейки” типовых блоков* в Схемное окно необходимые блоки, расположите их на требуемые места и соедините линиями связи.

Второй этап требует пояснений. Главная особенность структурной схемы на рис. 1.1. – использование векторизованной обработки и передачи данных.   
Переместите курсор на кнопку **Параметры макроблока** в *Дополнительной панели инструментов* и выполните щелчок левой клавишей “мыши”: откроется окно **Редактора глобальных параметров Проекта (Субмодели)**. Введите с клавиатуры текст, идентичный приведенному на рис. 1.2 (**n1=8; n2=20;**). Числа **n1** и **n2** задают количество последовательно соединенных апериодических звеньев 1-го порядка в двух параллельных цепях, аппроксимирующих свойства идеального запаздывающего звена. Закройте окно **Редактора**.



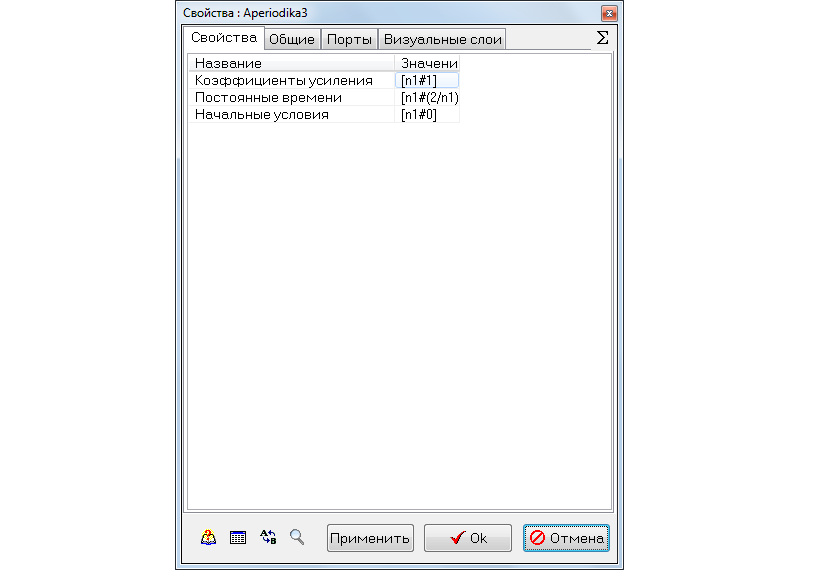
**Рис. 1.2**

Откройте диалоговое окно блока *Ступенька* и введите в диалоговой строке параметры смещенного ступенчатого воздействия: **Время срабатывания 2, Начальное состоянияние 0, Конечное состояние 1** . Введенное означает, что через **2** с после начала моделирования сигнал на выходе блока скачком изменится с **0** (нуля) до **1** (единицы).

Откройте диалоговое окно блока *Идеальное запаздывание* и введите в 1-ой строке число **2** (два), что означает что данный блок реализует постоянное запаздывание **2** с.

Число введенное во второй диалоговой строке задает начальный размер стека данных, в который будут записываться данные на входе блока после каждого шага интегрирования. Если стек заполнится полностью, то он будет увеличен до 1200, если снова заполнится – до 1400 и т.д. Выходной сигнал определяется линейной интерполяцией значений в стеке данных. Оставьте начальный размер стека (по умолчанию).

Откройте диалоговое окно верхнего блока Апериодическое звено 1-го порядка (*8 последовательных звеньев*) и заполните его так же, как это выполнено на рис. 1.3.



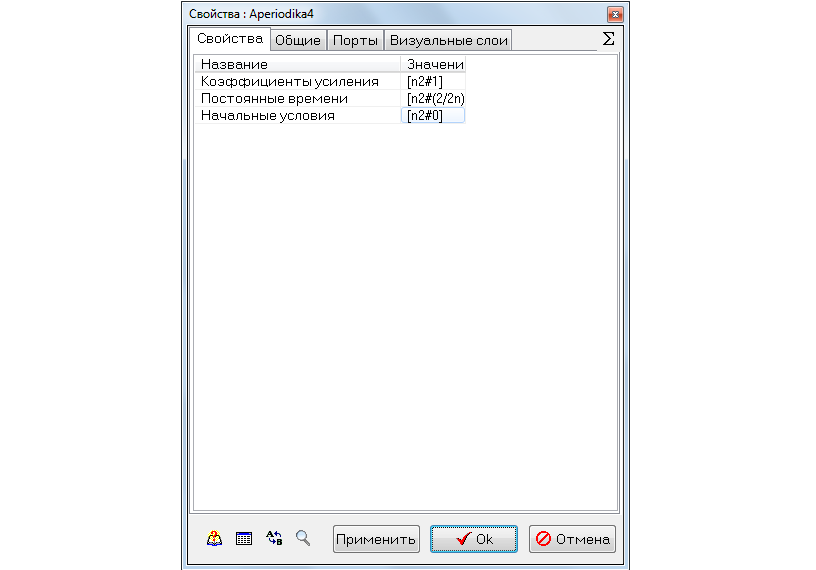
**Рис. 1.3**

В 1-ой диалоговой строке (*Коэффициент усиления*) введено **n1#1**. Это означает, что в данной строке введен числовой вектор из **n1** (8) **единиц** (1). Можно было ввести данную строку и так: **1 1 1 1 1 1 1 1** (через пробел). Символ # в диалоговых строках эквивалентен предлогу “**по**” ==> **n1** -элементов **по** **1**.

В последней диалоговой строке (*Вектор начальных условий*) аналогичным образом задан вектор из **n1** (восьми) **нулей**.

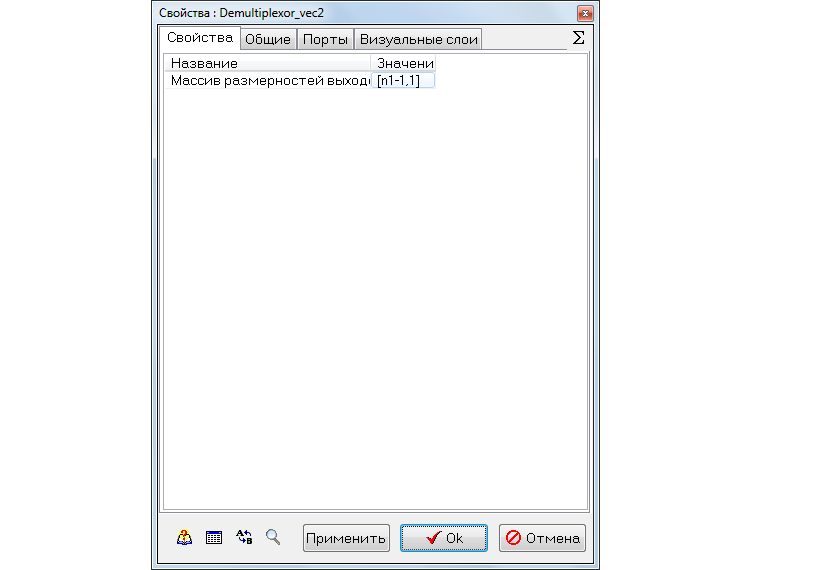
В средней (во 2-ой) диалоговой строке задан вектор из **n1** (восьми) одинаковых постоянных времени, равных **2/n1** = 2/8 = 0.25 c.

По аналогии с предыдущим заполните диалоговое окно для другого блока Апериодическое звено 1-го порядка (см. рис. 1.4 ниже по тексту). Очевидно, что данный блок предназначен для аппроксимации идеального запаздывающего звена цепью из 20-ти последовательно соединенных апериодических звеньев 1-го порядка



**Рис. 1.4**

Откройте диалоговое окно блока Демультиплексор и заполните его, как это выполнено на рис. 1.5



**Рис. 1.5**

Прокомментируем введенные параметры в последних двух блоках.

Поскольку алгоритм работы верхнего блока *Апериодическое звено 1-го порядка* (см. рис. 1.3) – векторизован, то на вход блока должен поступать векторный сигнал, размерностью **n1** (8).

Векторный сигнал, поступающий на 2-ой (нижний) порт блока *Мультиплексор* сформирован из (**n1-1**) на 1-ом выходном порте блока *Демультиплексор* (см. рис. 1.1).

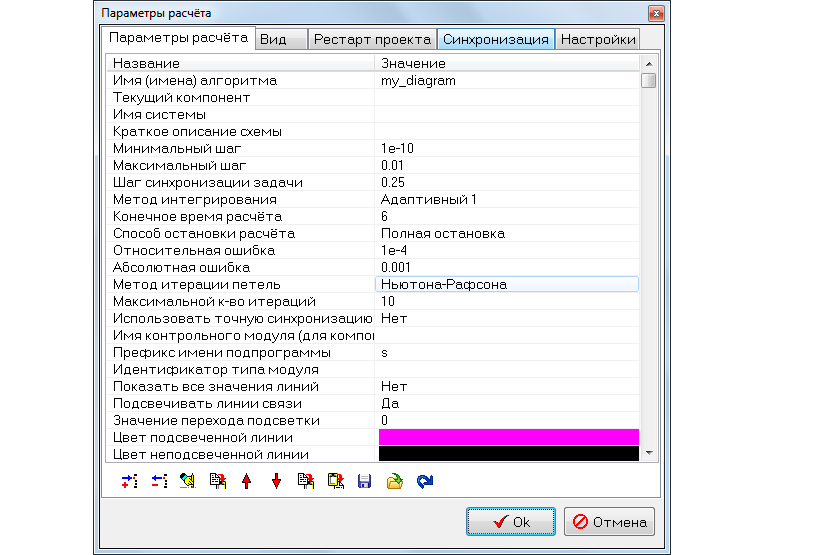
Фактически реализован сдвиг “жил” сигналов. Рассмотрим реализацию сдвига, “отталкиваясь” от сигнала блока Ступенька.

Сигнал от блока ступенька поступает на 1-ю “жилу” входного порта ==> далее “проход” через *Апериодическое звено* ==> далее сигнал 1-ой выходной “жилы” *Демультиплексора* подается на 2-ую входную “жилу” *Мультиплексора* ==> далее “проход” через *Апериодическое звено* ==> далее сигнал 2-ой выходной “жилы” *Демультиплексора* подается на 3-ю входную “жилу” *Мультиплексора* и т.д.   
В итоге на втором выходном порте блока *Демультиплексор* будет сигнал, который **n1**-раз “прошел” через *Апериодическое звено 1-го порядка*.

По аналогии с рис. 1.5 заполните диалоговые окна блоков *Демультиплексор* в цепи, аппроксимирующей звено идеального запаздывания 20-ю последовательно соединенными звеньями.

На этом формирование структурной схемы и ее параметров завершено.

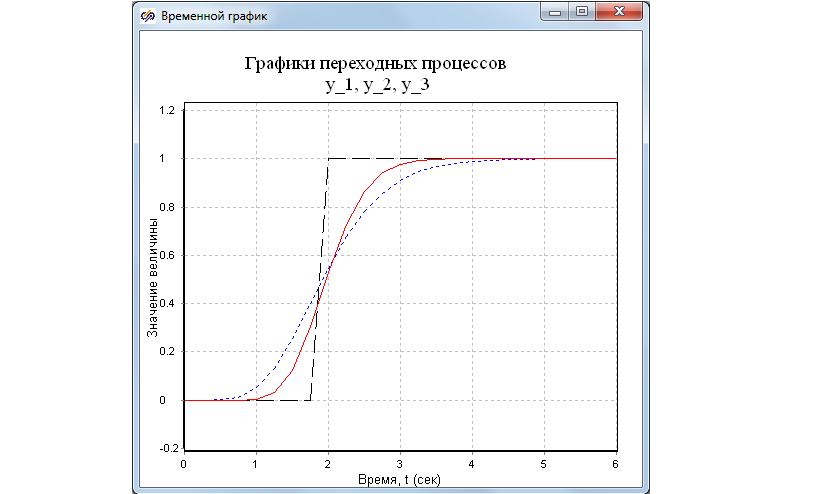
Переместите курсор на командную кнопку **Параметры расчета** и заполните диалоговое окно так же, как это выполнено на рис. 1.6.



**Рис. 1.6**

Заполнив окно **Параметры расчета**, закройте его щелчком “мыши” по   
кнопке **Да**.

Запустите задачу на счет. Мгновенно в графическом окне отобразятся результаты расчета. Используя процедуры редактирования графического окна, придайте ему вид, близкий рис. 1.7, где линии: пунктирная – цепь из 8 блоков, сплошная – из 20 блоков.



**Рис. 1.7**

Сравнение графиков переходных процессов показывает, что даже при аппроксимации блока *Идеальное запаздывание* цепью из 20-ти последовательно соединенных звеньев “фронт” скачка существенно “размыт”, а при аппроксимации цепью из 8-ми блоков – тем более.

**Резюме**: сравнение данных результатов расчета переходных показало, что вышеупомянутое утверждение о достаточности для аппроксимации цепи из 6…8 последовательно соединенных *Апериодических звеньев 1-го порядка* является фактически некорректным для входных воздействий типа “ступенька”.  
Дополним сравнение динамических свойств “классического” *Идеального запаздывающего звена* и его “аппроксиматоров” сопоставлением амплитудно-фазовых частотных характеристик.

На структурной схеме (см. рис. 1.1) блоки *В память* используются для указания точки входа и точек выхода при расчете частотных характеристик.

Поскольку Вы изучили процедуры работы в режиме АНАЛИЗ, подробных инструкций не ждите.

Вы должны самостоятельно и *правильно* выполнить расчет амплитудно-фазовых частотных характеристик для сопоставляемых звеньев.

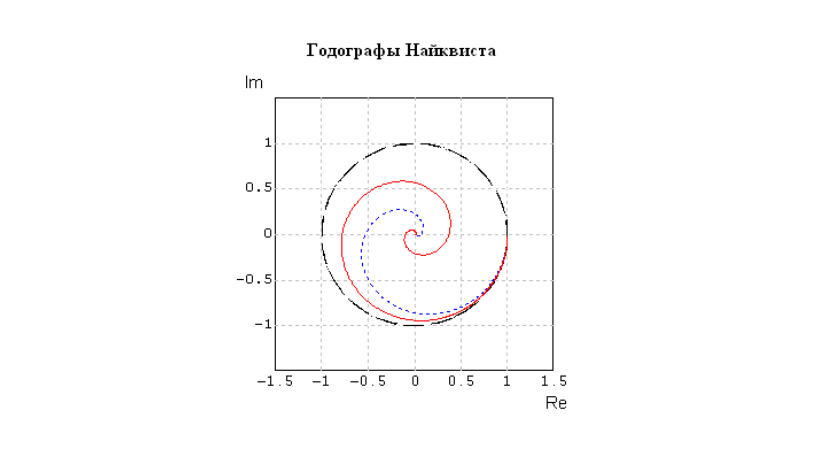
На рис. 1.8…рис. 1.10 (в качестве “эталона” для Ваших графиков) приведено сравнение годографов АФЧХ (годографов Найквиста), фазовых частотных характеристик (ФЧХ) и логарифмических амплитудных характеристик (ЛАХ), соответственно. Штриховыми линиями представлены характеристики *Идеального запаздывающего звена*, пунктирными линиями – для цепи из 8 звеньев, и сплошной линией – для цепи из 20 блоков.

Выполните оформление Ваших графиков подобно рис. 1.8…рис. 1.10.

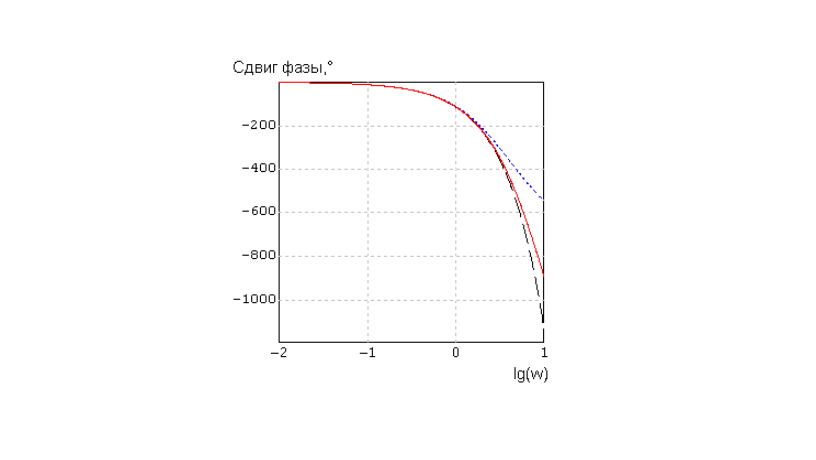
Анализ графиков частотных характеристик показывает, что в области низких частот (менее 1.0 с -1) аппроксимирующие цепи близки к *Идеальному запаздывающему звену.*

При высокочастотных входных воздействиях аппроксимирующие цепи дают меньшее значение фазового сдвига и существенно резкое ослабление по амплитуде.

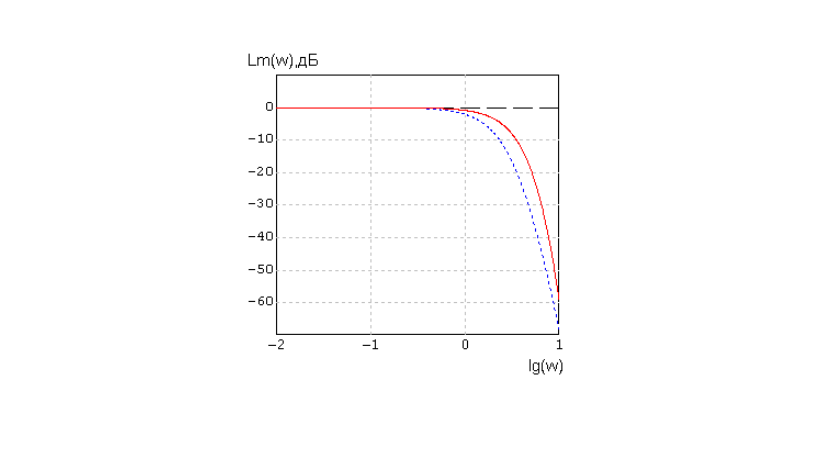
**Резюме**: вышеприведенное утверждение о достаточности для аппроксимации цепи из 6…8 последовательно соединенных Апериодических звеньев 1-го порядка является относительно корректным только для медленно изменяющихся входных воздействий.



**Рис. 1.8**



**Рис. 1.9**



**Рис. 1.10**

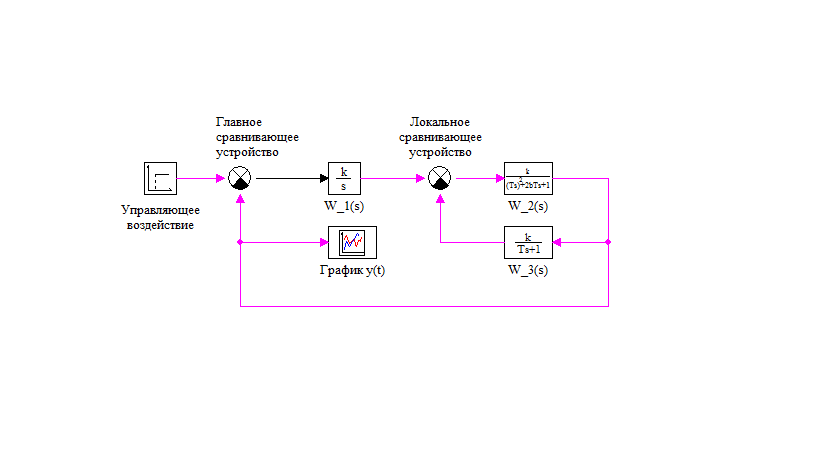
## 1.2 Определение устойчивости линейных систем с запаздыванием

В прошлом семестре изучение основных процедур работы в SimInTech Вы проводили в рамках демонстрационно-ознакомительной задачи, в которой структурная схема САР имела вид, близкий рис. 1.12.

Объект управления с передаточной функцией *W2* (s), соответствовал типовому звену (колебательному) с параметрами: *k2* = 1.0; *T2* = 1 c; параметр демпфирования *b* = 0.5; начальные условия - нулевые.

Местная обратная связь с передаточной функцией *W3* (s), соответствовала типовому звену - апериодическому 1-го порядка с параметрами: *k3* = 0.6; *T3* = 5 c.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА САР



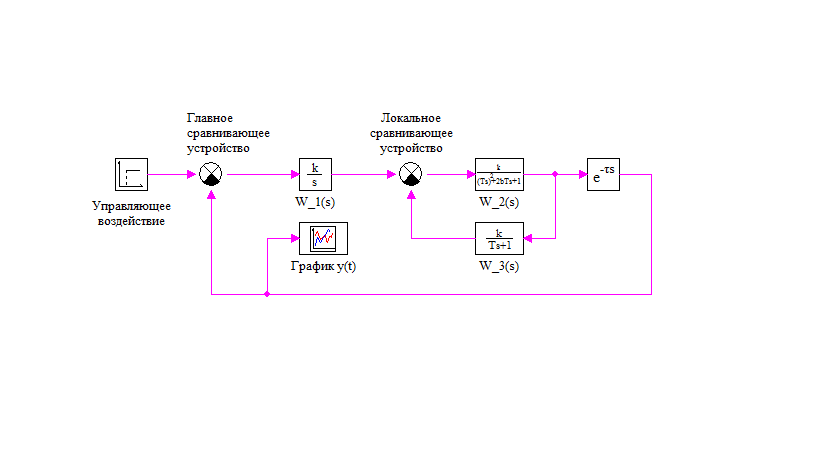
**Рис. 1.11**

Локальное сравнивающее устройство обеспечивало отрицательную обратную связь, т.е. “работало” в режиме обычного вычитания.

В ходе выполнения ознакомительной задачи Вы подобрали коэффициент усиления *k1* интегрирующего регулятора (*W1*(s)) таким образом, что при подаче ступенчатого управляющего воздействия *u(t)* = 0.8 **1**(t) перерегулирование отсутствовало (т.е. *ymax* <= 0.8) и время переходного процесса не превышало 20 с. Значение коэффициента усиления *k1* интегрирующего регулятора оказалось равным **0.35.**

В настоящей лабораторной работе Вам предстоит скорректировать структурную схему САР, добавив в “прямую” цепь *Идеальное запаздывающее звено*.

Структурная схема скорректированной САР должна иметь вид, близкий   
рис. 1.12.



**Рис. 1.12**

Этапы, которые Вы должны выполнить:

1. Вы должны фактически снова сформировать математическую модель динамики “знакомой” САР (с найденным ранее “оптимальным” значением   
   *k1* = 0.35).
2. Определить критическое значение постоянной запаздывания t *крит* в *Идеальном запаздывающем звене.*
3. Варьируя постоянную запаздывания в *Идеальном запаздывающем звене* в пределах 0.1\*t*крит* …0.9\*t*крит* (4 значения) выполнить моделирование переходных процессов.
4. Выполнить анализ полученных результатов.

## 1.3 Блок *Переменное транспортное запаздывание*

Блок *Идеальное запаздывающее звено* является простейшим и описывает динамику трубопровода только при постоянном расходе теплоносителя. На самом деле расход теплоносителя в теплогидравлических контурах энергетических установок в переходных режимах, в основном, является переменным во времени.

Поэтому в SimInTech реализован блок *Переменное транспортное запаздывание*, математическая модель динамики которого описывается уравнением

(1.4) и основана на допущении о постоянстве линейной скорости переноса распадающейся субстанции в пределах участка для каждого момента времени при граничных условиях и начальных условиях .   
В уравнении (1.4) *y(t)* – переносимая скалярная субстанция, *u(t)* – скорость переноса, *L* – длина участка переноса скалярной субстанции, *z* – пространственная (продольная) координата.

После ввода безразмерной пространственной координаты и мгновенного времени переноса скалярной субстанции в пределах участка уравнение записывается как

, (1.5)

а начальные условия принимают вид .

Вводя дополнительное дифференциальное уравнение для *новой* переменной 

дифференциальное уравнение (1.5) принимает вид:

(1.6)

Используя преобразование Лапласа, получаем решение в виде уравнения 1.7:

где сомножитель описывает составляющую, обусловленную *только* *транспортным запаздыванием*, а сомножитель описывает ослабление выходного сигнала блока, обусловленное *только распадом* субстанции за время ее пребывания в пределах участка транспортного запаздывания. При расчете используется запоминание текущих значений в стековой таблице (см. табл. 1) и последующая обработка табличных данных.

**Таблица 1**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Индекс записи | Модельное время t | θ(t) |  |  |  |
| 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 1 |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |
| … | … | … | … |  | … |
| J |  |  |  |  |  |
| … | … | … | … |  | … |
| k-1 |  |  |  |  |  |
| k |  |  |  |  |  |
| k+1 |  |  |  |  |  |
| … | … | … | … | … | … |
| m |  |  |  |  |  |
| … | … | … | … | … | … |

При значение , а при значение определяется с использованием данных табл. 1 по алгоритму . Последняя процедура (вычисление ) проводится с использованием линейной интерполяции данных табл. 1.

Расчет фактического времени запаздывания в блоке *Переменное транспортное запаздывание* при проводится следующим образом:

* при значение;
* при значение вычисляется по соотношению:

. (1.8)

* при значение определяется с использованием алгоритма причем вычисление проводится с использованием линейной интерполяции данных табл. 1.

Блок *Переменное транспортное запаздывание*, включенный в библиотеку ***Нелинейные***звенья, векторизован и имеет 2 входных и 2 выходных порта.

На 1-ый входной порт подается сигнал, соответствующий значению скалярной субстанции на входе в участок транспортировки. На 2-ой входной порт подается сигнал, соответствующий значению *мгновенного* времени переноса скалярной субстанции в пределах участка транспортировки.

На 1-ом выходном порте формируется сигнал, соответствующий значению скалярной субстанции на выходе из участка транспортировки. На 2-ом выходном порте формируется сигнал, соответствующий значению времени пребывания “метки” скалярной субстанции в пределах участка транспортировки.

Блок Переменное транспортное запаздывание имеет 2 диалоговые строки. Для работы блока необходимо задать:

* в 1-ой диалоговой строке - вектор постоянных распада в секундах;
* во 2-ой диалоговой строке – начальный размер стека.

По умолчанию блок Переменное транспортное запаздывание реализует алгоритм преобразования скалярного входного сигнала для нераспадающейся скалярной субстанции ().

Если значение *мгновенного* времени переноса скалярной субстанции в пределах участка транспортировки постоянно, то данный блок реализует математическую модель блока *Идеальное запаздывающее звено*.

С другой стороны, если задать в *Идеальном запаздывающем звене* значение времени запаздывания через *механизм Глобальных параметров*, то это звено может реализовать математическую модель блока *Переменное транспортное запаздывание*.

Проверим вышеприведенные утверждения. Для этого создайте новый проект и перенесите в Главное Схемное окно: из библиотеки ***Источники*** блоки *Синусоида* и *Произвольное кусочно-линейное воздействие*; из библиотеки ***Динамические*** *звенья* блок *Идеальное запаздывающее звено*; из библиотеки ***Динамические*** *звенья* блок *Переменное транспортное запаздывание*; из библиотеки ***Субструктуры*** блок *Y  U*; из библиотеки ***Данные*** блок *Временной график*.

Переместите курсор “мыши” в свободное место Схемного окна и выполните щелчок *правой* клавишей: откроется *Дополнительное командное меню* Схемного окна, в котором необходимо выбрать опцию *Внешние сигналы* (рис. 1.13). Далее переместите курсор на верхнюю кнопку со стрелкой в правой части диалогового окна **Входные сигналы модели** и выполните щелчок *левой* клавишей “мыши”: появится таблица, в первой колонке которой - номер строки (**1**), во второй колонке – *Имя сигнала* (**U1**), а в третьей колонке – *Значение по умолчанию* (**0**). Скорректируйте *Значение по умолчанию* и введите **2** (см. рис. 1.13).

< вставить рисунок>

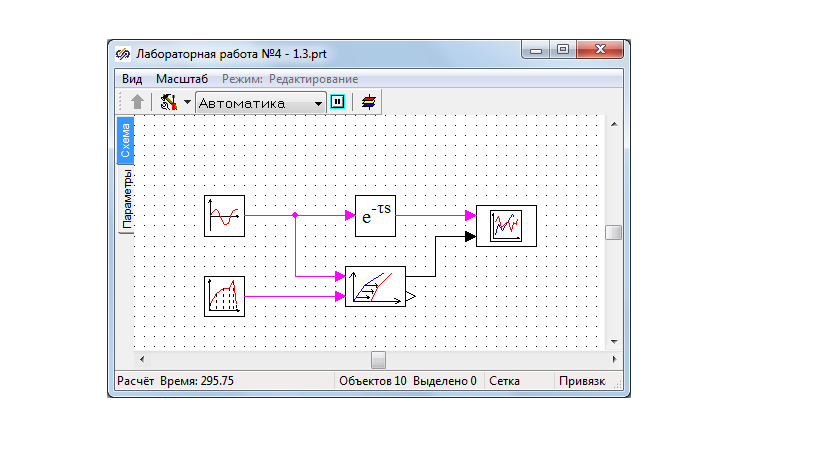
Закройте это диалоговое окно, выполнив щелчок “мышью” по кнопке **Да**.   
   Переместите курсор на блок *Y  U* и откройте его диалоговое окно 2-х кратным щелчком “мыши”. Использую крайнюю левую кнопку (со стрелкой вниз) в средней части диалогового окна (рис. 1.15) переместите **U1** в ***Список-приемник*** и далее щелчком “мыши” по кнопке **Да** закройте диалоговое окно: у блока появился *Входной порт*. Соедините блоки линиями связи, как это выполнено на рис. 1.15.

< вставить рисунок>

Откройте окно **Редактора Глобальных параметров Проекта…** и введите с клавиатуры: **tau=U1.** Закройте окно **Редактора…**

Откройте диалоговое окно блока *Синусоида* и введите (через пробел) значение амплитуды (**1**), частоты (**0.5**) и сдвига фазы (**0**). Закройте это диалоговое окно.

Откройте диалоговое окно блока *Произвольное кусочно-линейное воздействие* и введите в первой строке (через пробел) **0 5 10 20 25 40**, а во второй диалоговой строке (также через пробел) **2 2 5 5 2 2**. Закройте это диалоговое окно.



**Рис. 1.15**

# 2 САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ САР ЯР, ЗАДАННОЙ В ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ И В ФОРМЕ КОШИ