

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МИСИС»  
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра электроэнергетики и электротехники

**Р.Е. Мажирина**

# **ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Практикум  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,  
всех форм обучения

Новотроицк, 2023

УДК 681.5(07)  
ББК 32.965 я 7  
М 12

**Рецензенты:**

Зам. директора по инновациям и развитию Новотроицкого филиала  
ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС», к.т.н., доцент

**А.Н. Шаповалов**

Доцент кафедры Электропривод, мехатроника и электромеханика ФГАОУ ВО  
«Южно-уральский государственный университет (НИУ)» к.т.н., доцент

**К.В. Лицин**

Мажирина Р. Е. Теория автоматического управления: практикум для направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСИС», 2023. – 49 с.

В практикуме рассмотрены примеры решения задач по исследованию типовых звеньев и линейных систем автоматического управления. Примеры даны с использованием моделирования в программе SimInTech.

Пособие предназначено обучающимся технических направлений подготовки в вузе.

Методические указания составлены в соответствии с требованиями образовательного стандарта НИТУ «МИСИС» по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

*Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСИС»*

© ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСИС»  
Новотроицкий филиал, 2023

## Содержание

Введение.....	4
1 Начальные сведения о SimInTech .....	5
2 Характеристики типовых звеньев автоматических систем.....	7
3 Исследование линейных систем автоматического управления .....	36
Глоссарий .....	47
Список использованных источников .....	48

## Введение

Дисциплина «Теория автоматического управления» создает теоретический базис таких профессиональных дисциплин как «Компьютерное моделирование электроприводов», «Системы управления электроприводами». Дисциплине «Теория автоматического управления» предшествует изучение таких дисциплин как «Математика», «Информатика».

Дисциплина включена в базовую часть подготовки бакалавров на третьем курсе очной формы обучения по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Пособие включает в себя три раздела.

В первой части рассматриваются начальные сведения о программной платформе SimInTech, на основе которой решены типовые задачи по теории автоматического управления.

Во второй части приведены примеры проведения исследований типовых динамических звеньев.

В третьей части приведены задачи на изучение систем автоматического управления с использованием регуляторов различного типа.

SimInTech – программная платформа для разработки математических моделей, алгоритмов управления, мнемосхем и видеокадров, обладающая возможностью автоматической генерации кода для программируемых контроллеров. SimInTech относится к отечественным программным продуктам (реестровая запись №2379 от 15.12.2016).

Пособие содержит большое количество иллюстраций, позволяющих научиться работать в программе SimInTech. Необходимо отметить, что на рисунках надписи красным цветом, выполнены в графическом редакторе Visio.

## 1 Начальные сведения о SimInTech

Программное обеспечение SimInTech является модульным программным обеспечением, в составе которого есть несколько математических ядер, база данных, графическая среда разработки и другие модули.

Из несомненных положительных программно обеспечения SimInTech является совместимость с операционной системой Linux, русскоязычность и самой программы и справочного сопровождения, то есть программный продукт является полноценной заменой MATLAB.

В SimInTech возможна разработка как простых моделей, подробно описывающих поведение какой-либо системы (например, аperiodическое звено или колебательное), так и сложных моделей.

При открытии программы на экране появится окно SimInTech, представленное на рисунке 1.

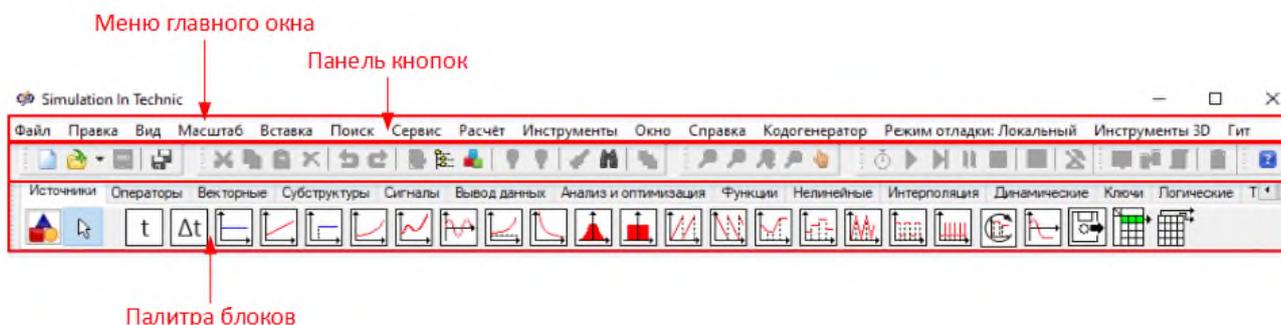


Рисунок 1 – Главное окно программы SimInTech

**Меню главного окна** – позволяет производить настройку программы под нужды пользователя, управлять созданием, редактированием и расчетом разработанных моделей, настройки параметров отображения главного окна и пр.

**Панель кнопок** – настраиваемая область с набором кнопок, отвечающих за ряд часто используемых команд. Содержащиеся на данной панели кнопки разбиты по группам в соответствии с выполняемыми функциями.

**Палитра блоков** – набор блоков, который используется для разработки расчетных схем в текущем активном шаблоне.

Окно при открытии нового проекта представлено на рисунке 2.

Управление окном проекта осуществляется при помощи таких инструментов как полосы прокрутки, строка состояния, дерево проекта; окно сообщений, различные закладки, панели инструментов.

Более подробную информацию по окнам, блокам можно посмотреть на сайте <https://help.simintech.ru/>.

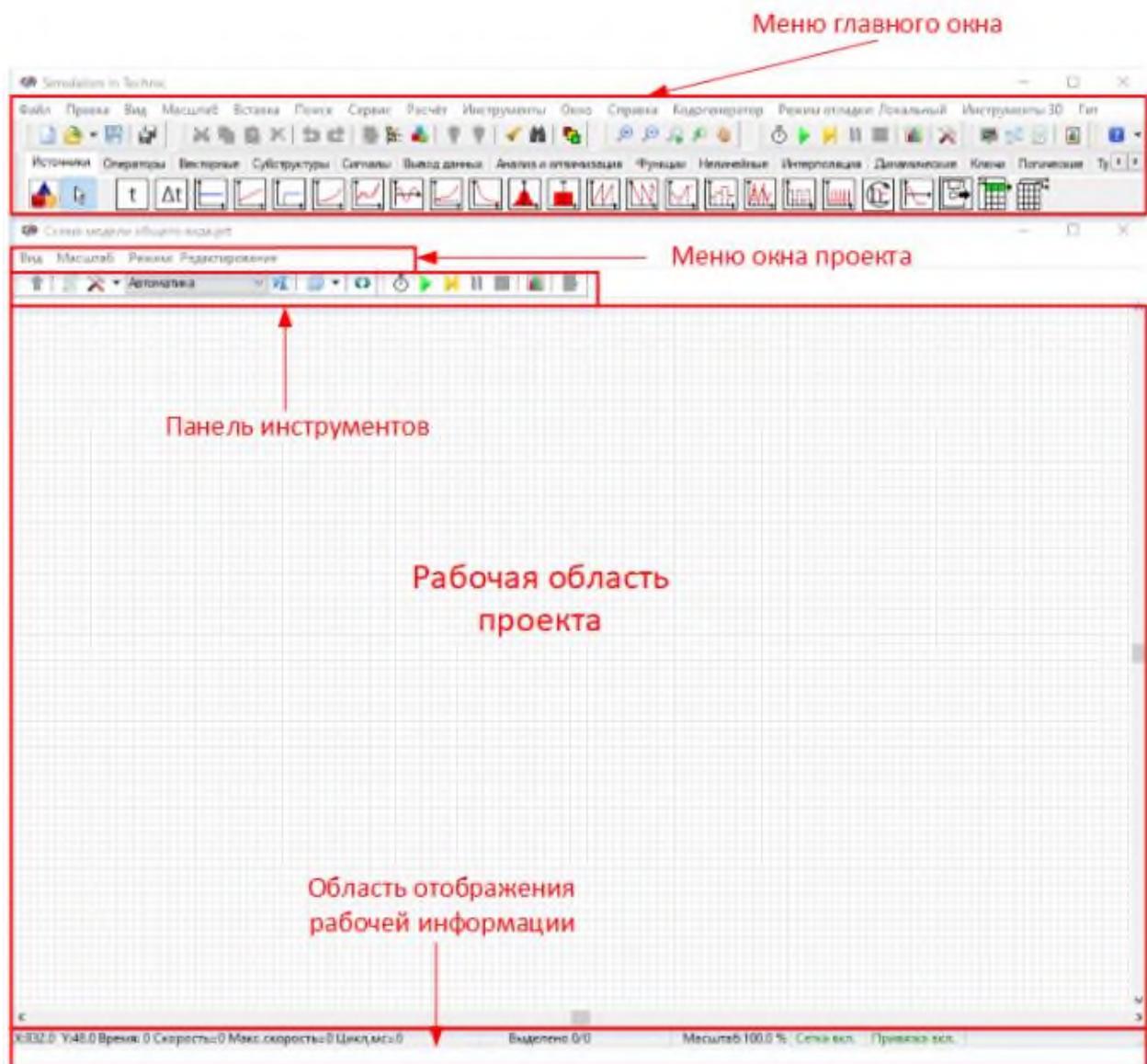


Рисунок 2 – Области окна нового проекта

В практикуме необходимо отметить, что надписи на рисунках, графиках красным цветом красным цветом, выполнены в графическом редакторе Visio.

## 2 Характеристики типовых звеньев автоматических систем

### Задача 1

Исследовать апериодическое звено с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{1,5}{0,3 \cdot s + 1}, \text{ построив динамические и частотные характеристики.}$$

### Решение:

Первоначально необходимо определиться с параметрами расчета. Это возможно при нажатии соответствующей кнопки в главном окне проекта, либо в главном меню программы «Расчет».

Название	Имя	Формула	Значение
Основные параметры			
Минимальный шаг	hmin		0.001
Максимальный шаг	hmax		0.001
Начальный шаг интегрирован...	startstep		0
Метод интегрирования	intmet		Эйлера
Начальное время расчёта	starttime		0
Конечное время расчёта	endtime		5
Относительная ошибка	relerr		0.0001
Абсолютная ошибка	abserr		1E-6
Относительная ошибка сравн...	time_rel_e...		1E-12
Начальное значение неиници...	InitOutputs...		0
Генерация кода			
Управление расчётом			
Настройки решения НАУ			
Визуализация данных			
Удалённая отладка кода			

Рисунок 3 – Окно «Параметры расчета» к задаче 1

Параметры расчета представлены в виде таблицы, в столбцах которой для каждого параметра указаны:

**Название** – название параметра (его краткое описание);

**Имя** – имя, является уникальным именем параметра на английском языке, которое можно использовать при наборе схемы и в процессе расчета, в том числе при создании собственных программ на встроенном языке программирования.

**Формула**- поле для задания произвольного интерпретируемого выраже-

ния, в котором могут быть использованы имена других переменных в рамках всего проекта (ключая базу данных), а также функции языка программирования.

**Значение** – задаваемая пользователем величина или интерпретируемое выражение (строка) для определения значения данного параметра и настройки расчетного ядра.

В окне «**Параметры расчета**», представленном на рисунке 3, изменено конечное время расчета на значение 5 с. Это числовое значение включает задержку по времени в 1с в блоке входного ступенчатого воздействия и приблизительное времени переходного процесса в апериодическом звене  $t_{\text{ин}} = (4 \div 5) \cdot T = (4 \div 5) \cdot 0,3 = 1,2 \div 1,5$  с.

Схема исследования апериодического звена к задаче представлена на рисунке 4.

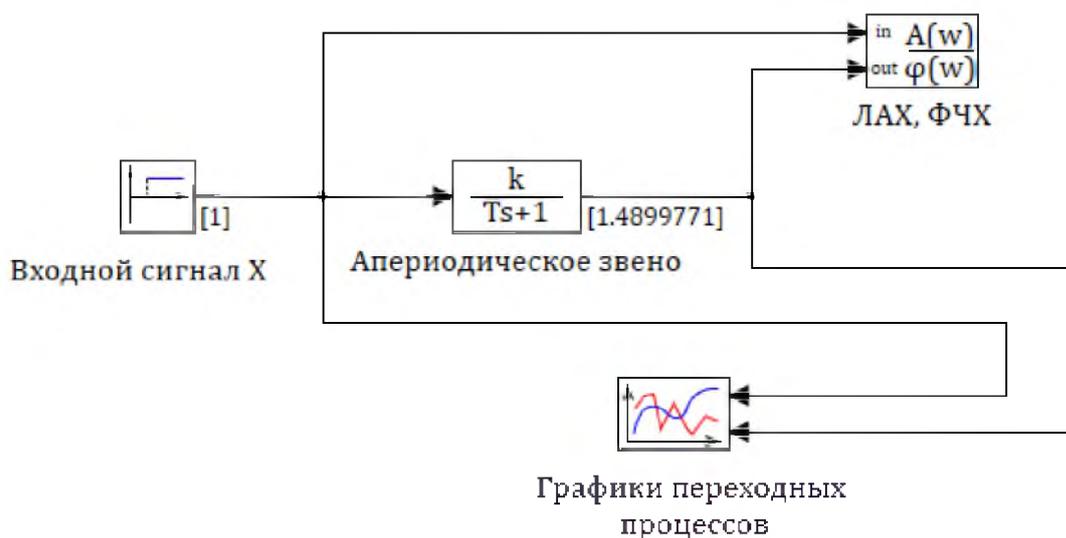


Рисунок 4 – Схема исследования апериодического звена

Входной сигнал задается блоком «**Ступенька**» со свойствами, представленными на рисунке 5.

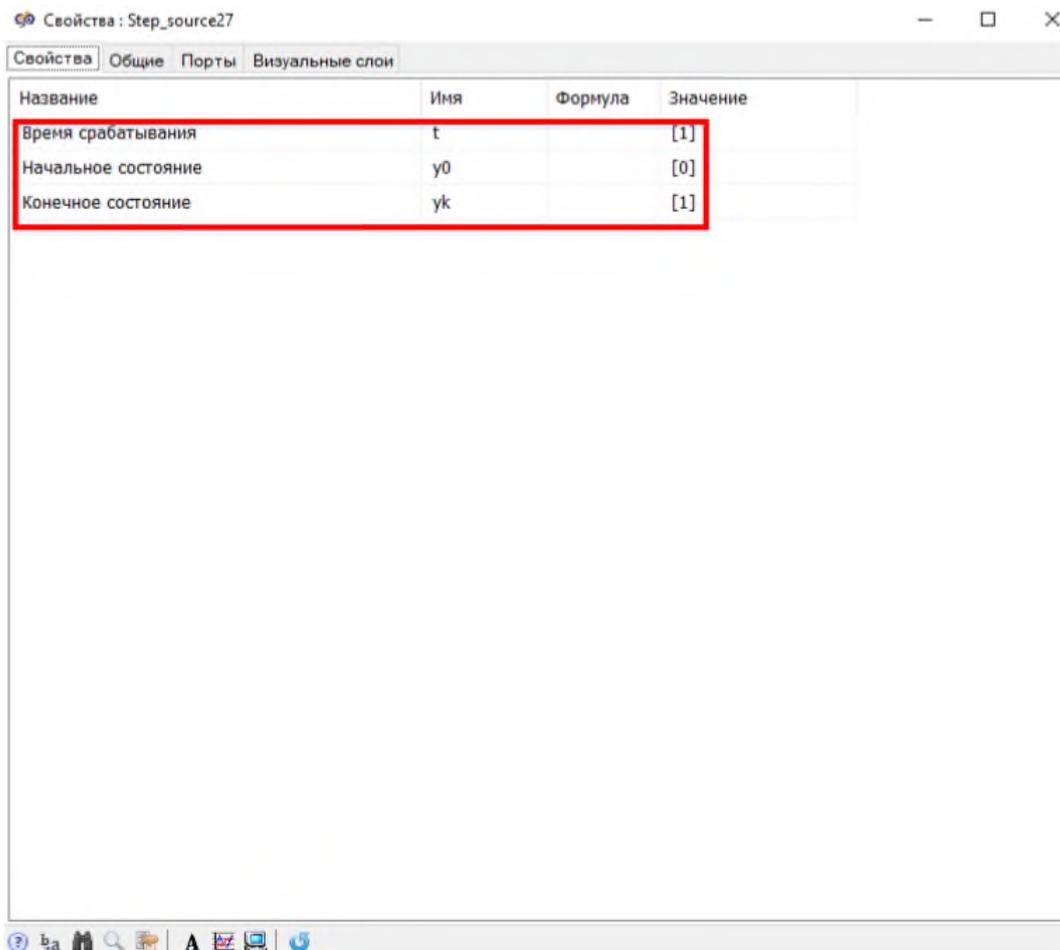


Рисунок 5 – Окно свойств блока «Входной сигнал X»

Апериодическое звено описывается дифференциальным уравнением вида:

$$T \frac{dy}{dt} + y = k \cdot x, \quad (1)$$

где  $T$  – постоянная времени звена, с;  
 $k$  – коэффициент усиления звена.

Выполнив преобразование по Лапласу, получим уравнение в операторной форме:

$$T \cdot y \cdot s + y = k \cdot x. \quad (2)$$

Преобразуем:

$$y \cdot (T \cdot s + 1) = k \cdot x. \quad (3)$$

Передаточная функция аperiодического звена получим:

$$W(s) = \frac{Y}{X} = \frac{k}{T \cdot s + 1}. \quad (4)$$

Апериодическое звено задается блоком «**Инерционное звено 1-го порядка**» со свойствами, представленными на рисунке 6.

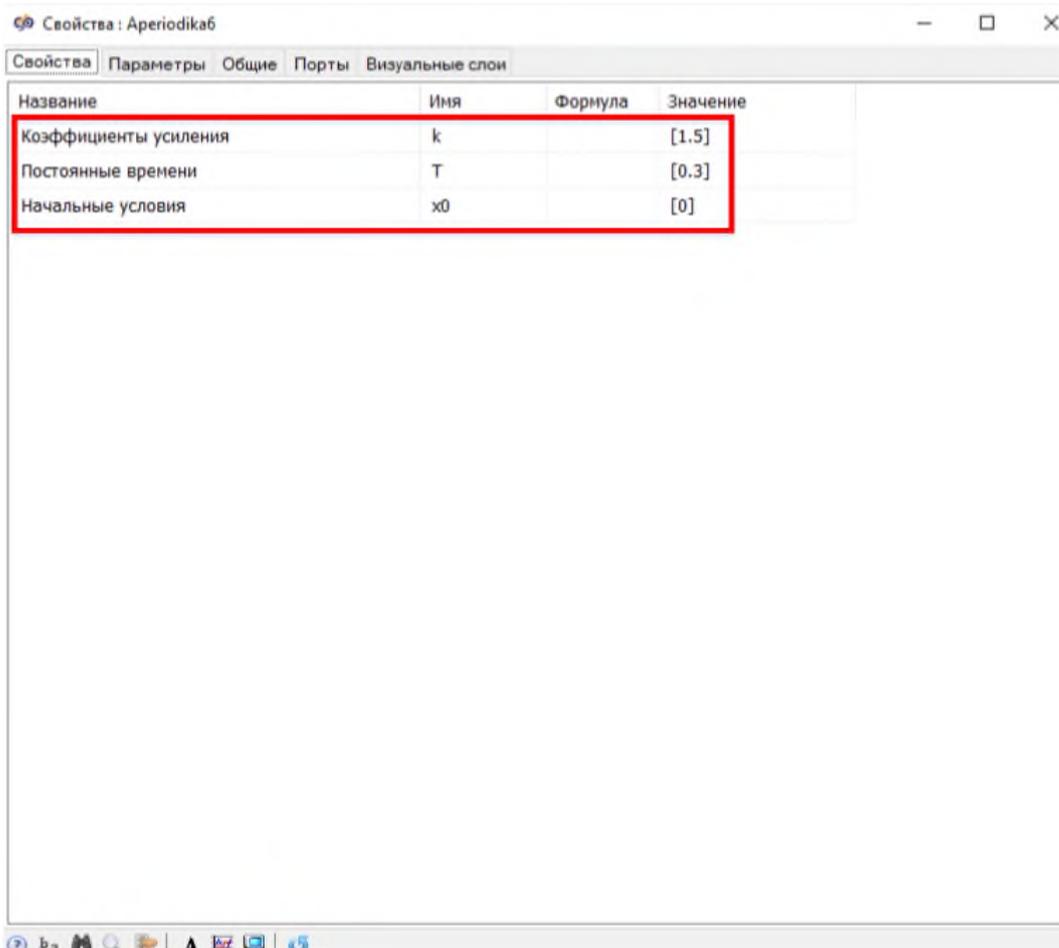


Рисунок 6 – Окно свойств блока «**Инерционное звено 1-го порядка**»

При помощи свойств блоку задаются начальные значения расчетных переменных, константы, а параметры отображают результат исполнения блока. По сути свойства – это входные сигналы блока, а параметры – выходные сигналы.

Для просмотра точных значений выходной координаты  $Y$  необходимо воспользоваться «**Табличным просмотром**». Для этого требуется нажать правую кнопку мыши на графиках переходных процессов и в пункте «**Анализ данных**» выбрать подпункт «**Табличный просмотр**».

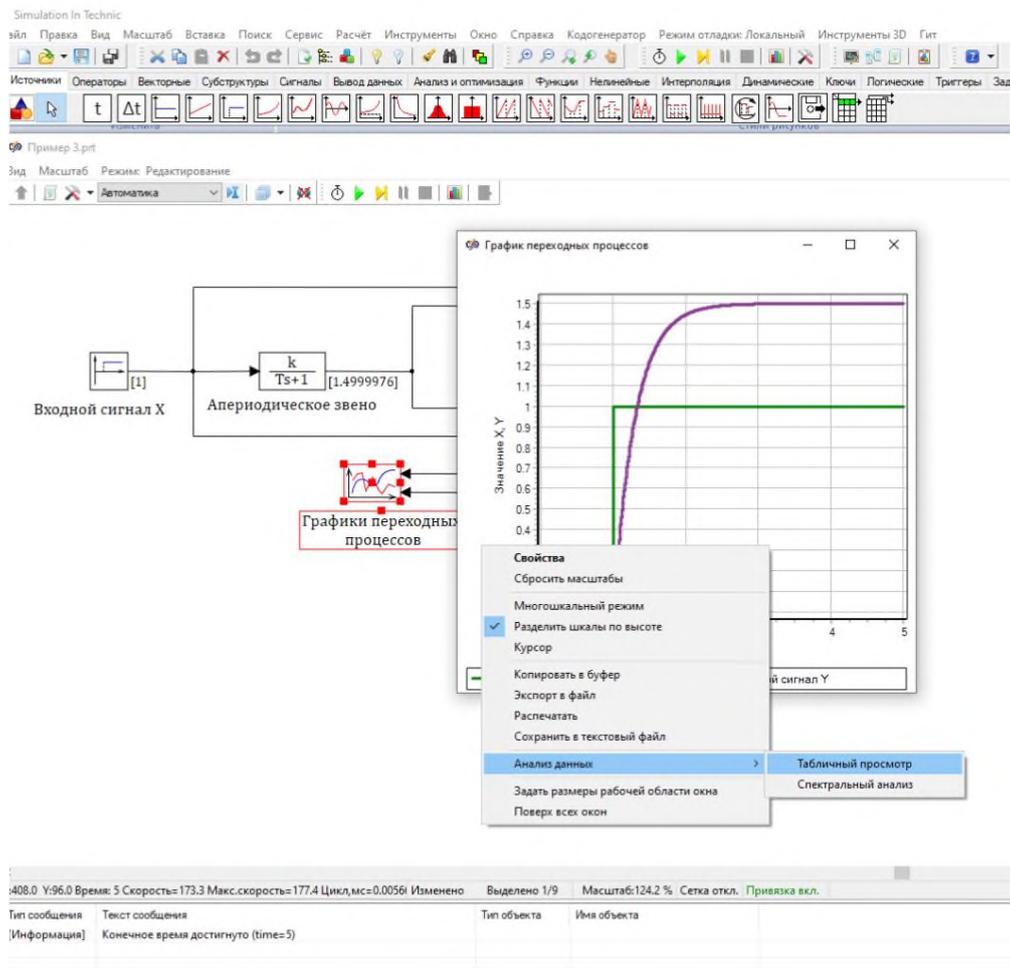


Рисунок 7 – Окно выбора «Табличного просмотра»

Табличный просмотр данных

Тип выборки данных: Сырые данные

N:	Входной сигнал X:X	Входной сигнал X:Y	Выходной сигнал Y:X	Выходной сигнал Y:Y
878			1.877	1.41976145766028
879			1.878	1.42002891946808
880			1.879	1.42029548973652
881			1.88	1.4205611714374
882			1.881	1.4208259675326
883			1.882	1.42108988097416
884			1.883	1.42135291470425
885			1.884	1.42161507165523
886			1.885	1.42187635474972
887			1.886	1.42213676690055
888			1.887	1.42239631101088
889			1.888	1.42265498997418
890			1.889	1.42291280667427
891			1.89	1.42316976398535
892			1.891	1.42342586477207
893			1.892	1.42368111188949
894			1.893	1.42393550818319
895			1.894	1.42418905648925
896			1.895	1.42444175963429
897			1.896	1.42469362043551
898			1.897	1.42494464170072
899			1.898	1.42519482622838
900			1.899	1.42544417680762
901			1.9	1.42569269621826

Рисунок 8 – Окно «Табличный просмотр данных»

Переходная функция представляет собой реакцию на выходе при подаче на вход единичного ступенчатого воздействия. В данном примере коэффициент усиления системы равен 1,5.

Время достижения  $Y_c = 0,95 \cdot Y_{уст} = 0,95 \cdot 1,5 = 1,425$  от установившегося значения  $t_{0,95} = 1,898$  с.

Общее время переходного процесса для апериодического звена составляет:

$$T_{пер} = (3 \div 4) \cdot T = (3 \div 4) \cdot 1,5 = 4,5 \div 6 \text{ с.} \quad (5)$$

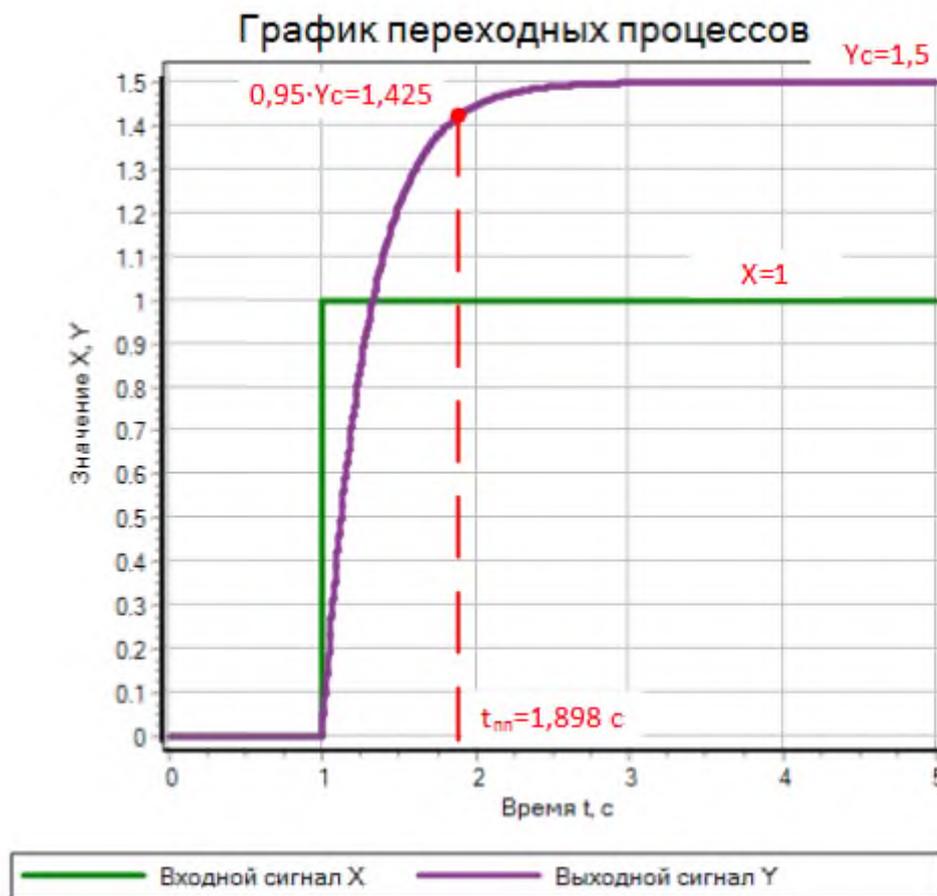


Рисунок 9 – Графики переходных процессов к задаче 1

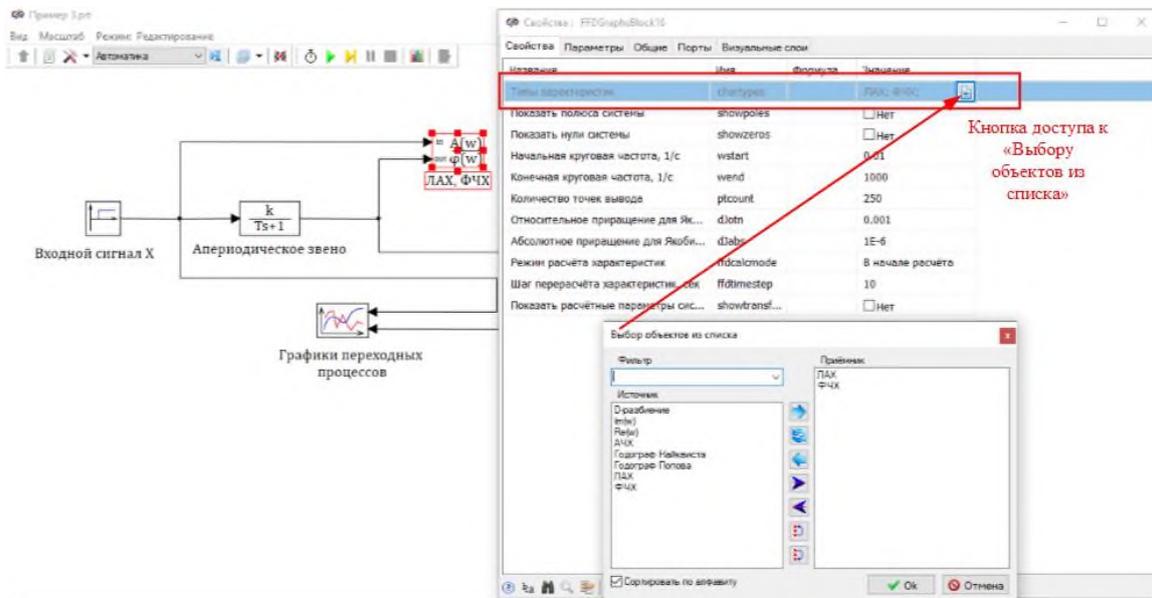


Рисунок 10 – Свойства блока «Построение частотных характеристик»

В открывшемся окне «Свойства графика» необходимо задать параметры согласно рисунку 11.

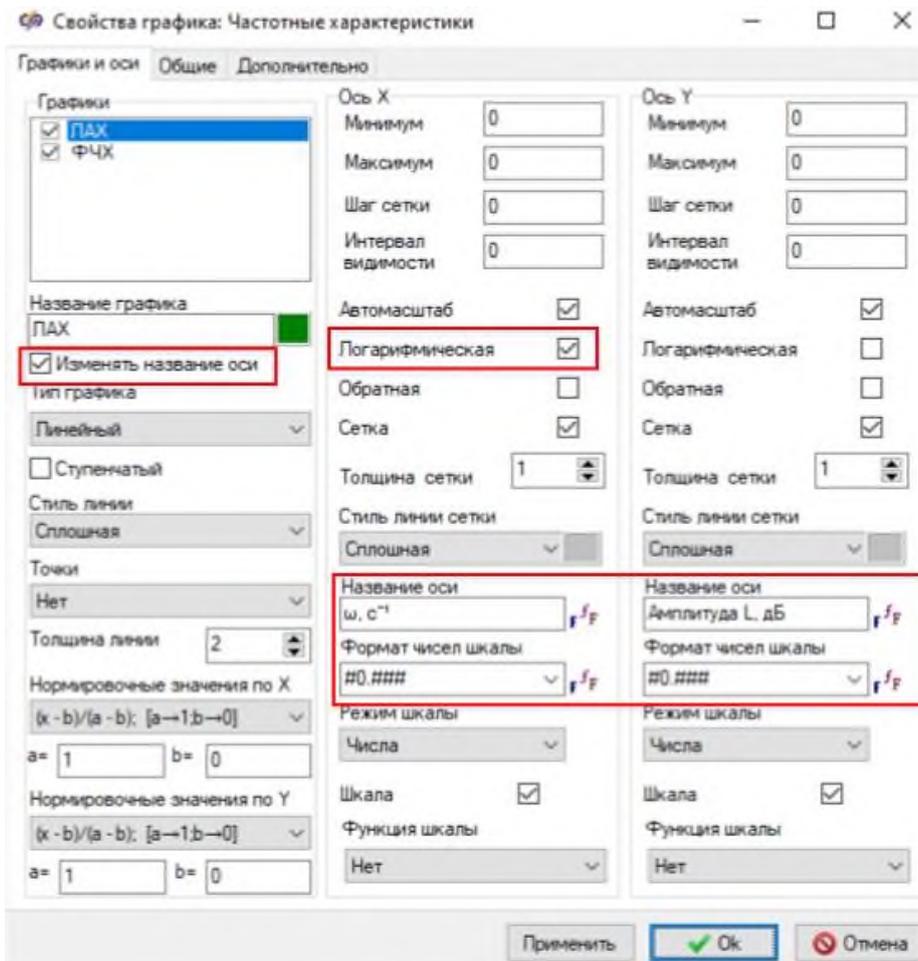


Рисунок 11 – Окно «Свойства графика» для построения ЛАХ и ФЧХ

При установке данных значений график примет вид согласно рисунку 12.

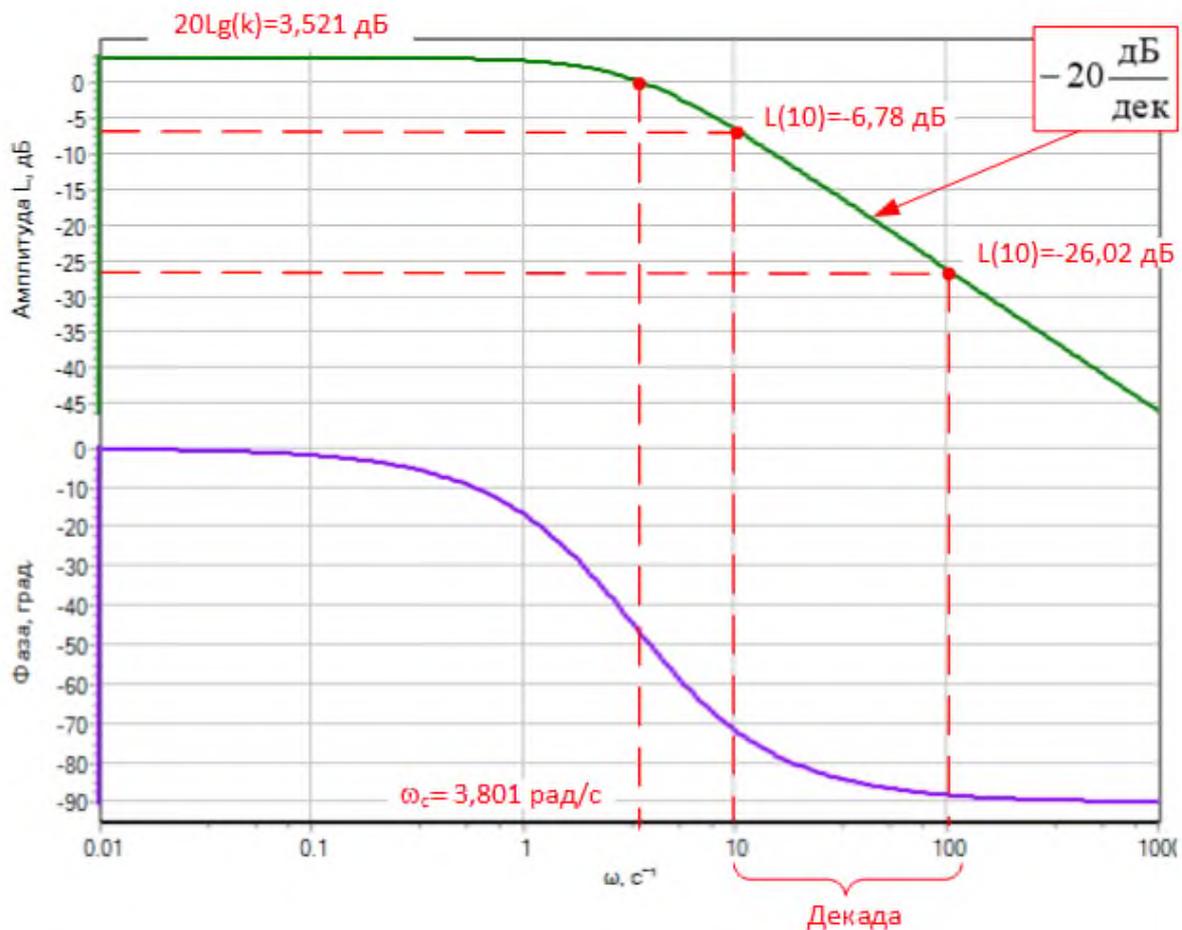


Рисунок 12 – Логарифмические амплитудные и фазовые характеристики к задаче 1

Частотные характеристики описывают установившиеся вынужденные колебания на выходе звена, вызванные гармоническим воздействием на входе.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) выражает отношение амплитуды колебаний на выходе звена к амплитуде колебаний на его входе в зависимости от частоты выходного сигнала.

Фазово-частотная характеристика (ФЧХ) выражает зависимость разности фаз между входными и выходными колебаниями звена от частоты входного сигнала. опережению фазы соответствует  $\varphi > 0$ , а отставанию  $\varphi < 0$ .

По оси ординат откладывается величина  $L(\omega)$  в децибелах. Изменение уровня сигнала на 10 дБ соответствует изменению его мощности в 10 раз. По оси абсцисс - частота  $\omega$  в логарифмическом масштабе. Единичным промежуткам по оси абсцисс соответствует изменение частоты в 10 раз. Такой интервал называется декадой.

ЛАЧХ аperiodического звена включает два участка горизонтальный, где можно коэффициенту усиления можно определить амплитудное значение

$$20 \cdot \lg(k) = 20 \cdot \lg(1,5) = 3,521 \text{ дБ}$$

и наклонный с наклоном

$$L(100) - L(10) = -26,02 - 6,78 = 19,24 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}.$$

Частота среза ЛАЧХ  $\omega_{\text{ср}} = 3,81$  рад/с.

ЛАЧХ представляет собой прямую, проходящую через точку  $L(\omega) = 0$  при  $\omega = 1$ , т.е. низкочастотная часть ЛАЧХ имеет нулевой наклон. При увеличении частоты на декаду ордината уменьшается на  $20 \cdot \lg 10 = 20$  дБ, то есть наклон ЛАЧХ соответствует наклону  $-20$  дБ/дек.

Логарифмическая фазо-частотная характеристика (ЛФЧХ) асимптотически стремится к нулю при уменьшении  $\omega$  до нуля (чем меньше частота, тем меньше искажения сигнала по фазе) и к  $-\frac{\omega}{2}$  при возрастании  $\omega$  до бесконечности. Перегиб ЛАЧХ происходит при  $\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{4} = 45^\circ$ .

### Задача 2

Исследовать колебательное звено с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \beta \cdot T \cdot s + 1}.$$

Данные к задаче:  $k = 8,3$ ;  $T = 0,8$ ;  $\beta = 0,45$ .

Входной сигнал  $X = 1$  подается с задержкой 1 с.

Необходимо построить переходную функцию, логарифмические амплитудную и фазовую частотные характеристики.

### Решение:

Колебательное звено описывается дифференциальным уравнением вида:

$$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = k \cdot x, \quad (6)$$

где  $T_1, T_2$  – постоянные времени звена, с;  
 $k$  – коэффициент усиления звена.

Выполнив преобразование по Лапласу, с учетом

$$\beta = \frac{T_1}{2 \cdot T_2}, \quad (7)$$

где  $\beta$  – коэффициент затухания (демпфирования)  
получим уравнение в операторной форме:

$$T^2 \cdot y \cdot s^2 + 2 \cdot \beta \cdot T \cdot y \cdot s + y = k \cdot x \quad (8)$$

Преобразуем:

$$y \cdot (T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \beta \cdot T \cdot s + 1) = k \cdot x. \quad (9)$$

Передаточная функция колебательного звена имеет вид:

$$W(s) = \frac{1}{T_2^2 \cdot s^2 + T_1 \cdot s + 1}, \quad (10)$$

где  $T_1, T_2$  – постоянные времени колебательного звена;  
 $k$  – коэффициент усиления колебательного звена.

Постоянные времени колебательного звена  $T_1$  и  $T_2$  связаны зависимостью

$$\beta = \frac{T_1}{2 \cdot T_2} = \frac{0,805}{2 \cdot \sqrt{0,8}} = 0,45. \quad (11)$$

Коэффициент  $\beta$  называют коэффициентом колебательности, он характеризует колебательность переходного процесса колебательного звена. Если  $\beta < 1$ , то переходный процесс звена – колебательный, и чем  $\beta$  меньше единицы, тем больше колебательность звена. Если  $\beta \geq 1$ , то получаем апериодическое звено второго порядка.



Рисунок 13 – Схема исследования колебательного звена к задаче 2

По переходной функции можно определить коэффициент усиления системы. В данном примере он равен  $k=8,3$ .



Рисунок 14 – Переходная характеристика колебательного звена

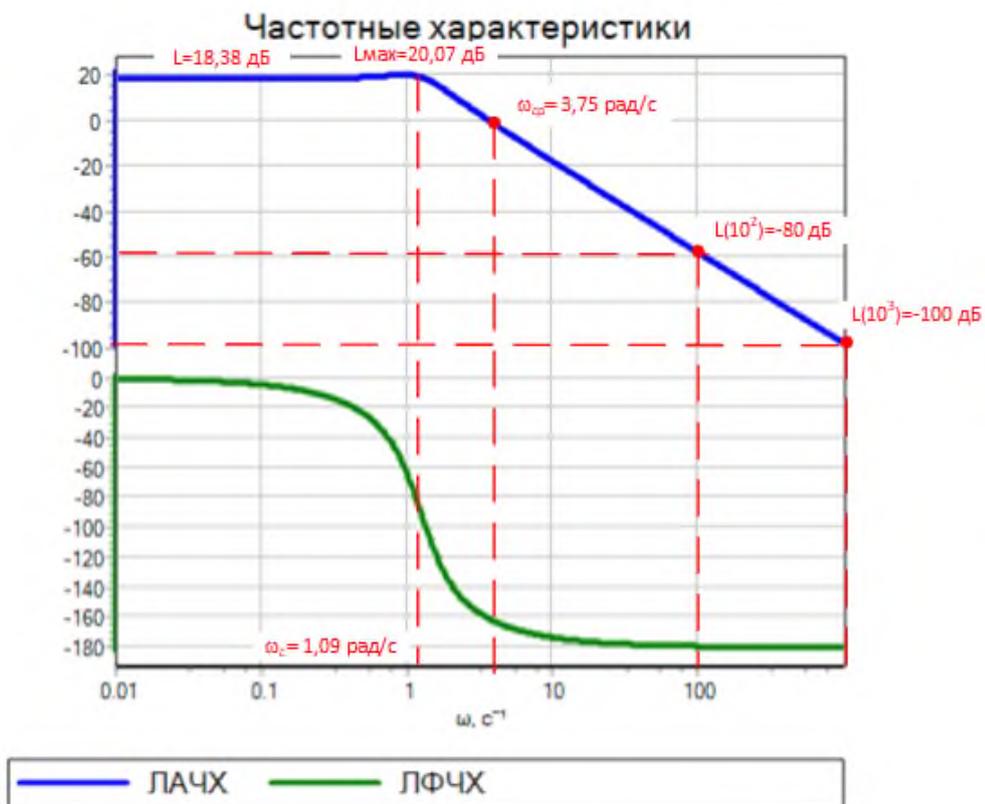


Рисунок 15 – ЛАЧХ и ЛФЧХ колебательного звена

Асимптотическая ЛАЧХ колебательного звена до сопрягающей частоты совпадает с осью абсцисс, при дальнейшем увеличении частоты идет с накло-

ном -40 дБ/дек. То есть высокие частоты колебательное звено «заваливает» сильнее, чем апериодическое звено.

ЛФЧХ при малых частотах асимптотически стремится к нулю. При увеличении частоты до бесконечности выходной сигнал поворачивается по фазе относительно входного на угол, стремящийся в пределе к  $-180^\circ$ .

### Задача 3

Исследуйте систему, состоящую из двухзвеньев апериодического и колебательного соединенных последовательно с передаточными функциями

$$W_1(s) = \frac{k_1}{T_1 \cdot s + 1} \quad \text{и} \quad W_2(s) = \frac{k_2}{T_2^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \beta \cdot T_2 \cdot s + 1}$$

В процессе исследования необходимо составить скрипт для ввода данных и построить переходную функцию, проанализировав ее вид.

### Решение:

Модель состоящая из последовательно соединенных апериодического и колебательного звеньев представлена на рисунке 16. На вход системы подается ступенчатый сигнал X, на выходе имеется окно, с графиками переходного процесса.

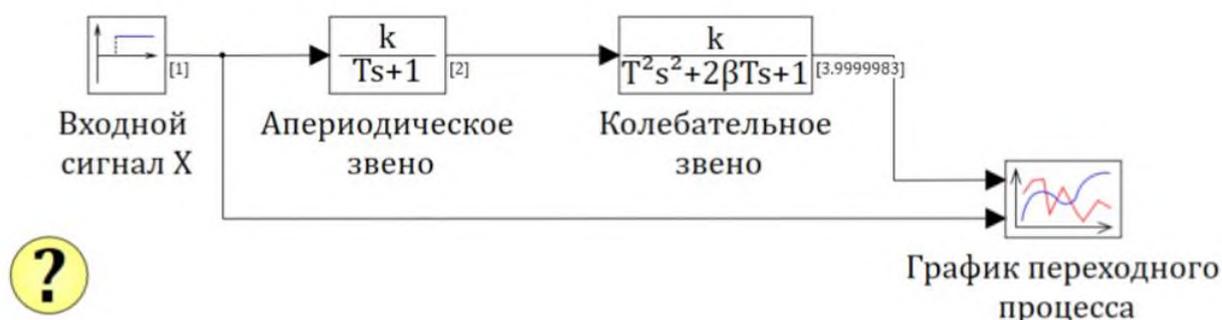


Рисунок 16 – Схема САР последовательно соединенных блоков

Параметры проекта задаются на закладке «**Параметры расчета**» при нажатии кнопки «**Параметры расчета**» в левом верхнем углу. В данной задаче в окне изменено от параметров по умолчанию только конечное время расчета 7 с.

Подписи блоков «**Входной сигнал X**», «**Апериодическое звено**», «**Колебательное звено**» и «**График переходного процесса**» выполнены автором модели и отображаются они рядом с родительскими блоками. При необходимости эти подписи можно редактировать как по шрифту, размеру и цвету.

У этих блоков могут задаваться свойства и параметры. По сути свойства–

это входные сигналы блока, а параметры – выходные сигналы.

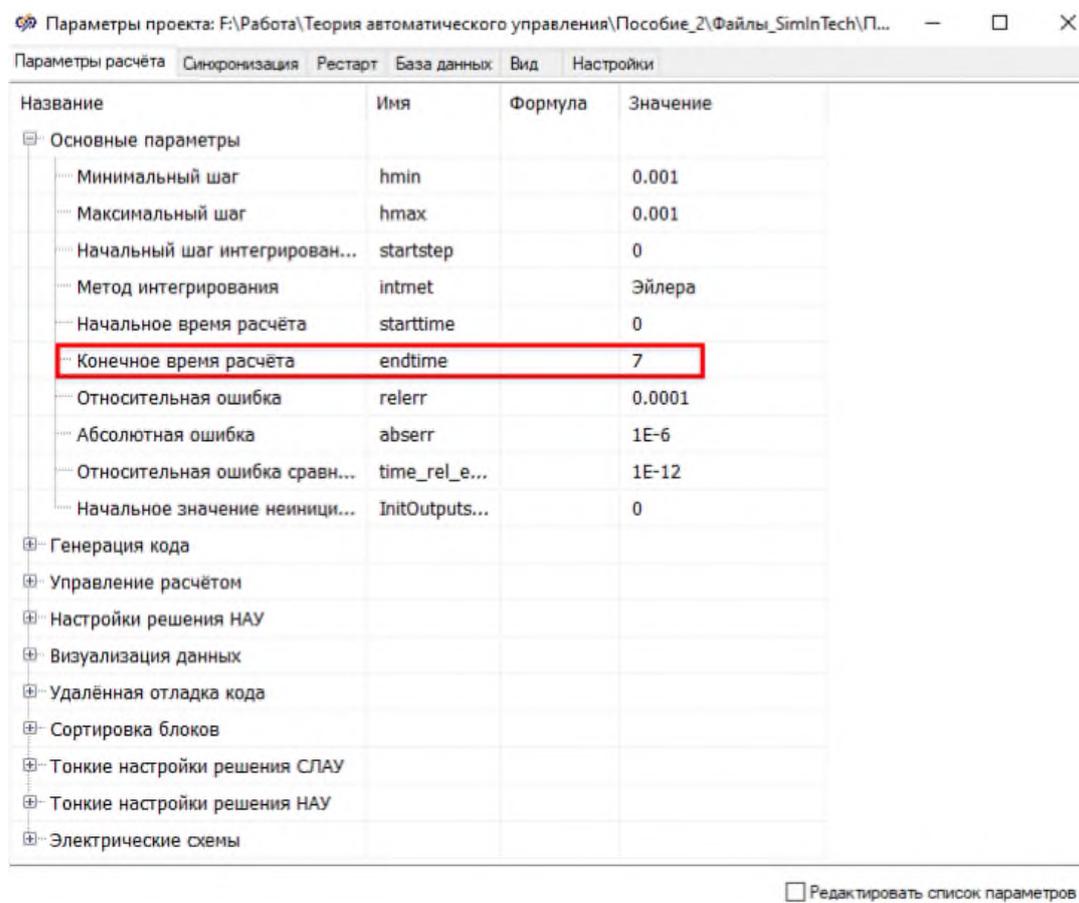


Рисунок 17 – Окно параметров расчета

В окне «Свойства» блоков «Входной сигнал X», «Апериодическое звено» и «Колебательное звено» заполняются только свойства в графе «Формула». Значение переносится автоматически из скрипта программы.

Скрипт – это небольшая программа, которая в данном случае позволяет ввести данные в модель, состоящей из двух звеньев. Скрипт программы открывается в отдельном окне при нажатии кнопки «Скрипт», расположенной в левом верхнем углу. Вид скрипта в программе SimInTech представлен на рисунке 18.

Скрипт программы имеет цветовую дифференциацию. Так ключевые слова выделены черным, полужирным шрифтом; комментарии – зеленым, а цифровые значения – синим цветом.

Синтаксис задания секции инициализации имеет вид:

```
initialization  
.....  
end;
```

Операция внутри секции будут выполнены только один раз при запуске вычислений.

При нажатии кнопки «**Рассчитать всё**» появляется в правой части окна «**Скрипт страницы**» окно «**Просмотр значений переменных**».

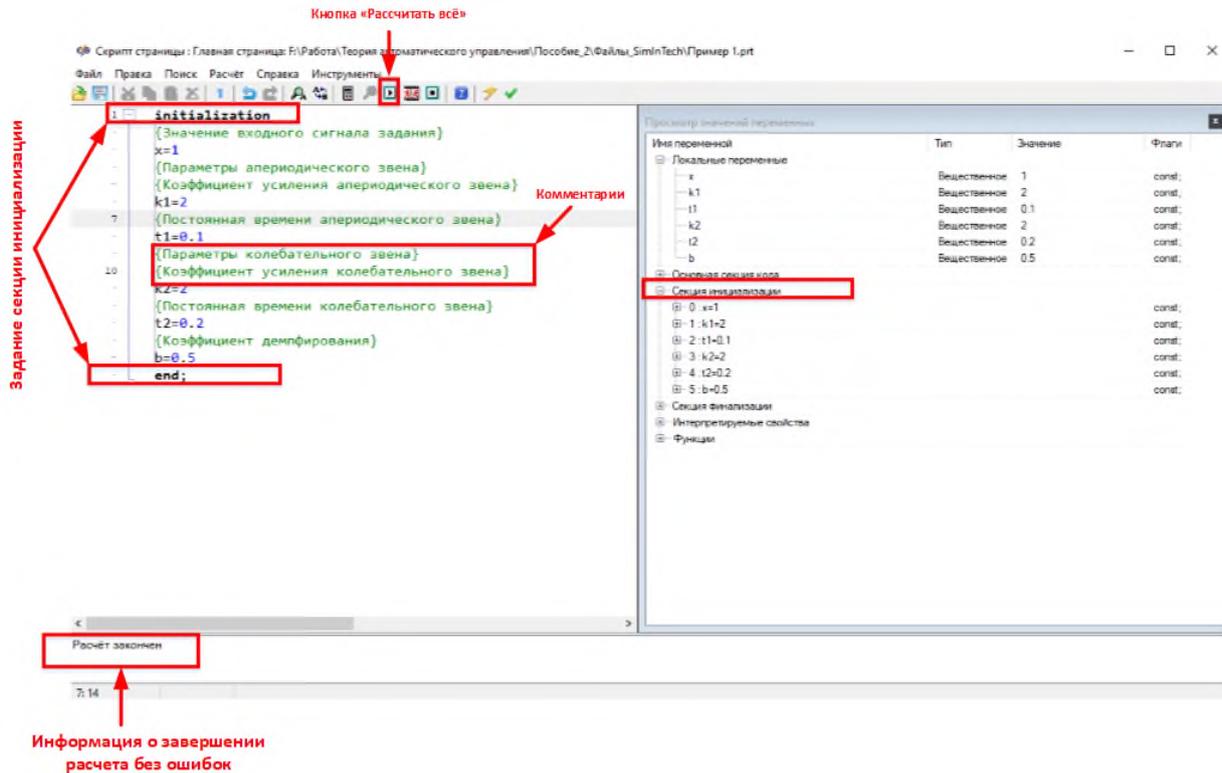


Рисунок 18 – Окно скрипта программы

Вид окон «**Свойства**» блоков «**Входной сигнал X**», «**Аperiodическое звено**» и «**Колебательное звено**» для примера представлены на рисунках 19, 20.

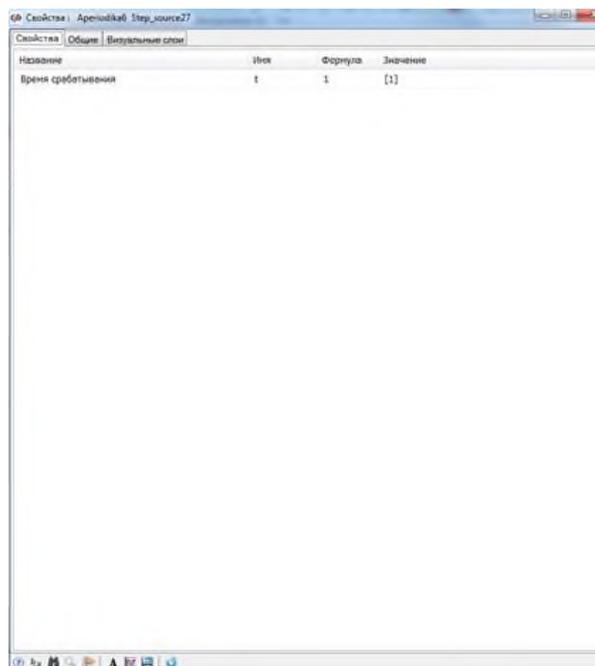


Рисунок 19 – Окно «**Свойства**» блока «**Входной сигнал X**»

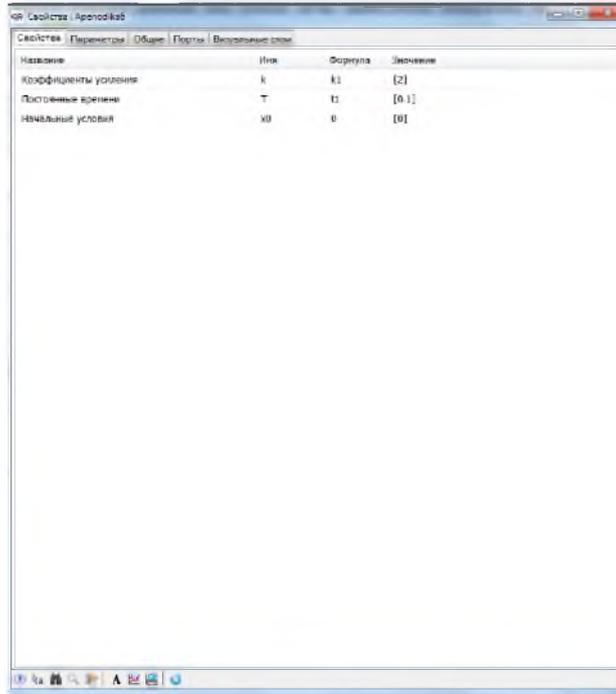


Рисунок 20 – Окно «Свойства» блока «Апериодическое звено»

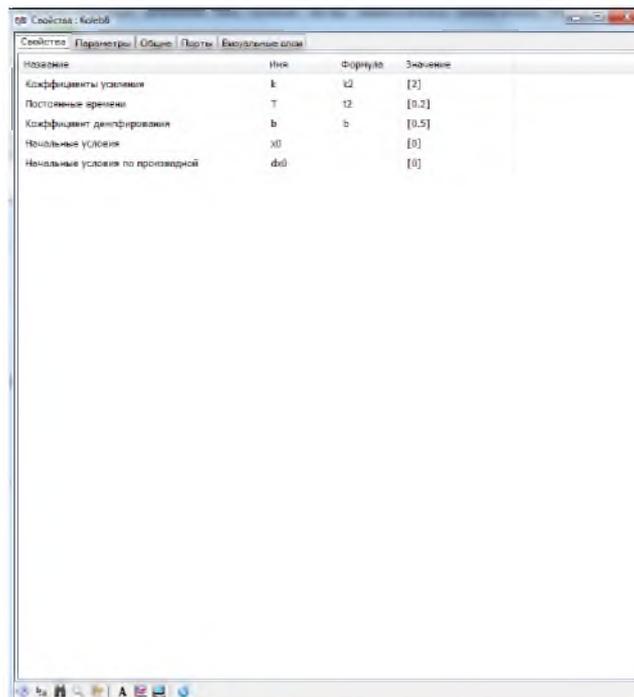


Рисунок 21 – Окно «Свойства» блока «Колебательное звено»

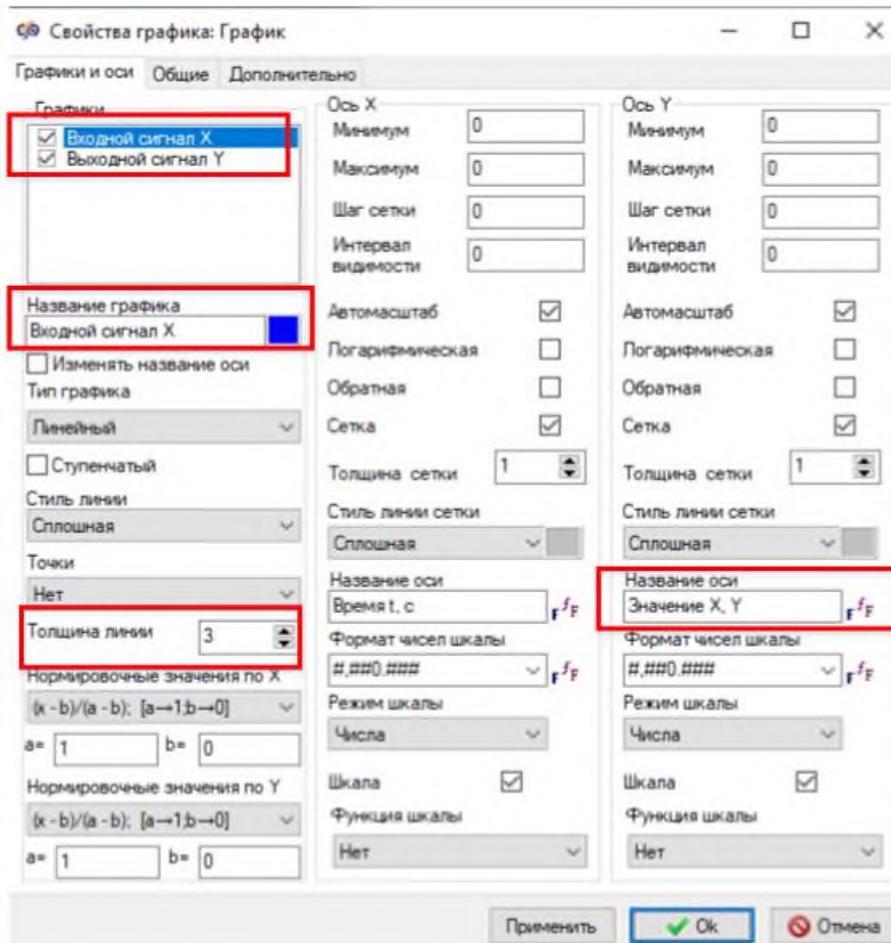


Рисунок 22 – Окно «Свойства графика переходного процесса»

Свойства блока «**График переходного процесса**» становится доступным при нажатии правой кнопки мыши по окну «**График**». На вкладке «**Общие**» в поле «**Заголовок**» удалено название графика, так как график будет подписан в названии рисунка.

В закладке «**Графики и оси**» можно форматировать наименование осей, минимальные и максимальные значения по осям, цвету, тип графика и др. Пример форматирования графиков и осей для данной задачи представлен на рисунке 22.

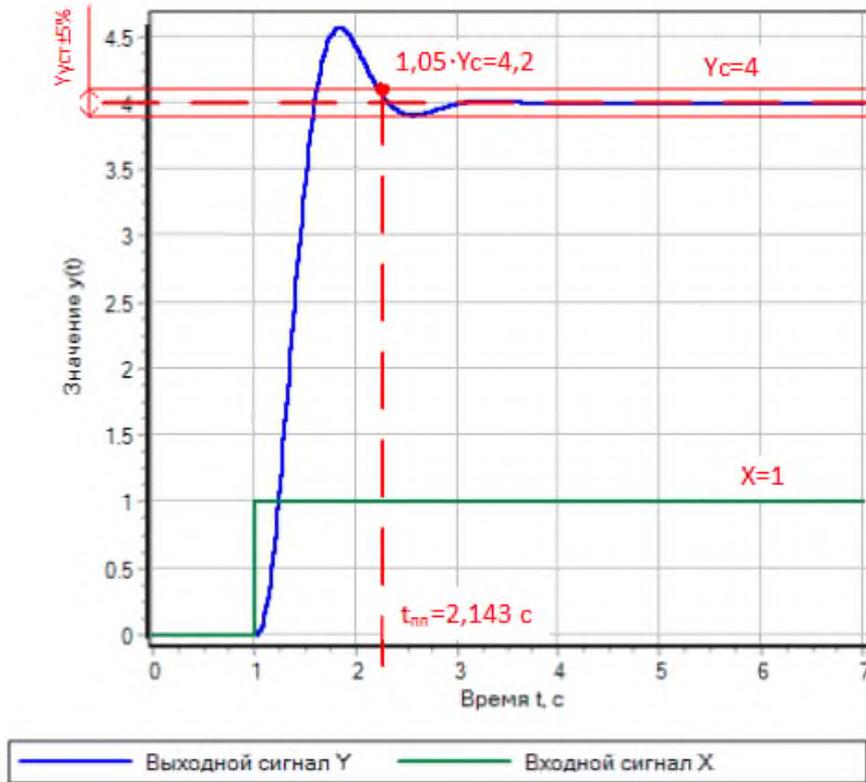


Рисунок 23 – График переходного процесса к задаче 3

На входе системы сигнал изменяется скачком с задержкой в 1 с. Входной сигнал представлен красным цветом, выходной сигнал представлен синим цветом. Вид графика соответствует двум последовательно соединенным блокам апериодическому и колебательному.

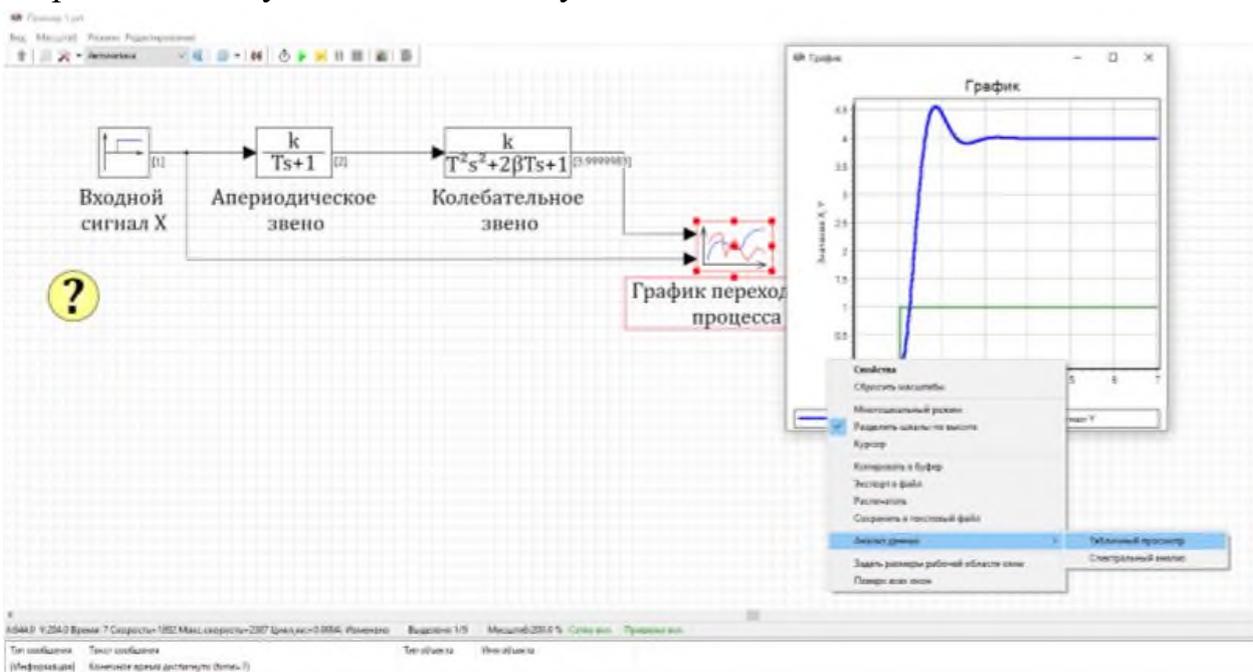


Рисунок 24 – Доступ к «Табличному просмотру» данных

Табличные значения графиков, представленных на рисунке 25 доступны при нажатии правой кнопки мыши на «Графике переходного процесса» в строке «Анализ данных».

№	Выходной сигнал Y_X	Выходной сигнал Y_Y	Выходной сигнал X_X	Выходной сигнал X_Y
1127	2.128	4.2442410307771		
1128	2.129	4.24173155292717		
1129	2.13	4.24022367937189		
1130	2.131	4.23871730071480		
1131	2.132	4.23721244719029		
1132	2.133	4.23570914884361		
1133	2.134	4.23420743553107		
1134	2.135	4.2327071069238		
1135	2.136	4.23120880290007		
1136	2.137	4.22971210195343		
1137	2.138	4.22821702318899		
1138	2.139	4.22672367632436		
1139	2.14	4.2252320896899		
1140	2.141	4.2237422918289		
1141	2.142	4.22225431109786		
1142	2.143	4.22076817556663		
1143	2.144	4.21928391351871		
1144	2.145	4.21780155245141		
1145	2.146	4.21632112507616		
1146	2.147	4.21484264301866		
1147	2.148	4.2133661509192		
1148	2.149	4.21189166843284		
1149	2.15	4.21041922322969		
1150	2.151	4.20894884199516		
1151	2.152	4.20748055123010		

Рисунок 25 – Окно «Табличного просмотра данных»

По таблице данных можно определить время переходного процесса для значения  $Y_c = 1,05 \cdot Y_{уст1} = 1,05 \cdot 3,999 = 4,20$  которое составит 2,143 с.

Общий коэффициент усиления системы определяется произведением коэффициентов усиления аperiodического и колебательного звена. В данной системе общий коэффициент системы  $k_{уст1} = 2 \cdot 2 = 4$ .

#### Задача 4

Система состоит из аperiodического звена с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{3}{0,5 \cdot s + 1}$$

и усилителя с коэффициентом усиления  $k=5$ .

Исследовать динамические процессы при последовательном и параллельном соединении звеньев.

**Решение:**

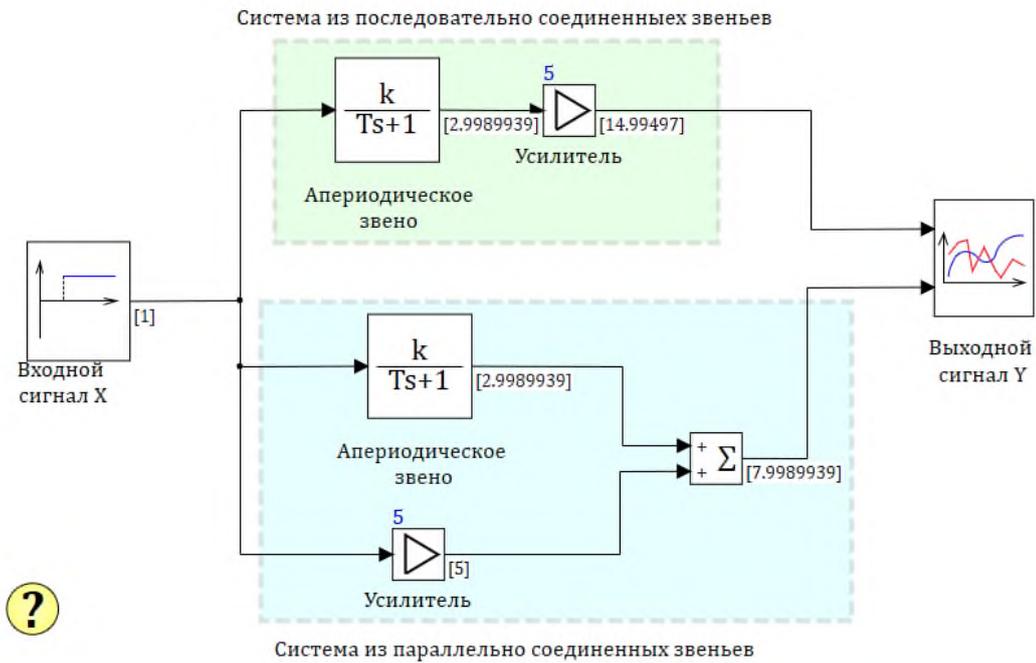


Рисунок 26 – Система из последовательно и параллельно соединенных звеньев

При последовательном соединении двух передаточных функций результирующая определится как произведение передаточных функций:

$$W_3(s) = W_1(s) \cdot W_2(s), \quad (12)$$

$$W(s)_3 = \frac{3}{0,5 \cdot s + 1} \cdot 5 = \frac{15}{0,5 \cdot s + 1}.$$

При параллельном соединении двух передаточных функций результирующая определится как сумма передаточных функций:

$$W_4(s) = W_1(s) + W_2(s). \quad (13)$$

$$W(s)_4 = \frac{3}{0,5 \cdot s + 1} + 5 = \frac{3 + 5 \cdot (0,5 \cdot s + 1)}{0,5 \cdot s + 1} = \frac{2,5 \cdot s + 8}{0,5 \cdot s + 1}.$$

При последовательном соединении звеньев общий коэффициент усиления системы составит  $k_{\text{усил}3} \approx 15$ , а время переходного процесса  $t_{\text{ин}} = (4 \div 5) \cdot T = (4 \div 5) \cdot 0,5 = 2 \div 2,5$  с.

При параллельном соединении коэффициент усиления станет меньше, т.е.  $k_{\text{усил}4} \approx 8$ , а время переходного процесса будет таким же, как и при последова-

тельном соединении звеньев.

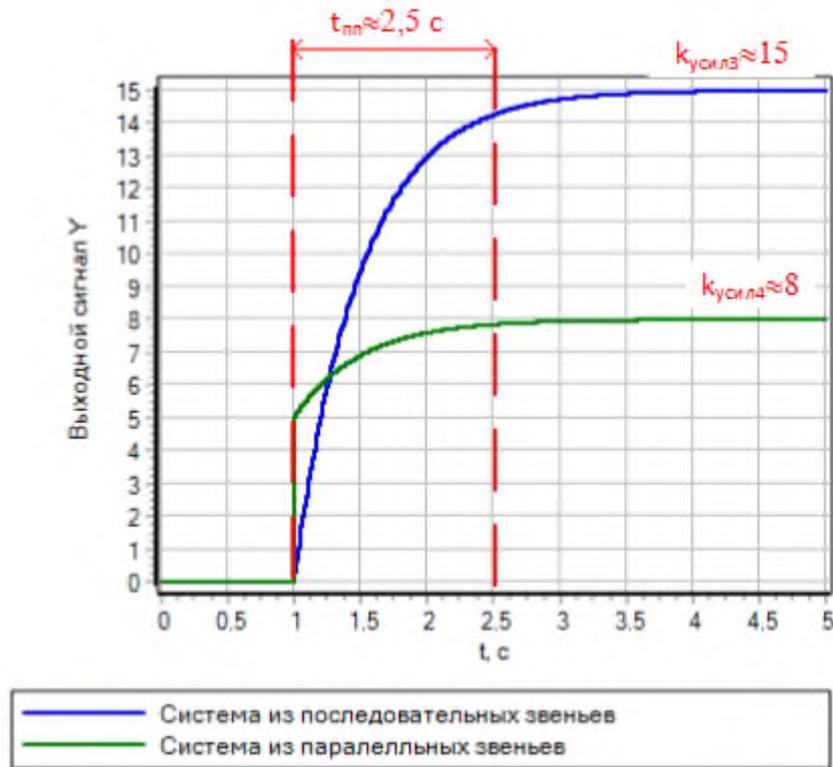


Рисунок 27 – Переходной процесс последовательно и параллельно соединенных звеньев

При последовательном соединении увеличивается коэффициент усиления всей системы, а при параллельном соединении на начальном этапе переходной функции наблюдается скачок, соответствующий усилительному звену с коэффициентом усиления  $k_{устл} = 5$ .

Выходные значения на линиях связи подтверждают правильность предварительных расчетов.

### Задача 5

Исследовать систему, состоящую из апериодического звена с передаточной функцией  $W(s)_1 = \frac{k_1}{T_1 \cdot s + 1}$  и колебательного звена с передаточной функцией

$$W(s)_2 = \frac{k_2}{T_2^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \beta \cdot T_2 \cdot s + 1},$$

построив динамические и частотные характеристики по задающему и возмущающему воздействию.

Данные к задаче:  $k_1=70$ ;  $T_1=1,1$ ;  $k_2=6$ ;  $T_2=0,05$ ;  $\beta=0,3$ .

Входной сигнал  $X=3,4$  подается с задержкой 0,5 с. Возмущающий сигнал  $F=125$  подается с задержкой 10 с.

### Решение:

В окне «**Параметры расчета**» необходимо задать конечное время расчета 20 с. Время расчета выбрано большее, чем задержка времени входного и возмущающих сигналов и времени переходного процесса в системе, Далее в окне нового проекта собрать схему, представленную на рисунке 28.

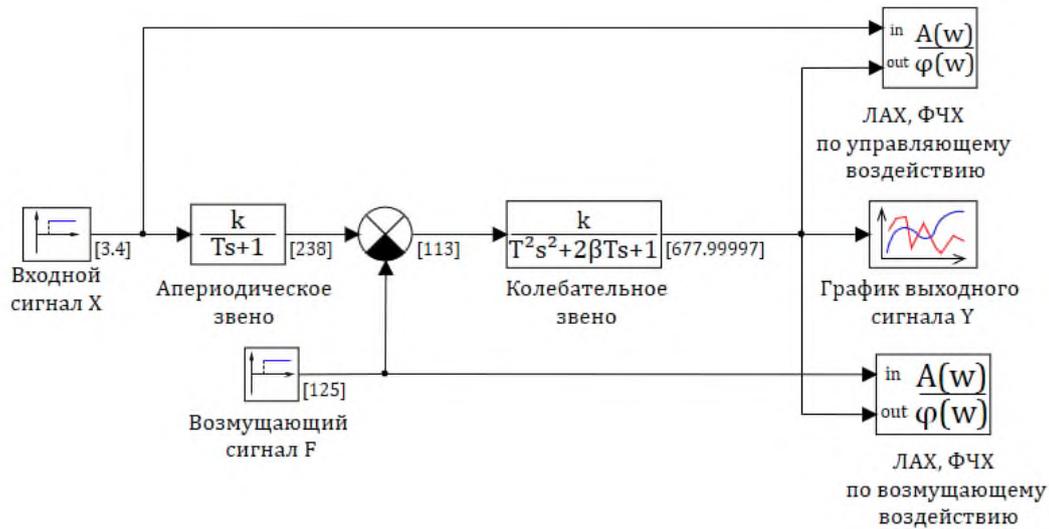


Рисунок 28 – Схема к задаче 5

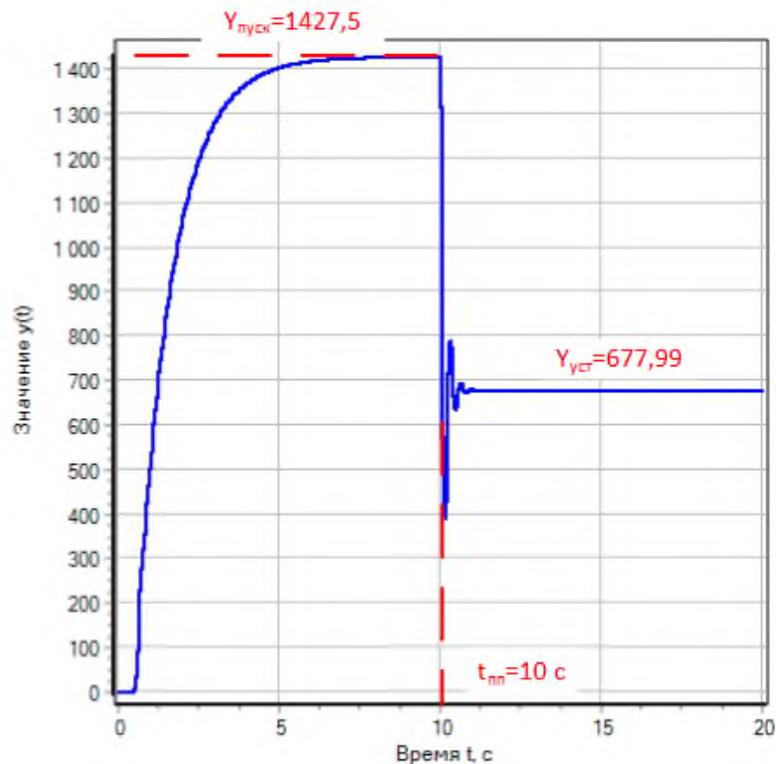


Рисунок 29 – Окно «**Графика переходного процесса**»

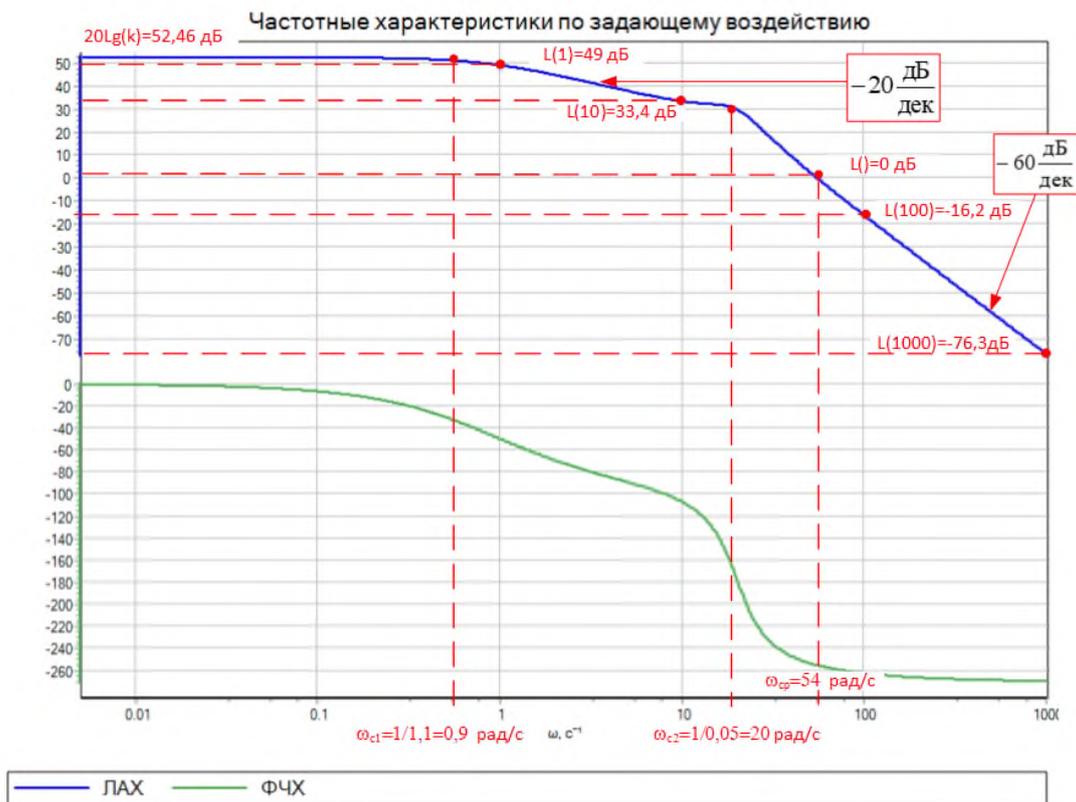


Рисунок 30 – ЛАЧХ и ФЧХ системы по управляющему воздействию

Переходной процесс состоит из двух участков

1) от времени подачи входного сигнала  $X$  в  $t_1=0,5$  с до времени подачи определяется апериодическим звеном. Так как у этого звена постоянная времени  $T_1=1,1$  смного больше постоянной времени колебательного звена  $T_2=0,05$  с.

2) При подаче возмущающего сигнала  $F=125$  в момент времени  $t_2=10$  с на переходной процесс оказывает влияние колебательное звено. По мере затухания колебаний на выходе системы устанавливается значение  $Y=677,99$ .

Анализ ЛАЧХ и ЛФЧХ, представленных на рисунке 30 показывает, что система по управляющему воздействию является статической. Наклон низкочастотной части ЛАЧХ нулевой, далее идет участок с наклоном  $-20 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ .

Высокочастотная часть имеет наклон  $-60 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ .

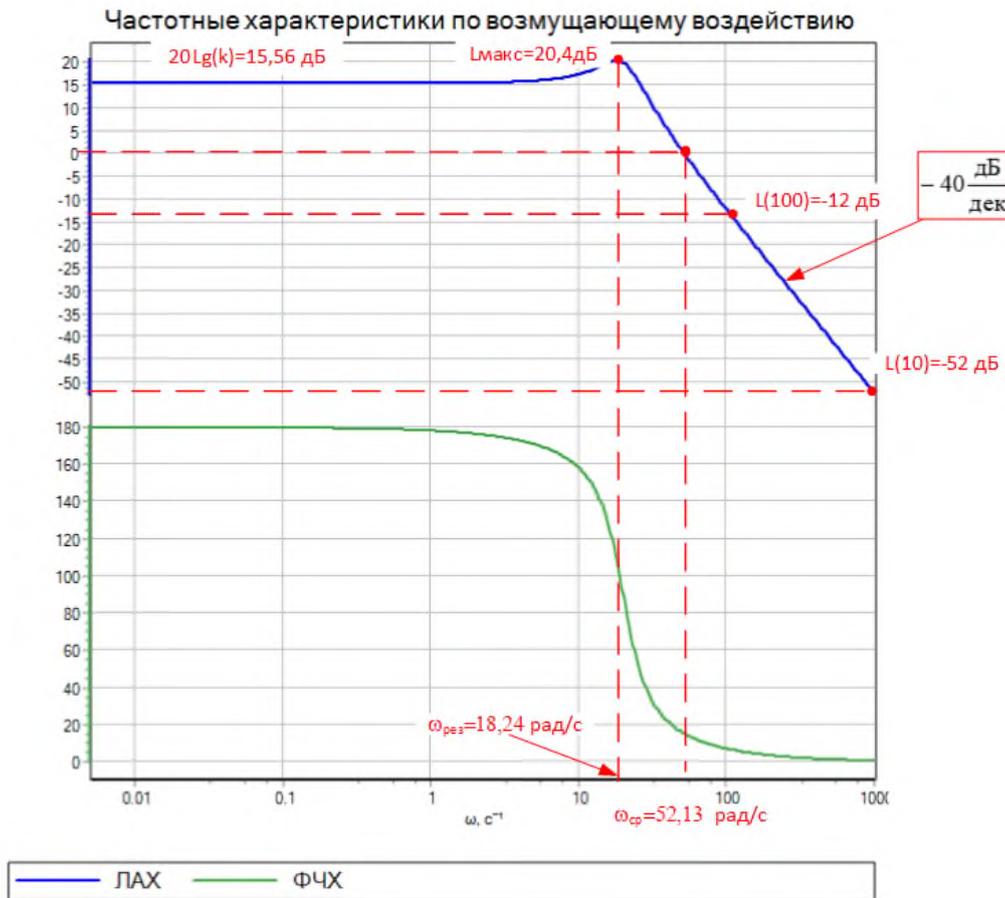


Рисунок 31 – ЛАЧХ и ФЧХ системы по возмущающему воздействию

Система по возмущающему воздействию, представленная на рисунке 31 является статической. Наклон низкочастотной части ЛАЧХ нулевой, далее идет участок с наклоном  $-40 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ , что соответствует колебательному звену с малой постоянной времени. Апериодическое звено находится до точки приложения сигнала и не оказывает влияние на вид ЛАЧХ.

### Задача 6

Исследовать систему, состоящую из последовательно соединенных инерционно-дифференцирующего звена с передаточной функцией  $W(s)_1 = \frac{k_1 \cdot s}{T_1 \cdot s + 1}$  и колебательного звена с передаточной функцией  $W(s)_2 = \frac{k_2}{T_2^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \beta \cdot T_2 \cdot s + 1}$ , построив динамические и частотные характеристики.

Данные к задаче:  $k_1=100$ ;  $T_1=0,1$  с;  $k_2=12$ ;  $T_2=0,37$  с;  $\beta=0,3$ .

Входной сигнал  $X=10$  подается с задержкой 1 с.

**Решение:**

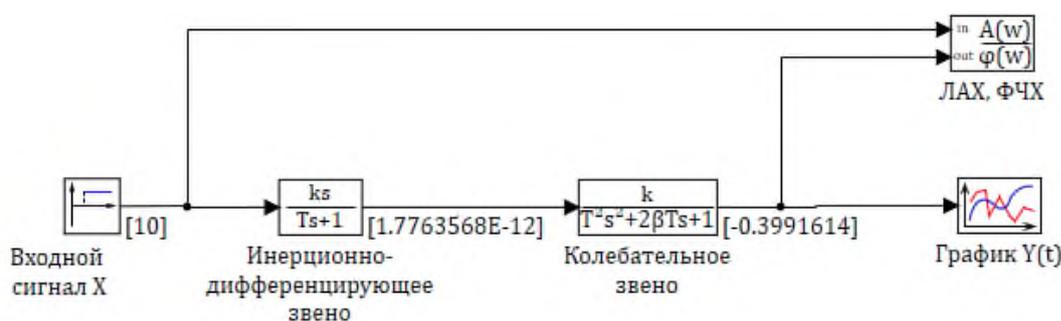


Рисунок 32 – Схема к задаче 6

Передаточная функция инерционно-дифференцирующего звена

$$W(s)_1 = \frac{k_1 \cdot s}{T_1 \cdot s + 1} = \frac{100 \cdot s}{0,1 \cdot s + 1}. \quad (14)$$

Передаточная функция колебательного звена

$$W(s)_2 = \frac{k_2}{T_2^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \beta \cdot T_2 \cdot s + 1} = \frac{12}{0,37^2 \cdot s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,37 \cdot s + 1}, \quad (15)$$

$$W(s)_2 = \frac{12}{0,137 \cdot s^2 + 0,222 \cdot s + 1}.$$

Результирующая передаточная функция при последовательном соединении двух звеньев:

$$W(s) = W(s)_1 \cdot W(s)_2 = \frac{100 \cdot s}{(0,1 \cdot s + 1)} \cdot \frac{12}{(0,137 \cdot s^2 + 0,222 \cdot s + 1)}.$$

После преобразования получим

$$W(s) = \frac{1200 \cdot s}{0,0137 \cdot s^3 + 0,01592 \cdot s^2 + 0,322 \cdot s + 1}.$$

Переходный процесс для результирующей передаточной функции представлен на рисунке 33.

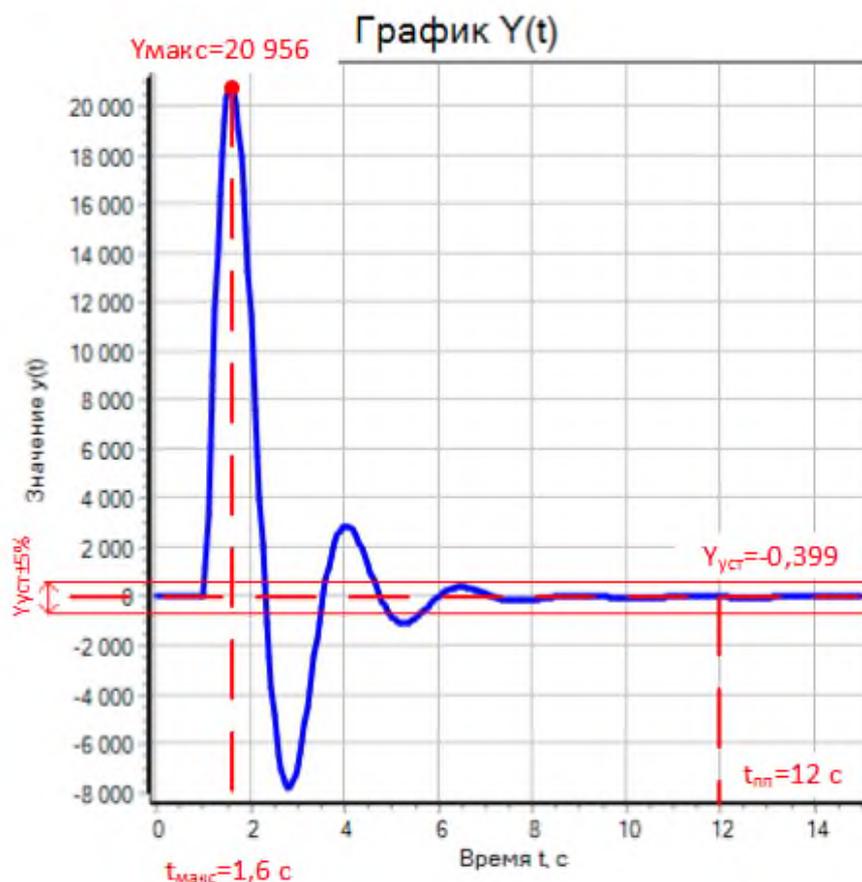


Рисунок 33 – Окно «График Y(t)»

Бросок выходной величины на рисунке 33 до  $Y_{\text{макс}}=20956$  на начальном этапе определяется инерционно-дифференцирующим звеном. Колебательность определяется параметрами колебательного звена.

Низкочастотная часть ЛАЧХ, изображенная на рисунке 34 соответствует дифференцирующему звену с наклоном  $+20 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ . При частоте  $\omega_{c1} = 2,679$  рад/с амплитуда частотной характеристики имеет максимальное значение  $L = 74,358$  дБ. Наклон высокочастотной части  $-40 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$  соответствует колебательному звену.

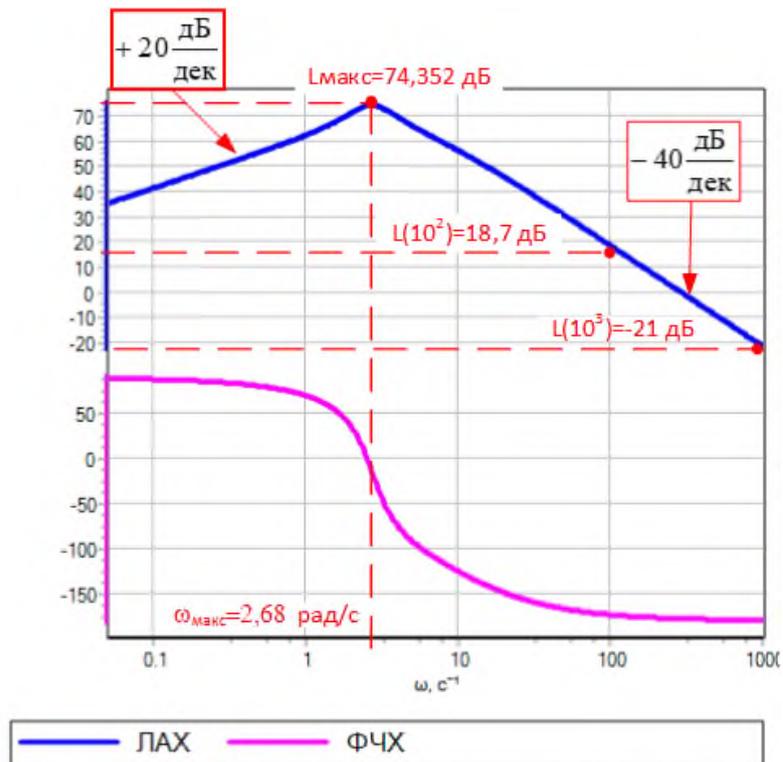


Рисунок 34 – ЛАЧХ и ФЧХ к задаче 6

### Задача 7

Исследовать колебательное звено с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{k}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \beta \cdot T \cdot s + 1}$$

с разными значениями коэффициента демпфирования 1, построив динамические и частотные характеристики.

Данные к задаче:  $k=1$ ;  $T=1$  с;  $\beta_1=1$ ;  $\beta_2=0,5$ ;  $\beta_3=0,25$ .

Входной сигнал  $X=1$  подается с задержкой 1 с.

Входной сигнал  $X=1$  подается с задержкой 1 с.

### Решение:

Схема исследования представлена на рисунке 35.

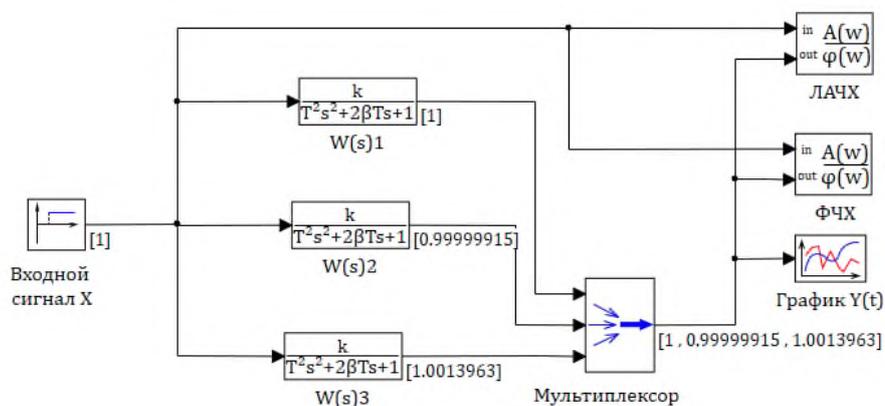


Рисунок 35 – Схема исследования колебательных звеньев в различными коэффициентами демпфирования к задаче 7

Передаточные функции колебательного звена с коэффициентом усиления  $k=1$  и постоянной времени  $T=1$  с, но с разными коэффициентами демпфирования имеют вид:

$$W(s)_1 = \frac{1}{1^2 \cdot s^2 + 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot s + 1} = \frac{1}{s^2 + 2 \cdot s + 1}, \quad (16)$$

$$W(s)_2 = \frac{1}{1^2 \cdot s^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot s + 1} = \frac{1}{s^2 + s + 1}, \quad (17)$$

$$W(s)_3 = \frac{1}{1^2 \cdot s^2 + 2 \cdot 0,25 \cdot 1 \cdot s + 1} = \frac{1}{s^2 + 0,5 \cdot s + 1}. \quad (18)$$

Характеристики к задаче 7 представлены на рисунках 36-38.

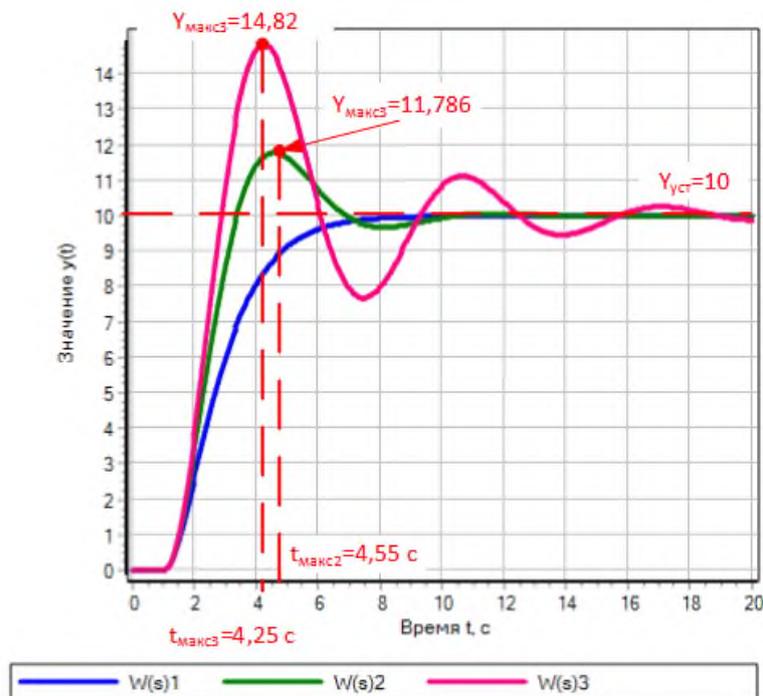


Рисунок 36 – Графики переходной функции колебательных звеньев в различными коэффициентами демпфирования к задаче 7

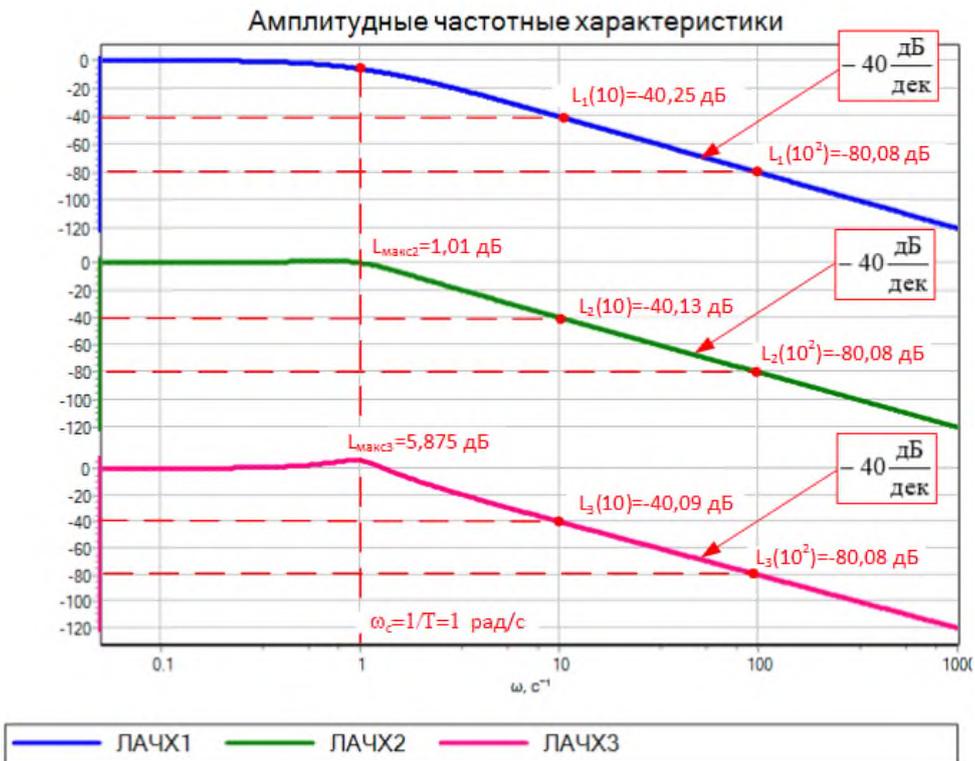


Рисунок 37 – ЛАЧХ колебательных звеньев в различными коэффициентами демпфирования к задаче 7

Чем меньше коэффициент демпфирования, тем больше колебательность системы. При  $\beta_1=1$  система  $W(s)_1$  имеет апериодический характер переходного процесса. При  $\beta_3=0,25$  система  $W(s)_3$  имеет колебательный характер переходного процесса.

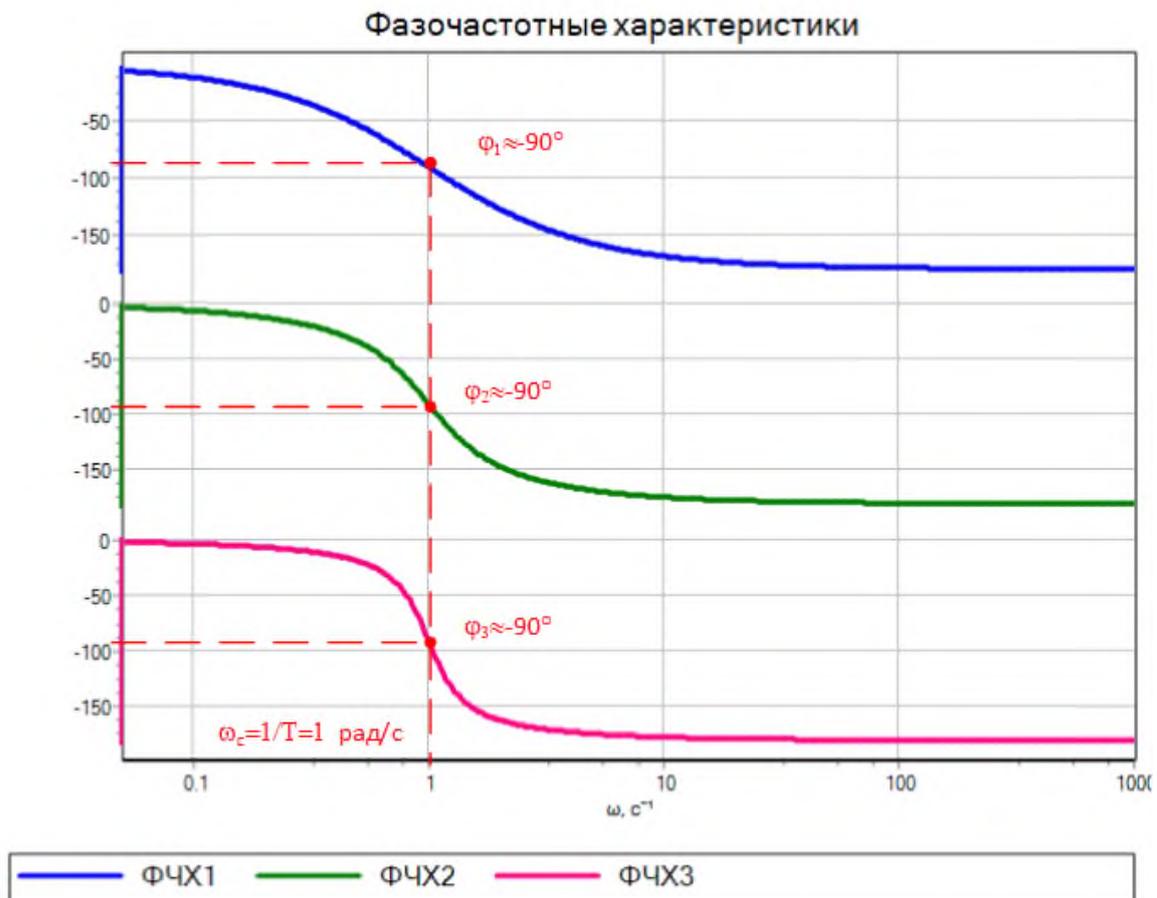


Рисунок 38 – ЛФЧХ колебательных звеньев в различными коэффициентами демпфирования к задаче 8

ЛФЧХ при различных коэффициентах демпфирования изменяется от  $0^\circ$  в области низких частот до  $180^\circ$  в области высоких частот. На частоте  $\omega_c = \frac{1}{T} = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  имеется сдвиг по фазе равный  $90^\circ$ .

### 3 Исследование линейных систем автоматического управления

#### Задача 8

Исследовать разомкнутую систему, состоящую из П-регулятора с коэффициентом усиления  $k_{pc}=1$  и объекта регулирования – колебательного звена с передаточной функцией  $W(s) = \frac{k}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \beta \cdot T \cdot s + 1}$ . Замкнутая система охвачена единичной обратной связью. Необходимо построить динамические характеристики.

Данные к задаче:  $k=1$ ;  $T=1$  с;  $\beta=0,75$ .

Входной сигнал  $X=1$  подается с задержкой 1 с.

#### Решение:

Конечное время расчета в задаче принято 10 с.

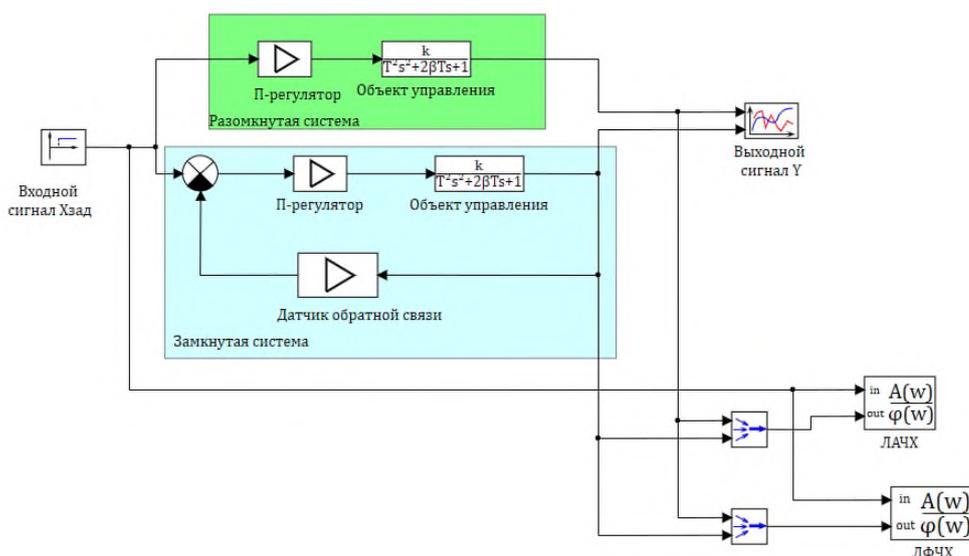


Рисунок 39 – Схема разомкнутой и замкнутой системы к задаче 8

Переходные процессы представлены на рисунке 40. В разомкнутой системе коэффициент усиления больше в два раза, чем в замкнутой системе.

$$W(s)_{\text{раз}} = \frac{1}{s^2 + 1,5 \cdot s + 1}.$$

Передаточная функция замкнутой системы с отрицательной обратной связью определяется по формуле:

$$W(s)_{\text{зам}} = \frac{W(s)_{\text{раз}}}{1 + W(s)_{\text{раз}} \cdot W(s)_{\text{ос}}}, \quad (19)$$

$$W(s)_{\text{зам}} = \frac{1}{s^2 + 1,5 \cdot s + 1} = \frac{1}{s^2 + 1,5 \cdot s + 2}.$$

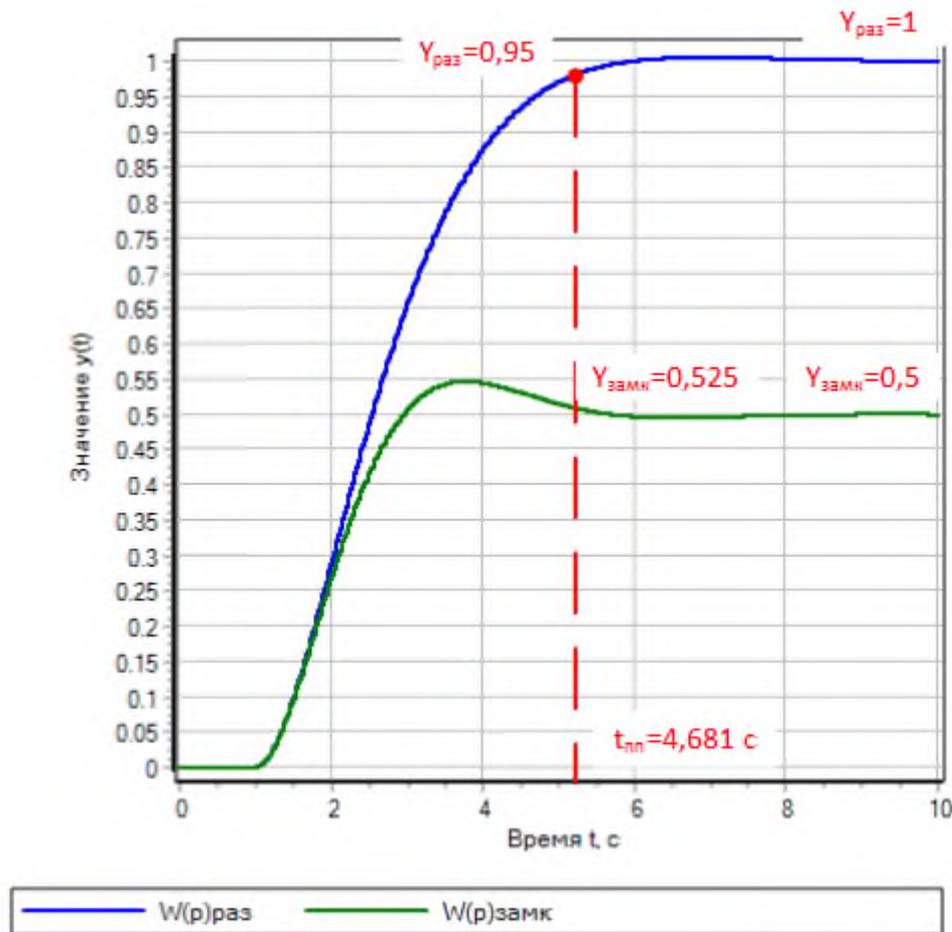


Рисунок 40 – Переходные характеристики разомкнутой и замкнутой систем к задаче 8

Частотные характеристики разомкнутой и замкнутой систем представлены на рисунках 41, 42.

ЛАЧХ разомкнутой системы имеет нулевой наклон, так система является астатической. Далее наклон соответствует колебательному звену.

ЛАЧХ замкнутой системы совпадает по виду с ЛАЧХ разомкнутой системы. Разница состоит в разных коэффициентах усиления и полосе пропускания сигналов.

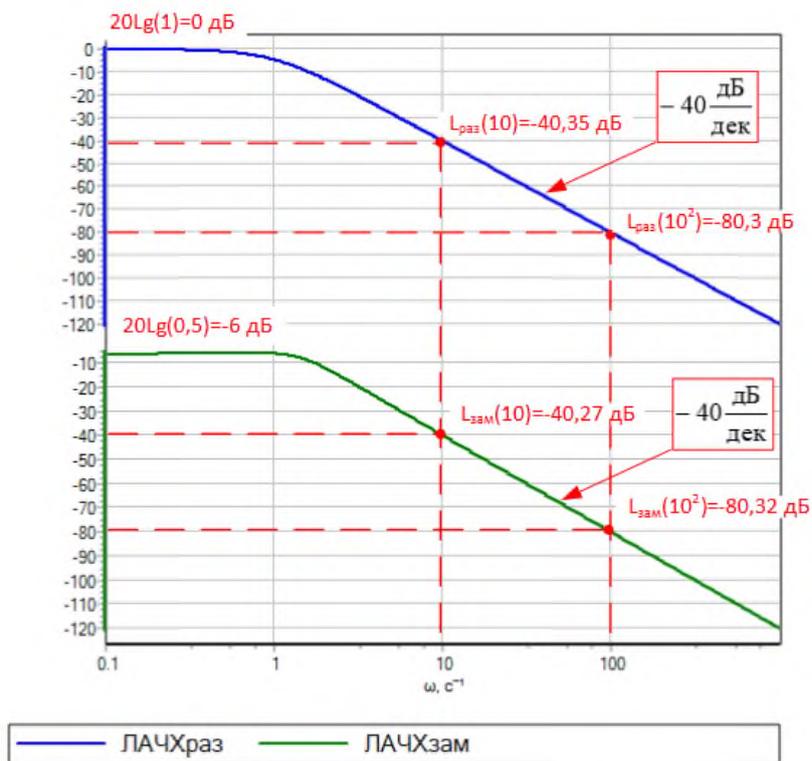


Рисунок 41 – ЛАЧХ разомкнутой и замкнутой систем к задаче 8

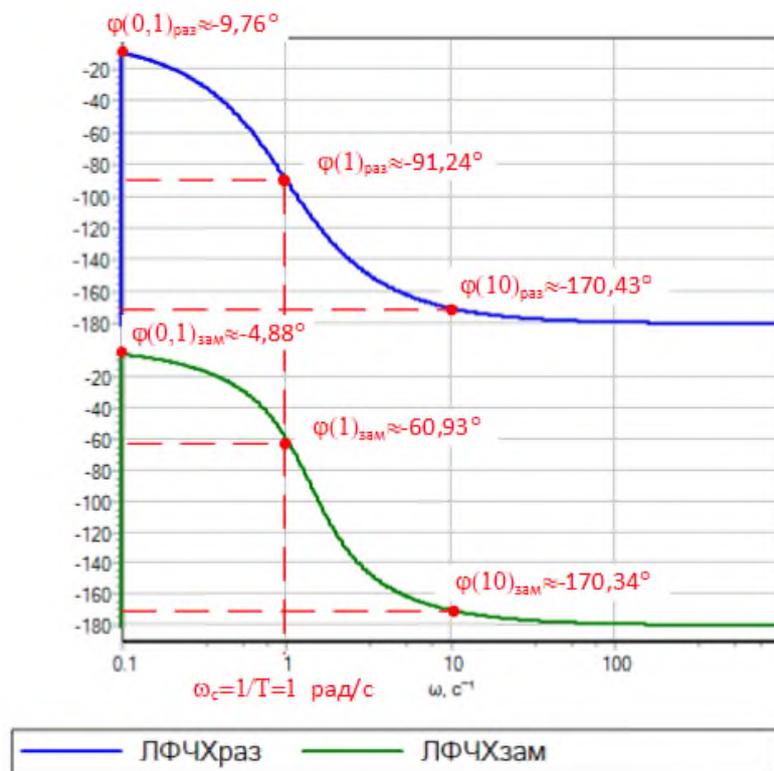


Рисунок 42 – LFЧХ разомкнутой и замкнутой систем к задаче 8

Анализируя вид ЛАЧХ и LFЧХ для разомкнутой и замкнутой систем видно, что различия в зависимостях наблюдается только на низких частотах. При возрастании частот характеристики сливаются.

### Задача 9

Провести исследование разомкнутой системы и замкнутой системы с П-регулятором, представленной на рисунке 43.

Разомкнутая система состоит из пропорционального, аperiodического и интегральных блоков с единичной внутренней обратной связью. Замкнутая система охвачена неединичной обратной связью.

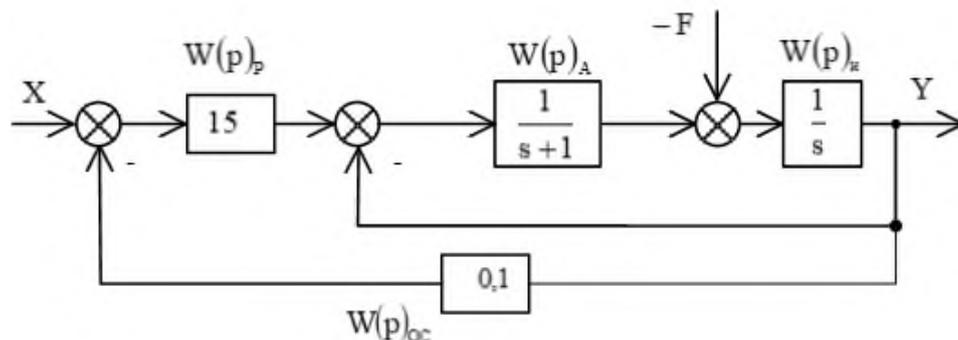


Рисунок 43 – Замкнутая схема САР к задаче 9

Входной сигнал  $X=10$  подается с задержкой 1 с.

Необходимо построить переходные и частотные характеристики.

### Решение:

Конечное время расчета в задаче принято 10 с.

В схеме использован блок «Субмодель». После установки на схему блока «Субмодель», устанавливаются «Порты входа» (в данном случае это «Входной сигнал X» и «Входной сигнал F»), а также «Порты выхода» («Выходной сигнал Y»). Далее собирается схема из базовых блоков, соединяя блоки математическими связями.

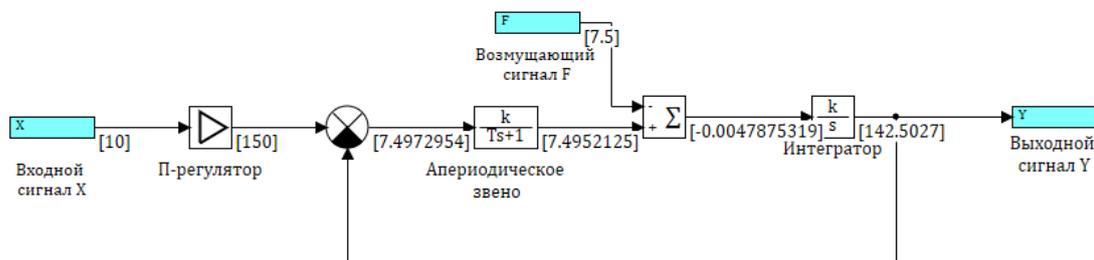


Рисунок 44 – Схема субмодели «Разомкнутая система»

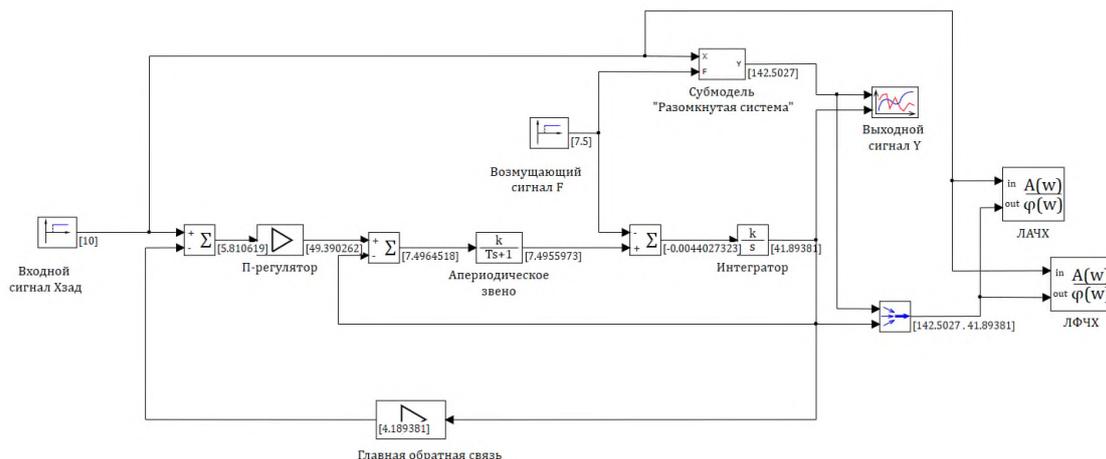


Рисунок 45 – Схема исследования к задаче 9

Переходные процессы представлены на рисунке 46. Процессы нарастают с задержкой времени в 1 с. Эта задержка времени выставлена в блоке «Входной сигнал X». В момент времени  $t=15$  с подают «Возмущающий сигнал F». Так как «Входной сигнал X» подают и на разомкнутую систему и на замкнутую системы одинаковым, а коэффициенты усиления систем различные, то и установившиеся значения в системах разные. В разомкнутой системе, где коэффициент усиления выше, установившееся значение  $Y_{уст}=143$ , а в замкнутой системе, где коэффициент усиления системы меньше, установившееся значение  $Y_{уст}=42,16$ .

Так как в исследовании не менялся коэффициент усиления П-регулятора, то вид переходного процесса и в разомкнутой, и замкнутой системе одинаковый, что видно на графиках.

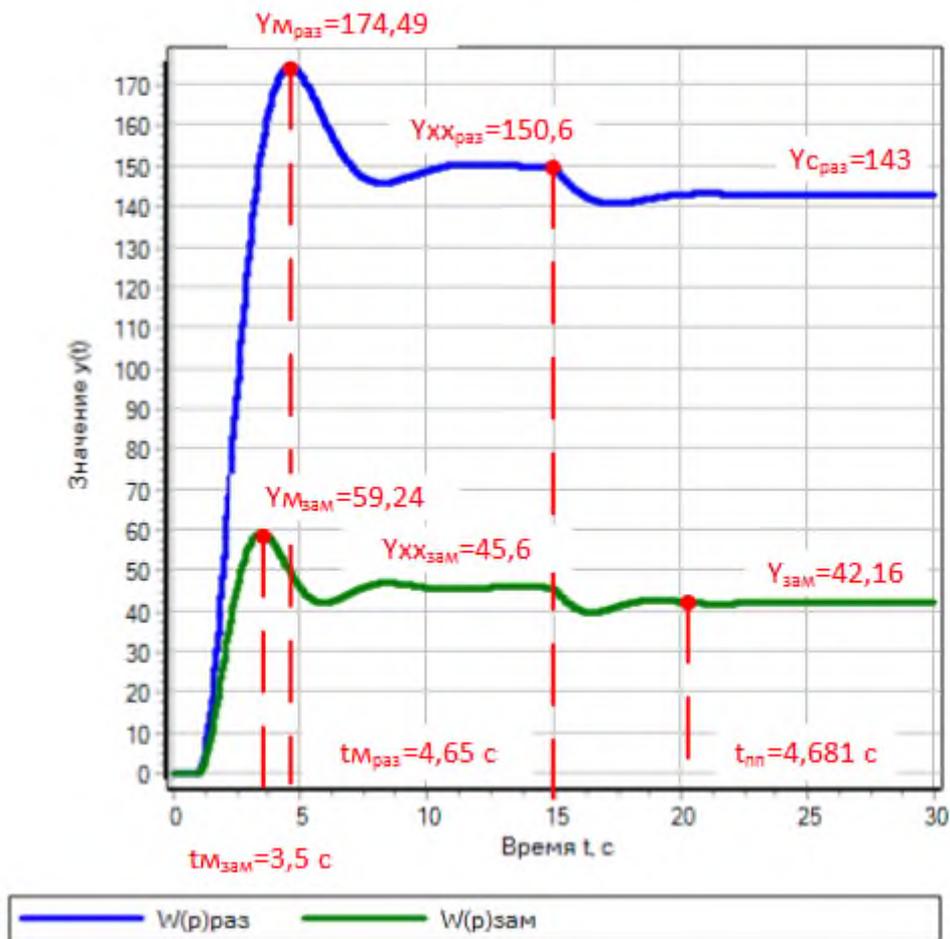


Рисунок 46 – Графики переходного процесса разомкнутой и замкнутой систем к задаче 9

Перерегулирование, определяемое по формуле

$$\sigma = \frac{Y_{\text{макс}} - Y_{\text{уст}}}{Y_{\text{уст}}} \cdot 100 \%, \quad (20)$$

где  $Y_{\text{макс}}$  – максимальное значение выходного сигнала  $Y$ ;  
 $Y_{\text{уст}}$  – установившееся значение выходного сигнала  $Y$ .

В разомкнутой системе перерегулирование составит:

$$\sigma_{\text{раз}} = \frac{Y_{M_{\text{раз}}} - Y_{XX_{\text{раз}}}}{Y_{XX_{\text{раз}}}} \cdot 100 \% = \frac{174,49 - 150,6}{150,6} \cdot 100 = 15,82 \%$$

В замкнутой системе перерегулирование составит:

$$\sigma_{\text{зам}} = \frac{Y_{M_{\text{зам}}} - Y_{XX_{\text{зам}}}}{Y_{XX_{\text{зам}}}} \cdot 100 \% = \frac{59,24 - 45,6}{45,6} \cdot 100 = 29,91 \%$$

Как видно, по значению перерегулирования в замкнутой системе это значение немного больше, что соответствует большей колебательности системы. По времени достижения максимальных значений замкнутая система ( $t_{M_{\text{зам}}}=3,5$

с) имеет большее быстродействие по сравнению с разомкнутой системой ( $t_{\text{Мраз}}=4,65$  с).

Логарифмические частотные характеристики представлены на рисунке 47.

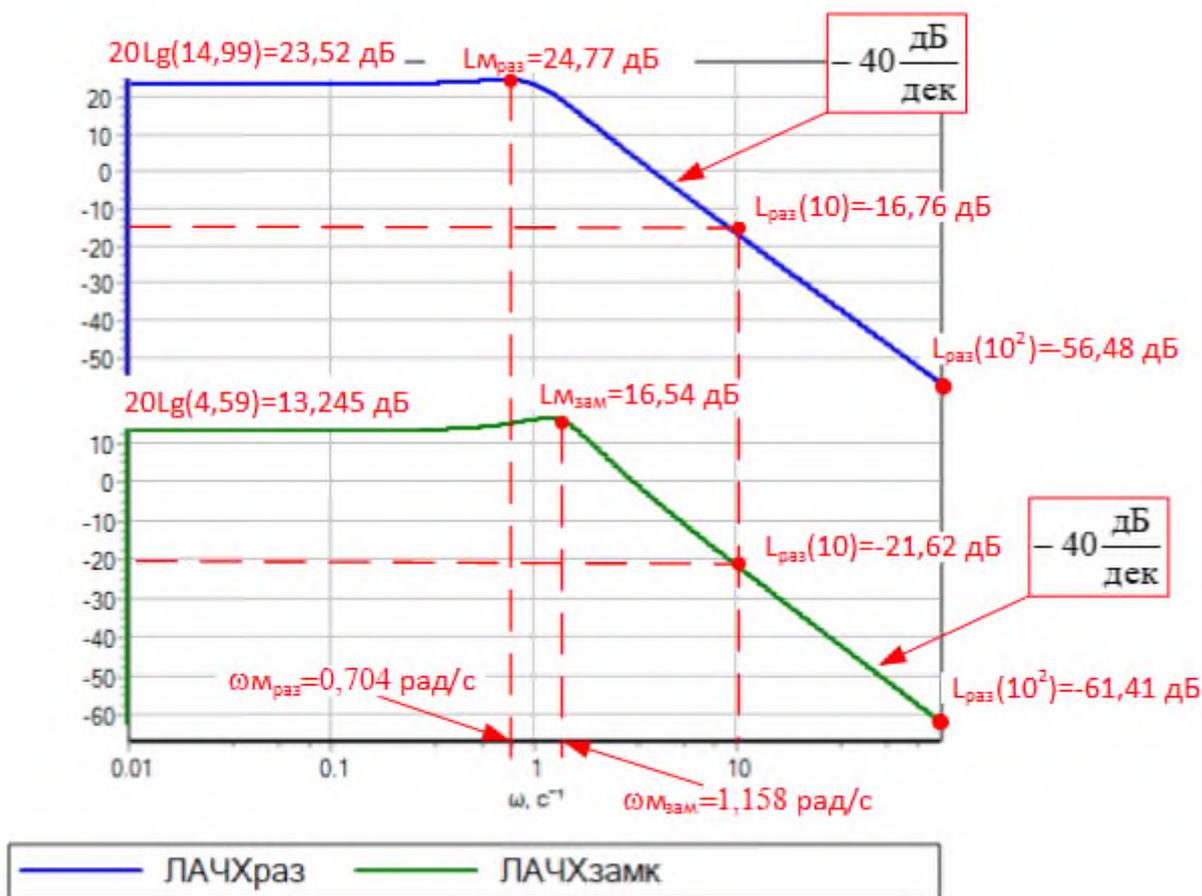


Рисунок 47 – Логарифмические частотный характеристики к задаче 9

Значение амплитуды ЛАЧХ в низкочастотной части соответствует коэффициентам усиления в разомкнутой ( $20Lg(14,99)=23,52$  дБ) и замкнутой ( $20Lg(4,59)=13,245$  дБ) системах. Наклон ЛАЧХ замкнутой и разомкнутой системой в высокочастотной части одинаковый и равен  $-40 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$ .

Фазочастотные характеристики разомкнутой и замкнутой систем отличаются в низкочастотной части, а в высокочастотной части значение фазы стремится к одному и тому же значению  $\varphi(10)_{\text{раз}} \approx \varphi(10)_{\text{зам}} \approx 174^\circ$ .

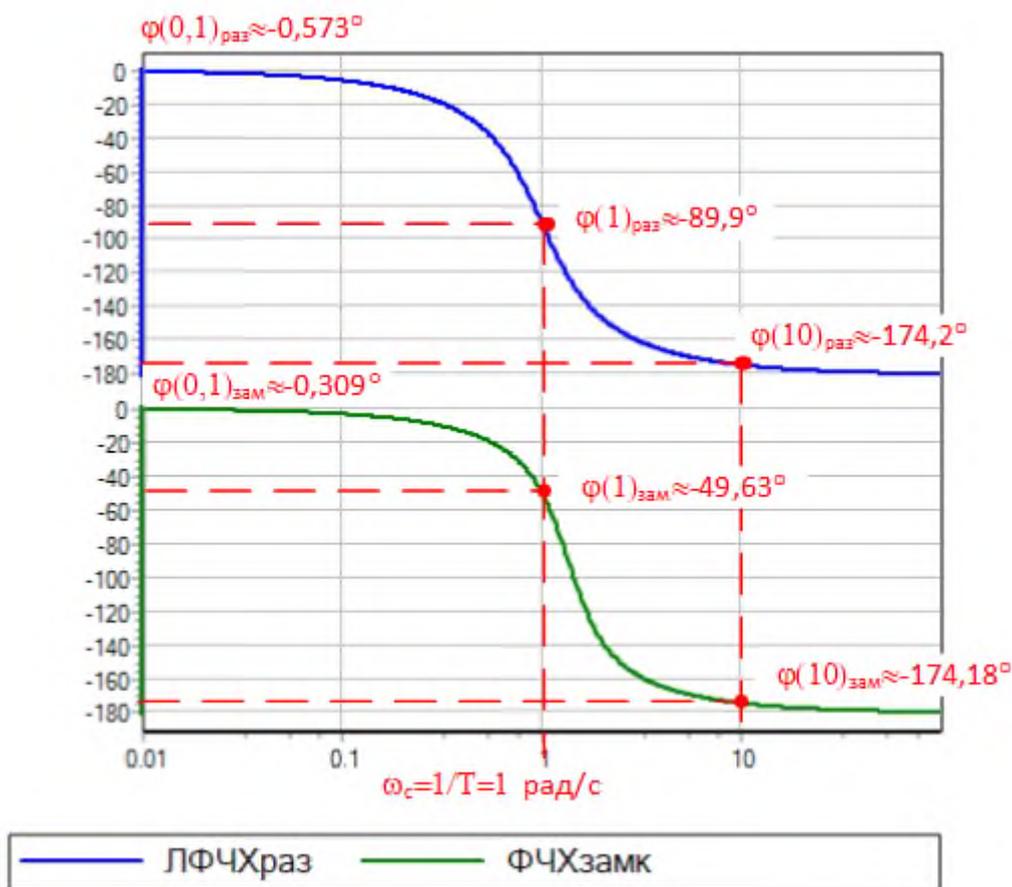


Рисунок 48 – Фазочастотные характеристики к задаче 9

### Задача 10

Исследовать систему, представленную на рисунке 49. В качестве корректирующего устройства использовать П-регулятор с коэффициентом усиления  $k_{\text{пил}}=1$  и ПИ-регулятор с передаточной функцией  $W(p)_{\text{пи}} = k_{\text{п}} + \frac{1}{T_{\text{и}} \cdot s} = 1 + \frac{1}{s}$ .

Входной сигнал  $X=7$  подается с задержкой 1 с. Возмущающий сигнал  $F=3$  подается с задержкой 10 с.

Необходимо построить переходные характеристики.

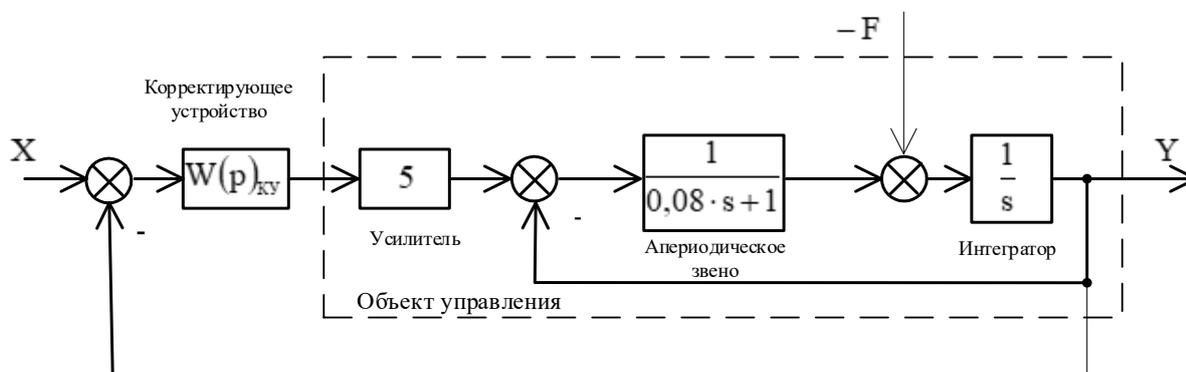


Рисунок 49 – Схема исследования к задаче 10

**Решение:**

Схема исследования объекта управления с П-, и ПИ-регуляторами представлена на рисунке 50. Объект управления выполнен в виде субмодели схема, которого представлена на рисунке 51.

Передаточная функция объекта управления с учетом единичной обратной связи определяется по формуле:

$$W(p)_{oy} = W(p)_y \cdot \frac{W(p)_A \cdot W(p)_И}{1 + W(p)_A \cdot W(p)_И}, \quad (21)$$

где  $W(p)_y$  – передаточная функция усилителя,  
 $W(p)_A$  – передаточная функция апериодического звена;  
 $W(p)_И$  – передаточная функция интегратора.

Окончательно передаточная функция объекта управления

$$W(p)_{oy} = 5 \cdot \frac{\frac{1}{0,08 \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{0,08 \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{s}} = \frac{5}{0,08 \cdot s^2 + s + 1}.$$

Передаточная функция замкнутой системы с П-регулятором определяется по формуле:

$$W(p)_{замП} = \frac{W(p)_П \cdot W(p)_{oy}}{1 + W(p)_П \cdot W(p)_{oy}}. \quad (22)$$

В числовой форме

$$W(p)_{замП} = \frac{1 \cdot \frac{5}{0,08 \cdot s^2 + s + 1}}{1 + 1 \cdot \frac{5}{0,08 \cdot s^2 + s + 1}} = \frac{5}{0,08 \cdot s^2 + s + 6}.$$

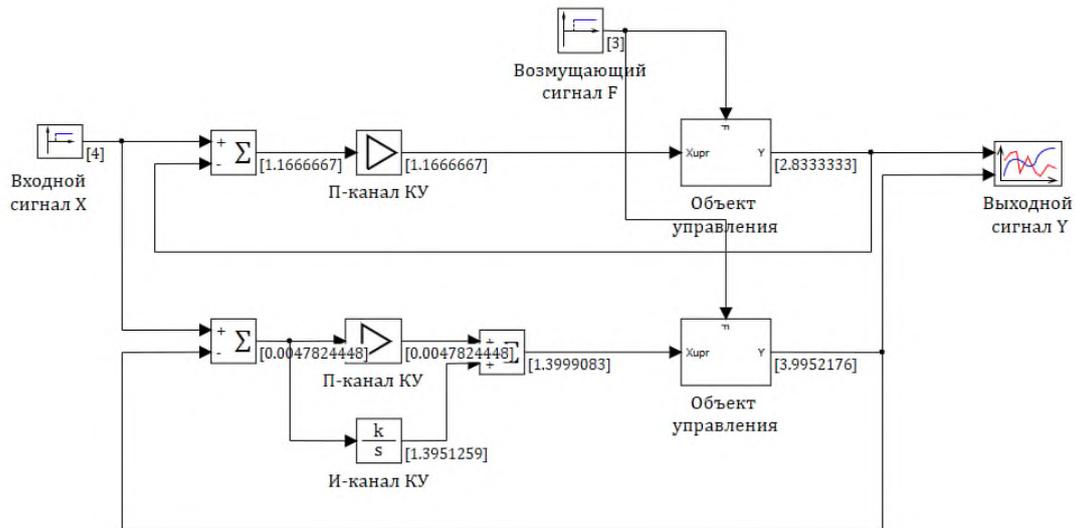


Рисунок 50 – Схема исследования П- и ПИ-регуляторов

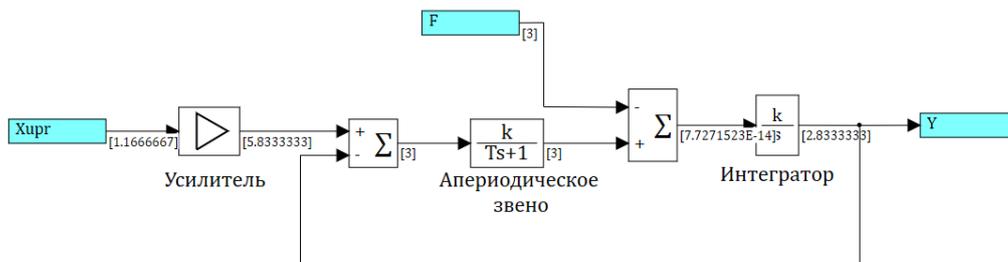


Рисунок 51 – Схема подсистемы «Объект управления»

Передаточная функция замкнутой системы с ПИ-регулятором определяется по формуле:

$$W(p)_{\text{замПИ}} = \frac{W(p)_{\text{ПИ}} \cdot W(p)_{\text{ОУ}}}{1 + W(p)_{\text{ПИ}} \cdot W(p)_{\text{ОУ}}} \quad (23)$$

В числовой форме

$$W(p)_{\text{замПИ}} = \frac{\frac{s+1}{s} \cdot \frac{5}{0,08 \cdot s^2 + s + 1}}{1 + \frac{s+1}{s} \cdot \frac{5}{0,08 \cdot s^2 + s + 1}} = \frac{5 \cdot s + 5}{0,08 \cdot s^3 + s^2 + 6 \cdot s + 5}$$

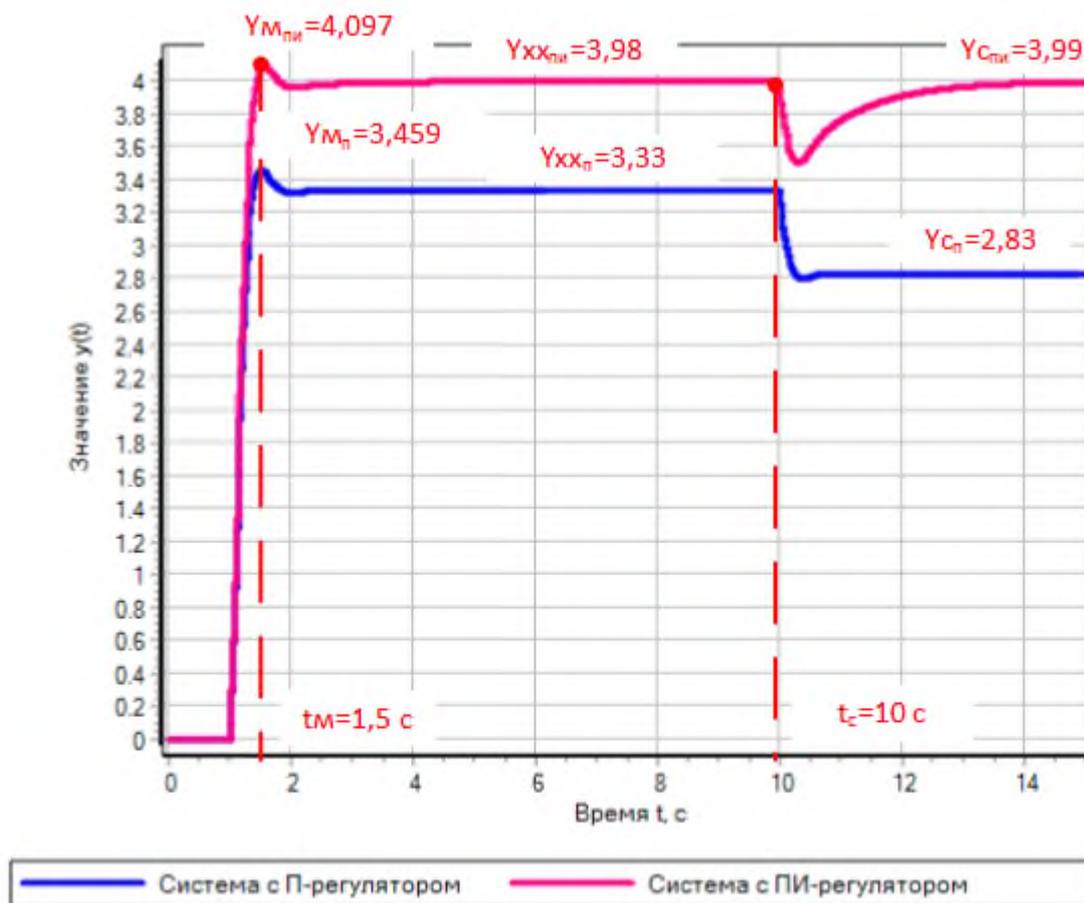


Рисунок 52 – Переходная функция для систем с П- и ПИ-регулятором

Переходные процессы систем с П- и ПИ-регуляторами представлены на рисунке 52.

Выходной сигнал  $Y_{\text{хх}_{\text{ПИ}}} = 3,98$  после приложения возмущающего сигнала практически не меняет значение  $Y_{C_{\text{ПИ}}} = 3,99$ . Что не скажешь о системе в П-регулятором, где выходной сигнал  $Y_{\text{хх}_{\text{П}}} = 3,33$  после приложения возмущающего сигнала уменьшилась до значение  $Y_{C_{\text{П}}} = 2,83$ . Таким образом, ошибка регулирования в системе с П-регулятором составит:

$$\Delta = Y_{\text{хх}_{\text{П}}} - Y_{C_{\text{П}}} = 3,33 - 2,83 = 0,5.$$

Таким образом, анализ графиков показывает, что ПИ-регулятор позволяет обеспечить нулевую ошибку регулирования.

## Глоссарий

**Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)** - зависимость амплитуд выходных и входных колебаний от частоты.

**Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ)** – определяется как годограф комплексного аргумента, построенный на комплексной плоскости при изменении частоты от нуля до бесконечности.

**Астатизм** – свойство системы автоматического управления устранять ошибку при постоянном внешнем воздействии.

**Коэффициент усиления** – это отношение выходной координаты к входной в установившемся режиме.

**Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ)** - зависимость модуля коэффициента усиления от частоты в логарифмическом масштабе.

**Обратная связь** – это канал информации по которому передается в обратном направлении по сравнению с управляющим воздействием.

**Отрицательная обратная связь** – это вид обратной связи, при котором изменение выходного сигнала передается на вход с целью компенсации.

**Разомкнутая система** - система содержащая только прямой канал передачи сигналов от устройства управления к объекту управления.

**Система автоматического управления (САУ)** – комплекс устройств, обеспечивающих автоматическое изменение координат объекта управления с целью установления желаемой динамики.

**Точность систем автоматического управления** – это степень приближения реального управляемого процесса к требуемому.

## Список использованных источников

1. Гайдук, А. Р. Применение программного пакета SimInTech для изучения теории автоматического управления : учебное пособие / А. Р. Гайдук, Т. А. Пьявченко ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Южный федеральный университет, 2021. – 133 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=691095>. – ISBN 978-5-9275-3862-1.
2. Карташов, Б. А. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов, О. С. Козлов, Е.А. Шабаев, А. М. Щекатуров. Москва : ДМК пресс, 2017. – 424 с. – ISBN 978-5-97060-482-3.
3. Ким, Д. П. Сборник задач по теории автоматического управления. Линейные системы : учебное пособие / Д. П. Ким, Н. Д. Дмитриева. - Москва : Физматлит, 2007. - 168 с. - URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=69282>
4. Кузьмин, А. В. Теория систем автоматического управления [Текст] : учеб. для вузов / А. В. Кузьмин, А. Г. Схиртладзе. - Старый Оскол : ТНТ, 2009. - 224 с. - ISBN 978-5-94178-189-8
5. Цветкова, О.Л. Теория автоматического управления : учебник / О. Л. Цветкова. - Москва; Берлин : Директ-Медиа, 2016. - 207 с. - URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=443415>

МАЖИРИНА РАИСА ЕВГЕНЬЕВНА

## ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Практикум

для студентов направления подготовки

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,

всех форм обучения

Подписано в печать 26.12.2023 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 268	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 3,06

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: [nf@misis.ru](mailto:nf@misis.ru)

Контактный тел. 8 (3537) 679729.

