

Министерство образования и науки
Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»

Новомосковский институт (филиал)

Ляшенко А.И., Маслова Н.В., Лопатин А.Г.

**Учебно-методические указания к
курсовому проекту по ТАУ
Проектирование одноконтурной САР в SimInTech**

Новомосковск
2022

УДК 681.5
ББК 32.965
Т 338

Рецензент:
канд. тех. наук _____
(НИ (филиал) ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева)

Авторы: Ляшенко А.И., Маслова Н.В., Лопатин А.Г.

Т 338 «Учебно-методические указания к курсовому проекту по ТАУ. Проектирование одноконтурной САР в SimInTech» / ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал), Авторы: Ляшенко А.И., Маслова Н.В., Лопатин А.Г. Новомосковск, 2022. 120 с.

В пособии приведены методические указания для выполнения курсового проекта по дисциплине «Теория автоматического управления». Сборник предназначен для студентов по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств». Курсовой проект выполняется на компьютере с использованием моделирующей программы SimInTech.

Табл. 22 Ил. 94. Библиогр.: 18 назв.

УДК 681.5

© ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Новомосковский институт (филиал), 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Задание на специальную разработку	5
2 Определение передаточной функции датчика	13
3 Определение передаточной функции объекта	23
4 Проектирование структурной схемы системы регулирования	35
5 Определение настроек ПИД-регулятора различными методами	43
6 Сравнительный анализ качества регулирования	62
Приложение А. Пример выполнения курсового проекта	66
Библиографический список.....	118

Введение

Предлагаемое учебное пособие содержит подробные рекомендации для выполнения курсового проекта по дисциплине «Теория автоматического управления» с использованием моделирующей программы SimInTech. Пособие предназначено для студентов по направлению подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

При овладении материалом данного учебного пособия, бакалавр по автоматизации технологических процессов и производств сможет использовать полученные знания при дальнейшем обучении, изучать системы автоматического управления, проектировать и моделировать их работу в теории и на практике.

Решение задач анализа существующих и синтеза новых систем автоматического регулирования (САР) невозможно без применения средств вычислительной техники. Процесс становится наиболее продуктивным с применением систем компьютерного моделирования, например, SimInTech.

1 Задание на специальную разработку

Цель: с использованием возможностей компьютерного моделирования приобрести навыки исследования свойств объекта управления, разработки схемы управления, расчета и оптимизации параметров настройки ПИ- или ПИД-регулятора в составе одноконтурной САР.

Задание к курсовому проекту:

1. По заданным в таблицах 1.1-1.5 экспериментальным точкам построить кривую разгона датчика, аппроксимировать ее графическим методом и определить динамические характеристики в виде передаточной функции, параметры которой уточнить численным методом.
2. По заданным в таблицах 1.6-1.10 экспериментальным точкам построить кривую разгона объекта управления, аппроксимировать ее графическим методом и определить динамические характеристики в виде передаточной функции, параметры которой уточнить численным методом.
3. С учетом заданной передаточной функции регулирующего клапана из таблицы 1.11 спроектировать структурную схему одноконтурной САР.
4. Для заданного в таблице 1.12 закона регулирования и критерия качества переходного процесса рассчитать приближенные настройки регулятора методами Ziegler-Nichols. Оценить качество регулирования при отработке возмущения по заданию и при отработке внешнего возмущения на входе объекта.
5. Решить задачу параметрической оптимизации настроек регулятора численным методом, реализованным в программе SimInTech.
6. Провести сравнительный анализ качества переходных процессов в синтезированной САР с различными настройками регулятора при отработке возмущения по заданию и при отработке внешнего возмущения на входе объекта.

Варианты по таблицам 1.1-1.5, 1.6-1.10, 1.11 выбираются согласно порядковому номеру фамилии студента по списку, прибавив единицу, т.е. № п/п 1 – вариант 2, № п/п 2 – вариант 3 и т.д. Варианты по таблице 1.12 выбираются по последней цифре номера зачетной книжки студента. Четное число – вариант 1, нечетное число – вариант 2.

Таблица 1.1 – Значения $y(t_i)$ для кривой разгона датчика

t_i № вар.	0	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	4.0	5.0	6.0	6.5	7.5
1	0	0.228	0.321	0.406	0.594	0.698	0.732	0.883	0.936	0.95	0.95	0.95
2	0	0.16	0.25	0.34	0.44	0.55	0.63	0.75	0.82	0.85	0.85	0.85
3	0	0.375	0.525	0.6	0.75	0.81	0.855	0.9	0.92	0.92	0.92	0.92
4	0	0.44	0.56	0.64	0.8	0.86	0.92	$\frac{0.94}{5}$	0.965	0.965	0.965	0.965
5	0	0.54	0.7	0.8	0.88	0.91	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96

Таблица 1.2 – Значения $y(t_i)$ для кривой разгона датчика

t_i № ва р.	0	0.4	0.65	0.9	1.4	1.8	2.4	3.8	4.8	5.6	6.0	6.5
6	0	0.2	0.32	0.45	0.6	0.69	0.815	0.935	0.97	0.99	1	1
7	0	0.25	0.35	0.44	0.6	0.72	0.83	0.92	0.96	0.97	0.98	0.98
8	0	0.1	0.21	0.3	0.45	0.5	0.65	0.75	0.8	0.82	0.84	0.84
9	0	0.2	0.35	0.53	0.75	0.85	0.9	0.95	0.98	0.99	0.99	0.99
10	0	0.12	0.2	0.3	0.45	0.55	0.65	0.8	0.87	0.89	0.9	0.9

Таблица 1.3 – Значения $y(t_i)$ для кривой разгона датчика

t_i № вар.	0	0.6	0.85	1.1	1.7	2.2	2.8	4.4	5.4	6.6	7.0
11	0	0.35	0.5	0.6	0.735	0.8	0.95	1.1	1.16	1.2	1.2
12	0	0.35	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3
13	0	0.18	0.34	0.42	0.63	0.72	0.82	0.95	0.99	0.99	0.99
14	0	0.7	0.9	1	1.15	1.18	1.19	1.2	1.2	1.2	1.2
15	0	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	1	1	1	1

Таблица 1.4 – Значения $y(t_i)$ для кривой разгона датчика

t_i № вар.	0	2.5	4	5.5	6.2	7.5	8	10	12	14	16	18	20
16	0	0.46	0.6	0.75	0.8	0.87	0.9	0.95	0.97	0.98	0.99	1	1
17	0	0.7	1	1.2	1.22	1.3	1.35	1.45	1.45	1.45	1.5	1.5	1.5
18	0	0.55	0.63	0.79	0.84	0.91	0.94	0.98	0.99	1	1.01	1.02	1.02
19	0	0.45	0.59	0.74	0.79	0.85	0.9	0.95	0.98	0.99	1	1	1
20	0	0.5	0.7	0.79	0.84	0.91	0.92	0.98	0.99	1.01	1.02	1.03	1.03

Таблица 1.5 – Значения $y(t_i)$ для кривой разгона датчика

t_i № вар.	0	0.5	0.78	1.1	1.7	2.3	2.9	4.5	5.6	6.7
21	0	0.27	0.36	0.5	0.65	0.7	0.8	0.95	1	1
22	0	0.3	0.51	0.65	0.82	0.96	0.98	1.05	1.1	1.1
23	0	0.17	0.33	0.43	0.62	0.71	0.78	0.89	0.95	0.95
24	0	0.7	0.9	1	1.15	1.18	1.19	1.2	1.2	1.2
25	0	0.25	0.35	0.44	0.6	0.72	0.83	0.92	0.96	0.97

Таблица 1.6 – Значения $y(t_i)$ для кривой разгона объекта

t_i № вар.	0	4	8	12	14	16	20	32	48	64	80	112	130	150
1	0	0.1	0.5	0.98	1.3	1.6	2.2	3.6	4.8	5.6	6	6.2	6.2	6.2
2	0	0.08	0.3	0.8	1.06	1.35	2	3.4	4.7	5.8	6.5	7	7	7
3	0	0.02	0.1	0.4	0.7	1.1	1.7	3.5	5.3	6.2	6.8	7.1	7.1	7.1
4	0	0	0.1	0.4	0.65	0.9	1.5	3.1	4.5	5.6	6.2	6.8	6.8	6.8
5	0	0.1	0.3	0.6	0.8	1	1.5	2.8	4.1	5.3	5.7	6.3	6.3	6.3

Таблица 1.7 – Значения $y(t_i)$ для кривой разгона объекта

t_i № вар.	0	4	8	13	17	19	22	35	51	68	88	117	132	145
6	0	0.12	0.32	0.58	0.9	1.12	1.4	2.6	4	4.9	5.6	6	6	6
7	0	0.05	0.1	0.4	0.65	0.79	1	1.9	2.9	3.8	4.5	4.9	5.1	5.1
8	0	0.02	0.12	0.53	1.01	1.25	1.65	3.3	5.1	6.4	6.9	7.4	7.5	7.5
9	0	0	0.11	0.5	0.9	1.1	1.4	2.8	4.3	5.5	6.5	7.2	7.4	7.4
10	0	0.09	0.46	0.98	1.5	1.75	2.1	3.6	4.8	5.6	6	6.25	6.25	6.25

Таблица 1.8 – Значения $y(t_i)$ для кривой разгона объекта

t_i № вар.	0	4.5	9	12	14	20	38	51	69	78	90	130	155
11	0	1.09	2.46	3.2	3.58	4.48	5.62	5.86	5.96	5.98	5.99	6	6
12	0	0.15	0.52	0.82	1.03	1.69	3.4	4.24	4.99	5.24	5.48	5.85	5.85
13	0	0.71	2.11	3.12	3.8	5.54	8.55	9.38	9.81	9.89	9.95	10	10
14	0	0.07	0.48	0.65	0.75	1.02	1.52	1.72	1.86	1.9	1.94	2	2
15	0	0.1	0.34	0.54	0.69	1.15	2.3	2.84	3.25	3.37	3.47	3.6	3.6

Таблица 1.9 – Значения $y(t_i)$ для кривой разгона объекта

t_i № вар.	0	4.8	9.6	14.4	16.8	19.2	24	38.4	57.6	76.8	96	134.4	156	180
16	0	0.12	0.6	1.18	1.56	1.92	2.64	4.32	5.76	6.72	7.2	7.44	7.44	7.44
17	0	0.04	0.15	0.4	0.53	0.675	1	1.7	2.35	2.9	3.25	3.5	3.5	3.5
18	0	0.04	0.2	0.8	1.4	2.2	3.4	7	10.6	12.4	13.6	14.2	14.2	14.2
19	0	0.24	1.2	2.36	3.12	3.84	5.28	8.64	11.52	13.44	14.4	14.88	14.88	14.88
20	0	0.05	0.15	0.3	0.4	0.5	0.75	1.4	2.05	2.65	2.85	3.15	3.15	3.15

Таблица 1.10 – Значения $y(t_i)$ для кривой разгона объекта

t_i № вар.	0	3.5	5	7.5	9	12	20	32	59	92	134	145	160
21	0	0.01	0.02	0.2	0.4	0.6	1.1	1.55	2.4	2.8	3.1	3.1	3.1
22	0	0.02	0.05	0.1	0.2	0.35	0.75	1.35	2.6	3.3	3.6	3.6	3.6
23	0	0.01	0.025	0.05	0.1	0.175	0.375	0.675	1.3	1.65	1.8	1.8	1.8
24	0	0.03	0.075	0.15	0.3	0.525	1.125	2.025	3.9	4.95	5.4	5.4	5.4
25	0	0.012	0.024	0.24	0.48	0.72	1.32	1.86	2.88	3.36	3.72	3.72	3.72

Таблица 1.11 – Параметры передаточной функции регулирующего клапана

$$W(s) = k \cdot \frac{(T_1s+1)}{T_2s^2+T_3s+1}$$

№ вар.	k	T₁	T₂	T₃
1	1	1,07	2,5	2,6
2	0,45	2	3	3,9
3	1	3.10	11.1	3.9
4	0.65	2.31	3.3	2.5
5	0.75	2.55	10.6	6
6	1	0.51	1.5	5.7
7	0.75	1.8	10	5
8	0.85	2.8	12	4
9	0.95	3.05	13	5
10	1	2.05	9.5	5.2
11	1	3.55	14.1	3.6
12	0.95	2.95	1.1	2.6
13	0.45	3.05	11	6
14	1	0.15	0.1	0.2

Окончание табл. 1.11

№ вар.	k	T₁	T₂	T₃
15	0.65	0.5	0.15	0.8
16	0.75	0.8	1.7	2.2
17	0.85	1	0.1	0.5
18	0.95	0.1	0.1	0.9
19	1	3.35	6.9	3.9
20	0.75	2.01	5	3.8
21	0.95	3.89	3	3
22	1	2.66	1.6	2.1
23	0.5	2.55	17.8	3.9
24	1	3.5	1.3	3.1
25	0.85	2.87	1.9	3.5

Таблица 1.12 – Тип регулятора и критерий оптимизации его настроек

№ варианта	Закон регулирования	Критерий настройки регулятора
1	ПИД	$I_{кр} = \int_0^t e^2(t)dt$
2	ПИ	$I_{кр} = \int_0^t e^2(t)dt$

2 Определение передаточной функции датчика

В качестве передаточной функции датчика будем использовать инерционное звено первого порядка:

$$W_d(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1}, \quad (2.1)$$

где k - коэффициент усиления; T - постоянная времени.

Для определения приближенных значений параметров передаточной функции датчика будем использовать графический метод аппроксимации кривой разгона [1, 2] (рисунок 2.1).

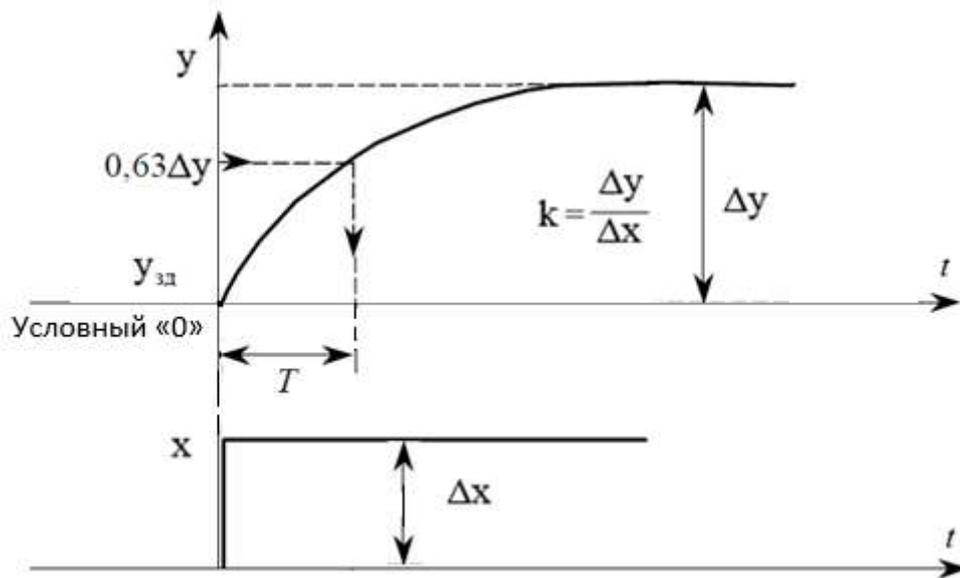


Рисунок 2.1 - Обработка кривой разгона звеном 1-го порядка графическим методом (при подаче единичного ступенчатого возмущения $\Delta x=1$)

Для уточнения динамических свойств кривой разгона датчика воспользуемся встроенным блоком SimInTech – **Оптимизатор**. В качестве критерия аппроксимации кривой разгона датчика выберем:

$$I = \int_0^t (y_э - y_p)^2 dt \rightarrow \min \quad (2.2)$$

где $y_э$ - заданные по таблицам 1.1-1.5 значения выходной переменной датчика, полученные экспериментально, y_p - значения выходной переменной датчика, полученные в результате расчета средствами SimInTech.

Оптимизируемых параметров для передаточной функции датчика будет два: коэффициент усиления k и постоянная времени T . В качестве начальных приближений будем использовать найденные графическим методом параметры.

2.1. Запустите среду **SimInTech**.

2.2. Создайте новый проект «Файл → Новый проект → Схема модели общего вида».

2.3. Настройте расчетные параметры схемы. Установите *Начальный шаг интегрирования* **startstep=0**, *Конечное время расчета* **endtime** выбирается из соображения того, чтобы переходные процессы успевали завершиться согласно варианту, *Максимальный шаг* **hmax=0.01**, *Минимальный шаг* **hmin=0.01**, *Метод интегрирования* **intmet** выберите **Адаптивный 1**. Остальные настройки оставьте по умолчанию.

Вставьте скриншот параметров проекта в пояснительную записку к курсовому проекту.

2.4. Соберите расчетную схему для задания кривой разгона датчика по экспериментальным исходным данным (рисунок 2.2).

Понадобятся блоки:

- кусочно-линейная функция 1 шт. (вкладка **Источники** → **Кусочно-линейная**);
- график 1 шт. (вкладка **Вывод данных** → **Временной график**).

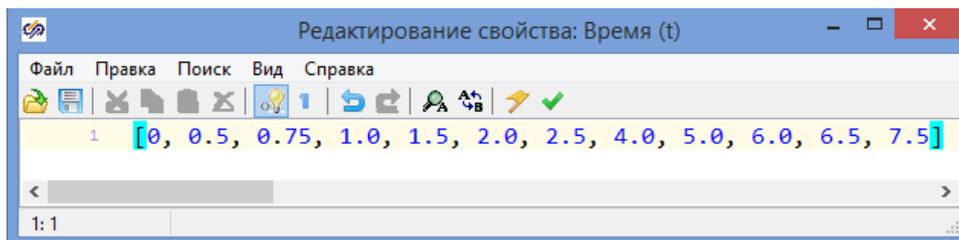
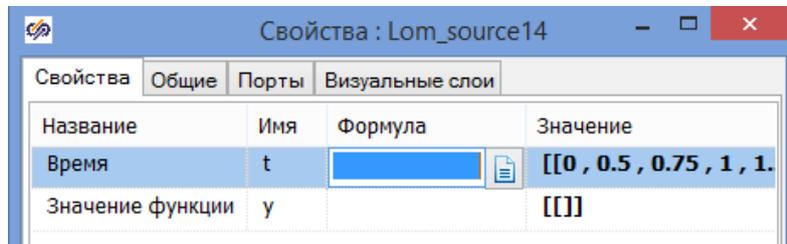


Рисунок 2.2 – Схема для задания кривой разгона датчика таблично

Вставьте скриншот расчетной схемы в пояснительную записку к курсовому проекту.

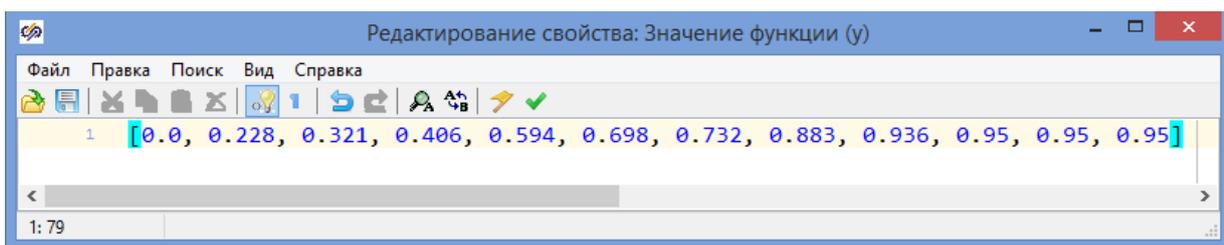
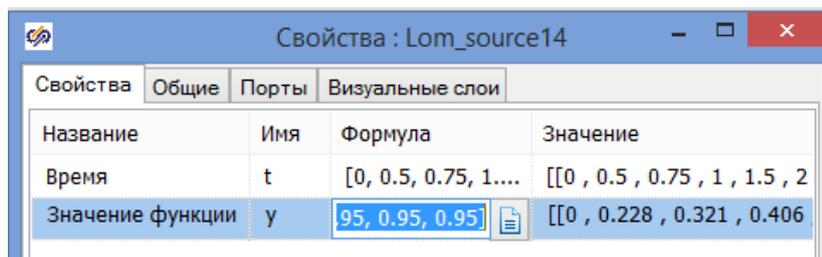
В свойствах блока **Кусочно-линейная** согласно своему варианту задайте исходные данные. Для этого в строке «Время» t нажмите левой кнопкой мыши в

поле «Формула», после чего еще раз нажмите левой кнопкой мыши на появившуюся кнопку . Откроется окно «Редактирование свойства», в котором необходимо ввести заданную матрицу:



После ввода нажать кнопку  (Применить и закрыть).

Далее повторить то же самое для строки «Значение функции» y.



Сделайте скриншот свойств блока Кусочно-линейная и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту.

2.5. Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов. Обработайте в первом приближении полученную кривую разгона согласно рисунку 2.1. Определите численные значения для переменных k, T.

Вставьте график с результатами аппроксимации в пояснительную записку к курсовому проекту.

2.6. Доработайте расчетную схему для приближенной обработки кривой разгона датчика (рисунок 2.3). Необходимо добавить блоки:

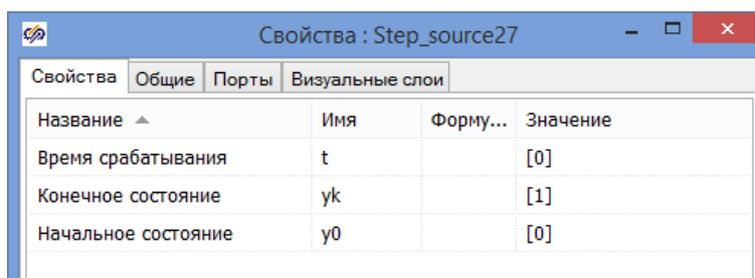
- ступенька 1 шт. (вкладка **Источники** → **Ступенька**);
- апериодическое звено 1-го порядка 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Инерционное звено 1-го порядка**).



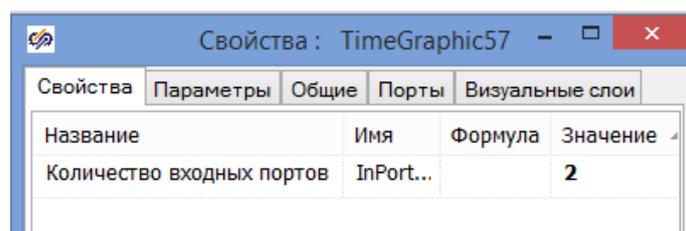
Рисунок 2.3 – Схема для аппроксимации кривой разгона датчика

Вставьте скриншот расчетной схемы в пояснительную записку к курсовому проекту.

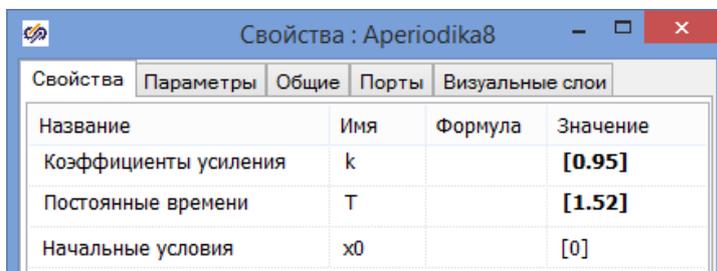
В свойствах блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[1]$, а для строки «Время срабатывания» в столбце «Значение» задайте $t=[0]$.



В свойствах блока **Временной график** задайте два входных порта.



В свойствах блока **Инерционное звено 1-го порядка** в строке «Коэффициенты усиления» в столбце «Значение» задайте в численном виде рассчитанное значение переменной k , а в строке «Постоянные времени» рассчитанное значение переменной T .

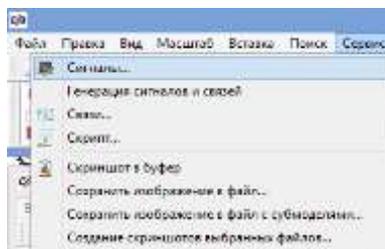


Свойства	Имя	Формула	Значение
Коэффициенты усиления	k		[0.95]
Постоянные времени	T		[1.52]
Начальные условия	x0		[0]

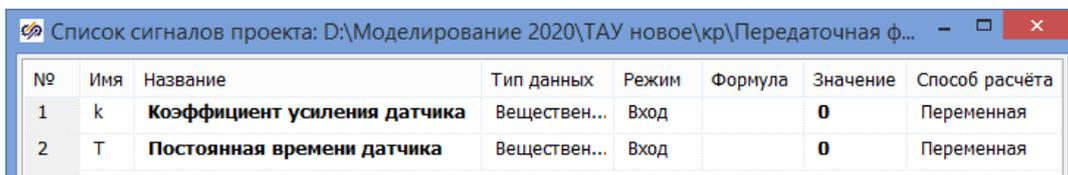
2.7. Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов.

Вставьте полученный график в пояснительную записку к курсовому проекту и зафиксируйте найденные приближенные параметры передаточной функции датчика.

2.8. Задайте оптимизируемые параметры как глобальные сигналы проекта. Для этого в **Главном меню** нужно выбрать: «Сервис → Сигналы...»:



Далее в диалоговом окне **Редактора сигналов проекта** создайте два сигнала (нажать в нижней части на кнопку **Добавить сигнал** ) и настройте их атрибуты:



№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k	Коэффициент усиления датчика	Веществен...	Вход		0	Переменная
2	T	Постоянная времени датчика	Веществен...	Вход		0	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту.

2.9. Доработайте расчетную схему для оптимальной обработки кривой разгона датчика (рисунок 2.4). Необходимо добавить блоки:

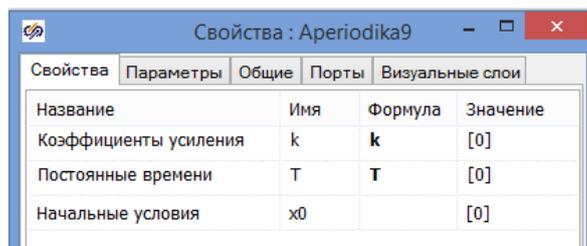
- элемент сравнения 1 шт. (вкладка **Операторы** → **Сравнивающее устройство**);
- степенная функция 1 шт. (вкладка **Функции** → **Степенная функция**);
- интегратор 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Интегратор**);
- апериодическое звено 1-го порядка 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Инерционное звено 1-го порядка**);
- оптимизатор 1 шт. (вкладка **Анализ и оптимизация** → **Оптимизатор**);
- демультиплексор 1 шт. (вкладка **Векторные** → **Демультиплексор**);
- переменная 2 шт. (вкладка **Сигналы** → **Запись в список сигналов**).



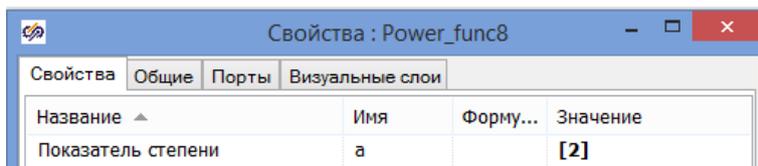
Рисунок 2.4 – Схема для аппроксимации кривой разгона датчика средствами SimInTech

Вставьте скриншот расчетной схемы в пояснительную записку к курсовому проекту.

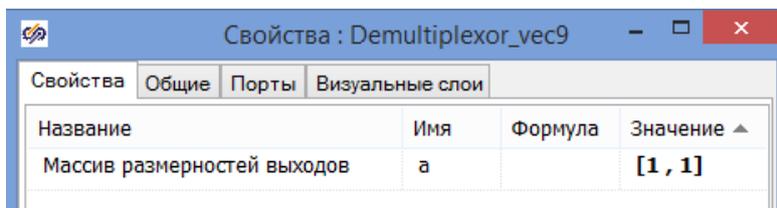
В свойствах нижнего блока **Инерционное звено 1-го порядка** в строке «Кoeffициенты усиления» вместо численного значения в столбце «Формула» задаем переменную k, а в строке «Постоянные времени» задаем переменную T.



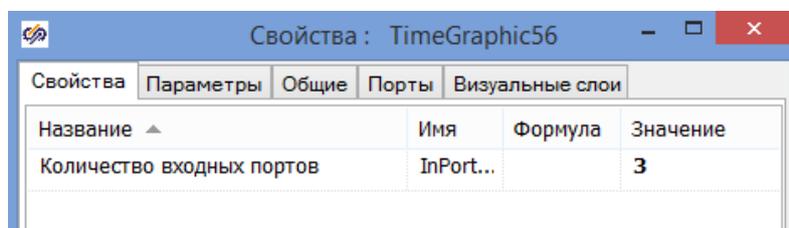
В свойствах блока **Степенная функция** задайте значение показателя степени $a=[2]$.



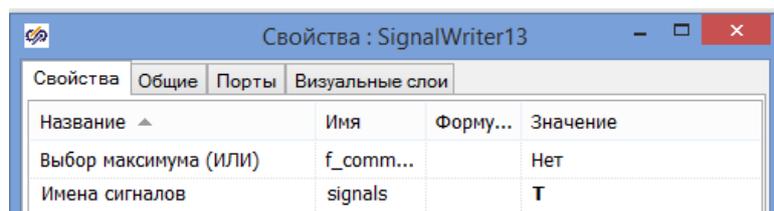
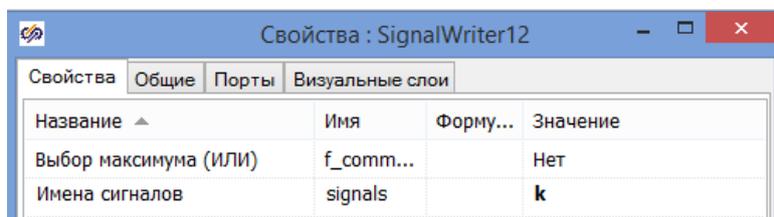
В свойствах блока **Демультимплексор** задайте массив размерностей для двух выходов.



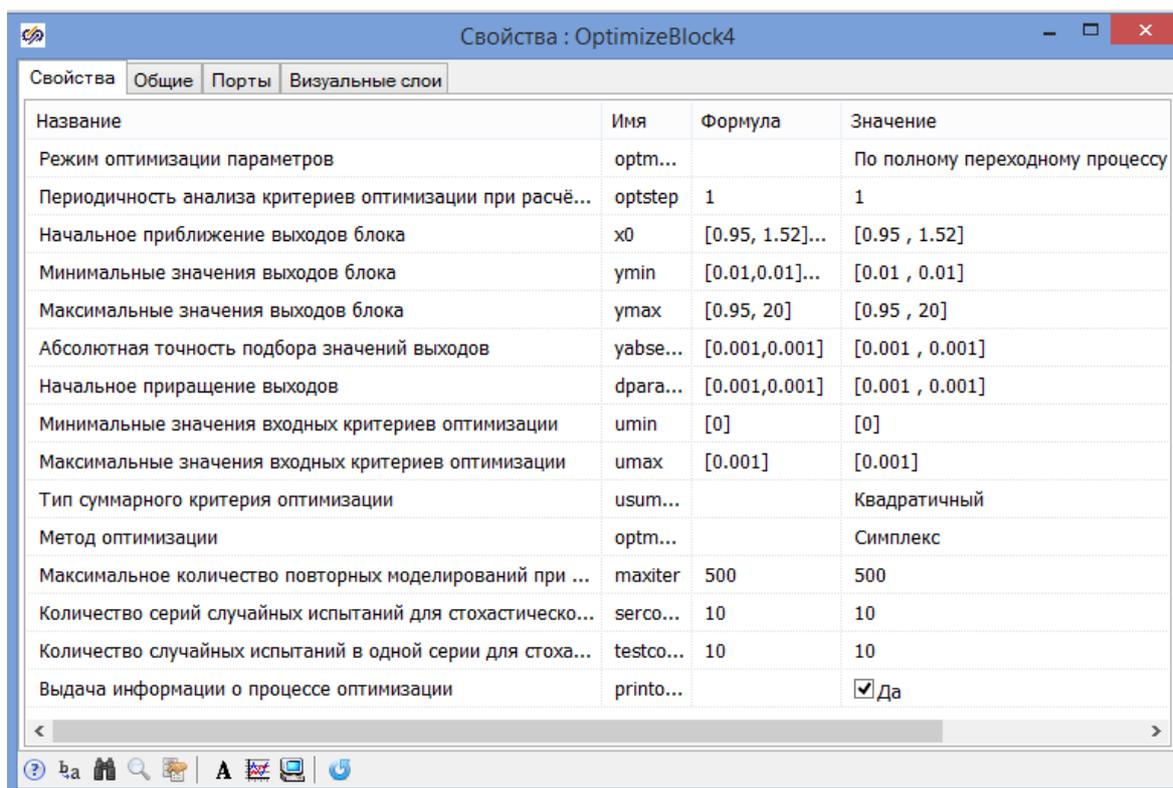
В свойствах блока **Временной график** задайте три входных порта.



В свойствах двух блоков **Запись в список сигналов** необходимо ввести для строки «Имена сигналов» в столбце «Значение» две переменные k, T.



Перейдите в свойства блока **Оптимизатор**:



В строке «Режим оптимизации параметров» необходимо выбрать значение - **По полному переходному процессу**, т.к. критерий оптимизации (2.2) вычисляется на протяжении всего переходного процесса.

В строке «Начальное приближение выходов блока» укажите вектор начальных значений оптимизируемых параметров – приближенные k и T , найденные при ручной аппроксимации согласно своему варианту **[0.95, 1.52]**.

Свойствами в строках «Минимальные значения выходов блока» и «Максимальное значение выходов блока» можно ограничить диапазон поиска оптимальных параметров системы. В строке «Минимальные значения выходов блока» задайте **[0.01, 0.01]**, а в строке «Максимальные значение выходов блока» задайте **[0.95, 20]** (0.95 - предельное значение коэффициента усиления, полученное при обработке кривой разгона вручную, 20 - заведомо большее значение постоянной времени, полученное при обработке кривой разгона вручную).

В строке «Абсолютная точность подбора значений выходов» укажите – **[0.001, 0.001]**.

В строке «Начальное приращение выходов» задайте первый шаг приращения при подборе значений оптимума. Чем больше шаг, тем быстрее меняются подбираемые значения в начале поиска оптимума, но при этом возникает вероятность пропустить оптимальные значения. Вводим [0.001, 0.001].

В строке «Минимальные значения входных критериев оптимизации» задайте [0], в строке «Максимальные значения входных критериев оптимизации» задайте [0.001], т.к. критерий (2.2), по условию задачи оптимизации, должен быть минимальный.

В строке «Тип суммарного критерия оптимизации» нужно выбрать метод свертывания критериев для формирования целевой функции. Укажите **Квадратичный**.

В строке «Метод оптимизации» нужно выбрать численный метод оптимизации - **Симплекс**, который использует метод «деформируемого многогранника» Нелдера и Мида.

В строке «Выдача информации о процессе оптимизации» необходимо выбрать значение – **Да**, чтобы в конце оптимизации программа выдала результаты своей работы.

Остальные свойства можно оставить по умолчанию.

Вставьте скриншот с настройками Оптимизатора в пояснительную записку к курсовому проекту.

2.10. Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов. Для наглядности работы блока оптимизации можно открыть блок **Временной график**. Схема SimInTech будет рассчитываться несколько раз в динамике до получения оптимального результата. По окончании в окне сообщений, в нижней части схемного окна должна появиться информация об оптимизированных параметрах и достигнутом критерии оптимизации.

2.11. После завершения моделирования, открыв свойства блоков **Инерционное звено 1-го порядка**, либо открыв **Редактор сигналов проекта**, можно увидеть коэффициент усиления и постоянную времени для датчика.

Свойства			
Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение
Коэффициенты усиления	k	k	[0.95]
Постоянные времени	T	T	[1.6118717]
Начальные условия	x0		[0]

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k	Коэффициент усиления датчика	Веществен...	Вход		0.95	Переменная
2	T	Постоянная времени датчика	Веществен...	Вход		1.6118717	Переменная

Вставьте полученный график в пояснительную записку к курсовому проекту и зафиксируйте уточненные параметры передаточной функции датчика.

Сравните результаты ручной аппроксимации и аппроксимации средствами SimInTech.

2.12. Сохраните проделанный этап курсовой работы в своей рабочей папке. Для этого в **Главном меню Главного окна SimInTech** выбрать пункт «**Файл → Сохранить проект как...**» и далее, используя стандартный диалог, сохранить файл, указав соответствующий путь и имя файла – «**Передаточная функция датчика.prt**».

3 Определение передаточной функции объекта

В качестве передаточной функции объекта управления будем использовать инерционное звено второго порядка:

$$W_{oy}(s) = \frac{k_1}{T_1 \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{T_2 \cdot s + 1}, \quad (3.1)$$

где k_1 - коэффициент усиления; T_1, T_2 - постоянные времени.

Для определения приближенных значений параметров передаточной функции объекта будем использовать графический метод аппроксимации кривой разгона [1, 2] (рисунок 3.1).

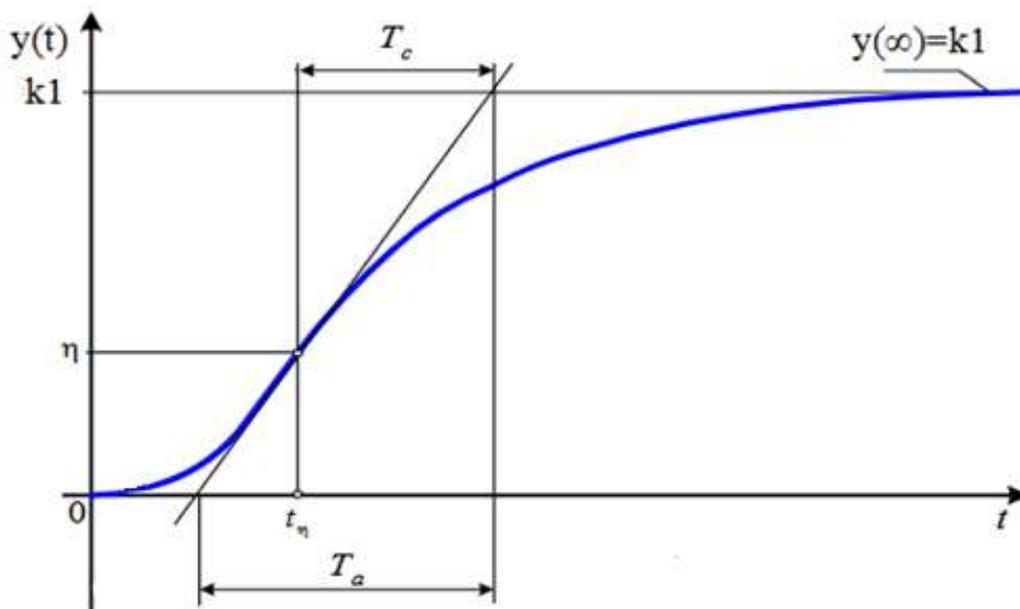


Рисунок 3.1 – Обработка кривой разгона звеном 2-го порядка графическим методом (при подаче единичного ступенчатого возмущения $\Delta x=1$)

Коэффициент усиления k_1 определяется обычными приемами по переходной функции. Необходимо решить задачу нахождения постоянных времени T_1 и T_2 .

Предварительно на графике переходной функции определяется точка перегиба η , в которой производная $dy(t)/dt$ максимальна. Через нее проводится касательная к графику переходной функции до пересечения с осью абсцисс и линией $y(\infty)=k_1$ (при единичном ступенчатом возмущении).

Далее по графику находят величины t_η, T_a, T_c . После чего, например, с помощью номограмм, приведенных на рисунке 3.2, определяются постоянные времени T_1 и T_2 .

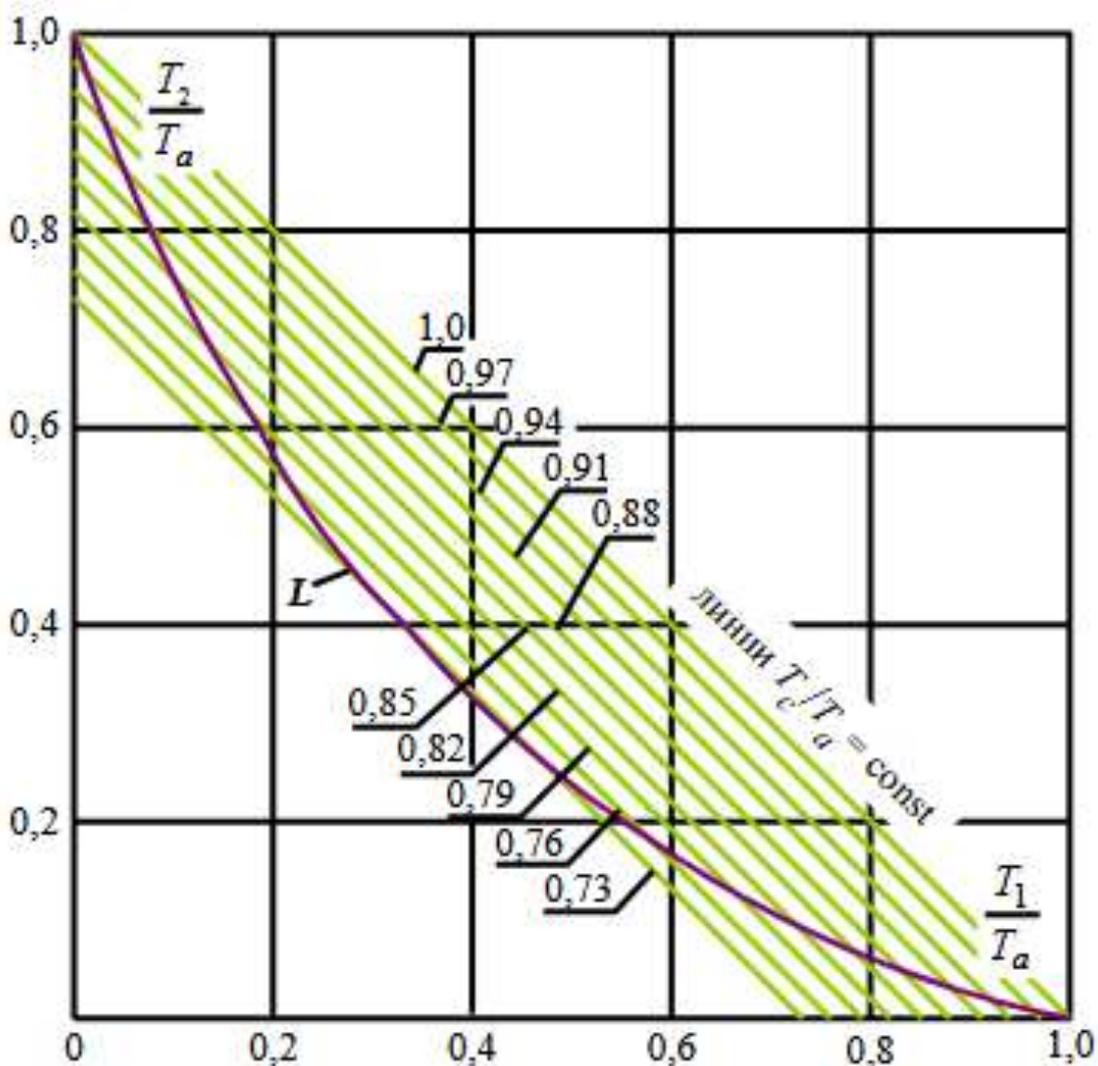


Рисунок 3.2 – Номограммы для нахождения постоянных времени T_1 , T_2 по Ольденбургу и Сарториусу [1, 2]

По найденной величине отношения T_c к T_a , находящейся в интервале значений $0.73 \leq T_c/T_a \leq 1$, по номограммам **определяются координаты двух точек пересечения линии $T_c/T_a = \text{const}$** (линии под углом -45° к оси абсцисс) и кривой L . Далее **по координатам любой из этих точек пересечения находят величины T_1 и T_2 .**

Для уточнения динамических свойств кривой разгона объекта воспользуемся встроенным блоком SimInTech – **Оптимизатор**. В качестве критерия аппроксимации кривой разгона объекта выберем:

$$I_2 = \int_0^t (y_э - y_p)^2 dt \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

где y_3 - заданные по таблицам 1.6-1.10 значения выходной переменной объекта, полученные экспериментально, y_p - значения выходной переменной объекта, полученные в результате расчета средствами SimInTech.

Оптимизируемых параметров для передаточной функции объекта будет три: коэффициент усиления k_1 , постоянные времени T_1 и T_2 .

3.1. Запустите среду **SimInTech**.

3.2. Создайте новый проект «Файл → Новый проект → Схема модели общего вида».

3.3. Настройте расчетные параметры схемы. Установите *Начальный шаг интегрирования* **startstep=0**, *Конечное время расчета* **endtime** выбирается из соображения того, чтобы переходные процессы успевали завершиться согласно варианту, *Максимальный шаг* **hmax=0.01**, *Минимальный шаг* **hmin=0.01**, *Метод интегрирования* **intmet** выберите **Адаптивный 1**. Остальные настройки оставьте по умолчанию.

Вставьте скриншот параметров проекта в пояснительную записку к курсовому проекту.

3.4. Соберите расчетную схему для задания кривой разгона объекта по экспериментальным исходным данным (рисунок 3.3).

Понадобятся блоки:

- кусочно-линейная функция 1 шт. (вкладка **Источники** → **Кусочно-линейная**);
- график 1 шт. (вкладка **Вывод данных** → **Временной график**).

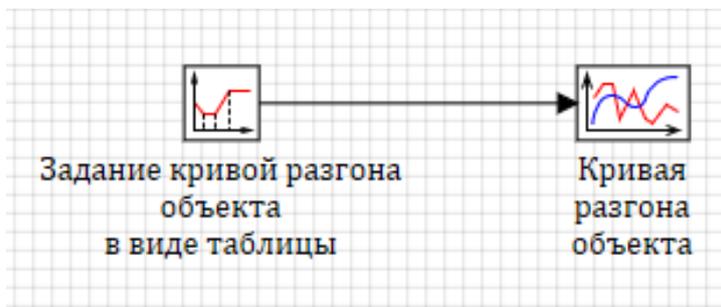
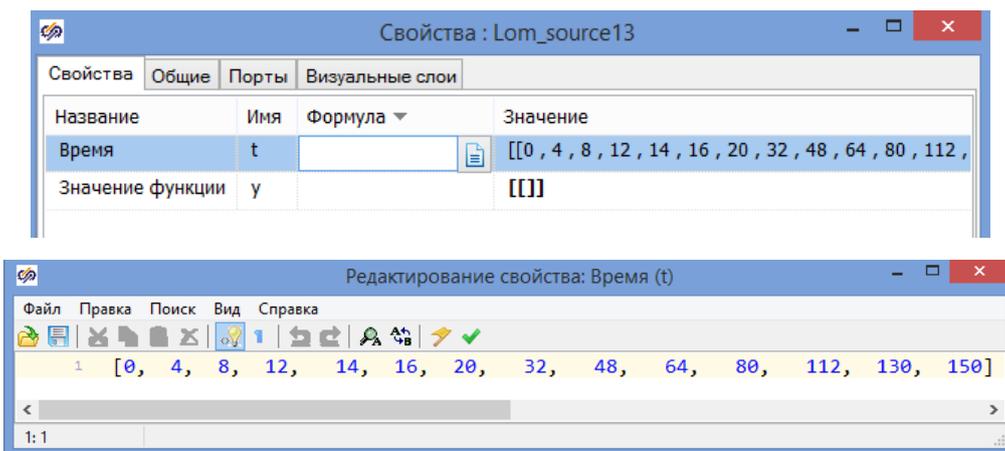


Рисунок 3.3 – Схема для задания кривой разгона объекта таблично

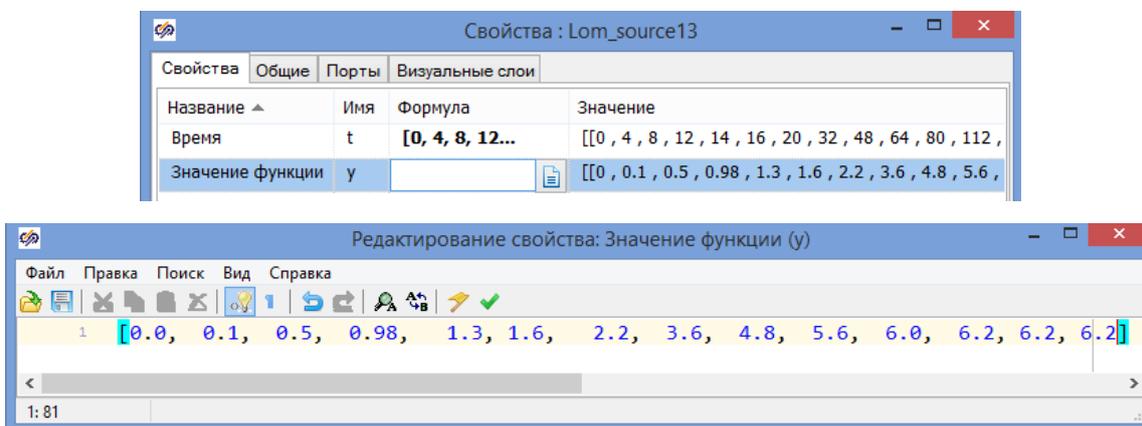
Вставьте скриншот расчетной схемы в пояснительную записку к курсовому проекту.

В свойствах блока **Кусочно-линейная** согласно своему варианту задайте исходные данные. Для этого в строке «Время» **t** нажмите левой кнопкой мыши в поле «Формула», после чего нажмите еще раз левой кнопкой мыши на появившуюся кнопку . Откроется окно «Редактирование свойства», в котором необходимо ввести заданную матрицу:



После ввода нажать кнопку  (Применить и закрыть).

Далее повторить то же самое для строки «Значение функции» **y**.



Сделайте скриншот свойств блока Кусочно-линейная и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту.

3.5. Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов. Обработайте в первом приближении полученную кривую разгона согласно методике, изложенной в начале 3 главы.

Для определения точки перегиба η , в которой производная $dy(t)/dt$ максимальна можно воспользоваться SimInTech, доработав ранее созданную схему (рисунок 3.4). Понадобятся блоки:

- идеальное дифференцирующее звено 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Производная**);
- график 1 шт. (вкладка **Вывод данных** → **Временной график**).

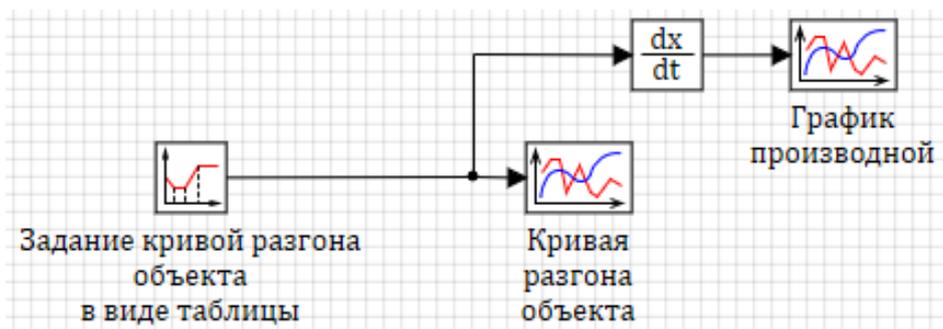


Рисунок 3.4 – Схема для нахождения точки перегиба кривой разгона объекта

Вставьте скриншот схемы для определения производной в пояснительную записку к курсовому проекту.

Запустите еще раз схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов.

Вставьте полученный график производной в пояснительную записку к курсовому проекту.

Проанализируйте график производной, определите время t_η , соответствующее точке перегиба η , в которой производная $dy(t)/dt$ максимальна. Откройте график переходной функции и через найденную ординату η проведите касательную к кривой разгона объекта до пересечения с осью абсцисс и линией $y(\infty)=k_1$. Определите величины T_a и T_c . Далее по номограммам на рисунке 3.2 определите численные значения для постоянных времени T_1 и T_2 .

Вставьте график с результатами аппроксимации в пояснительную записку к курсовому проекту.

3.6. Доработайте расчетную схему для приближенной обработки кривой разгона объекта (рисунок 3.5). Необходимо добавить блоки:

- ступенька 1 шт. (вкладка **Источники** → **Ступенька**);

- апериодическое звено 1-го порядка 2 шт. (вкладка **Динамические** → **Инерционное звено 1-го порядка**).



Рисунок 3.5 – Схема для аппроксимации кривой разгона объекта

Вставьте скриншот расчетной схемы в пояснительную записку к курсовому проекту.

В свойствах блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[1]$, а для строки «Время срабатывания» в столбце «Значение» задайте $t=[0]$.

Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение
Время срабатывания	t		[0]
Начальное состояние	y0		[0]
Конечное состояние	yk		[1]

В свойствах блока **Временной график** задайте два входных порта.

Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение	
Количество входных портов	InPort...		2	

В свойствах блоков **Инерционное звено 1-го порядка** в строке «Коэффициенты усиления» в столбце «Значение» задайте рассчитанное

значение переменной $k=k_1$ и численное значение $k=[1]$, а в строке «Постоянные времени» рассчитанные значения переменных $T=T_1$, $T=T_2$.

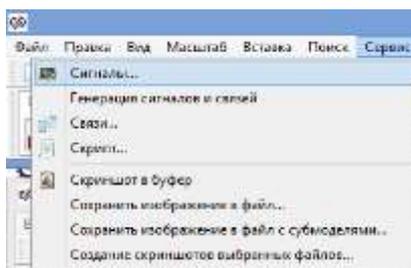
Свойства : Aperiodika10			
Свойства	Параметры	Общие	Порты
Название	Имя	Формула	Значение
Коэффициенты усиления	k		[6.2]
Постоянные времени	T		[30]
Начальные условия	x0		[0]

Свойства : Aperiodika11			
Свойства	Параметры	Общие	Порты
Название	Имя	Формула	Значение
Коэффициенты усиления	k		[1]
Постоянные времени	T		[3.7]
Начальные условия	x0		[0]

3.7. Запустите схему на расчет нажатием кнопки Пуск  на панели инструментов.

Вставьте полученный график в пояснительную записку к курсовому проекту и зафиксируйте найденные приближенные параметры передаточной функции объекта.

3.8. Задайте оптимизируемые параметры как глобальные сигналы проекта. Для этого в Главном меню нужно выбрать: «Сервис → Сигналы...»:



Далее в диалоговом окне Редактора сигналов проекта создайте три сигнала (нажать в нижней части на кнопку **Добавить сигнал** ) и настройте их атрибуты:

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k1	Коэффициент усиления объекта	Веществен...	Вход		0	Переменная
2	T1	Постоянная времени объекта	Веществен...	Вход		0	Переменная
3	T2	Постоянная времени объекта	Веществен...	Вход		0	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту.

3.9. Доработайте расчетную схему для оптимальной обработки кривой разгона объекта (рисунок 3.6). Необходимо добавить блоки:

- элемент сравнения 1 шт. (вкладка **Операторы** → **Сравнивающее устройство**);
- степенная функция 1 шт. (вкладка **Функции** → **Степенная функция**);
- интегратор 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Интегратор**);
- апериодическое звено 1-го порядка 2 шт. (вкладка **Динамические** → **Инерционное звено 1-го порядка**);
- оптимизатор 1 шт. (вкладка **Анализ и оптимизация** → **Оптимизатор**);
- демультиплексор 1 шт. (вкладка **Векторные** → **Демультиплексор**);
- переменная 3 шт. (вкладка **Сигналы** → **Запись в список сигналов**).

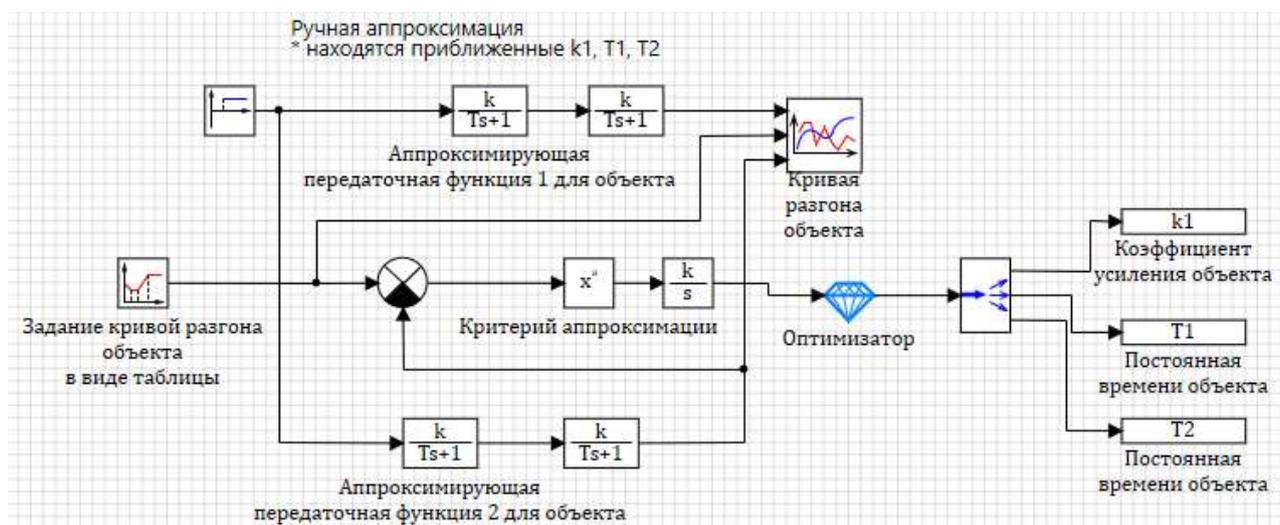


Рисунок 3.6 – Схема для аппроксимации кривой разгона объекта средствами SimInTech

Вставьте скриншот расчетной схемы в пояснительную записку к курсовому проекту.

В свойствах нижних блоков **Инерционное звено 1-го порядка** в строке «Коэффициенты усиления» вместо численного значения в столбце «Формула» задайте переменную $k=k_1$ и численное значение $k=[1]$ в столбце «Значение», а в строке «Постоянные времени» задайте переменные $T=T_1, T=T_2$ в столбце «Формула».

Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение	
Коэффициенты усиления	k	k1	[0]	
Постоянные времени	T	T1	[0]	
Начальные условия	x0		[0]	

Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение	
Коэффициенты усиления	k		[1]	
Постоянные времени	T	T2	[0]	
Начальные условия	x0		[0]	

В свойствах блока **Степенная функция** задайте значение показателя степени **a=[2]**.

Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение
Показатель степени	a		[2]

В свойствах блока **Демультимплексор** задайте массив размерностей для трех выходов.

Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение
Массив размерностей выходов	a		[1, 1, 1]

В свойствах блока **Временной график** задайте три входных порта.

Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение	
Количество входных портов	InPort...		3	

В свойствах трех блоков **Запись в список сигналов** необходимо ввести для строки «Имена сигналов» в столбце «Значение» три переменные k_1 , T_1 , T_2 .

Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Фор...	Значение
Имена сигналов	signals		k1

Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Фор...	Значение
Имена сигналов	signals		T1

Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Фор...	Значение
Имена сигналов	signals		T2

Перейдите в свойства блока **Оптимизатор**:

Название	Имя	Формула	Значение
Режим оптимизации параметров	optmode		По полному переходному про
Периодичность анализа критериев оптимизации...	optstep	1	1
Начальное приближение выходов блока	x0	[6.2, 30, 3.7]	[6.2, 30, 3.7]
Минимальные значения выходов блока	ymin	[0.01, 0.01, 0.01]	[0.01, 0.01, 0.01]
Максимальные значения выходов блока	ymax	[6.2, 40, 40]	[6.2, 40, 40]
Абсолютная точность подбора значений выходов	yabserror	[0.001, 0.001, 0.001]	[0.001, 0.001, 0.001]
Начальное приращение выходов	dparams	[0.001, 0.001, 0.001]	[0.001, 0.001, 0.001]
Минимальные значения входных критериев опт...	umin	[0]	[0]
Максимальные значения входных критериев опт...	umax	[0.001]	[0.001]
Тип суммарного критерия оптимизации	usumtype		Квадратичный
Метод оптимизации	optmethod		Симплекс
Максимальное количество повторных моделиро...	maxiter	500	500
Количество серий случайных испытаний для сто...	sercount	10	10
Количество случайных испытаний в одной серии...	testcount	10	10
Выдача информации о процессе оптимизации	printopti...		<input checked="" type="checkbox"/> Да

В строке «Режим оптимизации параметров» необходимо выбрать значение - **По полному переходному процессу**, т.к. критерий оптимизации (3.2) вычисляется на протяжении всего переходного процесса.

В строке «Начальное приближение выходов блока» укажите вектор начальных значений оптимизируемых параметров – приближенные k_1 , T_1 и T_2 , найденные при ручной аппроксимации согласно своему варианту **[6.2, 30 3.7]**.

Свойствами в строках «Минимальные значения выходов блока» и «Максимальное значение выходов блока» можно ограничить диапазон поиска оптимальных параметров системы. В строке «Минимальные значения выходов блока» задайте **[0.01, 0.01, 0.01]**, а в строке «Максимальные значение выходов блока» **[6.2, 40, 40]** (6.2 - предельное значение коэффициента усиления, полученное при обработке кривой разгона вручную, 40 – заведомо большее значение постоянных времени, полученное при обработке кривой разгона вручную).

В строке «Абсолютная точность подбора значений выходов» укажите **[0.001, 0.001, 0.001]**.

В строке «Начальное приращение выходов» нужно задать первый шаг приращения при подборе значений оптимума. Чем больше шаг, тем быстрее меняются подбираемые значения в начале поиска оптимума, но при этом

возникает вероятность пропустить оптимальные значения. Задайте [0.001, 0.001, 0.001].

В строке «Минимальные значения входных критериев оптимизации» задайте [0], в строке «Максимальные значения входных критериев оптимизации» задайте [0.001], т.к. критерий (3.2), по условию задачи оптимизации, должен быть минимальный.

В строке «Тип суммарного критерия оптимизации» нужно выбрать метод свертывания критериев для формирования целевой функции. Укажите **Квадратичный**.

В строке «Метод оптимизации» нужно выбрать численный метод оптимизации - **Симплекс**, который использует метод «деформируемого многогранника» Нелдера и Мида.

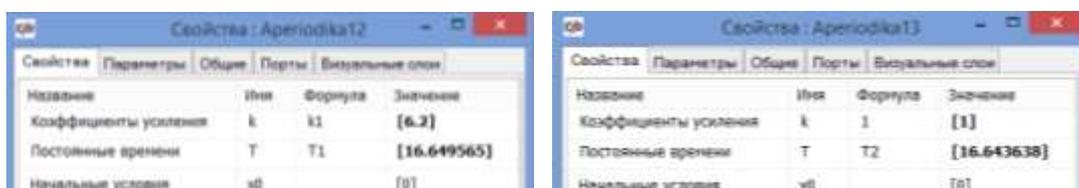
В строке «Выдача информации о процессе оптимизации» необходимо выбрать значение – **Да**, чтобы в конце оптимизации программа выдала результаты своей работы.

Остальные свойства можно оставить по умолчанию.

Вставьте скриншот с настройками Оптимизатора в пояснительную записку к курсовому проекту.

3.10. Запустите схему на расчет нажатием кнопки Пуск  на панели инструментов. Для наглядности работы блока оптимизации можно открыть блок **Временной график**. Схема SimInTech будет рассчитываться несколько раз в динамике до получения оптимального результата. По окончании в окне сообщений, в нижней части схемного окна должна появиться информация об оптимизированных параметрах и достигнутом критерии оптимизации.

3.11. После завершения моделирования, открыв свойства блоков **Инерционное звено 1-го порядка**, либо открыв **Редактор сигналов проекта**, можно увидеть коэффициент усиления и постоянные времени для объекта.



Название	Имя	Формула	Значение
Коэффициенты усиления	k	k1	[6.2]
Постоянные времени	T	T1	[16.649565]
Начальные условия	x0		[0]

Название	Имя	Формула	Значение
Коэффициенты усиления	k	1	[1]
Постоянные времени	T	T2	[16.643638]
Начальные условия	x0		[0]

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k1	Коэффициент усиления объекта	Веществен...	Вход		6.2	Переменная
2	T1	Постоянная времени объекта	Веществен...	Вход		16.649565	Переменная
3	T2	Постоянная времени объекта	Веществен...	Вход		16.643638	Переменная

Вставьте полученный график в пояснительную записку к курсовому проекту и зафиксируйте уточненные параметры передаточной функции объекта.

Сравните результаты ручной аппроксимации и аппроксимации средствами SimInTech.

3.12. Сохраните проделанный этап курсового проекта в своей рабочей папке. Для этого в **Главном меню Главного окна SimInTech** выбрать пункт «**Файл → Сохранить проект как...**» и далее, используя стандартный диалог, сохранить файл, указав соответствующий путь и имя файла – «**Передаточная функция объекта.prt**».

4 Проектирование структурной схемы системы регулирования

4.1. Запустите среду **SimInTech**.

4.2. Создайте новый проект «Файл → Новый проект → Схема модели общего вида».

4.3. Создайте субмодель «Объект управления» (рисунок 4.1 а). Перенесите на Схемное окно следующий блок:

- макроблок 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Субмодель**).

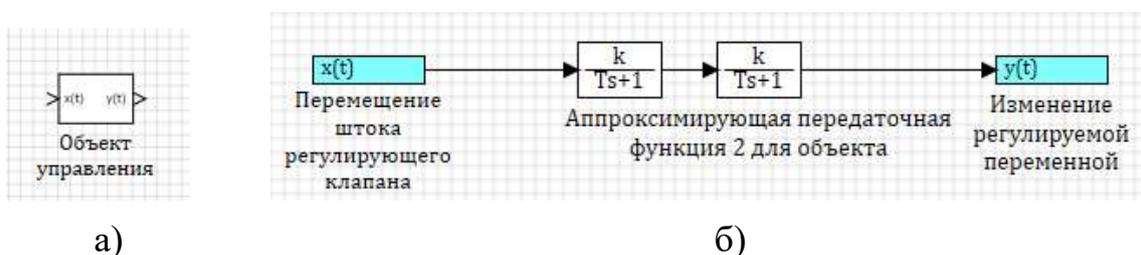


Рисунок 4.1 – Субмодель «Объект управления»

Перейдите во вложение блока **Субмодель**. Наполните субструктуру следующими блоками (рисунок 4.1 б):

- вход 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Порт входа**);
- выход 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Порт выхода**);
- передаточная функция 2 шт. (вкладка **Динамические** → **Инерционное звено 1-го порядка**).

Выход блока **Порт входа** подключите к входу исследуемого объекта, а выход объекта подключите к входу блока **Порт выхода** (рисунок 4.1 б). Задайте соответствующие имена портов субмодели.

В свойствах блоков **Инерционное звено 1-го порядка** задайте *Коэффициенты усиления* и *Постоянные времени* согласно значениям, рассчитанным ранее для своего варианта (пункт 3.11), *Начальные условия* оставьте без изменения $y_0=[0]$. Остальные параметры оставьте по умолчанию.

Вставьте скриншот субмодели объекта управления в пояснительную записку к курсовому проекту.

Выйдите из субмодели в пространство основной структурной схемы. Для этого необходимо либо нажать кнопку **Возврат из Субмодели** на **Панели инструментов Схемного окна** , либо выполнить двойной щелчок левой кнопкой мыши на свободном месте пространства субмодели.

4.4. Создайте субмодель «Датчик» (рисунок 4.2 а). Перенесите на **Схемное окно** следующий блок:

- макроблок 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Субмодель**).



Рисунок 4.2 – Субмодель «Датчик»

Перейдите во вложение блока **Субмодель**. Наполните субструктуру следующими блоками (рисунок 4.2 б):

- вход 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Порт входа**);
- выход 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Порт выхода**);
- передаточная функция 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Инерционное звено 1-го порядка**).

В свойствах блока **Инерционное звено 1-го порядка** задайте *Коэффициенты усиления* и *Постоянные времени* согласно значениям, рассчитанным ранее для своего варианта (пункт 2.11), *Начальные условия* оставьте без изменения $y_0=[0]$. Остальные параметры оставьте по умолчанию.

Вставьте скриншот субмодели датчика в пояснительную записку к курсовому проекту.

Выйдите из субмодели в пространство основной структурной схемы.

4.5. Создайте субмодель «Клапан регулирующий» (рисунок 4.3 а). Перенесите на **Схемное окно** следующий блок:

- макроблок 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Субмодель**).



а)



б)

Рисунок 4.3 – Субмодель «Клапан регулирующий»

Перейдите во вложение блока **Субмодель**. Наполните субструктуру следующими блоками (рисунок 4.3 б):

- вход 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Порт входа**);
- выход 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Порт выхода**);
- усилительное звено 1 шт. (вкладка **Операторы** → **Усилитель**);
- передаточная функция 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Передаточная функция общего вида**).

В свойствах блока **Усилитель** задайте *Коэффициент усиления* согласно своему варианту. В свойствах блока **Передаточная функция общего вида** задайте *Коэффициенты числителя и знаменателя* согласно своему варианту из таблицы 1.11 (*запись векторов необходимо начинать с нулевого элемента в порядке возрастания степени при s*), *Начальные условия* оставьте без изменения $y_0=[0]$. Остальные параметры оставьте по умолчанию.

Вставьте скриншот субмодели регулирующего клапана в пояснительную записку к курсовому проекту.

Выйдите из субмодели в пространство основной структурной схемы.

4.6. Создайте субмодель «Регулятор» для системы регулирования, реализующий в общем случае ПИД-закон (рисунок 4.4 а). Передаточная функция ПИД-регулятора с независимыми настройками имеет вид:

$$W_{\text{ПИД}}(s) = k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s, \quad (4.1)$$

где k_p – коэффициент пропорциональности (П-часть); $k_i = 1/T_i$ – коэффициент, обратный постоянной времени интегрирования T_i (И-часть); $k_d = T_d$ – коэффициент, равный постоянной времени дифференцирования T_d (Д-часть).

Обнулив ту или иную часть, можно легко перейти к другому закону.

Перенесите на **Схемное окно** следующий блок:

– макроблок 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Субмодель**).

Перейдите во вложение блока **Субмодель**. Наполните субструктуру следующими блоками (рисунок 4.4 б):

– вход 2 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Порт входа**);

– выход 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Порт выхода**);

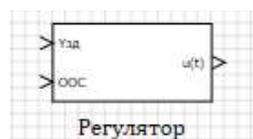
– суммирующий элемент 1 шт. (вкладка **Операторы** → **Сумматор**);

– элемент сравнения 1 шт. (вкладка **Операторы** → **Сравнивающее устройство**);

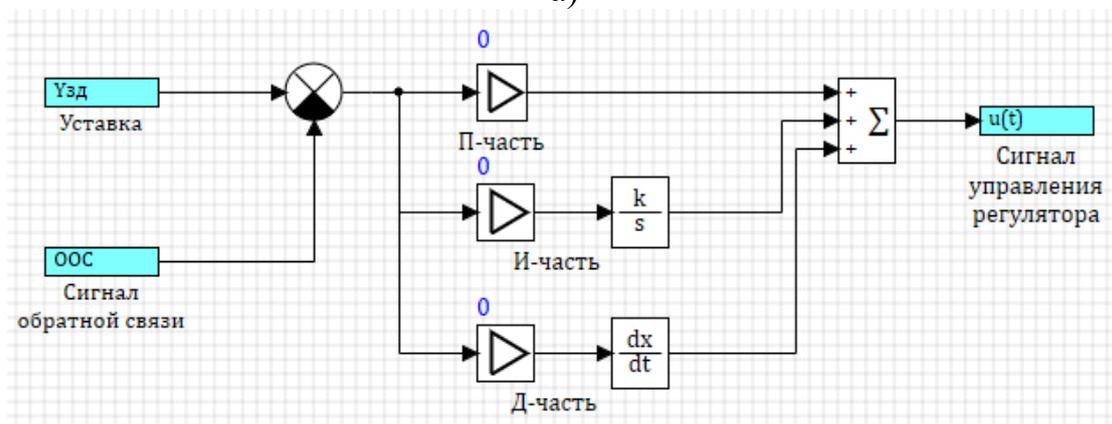
– усилительное звено 3 шт. (вкладка **Операторы** → **Усилитель**);

– интегратор 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Интегратор**);

– идеальное дифференцирующее звено 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Производная**).



а)

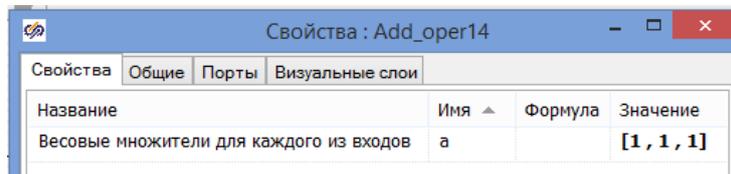


б)

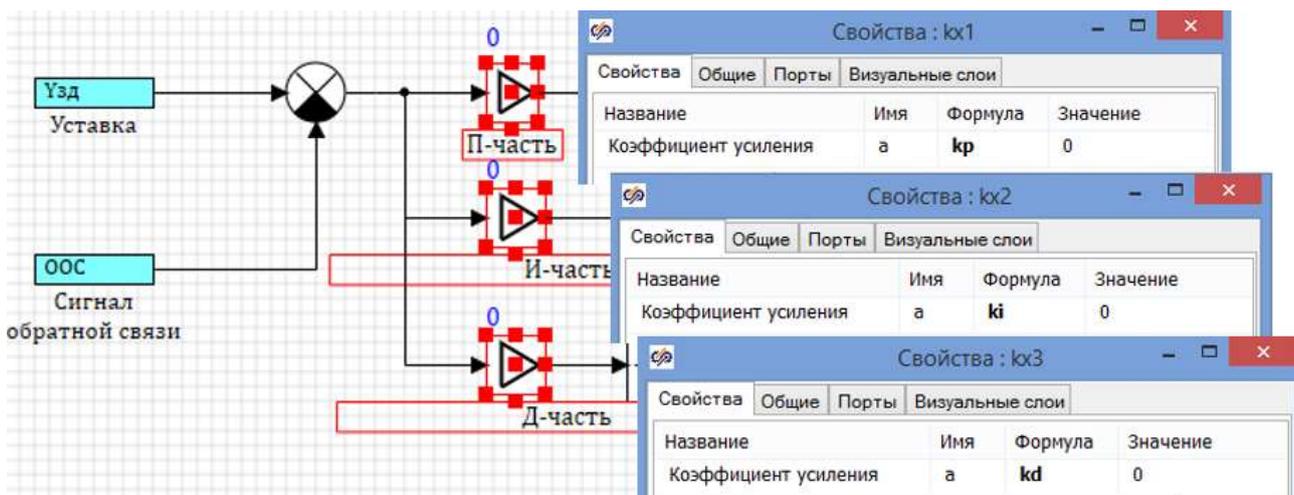
Рисунок 4.4 – Субмодель «Регулятор»

Вставьте передаточную функцию своего регулятора и скриншот субмодели регулятора в пояснительную записку к курсовому проекту.

В свойствах блока **Сумматор** задайте три входа:



В свойствах верхнего блока **Усилитель** (П-часть) вместо численного значения параметра *Коэффициент усиления* в столбце «Формула» задайте переменную k_p . В свойствах среднего блока **Усилитель** (И-часть) вместо численного значения параметра *Коэффициент усиления* в столбце «Формула» задайте переменную k_i . В свойствах нижнего блока **Усилитель** (Д-часть) вместо численного значения параметра *Коэффициент усиления* в столбце «Формула» задайте переменную k_d .



Добавьте субмодель «Критерий качества САР» для оценки работы замкнутой системы регулирования (рисунок 4.5 а). Перенесите на **Схемное окно** текущей субмодели «Регулятор» следующий блок:

- макроблок 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Субмодель**).

Перейдите во вложение блока **Субмодель**. Наполните субструктуру блоками согласно критерию для своего варианта из таблицы 1.12 (рисунок 4.5 б). Формула для расчета квадратичного интегрального критерия имеет вид:

$$I_{кр} = \int_0^t e^2(t)dt \rightarrow \min \quad (4.2)$$

- вход 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Порт входа**);
- выход 1 шт. (вкладка **Субструктуры** → **Порт выхода**);
- степенная функция 1 шт. (вкладка **Функции** → **Степенная функция**);
- интегратор 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Интегратор**).

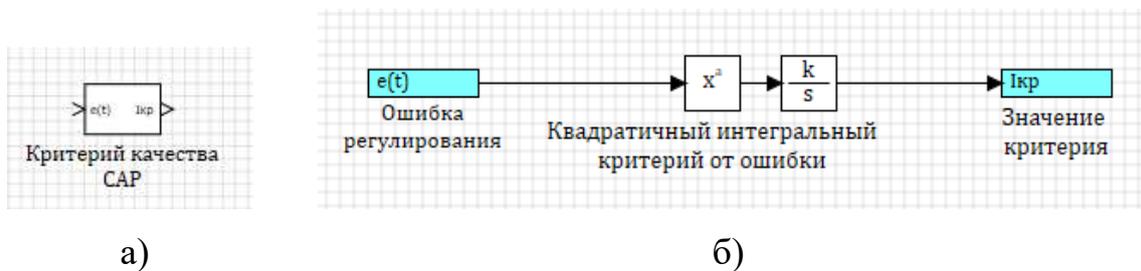
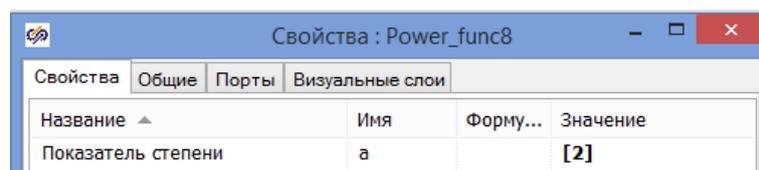


Рисунок 4.5 – Субмодель «Критерий качества САР»

В случае квадратичного интегрального критерия в свойствах блока **Степенная функция** задайте значение показателя степени **a=[2]**.

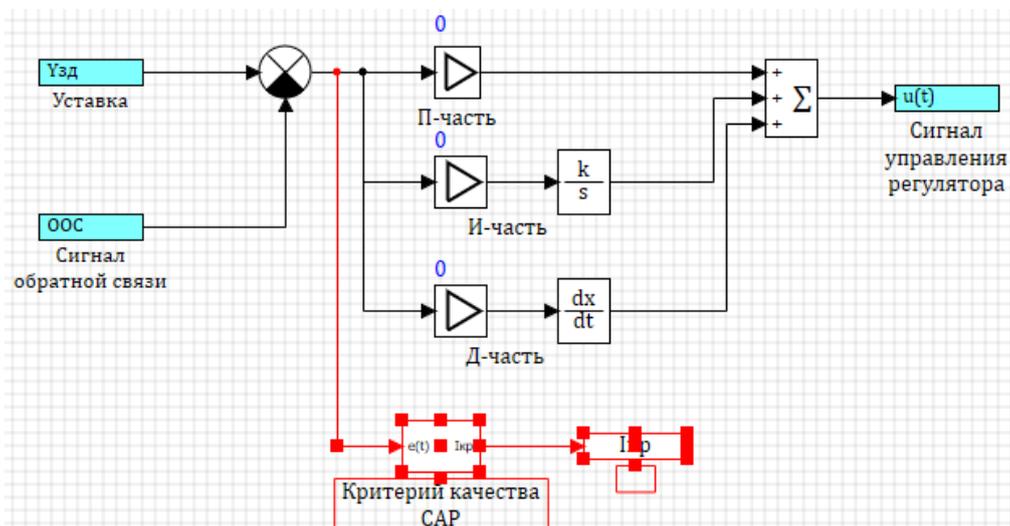


Вставьте скриншот субмодели критерия качества в пояснительную записку к курсовому проекту.

Выйдите из субмодели «Критерий качества САР» в пространство субмодели «Регулятор». Добавьте блок:

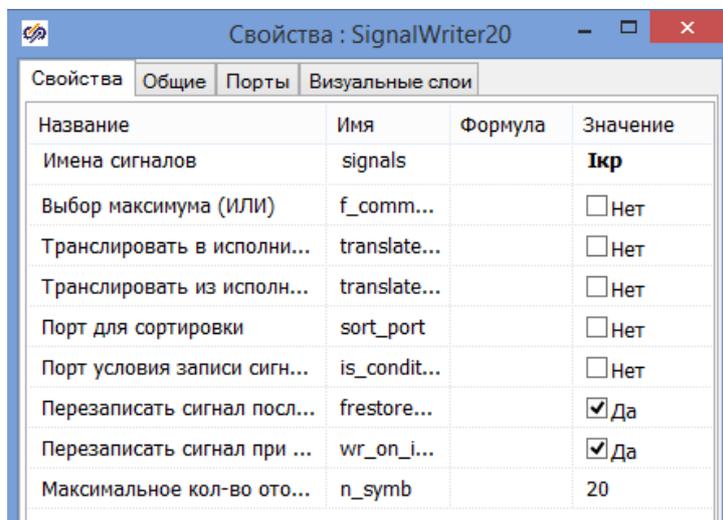
- переменная 1 шт. (вкладка **Сигналы** → **Запись в список сигналов**).

Преобразуйте схему к виду.



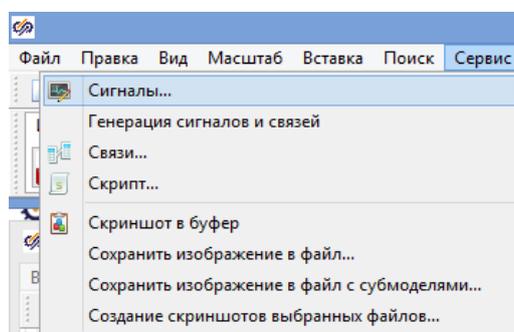
Вставьте скриншот доработанной субмодели регулятора в пояснительную записку к курсовому проекту.

В свойствах блока «**Запись в список сигналов**» необходимо ввести для строки «Имена сигналов» в столбце «Значение» - $I_{кр}$.



Выйдите из субмодели в пространство основной структурной схемы.

4.7. Задайте параметры настройки регулятора и критерий качества как глобальные сигналы проекта. Для этого в **Главном меню** выберем: «**Сервис** → **Сигналы...**»:



Далее в диалоговом окне **Редактора сигналов проекта** создайте четыре сигнала (нажать в нижней части на кнопку **Добавить сигнал** ) и настройте их атрибуты:

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	кр	П-часть	Веществен...	Вход		0	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		0	Переменная
4	$I_{кр}$	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		0	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту.

4.8. С использованием созданных субмоделей соберите структурную схему для моделирования одноконтурной САР (рисунок 4.6). Дополнительно понадобятся блоки:

- ступенька 2 шт. (вкладка **Источники** → **Ступенька**);
- суммирующий элемент 1 шт. (вкладка **Операторы** → **Сумматор**);
- график 1 шт. (вкладка **Вывод данных** → **Временной график**).

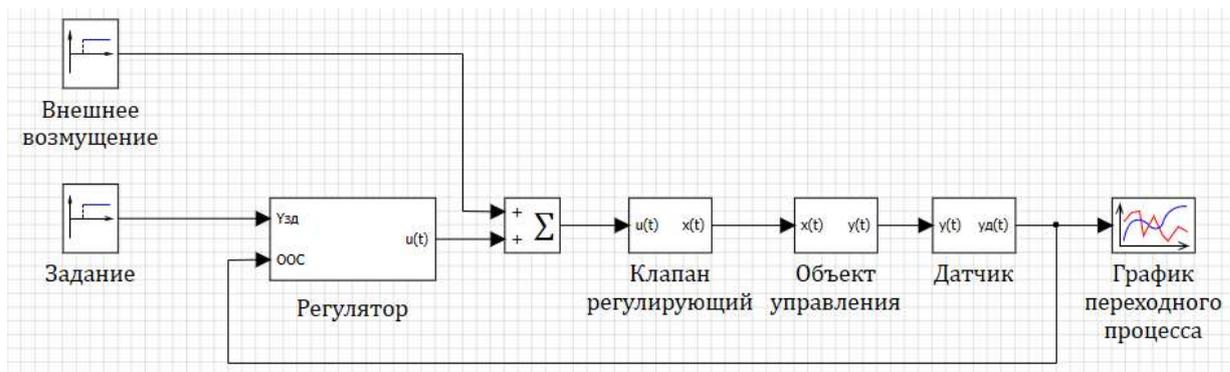
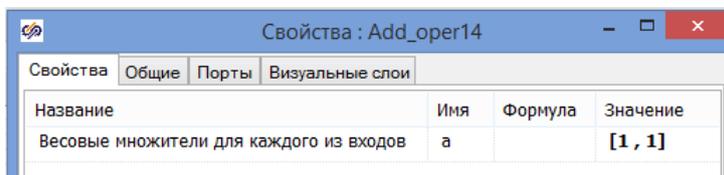


Рисунок 4.6 – Структурная схема одноконтурной САР

Вставьте скриншот структурной схемы одноконтурной САР в пояснительную записку к курсовому проекту.

В свойствах блоков **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[1]$, а для строки «Время срабатывания» в столбце «Значение» $t=[0]$.

В свойствах блока **Сумматор** задайте два входа:



4.9. Сохраните сделанный этап курсовой работы в своей рабочей папке. Для этого в **Главном меню Главного окна SimInTech** выбрать пункт «**Файл** → **Сохранить проект как...**» и далее, используя стандартный диалог, сохранить файл, указав соответствующий путь и имя файла – «**Структурная схема одноконтурной САР.prt**».

5 Определение настроек ПИД-регулятора различными методами

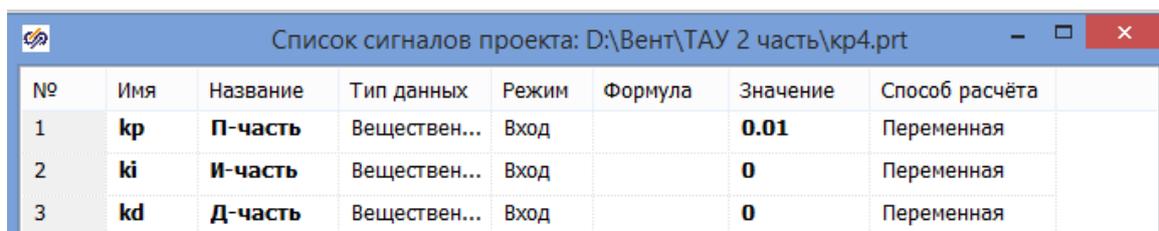
5.1. Приближенный метод Ziegler-Nichols [3-7] (способ 1)

5.1.1. Откройте ранее сохраненную структуру САР. Для этого необходимо в Главном меню Главного окна SimInTech выбрать пункт «Файл → Открыть...» и далее, используя стандартный диалог, открыть файл, указав соответствующий путь и имя файла – «Структурная схема одноконтурной САР.prt».

5.1.2. Настройте расчетные параметры схемы. Установите *Начальный шаг интегрирования* **startstep=0**, *Конечное время расчета* **endtime** выбирается из соображения того, чтобы переходные процессы успевали завершиться, *Максимальный шаг* **hmax=0.01**, *Минимальный шаг* **hmin=0.01**, *Метод интегрирования* **intmet** выберите **Адаптивный 1**. Остальные настройки оставьте по умолчанию.

Вставьте скриншот параметров проекта в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.1.3. Рассчитайте настройки регулятора методом Ziegler-Nichols путем вывода системы на границу колебательной устойчивости [3-7]. Для этого перейдите в диалоговое окно Редактора сигналов проекта и в настройках регулятора выключите интегральную и дифференциальную составляющие **$k_i=0$** , **$k_d=0$** , то есть принудительно переведите его в П-закон регулирования. Установите небольшое начальное значение пропорциональной составляющей **$k_p=0.01$** .



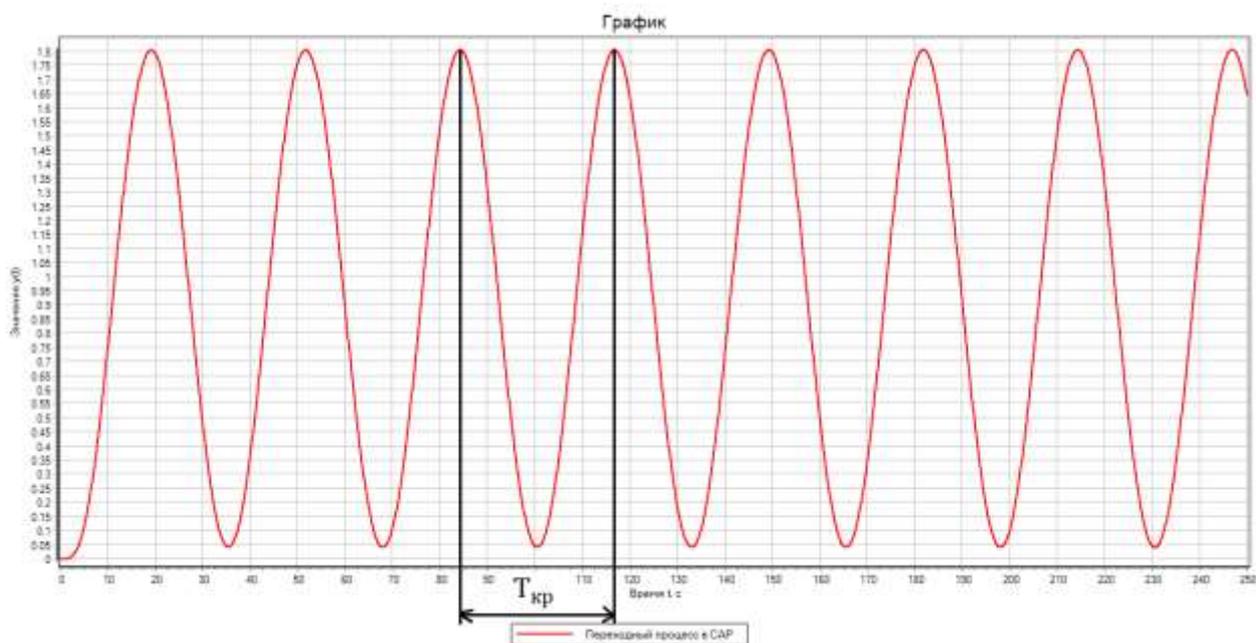
№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		0.01	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		0	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.1.4. В исходной структурной схеме в свойствах верхнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$. В свойствах нижнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$.

5.1.5. Запускайте схему на расчет (кнопка **Пуск**  или клавиша F9), обеспечивая подачу единичного скачкообразного сигнала задания и постепенно увеличивая значение пропорциональной составляющей k_p до тех пор, пока в системе не установятся незатухающие устойчивые колебания с постоянной амплитудой.

Если система начнет раскачиваться, то k_p следует уменьшить. После вывода системы на границу колебательной устойчивости, зафиксируйте максимальный для данной системы коэффициент $k_p=K_{кр}$ и замерьте период колебаний $T_{кр}$ (время одного полного цикла).



Вставьте полученный график и найденные критические параметры колебаний в пояснительную записку к курсовому проекту.

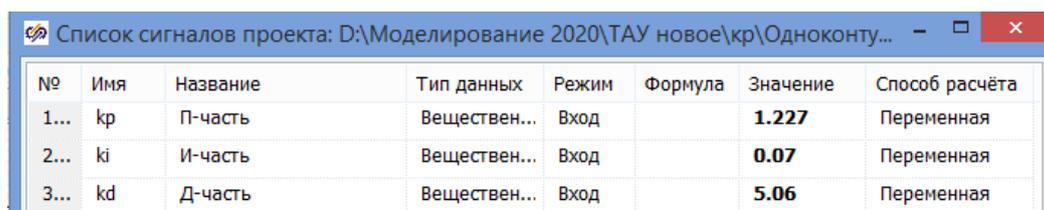
По полученным $K_{кр}$ и $T_{кр}$ рассчитайте параметры настройки регулятора для своего варианта по формулам, представленным в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Формулы расчета приближенных настроек регулятора по методу Ziegler-Nichols [3-7]

Тип регулятора	Пропорциональный коэффициент k_p	Интегральный коэффициент k_i	Дифференциальный коэффициент k_d
П	$0.5 \cdot K_{кр}$	-	-
ПИ	$0.45 \cdot K_{кр}$	$0.54 \cdot K_{кр} / T_{кр}$	-
ПИД	$0.6 \cdot K_{кр}$	$1.2 \cdot K_{кр} / T_{кр}$	$0.075 \cdot K_{кр} \cdot T_{кр}$

Вставьте рассчитанные настройки регулятора в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.1.6. Откройте Редактор сигналов проекта и введите рассчитанные в пункте 5.1.5 настройки регулятора для своего варианта. Для ПИ-регулятора необходимо задать значение переменной $k_d=0$.



№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1...	k_p	П-часть	Веществен...	Вход		1.227	Переменная
2...	k_i	И-часть	Веществен...	Вход		0.07	Переменная
3...	k_d	Д-часть	Веществен...	Вход		5.06	Переменная

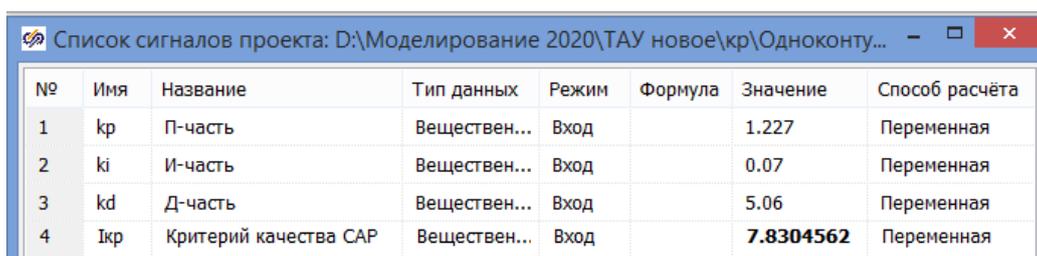
Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.1.7. Снимите переходный процесс в одноконтурной САР с приближенными настройками регулятора при возмущении по заданию. Для этого в исходной структурной схеме в свойствах верхнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$. В свойствах нижнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$.

Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов.

Вставьте полученный график переходного процесса в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.1.8. Оцените качество регулирования САР по заданному критерию. Для этого после завершения моделирования откройте **Редактор сигналов проекта**.



№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		1.227	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.07	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		5.06	Переменная
4	Iкр	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		7.8304562	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученное значение критерия качества $I_{кр}$.

5.1.9. Дополнительно определите прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при отработке возмущения по заданию (статическую и динамическую ошибки, время регулирования, перерегулирование, декремент затухания, степень затухания).

Обработайте кривую переходного процесса, полученную в п. 5.1.7, и вставьте результаты обработки в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученные значения прямых показателей качества при отработке возмущения по заданию.

5.1.10. Снимите переходный процесс в одноконтурной САР с приближенными настройками регулятора при отработке внешнего возмущения. Для этого в исходной схеме в свойствах верхнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$. В свойствах нижнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$.

Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов.

Вставьте полученный график переходного процесса в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.1.11. Оцените качество регулирования САР по заданному критерию. Для этого после завершения моделирования откройте **Редактор сигналов проекта**.

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		1.227	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.07	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		5.06	Переменная
4	Iкр	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		8.9404365	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученное значение критерия качества $I_{кр}$.

5.1.12. Дополнительно определите прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при отработке внешнего возмущения (статическую и динамическую ошибки, время регулирования, перерегулирование, декремент затухания, степень затухания).

Обработайте кривую переходного процесса, полученную в п. 5.1.10, и вставьте результаты обработки в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученные значения прямых показателей качества при отработке внешнего возмущения.

5.1.13. Сохраните проделанный этап курсового проекта в своей рабочей папке. Для этого в **Главном меню Главного окна SimInTech** выбрать пункт «**Файл → Сохранить проект как...**» и далее, используя стандартный диалог, сохранить файл, указав соответствующий путь и имя файла – «**Одноконтурная САР с приближенными настройками_1.prt**».

5.2. Приближенный метод Циглера-Никольса [3-7] (способ 2)

5.2.1. Откройте ранее сохраненную структуру САР. Для этого необходимо в **Главном меню Главного окна SimInTech** выбрать пункт «**Файл → Открыть...**» и далее, используя стандартный диалог, открыть файл, указав соответствующий путь и имя файла – «**Структурная схема одноконтурной САР.prt**».

5.2.2. Настройте расчетные параметры схемы. Установите *Начальный шаг интегрирования* **startstep=0**, *Конечное время расчета* **endtime** выбирается из

соображения того, чтобы переходные процессы успевали завершиться, *Максимальный шаг* **hmax=0.01**, *Минимальный шаг* **hmin=0.01**, *Метод интегрирования* **intmet** выберите **Адаптивный 1**. Остальные настройки оставьте по умолчанию.

Вставьте скриншот параметров проекта в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.2.3. Рассчитайте настройки регулятора методом Ziegler-Nichols путем определения реакции эквивалентного статического объекта с самовыравниванием на ступенчатое изменение управляющего воздействия [3-7]. Предварительно аппроксимируйте неизменяемую часть системы (клапан+объект+датчик) последовательным соединением апериодического звена 1-го порядка и звена чистого запаздывания по методу Ормана [1, 2] (рисунок 5.1). Передаточная функция будет иметь вид:

$$W_{oy}(s) = \frac{k_{oy}}{T_{oy}s+1} \cdot e^{-\tau_{oy}s} \quad (5.1)$$

где k_{oy} - коэффициент усиления; T_{oy} - постоянная времени, τ_{oy} - время запаздывания.

Для этого соберите вспомогательную схему из созданных ранее субмоделей «Датчик», «Объект управления», «Клапан регулирующий» (рисунок 5.1). Добавьте к ним блоки:

- ступенька 1 шт. (вкладка **Источники** → **Ступенька**);
- график 1 шт. (вкладка **Вывод данных** → **Временной график**).

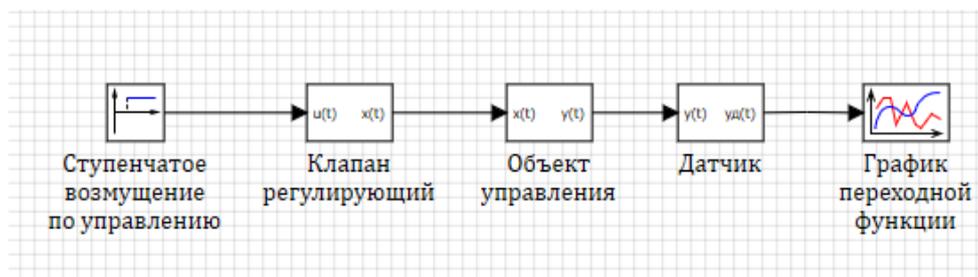


Рисунок 5.1 – Вспомогательная схема для снятия кривой разгона эквивалентного объекта

Вставьте скриншот вспомогательной схемы в пояснительную записку к курсовому проекту.

В свойствах блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $uk=[1]$, а для строки «Время срабатывания» в столбце «Значение» задайте $t=[0]$.

Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение
Время срабатывания	t		[0]
Начальное состояние	y0		[0]
Конечное состояние	uk		[1]

5.2.4. Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов. Обработайте полученную кривую разгона по методу Ормана (рисунок 5.2). Определите численные значения переменных k_{oy} , T_{oy} , τ_{oy} .

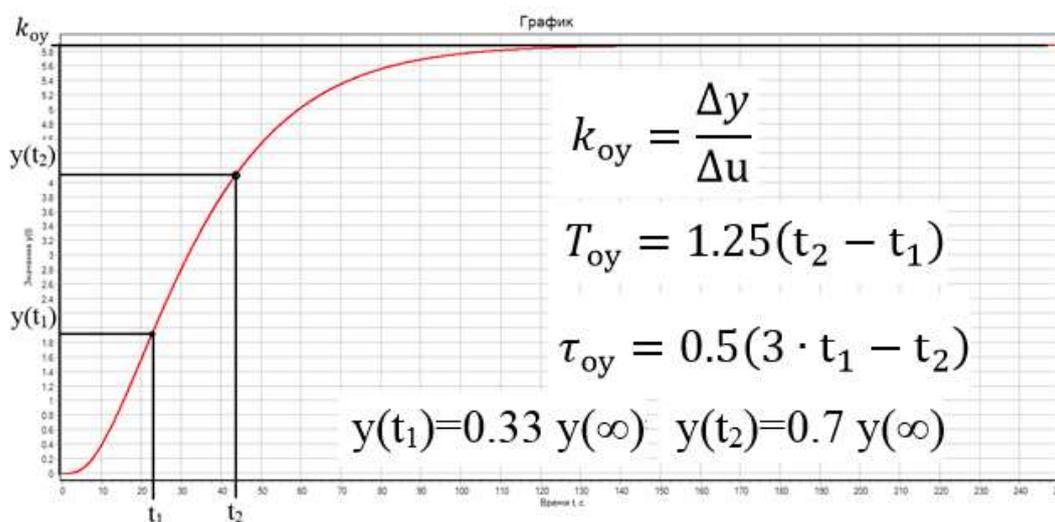


Рисунок 5.2 – Аппроксимация кривой разгона эквивалентного объекта по методу Ормана [1, 2]

Вставьте обработанный график в пояснительную записку к курсовому проекту и зафиксируйте найденные параметры.

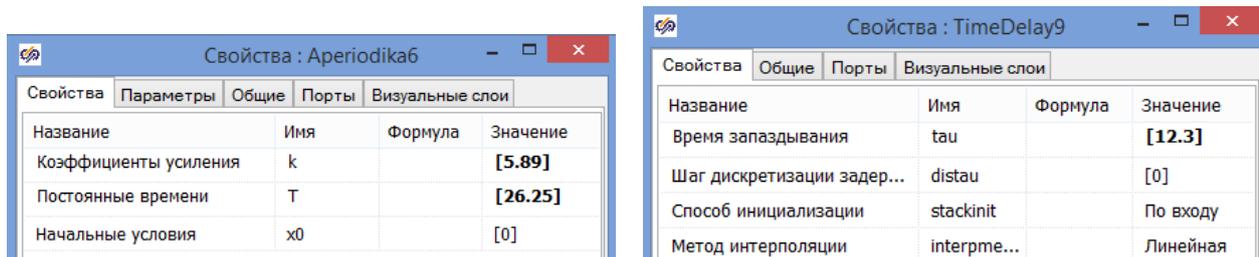
5.2.5. Постройте на одном графике исходную переходную характеристику эквивалентного объекта и полученную после аппроксимации по методу Ормана. Для этого доработайте вспомогательную схему (рисунок 5.3).

Понадобятся блоки:

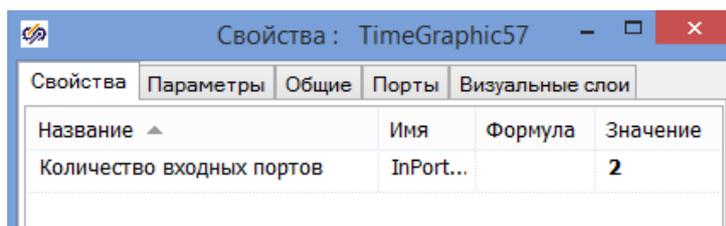
- апериодическое звено 1-го порядка 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Инерционное звено 1-го порядка**);

- звено чистого запаздывания 1 шт. (вкладка **Динамические** → **Идеальное транспортное запаздывание**);

В свойствах блока **Инерционное звено 1-го порядка** в строке «Коэффициенты усиления» в столбце «Значение» задайте рассчитанное значение переменной $k=k_{0y}$, а в строке «Постоянные времени» рассчитанное значение переменной $T=T_{0y}$. В свойствах блока **Идеальное транспортное запаздывание** в строке «Время запаздывания» в столбце «Значение» задайте рассчитанное значение переменной $\tau=\tau_{0y}$.



В свойствах блока **Временной график** задайте два входных порта.



Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов.

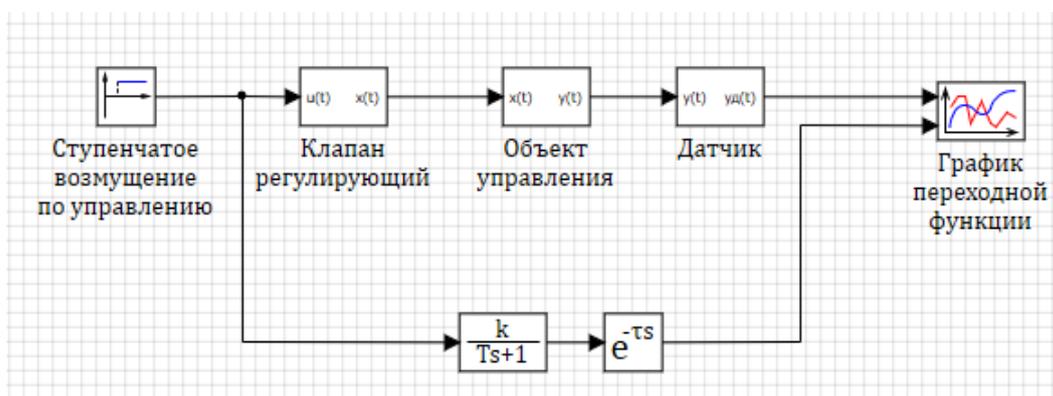


Рисунок 5.3 – Схема для сравнения результатов аппроксимации

Вставьте скриншот схемы для сравнения результатов аппроксимации и полученный график в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.2.6. По полученным k_{oy} , T_{oy} , и τ_{oy} рассчитайте параметры настройки регулятора для своего варианта по формулам, представленным в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Формулы расчета приближенных настроек регулятора методом Ziegler-Nichols [3-7]

Тип регулятора	Пропорциональный коэффициент k_p	Интегральный коэффициент k_i	Дифференциальный коэффициент k_d
П	$T_{oy}/(k_{oy} \cdot \tau_{oy})$	-	-
ПИ	$0.9 \cdot T_{oy}/(k_{oy} \cdot \tau_{oy})$	$0.27 \cdot T_{oy}/(k_{oy} \cdot \tau_{oy}^2)$	-
ПИД	$1.2 \cdot T_{oy}/(k_{oy} \cdot \tau_{oy})$	$0.6 \cdot T_{oy}/(k_{oy} \cdot \tau_{oy}^2)$	$0.6 \cdot T_{oy}/(k_{oy} \cdot \tau_{oy})$

Вставьте рассчитанные настройки регулятора в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.2.7. Откройте **Редактор сигналов проекта** и введите рассчитанные в пункте 5.2.6 настройки регулятора для своего варианта. Для **ПИ-регулятора** необходимо задать значение переменной $k_d=0$.

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k_p	П-часть	Веществен...	Вход		0.43	Переменная
2	k_i	И-часть	Веществен...	Вход		0.018	Переменная
3	k_d	Д-часть	Веществен...	Вход		0.217	Переменная

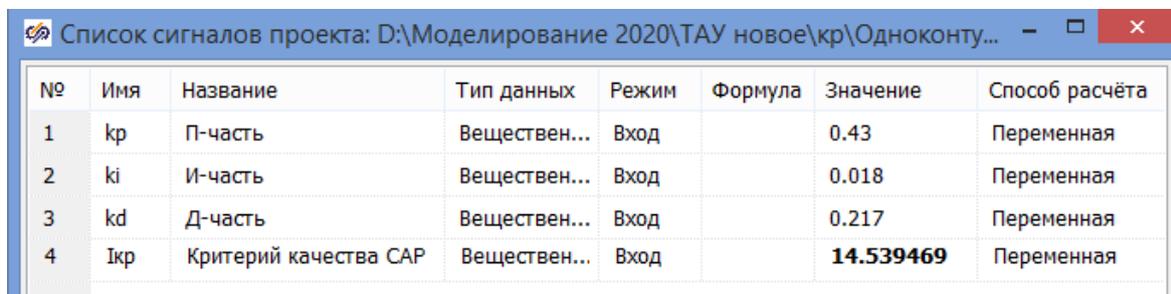
Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.2.8. Снимите переходный процесс в одноконтурной САР с приближенными настройками регулятора при возмущении по заданию. Для этого в исходной структурной схеме в свойствах верхнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$. В свойствах нижнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$.

Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов.

Вставьте полученный график переходного процесса в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.2.9. Оцените качество регулирования САР по заданному критерию. Для этого после завершения моделирования откройте **Редактор сигналов проекта**.



№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	кр	П-часть	Веществен...	Вход		0.43	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.018	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		0.217	Переменная
4	Iкр	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		14.539469	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученное значение критерия качества $I_{кр}$.

5.2.10. Дополнительно определите прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при обработке возмущения по заданию (статическую и динамическую ошибки, время регулирования, перерегулирование, декремент затухания, степень затухания).

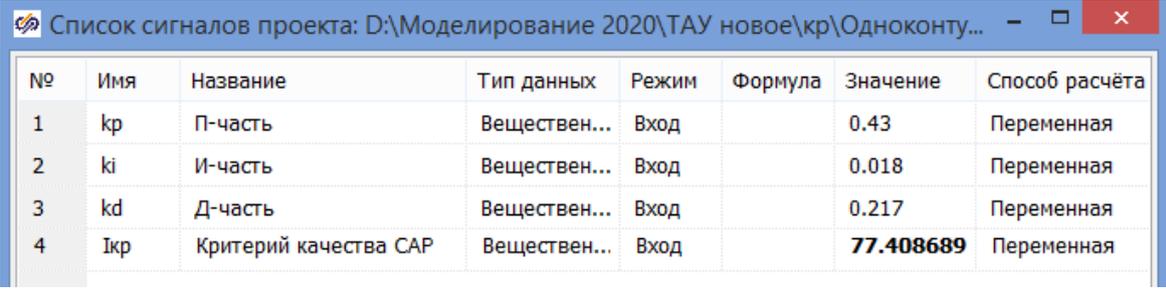
Обработайте кривую переходного процесса, полученную в п. 5.2.8, и вставьте результаты обработки в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученные значения прямых показателей качества при обработке возмущения по заданию.

5.2.11. Снимите переходный процесс в одноконтурной САР с приближенными настройками регулятора при обработке внешнего возмущения. Для этого в исходной схеме в свойствах верхнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$. В свойствах нижнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$.

Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов.

Вставьте полученный график переходного процесса в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.2.12. Оцените качество регулирования САР по заданному критерию. Для этого после завершения моделирования откройте **Редактор сигналов проекта**.



№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	кр	П-часть	Веществен...	Вход		0.43	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.018	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		0.217	Переменная
4	Икр	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		77.408689	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученное значение критерия качества $I_{кр}$.

5.2.13. Дополнительно определите прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при отработке внешнего возмущения (статическую и динамическую ошибки, время регулирования, перерегулирование, декремент затухания, степень затухания).

Обработайте кривую переходного процесса, полученную в п. 5.2.11, и вставьте результаты обработки в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученные значения прямых показателей качества при отработке внешнего возмущения.

5.2.14. Сохраните проделанный этап курсового проекта в своей рабочей папке. Для этого в **Главном меню Главного окна SimInTech** выбрать пункт «**Файл → Сохранить проект как...**» и далее, используя стандартный диалог, сохранить файл, указав соответствующий путь и имя файла – «**Одноконтурная САР с приближенными настройками_2.prt**».

5.3. Уточнение настроек регулятора численным методом оптимизации

5.3.1. Откройте ранее сохраненную структуру САР. Для этого необходимо в **Главном меню Главного окна SimInTech** выбрать пункт «**Файл → Открыть...**» и далее, используя стандартный диалог, открыть файл, указав

соответствующий путь и имя файла – «**Структурная схема одноконтурной САР.prt**».

5.3.2. Настройте расчетные параметры схемы. Установите *Начальный шаг интегрирования* **startstep=0**, *Конечное время расчета* **endtime** выбирается из соображения того, чтобы переходные процессы успевали завершиться, *Максимальный шаг* **hmax=0.01**, *Минимальный шаг* **hmin=0.001**, *Метод интегрирования* **intmet** выберите **Адаптивный 1**. Остальные настройки оставьте по умолчанию.

Вставьте скриншот параметров проекта в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.3.3. Решите задачу параметрической оптимизации настроек регулятора для одноконтурной САР согласно своему варианту. Для этого доработайте исходную схему (рисунок 5.4-5.5).

Верхняя структура будет имитировать отработку возмущения по заданию. Для этого в свойствах верхнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте **uk=[0]**; для строки «Время срабатывания» задайте **t=[0]**. В свойствах нижнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте **uk=[1]**; для строки «Время срабатывания» задайте **t=[0]**.

Нижняя структура будет имитировать отработку внешнего возмущения. Для этого в свойствах верхнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте **uk=[1]**; для строки «Время срабатывания» задайте **t=[0]**. В свойствах нижнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте **uk=[0]**; для строки «Время срабатывания» задайте **t=[0]**.

Дополнительно добавьте следующие общие блоки:

- оптимизатор 1 шт. (вкладка **Анализ и оптимизация** → **Оптимизатор**);
- демультиплексор 1 шт. (вкладка **Векторные** → **Демультиплексор**);
- переменная 2 шт. (вкладка **Сигналы** → **Чтение из списка сигналов**);

– переменная (вкладка **Сигналы** → **Запись в список сигналов**).

Число блоков **Запись в список сигналов** будет зависеть от типа используемого регулятора. Для ПИД-регулятора - 3 шт., для ПИ-регулятора – 2 шт.

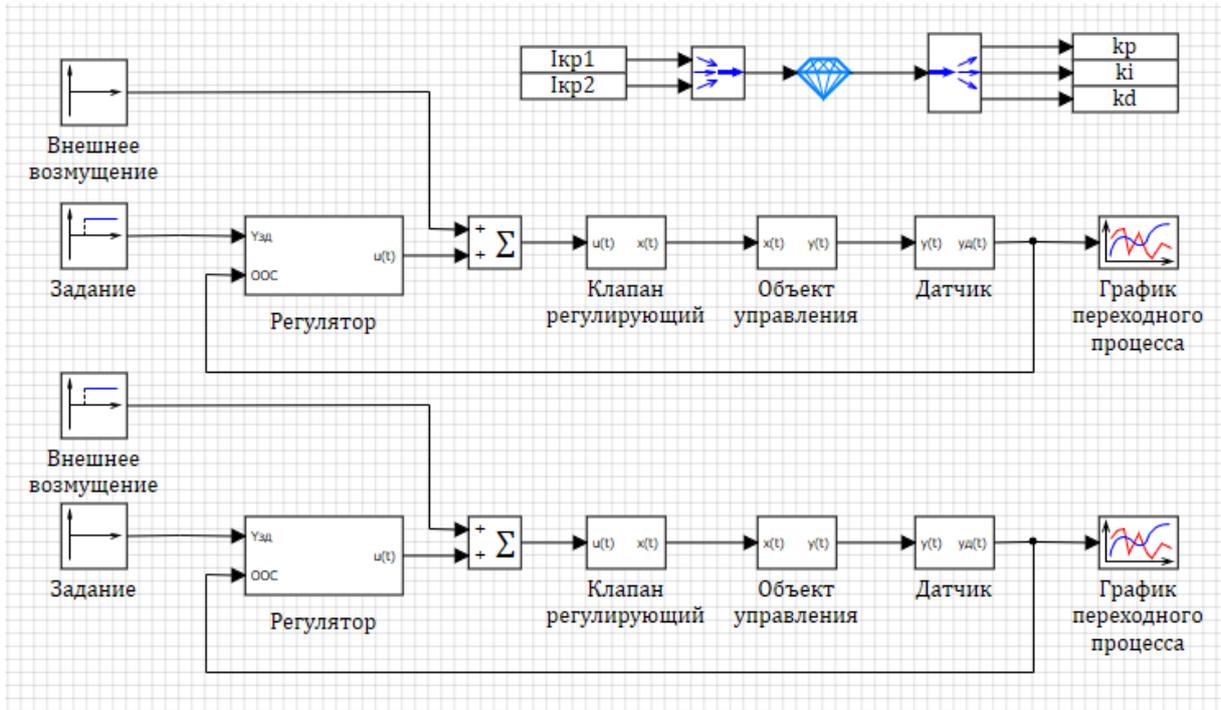


Рисунок 5.4 – Схема уточнения настроек ПИД-регулятора

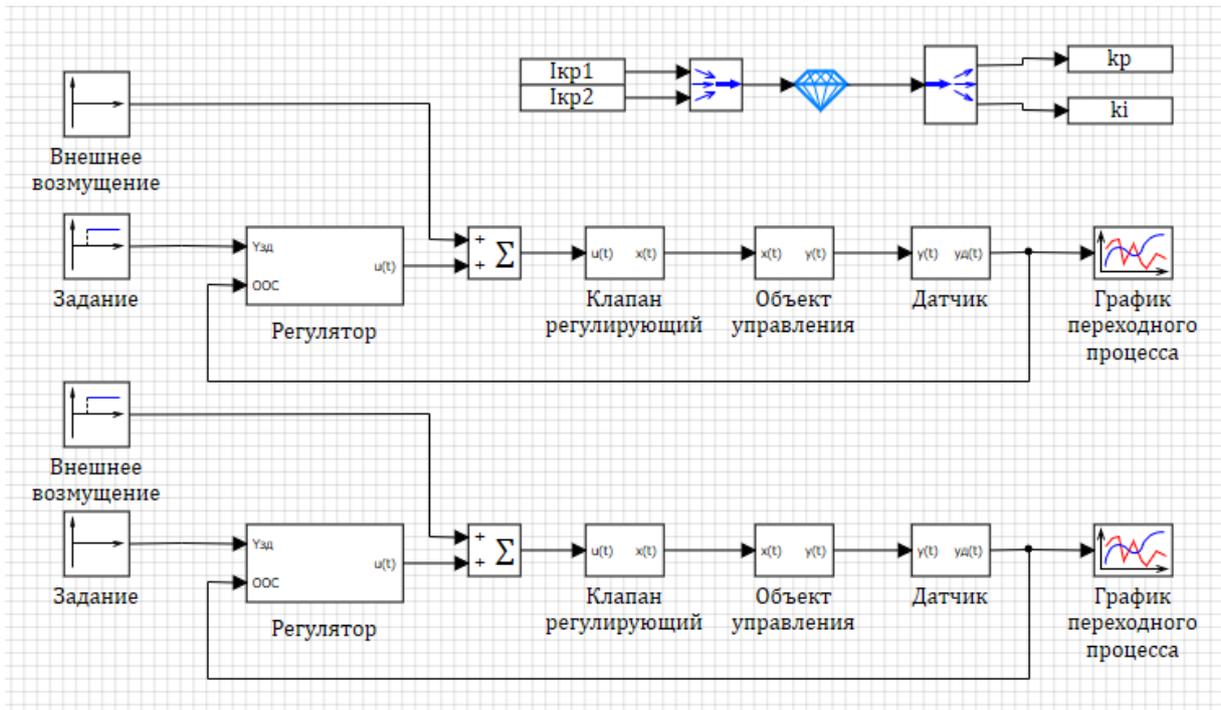
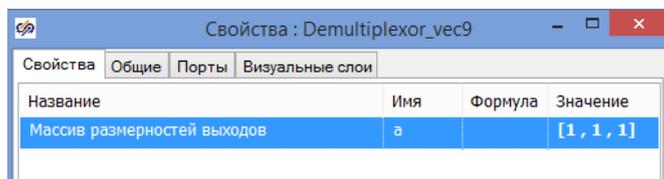


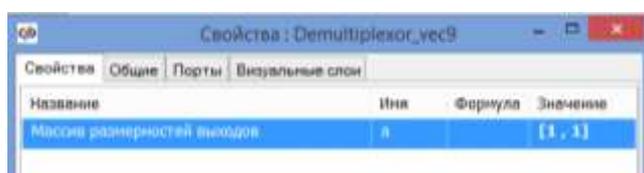
Рисунок 5.5 – Схема уточнения настроек ПИ-регулятора

Вставьте скриншот своей схемы оптимизации в пояснительную записку к курсовому проекту.

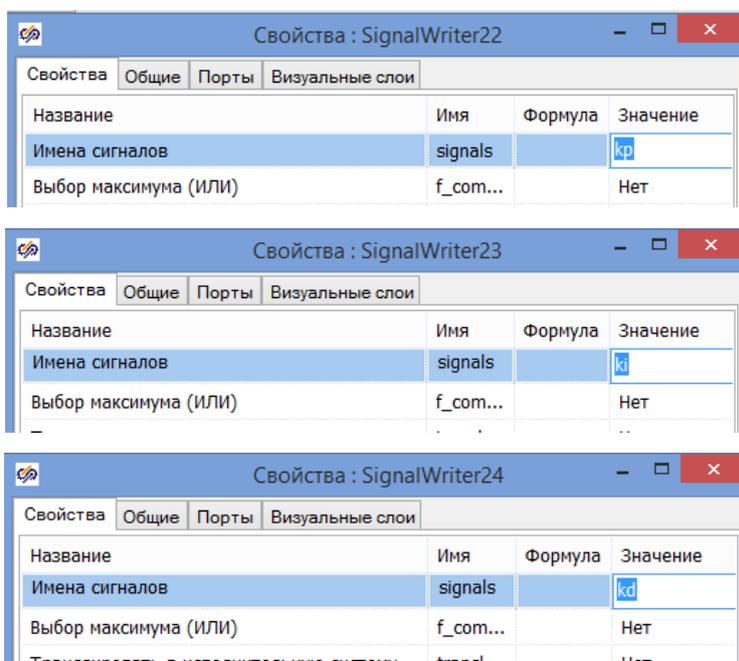
В свойствах блока **Демультимплексор** необходимо будет задать массив размерностей выходов также согласно типу регулятора. В случае ПИД-регулятора:



В случае ПИ-регулятора:



В свойствах блоков **Запись в список сигналов** необходимо ввести для строки «Имена сигналов» в столбце «Значение» глобальные переменные, отвечающие за настроечные параметры соответствующего регулятора - k_p , k_i , k_d (для ПИД-регулятора); k_p , k_i (для ПИ-регулятора).



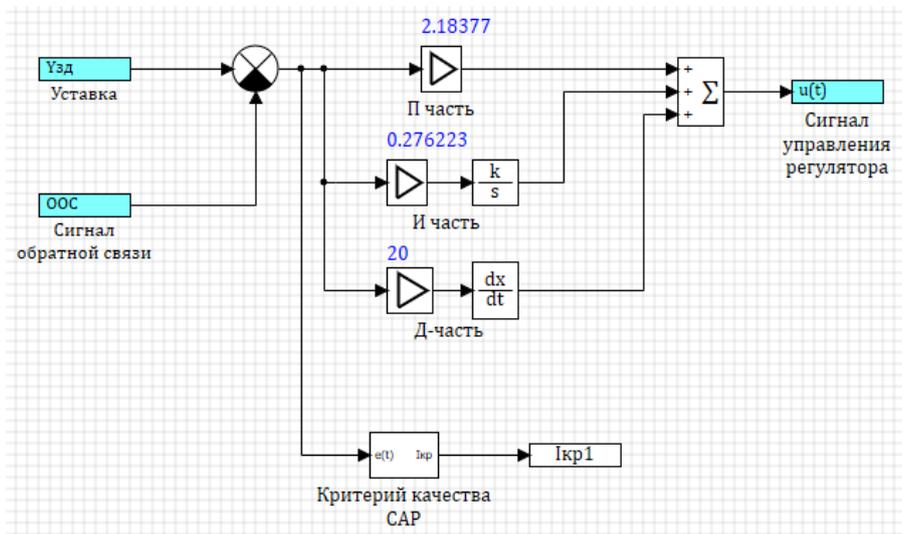
В свойствах блока **Чтение из списка сигналов** необходимо ввести для строки «Имена сигналов» в столбце «Значение» критерий качества системы $I_{кр1}$ – который будет рассчитываться при возмущении по заданию

Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение
Имена сигналов	sig...		Iкр1
Рассчитывать с задержкой на шаг	ste...		<input type="checkbox"/> Нет
Автоблос.	f c...		<input type="checkbox"/> Нет

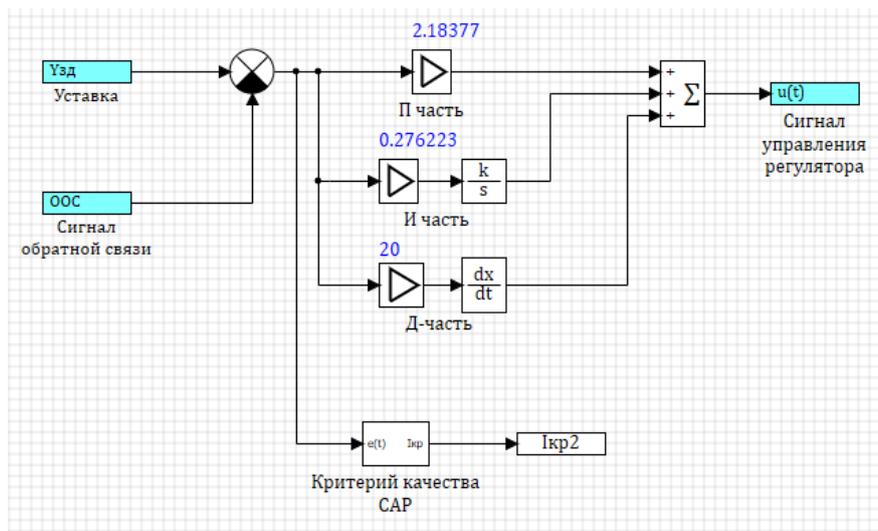
и $I_{кр2}$ – который будет рассчитываться при обработке внешнего возмущения.

Свойства	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение
Имена сигналов	sig...		Iкр2
Рассчитывать с задержкой на шаг	ste...		<input type="checkbox"/> Нет

Не забудьте указать $I_{кр1}$ в субмодели верхнего Регулятора,



а $I_{кр2}$ в субмодели нижнего Регулятора.



Также пропишите критерии $I_{кр1}$, $I_{кр2}$ в Редакторе сигналов проекта

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула
1	kp	П-часть	Вещественное	Вход	
2	ki	И-часть	Вещественное	Вход	
3	kd	Д-часть	Вещественное	Вход	
4	Икр1	Критерий качества CAP	Вещественное	Вход	
5	Икр2	Критерий качества CAP	Вещественное	Вход	

5.3.4. Самостоятельно настройте блок **Оптимизатор**, воспользовавшись следующими рекомендациями. Для вариантов с ПИД-регулятором размерность выходных векторов равна 3.

Название	Имя	Формула	Значение
Режим оптимизации параметров	optmode		По полному переходному
Периодичность анализа критериев оптимиза...	optstep		1
Начальное приближение выходов блока	x0	[1.227, 0.07, 5.06]	[1.227, 0,07, 5.06]
Минимальные значения выходов блока	ymin	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]
Максимальные значения выходов блока	ymax	[10, 10, 20]	[10, 10, 20]
Абсолютная точность подбора значений выхо...	yabserror	[0.01, 0.01, 0.01]	[0.01, 0.01, 0.01]
Начальное приращение выходов	dparams	[0.01, 0.01, 0.01]	[0.01, 0.01, 0.01]
Минимальные значения входных критериев оп...	umin	[0, 0]	[0, 0]
Максимальные значения входных критериев о...	umax	[1, 1]	[1, 1]
Тип суммарного критерия оптимизации	usumtype		Аддитивный
Метод оптимизации	optmethod		Симплекс
Максимальное количество повторных моделир...	maxiter		500
Выдача информации о процессе оптимизации	printoptinfo		<input checked="" type="checkbox"/> Да

Для вариантов с ПИ-регулятором размерность выходных векторов равна 2.

Название	Имя	Формула	Значение
Режим оптимизации параметров	optmode		По полному переходному процессу
Периодичность анализа критериев опти...	optstep		1
Начальное приближение выходов блока	x0	[0.92, 0.033]	[0.92, 0.033]
Минимальные значения выходов блока	ymin	[0, 0]	[0, 0]
Максимальные значения выходов блока	ymax	[10, 10]	[10, 10]
Абсолютная точность подбора значений...	yabserror	[0.001, 0.001]	[0.001, 0.001]
Начальное приращение выходов	dparams	[0.001, 0.001]	[0.001, 0.001]
Минимальные значения входных критер...	umin	[0, 0]	[0, 0]
Максимальные значения входных крите...	umax	[1, 1]	[1, 1]
Тип суммарного критерия оптимизации	usumtype		Аддитивный
Метод оптимизации	optmethod		Симплекс
Максимальное количество повторных мо...	maxiter		500
Выдача информации о процессе оптимиз...	printopti...		<input checked="" type="checkbox"/> Да

- основная задача – добиться улучшения значения критерия (4.2), рассчитанного в пунктах 5.1-5.2, одновременно при обработке возмущения по заданию и при обработке внешнего возмущения, при этом система должна оставаться устойчивой;

- критерий оптимизации (4.2) должен вычисляться на протяжении всего переходного процесса;

- в качестве начального приближения выходов блока можно указать вектор приближенных параметров k_p , k_i , k_d для ПИД-регулятора и k_p , k_i для ПИ-регулятора, найденных в пункте 5.1 или 5.2;

- минимальные значения выходов блока должны быть меньше начальных приближений выходов блока, а максимальные значения выходов блока должны быть соответственно больше;

- минимальные значения входных критериев оптимизации должны быть меньше значений, рассчитанных в пунктах 5.1-5.2 для САР с приближенными настройками регулятора.

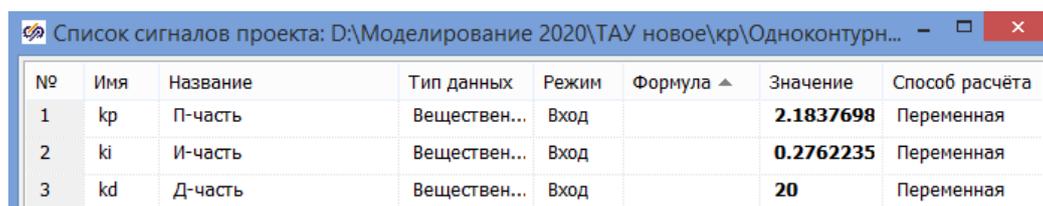
Остальные свойства можно оставить по умолчанию.

Вставьте скриншот с настройками Оптимизатора в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.3.5. Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов. Для наглядности работы блока оптимизации можно открыть блоки **Временной график**. Схема SimInTech будет рассчитываться несколько раз в динамике до получения оптимального результата. По окончании в окне сообщений, в нижней части схемного окна должна появиться информация об оптимизированных параметрах регулятора и достигнутом критерии оптимизации.

Сравните значение критерия с результатом в пунктах 5.1-5.2 для САР с приближенными настройками регулятора. Если качество улучшить не удалось, вернитесь вновь к пункту 5.3.4 и попробуйте поварьировать настройки оптимизатора (usumtype, optmethod, x0, umax). В случае улучшения критерия переходите к пункту 5.3.6.

5.3.6. Зафиксируйте уточненные значения настроек регулятора. Для этого откройте **Редактор сигналов проекта**.



№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		2.1837698	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.2762235	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		20	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.3.7. Снимите переходный процесс в одноконтурной САР с уточненными настройками регулятора при возмущении по заданию. Для этого откройте блок **Временной график** для верхней структуры на схеме.

Вставьте полученный график переходного процесса в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.3.8. Оцените качество регулирования САР по заданному критерию при возмущении по заданию. Для этого откройте **Редактор сигналов проекта**.



№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		2.1837698	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.2762235	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		20	Переменная
4	Ikp1	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		4.5066552	Переменная
5	Ikp2	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		1.2428086	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученное значение критерия качества Iкр1.

5.3.9. Дополнительно определите прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при отработке возмущения по заданию (статическую и динамическую ошибки, время регулирования, перерегулирование, декремент затухания, степень затухания).

Обработайте кривую переходного процесса, полученную в п. 5.3.7, и вставьте результаты обработки в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученные значения прямых показателей качества при отработке возмущения по заданию.

5.3.10. Снимите переходный процесс в одноконтурной САР с уточненными настройками регулятора при обработке внешнего возмущения. Для этого откройте блок **Временной график** для нижней структуры на схеме.

Вставьте полученный график переходного процесса в пояснительную записку к курсовому проекту.

5.3.11. Оцените качество регулирования САР по заданному критерию. Для этого откройте **Редактор сигналов проекта**.

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		2.1837698	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.2762235	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		20	Переменная
4	Iкр1	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		4.5066552	Переменная
5	Iкр2	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		1.2428086	Переменная

Сделайте скриншот Списка сигналов проекта и включите его в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученное значение критерия качества $I_{кр2}$.

5.3.12. Дополнительно определите прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при обработке внешнего возмущения (статическую и динамическую ошибки, время регулирования, перерегулирование, декремент затухания, степень затухания).

Обработайте кривую переходного процесса, полученную в п. 5.3.10, и вставьте результаты обработки в пояснительную записку к курсовому проекту. Зафиксируйте полученные значения прямых показателей качества при обработке внешнего возмущения.

5.3.13. Сохраните проделанный этап курсовой работы в своей рабочей папке. Для этого в **Главном меню Главного окна SimInTech** выбрать пункт «**Файл → Сохранить проект как...**» и далее, используя стандартный диалог, сохранить файл, указав соответствующий путь и имя файла – «**Одноконтурная САР с уточненными настройками.prt**».

6 Сравнительный анализ качества регулирования

6.1. Откройте ранее сохраненную структуру САР. Для этого необходимо в Главном меню Главного окна **SimInTech** выбрать пункт «Файл → Открыть...» и далее, используя стандартный диалог, открыть файл, указав соответствующий путь и имя файла – «Структурная схема одноконтурной САР.prt».

6.2. Настройте расчетные параметры схемы. Установите *Начальный шаг интегрирования* **startstep=0**, *Конечное время расчета* **endtime** выбирается из соображения того, чтобы переходные процессы успевали завершиться, *Максимальный шаг* **hmax=0.01**, *Минимальный шаг* **hmin=0.001**, *Метод интегрирования* **intmet** выберите **Адаптивный 1**. Остальные настройки оставьте по умолчанию.

Вставьте скриншот параметров проекта в пояснительную записку к курсовому проекту.

6.3. Дополните расчетную схему для сравнительного анализа переходных процессов в спроектированной одноконтурной САР с настройками регулятора, рассчитанными разными методами согласно рисунку 6.1.

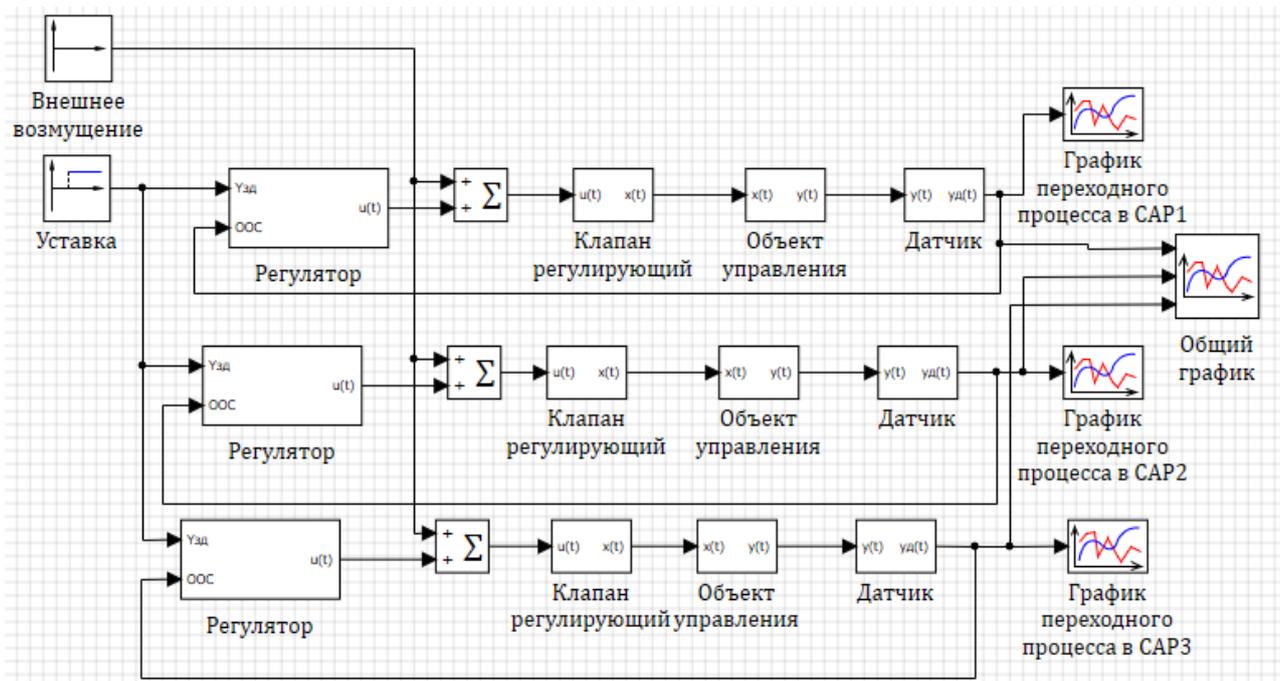
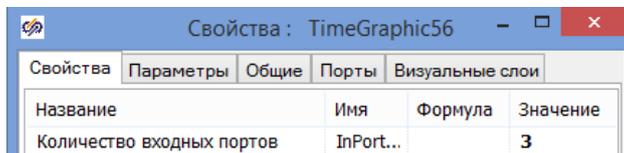


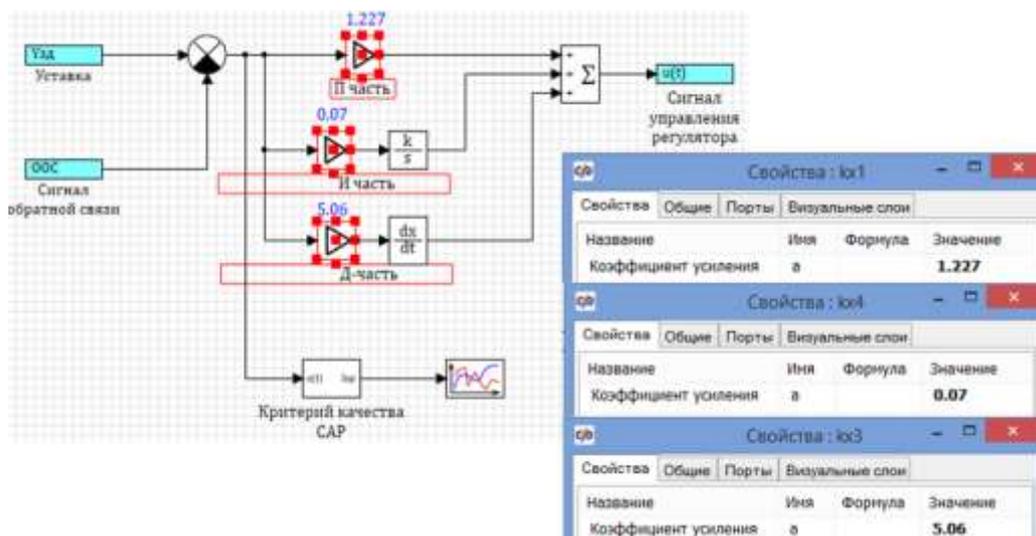
Рисунок 6.1 – Схема для сравнительного анализа переходных процессов в одноконтурной САР

Вставьте скриншот сравнительной схемы в пояснительную записку к курсовому проекту.

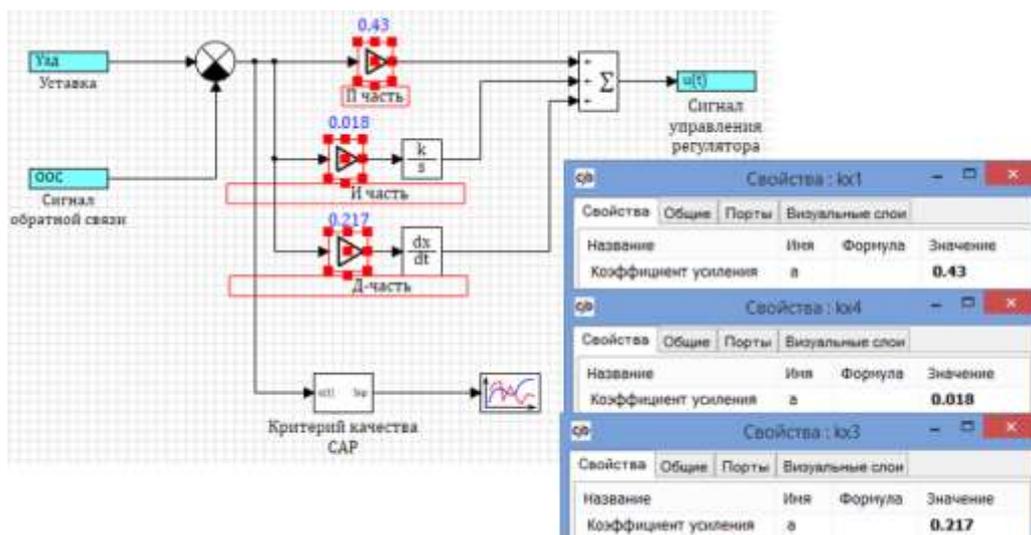
Добавится блок **Временной график**, в общих свойствах которого задайте три входных порта.



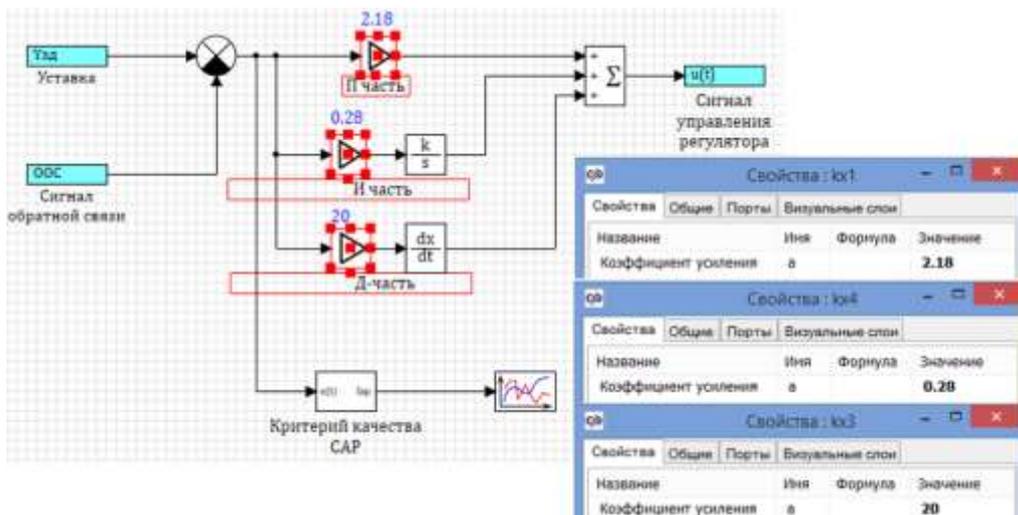
В качестве настроек регулятора воспользуйтесь расчетами главы 5.1-5.3. В свойствах верхней субмодели Регулятор в численном виде задайте приближенные настройки, полученные в главе 5.1.



В свойствах средней субмодели Регулятор в численном виде задайте приближенные настройки, полученные в главе 5.2.



В свойствах нижней субмодели Регулятор в явном виде задайте уточненные настройки, полученные в главе 5.3.



Для вариантов с ПИ-регулятором в свойствах нижнего блока **Усилитель (Д-часть)** необходимо задавать численное значение, равное 0.

6.3. Снимите переходный процесс в одноконтурной САР с различными настройками регулятора при возмущении по заданию. Для этого в структурной схеме в свойствах верхнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $uk=[0]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$. В свойствах нижнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $uk=[1]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$.

Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов.

Вставьте полученный общий график с тремя кривыми переходного процесса в пояснительную записку к курсовому проекту.

В сводную таблицу 6.1 внесите результаты численного расчета показателей качества из главы 5.1-5.3.

Таблица 6.1 – Показатели качества регулирования при возмущении по заданию

Критерий качества и прямые показатели	Ziegler-Nichols 1 способ	Ziegler-Nichols 2 способ	Численная оптимизация
...

Вставьте сводную таблицу с показателями качества регулирования в пояснительную записку к курсовому проекту.

6.4. Снимите переходный процесс в одноконтурной САР с приближенными настройками регулятора при отработке внешнего возмущения. Для этого в исходной схеме в свойствах верхнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $uk=[1]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$. В свойствах нижнего блока **Ступенька** в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задайте $uk=[0]$; для строки «Время срабатывания» задайте $t=[0]$.

Запустите схему на расчет нажатием кнопки **Пуск**  на панели инструментов.

Вставьте полученный общий график с тремя кривыми переходного процесса в пояснительную записку к курсовому проекту.

В сводную таблицу 6.2 внесите результаты численного расчета показателей качества из главы 5.1-5.3.

Таблица 6.2 – Показатели качества регулирования при внешнем возмущении на входе объекта

Критерий качества и прямые показатели	Ziegler-Nichols 1 способ	Ziegler-Nichols 2 способ	Численный SimInTech
...

Вставьте сводную таблицу с показателями качества регулирования в пояснительную записку к курсовому проекту.

6.5. **Сделайте выводы по курсовому проекту и включите их в пояснительную записку.**

6.6. Сохраните проделанный этап курсовой работы в своей рабочей папке. Для этого в Главном меню Главного окна **SimInTech** выбрать пункт «**Файл → Сохранить проект как...**» и далее, используя стандартный диалог, сохранить файл, указав соответствующий путь и имя файла – «**Сравнительный анализ переходных процессов в одноконтурной САР.prt**».

Приложение А. Пример выполнения курсового проекта

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Новомосковский институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»

Кафедра

Автоматизация производственных процессов

Пояснительная записка к курсовому проекту по ТАУ

на тему:

Проектирование одноконтурной САР в SimInTech

Зав. кафедрой

Лопатин А.Г.

Руководитель

Н/контролер

Студент

Группа

А-___-___

г. Новомосковск

20__ г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Новомосковский институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования

«Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»

Кафедра Автоматизация производственных процессов

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой

_____ Лопатин А.Г.
_____ 20____ г.

ЗАДАНИЕ

ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Студенту _____ Курса 2 Группы А-____-__

1. Тема работы и исходные данные:

проектирование одноконтурной САР. Вариант 1. Значения $y(t_i)$ для кривой разгона датчика, объекта регулирования; передаточная функция клапана; закон регулирования и критерий качества приведены в пособии.

2. Задание на специальную разработку:

определить динамические характеристики датчика и объекта регулирования; с учетом передаточной функции клапана спроектировать структурную схему одноконтурной САР. Для заданного закона регулирования рассчитать приближенные настройки регулятора; на основании заданного критерия качества переходного процесса решить задачу параметрической оптимизации параметров настройки регулятора; сравнить качество регулирования в САР с различными настройками регулятора.

3. Перечень обязательного графического материала

Обязательный графический материал отсутствует.

4. Рекомендуемая литература и материалы:

Ляшенко А.И., Маслова Н.В., Лопатин А.Г. Учебно-методические указания к курсовому проекту по ТАУ. Проектирование одноконтурной САР в SimInTech // ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал). Новомосковск, 2022. – 120 с.

5. Срок сдачи законченной работы _____.

6. Дата выдачи задания ____ . ____ .20 ____ г.

Руководитель: _____

Задание принял к исполнению (____ . ____ .20 ____ г.)

Студент: _____

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Сроки	Содержание выполненного задания	% по плану	% фактич.
__.-__- __.-__	Выдача задания, ознакомление с материалом	0	0
__.-__- __.-__	Определение динамических характеристик датчика	15	15
__.-__- __.-__	Определение динамических характеристик объекта регулирования	40	40
__.-__- __.-__	Построение структурной схемы САР	60	60
__.-__- __.-__	Расчет настроек регулятора приближенными методами	80	80
__.-__- __.-__	Уточнение настроек регулятора. Сравнительная оценка качества переходных процессов в САР, рассчитанной различными методами	90	90
__.-__- __.-__	Оформление пояснительной записки	100	100

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка ___ с., ___ рис., ___ табл., ___ источника.

СИНТЕЗ САР, ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ, ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС, РЕГУЛЯТОР, НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРА, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА

Цель работы – с использованием возможностей компьютерного моделирования приобрести навыки исследования свойств объекта управления, разработки схемы управления, расчета и оптимизации настроечных параметров автоматического регулятора в составе одноконтурной САР.

В проекте используются различные методы аппроксимации кривых разгона для определения передаточных функций объекта и датчика. Используется метод Ziegler-Nichols для определения приближенных настроек ПИД (или ПИ)-регулятора, после чего они уточняются путем решения задачи параметрической оптимизации в SimInTech. В результате расчетов получены оптимальные настройки регулятора, проведен сравнительный анализ качества регулирования в синтезированных системах при различных возмущениях.

Содержание

Введение	71
А.1 Определение передаточной функции датчика	71
А.1.1 Создание расчетной схемы моделирования кривой разгона датчика	73
А.1.2 Определение приближенных параметров передаточной функции датчика	74
А.1.3 Уточнение параметров передаточной функции датчика.....	76
А.2 Определение передаточной функции объекта.....	78
А.2.1 Создание расчетной схемы моделирования кривой разгона объекта	79
А.2.2 Определение приближенных параметров передаточной функции объекта.....	81
А.2.3 Уточнение параметров передаточной функции объекта	85
А.3 Проектирование структурной схемы системы регулирования.....	87
А.3.1 Создание субмодели «Объект управления»	87
А.3.2 Создание субмодели «Датчик».....	88
А.3.3 Создание субмодели «Клапан регулирующий».....	88
А.3.4 Создание субмодели «Регулятор».....	89
А.3.5 Синтез структурной схемы одноконтурной САР.....	91
А.4 Определение настроек регулятора.....	92
А.4.1 Приближенный метод Ziegler-Nichols (способ 1).....	92
А.4.2 Приближенный метод Ziegler-Nichols (способ 2).....	99
А.4.3 Уточнение настроек регулятора численным методом оптимизации	107
А.5 Сравнительная оценка качества регулирования	113
Список использованных источников.....	117

Введение

Современный период автоматизации производственных процессов характеризуется созданием и развитием автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Создание АСУ ТП и выполнение возложенных на них задач было бы невысказимо без появления современных средств переработки информации - электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Для химических производств характерна двухуровневая структура АСУ ТП, а все ее функции подразделяются на информационные и управляющие. Для управляющей части АСУ ТП используются системы автоматического регулирования (САР).

В процессе выполнения курсового проекта будут получены навыки исследования свойств объекта управления, разработки схемы управления, расчета и оптимизации настроечных параметров автоматического регулятора в составе одноконтурной САР.

А.1 Определение передаточной функции датчика

В качестве передаточной функции датчика будем использовать инерционное звено первого порядка:

$$W_d(s) = \frac{k}{Ts + 1}$$

где k - коэффициент усиления; T - постоянная времени.

Для определения приближенных значений параметров передаточной функции датчика будем использовать графический метод аппроксимации кривой разгона (рисунок А.1.1).

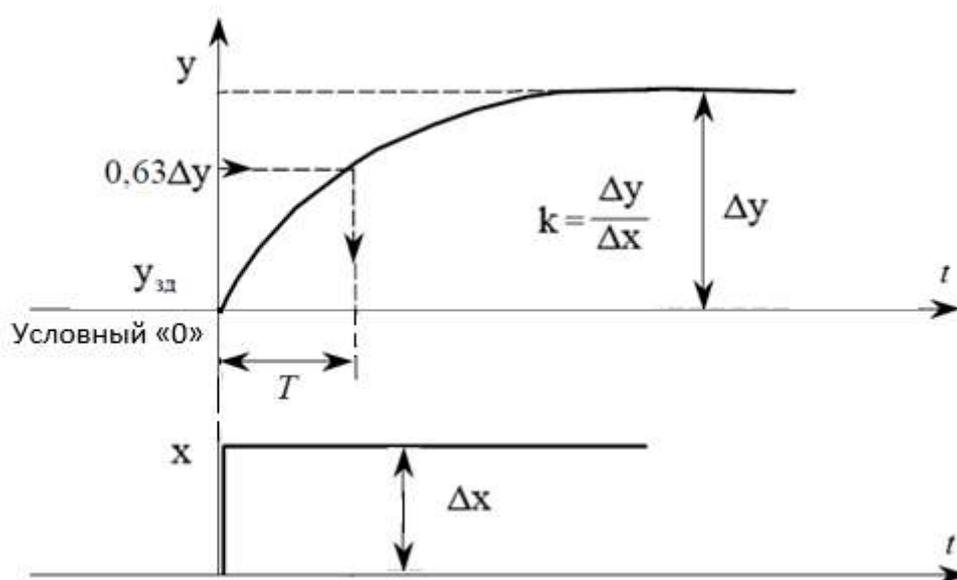


Рисунок А.1.1 – Обработка кривой разгона звеном 1-го порядка графическим методом (при единичном ступенчатом возмущении)

Для уточнения значений параметров передаточной функции датчика воспользуемся встроенным блоком SimInTech – Оптимизатор. В качестве критерия аппроксимации кривой разгона датчика выберем:

$$I = \int_0^t (y_э - y_p)^2 dt \rightarrow \min$$

где $y_э$ - значения выходной переменной датчика, полученные экспериментально, y_p - значения выходной переменной датчика, полученные в результате расчета средствами SimInTech.

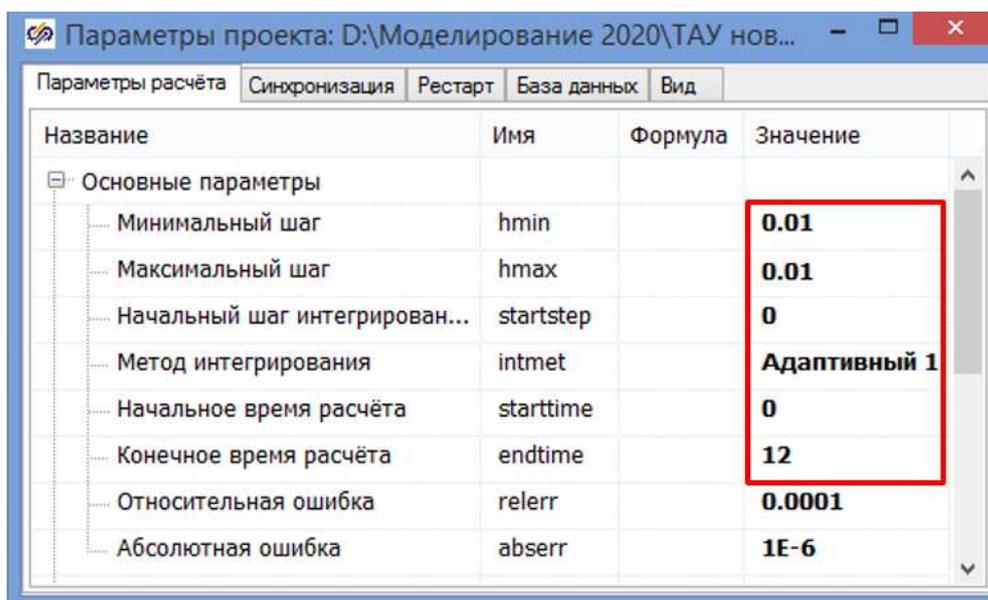
Оптимизируемых параметров для передаточной функции датчика будет два: коэффициент усиления k и постоянная времени T . В качестве начальных приближений будем использовать найденные графическим методом параметры.

А.1.1 Создание расчетной схемы моделирования кривой разгона датчика

датчика

Запустим среду SimInTech и создадим новый проект с помощью команды «Файл → Новый проект → Схема модели общего вида».

Настроим расчетные параметры схемы (рисунок А.1.2).



Название	Имя	Формула	Значение
Основное параметры			
Минимальный шаг	hmin		0.01
Максимальный шаг	hmax		0.01
Начальный шаг интегрирован...	startstep		0
Метод интегрирования	intmet		Адаптивный 1
Начальное время расчёта	starttime		0
Конечное время расчёта	endtime		12
Относительная ошибка	relerr		0.0001
Абсолютная ошибка	abserr		1E-6

Рисунок А.1.2 – Настройки параметров проекта

Соберем расчетную схему для задания кривой разгона датчика по экспериментальным исходным данным (рисунок А.1.3).

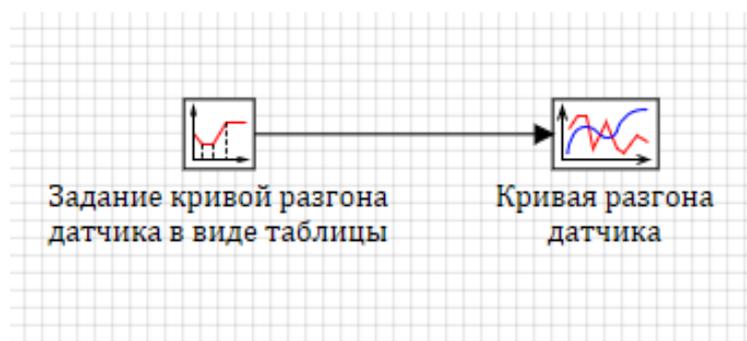


Рисунок А.1.3 – Схема для задания кривой разгона датчика таблично

В свойствах блока Кусочно-линейная согласно варианту зададим исходные данные (таблица А.1.1, рисунок А.1.4).

Таблица А.1.1 - Исходные значения $y(t_i)$ для кривой разгона датчика

t_i № вар.	0	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	4.0	5.0	6.0	6.5	7.5
1	0.0	0.228	0.321	0.406	0.594	0.698	0.732	0.883	0.936	0.95	0.95	0.95

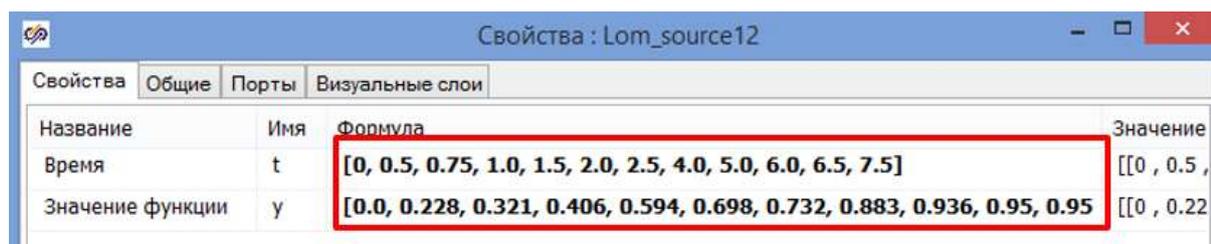


Рисунок А.1.4 – Ввод исходных данных

А.1.2 Определение приближенных параметров передаточной функции датчика

Запустим схему на расчет нажатием кнопки Пуск  на панели инструментов и получим кривую разгона датчика по экспериментальным точкам. Проведем обработку кривой разгона согласно методике, представленной на рисунке А.1.1, получим рисунок А.1.5.

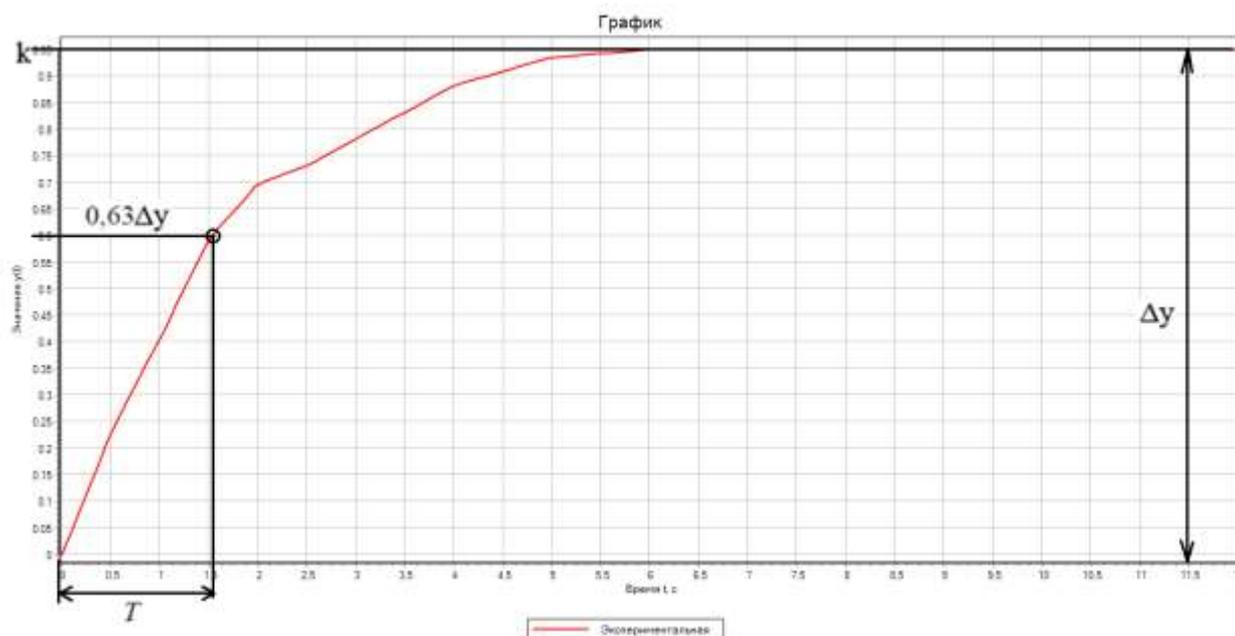


Рисунок А.1.5 – Аппроксимация кривой разгона датчика вручную

$$\Delta x=1$$

Коэффициент усиления: $k=\Delta y/\Delta x=0.95/1=0.95$

Постоянная времени: $T=1.52$ сек

Соберем расчетную схему для приближенной обработки кривой разгона датчика (рисунок А.1.6).



Рисунок А.1.6 – Схема для аппроксимации кривой разгона датчика

Задаем свойства блока Инерционное звено 1-го порядка, в свойствах блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $uk=[1]$, а для строки «Время срабатывания» в столбце «Значение» задаем $t=[0]$, в свойствах блока Временной график задаем два входных порта.

Запустим схему на расчет нажатием кнопки Пуск  на панели инструментов и получим следующие графики кривой разгона датчика (рисунок А.1.7).

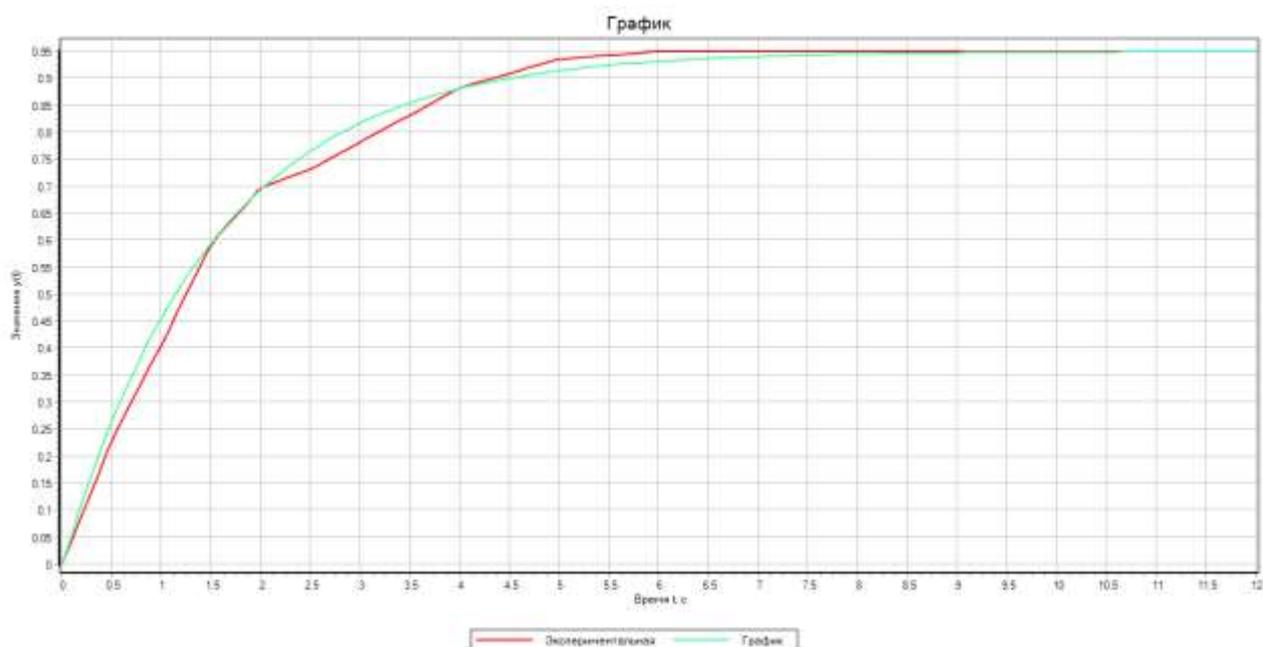


Рисунок А.1.7 – Кривая разгона датчика

А.1.3 Уточнение параметров передаточной функции датчика

Зададим оптимизируемые параметры как глобальные сигналы проекта (рисунок А.1.8).

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k	Коэффициент усиления датчика	Веществен...	Вход		0	Переменная
2	T	Постоянная времени датчика	Веществен...	Вход		0	Переменная

Рисунок А.1.8 – Список сигналов проекта

Доработаем ранее созданную схему для оптимальной обработки кривой разгона датчика (рисунок А.1.9).

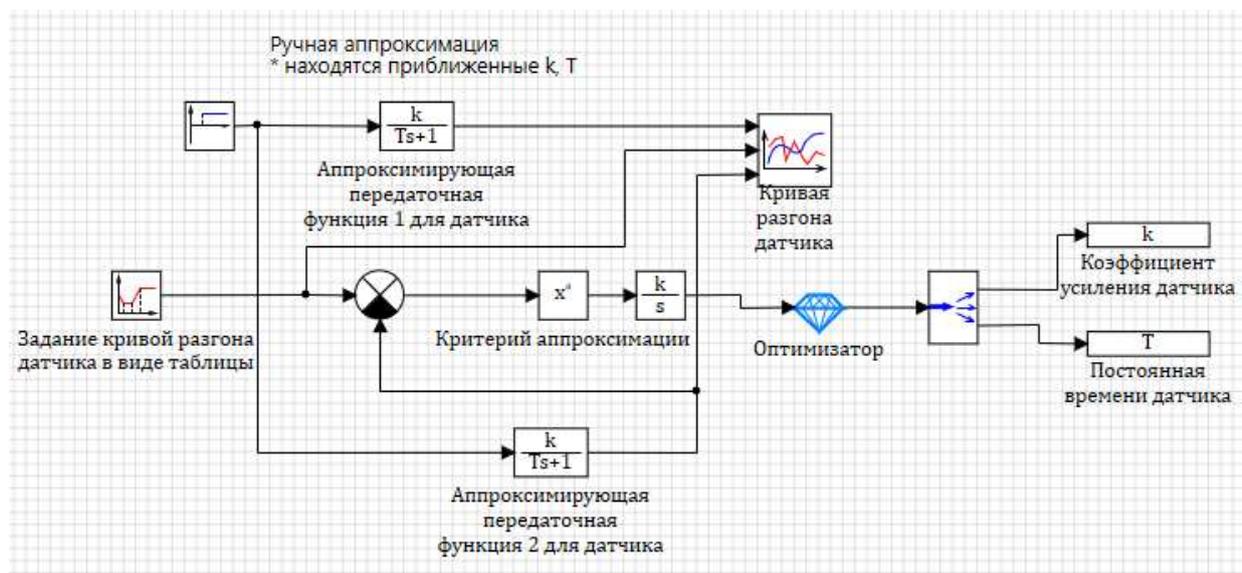


Рисунок А.1.9 – Схема для аппроксимации кривой разгона датчика средствами SimInTech

Настроим все элементы схемы согласно описанию в пособии [1], в том числе зададим свойства в блоке Оптимизатор (рисунок А.1.10).

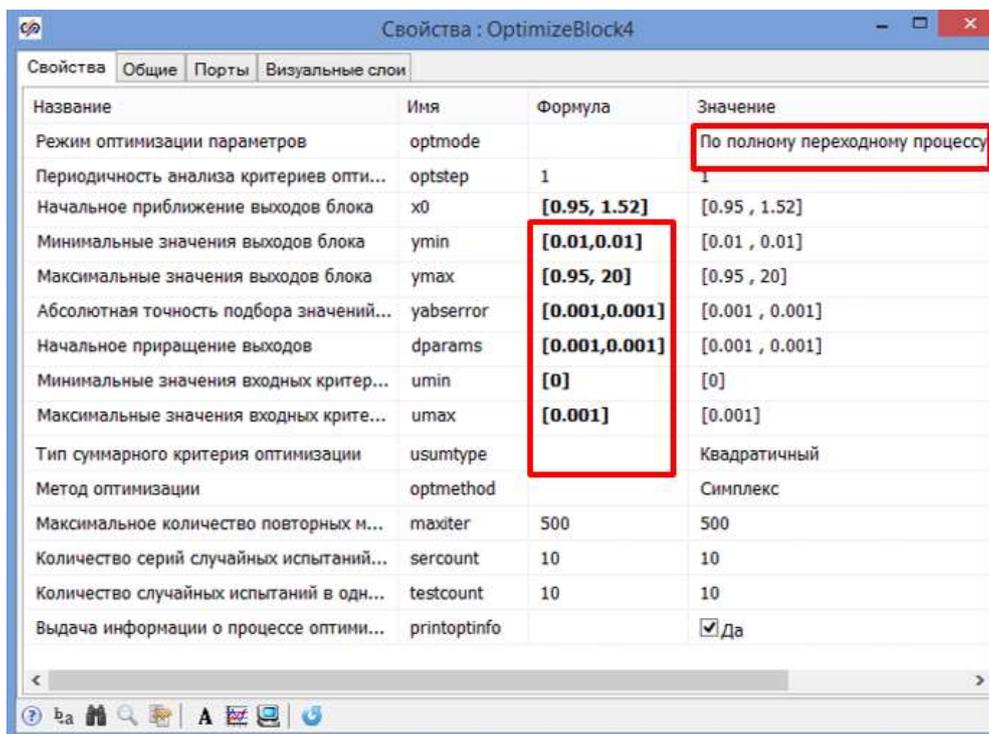


Рисунок А.1.10 – Свойства блока Оптимизатор

Проведя моделирование схемы, получили уточненные значения параметров передаточной функции датчика, которые можно наблюдать в редакторе сигналов проекта (рисунок А.1.11).

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k	Кoeffициент усиления датчика	Веществен...	Вход		0.95	Переменная
2	T	Постоянная времени датчика	Веществен...	Вход		1.6118717	Переменная

Рисунок А.1.11 – Уточненные значения параметров передаточной функции датчика

Передаточная функция датчика будет иметь вид:

$$W_d(s) = \frac{0.95}{1.61 \cdot s + 1}$$

Исходная кривая разгона датчика совместно с полученной путем аппроксимации вручную и с помощью средств SimInTech, приведены на рисунке А.1.12.

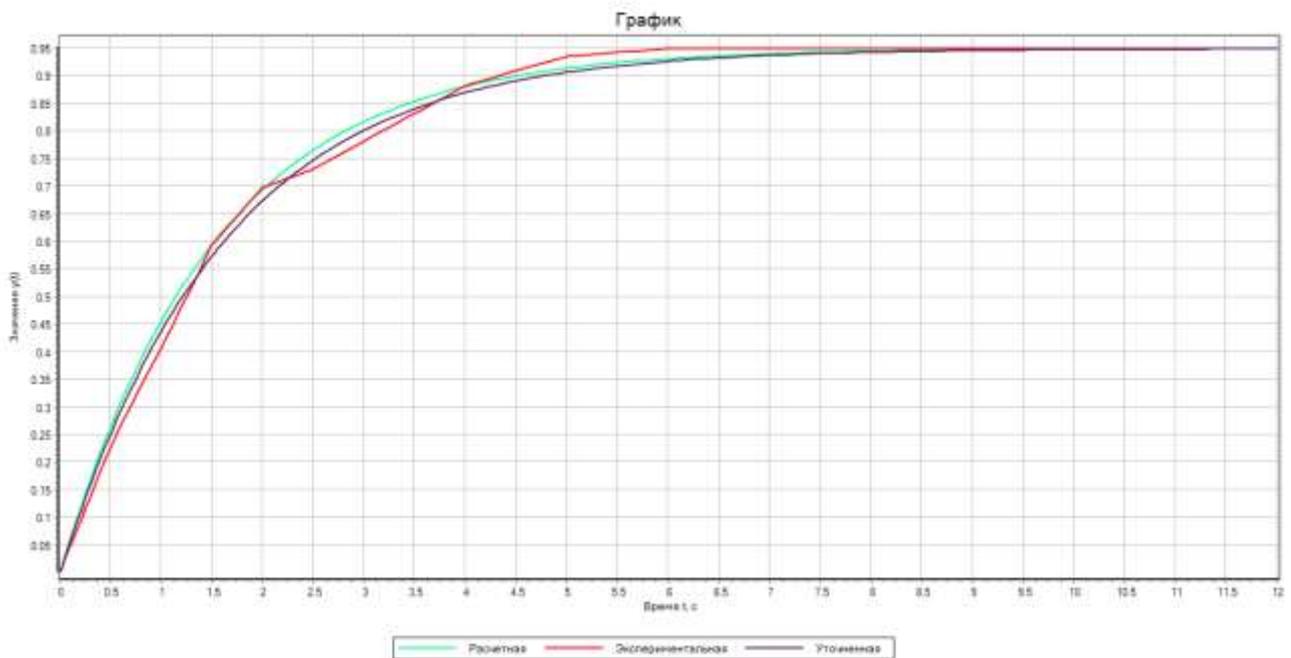


Рисунок А.1.12 – Кривая разгона датчика

Успешно завершённый этап проекта сохраним стандартными методами Windows.

А.2 Определение передаточной функции объекта

В качестве передаточной функции объекта будем использовать апериодическое звено второго порядка:

$$W_{oy}(s) = \frac{k_1}{T_1s + 1} \cdot \frac{1}{T_2s + 1}$$

где k_1 - коэффициент усиления; T_1, T_2 - постоянные времени.

Для определения приближенных значений параметров передаточной функции объекта будем использовать графический метод аппроксимации кривой разгона (рисунок А.2.1).

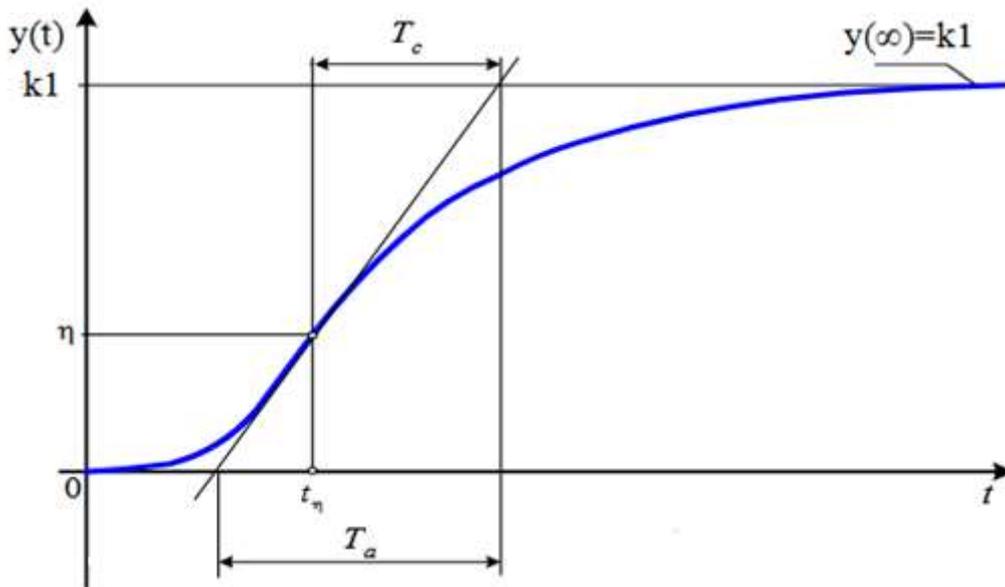


Рисунок А.2.1 – Обработка кривой разгона звеном 2-го порядка графическим методом (при единичном ступенчатом возмущении)

Для уточнения значений параметров передаточной функции объекта воспользуемся встроенным блоком SimInTech – **Оптимизатор**. В качестве критерия аппроксимации кривой разгона объекта выберем:

$$I = \int_0^t (y_э - y_p)^2 dt \rightarrow \min$$

где $y_э$ - значения выходной переменной объекта, полученные экспериментально, y_p - значения выходной переменной объекта, полученные в результате расчета средствами SimInTech.

Оптимизируемых параметров для передаточной функции объекта будет три: коэффициент усиления k_1 , постоянные времени T_1 и T_2 . В качестве начальных приближений будем использовать найденные графическим методом параметры.

А.2.1 Создание расчетной схемы моделирования кривой разгона объекта

Запустим среду SimIntech и создадим новый проект с помощью команды «Файл → Новый проект → Схема модели общего вида».

Настроим расчетные параметры схемы (рисунок А.2.2).

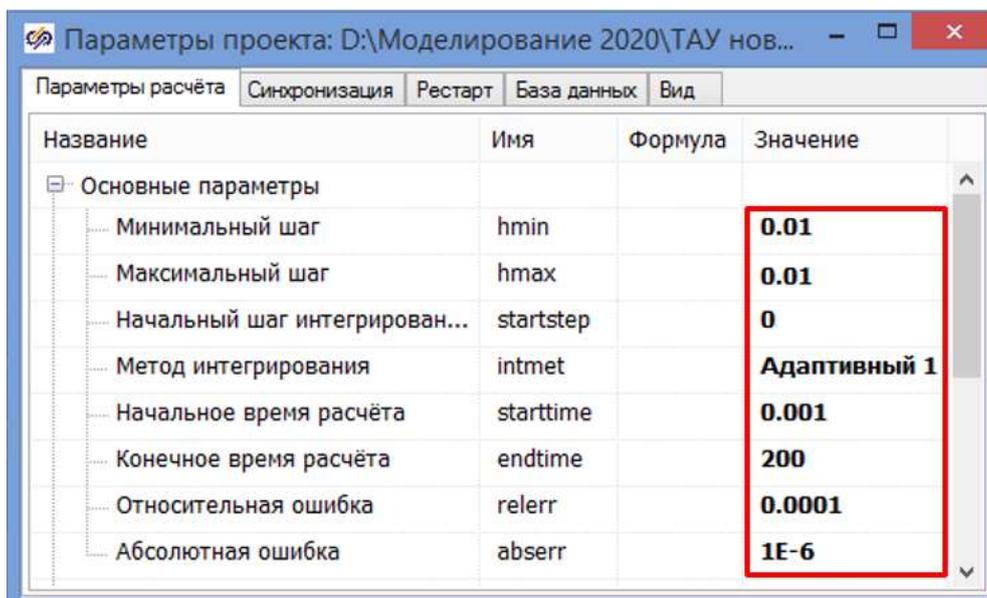


Рисунок А.2.2 – Настройки параметров проекта

Соберем расчетную схему для задания кривой разгона объекта по экспериментальным исходным данным (рисунок А.2.3).

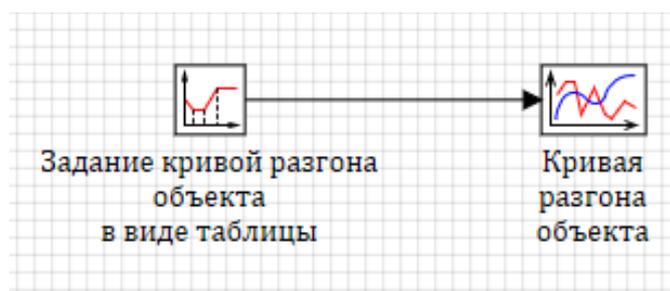


Рисунок А.2.3 – Схема для аппроксимации кривой разгона объекта таблично

В свойствах блока Кусочно-линейная согласно варианту зададим исходные данные (таблица А.2.1, рисунок А.2.4).

Таблица А.2.1 - Исходные значения $y(t_i)$ для кривой разгона объекта

t_i № вар.	0	4	8	12	14	16	20	32	48	64	80	112	130	150
1	0	0.1	0.5	0.98	1.3	1.6	2.2	3.6	4.8	5.6	6.0	6.2	6.2	6.2

Название	Имя	Формула	Значение
Время	t	[0, 4, 8, 12, 14, 16, 20, 32, 48, 64, 80, 112, 130, 150]	[[0, 4, 8, 12,
Значение функции	y	[0.0, 0.1, 0.5, 0.98, 1.3, 1.6, 2.2, 3.6, 4.8, 5.6, 6.0, 6.2, 6.2, 6.2]	[[0, 0.1, 0.5,

Рисунок А.2.4 – Ввод исходных данных

А.2.2 Определение приближенных параметров передаточной функции объекта

Запустим схему на расчет нажатием кнопки Пуск  на панели инструментов и получим график кривой разгона объекта по экспериментальным точкам. Проведем обработку кривой разгона согласно методике, представленной на рисунке А.2.1.

Для определения точки перегиба η , в которой производная $dy(t)/dt$ максимальна воспользуемся SimInTech, доработав ранее созданную схему (рисунок А.2.5).

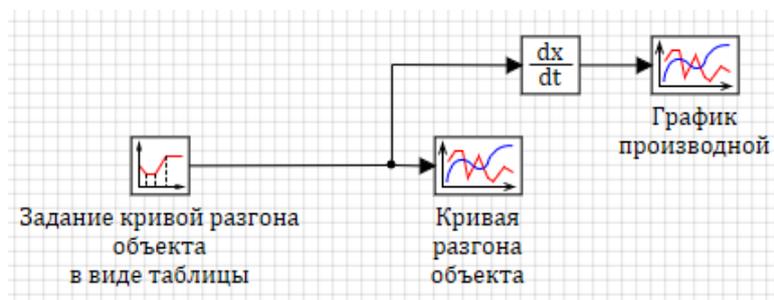


Рисунок А.2.5 – Схема для нахождения точки перегиба кривой разгона объекта

Анализ графика производной (рисунок А.2.6) показывает, что точке перегиба η , в которой производная $dy(t)/dt$ максимальна, соответствует время, равное ~ 13 сек.

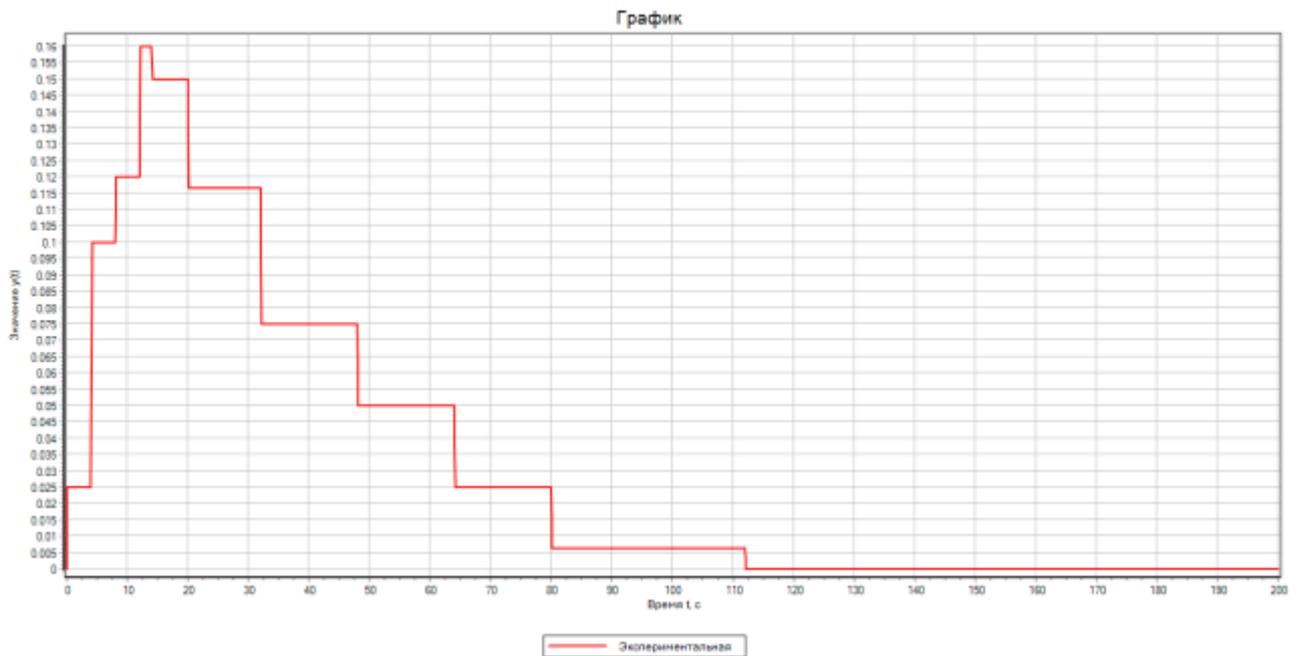


Рисунок А.2.6 – График производной кривой разгона объекта

Через найденную ординату η проводим касательную к кривой разгона объекта до пересечения с осью абсцисс и линией $y(\infty)=k_1$ (при единичном ступенчатом возмущении). Получим рисунок А.2.7.

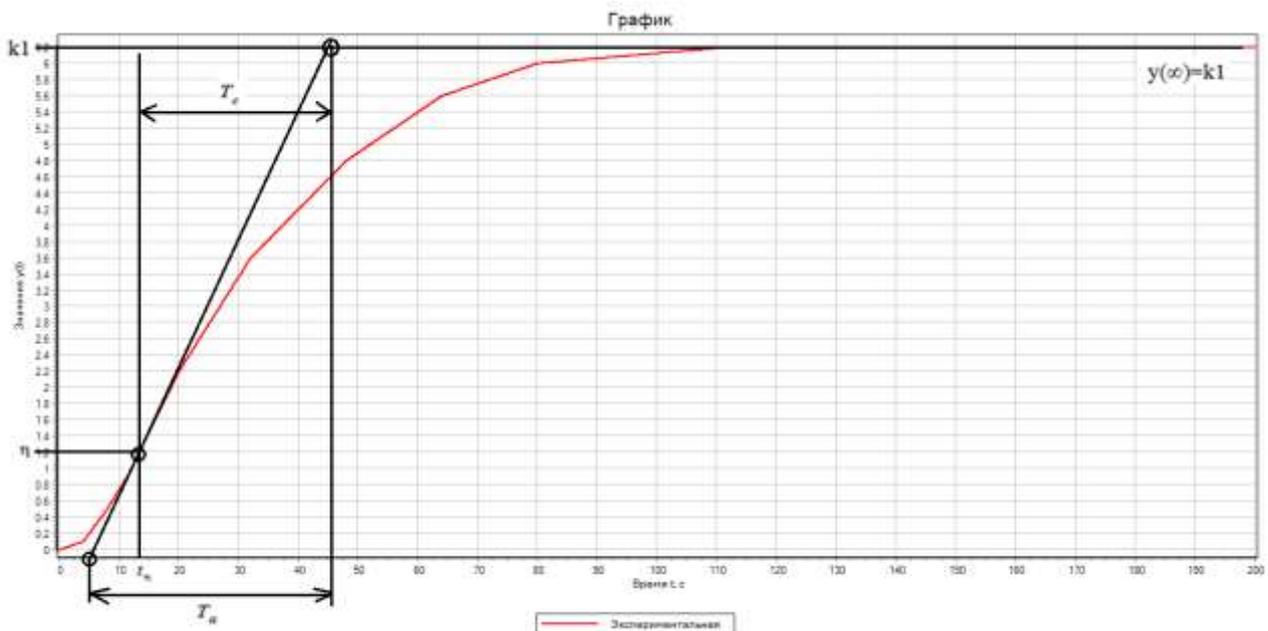


Рисунок А.2.7 – Аппроксимация кривой разгона объекта вручную

По графику находим величины:

$$T_a=41.25 \text{ сек}$$

$$T_c=33.85 \text{ сек}$$

Постоянные времени T_1 и T_2 определяем по номограммам (рисунок А.2.8) для отношения $T_c/T_a = \text{const} = 0.82$.

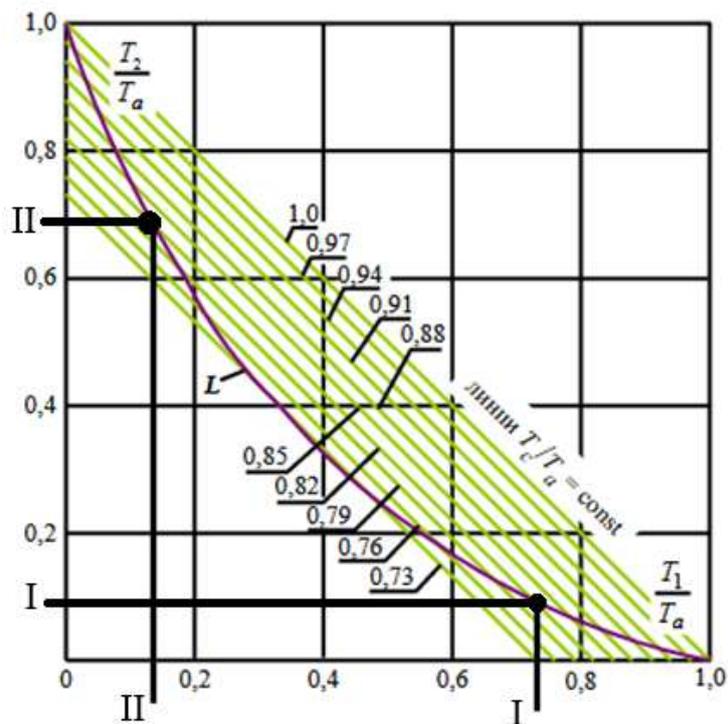


Рисунок А.2.8 – Номограммы для нахождения постоянных времени кривой разгона объекта

Для координаты I-I получаем

$$T_2/T_a = 0.09$$

$$\text{откуда } T_2 = 0.09 \cdot 41.25 = 3.7 \text{ сек}$$

$$T_1/T_a = 0.73$$

$$\text{откуда } T_1 = 0.73 \cdot 41.25 = 30 \text{ сек}$$

Для координаты II-II получаем

$$T_2/T_a = 0.69$$

$$\text{откуда } T_2 = 0.69 \cdot 41.25 = 28.5 \text{ сек}$$

$$T_1/T_a = 0.13$$

$$\text{откуда } T_1 = 0.13 \cdot 41.25 = 5.4 \text{ сек}$$

Вспользуемся расчетами, например, по координате I-I.

Коэффициент усиления:

$$k_1 = y(\infty) = 6.2 \text{ при } \Delta x = 1$$

Соберем расчетную схему для приближенной обработки кривой разгона объекта (рисунок А.2.9).



Рисунок А.2.9 – Схема для аппроксимации кривой разгона объекта

Задаем свойства блоков Инерционное звено 1-го порядка, в свойствах блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[1]$, а для строки «Время срабатывания» в столбце «Значение» задаем $t=[0]$, в свойствах блока Временной график задаем два входных порта.

Запустим схему на расчет нажатием кнопки Пуск  на панели инструментов и получим следующие графики кривой разгона объекта (рисунок А.2.10).

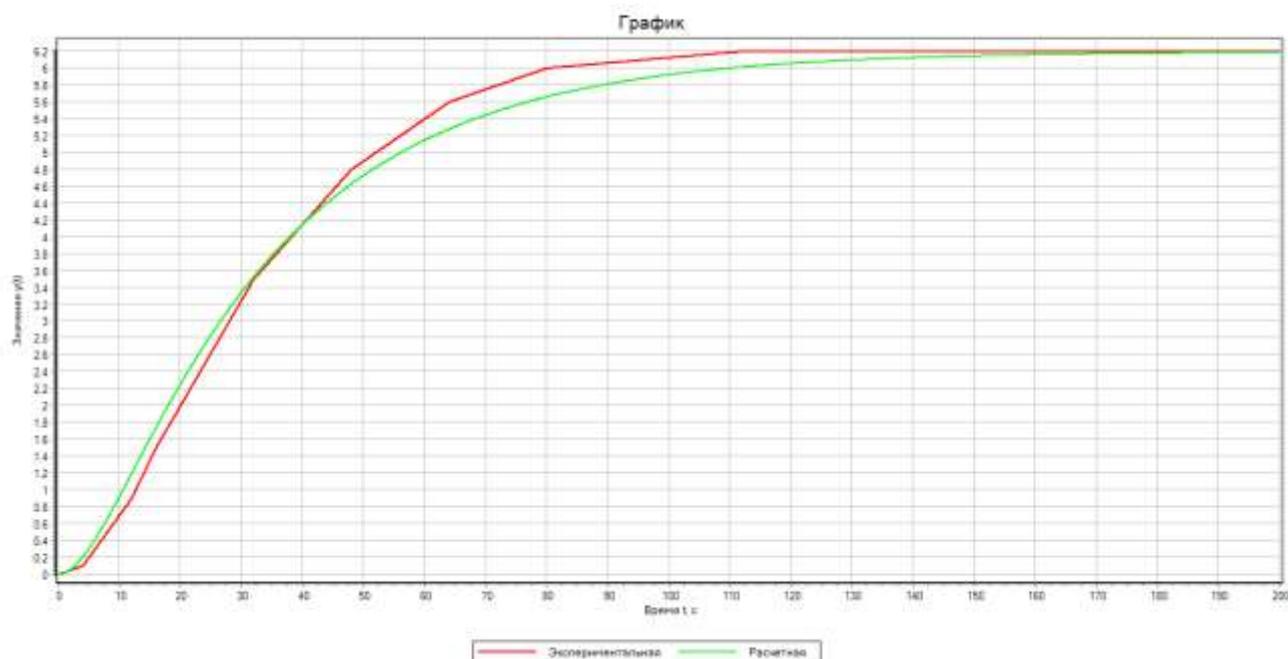
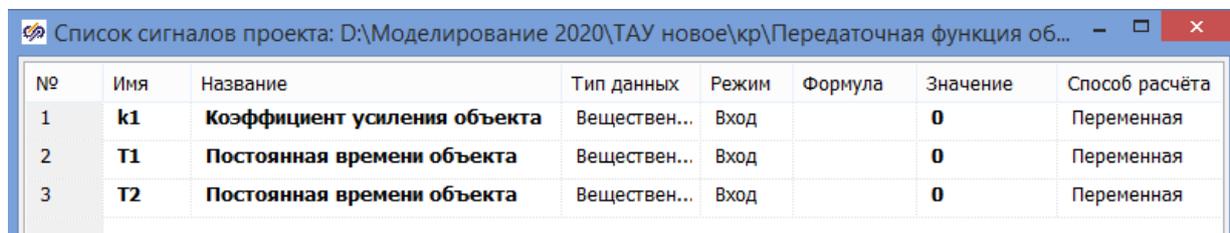


Рисунок А.2.10 – Кривая разгона объекта

А.2.3 Уточнение параметров передаточной функции объекта

Зададим оптимизируемые параметры как глобальные сигналы проекта (рисунок А.2.11).



№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k1	Коэффициент усиления объекта	Веществен...	Вход		0	Переменная
2	T1	Постоянная времени объекта	Веществен...	Вход		0	Переменная
3	T2	Постоянная времени объекта	Веществен...	Вход		0	Переменная

Рисунок А.2.11 – Список сигналов проекта

Доработаем ранее созданную схему для оптимальной обработки кривой разгона объекта (рисунок А.2.12).

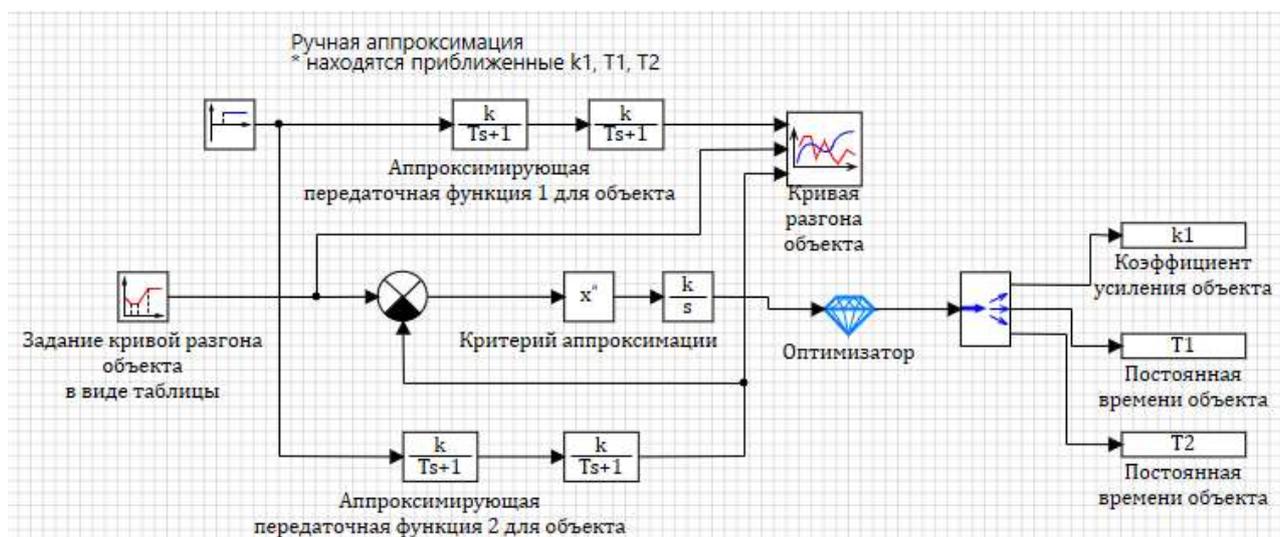


Рисунок А.2.12 – Схема для аппроксимации кривой разгона объекта средствами SimInTech

Настроим все элементы схемы согласно описанию в пособии [1], в том числе зададим свойства в блоке Оптимизатора (рисунок А.2.13).

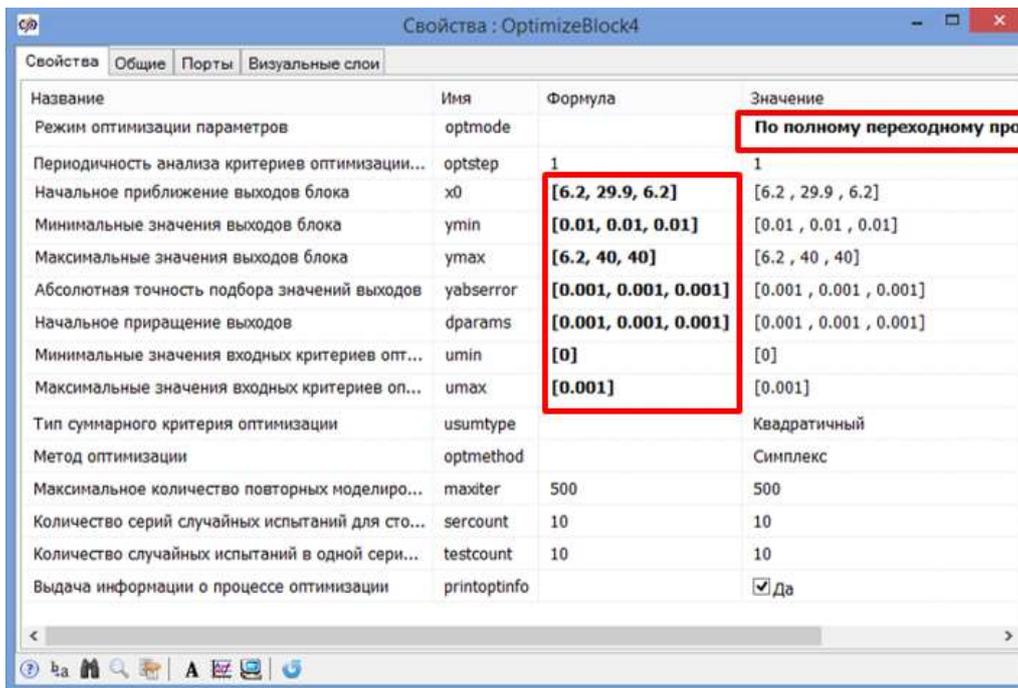


Рисунок А.2.13 – Свойства блока Оптимизатор

Проведя моделирование схемы, получили уточненные значения параметров передаточной функции объекта, которые можно наблюдать в редакторе сигналов проекта (рисунок А.2.14).

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k1	Коэффициент усиления объекта	Веществен...	Вход		6.2	Переменная
2	T1	Постоянная времени объекта	Веществен...	Вход		16.649565	Переменная
3	T2	Постоянная времени объекта	Веществен...	Вход		16.643638	Переменная

Рисунок А.2.14 – Уточненные значения параметров передаточной функции объекта

Передаточная функция объекта будет иметь вид:

$$W_{oy}(s) = \frac{6.2}{16.65 \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{16.64 \cdot s + 1}$$

Исходная кривая разгона объекта совместно с полученной путем аппроксимации вручную и с помощью средств SimInTech, приведены на рисунке А.2.15.

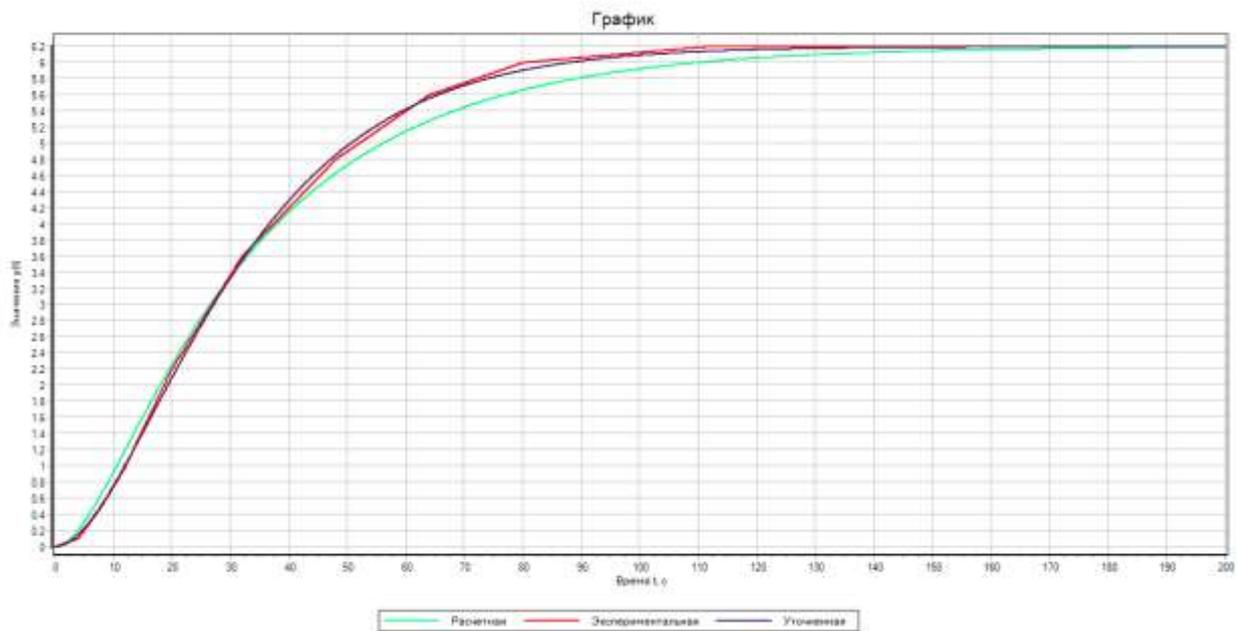


Рисунок А.2.15 – Кривая разгона объекта

Успешно завершённый этап проекта сохраним стандартными методами Windows.

А.3 Проектирование структурной схемы системы регулирования

Запускаем среду SimInTech и создаем новый проект с помощью команд «Файл → Новый проект → Схема модели общего вида».

А.3.1 Создание субмодели «Объект управления»

Создаем субмодель «Объект управления» согласно инструкции в пособии, реализовав в нем передаточную функцию, рассчитанную в главе А.2.3 курсового проекта:

$$W_{oy}(s) = \frac{6.2}{16.65 \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{16.64 \cdot s + 1}$$

Субмодель «Объект управления» примет вид (рисунок А.3.1).

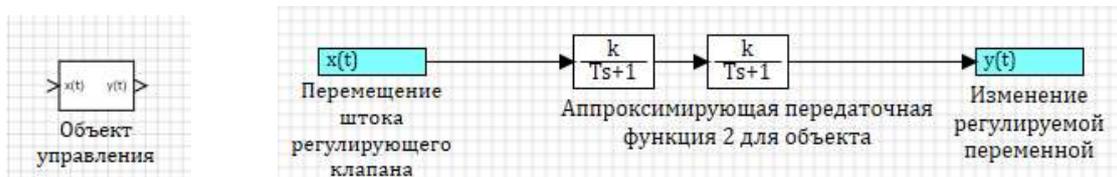


Рисунок А.3.1 – Субмодель «Объект управления»

А.3.2 Создание субмодели «Датчик»

Создаем субмодель «Датчик» согласно инструкции в пособии, реализовав в нем передаточную функцию, рассчитанную в главе А.1.3 курсового проекта:

$$W_d(s) = \frac{0.95}{1.61 \cdot s + 1}$$

Субмодель «Датчик» примет вид (рисунок А.3.2).



Рисунок А.3.2 – Субмодель «Датчик»

А.3.3 Создание субмодели «Клапан регулирующий»

Согласно варианту для передаточной функции регулирующего клапана в виде следующего звена:

$$W(s) = k \cdot \frac{(T_1s + 1)}{T_2s^2 + T_3s + 1}$$

задаем исходные данные (таблица А.3.1)

Таблица А.3.1 - Исходные значения параметров передаточной функции клапана

№ вар.	k	T ₁	T ₂	T ₃
1	1	1,07	2,5	2,6

Передаточная функция клапана примет окончательный вид:

$$W(s) = \frac{1.07s + 1}{2.5s^2 + 2.6s + 1}$$

Субмодель будет иметь вид (рисунок А.3.3). В свойствах блока Передаточная функция общего вида запись векторов начинаем с нулевого элемента в порядке возрастания степени при s.

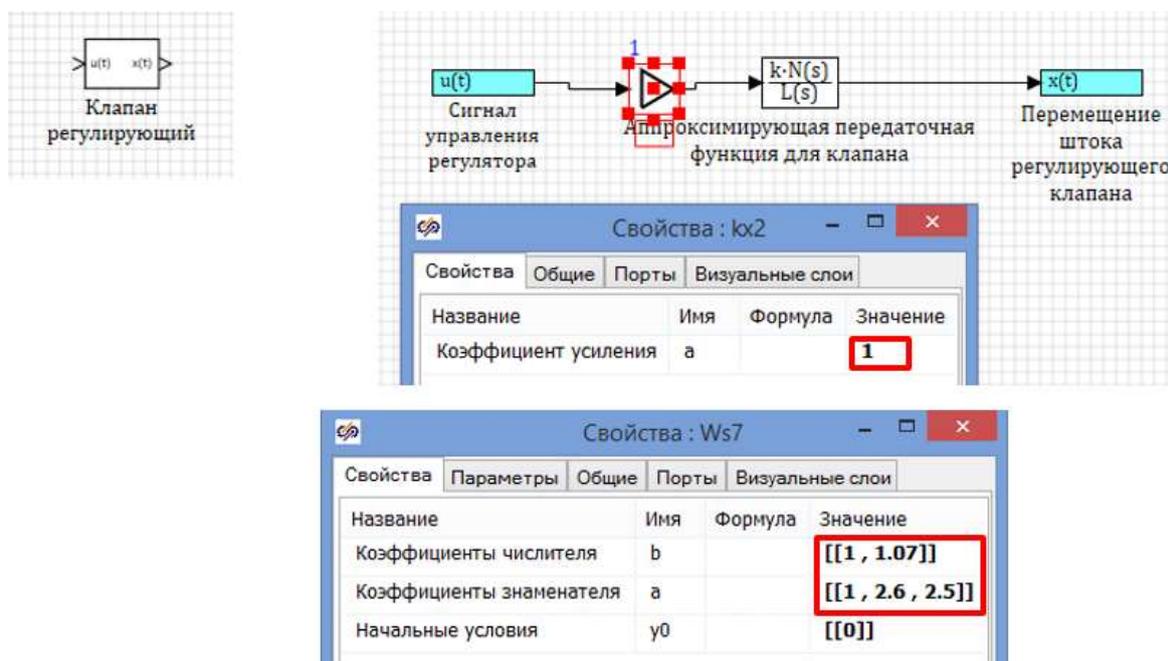


Рисунок А.3.3 – Субмодель «Клапан регулирующий»

А.3.4 Создание субмодели «Регулятор»

Создаем субмодель «Регулятор». Согласно варианту принимаем ПИД-закон регулирования (таблица А.3.2).

Таблица А.3.2 - Исходные тип регулятора и критерий оптимизации его настроек

№ варианта	Закон регулирования	Критерий настройки регулятора
1	ПИД	$I_{кр} = \int_0^t e^2(t)dt$

ПИД-регулятор описывается передаточной функцией с независимыми настройками:

$$W_{\text{ПИД}}(s) = k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s,$$

где k_p – коэффициент пропорциональности (П-часть); $k_i = 1/T_i$ – коэффициент, обратный постоянной времени интегрирования T_i (И-часть); $k_d = T_d$ – коэффициент, равный постоянной времени дифференцирования T_d (Д-часть).

Следовательно, субмодель «Регулятор» примет вид (рисунок А.3.4).

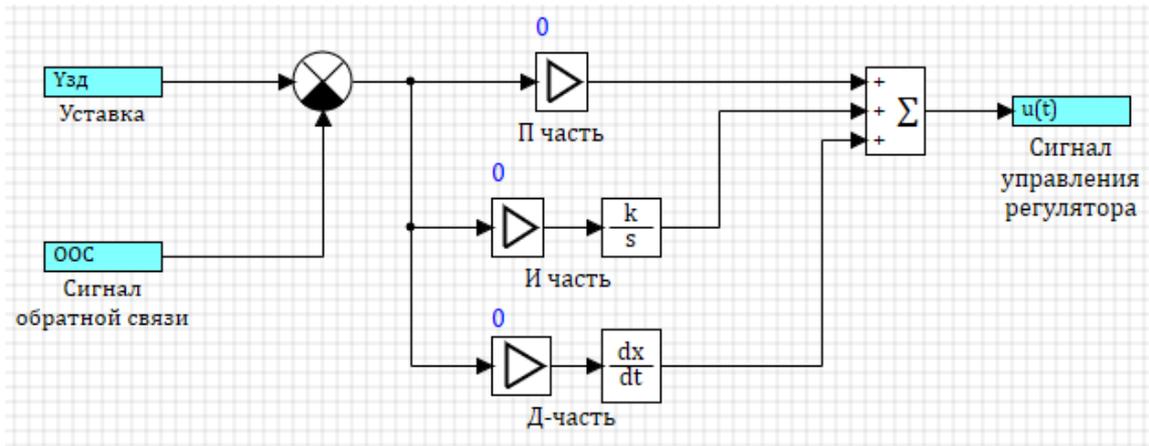


Рисунок А.3.4 – Субмодель «Регулятор»

В верхнем блоке Усилитель задаем коэффициент пропорциональной части, равный k_p . В среднем блоке Усилитель задаем коэффициент интегральной части k_i , обратный постоянной времени интегрирования. В нижнем блоке Усилитель задаем коэффициент дифференциальной части k_d , равный постоянной времени дифференцирования.

Для оценки работы замкнутой САР добавим в субмодель «Регулятор» субмодель «Критерий качества САР». В качестве критерия используем интегральный квадратичный критерий:

$$I_{\text{кр}} = \int_0^t e^2(t) dt \rightarrow \min$$

Субмодель «Критерий качества» примет вид (рисунок А.3.5). В свойствах блока Степенная функция указываем значение показателя степени $a=[2]$.

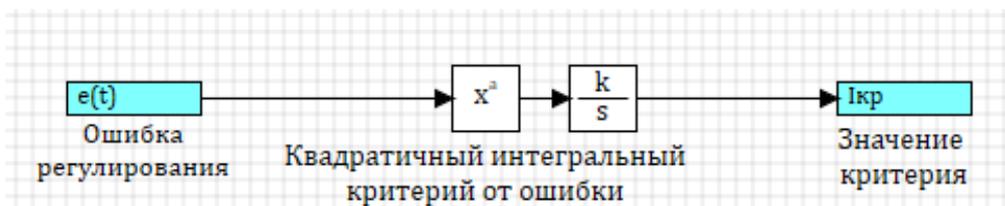


Рисунок А.3.5 – Субмодель «Критерий качества САР»

Конечный вид субмодели «Регулятор» с учетом добавленной субмодели «Критерий качества САР» представлен на рисунке А.3.6.

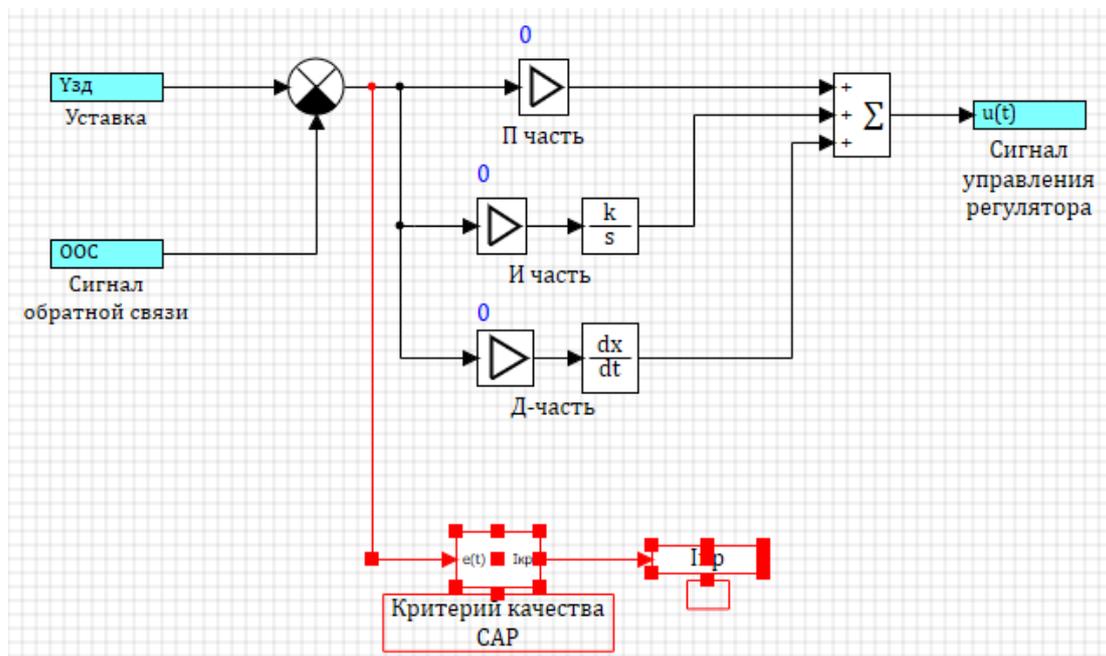


Рисунок А.3.6 – Субмодель «Регулятор»

А.3.5 Синтез структурной схемы одноконтурной САР

Задаем параметры настройки регулятора и значение критерия качества как глобальные сигналы проекта (рисунок А.3.7).

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kr	П-часть	Веществен...	Вход		0	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		0	Переменная
4	Икр	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		0	Переменная

Рисунок А.3.7 – Список сигналов проекта

Используя все созданные субмодели, построим структурную схему замкнутой одноконтурной САР, позволяющей имитировать обработку внешнего ступенчатого возмущения на входе объекта и возмущения по заданию (рисунок А.3.8). В свойствах блоков Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$.

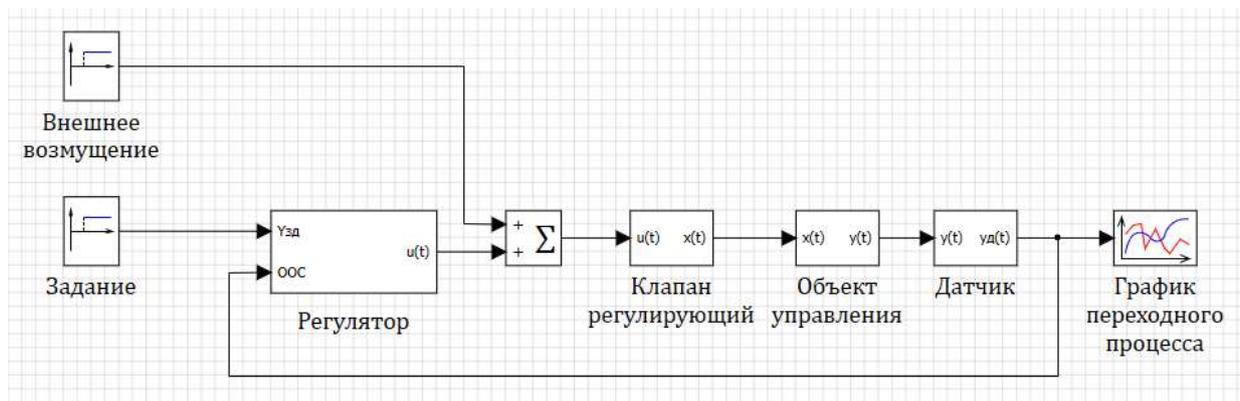


Рисунок А.3.8 – Структурная схема одноконтурной САР

Успешно завершённый этап проекта сохраним стандартными методами Windows.

А.4 Определение настроек регулятора

А.4.1 Приближённый метод Ziegler-Nichols (способ 1)

Откроем стандартными методами Windows этап проекта, сохранённый в главе А.3.5, и настроим созданную расчётную схему замкнутой САР следующим образом (рисунок А.4.1).

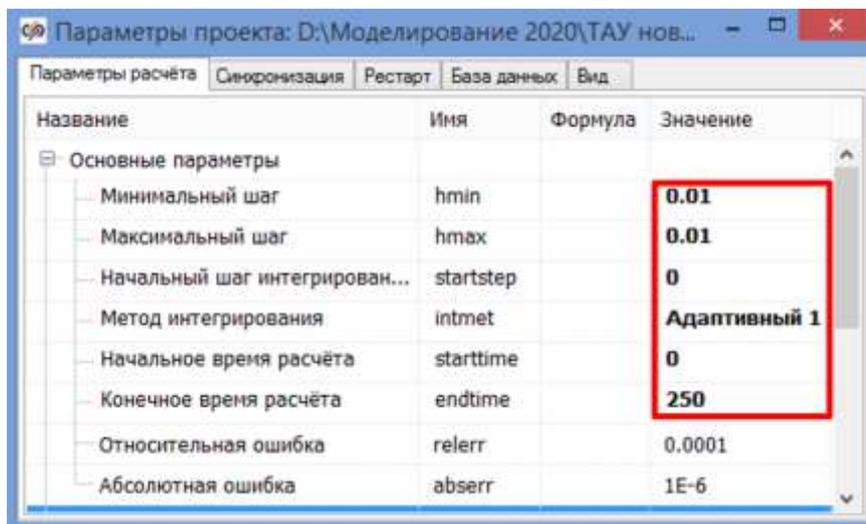
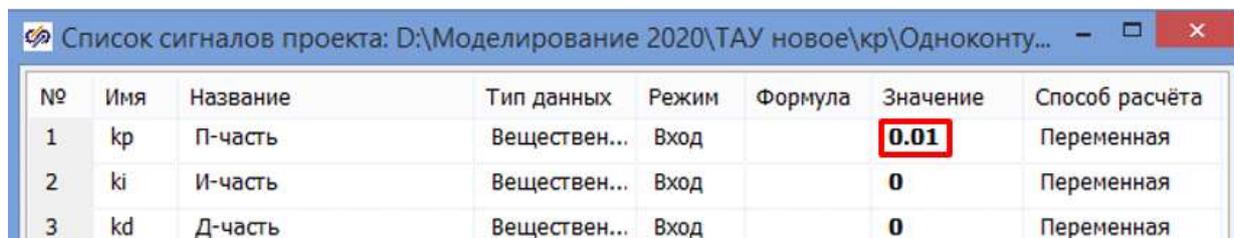


Рисунок А.4.1 – Настройка параметров проекта

Для приближённого расчёта параметров ПИД-регулятора воспользуемся первым вариантом метода Ziegler-Nichols (метод незатухающих колебаний), суть которого заключается в выводе САР с П-регулятором на режим незатухающих колебаний (на границу устойчивости). Полученное значение $k_p=K_{кр}$ и период

колебаний $T_{кр}$ используются для расчета настроек регулятора по эмпирическим формулам.

Отключим у ПИД-регулятора интегральную и дифференциальную составляющую, сделав $k_i = 0$ и $k_d = 0$. Зададим некоторое небольшое значение для k_p , например, 0.01 (рисунок А.4.2).



№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		0.01	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		0	Переменная

Рисунок А.4.2 – Список сигналов проекта

Запускаем схему на расчет и получаем следующий график переходного процесса (рисунок А.4.3).

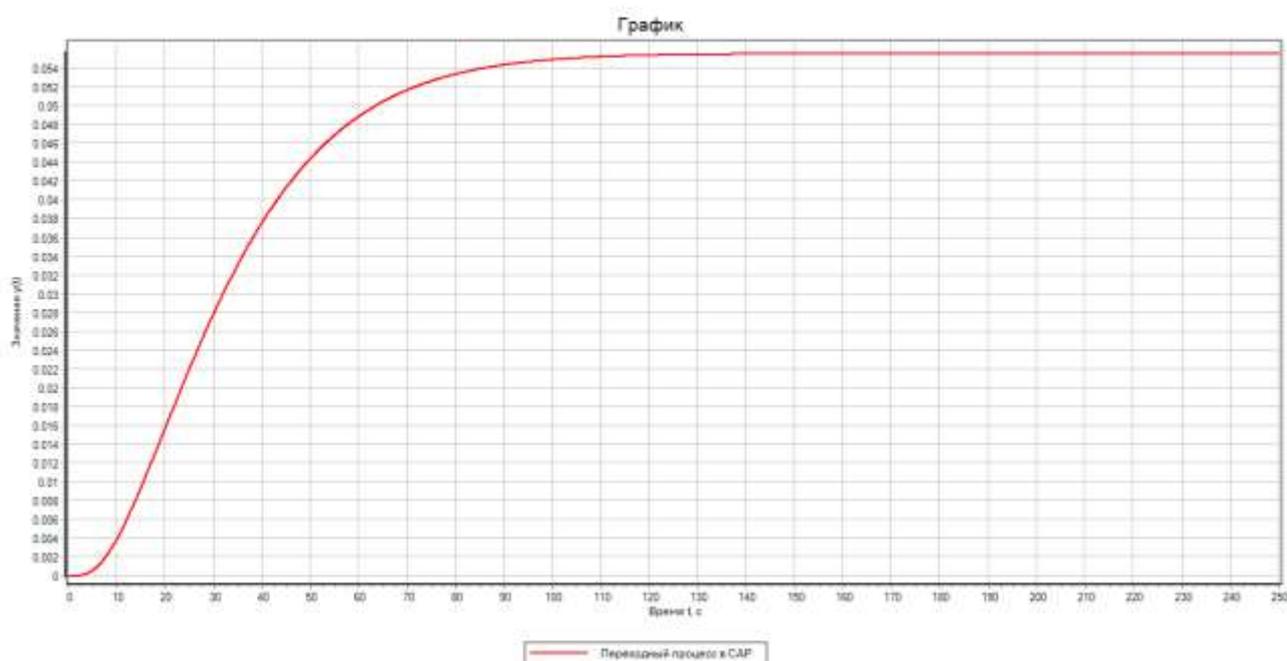


Рисунок А.4.3 – График переходного процесса при $k_p = 0.01$

Постепенно увеличиваем k_p до момента достижения в системе установившихся незатухающих устойчивых колебаний с постоянной амплитудой. В данном варианте критическое значение $K_{кр}=2.045$. Переходный процесс принял вид (рисунок А.4.4).

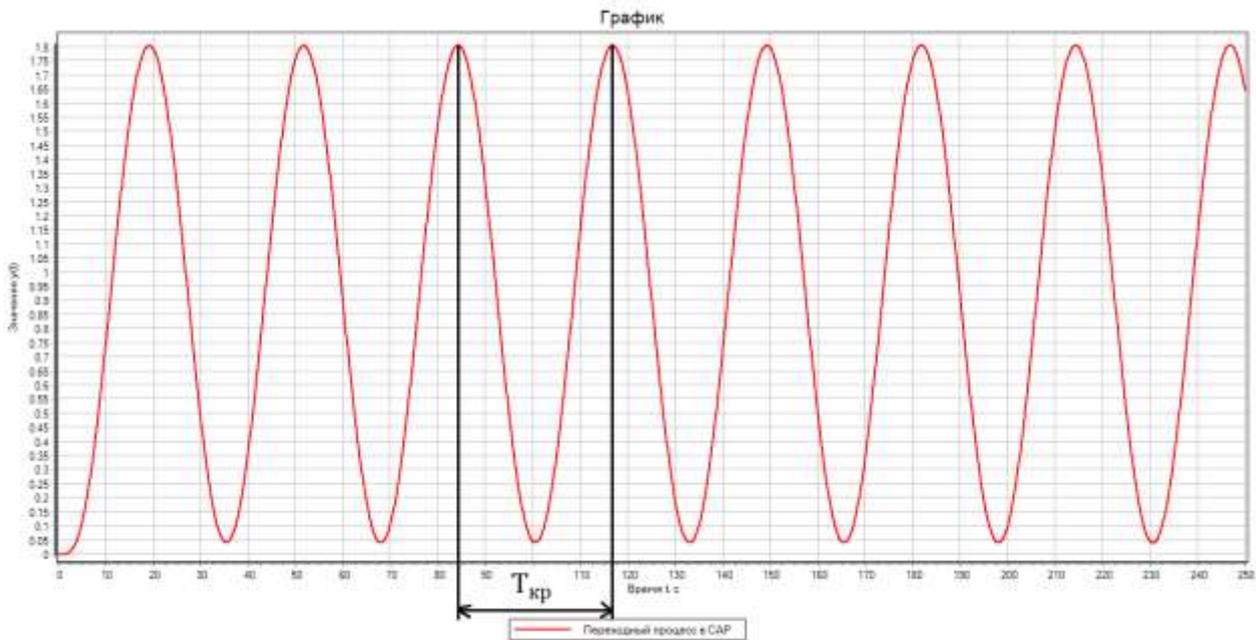


Рисунок А.4.4 – Незатухающие колебания

Фиксируем $K_{кр}=2.045$ и измеряем период колебаний $T_{кр}=33$ сек.

Рассчитываем независимые параметры настройки ПИД-регулятора:

$$k_p = 0.6 \cdot K_{кр} = 0.6 \cdot 2.045 = 1.227,$$

$$T_i = \frac{T_{кр}}{1.2 \cdot K_{кр}} = \frac{33}{1.2 \cdot 2.045} = 13.45,$$

$$k_i = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{13.45} = 0.07,$$

$$T_d = k_d = 0.075 \cdot K_{кр} \cdot T_{кр} = 0.075 \cdot 2.045 \cdot 33 = 5.06.$$

Вводим рассчитанные настройки регулятора в Список сигналов проекта (рисунок А.4.5).

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	k _p	П-часть	Веществен...	Вход		1.227	Переменная
2	k _i	И-часть	Веществен...	Вход		0.07	Переменная
3	k _d	Д-часть	Веществен...	Вход		5.06	Переменная

Рисунок А.4.5 – Список сигналов проекта

Проведем моделирование в одноконтурной САР при отработке возмущения по заданию с приближенными настройками регулятора и получим переходный процесс вида (рисунок А.4.6). Для этого в исходной схеме (рисунок А.3.8) в свойствах верхнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки

«Конечное состояние» задаем $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$. В свойствах нижнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$.

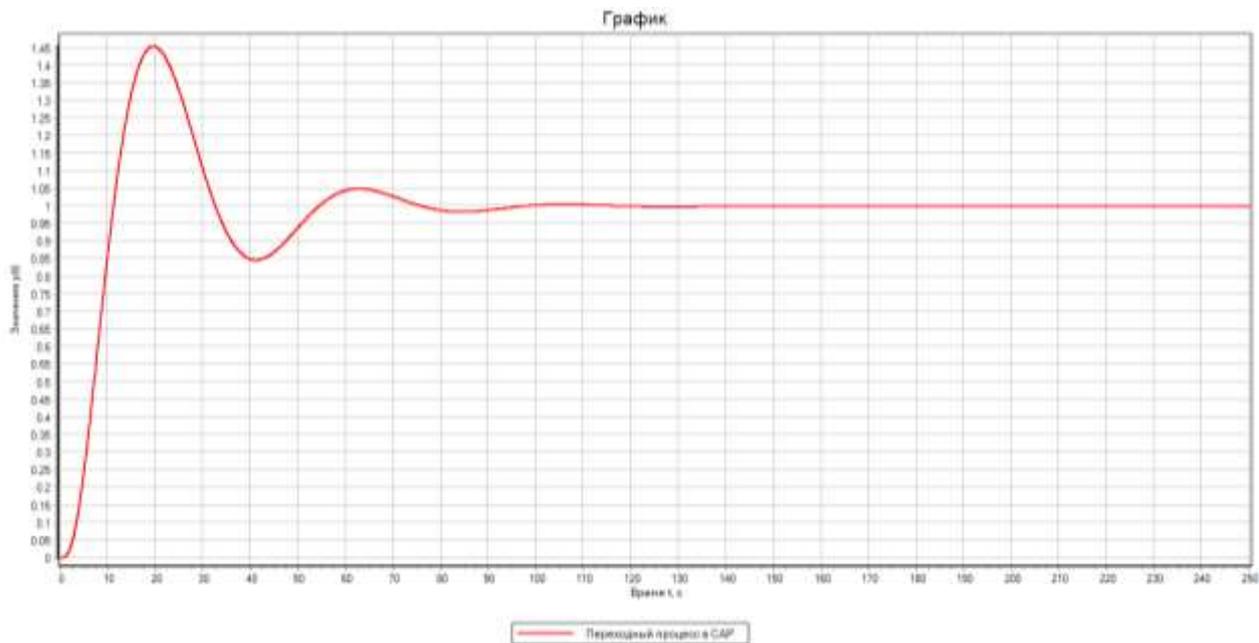


Рисунок А.4.6 – График переходного процесса при возмущении по заданию

По результатам моделирования значение критерия качества равно 7.83 (рисунок А.4.7). Фиксируем его.

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		1.227	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.07	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		5.06	Переменная
4	Iкр	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		7.833224	Переменная

Рисунок А.4.7 – Список сигналов проекта

$$I_{кр} = \int_0^t e^2(t) dt = 7.83$$

Дополнительно определим прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при обработке возмущения по заданию (рисунок А.4.8).

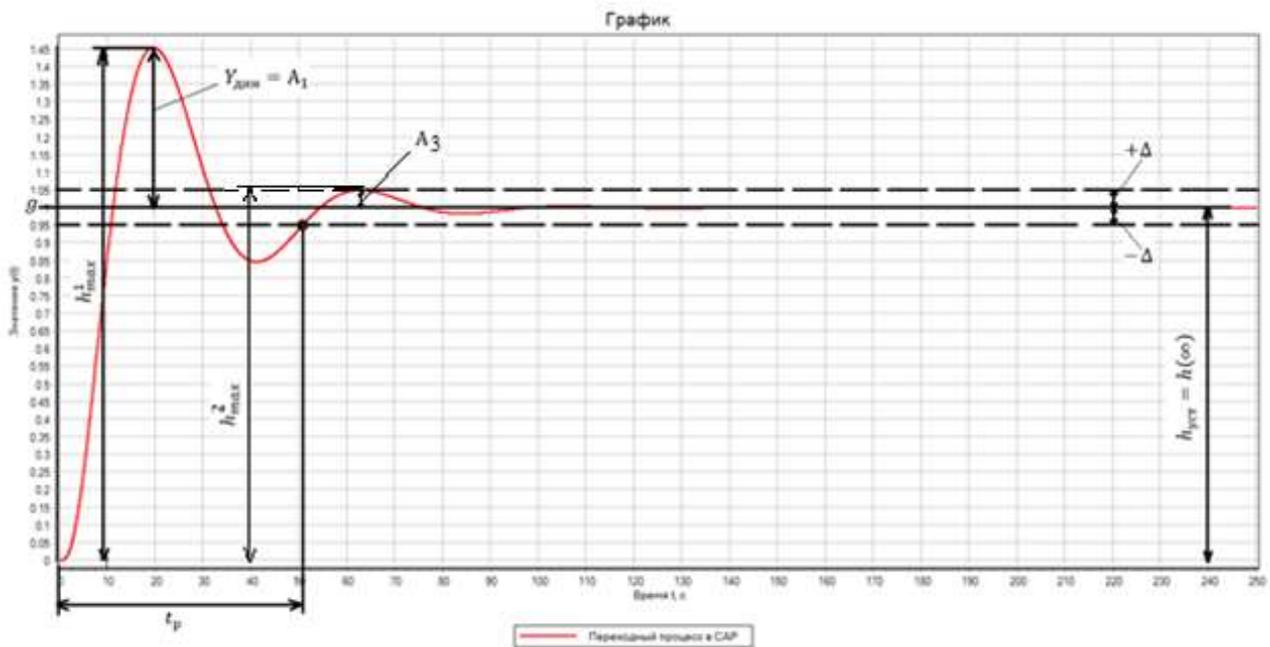


Рисунок А.4.8 – Прямые показатели качества

Статическая ошибка регулирования

$$\varepsilon(\infty) = g - h(\infty) = 1 - 1 = 0$$

Максимальная динамическая ошибка регулирования

$$Y_{\text{дин}} = A_1 = \max(|g - h(t)|) = \max(|1 - 1.455|) = 0.455$$

Время регулирования для «трубки допуска» $\pm 5\%$ от входного ступенчатого воздействия: $\Delta = \pm 5\% \cdot \Delta g = \pm 5\% \cdot 1 = \pm 0.05$

$$t_p = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq \Delta) = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq 0.05) = 51 \text{ сек}$$

Перерегулирование

$$\sigma = \frac{h_{\text{max}}^1 - h(\infty)}{h(\infty)} \cdot 100\% = \frac{Y_{\text{дин}}}{h(\infty)} \cdot 100\% = \frac{0.455}{1} \cdot 100\% = 45.5\%$$

Декремент затухания

$$\chi = \frac{|h_{\text{max}}^1 - h(\infty)|}{|h_{\text{max}}^2 - h(\infty)|} = \frac{|1.455 - 1|}{|1.05 - 1|} = \frac{0.455}{0.05} = 9.1$$

Степень затухания

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = \frac{0.455 - 0.05}{0.455} = 0.89$$

Проведем моделирование в одноконтурной САР при отработке внешнего возмущения на входе объекта с приближенными настройками регулятора и

получим переходный процесс вида (рисунок А.4.9). Для этого в исходной схеме (рисунок А.3.8) в свойствах верхнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$. В свойствах нижнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$.

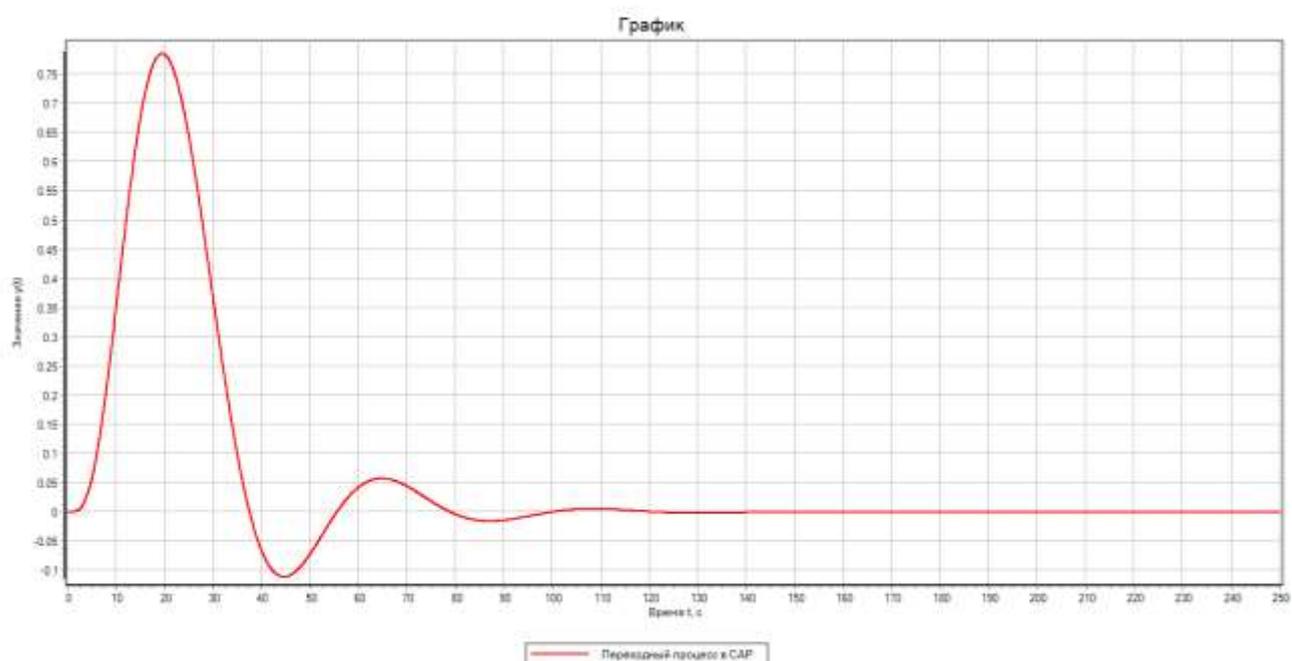


Рисунок А.4.9 – График переходного процесса при внешнем возмущении

По результатам моделирования значение критерия качества равно 8.94 (рисунок А.4.10). Фиксируем его.

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kr	П-часть	Веществен...	Вход		1.227	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.07	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		5.06	Переменная
4	Iкр	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		8.9354963	Переменная

Рисунок А.4.10 – Список сигналов проекта

$$I_{кр} = \int_0^t e^2(t) dt = 8.94$$

Дополнительно определим прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при отработке внешнего возмущении на входе объекта (рисунок А.4.11).

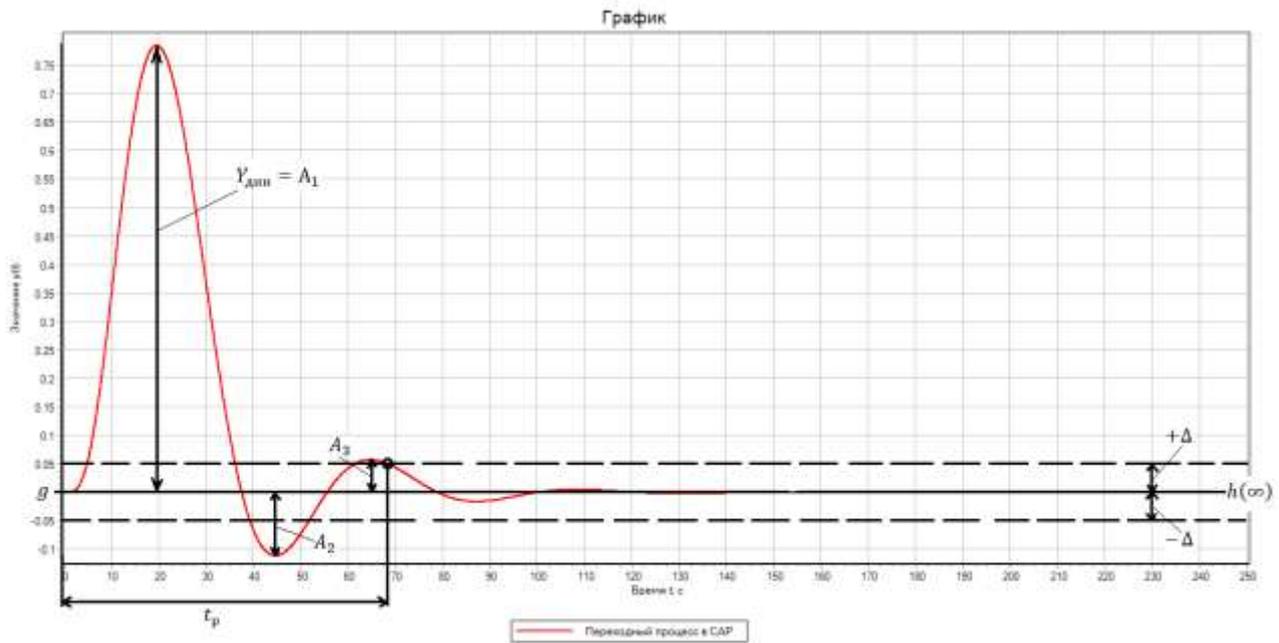


Рисунок А.4.11 – Прямые показатели качества

Статическая ошибка регулирования

$$\varepsilon(\infty) = g = h(\infty) = 0$$

Максимальная динамическая ошибка регулирования

$$Y_{\text{дин}} = A_1 = 0.786$$

Время регулирования для «трубки допуска» $\pm 5\%$ от входного ступенчатого воздействия: $\Delta = \pm 5\% \cdot \Delta f = \pm 5\% \cdot 1 = \pm 0.05$

$$t_p = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq \Delta) = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq 0.05) = 68.5 \text{ сек}$$

Перерегулирование

$$\sigma = \left| \frac{A_2}{A_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{0.11}{0.786} \right| \cdot 100\% = 14\%$$

Декремент затухания

$$\chi = \frac{A_1}{A_3} = \frac{0.786}{0.058} = 13.6$$

Степень затухания

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = \frac{0.786 - 0.058}{0.786} = 0.93$$

Успешно завершённый этап проекта сохраним стандартными методами Windows.

А.4.2 Приближенный метод Ziegler-Nichols (способ 2)

Откроем стандартными методами Windows этап проекта, сохраненный в главе А.3.5, и настроим созданную расчетную схему замкнутой САР следующим образом (рисунок А.4.12).

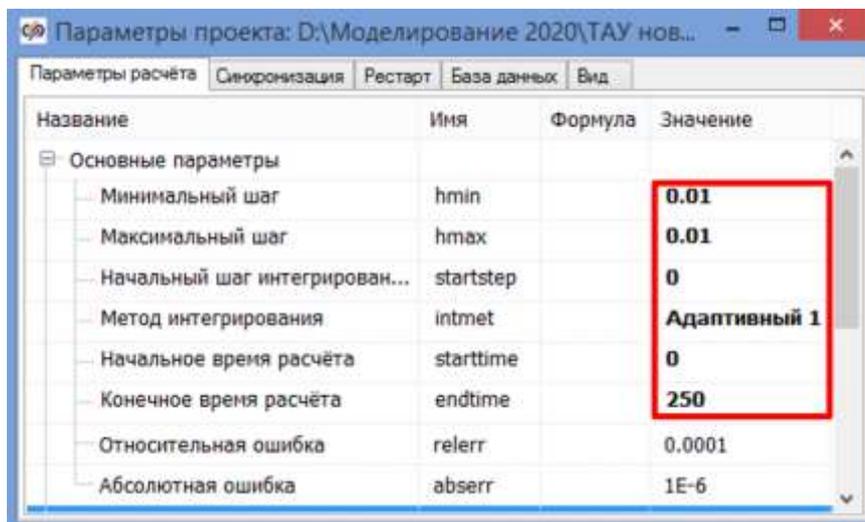


Рисунок А.4.12 – Настройка параметров проекта

Для приближенного расчета параметров ПИД-регулятора воспользуемся вторым вариантом метода Ziegler-Nichols, суть которого заключается в определении реакции статического объекта с самовыравниванием на ступенчатое изменение управляющего воздействия.

Аппроксимируем неизменяемую часть системы (клапан+объект+датчик) последовательным соединением апериодического звена 1-го порядка и звена чистого запаздывания по методу Ормана. Передаточная функция будет иметь вид:

$$W_{oy}(s) = \frac{k_{oy}}{T_{oy}s + 1} \cdot e^{-\tau_{oy}s}$$

Полученные значения k_{oy} , T_{oy} , τ_{oy} будем использовать для расчета настроек регулятора по эмпирическим формулам.

Сначала найдем реакцию эквивалентного объекта на единичное ступенчатое возмущение. Для этого добавим схему (рисунок А.4.13). В

свойствах блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $uk=[1]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$.



Рисунок А.4.13 – Схема для снятия кривой разгона эквивалентного объекта

Проведем моделирование и получим переходную характеристику эквивалентного объекта. Обработаем полученный график (рисунок А.4.14).

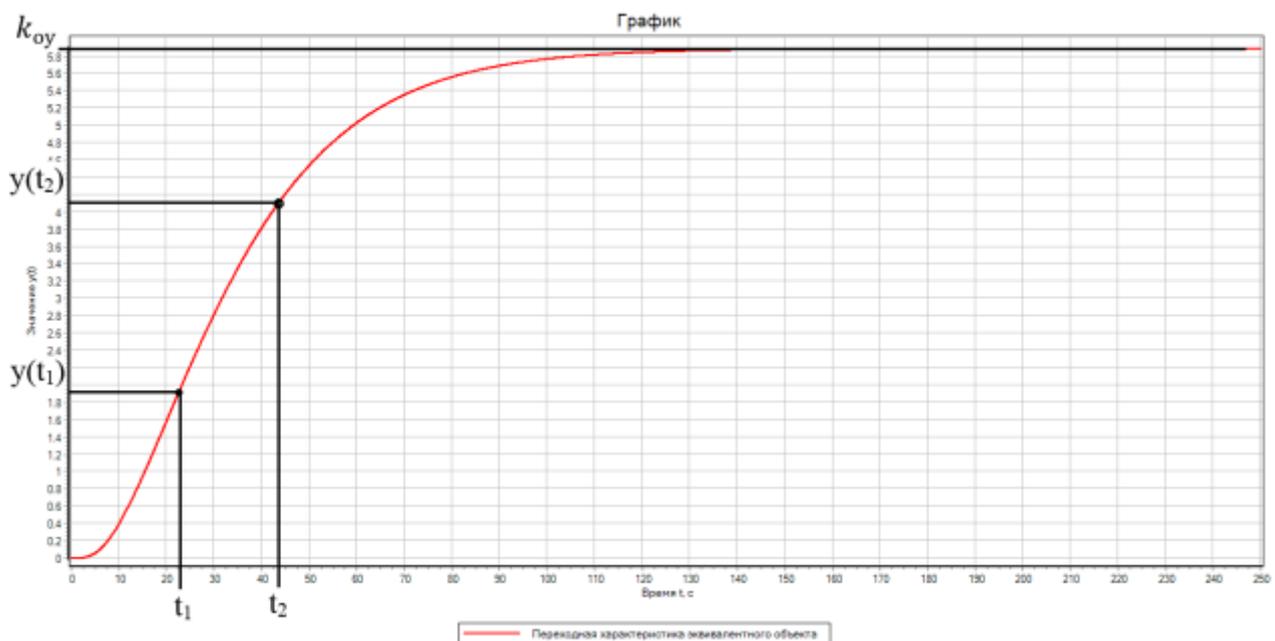


Рисунок А.4.14 – Аппроксимация кривой разгона эквивалентного объекта по методу Ормана

Коэффициент усиления равен

$$k_{ou} = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{5.89}{1} = 5.89$$

Время, за которое выходная величина $y(t)$ достигает 0.33 от установившегося значения, равно

$$y(t_1) = 0.33 y(\infty) = 0.33 \cdot 5.89 = 1.94$$

$$t_1 = 22.8 \text{ сек}$$

Время, за которое выходная величина $y(t)$ достигает 0.7 от установившегося значения, равно

$$y(t_2) = 0.7 y(\infty) = 0.7 \cdot 5.89 = 4.12$$

$$t_2 = 43.8 \text{ сек}$$

Постоянная времени равна

$$T_{oy} = 1.25(t_2 - t_1) = 1.25(43.8 - 22.8) = 26.25 \text{ сек}$$

Время чистого запаздывания равно

$$\tau_{oy} = 0.5(3 \cdot t_1 - t_2) = 0.5(3 \cdot 22.8 - 43.8) = 12.3 \text{ сек}$$

Построим на одном графике исходную переходную характеристику эквивалентного объекта и полученную после аппроксимации по методу Ормана. Для этого доработаем схему (рисунок А.4.15). В свойствах блока Инерционное звено 1-го порядка задаем $k=k_{oy}$, $T=T_{oy}$, в свойствах блока Идеальное транспортное запаздывание задаем $\tau=\tau_{oy}$.



Рисунок А.4.15 – Расчетная схема для сравнения переходной характеристики эквивалентного объекта и полученной после аппроксимации по методу Ормана

Проведем моделирование и получим переходные характеристики вида (рисунок А.4.16).

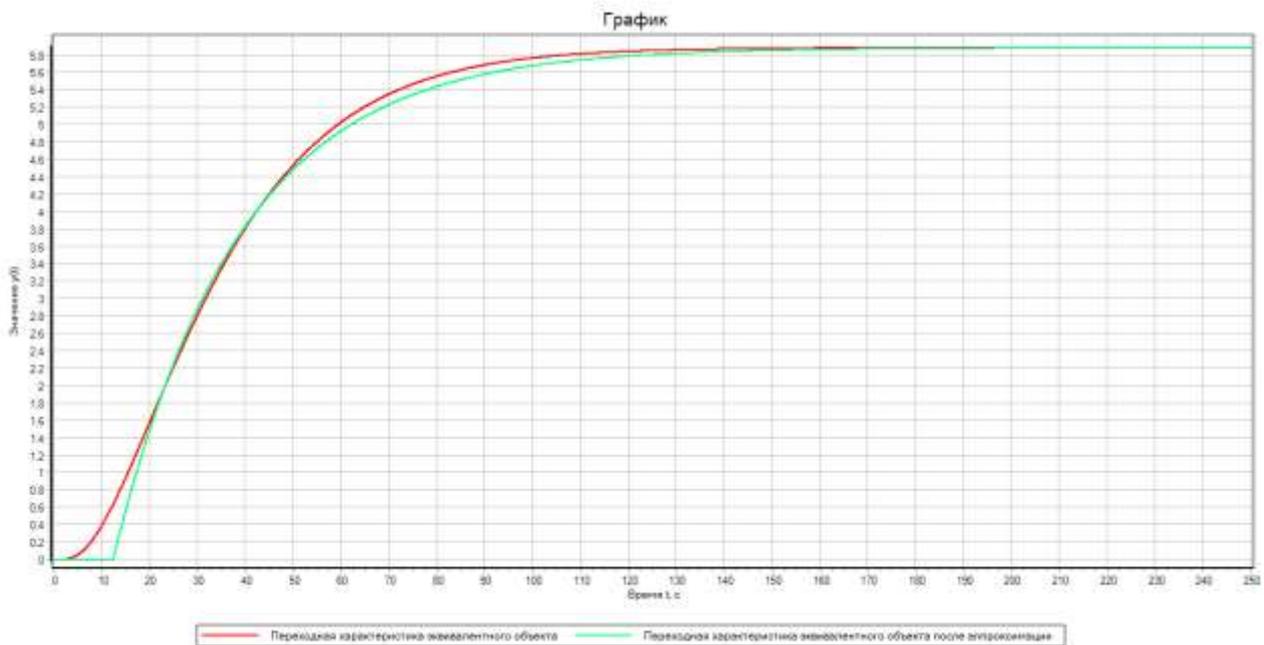


Рисунок А.4.16 – Переходные характеристики эквивалентного объекта

Рассчитаем параметры настройки ПИД-регулятора:

$$k_p = \frac{1.2 \cdot T_{oy}}{k_{oy} \cdot \tau_{oy}} = \frac{1.2 \cdot 26.25}{5.89 \cdot 12.3} = 0.43$$

$$T_i = \frac{k_{oy} \cdot \tau_{oy}^2}{0.6 \cdot T_{oy}} = \frac{5.89 \cdot 12.3^2}{0.6 \cdot 26.25} = 56.58$$

$$k_i = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{56.58} = 0.018$$

$$T_d = k_d = \frac{0.6 \cdot T_{oy}}{k_{oy} \cdot \tau_{oy}} = \frac{0.6 \cdot 26.25}{5.89 \cdot 12.3} = 0.217$$

Вводим рассчитанные настройки регулятора в Список сигналов проекта (рисунок А.4.17).

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		0.43	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.018	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		0.217	Переменная

Рисунок А.4.17 – Список сигналов проекта

Проведем моделирование в исходной замкнутой одноконтурной САР при отработке возмущения по заданию с приближенными настройками регулятора и получим переходный процесс вида (рисунок А.4.18). Для этого в исходной схеме

(рисунок А.3.8) в свойствах верхнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$. В свойствах нижнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$.

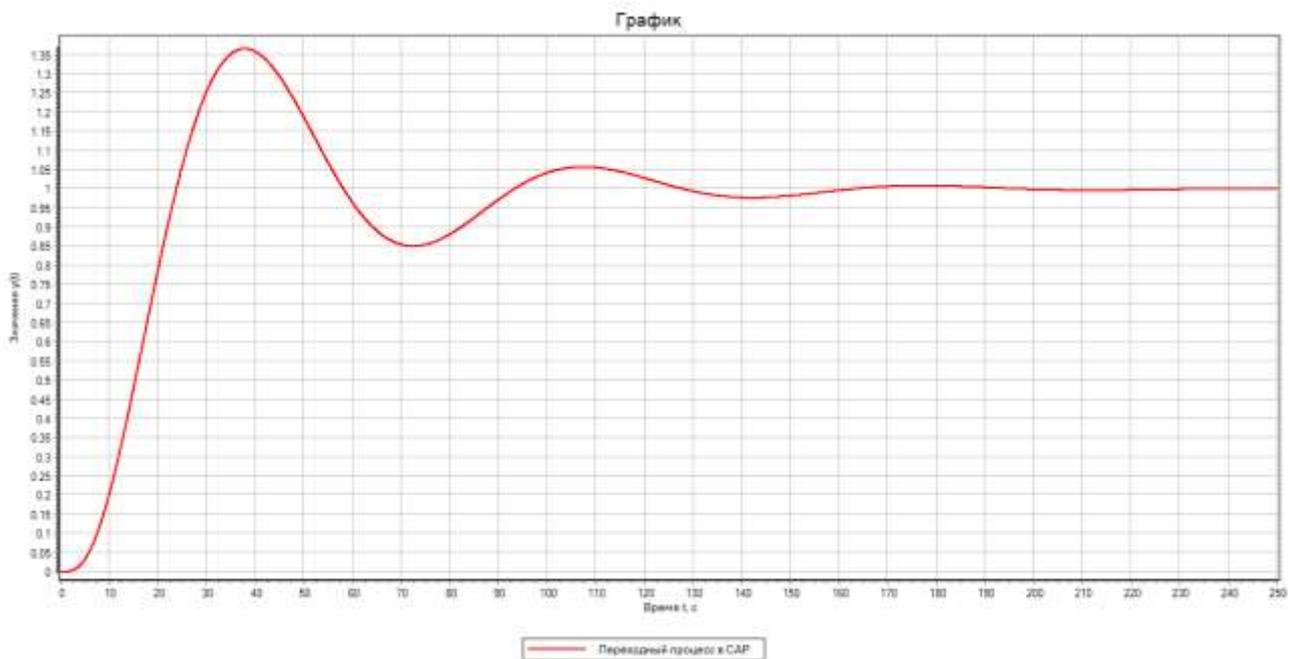


Рисунок А.4.18 – График переходного процесса при возмущении по заданию

По результатам моделирования значение критерия качества равно 14.54 (рисунок А.4.19). Фиксируем его.

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		0.43	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.018	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		0.217	Переменная
4	Iкр	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		14.538886	Переменная

Рисунок А.4.19 – Список сигналов проекта

$$I_{кр} = \int_0^t e^2(t) dt = 14.54$$

Дополнительно определим прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при обработке возмущения по заданию (рисунок А.4.20).

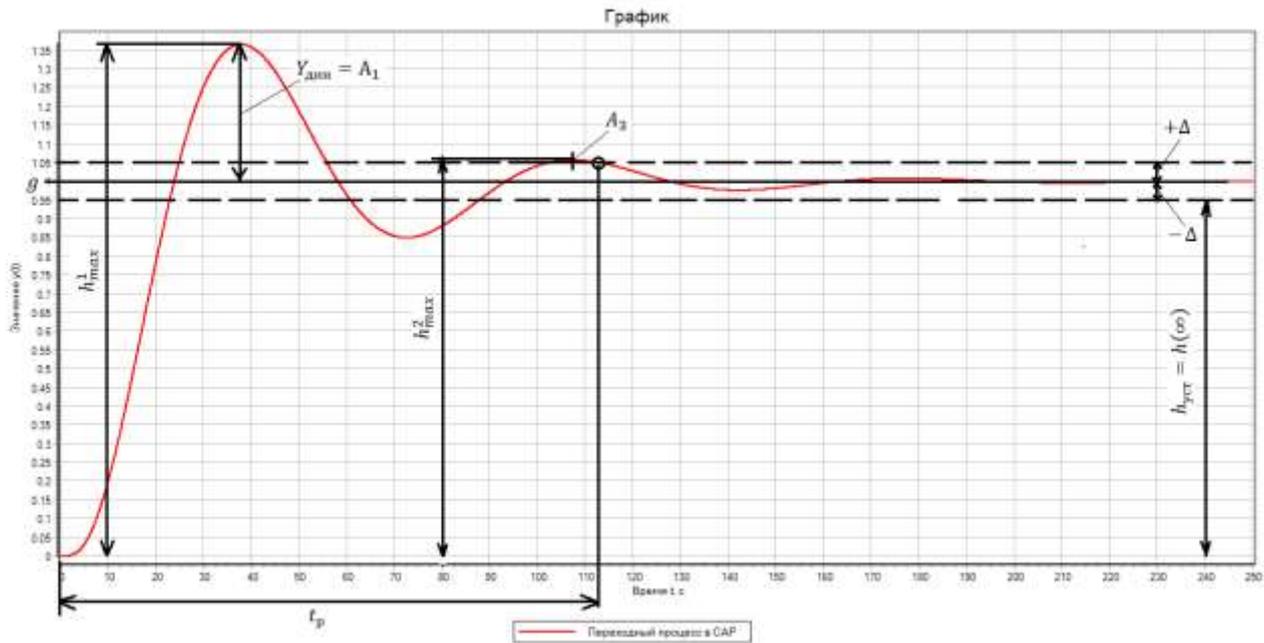


Рисунок А.4.20 – Прямые показатели качества

Статическая ошибка регулирования

$$\varepsilon(\infty) = g - h(\infty) = 1 - 1 = 0$$

Максимальная динамическая ошибка регулирования

$$Y_{\text{дин}} = A_1 = \max(|g - h(t)|) = \max(|1 - 1.366|) = 0.366$$

Время регулирования для «трубки допуска» $\pm 5\%$ от входного ступенчатого воздействия: $\Delta = \pm 5\% \cdot \Delta g = \pm 5\% \cdot 1 = \pm 0.05$

$$t_p = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq \Delta) = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq 0.05) = 113.2 \text{ сек}$$

Перерегулирование

$$\sigma = \frac{h_{\text{max}}^1 - h(\infty)}{h(\infty)} \cdot 100\% = \frac{Y_{\text{дин}}}{h(\infty)} \cdot 100\% = \frac{0.366}{1} \cdot 100\% = 36.6\%$$

Декремент затухания

$$\chi = \frac{|h_{\text{max}}^1 - h(\infty)|}{|h_{\text{max}}^2 - h(\infty)|} = \frac{A_1}{A_3} = \frac{0.366}{0.058} = 6.31$$

Степень затухания

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = \frac{0.366 - 0.058}{0.366} = 0.84$$

Проведем моделирование в одноконтурной САУ при обработке внешнего возмущения на входе объекта с приближенными настройками регулятора и

получим переходный процесс вида (рисунок А.4.21). Для этого в исходной схеме (рисунок А.3.8) в свойствах верхнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$. В свойствах нижнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$.

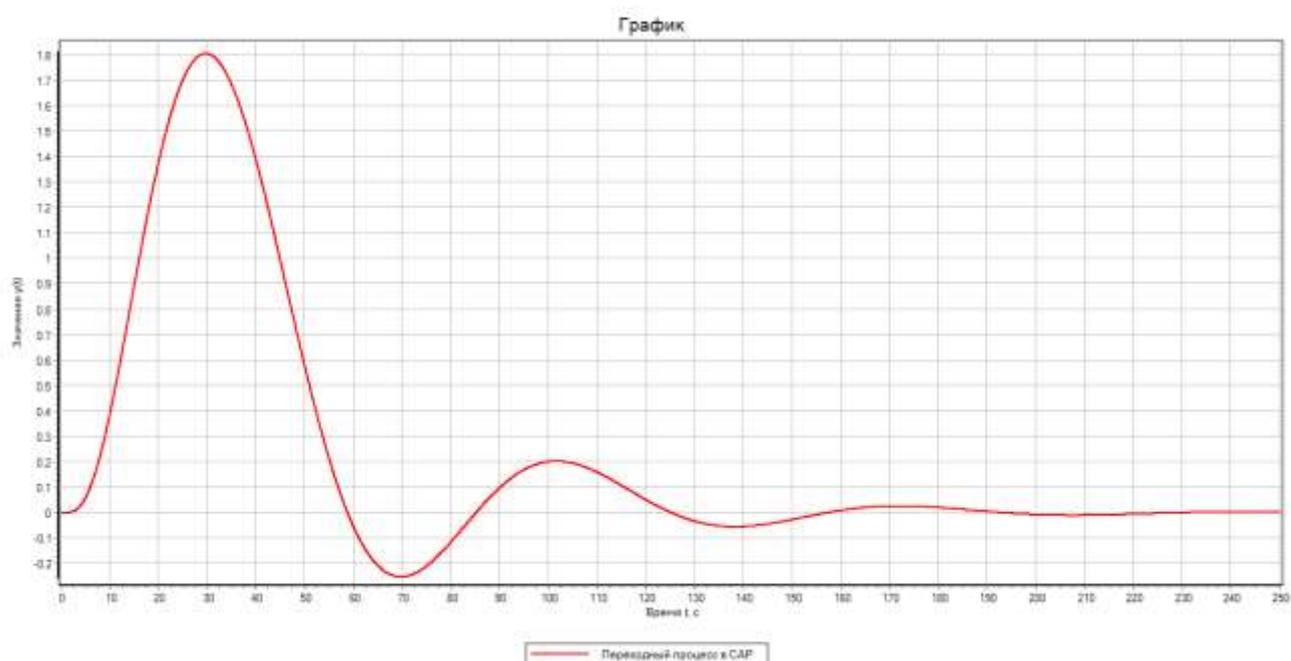


Рисунок А.4.21 – График переходного процесса при внешнем возмущении

По результатам моделирования значение критерия качества равно 77.4 (рисунок А.4.22). Фиксируем его.

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		0.43	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.018	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		0.217	Переменная
4	Iкр	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		77.406349	Переменная

Рисунок А.4.22 – Список сигналов проекта

$$I_{кр} = \int_0^t e^2(t) dt = 77.4$$

Дополнительно определим прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при отработке внешнего возмущения на входе объекта (рисунок А.4.23).

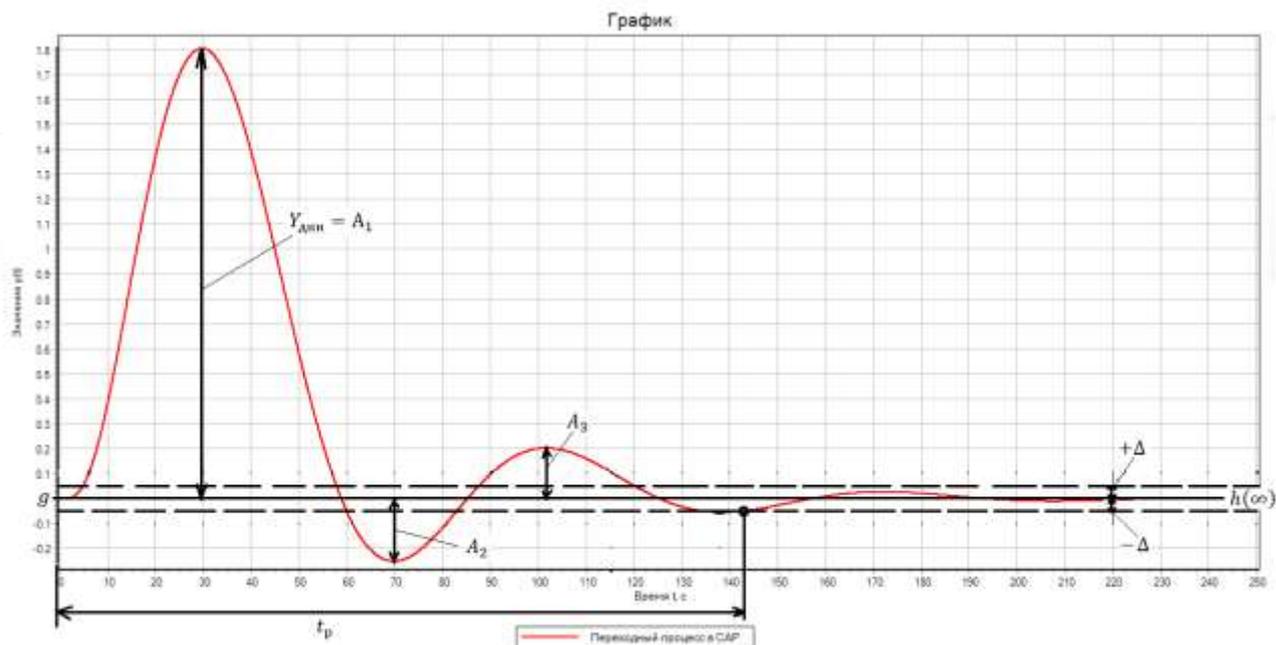


Рисунок А.4.23 – Прямые показатели качества

Статическая ошибка регулирования

$$\varepsilon(\infty) = g = h(\infty) = 0$$

Максимальная динамическая ошибка регулирования

$$Y_{\text{дин}} = A_1 = 1.807$$

Время регулирования для «трубки допуска» $\pm 5\%$ от входного ступенчатого воздействия: $\Delta = \pm 5\% \cdot \Delta f = \pm 5\% \cdot 1 = \pm 0.05$

$$t_p = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq \Delta) = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq 0.05) = 142.5 \text{ сек}$$

Перерегулирование

$$\sigma = \left| \frac{A_2}{A_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{0.251}{1.807} \right| \cdot 100\% = 13.89 \%$$

Декремент затухания

$$\chi = \frac{A_1}{A_3} = \frac{1.807}{0.203} = 8.9$$

Степень затухания

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = \frac{1.807 - 0.203}{1.807} = 0.89$$

Успешно завершённый этап проекта сохраним стандартными методами Windows.

А.4.3 Уточнение настроек регулятора численным методом оптимизации

Откроем стандартными методами Windows этап проекта, сохраненный в главе 3.5, и настроим созданную расчетную схему замкнутой САР следующим образом (рисунок 4.24).

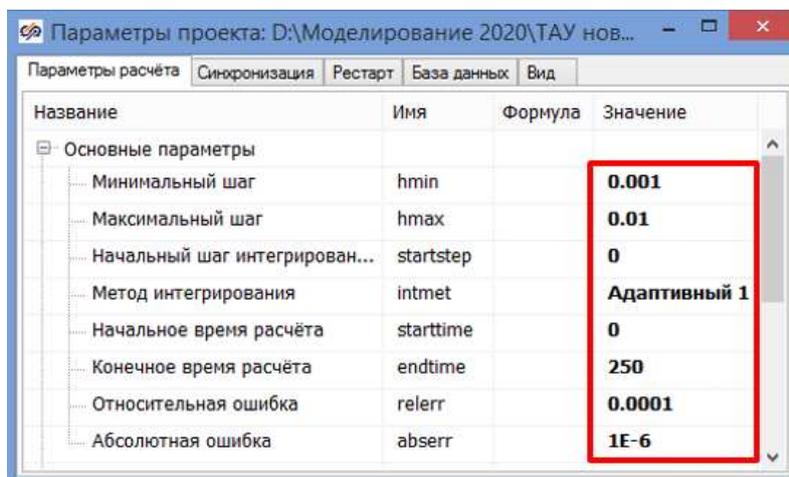


Рисунок 4.24 – Настройка параметров проекта

Дополним расчетную схему для параметрической оптимизации настроек регулятора в одноконтурной САР (рисунок 4.25) согласно рекомендациям из пособия [1].

Верхняя структура будет имитировать отработку возмущения по заданию. Для этого в свойствах верхнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$. В свойствах нижнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$.

Нижняя структура будет имитировать отработку внешнего возмущения. Для этого в свойствах верхнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[1]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$. В свойствах нижнего блока Ступенька в столбце «Значение» для строки «Конечное состояние» задаем $u_k=[0]$; для строки «Время срабатывания» задаем $t=[0]$.

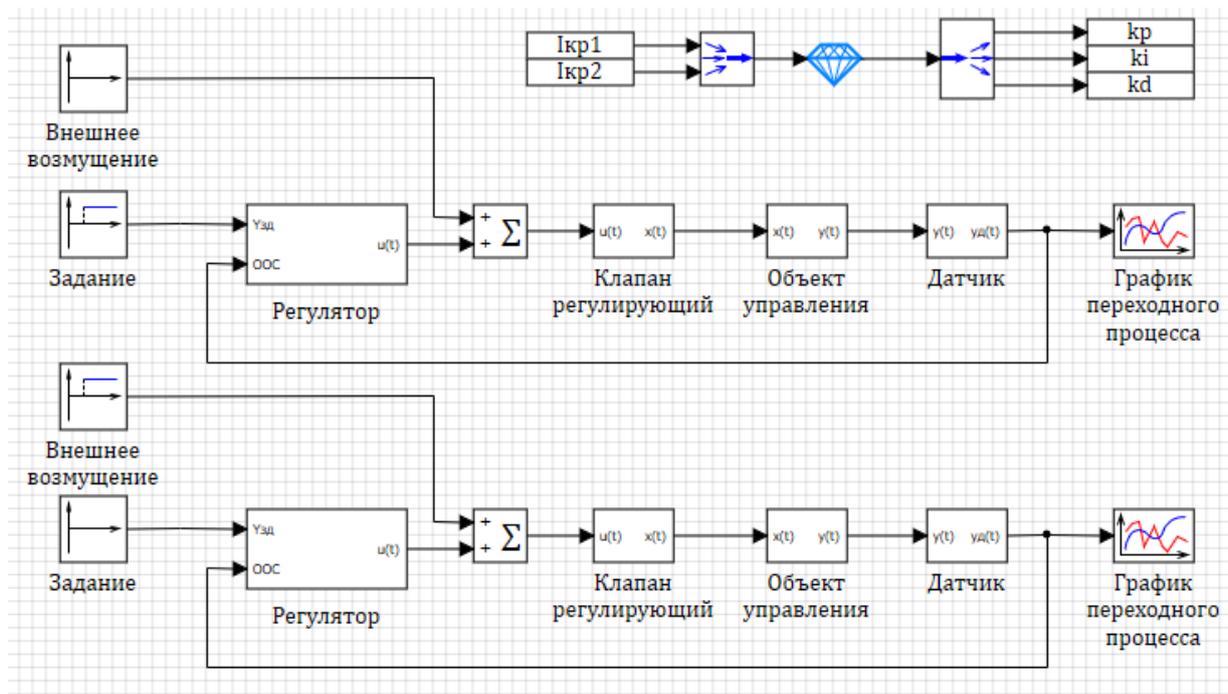


Рисунок 4.25 – Расчетная схема для уточнения настроек ПИД-регулятора численным методом

Настроим все элементы схемы, в том числе зададим свойства в блоке Оптимизатора (рисунок 4.26). В качестве начальных приближений зададим настройки, полученные в п. 4.1 приближенным методом, с которыми САР показала наименьшее значение заданного критерия качества. Проведем моделирование.

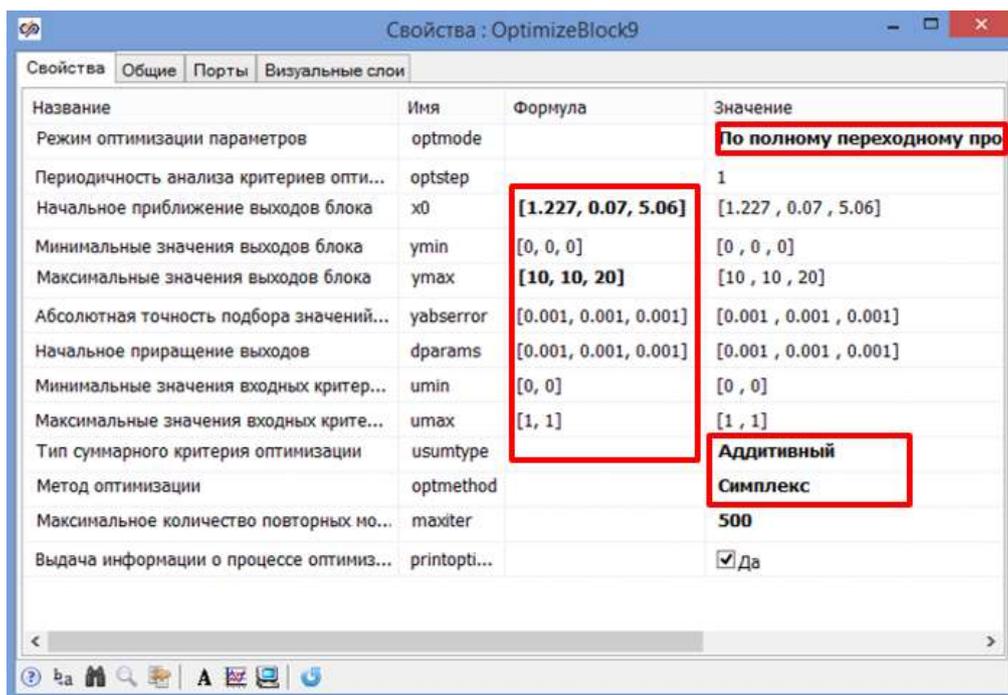


Рисунок 4.26 – Настройка блока Оптимизатор

В результате проведения большого числа итераций были получены уточненные настройки ПИД-регулятора (рисунок 4.27):

$$k_p^{\text{опт}} = 2.18, k_i^{\text{опт}} = 0.28, k_d^{\text{опт}} = 20.$$

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		2.1837698	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.2762235	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		20	Переменная

Рисунок 4.27 – Уточненные настройки ПИД-регулятора

С учетом уточненных настроек переходный процесс в САР при отработке возмущения по заданию принял вид (рисунок 4.28).

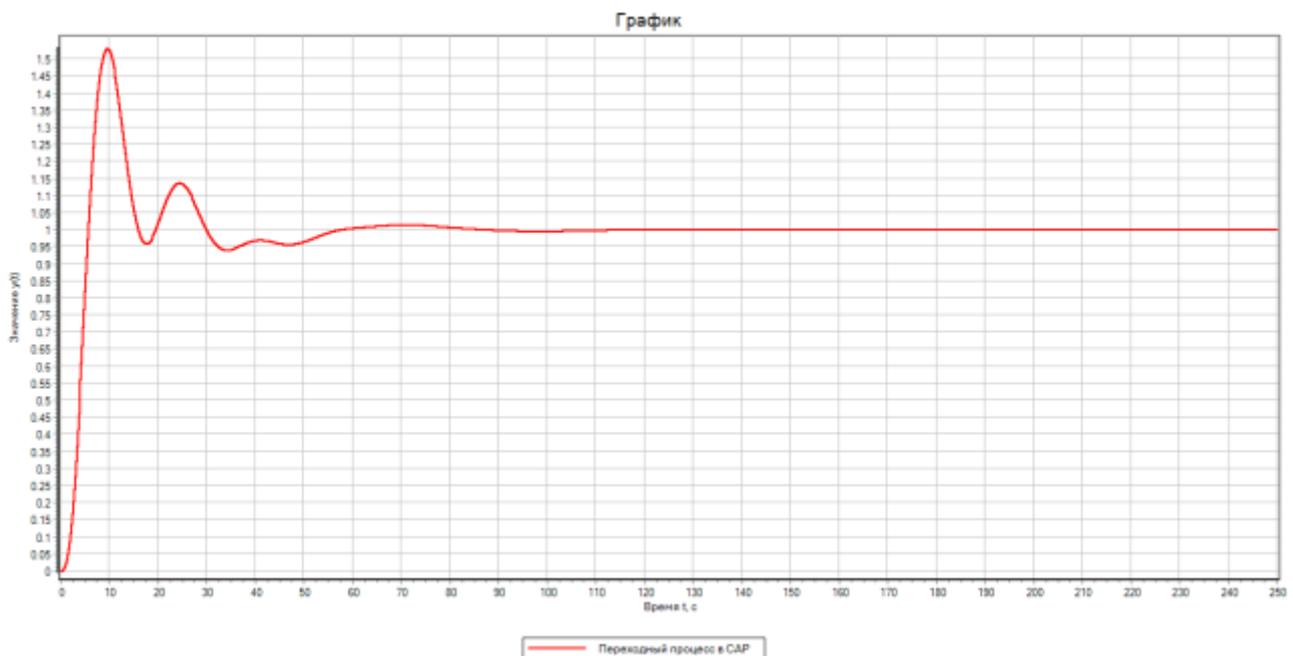


Рисунок 4.28 – Переходный процесс в САР при возмущении по заданию с уточненными настройками регулятора

По результатам моделирования значение критерия качества при отработке возмущения по заданию равно 4.5 (рисунок 4.29). Фиксируем его.

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		2.1837698	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.2762235	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		20	Переменная
4	Икр1	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		4.5066552	Переменная
5	Икр2	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		1.2428086	Переменная

Рисунок 4.29 – Список сигналов проекта

$$I_{кр} = \int_0^t e^2(t) dt = 4.5$$

Дополнительно определим прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при обработке возмущения по заданию (рисунок 4.30).

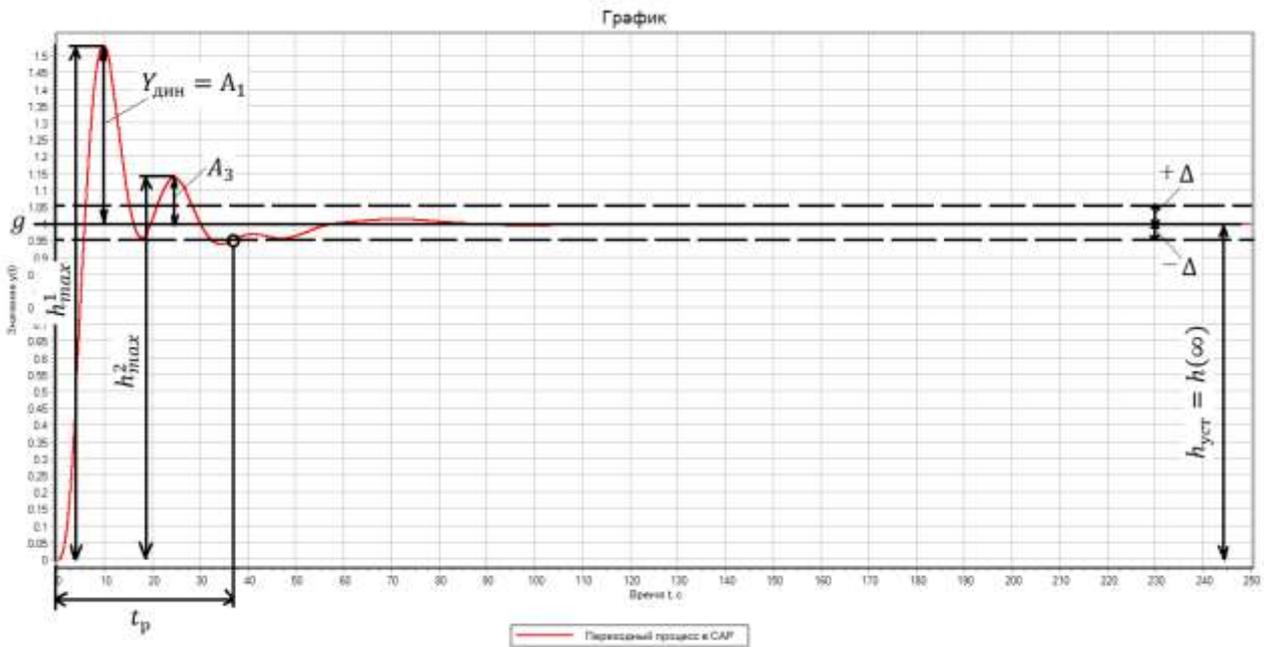


Рисунок 4.30 – Прямые показатели качества

Статическая ошибка регулирования

$$\varepsilon(\infty) = g - h(\infty) = 1 - 1 = 0$$

Максимальная динамическая ошибка регулирования

$$Y_{дин} = A_1 = \max(|g - h(t)|) = \max(|1 - 1.531|) = 0.531$$

Время регулирования для «трубки допуска» $\pm 5\%$ от входного ступенчатого воздействия: $\Delta = \pm 5\% \cdot \Delta g = \pm 5\% \cdot 1 = \pm 0.05$

$$t_p = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq \Delta) = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq 0.05) = 36.6 \text{ сек}$$

Перерегулирование

$$\sigma = \frac{h_{max}^1 - h(\infty)}{h(\infty)} \cdot 100\% = \frac{Y_{дин}}{h(\infty)} \cdot 100\% = \frac{0.531}{1} \cdot 100\% = 53.1\%$$

Декремент затухания

$$\chi = \frac{|h_{max}^1 - h(\infty)|}{|h_{max}^2 - h(\infty)|} = \frac{|1.531 - 1|}{|1.137 - 1|} = \frac{0.531}{0.137} = 3.9$$

Степень затухания

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = \frac{0.531 - 0.137}{0.531} = 0.74$$

С учетом уточненных настроек переходный процесс в САР при отработке внешнего возмущения принял вид (рисунок 4.31).

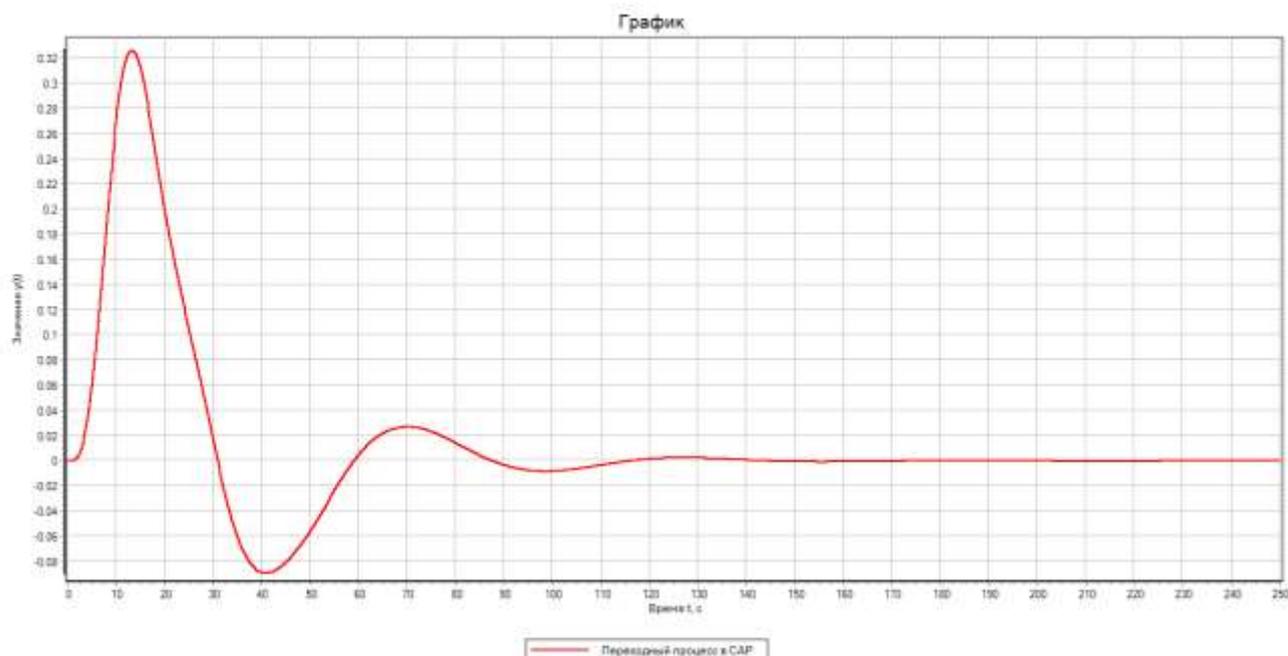


Рисунок 4.31 – Переходный процесс в САР при внешнем возмущении с уточненными настройками регулятора

По результатам моделирования значение критерия качества при отработке внешнего возмущения равно 1.24 (рисунок 4.32). Фиксируем его.

№	Имя	Название	Тип данных	Режим	Формула	Значение	Способ расчёта
1	kp	П-часть	Веществен...	Вход		2.1837698	Переменная
2	ki	И-часть	Веществен...	Вход		0.2762235	Переменная
3	kd	Д-часть	Веществен...	Вход		20	Переменная
4	Икр1	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		4.5066552	Переменная
5	Икр2	Критерий качества САР	Веществен...	Вход		1.2428086	Переменная

Рисунок 4.32 – Список сигналов проекта

$$I_{кр} = \int_0^t e^2(t) dt = 1.24$$

Дополнительно определим прямые показатели качества переходного процесса в одноконтурной САР при отработке внешнего возмущения (рисунок 4.33).

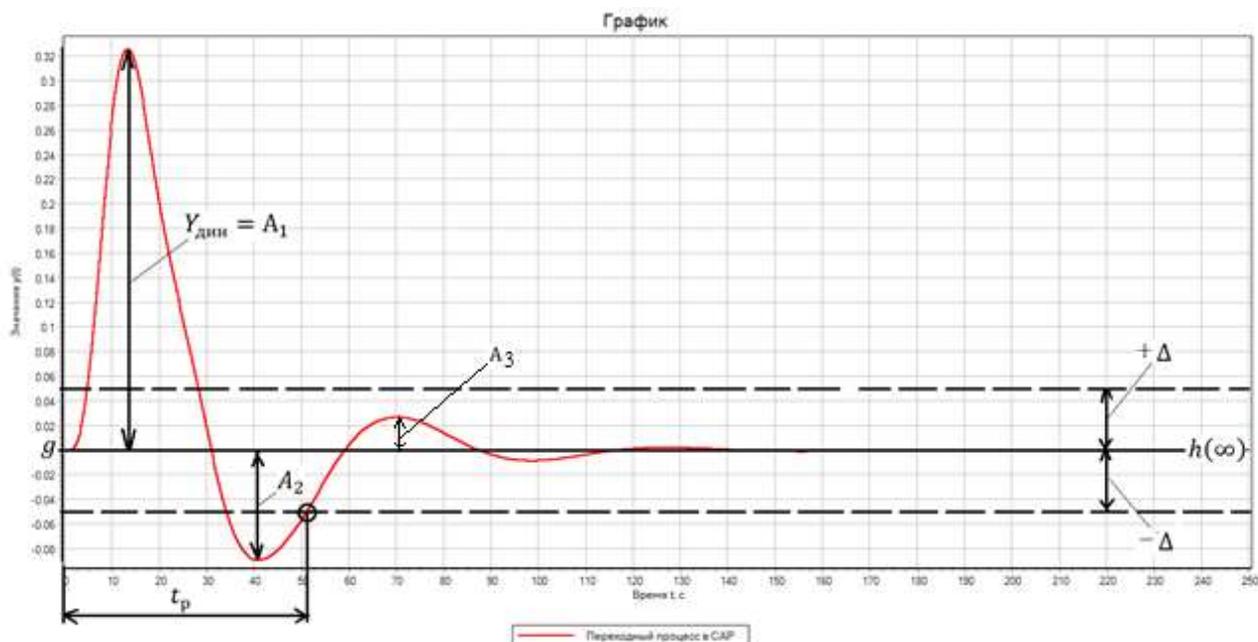


Рисунок 4.33 – Прямые показатели качества

Статическая ошибка регулирования

$$\varepsilon(\infty) = g = h(\infty) = 0$$

Максимальная динамическая ошибка регулирования

$$Y_{\text{дин}} = A_1 = \max(|g - h(t)|) = \max(|0 - 0.326|) = 0.326$$

Время регулирования для «трубки допуска» $\pm 5\%$ от входного ступенчатого воздействия: $\Delta = \pm 5\% \cdot \Delta f = \pm 5\% \cdot 1 = \pm 0.05$

$$t_p = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq \Delta) = \min(|h(t) - h(\infty)| \leq 0.05) = 51.2 \text{ сек}$$

Перерегулирование

$$\sigma = \left| \frac{A_2}{A_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{0.089}{0.326} \right| \cdot 100\% = 27.3 \%$$

Декремент затухания

$$\chi = \frac{A_1}{A_3} = \frac{0.326}{0.028} = 11.6$$

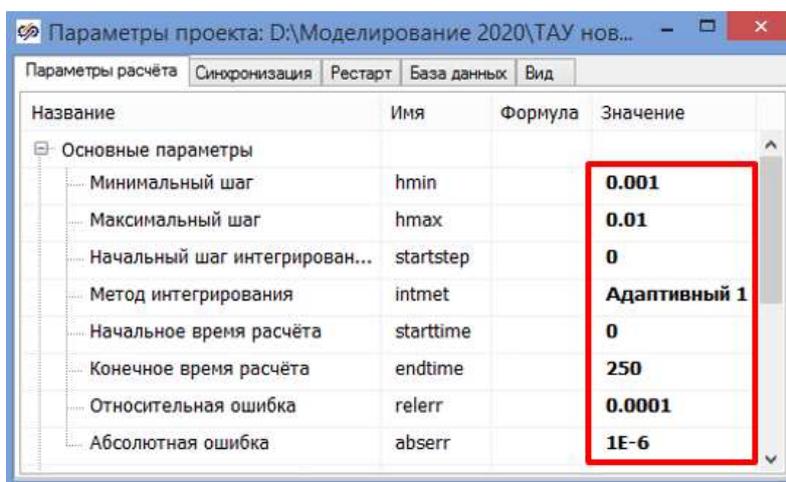
Степень затухания

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = \frac{0.326 - 0.028}{0.326} = 0.91$$

Успешно завершённый этап проекта сохраним стандартными методами Windows.

А.5 Сравнительная оценка качества регулирования

Откроем стандартными методами Windows этап проекта, сохранённый в главе А.3.5, и настроим созданную расчётную схему замкнутой САР следующим образом (рисунок А.5.1).



Название	Имя	Формула	Значение
Основные параметры			
Минимальный шаг	hmin		0.001
Максимальный шаг	hmax		0.01
Начальный шаг интегрирован...	startstep		0
Метод интегрирования	intmet		Адаптивный 1
Начальное время расчёта	starttime		0
Конечное время расчёта	endtime		250
Относительная ошибка	relerr		0.0001
Абсолютная ошибка	abserr		1E-6

Рисунок А.5.1 – Настройка параметров проекта

Дополним расчётную схему для сравнительного анализа переходных процессов в спроектированной одноконтурной САР с настройками регулятора, рассчитанными разными методами (рисунок А.5.2) согласно рекомендациям из пособия [1]. В качестве настроек регулятора воспользуемся расчетами главы А.4.1-А.4.3.

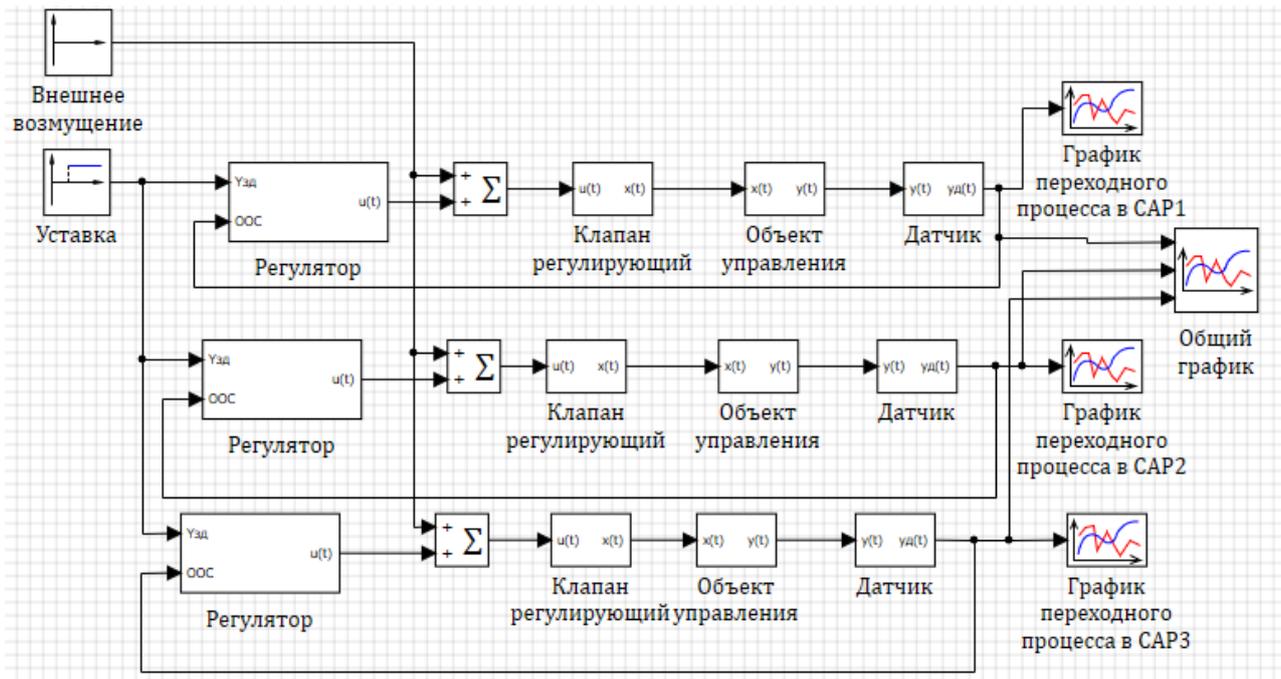


Рисунок А.5.2 – Расчетная схема для сравнительного анализа переходных процессов в одноконтурной САР

Проведем моделирование в спроектированной одноконтурной САР с различными настройками регулятора сначала при обработке возмущения по заданию, а потом при обработке внешнего возмущения на входе объекта. Выведем все переходные процессы на один график (рисунок А.5.3-А.5.4), и сведем рассчитанные в главе А.4.1-А.4.3 показатели качества в сводную таблицу А.5.1-А.5.2.

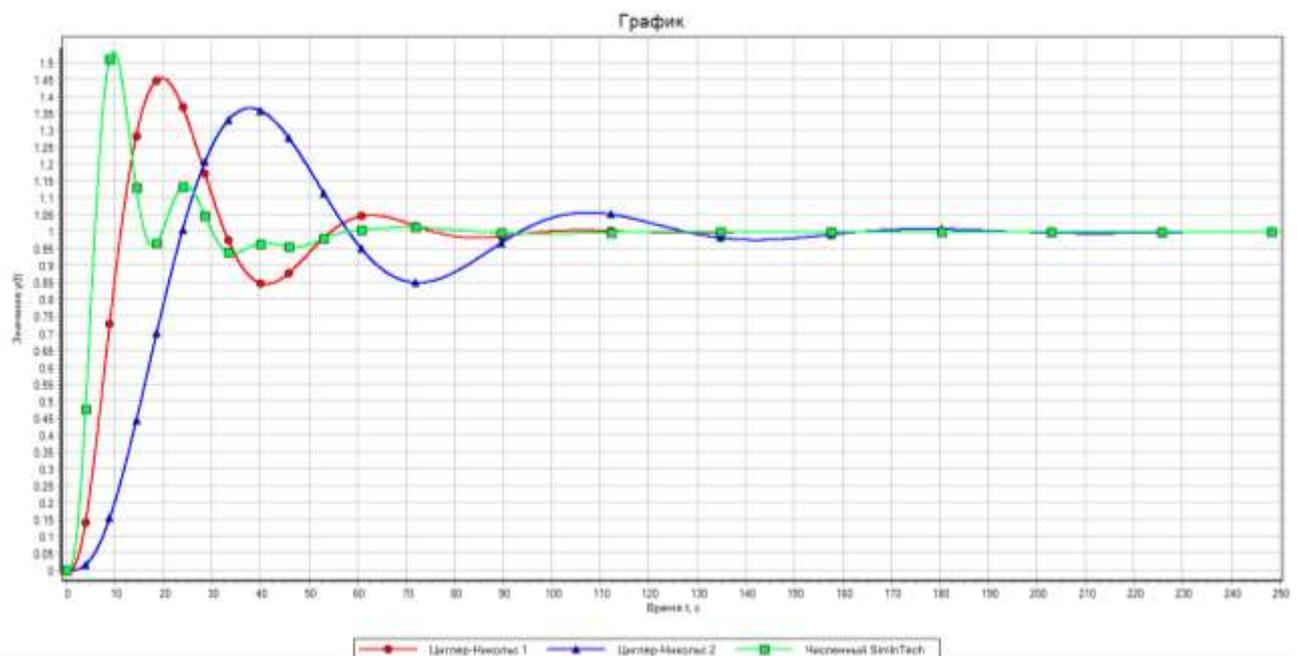


Рисунок А.5.3 – Графики переходных процессов при возмущении по заданию

Таблица А.5.1 – Показатели качества регулирования при возмущении по заданию

	Ziegler-Nichols 1 способ	Ziegler-Nichols 2 способ	Численная оптимизация
Квадратичный критерий качества	7.83	14.54	4.5
Статическая ошибка	0	0	0
Динамическая ошибка	0.455	0.366	0.531
Время регулирования	51	113.2	36.6
Перерегулирование	45.5 %	36.6 %	53.1 %
Декремент затухания	9.1	6.31	3.9
Степень затухания	0.89	0.84	0.74

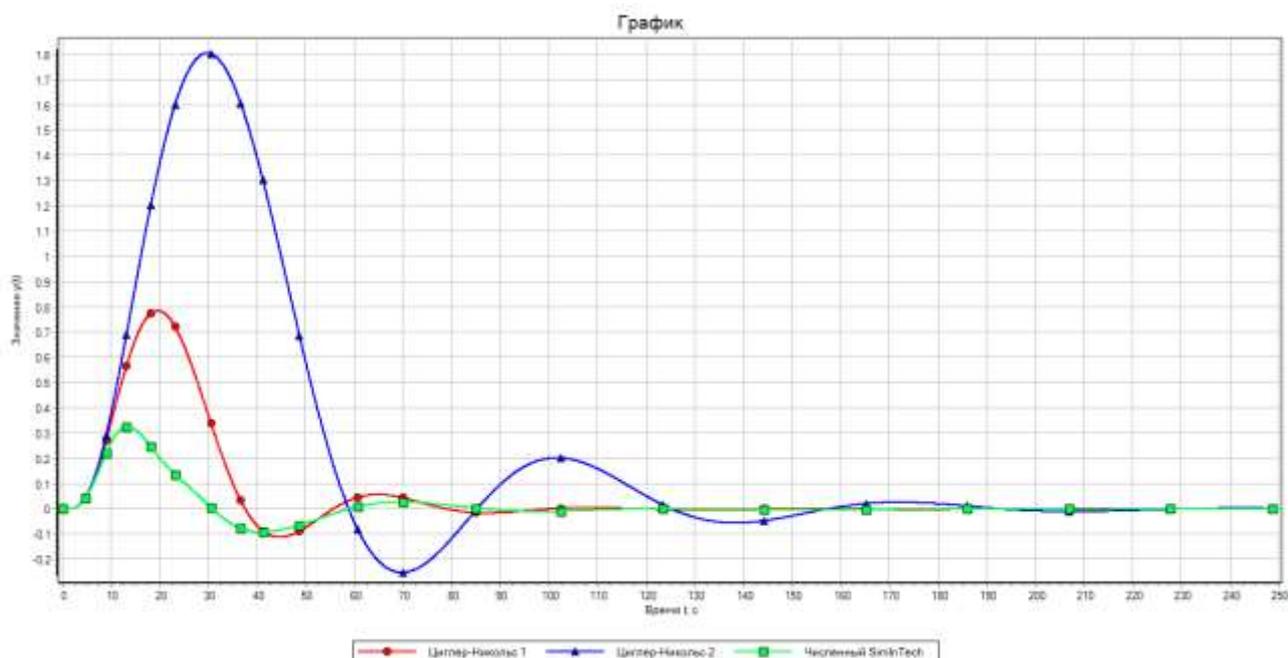


Рисунок А.5.4 – Графики переходных процессов при внешнем возмущении на входе объекта

Таблица А.5.2 – Показатели качества регулирования при внешнем возмущении на входе объекта

	Ziegler-Nichols 1 способ	Ziegler-Nichols 2 способ	Численный SimInTech
Квадратичный критерий качества	8.94	77.4	1.24
Статическая ошибка	0	0	0
Динамическая ошибка	0.786	1.807	0.326
Время регулирования	68.5	142.5	51.2
Перерегулирование	14 %	13.89 %	27.3 %
Декремент затухания	13.6	8.9	11.6
Степень затухания	0.93	0.89	0.91

Вывод: разработана компьютерная модель одноконтурной САР, рассчитаны настроечные параметры ПИД-регулятора в составе одноконтурной САР различными методами. Рассчитаны прямые показатели качества регулирования и значение заданного критерия оптимальности. Проведена сравнительная оценка качества регулирования, которая показала, что заданный критерий качества в одноконтурной САР, рассчитанной приближенными методами, удалось улучшить численным методом оптимизации SimInTech.

Список использованных источников

1. Ляшенко А.И., Маслова Н.В., Лопатин А.Г. Учебно-методические указания к курсовому проекту по ТАУ. Проектирование одноконтурной САР в SimInTech // ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал). Новомосковск, 2022. 120 с.

Библиографический список

1. Спасибов В.М. Идентификация промышленных объектов и систем управления [Текст]: учебное пособие. Ч.1 / В. М. Спасибов, И. А. Каменских, Ю. А. Ведерникова. Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. 104 с.
2. Новиков С.И. Практическая идентификация динамических характеристик объектов управления теплоэнергетического оборудования: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 64 с.
3. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера-Никольса: метод. указания к выполнению лаб. работы для студентов, обучающихся по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника» и 201000 «Биотехнические системы и технологии» / сост. О.С. Вадутов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 10 с.
4. Ziegler–Nichols method [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler-Nichols_method (дата обращения: 07.02.2022).
5. Astrom K.J. Advanced PID control / K.J. Astrom, T. Hagglund. ISA (The instrumentation, Systems, and Automation Society), 2006. 460 с.
6. Wen. Tan. Comparison of some well - known PID tuning formulas / Wen. Tan. Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio. J. Marquez // Computers and Chemical Engineering, 2006. № 30. p. 1416-1423.
7. Astrom K.J. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control / K.J. Astrom, T. Hagglund // Journal of Process Control, 2004. № 4. p. 635-650.
8. Вент Д.П., Лопатин А.Г., Сидельников С.И. Математическое моделирование химико-технологических систем: Учебное пособие / РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский ин-т. Новомосковск, 2013. 96 с.
9. Синтез систем автоматического управления: учебно-методическое пособие / составитель В.А. Денисов. Тольятти: ТГУ, 2014. 47 с.
10. Руководство к лабораторным работам в пакетах Electronics Workbench и VisSim: методические указания / составитель Б. А. Татаринич. Белгород: БелГАУ им.В.Я.Горина, 2020. 35 с.
11. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами. Учебник для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 690 с.

12. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.1. Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 748 с.
13. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2010617758 от 23.11.2010 г.
14. Официальный сайт компании ООО «ЗВ Сервис» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://simintech.ru/> (дата обращения: 01.02.2022).
15. Жмудь В.А. Теория автоматического управления. Замкнутые системы: учебное пособие для вузов / В. А. Жмудь. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2022. 234 с.
16. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Линейные системы: учебник и практикум для вузов / Д. П. Ким. 3-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2022. 311 с.
17. Ягодкина Т.В. Теория автоматического управления: учебник и практикум для вузов / Т. В. Ягодкина, В. М. Беседин. Москва: Издательство Юрайт, 2022. 470 с.
18. Ким Д. П. Теория автоматического управления: учебник и практикум для вузов / Д. П. Ким. Москва: Издательство Юрайт, 2022. 276 с.

Учебное издание

Учебно-методические указания к курсовому проекту по ТАУ

Проектирование одноконтурной САР в SimInTech

Авторы:

*ЛЯШЕНКО Александр Иванович
МАСЛОВА Наталия Васильевна
ЛОПАТИН Александр Геннадиевич*

Редактор Туманова Е.М.

Компьютерный набор Ляшенко А.И.

Подписано в печать

Формат 60×84/16.

Бумага «Комус». Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. ____ . Уч.-изд.л. ____ .

Тираж ____ экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
им. Д.И.Менделеева»

Новомосковский институт (филиал). Издательский центр.

Адрес университета: 125047, Москва, Миусская пл.,9.

Адрес института: 301670, Новомосковск, Тульская обл., Дружбы, 8