

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 19.09.2024 19:13:33

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39c5f1c11eabf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра механики, мехатроники и робототехники

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 10 » 09



НАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРА ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ САУ

Методические указания по выполнению лабораторной работы №1 по
дисциплине «Теория автоматического управления» для студентов
направления 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»

Курск 2024

УДК 681.323

Составители: Яцун С.Ф., Щербакова М.П.

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент Юго-Западного государственного университета *Политов Е.Н.*

Настройка ПИД-регулятора линейной и нелинейной САУ: методические указания по выполнению лабораторной работы №1 по дисциплине «Теория автоматического управления» для студентов направления 15.03.06 Мехатроника и робототехника / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: С.Ф. Яцун, М.П. Щербакова. - Курск, 2024. 24 с.

Изложены задания, ход выполнения и пример выполнения лабораторной работы по дисциплине «Теория автоматического управления».

Методические указания соответствуют требованиям Федерального государственного образовательного стандарта.

Методические указания предназначены для студентов направления 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» а также других направлений технического профиля для всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать. Формат 60x84 1/16.

Усл.печ.л. 1,4 Уч.-изд.л. 0,69 Тираж 30 экз. Заказ. ~~238~~ Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Лабораторная работа №1

НАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРА ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ САУ

Цель работы:

1. Ознакомление с показателями качества системы автоматического управления. Точность, быстродействие.
2. Выбор значений параметров ПИД-регулятора, обеспечивающих желаемые динамические свойства линейной САУ;
3. Модели нелинейностей САУ.
4. Выбор значений параметров ПИД-регулятора, обеспечивающих желаемые динамические свойства нелинейной САУ;

Объект исследования: линейная и нелинейная система автоматического управления.

Аппаратные средства: виртуальная лаборатория на ЭВМ IBM PC, программный пакет «MATLAB/Simulink».

1.1 Настройка ПИД-регулятора линейной САУ

Краткие теоретические сведения:

Линейная система - это система, которая описывается линейными уравнениями (алгебраическими, дифференциальными или разностными).

Поскольку дальнейшая работа будет вестись с передаточными функциями САУ, введём следующее определение:

Передаточная функция системы - отношение операторного (лапласового) изображения соответствующей выходной величины $y(t)$ к операторному изображению входной величины $g(t)$:

$$\begin{array}{c} g(t) \longrightarrow \boxed{W(p)} \longrightarrow y(t) \end{array} \quad W(p) = \frac{y(t)}{g(t)}, \quad (1)$$

Также для линейной системы справедливы выполнения принципа аддитивности и суперпозиций:

Принцип аддитивности (от англ. To add – добавлять, прибавлять) заключается в том, что пропорциональное увеличение входного сигнала должно приводить к такому же пропорциональному увеличению выходного сигнала. Например, увеличение в 1.2 раза питающего напряжения двигателя постоянного тока в линейной системе должно привести к увеличению частоты вращения его ротора в 1.2 раза. Математически выполнение этого принципа можно записать следующим образом:

$$\text{Если } y = L(g), \text{ то } L(k \cdot g) = k \cdot y, \quad (2)$$

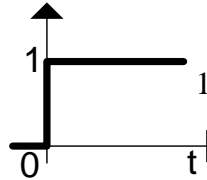
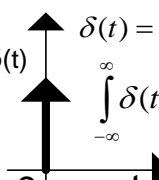
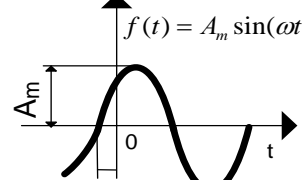
где g – входной сигнал, y – выходной сигнал, L – оператор (например, передаточная функция) преобразования входного сигнала в выходной.

Принцип суперпозиции состоит в том, что в линейной системе не важен порядок выполнения операций (преобразований, действий), порядок следования передаточных функций и т.д. Математически выполнение этого принципа можно записать следующим образом:

$$L \cdot (g_1(t) + g_2(t)) = L \cdot g_1(t) + L \cdot g_2(t), \quad (3)$$

1) Для оценки свойств САУ можно использовать тестовые сигналы на входе. Существуют как единичные воздействия (таблица 1), которые порождают переходную функцию (рис. 1), так и периодические, которые порождают частотные функции, например годограф и тд.

Таблица 1

Единичное ступенчатое воздействие $g(t)=1(t)$ (функция Хевисайда)	Единичное импульсное воздействие $\delta(t)=1$ (функция Дирака)	Гармоническое воздействие
 $1(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$	 $\delta(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}$ $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$	 $f(t) = A_m \sin(\omega t + \varphi)$

Динамические свойства САУ оцениваются по виду переходной функции (рис. 1) и её характеристикам, соответственно.

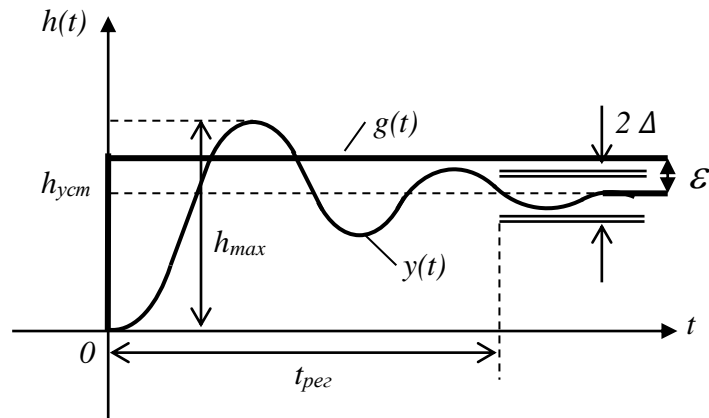


Рис.1 График переходного процесса САУ

Характеризуется переходная функция следующими параметрами:

А) Коэффициент перерегулирования σ (сигма), выраженный в процентах, определяется по формуле 4:

$$\sigma = \frac{|h_{max} - h_{уст}|}{h_{уст}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где h_{max} - максимальное значение переходной характеристики замкнутой САУ $y(t)$;

$h_{уст}$ - установившееся значение переходного процесса $y(t)$ - реакция на единичное ступенчатое воздействие $g(t)$.

Б) Время регулирования (или установления) $t_{рег}$ - минимальная величина, при которой удовлетворяется условие: $|g(t) - h_{уст}| \leq \Delta$, где Δ - заданный диапазон величины ошибки (обычно $\Delta = 0,05h_{уст}$). Т.е. **временем регулирования (установления)** будет время, за которое график переходного процесса попадает внутрь 5% - ой (зависит от качества и требования к переходной функции) окрестности установившегося значения и больше из этой области не выходит.

В) Статическая ошибка ε (эпсилон), выраженная в процентах по формулам 5,6:

$$\varepsilon = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{|h_{уст} - g(t)|}{h_{уст}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

Или же ε вычисляется как:

$$\varepsilon = h_{уст} - g(t) \quad (6)$$

Также существует и динамическая ошибка, которая определяется она по формуле 7:

$$\varepsilon(t) = \Phi_e(p) \cdot g(t) + \frac{d\Phi_e(p)}{dp} \cdot \frac{dg(t)}{dt} + \dots \quad (\text{При } p \rightarrow 0) \quad (7)$$

где: $\Phi_e(p)$ - передаточная функция замкнутой системы, $g(t)$ - входное воздействие.

В данном случае работа ведётся с передаточной функцией замкнутой системы, если система разомкнутая, то необходимо провести следующее преобразование:

$$W(\text{р.с.}) = \frac{\overset{A}{\text{вр} + 1}}{\underset{B}{\text{ар}^2 + \text{вр} + 1}} \rightarrow W(\text{з.с.}) = \frac{B}{A + B} = \frac{\text{ар}^2 + \text{вр} + 1}{\text{ар}^2 + 2\text{вр} + 2} \quad (8)$$

Г) Колебательность n определяют по количеству условных периодов переходного процесса (на рис. 1 $n \approx 2$).

2) САУ с регулятором

На рисунке 2 представлена замкнутая структурная схема одноканальной САУ с регулятором.

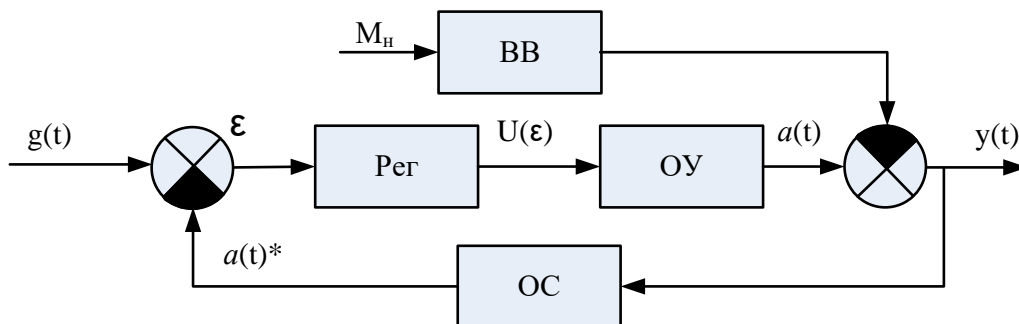


Рис. 2 Структурная схема одноканальной САУ

$g(t)$ – входное воздействие;

$U(\varepsilon)$ – управляющее напряжение;

$a(t)$ – желаемая величина исполнительного звена;

$a(t)^*$ – фактическая величина исполнительного звена;

$y(t)$ – выходное воздействие;

M_n – момент нагрузки

OU – объект управления;

Per – регулятор;

OC – обратная связь;

BB – Возмущающее воздействие;

ε – ошибка угла повтора звена.

Задачей любого регулятора является установление связи между входным воздействием ошибки ε и выходным управляющим воздействием $U = f(\varepsilon)$.

Одним из эффективных средств достижения желаемого качества переходного процесса управления является применение пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора). Он регулирует управляющее напряжение по следующему закону:

$$u(t) = k_I \varepsilon(t) + k_E \int_0^t \varepsilon(t) dt + k_A \dot{\varepsilon}(t), \quad (9)$$

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид:

$$W(p)_{i\dot{\epsilon}\ddot{\epsilon}} = \frac{K_p \cdot p + K_i + K_d \cdot p^2}{p} = K_d + \frac{K_i}{p} + K_d \cdot p \quad (10)$$

Коэффициенты k_p , k_i , k_d называются коэффициентами соответственно пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Структурная схема ПИД-регулятора представлена на рис. 3.

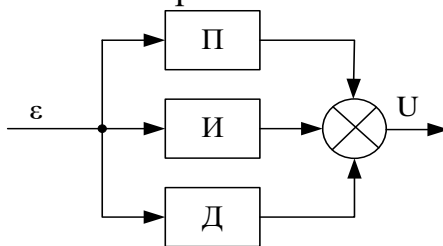


Рис.3 Структурная схема ПИД-регулятора в общем виде

Пропорциональная составляющая стандартного закона управления позволяет уменьшить установившуюся ошибку ϵ .

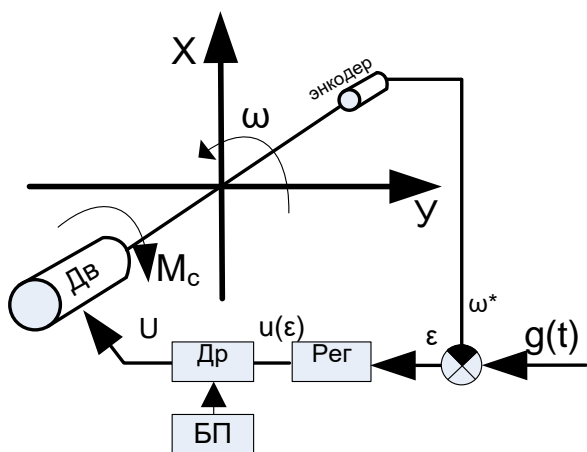
Интегральная составляющая стандартного закона управления вводится для повышения степени астатизма системы и (для повышения точности: $\epsilon \rightarrow 0$).

Дифференциальная составляющая стандартного закона управления непосредственно не влияет на установившуюся ошибку. Однако она повышает запас устойчивости системы, что позволяет компенсировать потерю устойчивости при увеличении вклада пропорциональной и интегрирующей составляющих. Кроме того, дифференцирующая составляющая обеспечивает повышение быстродействия и снижение динамической ошибки системы.

Целью настройки ПИД-регулятора является подбор такого сочетания коэффициентов k_p , k_i и k_d , которые бы обеспечивали требуемое качество переходного процесса и получение желаемых значений коэффициента перерегулирования σ , времени переходного процесса $t_{рег}$, статической ошибки ϵ и колебательности n .

3. Построение передаточной функции ОУ.

Рассмотрим пример САУ с управлением по положению выходного звена (вращательное движение) (рис. 4)



где: Дв – двигатель; Др – драйвер;
Рег – регулятор; БП – блок питания;
 Ω , ω^* – желаемая и фактическая угловая скорость объекта управления, соответственно;
энкодер – датчик измерения положения вала двигателя;
 $u(\epsilon)$ – управляющее по ошибке напряжение;
 U – управляющее (питающее) напряжение;
 M_c – момент сопротивления Дв;
 ϵ – ошибка;
 $g(t)$ – входное воздействие.

Рис. 4 Схема САУ с управление по положению выходного звена

Данная схема наглядно представляет какие связи возникают в простой одноканальной САУ.

Теперь рассмотрим для примера на рис. 5, построение в общем виде математической модели электромеханической системы (электропривода) описываемой системой уравнений Максвелла-Лагранжа в передаточную функцию двигателя постоянного тока (ДПТ) без учёта ПИД-регулятора:

$$\begin{cases} U(t) = R_{\text{я}} i_{\text{я}} + \omega C_e + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} \\ (J + J_{\text{об}}) \frac{d\omega}{dt} = C_m i_{\text{я}} - M_c \end{cases} \quad (11)$$

$U(t)$ – управляющее напряжение;

C_m – моментная постоянная;

$L_{\text{я}}$ – индуктивность якоря;

C_e – скоростная постоянная;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление якоря;

ω – угловая скорость вала двигателя;

$i_{\text{я}}$ – ток якоря;

M_c – момент сопротивления на двигателе.

J – момент инерции ротора;

Получим передаточную функцию ОУ. Заменим $\frac{d}{dt}$ оператором Лапласа p :

$$\begin{cases} U = R_{\text{я}} i_{\text{я}} + \omega C_e + L_{\text{я}} \cdot p \cdot i_{\text{я}} \\ (J + J_{\text{об}}) p \omega = C_m i_{\text{я}} - M_c \end{cases} \quad (12)$$

Проведем следующие преобразования 11 в 12:

$$\begin{cases} U(t) - \omega C_e = i_{\text{я}} (L_{\text{я}} \cdot p + R_{\text{я}}) \\ i_{\text{я}} = \frac{J \cdot p \cdot \omega + M_c}{C_m} \end{cases} \quad (13)$$

Подставим второе уравнение системы в первое:

$$\frac{J \cdot p \cdot \omega + M_c}{C_m} (L_{\text{я}} \cdot p + R_{\text{я}}) = U(t) - \omega C_e \quad (14)$$

Раскроем скобки и получим:

$$\frac{L_{\text{я}} \cdot J}{C_m} \cdot p^2 \cdot \omega + \frac{L_{\text{я}}}{C_m} \cdot p \cdot M + \frac{R_{\text{я}} \cdot J}{C_m} \cdot p \cdot \omega + \frac{R_{\text{я}}}{C_m} \cdot M = U(t) - \omega C_e \quad (15)$$

Преобразуем выражение к виду:

$$\left(\frac{L_{\text{я}} \cdot J}{C_m} \cdot p^2 + \frac{R_{\text{я}} \cdot J}{C_m} \cdot p + C_e \right) \cdot \omega = U(t) - \left(\frac{L_{\text{я}}}{C_m} \cdot p + \frac{R_{\text{я}}}{C_m} \right) \cdot M \quad (16)$$

Отсюда находим передаточные функции. Передаточная функция по возмущающему воздействию:

$$W_{\text{вв}}(P) = \frac{\frac{L_{\text{я}}}{C_m} \cdot p + \frac{R_{\text{я}}}{C_m}}{\frac{L_{\text{я}} \cdot J}{C_m} \cdot p^2 + \frac{R_{\text{я}} \cdot J}{C_m} \cdot p + C_e} \quad (17)$$

Передаточная функция ОУ (коллекторный ДПТ):

$$W_{\text{об}}(P) = \frac{1}{\frac{L_{\text{я}} \cdot J}{C_m} \cdot p^2 + \frac{R_{\text{я}} \cdot J}{C_m} \cdot p + C_e} \quad (18)$$

Приведём 17 к виду 18:

$$W(p) = \frac{k_0}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1} \quad (19)$$

k_0 - константа;

$$\frac{L_{я} \cdot J}{C_m} \cdot p^2 = T^2 p^2 \rightarrow T^2 = \frac{L_{я} \cdot J}{C_m} \text{ - постоянная времени;}$$

$$\frac{R_{я} \cdot J}{C_m} \cdot p = 2T\xi p \rightarrow 2T\xi = \frac{R_{я} \cdot J}{C_m}.$$

Преобразуем структурную схему одноканальной САУ (рис. 2) к виду, представленному на рисунке 5. Как видим, вместо обобщённых значений появляются передаточные функции конкретной составляющей САУ.

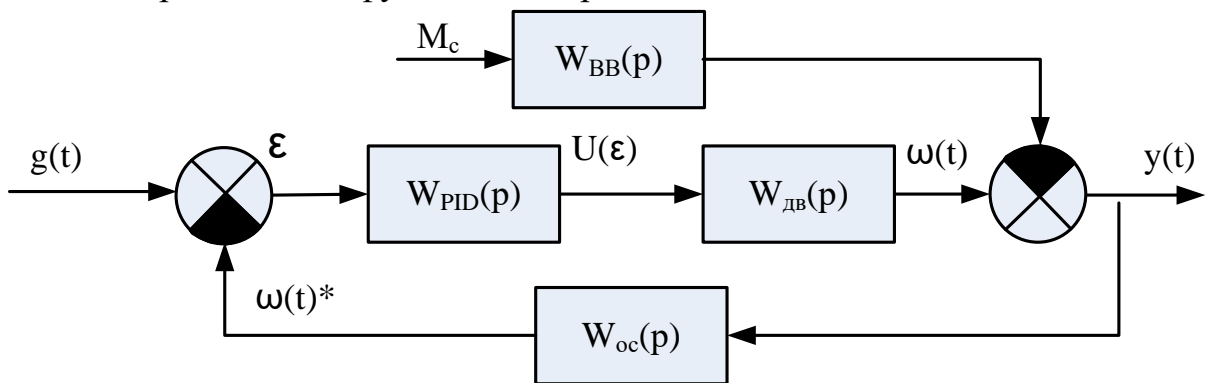


Рис. 5 Структурная схема одноканальной САУ

$g(t)$ – в общем понимании - входное воздействие в частном случае - единичное ступенчатое воздействие ;

$y(t)$ – в общем понимании - выходное воздействие, в частном случае (рис. 6) - ω ;

$U(\varepsilon)$ – управляющее напряжение;

M_c – момент сопротивления на валу электродвигателя;

$\omega(t)$ – управляемая угловая скорость исполнительного звена;

$\omega^*(t)$ – фактическая угловая скорость исполнительного звена;

$W_{вв}(p)$ – передаточная функция возмущения;

$W_{PID}(p)$ – передаточная функция ПИД-регулятора;

$W_{дв}(p)$ – передаточная функция двигателя;

$W_{ос}(p)$ – передаточная функция обратной связи;

ε – ошибка угловой скорости вращения звена.

Любую систему автоматического управления, как правило, можно разделить на две части: изменяемую и неизменяемую.

- неизменяемая часть включает: объект управления, управляющий орган, система измерения управляемой величины (датчики, вторичные преобразователи сигнала) и др. Неизменяемую часть можно отнести к объекту управления и получить для него общую передаточную функцию $W_{об}(p)$.

- к изменяемой части относятся регулятор или другие корректирующие устройства.

Пример выполнения работы:

В качестве примера данная лабораторная будет выполнена в пакете MATLAB/Simulink. Исходные данные представлены в табл.1.

Таблица 2 – Исходные данные

Параметр	k_0	T, c	$t_{уст}, c$	ξ	$\sigma, \% \leq$	$\varepsilon, \%$	n
Значение	1	0.5	0.2	0.15	1	0	0

Разомкнутая передаточная функция исследуемой системы имеет вид 18:

$$W(p) = \frac{k_0}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1}$$

численные значения постоянных коэффициентов для которой необходимо принять по табл.1 (для выполнения работы в соответствии с вариантом из табл.2). Обратная отрицательная связь пусть будет единичной.

1. Исходные параметры исследуемой САУ

Для получения данных о качестве переходного процесса исследуемой САУ, в качестве примера создадим её структурную схему (рис.6) и по результатам моделирования определить параметры качества переходного процесса (рис.7).

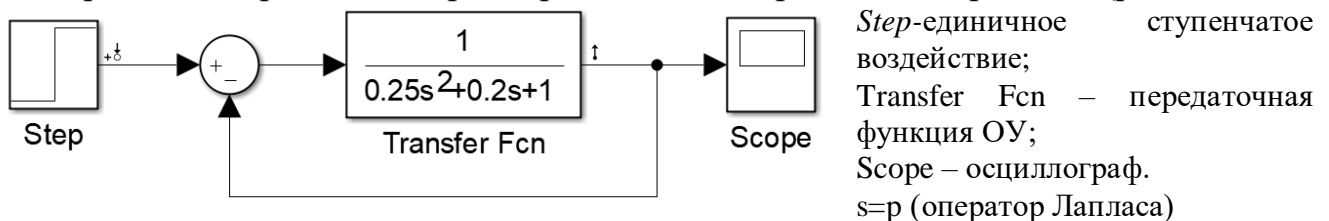


Рис. 6 Структурная блок-схема САУ

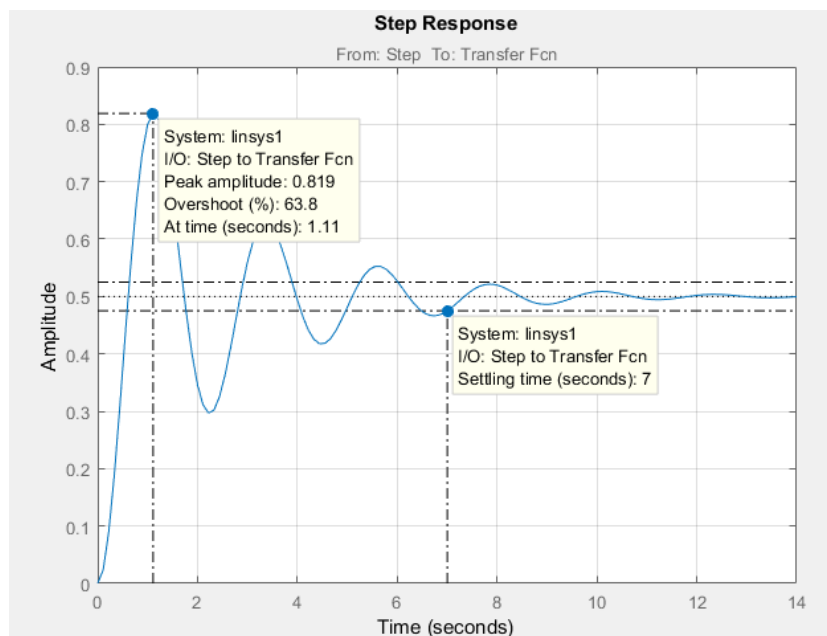


Рис. 7 Переходная функция САУ

Как следует из анализа графика (рис.7б), коэффициент перерегулирования, время установления, статическая ошибка и колебательность соответственно равны:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% = \frac{0.819 - 0.5}{0.5} \cdot 100\% = 63.8\%;$$

$$t_{уст} = 7(c); \varepsilon = 50\%; n = 3.$$

Полученные значения не удовлетворяют требованиям задания (табл.1). Поэтому для обеспечения требуемых характеристик переходного процесса будем использовать ПИД-регулятор.

2. Исследование САУ с учётом ПИД-регулятора.

Передаточная функция ОУ с ПИД-регулятором будет иметь следующий вид 19:

$$W_{OY(ПИД)}(p) = W_{ПИД}(p) \cdot W_{OY}(p) = \frac{K_p \cdot p + K_i + K_d \cdot p^2}{p} \cdot \frac{k_0}{T^2 p^2 + 2T\zeta p + 1} =$$

$$= \frac{k_0 \cdot (K_p \cdot p + K_i + K_d \cdot p^2)}{T^2 p^3 + 2T\zeta p^2 + p} \quad (19)$$

По умолчанию в Simulink/MATLAB начальные значения коэффициентов стандартного блока ПИД-регулятора равны $k_P=1$, $k_I=1$, $k_D=0$. Если использовать ПИД-регулятор с такими коэффициентами в исследуемой САУ (рис. 8а), то требуемого качества переходного процесса достичь не удаётся (рис. 8б).

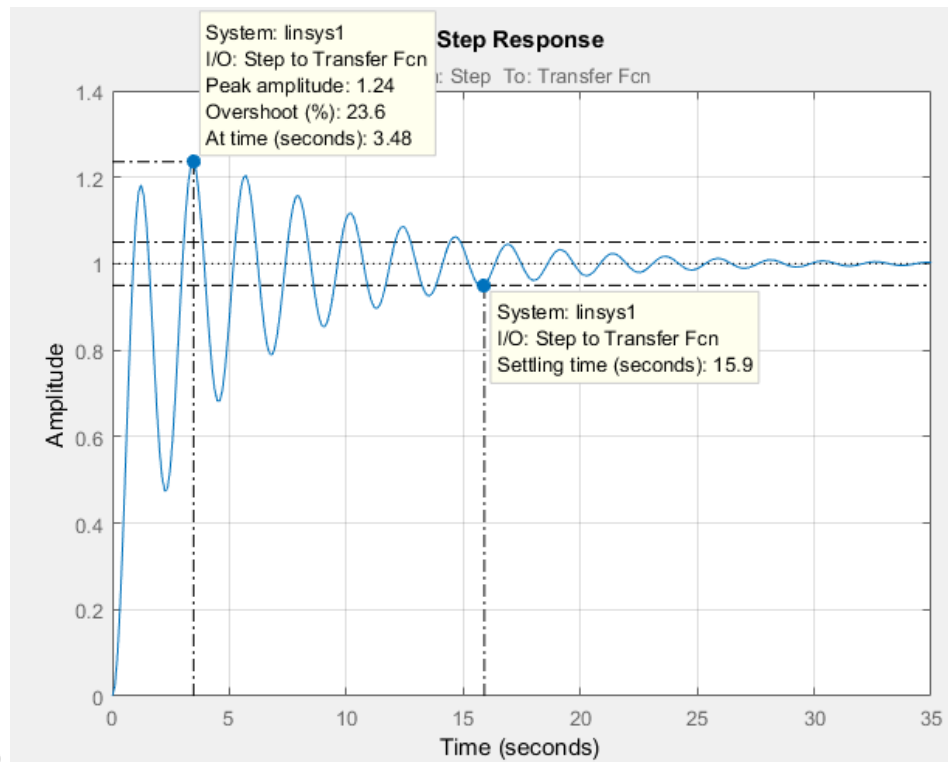
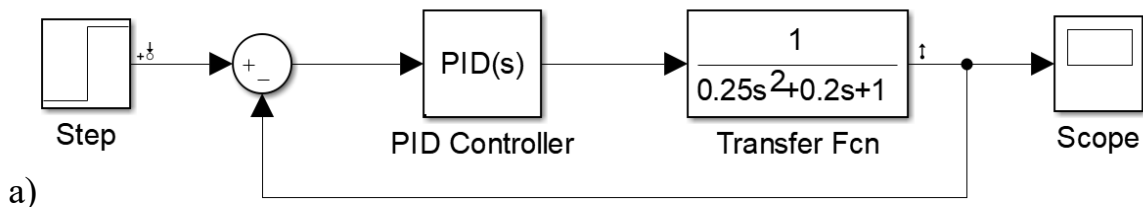


Рис. 8 а) Модель системы с ПИД-регулятором; б) График переходного процесса САУ с ПИД-регулятором без подбора оптимальных коэффициентов регулирования

Как видно по графику (рис.6) параметры качества переходного процесса САУ с ненастроенным ПИД-регулятором имеют следующие значения:

- коэффициент перерегулирования

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% = \frac{1.236 - 1}{1} \cdot 100\% = 23.6\%;$$

- время установления $t_{уст} = 15.9(c)$;
- установившаяся ошибка $\varepsilon = 4.8 \%$;
- $n = 7$.

и также не соответствуют требованиям задания (табл.1).

Таким образом, введение ПИД-регулятора без подбора коэффициентов регулирования значительно увеличило значение коэффициента перерегулирования и более чем в 2 раза увеличило время установления.

3. Подбор коэффициентов регулирования.

Для настройки ПИД-регулятора воспользуемся блоком **Check Step Response Characteristics (CSRC)** (рис. 9а). Перед началом настройки в интерфейсе блока **PID Controller** заменим значения коэффициентов регулирования на их обозначения – k_p , k_d , k_i (рис.9б).

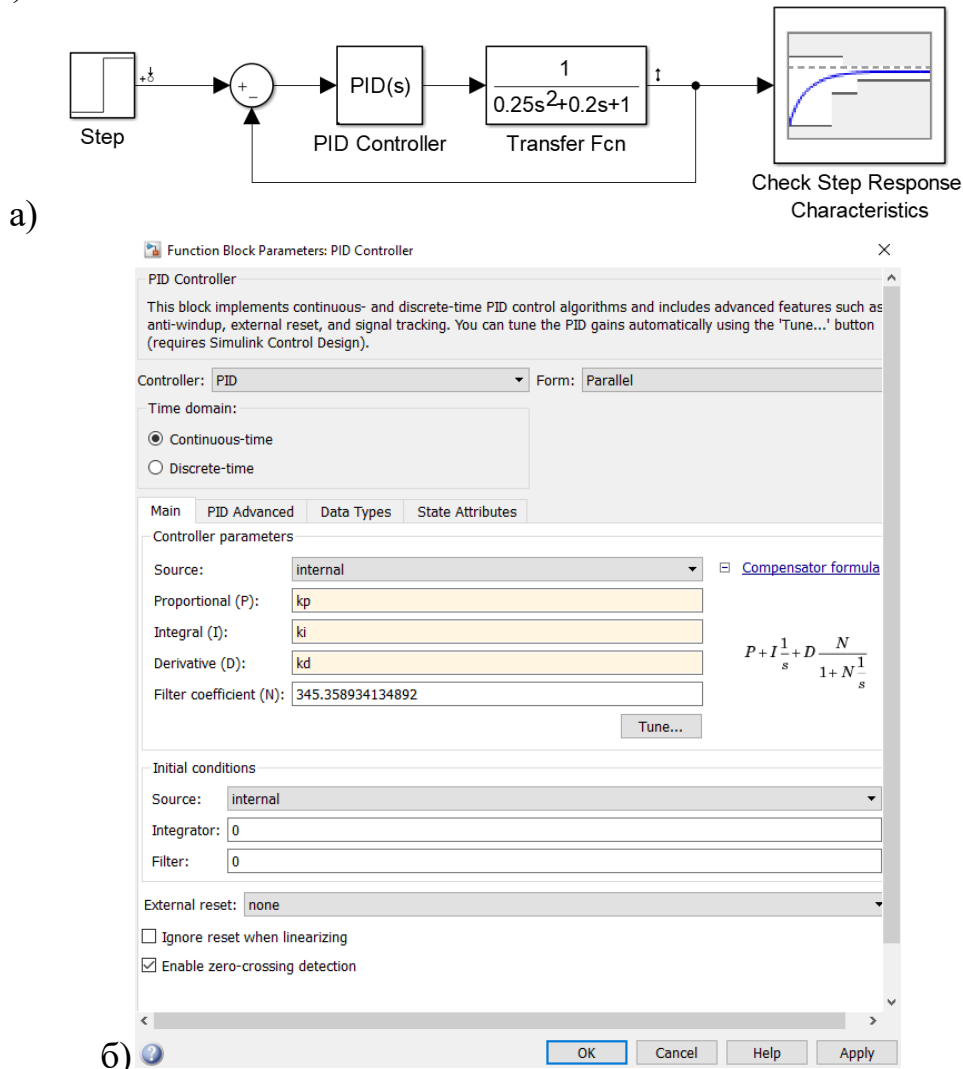


Рис. 9 а) Блок-модель системы для настройки ПИД-регулятора;
б) Интерфейс блока PIDController

В командном окне **MATLAB** (Command Window) введём необходимые переменные и для начала примем следующие значения (рис. 10)


```

Command Window
>> kp=1;
>> ki=1;
>> kd=0;

```

Рис. 10 Консоль команд в среде MATLAB

Откроем параметры блока оптимизации (рис.11).

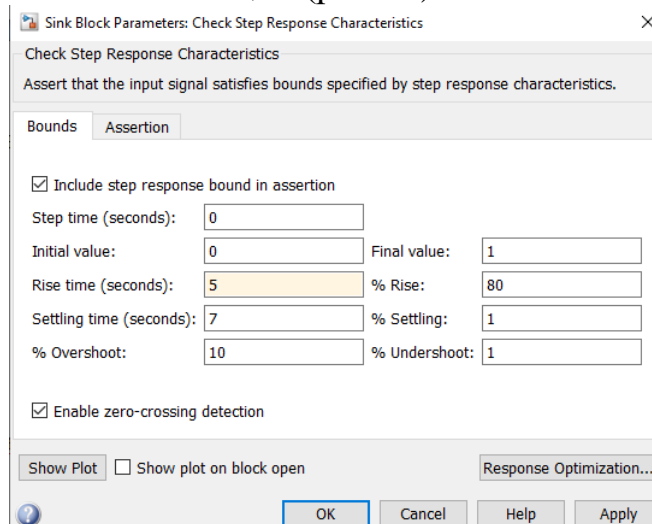


Рис. 11 Интерфейс блока оптимизации

Параметры блока **CSRC** содержат в себе численные значения параметров «коридора», в который должна зайти кривая переходного процесса. Время указано в секундах, установившееся значение в абсолютных единицах, амплитуда для «коридора» указывается в процентах. Для просмотра полученного «коридора» нажмем кнопку «Response Optimization». Открывшееся окно представляет собой поле для подбора коэффициентов ПИД-регулятора путём изменения динамических параметров САУ (коэффициента перерегулирования (горизонтальные линии) и времени установления (вертикальные линии)) (рис. 12).

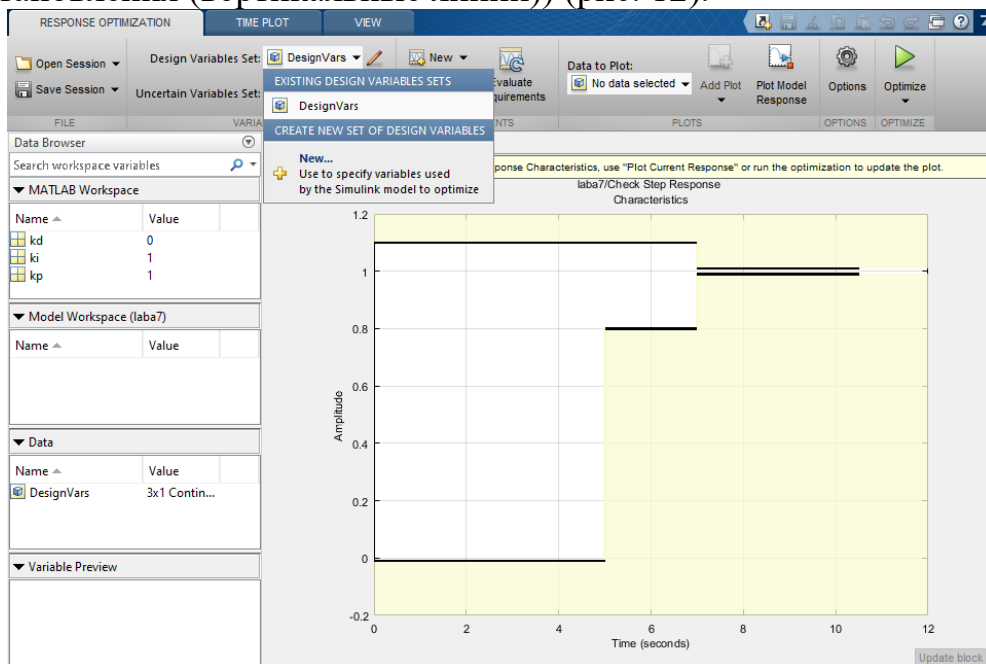


Рис. 12 Вызов меню выбора переменных оптимизации

Для выбора переменных оптимизации необходимо нажать кнопку «CREATE NEW SET OF DESIGN VARIABLES» (рис. 13).

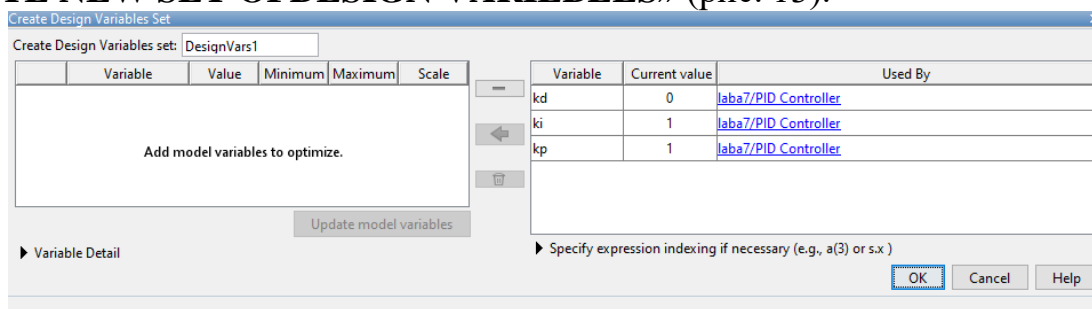


Рис. 13 Меню выбора переменных для оптимизации

Выделим левой кнопкой мыши в правом поле переменные k_p , k_d , k_i и нажатием стрелки переместим их в левое поле. Когда все необходимые переменные появятся в левом поле, нажмём кнопку «OK».

Для настройки параметров оптимизации нажмём кнопку «Options». Здесь можно выбрать необходимый алгоритм оптимизации и точность производимой оптимизации (добавлением или убиранием нуля в параметре «Parameter tolerance»)(рис. 14).

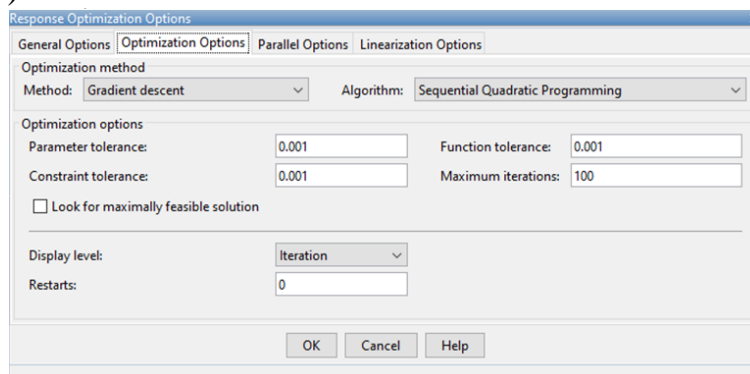


Рис. 14 Настройка параметров оптимизации

После настройки запускаем работу системы нажатием кнопки Start. Начнёт производиться подбор коэффициентов регулирования, что будет сопровождаться трансформацией графика САУ, пока основные его параметры не станут удовлетворять установленным границам (рис.15).

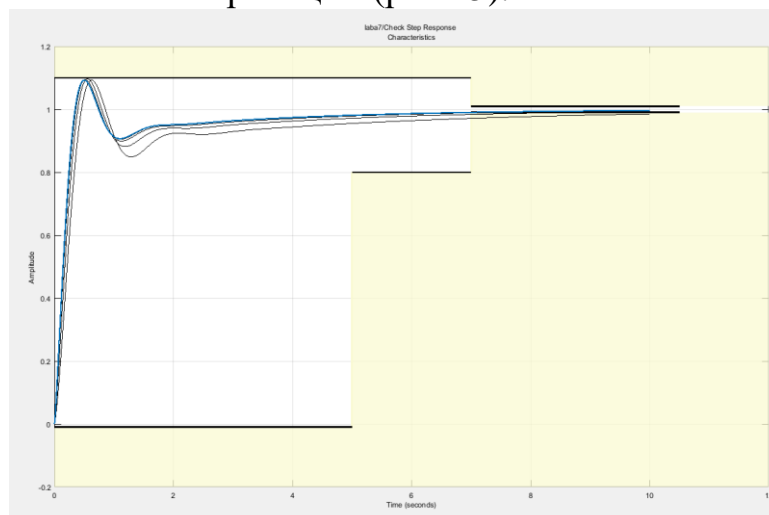


Рис. 15 Результаты оптимизации при заданных границах регулирования

Перемещая соответствующие границы регулирования в вертикальном и горизонтальном направлениях, добиваемся оптимального вида характеристики (рис.17). Также можно отслеживать параметры переходного процесса нажатием на его график правой кнопкой мыши, а также изменить границы просматриваемой области, нажав правой кнопкой мыши по белой области и выбрав параметр «Axes Properties» (рис.16). (**Примечание:** время моделирования, то есть значение оси X, должно меняться одновременно со значением времени моделирования в настройках самой модели).

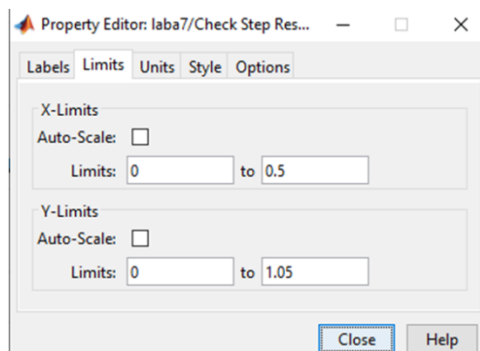


Рис. 16 Окно управления границами области регулирования

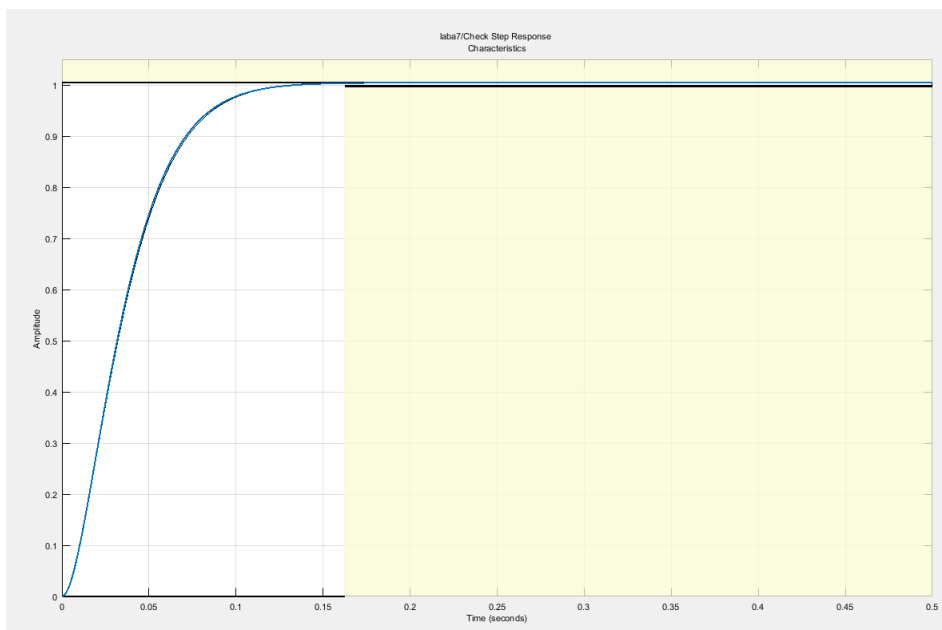


Рис. 17 Характеристика САУ после оптимизации

Итоговые коэффициенты регулирования будут показаны в верхнем левом углу окна блока оптимизации (рис. 18). Также их значения можно получить в командном окне MATLAB, указав требуемый коэффициент и нажав на клавишу «Enter».

Search workspace variables	
MATLAB Workspace	
Name	Value
kd	2.1642
ki	10.1270
kp	7.2776
tout	168x1 dou...

Рис. 18 Полученные коэффициенты регулирования
 $k_p=7.2776$; $k_d=2.1642$; $k_i=10.1270$

4. Проверка коэффициентов ПИД-регулятора.

После получения оптимальной характеристики переходного процесса необходимо выполнить проверку. Полученные коэффициенты нужно вписать в соответствующие поля блока PIDController исходной схемы. В поле Proportional записываем значение коэффициента K_p , Integral – K_i , Derivative – K_d (рис.19). Запускаем схему.

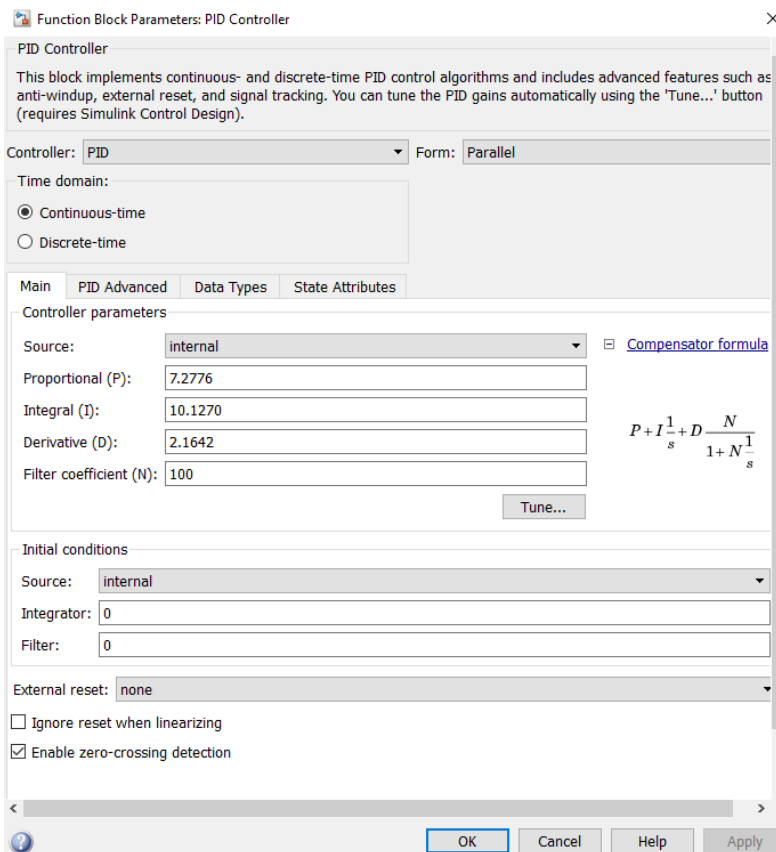


Рис. 19 Окно задания значений коэффициентов регулирования

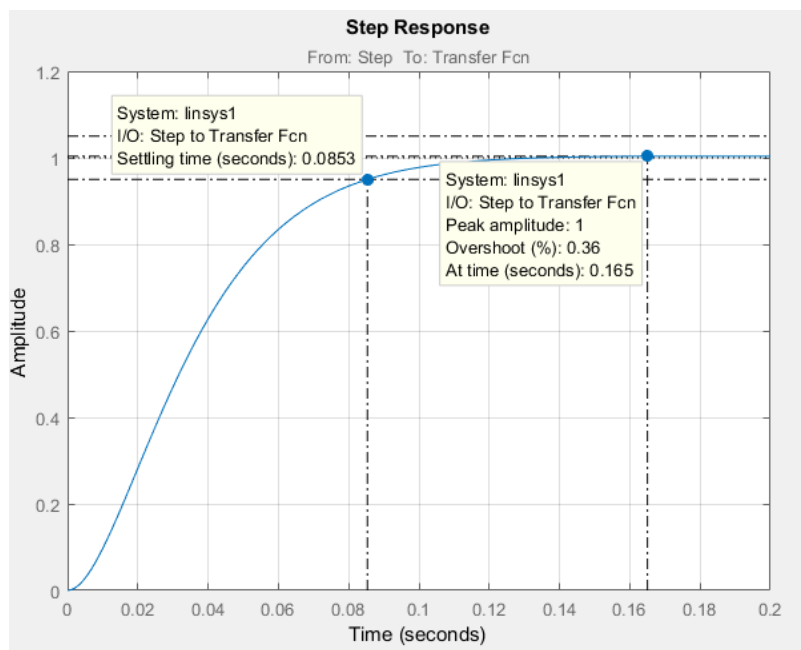


Рис. 20 График переходного процесса САУ с подобранными коэффициентами ПИД-регулятора

Как следует из анализа графика переходного процесса (рис.20), параметры качества имеют следующие значения:

- статическая ошибка $\varepsilon = 0 \%$;
- коэффициент перерегулирования - $\sigma = 0.36\%$;
- время установления - $t_{уст} = 0.0853(c)$;
- колебательность $n = 0$.

и теперь соответствуют требованиям задания (табл.1).

Таким образом, используя программные средства пакета MATLAB, были подобраны коэффициенты ПИД-регулятора, обеспечивающие оптимальные динамические параметры передаточной характеристики САУ, удовлетворяющие заданным требованиям.

Порядок и методика выполнения работы:

1. При исследовании рассмотренного *способа коррекции динамических свойств САУ* в качестве исходных данных выступит передаточная функция $W(p)$ неизменяемой части системы вида:

$$W(p) = \frac{K_0}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1},$$

Постоянные коэффициенты для которой берутся по вариантам из табл.2.

Задающее воздействие $g(t) = 1(t)$.

2. В процессе выполнения данной части работы студенты должны:

2.1) получить путём математического моделирования в программном пакете MATLAB графики $y(t)$, $\varepsilon(t)$ в системе;

2.2) определить параметры качества переходного процесса исследуемой САУ: время установления $t_{уст}$, коэффициент перерегулирования σ и установившуюся ошибку ε ;

2.3) применяя вышеописанный способ коррекции динамических свойств САУ, найти с помощью CSRC-блока пакета MATLAB коэффициенты регулирования k_p , k_i , k_d , обеспечивающие требуемое качество управления;

2.4) выполнить проверку достижения требуемого качества переходного процесса с использованием полученных значений коэффициентов ПИД-регулятора применительно к своей математической модели САУ.

3. Сделать вывод о проделанной работе и её результатах.

Таблица 3

<i>№ вар.</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
<i>К₀</i>	1	4	1	4	5	6	7	8	6	5	7
<i>T, c</i>	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,5	0,6	0,3
<i>ξ</i>	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,25	0,2	0,35	0,4	0,2	0,3
<i>t_{уст}, c ≤</i>	0,2	0,3	0,15	0,1	0,3	0,35	0,4	0,3	0,1	0,2	0,25
<i>σ, % ≤</i>	1	1	1	1,5	2	2	1	1	1	1	2
<i>n</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>ε, %</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1.2 Настройка ПИД-регулятора нелинейной САУ

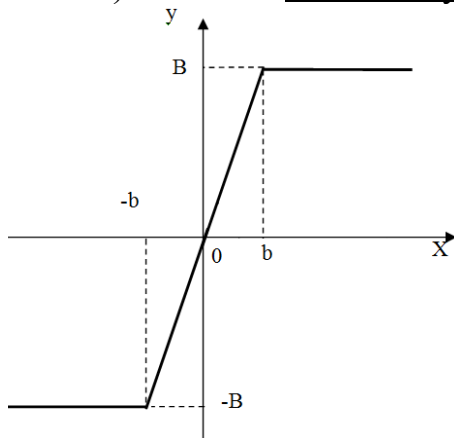
Краткие теоретические сведения нелинейных САУ:

Нелинейной системой автоматического управления называется такая система, которая содержит хотя бы одно звено, описываемое нелинейным уравнением (в более общем случае – нелинейным оператором).

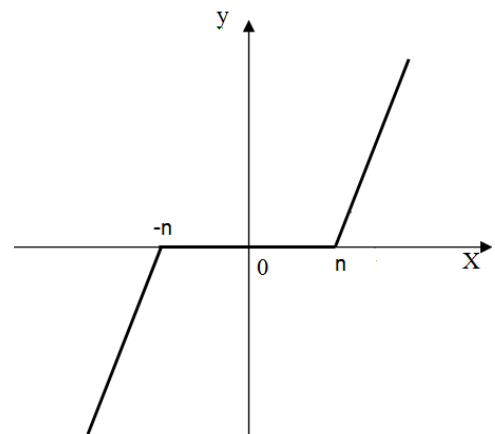
Нелинейными могут быть системы с переменными параметрами, с распределёнными параметрами, с запаздыванием, импульсные и цифровые системы, если в них где-либо нарушается линейность уравнений динамики.

Для проверки линейности или нелинейности рассматриваемой системы используются принципы аддитивности и суперпозиции (см. краткую теорию к 1.1). Если они не выполняются, то систему можно считать нелинейной.

В данной лабораторной работе проводится исследование нелинейности (рис.23), реализуемой с помощью двух звеньев: звена с зоной насыщения (рис. 21) (ограничителя) и звена с зоной нечувствительности (рис.22).



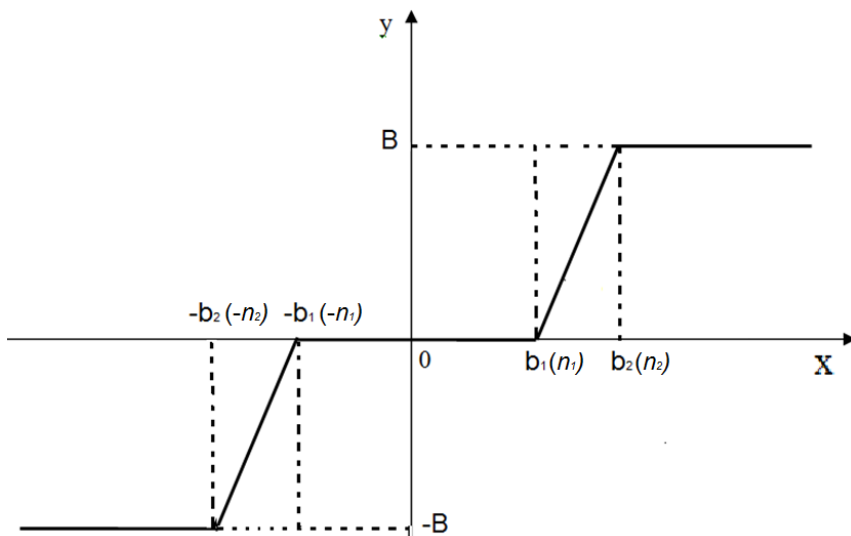
$$o = \begin{cases} \hat{A}i\delta\tilde{O} > b \\ kXi\delta\tilde{O} \text{ } |\tilde{O}| \leq b \\ -\hat{A}i\delta\tilde{O} > -b \end{cases}$$



$$o = \begin{cases} k(X - i)i\delta\tilde{O} > i \\ 0i\delta\tilde{O} \text{ } |\tilde{O}| \leq i \\ k(X + i)i\delta\tilde{O} > -i \end{cases}$$

Рис.21 Кусочно-линейная характеристика ограничителя (зоны насыщения)

Рис.22 Кусочно-линейная характеристика зоны нечувствительности



$$y = \begin{cases} \hat{A}i\delta\tilde{O} > b_2(i_2) \\ k(X - b_1(-i_1))i\delta\tilde{O} \text{ } b_1 < X \leq b_2(i_2) \\ 0i\delta\tilde{O} \text{ } |\tilde{O}| \leq b_1(i_1) \\ k(X + b_1(i_1))i\delta\tilde{O} \text{ } -b_1(-i_1) < X \leq -b_2(-i_2) \\ -\hat{A}i\delta\tilde{O} < -b_2(-i_2) \end{cases}$$

Рис.23 Характеристика нелинейности, исследуемой в работе

Зона нечувствительности n (на примере электродвигателя) выражается в том, что электрический двигатель имеет определённый минимальный ток пуска ($i=n$), до достижения которого вал двигателя будет неподвижен. В гидравлическом же двигателе золотник имеет так называемую зону перекрытия (его поршень немного шире отверстия, им закрываемого), вследствие чего он откроет путь рабочей жидкости в цилиндр двигателя, только переместившись на некоторую величину $x=b$.

На рисунке 24 представлен пример зоны нечувствительности, которая представлена в виде люфта, зазор, который существует между валом и шпонкой, а также между муфтой и шпонкой в результате движения вала становится причиной того, что вал провернулся на небольшой угол, а муфта всё ещё неподвижна.

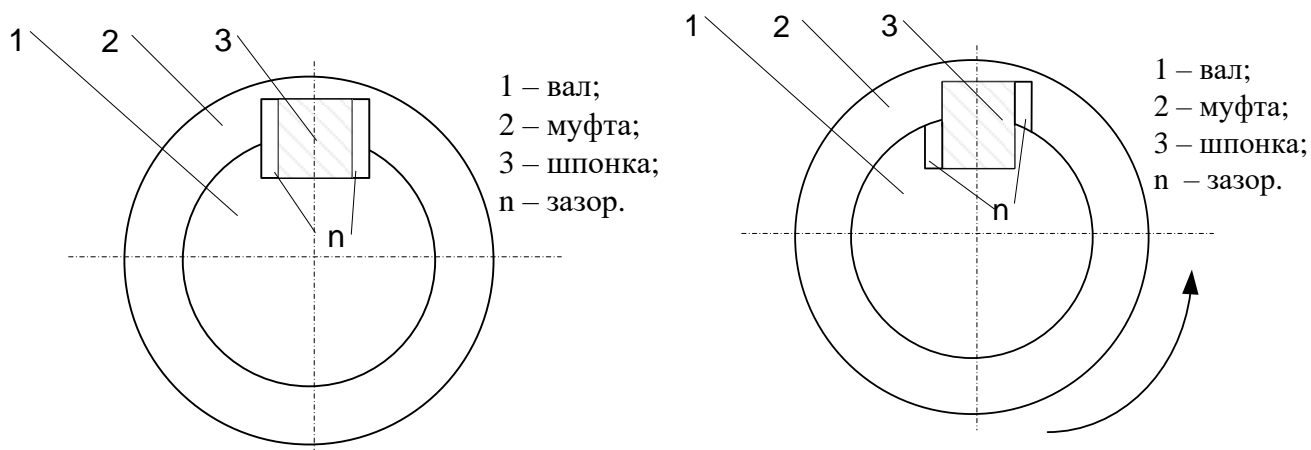


Рис. 24 Зона нечувствительности на примере соединения муфты с валом посредством шпонки

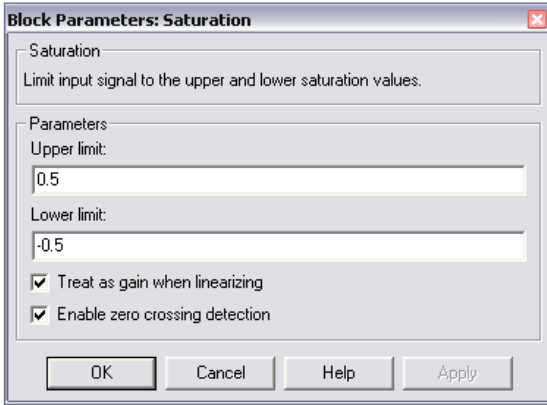
Зона насыщения обнаруживается в том, что при увеличении тока в приводе управляющего органа сверх некоторого значения $i=b$ скорость перемещения управляющего органа остаётся постоянной; также и для гидравлического двигателя, когда окна золотника полностью открыты.

Стоит отметить, что все модели реальных систем – нелинейные. Это легко понять хотя бы потому, что всегда есть предельно допустимое значение входного сигнала – при его превышении объект может просто выйти из строя или даже разрушиться (линейность нарушается). Чаще всего сначала проводят линеаризацию нелинейной модели объекта (привода), то есть строят приближённую линейную модель. Затем на основе этой модели проектируют закон управления, применяя точные методы теории линейных систем.

В программном пакете MATLAB нелинейные зависимости реализуются соответствующими блоками библиотеки Discontinuities (блоки нелинейных элементов). Рассмотрим некоторые из них.

Ограничитель, назначение: выполняет ограничение величины сигнала.

Окно задания параметров:



Параметры блока:

Upper limit – верхний порог ограничения;

Lower limit – нижний порог ограничения;

Treat as gain when linearizing – трактовать как усилитель при линеаризации. При выполнении линеаризации блок заменяется усилителем с коэффициентом передачи, равным единице.

Enable zero crossing detection – фиксировать прохождение сигнала через нулевой уровень.

Выходной сигнал блока равен входному, если его величина не выходит за порог ограничения. По достижении входным сигналом уровня ограничения выходной сигнал блока перестаёт изменяться и остаётся равным порогу.

Рисунок 25 демонстрирует работу блока с синусоидальным сигналом.

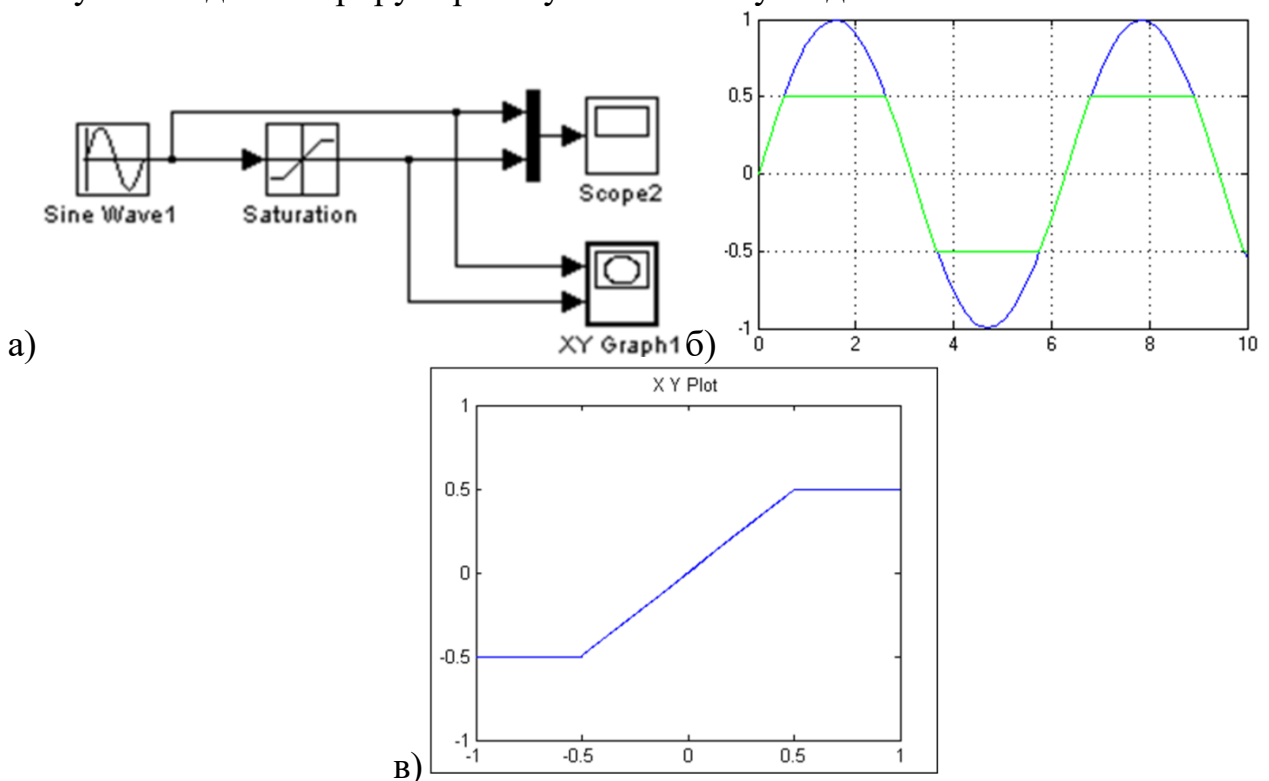
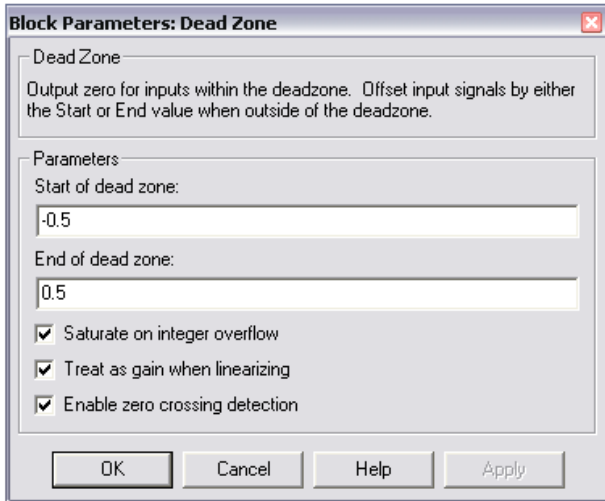


Рис.25 Работа блока Saturation (ограничитель): а – схема реализации нелинейности типа «зона насыщения»; б – временные диаграммы сигналов; в – зависимость выходного сигнала блока от входного.

Зона нечувствительности, назначение: реализует нелинейную зависимость типа «зона нечувствительности». Окно задания параметров:



Параметры блока:

Start of dead zone – начало зоны нечувствительности (нижний порог);

End of dead zone – конец зоны нечувствительности (верхний порог);

Saturate on integer overflow – подавлять переполнение целого. При выставленном флажке ограничение сигналов целого типа выполняется корректно.

Enable zero crossing detection – фиксировать прохождение сигнала через нулевой уровень.

Treat as gain when linearizing – трактовать как усилитель при линеаризации. При выполнении линеаризации блок заменяется усилителем с коэффициентом передачи, равным единице.

Выходной сигнал блока вычисляется в соответствии со следующим алгоритмом:

- если величина входного сигнала находится в пределах зоны нечувствительности, то выходной сигнал блока равен нулю;
- если входной сигнал больше или равен верхнему входному порогу зоны нечувствительности, то выходной сигнал равен входному минус величина порога;
- если входной сигнал меньше или равен нижнему входному порогу зоны нечувствительности, то выходной сигнал равен входному плюс величина порога.

Рисунок 26 демонстрирует работу блока с синусоидальным сигналом.

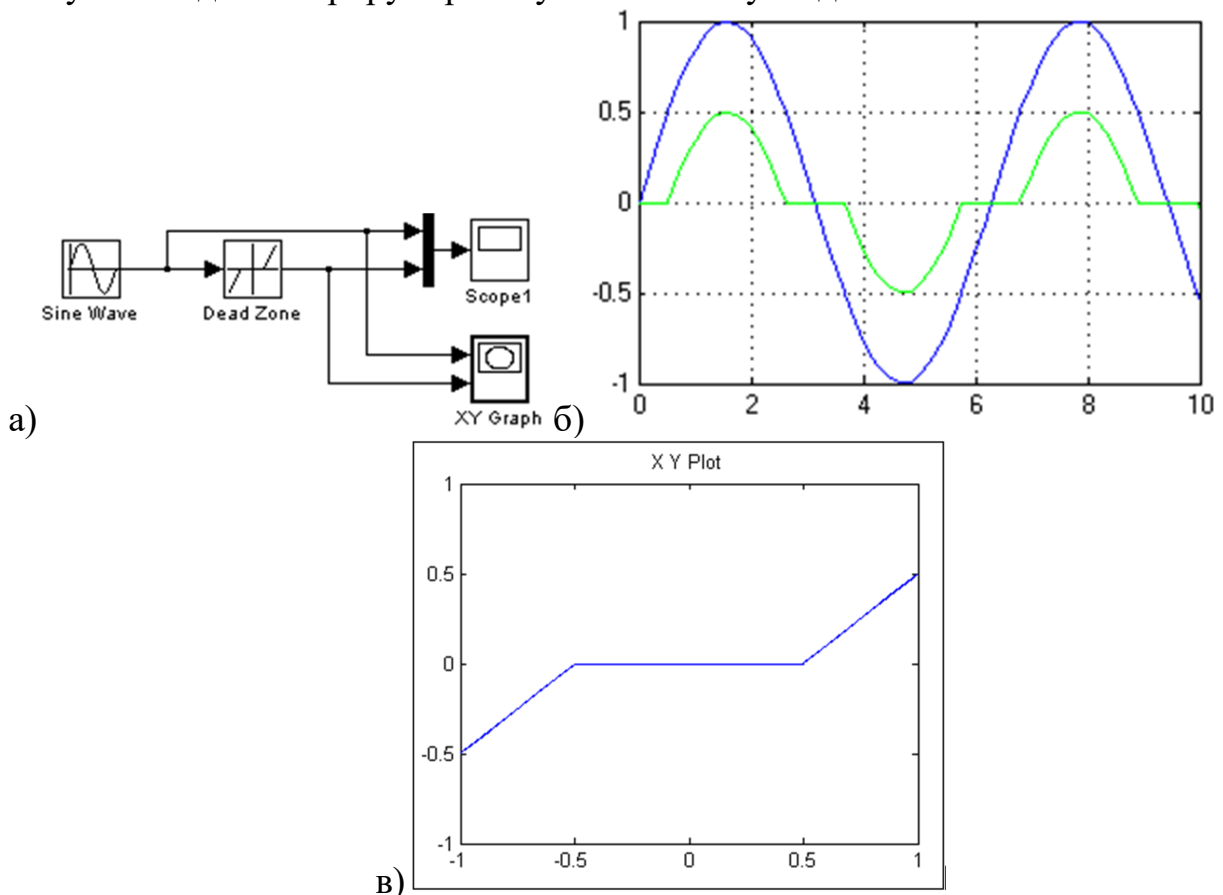


Рис.26 Работа блока Dead Zone (зона нечувствительности): а – схема реализации нелинейности типа «зона нечувствительности»; б – временные диаграммы сигналов; в – зависимость выходного сигнала блока от входного.

Последовательное соединение двух блоков даст результат, изображённый на рисунке 27.

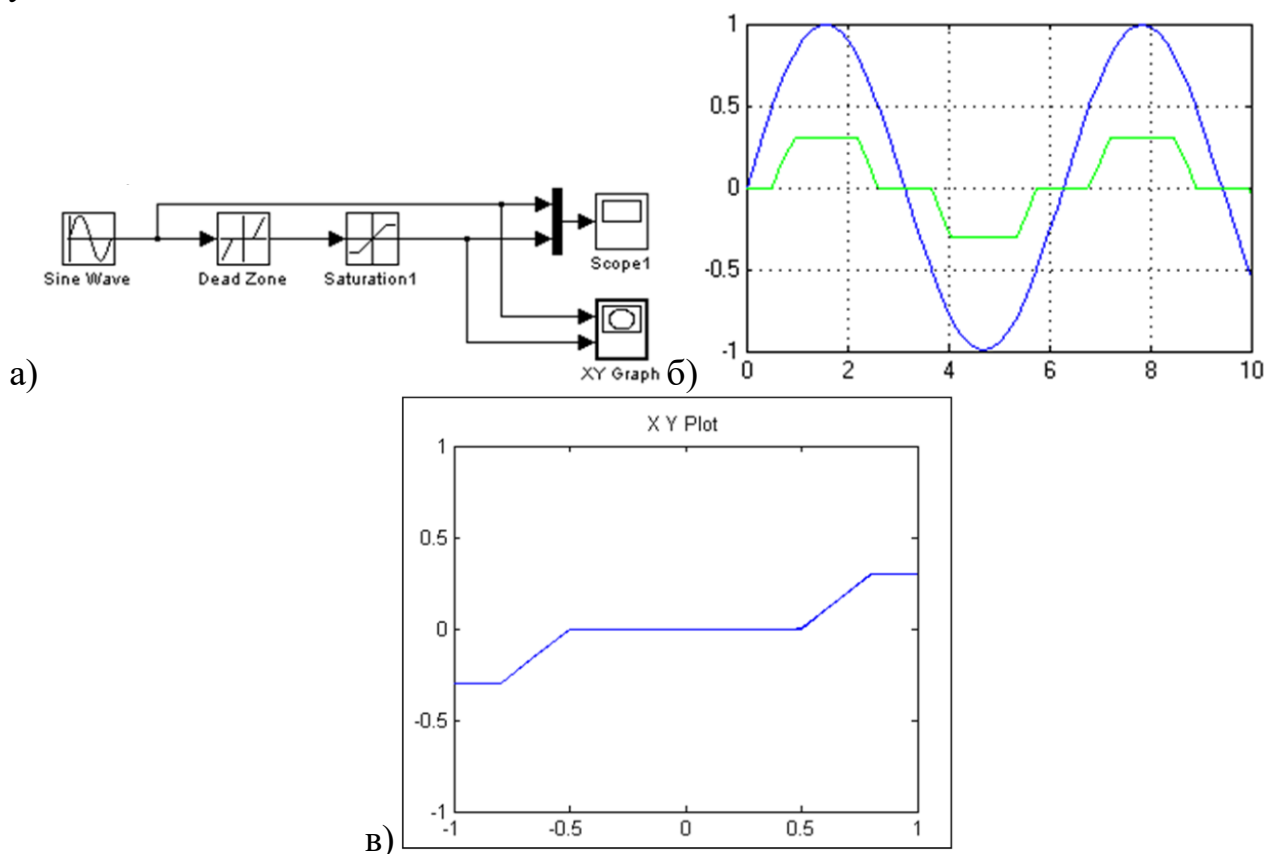


Рис.27 Работа блоков Dead Zone и Saturation, соединённых последовательно: а – схема соединения; б – временные диаграммы сигналов; в – зависимость выходного сигнала блока от входного.

Пример выполнения работы:

Исходные данные представлены в табл.3.

Таблица 4 – Исходные данные

Параметр	k_0	T, c	$t_{уст}, c$	ξ	$\sigma, \% \leq$
Значение	2	0,4	1,5	0,7	10

Передаточная функция исследуемого ОУ имеет вид (см. лаб. 1.1):

$$W(p) = \frac{k_0}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1}$$

1. Изучение влияния параметров нелинейности на САУ (рис. 28).

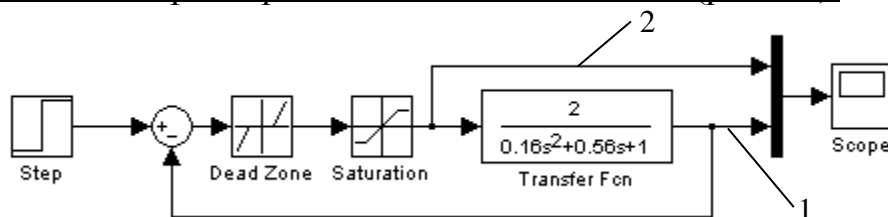


Рис.28 Блочная-модель САУ с нелинейностью

При ширине зоны нечувствительности $n=0,5$ и ограничителе $b=0,3$ получаем следующие результаты (рис. 29):

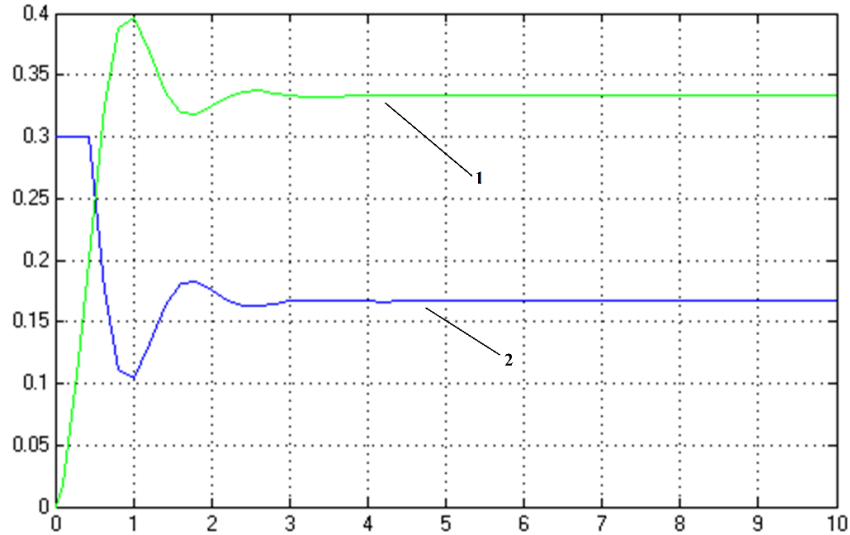


Рис.29 Характеристика переходного процесса при $n=0,5$ и $b=0,3$,

2. исследование САУ с ПИД-регулятором и подбор оптимальных коэффициентов регулирования (рис. 30).

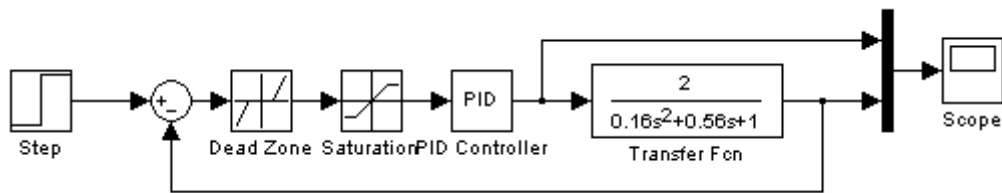


Рис.30 Блочная-модель системы с ПИД-регулятором

Подбор оптимальных коэффициентов осуществляется с помощью блока **CSRC**.
 Переходный процесс системы удовлетворяет заданным параметрам регулирования при $k_P=9,1199$; $k_I=1,9305$; $k_D=1,6925$ (рис. 31).

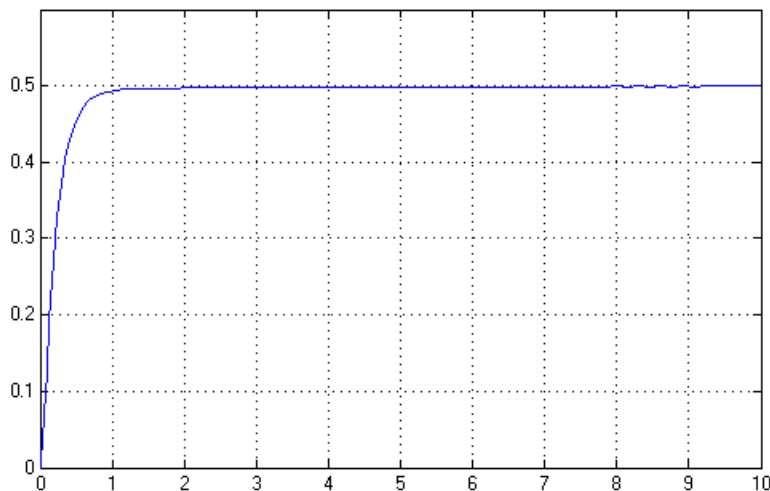


Рис.31 Характеристика САУ с подобранными коэффициентами регулирования

Таким образом, используя программные средства пакета MATLAB, были подобраны оптимальные динамические параметры передаточной характеристики нелинейной САУ, удовлетворяющие заданным условиям.

Порядок и методика выполнения работы:

1. При исследовании рассмотренного *способа коррекции динамических свойств САУ* в качестве исходных данных выступают передаточная функция $W(p)$ неизменяемой части системы вида:

$$W(p) = \frac{K_0}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1}.$$

Постоянные коэффициенты для которой берутся по вариантам из табл.4.

Задающее воздействие $g(t) = 1(t)$.

2. В процессе выполнения данной части работы студенты должны:

2.1) ознакомиться с основными видами нелинейностей САУ;

2.2) исследовать влияние параметров нелинейностей на качество САУ и вид выходного сигнала;

2.3) найти с помощью CSRC-блока пакета MATLAB оптимальные коэффициенты регулирования k_p , k_i , k_d ;

2.4) выполнить проверку полученных значений применительно к своей математической модели САУ;

2.5) поменять местами блоки отвечающие за зону нечувствительности и насыщения, получить характеристики переходного процесса без и с ПИД-регулятором;

2.6) Сделать выводы по результату сравнения поведения системы при различных положениях блоков нелинейности.

3. Сделать вывод о проделанной работе и её результатах.

Таблица 5

<i>№ вар.</i> <i>Параметры</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
<i>K₀</i>	2,5	3,4	4,3	5,4	6,5	7,6	8,7	9,8	3,6	5,2	7,1
<i>T, с</i>	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,5	0,6	0,3
<i>ξ</i>	0,26	0,37	0,48	0,18	0,27	0,39	0,15	0,24	0,36	0,5	0,35
<i>t_{уст}, с ≤</i>	0,3	0,5	0,2	0,5	0,3	0,5	0,1	0,4	0,5	0,3	0,2
<i>σ, % ≤</i>	0	2	2	4	5	1	0	0	5	3	0

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчет должен содержать следующие разделы:

1. Цель работы.

2. Задание на выполнение работы;

3. Необходимая краткая теория;

4. Структурные схемы исследуемых систем.

5. Полученные графики и характеристики.

6. Расчётная часть.

7. Основные выводы, включающее анализ проведённой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения / Дьяконов В. П. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 768 с. – (Серия «Полное руководство пользователя»).
2. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. к. т. н. В. Г. Потёмкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.-496 с.
3. Власов, К.П. Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета / К.П. Власов. – М. : Гуманитарный центр, 2013. – 540 с.
4. Юревич, Е. И. Теория автоматического управления : учебник для вузов / Е. И. Юревич. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2016. – 560 с.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования - М.: Наука, 1975.
6. Теория автоматического управления. Нелинейные системы [Электронный ресурс] : учебное пособие / И.В. Лазута, В.С. Щербаков ;кафедра «Автоматизация производственных процессов и электротехника». – Электрон. дан. – Омск : СибАДИ, 2017