Оглавление

[**1.** **По уставке. Код только с ПИД регулятором (коэффициенты вручную)** 2](#_Toc190759849)

[**2.** **По уставке. Код с ПИД регулятором, шумами без фильтра. Время переходного процесса считается только по уставке по усреднённому значению. (коэффициенты вручную)** 5](#_Toc190759850)

[**2.1. По уставке. Перебор коэффициентов. Код с ПИД регулятором, шумами без фильтра.** 7](#_Toc190759851)

[**3.** **По возмущению. Код с ПИД регулятором, шумами без фильтра. Время переходного процесса считается только по уставке по усреднённому значению. (коэффициенты вручную)** 11](#_Toc190759852)

[**3.1. По возмущению. Перебор коэффициентов. Код с ПИД регулятором, шумами без фильтра.** Тут нужно сделать перебор по возмущению 14](#_Toc190759853)

[**4.** **По уставке. Код с ПИД регулятором и фильтром Д (коэффициенты вручную), без шумов** 17](#_Toc190759854)

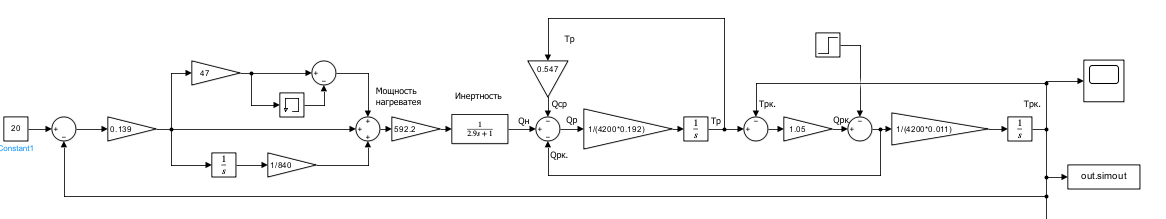
[**4.1** **По уставке. Код с ПИД регулятором и фильтром Д (коэффициенты вручную) с шумами** 19](#_Toc190759855)

[**Не актуальное. ПИД регулятор с фильтром и шумами. Моделирование сигнала 7 раз и усреднение.** 20](#_Toc190759856)

[**Не актуальное. Сигнал с подсчётом времени переходного процесса и перерегулирования. Пробная версия кода** 22](#_Toc190759857)

[**Не актуальное. Вывод и усреднение времени каждого переходного процесса. Идея была уменьшить время моделирования. Сравнить сумму времени переходного процесса и вывод. Надо доделать.** 26](#_Toc190759858)

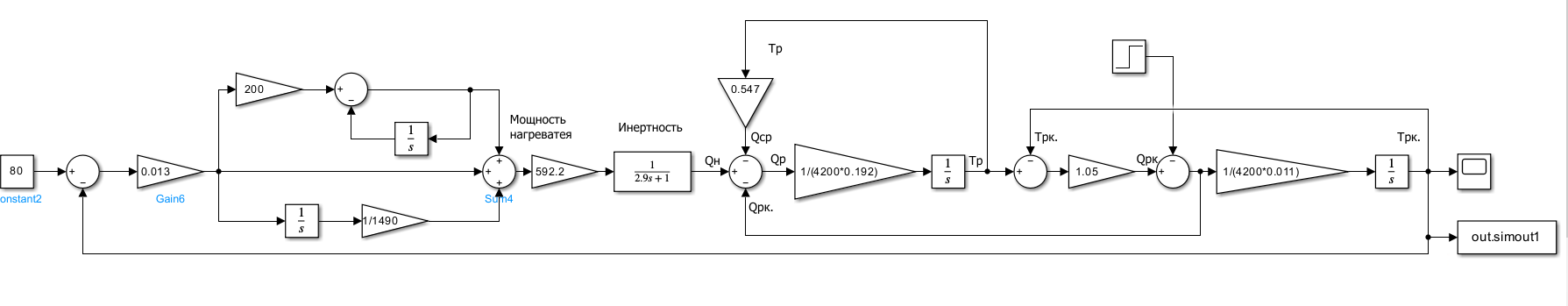
**Схема с ПИД регулятором:**



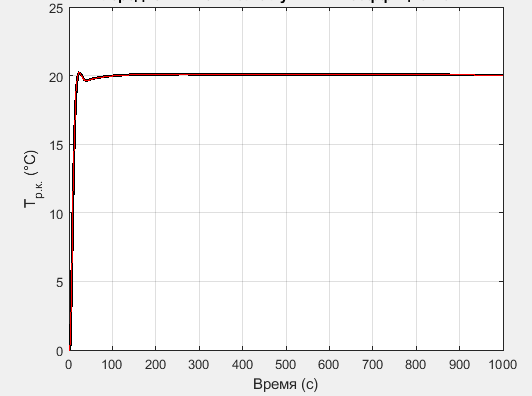
# **По уставке. Код только с ПИД регулятором (коэффициенты вручную)**

|  |
| --- |
| function PI\_regulator\_ustavka\_nonauto()  tic  % Время моделирования  t\_total = 2000; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага    % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 20; % Уставка — желаемая температура    % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры и теплота    % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T];  B = [0; 0; k/T];    % Параметры для стабилизации    steady\_state\_criteria = 0.02; % Критерий ±2% от уставки  % Счетчик для проверки условия установившегося значения  derivative\_count = 0;  duration\_threshold = 500; % Продолжительность для проверки    % Параметры поиска лучших коэффициентов  best\_time = Inf; % Лучшее время переходного процесса  best\_Kp = 0;  best\_Ti = 0;  best\_Td = 0;  best\_overshoot = Inf; % Лучшее перерегулирование  best\_Tmax = Inf;    % Параметры для поиска  Kp = 0.139;  Ti = 840;  Td = 47;    % Генерация сигналов 7 раз и их обработка  num\_experiment = 1; % Количество экспериментов  summed\_signal = zeros(1, N); % Сумма отфильтрованных сигналов  average\_summed\_signal = zeros(1, N); % Усреднённый отфильтрованный сигнал  for trial = 1:num\_experiment  transition\_time = NaN; % Время переходного процесса  error\_integral = 0; % Интеграл ошибки  previous\_error = 0; % Предыдущее значение ошибки  u = ones(1, N); % Управляющее воздействие  noisy\_signal = zeros(1, N); % Сигнал с шумами  % Моделирование системы  for i = 1:N-1  error = setpoint - x(1,i); % Вычисляем ошибку (разница между уставкой и текущей температурой)  error\_integral = error\_integral + error \* h; % Интегрируем ошибку  error\_derivative = (error - previous\_error) / h; % Дифференциальная ошибка  previous\_error = error;  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Td \* error\_derivative); % ПИД-регулятор  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i)) \* h + x(:,i); % Дискретное моделирование    % Добавляем шум в температуру рабочей камеры  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*0); % Генерация шума в пределах ±3%  noisy\_signal(i+1) = x(1,i+1) + noise;  end  summed\_signal = summed\_signal + noisy\_signal; % Добавление текущего отфильтрованного сигнала в общую сумму  end    average\_summed\_signal = summed\_signal / num\_experiment; % Усреднение отфильтрованного сигнала  for i = 1:N  % Проверка установившегося состояния  if isnan(transition\_time)  % Рассчитываем отклонение от уставки  deviation = abs(average\_summed\_signal(i) - setpoint);  relative\_deviation = deviation / abs(setpoint);    % Проверка на отклонение в пределах 2% от уставки  deviation\_met = relative\_deviation <= steady\_state\_criteria;    % Если отклонение соответствует критерию, увеличиваем счётчик  if deviation\_met  derivative\_count = derivative\_count + 1;  % Если сигнал удерживается в пределах отклонения 1000 секунд  if derivative\_count >= duration\_threshold  transition\_time = t(i) - duration\_threshold; % Фиксируем время переходного процесса  end  else  derivative\_count = 0; % Сброс счётчика при выходе за пределы отклонения  end  end  end  % Расчет перерегулирования  Tmax = max(average\_summed\_signal(1,:));  A2 = Tmax - setpoint; % Максимальное отклонение от уставки  overshoot\_ratio = (A2 / setpoint) \* 100; % Перерегулирование в процентах  if overshoot\_ratio >= 4  fprintf('Система не сбалансировалась\n');  fprintf('overshoot\_ratio: %.2f\n', overshoot\_ratio);  else  % Вывод коэффициентов, времени переходного процесса и перерегулирования  fprintf('Время переходного процесса: %.2f секунд\n', transition\_time);  fprintf('Лучший Kp: %.4f\n', Kp);  fprintf('Лучший Ti: %.2f\n', Ti);  fprintf('Лучший Td: %.2f\n', Td);  fprintf('Tmax: %.4f\n', Tmax);  fprintf('Перерегулирование: %.4f%%\n', overshoot\_ratio);    % % Получение информации о переходном процессе через stepinfo  % info = stepinfo(x(1,:), t); % Здесь x(1,:) - это выходная величина, а t - время  % % Вывод информации о переходном процессе  % fprintf('Время переходного процесса (stepinfo): %.2f секунд\n', info.SettlingTime);    % Построение графика усреднённого сигнала  figure;  plot(t, average\_summed\_signal, 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Average Signal');  title('Усреднённый сигнал с лучшими коэффициентами');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  grid on;  end  toc  end |

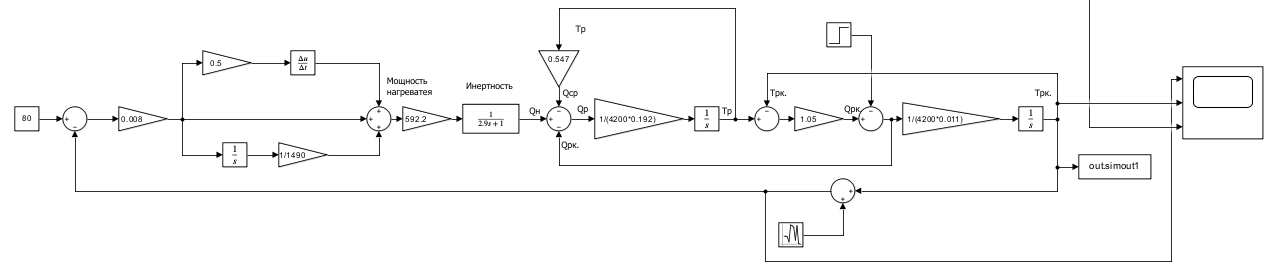
Схема с Д составляющей без шумов и фильтра



Сравнение графиков с Simulink и скрипта

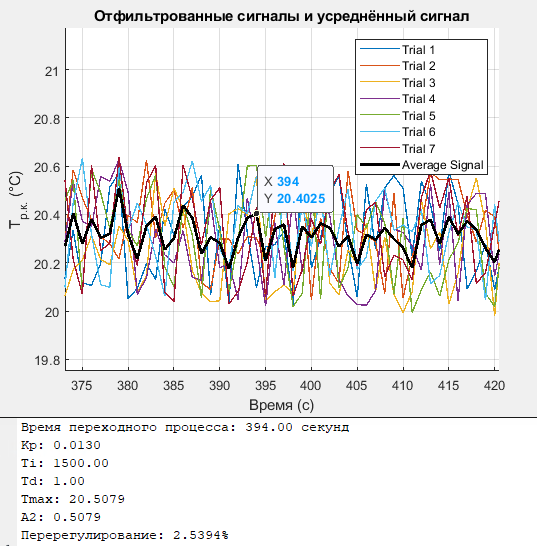
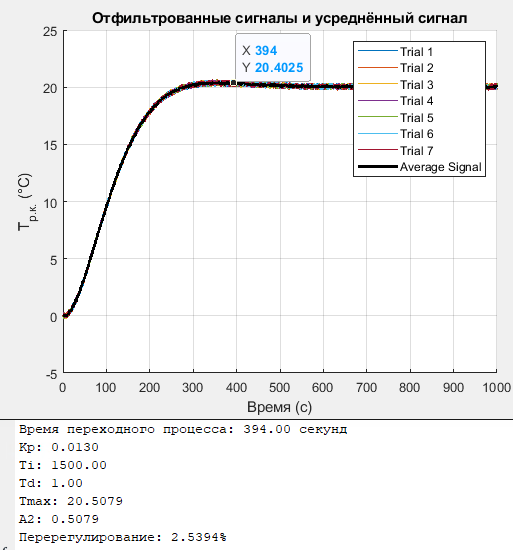


**Схема с шумами:**



# **По уставке. Код с ПИД регулятором, шумами без фильтра. Время переходного процесса считается только по уставке по усреднённому значению. (коэффициенты вручную)**

|  |
| --- |
| function PI\_regulator\_ustavka\_nonauto()  % Время моделирования  t\_total = 1000; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага  % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 20; % Уставка — желаемая температура  % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры и теплота  % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T];  B = [0; 0; k/T];  % Параметры для стабилизации  transition\_time = NaN; % Время переходного процесса  steady\_state\_criteria = 0.02; % Критерий ±2% от уставки  % Счетчик для проверки условия установившегося значения  derivative\_count = 0;  duration\_threshold = 500; % Продолжительность для проверки  % Переменные для усреднения  average\_summed\_signal = zeros(1, N); % Усреднённый отфильтрованный сигнал  summed\_signal = zeros(1, N); % Сумма отфильтрованных сигналов  % Генерация сигналов 7 раз и их обработка  num\_experiment = 7; % Количество экспериментов    figure;  hold on;  for trial = 1:num\_experiment  % Параметры для поиска  Kp = 0.013; % Значение параметар Kp  Ti = 1500; % Значение параметар Ti  Td = 1; % Дифференциальное время    error\_integral = 0; % Интеграл ошибки  previous\_error = 0; % Предыдущее значение ошибки  u = ones(1, N); % Управляющее воздействие  noisy\_signal = zeros(1, N); % Сигнал с шумами  % Моделирование системы  for i = 1:N-1  error = setpoint - x(1,i); % Вычисляем ошибку (разница между уставкой и текущей температурой)  error\_integral = error\_integral + error \* h; % Интегрируем ошибку  error\_derivative = (error - previous\_error) / h; % Дифференциальная ошибка  previous\_error = error;  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Td \* error\_derivative); % ПИД-регулятор  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i)) \* h + x(:,i); % Дискретное моделирование  % Добавляем шум в температуру рабочей камеры  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*setpoint); % Генерация шума в пределах ±3%  noisy\_signal(i+1) = x(1,i+1) + noise;  end    summed\_signal = summed\_signal + noisy\_signal; % Добавление текущего отфильтрованного сигнала в общую сумму  plot(t, noisy\_signal, 'LineWidth', 1, 'DisplayName', ['Trial ' num2str(trial)]); % Построение графика для текущего эксперимента  end  average\_summed\_signal = summed\_signal / num\_experiment; % Усреднение отфильтрованного сигнала  % Проверка установившегося состояния  for i = 1:N  if isnan(transition\_time)  % Рассчитываем отклонение от уставки  deviation = abs(average\_summed\_signal(i) - setpoint);  relative\_deviation = deviation / abs(setpoint);  % Проверка на отклонение в пределах 2% от уставки  deviation\_met = relative\_deviation <= steady\_state\_criteria;  % Если отклонение соответствует критерию, увеличиваем счётчик  if deviation\_met  derivative\_count = derivative\_count + 1;  % Если сигнал удерживается в пределах отклонения 1000 секунд  if derivative\_count >= duration\_threshold  transition\_time = t(i) - duration\_threshold; % Фиксируем время переходного процесса  end  else  derivative\_count = 0; % Сброс счётчика при выходе за пределы отклонения  end  end  end  % Расчет перерегулирования  Tmax = max(average\_summed\_signal(1,:));  A2 = Tmax - setpoint; % Максимальное отклонение от уставки  overshoot\_ratio = (A2 / setpoint) \* 100; % Перерегулирование в процентах  if overshoot\_ratio >= 4  fprintf('Система не сбалансировалась\n');  else  % Вывод коэффициентов, времени переходного процесса и перерегулирования  fprintf('Время переходного процесса: %.2f секунд\n', transition\_time);  fprintf('Kp: %.4f\n', Kp);  fprintf('Ti: %.2f\n', Ti);  fprintf('Td: %.2f\n', Td);  fprintf('Tmax: %.4f\n', Tmax);  fprintf('A2: %.4f\n', A2);  fprintf('Перерегулирование: %.4f%%\n', overshoot\_ratio);  % % Получение информации о переходном процессе через stepinfo  % info = stepinfo(x(1,:), t); % Здесь x(1,:) - это выходная величина, а t - время  % % Вывод информации о переходном процессе  % fprintf('Время переходного процесса (stepinfo): %.2f секунд\n', info.SettlingTime);  % Построение графика усреднённого сигнала  plot(t, average\_summed\_signal, 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Average Signal');  title('Отфильтрованные сигналы и усреднённый сигнал');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  legend;  grid on;  end  end |



# **2.1. По уставке. Перебор коэффициентов. Код с ПИД регулятором, шумами без фильтра.**

|  |
| --- |
| function PI\_regulator\_ustavka\_nonauto()  tic  % Время моделирования  t\_total = 1000; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага    % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 20; % Уставка — желаемая температура    % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры и теплота    % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T];  B = [0; 0; k/T];    % Параметры для стабилизации  steady\_state\_criteria = 0.02; % Критерий ±2% от уставки  % Счетчик для проверки условия установившегося значения  derivative\_count = 0;  duration\_threshold = 500; % Продолжительность для проверки    % Параметры поиска лучших коэффициентов  best\_time = Inf; % Лучшее время переходного процесса  best\_Kp = 0;  best\_Ti = 0;  best\_Td = 0;  best\_overshoot = Inf; % Лучшее перерегулирование  best\_Tmax = Inf;    % Параметры для поиска  Kp\_values = 0.1:0.001:0.3; % Диапазон значений Kp  Ti\_values = 700:1:900; % Диапазон значений Ti  Td\_values = 30:1:60; % Диапазон значений Td    % Генерация сигналов 7 раз и их обработка  num\_experiment = 7; % Количество экспериментов    % Начало цикла перебора коэффициентов  for Kp = Kp\_values  for Ti = Ti\_values  for Td = Td\_values  summed\_signal = zeros(1, N); % Сумма отфильтрованных сигналов  average\_summed\_signal = zeros(1, N); % Усреднённый отфильтрованный сигнал  for trial = 1:num\_experiment  transition\_time = NaN; % Время переходного процесса  error\_integral = 0; % Интеграл ошибки  previous\_error = 0; % Предыдущее значение ошибки  u = ones(1, N); % Управляющее воздействие  noisy\_signal = zeros(1, N); % Сигнал с шумами  % Моделирование системы  for i = 1:N-1  error = setpoint - x(1,i); % Вычисляем ошибку (разница между уставкой и текущей температурой)  error\_integral = error\_integral + error \* h; % Интегрируем ошибку  error\_derivative = (error - previous\_error) / h; % Дифференциальная ошибка  previous\_error = error;  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Td \* error\_derivative); % ПИД-регулятор  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i)) \* h + x(:,i); % Дискретное моделирование    % Добавляем шум в температуру рабочей камеры  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*setpoint); % Генерация шума в пределах ±3%  noisy\_signal(i+1) = x(1,i+1) + noise;  end  summed\_signal = summed\_signal + noisy\_signal; % Добавление текущего отфильтрованного сигнала в общую сумму  end    average\_summed\_signal = summed\_signal / num\_experiment; % Усреднение отфильтрованного сигнала  for i = 1:N  % Проверка установившегося состояния  if isnan(transition\_time)  % Рассчитываем отклонение от уставки  deviation = abs(average\_summed\_signal(i) - setpoint);  relative\_deviation = deviation / abs(setpoint);    % Проверка на отклонение в пределах 2% от уставки  deviation\_met = relative\_deviation <= steady\_state\_criteria;    % Если отклонение соответствует критерию, увеличиваем счётчик  if deviation\_met  derivative\_count = derivative\_count + 1;  % Если сигнал удерживается в пределах отклонения 1000 секунд  if derivative\_count >= duration\_threshold  transition\_time = t(i) - duration\_threshold; % Фиксируем время переходного процесса  end  else  derivative\_count = 0; % Сброс счётчика при выходе за пределы отклонения  end  end  end  % Расчет перерегулирования  Tmax = max(average\_summed\_signal(1,:));  A2 = Tmax - setpoint; % Максимальное отклонение от уставки  overshoot\_ratio = (A2 / setpoint) \* 100; % Перерегулирование в процентах  % Обновление наилучших параметров, если найдено меньшее время переходного процесса  if ~isnan(transition\_time) && transition\_time < best\_time && overshoot\_ratio <= 4  best\_time = transition\_time;  best\_Kp = Kp;  best\_Ti = Ti;  best\_Td = Td;  best\_overshoot = overshoot\_ratio;  best\_Tmax = Tmax;  best\_response = average\_summed\_signal(1,:); % Сохраняем ответ для построения графика  end  end  end  end  if best\_overshoot >= 4  fprintf('Система не сбалансировалась\n');  fprintf('overshoot\_ratio: %.2f\n', overshoot\_ratio);  fprintf('best\_overshoot: %.2f\n', best\_overshoot);  else  % Вывод коэффициентов, времени переходного процесса и перерегулирования  fprintf('Время переходного процесса: %.2f секунд\n', transition\_time);  fprintf('Лучший Kp: %.4f\n', best\_Kp);  fprintf('Лучший Ti: %.2f\n', best\_Ti);  fprintf('Лучший Td: %.2f\n', best\_Td);  fprintf('Tmax: %.4f\n', best\_Tmax);  fprintf('Перерегулирование: %.4f%%\n', best\_overshoot);    % % Получение информации о переходном процессе через stepinfo  % info = stepinfo(x(1,:), t); % Здесь x(1,:) - это выходная величина, а t - время  % % Вывод информации о переходном процессе  % fprintf('Время переходного процесса (stepinfo): %.2f секунд\n', info.SettlingTime);    % Построение графика усреднённого сигнала  figure;  plot(t, best\_response, 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Average Signal');  title('Усреднённый сигнал с лучшими коэффициентами');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  grid on;  end  toc  end |

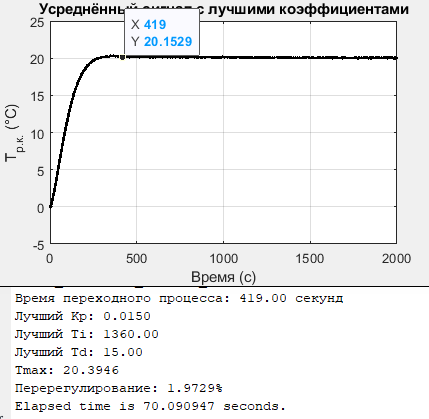
**Эксперимент 1:**

% Параметры для поиска

Kp\_values = 0.001:0.001:0.015; % Диапазон значений Kp

Ti\_values = 1000:5:1500; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 0:5:50; % Диапазон значений Td



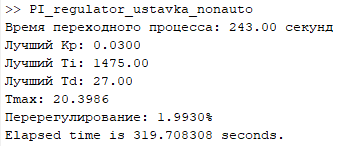
**Эксперимент 2:**

% Параметры для поиска

Kp\_values = 0.015:0.001:0.03; % Диапазон значений Kp

Ti\_values = 1000:5:1500; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 0:1:50; % Диапазон значений Td



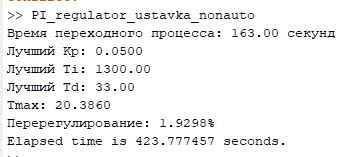
**Эксперимент 3:**

% Параметры для поиска

Kp\_values = 0.025:0.001:0.05; % Диапазон значений Kp

Ti\_values = 1300:5:1700; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 0:1:50; % Диапазон значений Td



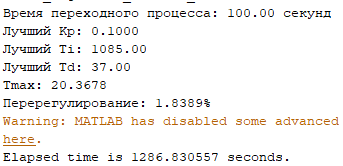
**Эксперимент 4:**

% Параметры для поиска

Kp\_values = 0.045:0.001:0.1; % Диапазон значений Kp

Ti\_values = 1000:5:1700; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 10:1:50; % Диапазон значений Td



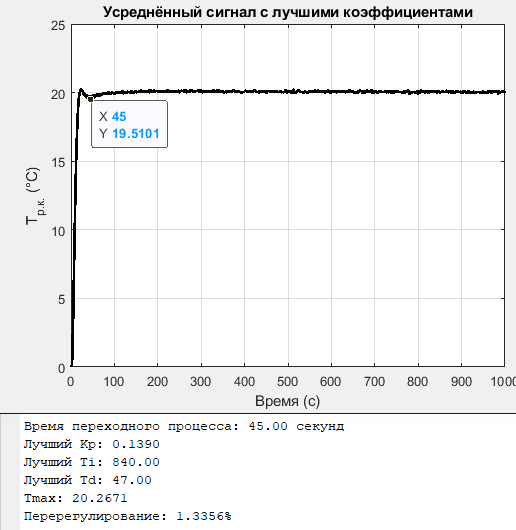
**Эксперимент 5: с наилучшими результатами**

% Параметры для поиска

Kp\_values = 0.01:0.001:0.5; % Диапазон значений Kp

Ti\_values = 700:5:1200; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 20:1:70; % Диапазон значений Td



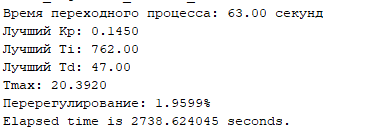
**Эксперимент 6: уточнёнными наилучшими результатами**

% Параметры для поиска

Kp\_values = 0.1:0.001:0.3; % Диапазон значений Kp

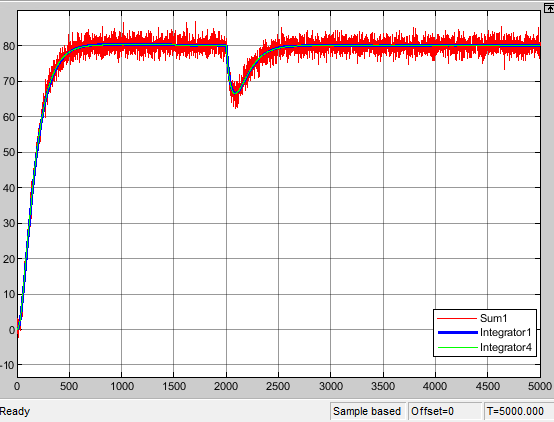
Ti\_values = 700:1:900; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 30:1:60; % Диапазон значений Td



# **По возмущению. Код с ПИД регулятором, шумами без фильтра. Время переходного процесса считается только по уставке по усреднённому значению. (коэффициенты вручную)**

|  |
| --- |
| function PI\_regulator\_ustavka\_nonauto()  tic  % Время моделирования  t\_total = 3000; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага    % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 0; % Уставка — желаемая температура    % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры и теплота    % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T];  B = [0; 0; k/T];    F = [-1/(c\*mp\_k); 1/(c\*mp); 0];    % Возмущение: изменение температуры окружающей среды  f = zeros(1, N);  start\_disturbance = 500;  f(start\_disturbance:end) = 2000;  % Параметры для стабилизации  steady\_state\_criteria = 0.04; % Критерий ±2% от уставки  % Счетчик для проверки условия установившегося значения  derivative\_count = 0;  duration\_threshold = 100; % Продолжительность для проверки    % Параметры для поиска  Kp = 0.545;  Ti = 1000;  Td = 4;    % Генерация сигналов 7 раз и их обработка  num\_experiment = 7; % Количество экспериментов  figure;  hold on;  summed\_signal = zeros(1, N); % Сумма отфильтрованных сигналов  average\_summed\_signal = zeros(1, N); % Усреднённый отфильтрованный сигнал  for trial = 1:num\_experiment  % Параметры для поиска  Kp = 0.145;  Ti = 1500;  Td = 40;    transition\_time = NaN; % Время переходного процесса  error\_integral = 0; % Интеграл ошибки  previous\_error = 0; % Предыдущее значение ошибки  u = ones(1, N); % Управляющее воздействие  noisy\_signal = zeros(1, N); % Сигнал с шумами  % Моделирование системы  for i = 1:N-1  error = setpoint - x(1,i); % Вычисляем ошибку (разница между уставкой и текущей температурой)  error\_integral = error\_integral + error \* h; % Интегрируем ошибку  error\_derivative = (error - previous\_error) / h; % Дифференциальная ошибка  previous\_error = error;  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Td \* error\_derivative); % ПИД-регулятор  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i) + F\*f(i)) \* h + x(:,i); % Дискретное моделирование с учётом возмущения  % Добавляем шум в температуру рабочей камеры  if setpoint == 0  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*20); % Генерация шума в пределах ±3%  else  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*setpoint); % Генерация шума в пределах ±3%  end  noisy\_signal(i+1) = x(1,i+1) + noise;  end  summed\_signal = summed\_signal + noisy\_signal; % Добавление текущего отфильтрованного сигнала в общую сумму  plot(t, noisy\_signal, 'LineWidth', 1, 'DisplayName', ['Trial ' num2str(trial)]); % Построение графика для текущего эксперимента  end  average\_summed\_signal = summed\_signal / num\_experiment; % Усреднение отфильтрованного сигнала  for i = 1:N  % Проверка установившегося состояния  if i >= start\_disturbance && isnan(transition\_time)  % Проверка на отклонение в зависимости от значения уставки  if setpoint == 0  % Если уставка 0, используем абсолютное отклонение  deviation\_met = abs(average\_summed\_signal(i) - setpoint) < steady\_state\_criteria \* 20;  else  % Если уставка не 0, используем относительное отклонение  deviation\_met = abs(average\_summed\_signal(i) - setpoint) < steady\_state\_criteria \* abs(setpoint);  end  % Если отклонение соответствует критерию, увеличиваем счётчик  if deviation\_met  derivative\_count = derivative\_count + 1;  % Если сигнал удерживается в пределах отклонения 1000 секунд  if derivative\_count >= duration\_threshold  transition\_time = t(i) - t(start\_disturbance) - duration\_threshold; % Фиксируем время переходного процесса  end  else  derivative\_count = 0; % Сброс счётчика при выходе за пределы отклонения  end  end  end    % Расчет перерегулирования  Tmax = max(average\_summed\_signal(1, start\_disturbance:end));  Tmin = min(average\_summed\_signal(1, start\_disturbance:end));  A2 = Tmax - setpoint;  A1 = Tmin - setpoint;  overshoot\_ratio = abs(A2 / A1)\*100;  if overshoot\_ratio >= 40  fprintf('Система не сбалансировалась\n');  fprintf('overshoot\_ratio: %.2f\n', overshoot\_ratio);  else  % Вывод коэффициентов, времени переходного процесса и перерегулирования  fprintf('Время переходного процесса: %.2f секунд\n', transition\_time);  fprintf('Лучший Kp: %.4f\n', Kp);  fprintf('Лучший Ti: %.2f\n', Ti);  fprintf('Лучший Td: %.2f\n', Td);  fprintf('Tmax: %.4f\n', Tmax);  fprintf('Tmin: %.4f\n', Tmin);  fprintf('Перерегулирование: %.4f%%\n', overshoot\_ratio);    % % Получение информации о переходном процессе через stepinfo  % info = stepinfo(x(1,:), t); % Здесь x(1,:) - это выходная величина, а t - время  % % Вывод информации о переходном процессе  % fprintf('Время переходного процесса (stepinfo): %.2f секунд\n', info.SettlingTime);    % Построение графика усреднённого сигнала  %figure;  plot(t, average\_summed\_signal, 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Average Signal');  title('Усреднённый сигнал с лучшими коэффициентами');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  grid on;  end  toc  end |



# **3.1. По возмущению. Перебор коэффициентов. Код с ПИД регулятором, шумами без фильтра. Тут нужно сделать перебор по возмущению**

|  |
| --- |
| function PI\_regulator\_ustavka\_nonauto()  tic  % Время моделирования  t\_total = 2000; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага    % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 0; % Уставка — желаемая температура    % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры и теплота    % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T];  B = [0; 0; k/T];    F = [-1/(c\*mp\_k); 1/(c\*mp); 0];    % Возмущение: изменение температуры окружающей среды  f = zeros(1, N);  start\_disturbance = 100;  f(start\_disturbance:end) = 20;  % Параметры для стабилизации  steady\_state\_criteria = 0.02; % Критерий ±2% от уставки  % Счетчик для проверки условия установившегося значения  derivative\_count = 0;  duration\_threshold = 100; % Продолжительность для проверки    % Параметры поиска лучших коэффициентов  best\_time = Inf; % Лучшее время переходного процесса  best\_Kp = 0;  best\_Ti = 0;  best\_Td = 0;  best\_overshoot = Inf; % Лучшее перерегулирование  best\_Tmax = Inf;    % Параметры для поиска  Kp\_values = 0.1:0.001:0.3; % Диапазон значений Kp  Ti\_values = 700:1:900; % Диапазон значений Ti  Td\_values = 30:1:60; % Диапазон значений Td  % Генерация сигналов 7 раз и их обработка  num\_experiment = 7; % Количество экспериментов  % Начало цикла перебора коэффициентов  for Kp = Kp\_values  for Ti = Ti\_values  for Td = Td\_values  summed\_signal = zeros(1, N); % Сумма отфильтрованных сигналов  average\_summed\_signal = zeros(1, N); % Усреднённый отфильтрованный сигнал  for trial = 1:num\_experiment  % Параметры для поиска  transition\_time = NaN; % Время переходного процесса  error\_integral = 0; % Интеграл ошибки  previous\_error = 0; % Предыдущее значение ошибки  u = ones(1, N); % Управляющее воздействие  noisy\_signal = zeros(1, N); % Сигнал с шумами  % Моделирование системы  for i = 1:N-1  error = setpoint - x(1,i); % Вычисляем ошибку (разница между уставкой и текущей температурой)  error\_integral = error\_integral + error \* h; % Интегрируем ошибку  error\_derivative = (error - previous\_error) / h; % Дифференциальная ошибка  previous\_error = error;  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Td \* error\_derivative); % ПИД-регулятор  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i) + F\*f(i)) \* h + x(:,i); % Дискретное моделирование с учётом возмущения  % Добавляем шум в температуру рабочей камеры  if setpoint == 0  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*1); % Генерация шума в пределах ±3%  else  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*setpoint); % Генерация шума в пределах ±3%  end  noisy\_signal(i+1) = x(1,i+1) + noise;  end  summed\_signal = summed\_signal + noisy\_signal; % Добавление текущего отфильтрованного сигнала в общую сумму  plot(t, noisy\_signal, 'LineWidth', 1, 'DisplayName', ['Trial ' num2str(trial)]); % Построение графика для текущего эксперимента  end  average\_summed\_signal = summed\_signal / num\_experiment; % Усреднение отфильтрованного сигнала  for i = 1:N  % Проверка установившегося состояния  if i >= start\_disturbance && isnan(transition\_time)  % Проверка на отклонение в пределах 2% от уставки  %deviation\_met = relative\_deviation <= steady\_state\_criteria;  % Проверка на отклонение в зависимости от значения уставки  if setpoint == 0  % Если уставка 0, используем абсолютное отклонение  deviation\_met = abs(average\_summed\_signal(i)) < steady\_state\_criteria;  else  % Если уставка не 0, используем относительное отклонение  deviation\_met = abs(average\_summed\_signal(i) - setpoint) < steady\_state\_criteria \* abs(setpoint);  end  % Если отклонение соответствует критерию, увеличиваем счётчик  if deviation\_met  derivative\_count = derivative\_count + 1;  % Если сигнал удерживается в пределах отклонения 1000 секунд  if derivative\_count >= duration\_threshold  transition\_time = t(i) - t(start\_disturbance) - duration\_threshold; % Фиксируем время переходного процесса  end  else  derivative\_count = 0; % Сброс счётчика при выходе за пределы отклонения  end  end  end    % Расчет перерегулирования  Tmax = max(average\_summed\_signal(1, start\_disturbance:end));  Tmin = min(average\_summed\_signal(1, start\_disturbance:end));  A2 = Tmax - setpoint;  A1 = Tmin - setpoint;  overshoot\_ratio = abs(A2 / A1)\*100;    % Обновление наилучших параметров, если найдено меньшее время переходного процесса  if ~isnan(transition\_time) && transition\_time < best\_time && overshoot\_ratio <= 4  best\_time = transition\_time;  best\_Kp = Kp;  best\_Ti = Ti;  best\_Td = Td;  best\_overshoot = overshoot\_ratio;  best\_Tmax = Tmax;  best\_Tmin = Tmin;  best\_response = average\_summed\_signal(1,:); % Сохраняем ответ для построения графика  end  end  end  end  if overshoot\_ratio >= 4  fprintf('Система не сбалансировалась\n');  fprintf('overshoot\_ratio: %.2f\n', best\_overshoot);  else  % Вывод коэффициентов, времени переходного процесса и перерегулирования  fprintf('Время переходного процесса: %.2f секунд\n', transition\_time);  fprintf('Лучший Kp: %.4f\n', best\_Kp);  fprintf('Лучший Ti: %.2f\n', best\_Ti);  fprintf('Лучший Td: %.2f\n', best\_Td);  fprintf('Tmax: %.4f\n', best\_Tmax);  fprintf('Tmin: %.4f\n', best\_Tmin);  fprintf('Перерегулирование: %.4f%%\n', best\_overshoot);    % % Получение информации о переходном процессе через stepinfo  % info = stepinfo(x(1,:), t); % Здесь x(1,:) - это выходная величина, а t - время  % % Вывод информации о переходном процессе  % fprintf('Время переходного процесса (stepinfo): %.2f секунд\n', info.SettlingTime);    % Построение графика усреднённого сигнала  figure;  plot(t, best\_response, 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Average Signal');  title('Усреднённый сигнал с лучшими коэффициентами');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  grid on;  end  toc  end |

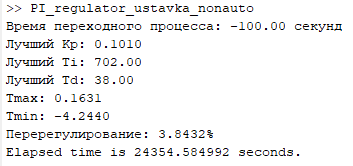
**Эксперимент 1:**

% Параметры для поиска

Kp\_values = 0.1:0.001:0.3; % Диапазон значений Kp

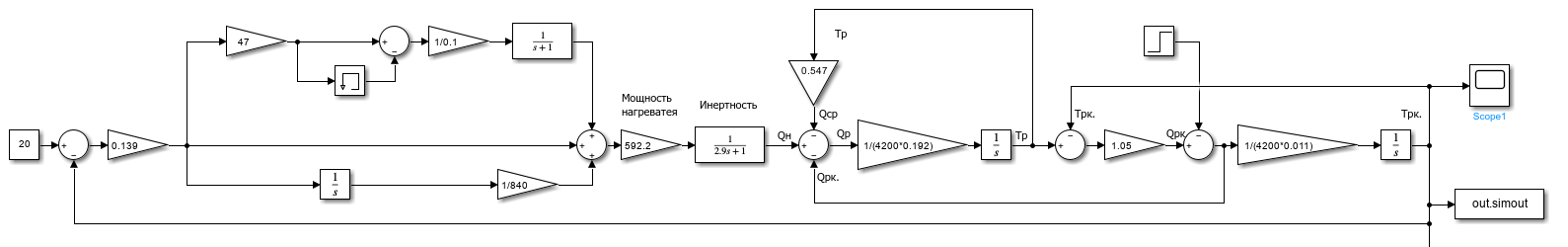
Ti\_values = 700:1:900; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 30:1:60; % Диапазон значений Td



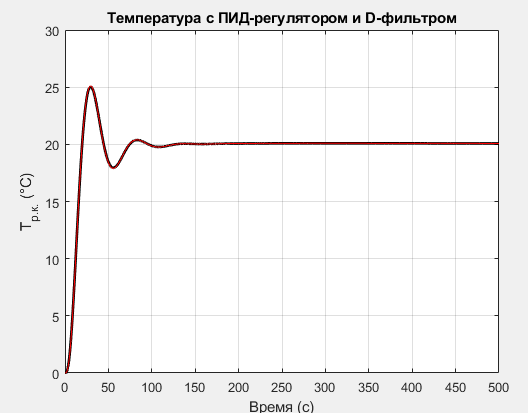
# **По уставке. Код с ПИД регулятором и фильтром Д (коэффициенты вручную), без шумов. Апериодическое звено 1го порядка**

Схема с ПИД регулятором фильтром Д составляющей



|  |
| --- |
| function PI\_regulator\_ustavka\_nonauto()  tic  % Время моделирования  t\_total = 500; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага    % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 20; % Уставка — желаемая температура    % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры и теплота    % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T];  B = [0; 0; k/T];    % Параметры ПИД-регулятора с фильтром D-составляющей  Kp = 0.139;  Ti = 840;  Kd = 47;  Td = 7;    % Переменные для хранения значений  error\_integral = 0; % Интеграл ошибки  previous\_error = 0; % Предыдущее значение ошибки  filtered\_derivative = 0; % Фильтрованная производная    % Управляющее воздействие  u = ones(1, N);    % Моделирование системы  for i = 1:N-1  % Ошибка регулирования  error = setpoint - x(1,i);  error\_integral = error\_integral + error \* h;  error\_derivative = ((error - previous\_error) / h);  previous\_error = error;    % Фильтрация D-составляющей (последовательный фильтр первого порядка)  filtered\_derivative = (Td / (Td + h)) \* filtered\_derivative + (h / (Td + h)) \* error\_derivative;    % Управляющее воздействие (ПИД-регулятор с фильтром)  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Kd \* filtered\_derivative);    % Дискретное моделирование системы  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i)) \* h + x(:,i);  end    % Построение графика  figure;  plot(t, x(1,:), 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Temperature');  title('Температура с ПИД-регулятором и D-фильтром');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  grid on;    toc  end |

Сравнение графиков со схемы и кода



# **. По уставке. Код с ПИД регулятором и фильтром Д (коэффициенты вручную) с шумами. Апериодическое звено 1го порядка**

|  |
| --- |
| function PI\_regulator\_ustavka\_nonauto()  % Время моделирования  t\_total = 1000; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага  % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 20; % Уставка — желаемая температура  % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры и теплота  % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T];  B = [0; 0; k/T];  % Параметры для стабилизации  transition\_time = NaN; % Время переходного процесса  steady\_state\_criteria = 0.02; % Критерий ±2% от уставки  % Счетчик для проверки условия установившегося значения  derivative\_count = 0;  duration\_threshold = 100; % Продолжительность для проверки  % Переменные для усреднения  average\_summed\_signal = zeros(1, N); % Усреднённый отфильтрованный сигнал  summed\_signal = zeros(1, N); % Сумма отфильтрованных сигналов  % Генерация сигналов 7 раз и их обработка  num\_experiment = 7; % Количество экспериментов    %figure;  %hold on;  for trial = 1:num\_experiment  % Параметры для поиска  Kp = 0.139;  Ti = 840;  Kd = 47;  Td = 0.1;  filtered\_derivative = 0; % Фильтрованная производная  error\_integral = 0; % Интеграл ошибки  previous\_error = 0; % Предыдущее значение ошибки  u = ones(1, N); % Управляющее воздействие  noisy\_signal = zeros(1, N); % Сигнал с шумами  % Моделирование системы  for i = 1:N-1  error = setpoint - x(1,i); % Вычисляем ошибку (разница между уставкой и текущей температурой)  error\_integral = error\_integral + error \* h; % Интегрируем ошибку  error\_derivative = (error - previous\_error) / h; % Дифференциальная ошибка  previous\_error = error;  % Фильтрация D-составляющей (последовательный фильтр первого порядка)  filtered\_derivative = (Td / (Td + h)) \* filtered\_derivative + (h / (Td + h)) \* error\_derivative;    % Управляющее воздействие (ПИД-регулятор с фильтром)  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Kd \* filtered\_derivative);  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i)) \* h + x(:,i); % Дискретное моделирование  % Добавляем шум в температуру рабочей камеры  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*setpoint); % Генерация шума в пределах ±3%  noisy\_signal(i+1) = x(1,i+1) + noise;  end    summed\_signal = summed\_signal + noisy\_signal; % Добавление текущего отфильтрованного сигнала в общую сумму  %plot(t, noisy\_signal, 'LineWidth', 1, 'DisplayName', ['Trial ' num2str(trial)]); % Построение графика для текущего эксперимента  end  average\_summed\_signal = summed\_signal / num\_experiment; % Усреднение отфильтрованного сигнала  % Проверка установившегося состояния  for i = 1:N  if isnan(transition\_time)  % Рассчитываем отклонение от уставки  deviation = abs(average\_summed\_signal(i) - setpoint);  relative\_deviation = deviation / abs(setpoint);  % Проверка на отклонение в пределах 2% от уставки  deviation\_met = relative\_deviation <= steady\_state\_criteria;  % Если отклонение соответствует критерию, увеличиваем счётчик  if deviation\_met  derivative\_count = derivative\_count + 1;  % Если сигнал удерживается в пределах отклонения 1000 секунд  if derivative\_count >= duration\_threshold  transition\_time = t(i) - duration\_threshold; % Фиксируем время переходного процесса  end  else  derivative\_count = 0; % Сброс счётчика при выходе за пределы отклонения  end  end  end  % Расчет перерегулирования  Tmax = max(average\_summed\_signal(1,:));  A2 = Tmax - setpoint; % Максимальное отклонение от уставки  overshoot\_ratio = (A2 / setpoint) \* 100; % Перерегулирование в процентах  if overshoot\_ratio >= 4  fprintf('Система не сбалансировалась\n');  else  % Вывод коэффициентов, времени переходного процесса и перерегулирования  fprintf('Время переходного процесса: %.2f секунд\n', transition\_time);  fprintf('Kp: %.4f\n', Kp);  fprintf('Ti: %.2f\n', Ti);  fprintf('Kd: %.2f\n', Kd);  fprintf('Td: %.2f\n', Td);  fprintf('Tmax: %.4f\n', Tmax);  fprintf('A2: %.4f\n', A2);  fprintf('Перерегулирование: %.4f%%\n', overshoot\_ratio);  % % Получение информации о переходном процессе через stepinfo  % info = stepinfo(x(1,:), t); % Здесь x(1,:) - это выходная величина, а t - время  % % Вывод информации о переходном процессе  % fprintf('Время переходного процесса (stepinfo): %.2f секунд\n', info.SettlingTime);  % Построение графика усреднённого сигнала  plot(t, average\_summed\_signal, 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Average Signal');  title('Отфильтрованные сигналы и усреднённый сигнал');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  legend;  grid on;  end  end |

# **4.2. По уставке. Перебор коэффициентов. Код с ПИД регулятором, шумами и фильтром. Kp и Ki – const. Апериодическое звено 1го порядка**

|  |
| --- |
| function PI\_regulator\_ustavka\_nonauto()  tic  % Время моделирования  t\_total = 500; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага    % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 20; % Уставка — желаемая температура    % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры и теплота    % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T];  B = [0; 0; k/T];    % Параметры для стабилизации  steady\_state\_criteria = 0.02; % Критерий ±2% от уставки  % Счетчик для проверки условия установившегося значения  derivative\_count = 0;  duration\_threshold = 100; % Продолжительность для проверки    % Параметры поиска лучших коэффициентов  best\_time = Inf; % Лучшее время переходного процесса  best\_Kd = 0;  best\_Td = 0;  best\_overshoot = Inf; % Лучшее перерегулирование  best\_Tmax = Inf;    % Параметры для поиска  Kp = 0.139;  Ti = 840;  Kd\_values = 1:1:100; % Диапазон значений Ti  Td\_values = 0.01:0.01:10; % Диапазон значений Td    % Генерация сигналов 7 раз и их обработка  num\_experiment = 7; % Количество экспериментов    % Начало цикла перебора коэффициентов  for Kd = Kd\_values  for Td = Td\_values  summed\_signal = zeros(1, N); % Сумма отфильтрованных сигналов  average\_summed\_signal = zeros(1, N); % Усреднённый отфильтрованный сигнал  for trial = 1:num\_experiment  transition\_time = NaN; % Время переходного процесса  error\_integral = 0; % Интеграл ошибки  previous\_error = 0; % Предыдущее значение ошибки  u = ones(1, N); % Управляющее воздействие  noisy\_signal = zeros(1, N); % Сигнал с шумами  filtered\_derivative = 0; % Фильтрованная производная  % Моделирование системы  for i = 1:N-1  error = setpoint - x(1,i); % Вычисляем ошибку (разница между уставкой и текущей температурой)  error\_integral = error\_integral + error \* h; % Интегрируем ошибку  error\_derivative = (error - previous\_error) / h; % Дифференциальная ошибка  previous\_error = error;    % Фильтрация D-составляющей (последовательный фильтр первого порядка)  filtered\_derivative = (Td / (Td + h)) \* filtered\_derivative + (h / (Td + h)) \* error\_derivative;    % Управляющее воздействие (ПИД-регулятор с фильтром)  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Kd \* filtered\_derivative);  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i)) \* h + x(:,i); % Дискретное моделирование  % Добавляем шум в температуру рабочей камеры  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*setpoint); % Генерация шума в пределах ±3%  noisy\_signal(i+1) = x(1,i+1) + noise;  end  summed\_signal = summed\_signal + noisy\_signal; % Добавление текущего отфильтрованного сигнала в общую сумму  end  average\_summed\_signal = summed\_signal / num\_experiment; % Усреднение отфильтрованного сигнала  for i = 1:N  % Проверка установившегося состояния  if isnan(transition\_time)  % Рассчитываем отклонение от уставки  deviation = abs(average\_summed\_signal(i) - setpoint);  relative\_deviation = deviation / abs(setpoint);  % Проверка на отклонение в пределах 2% от уставки  deviation\_met = relative\_deviation <= steady\_state\_criteria;  % Если отклонение соответствует критерию, увеличиваем счётчик  if deviation\_met  derivative\_count = derivative\_count + 1;  % Если сигнал удерживается в пределах отклонения 100 секунд  if derivative\_count >= duration\_threshold  transition\_time = t(i) - duration\_threshold; % Фиксируем время переходного процесса  end  else  derivative\_count = 0; % Сброс счётчика при выходе за пределы отклонения  end  end  end  % Расчет перерегулирования  Tmax = max(average\_summed\_signal(1,:));  A2 = Tmax - setpoint; % Максимальное отклонение от уставки  overshoot\_ratio = (A2 / setpoint) \* 100; % Перерегулирование в процентах  % Обновление наилучших параметров, если найдено меньшее время переходного процесса  if ~isnan(transition\_time) && transition\_time < best\_time && overshoot\_ratio <= 4  best\_time = transition\_time;  best\_Kd = Kd;  best\_Td = Td;  best\_overshoot = overshoot\_ratio;  best\_Tmax = Tmax;  best\_response = average\_summed\_signal(1,:); % Сохраняем ответ для построения графика  end  end  end  if best\_overshoot >= 4  fprintf('Система не сбалансировалась\n');  fprintf('overshoot\_ratio: %.2f\n', overshoot\_ratio);  fprintf('best\_overshoot: %.2f\n', best\_overshoot);  else  % Вывод коэффициентов, времени переходного процесса и перерегулирования  fprintf('Время переходного процесса: %.2f секунд\n', best\_time);  fprintf('Kp: %.4f\n', Kp);  fprintf('Ti: %.2f\n', Ti);  fprintf('Лучший Kd: %.2f\n', best\_Kd);  fprintf('Лучший Td: %.4f\n', best\_Td);  fprintf('Tmax: %.4f\n', best\_Tmax);  fprintf('Перерегулирование: %.4f%%\n', best\_overshoot);    % % Получение информации о переходном процессе через stepinfo  % info = stepinfo(x(1,:), t); % Здесь x(1,:) - это выходная величина, а t - время  % % Вывод информации о переходном процессе  % fprintf('Время переходного процесса (stepinfo): %.2f секунд\n', info.SettlingTime);    % Построение графика усреднённого сигнала  figure;  plot(t, best\_response, 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Average Signal');  title('Усреднённый сигнал с лучшими коэффициентами');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  grid on;  end  toc  end |

**Эксперимент 1:**

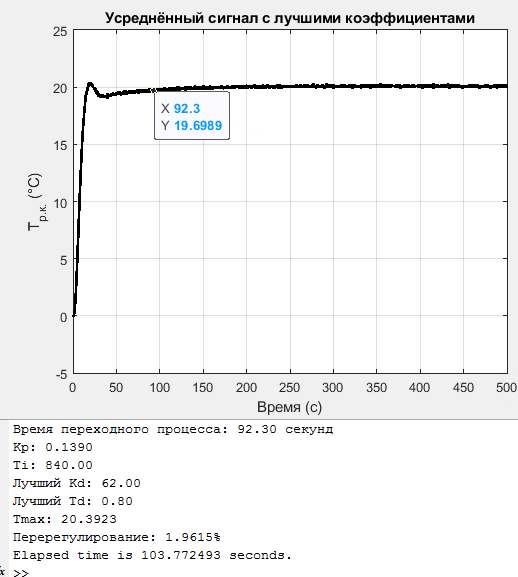
% Параметры для поиска

Kp = 0.139;

Ti = 840;

Kd\_values = 1:1:100; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 0.1:0.1:10; % Диапазон значений Td



**Эксперимент 2: лучшие коэффициенты:**

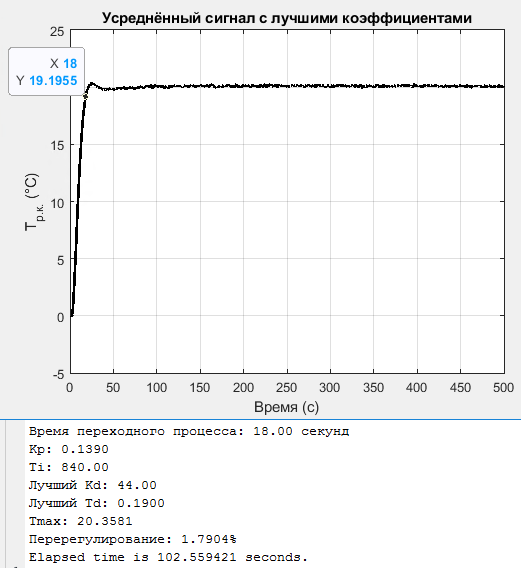
% Параметры для поиска

Kp = 0.139;

Ti = 840;

Kd\_values = 1:1:100; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 0.01:0.01:10; % Диапазон значений Td



# **4.3. По уставке. Перебор ВСЕХ коэффициентов. Код с ПИД регулятором, шумами и фильтром. Апериодическое звено 1го порядка**

|  |
| --- |
| function PI\_regulator\_ustavka\_nonauto()  tic  % Время моделирования  t\_total = 300; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага    % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 20; % Уставка — желаемая температура    % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры и теплота    % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T];  B = [0; 0; k/T];    % Параметры для стабилизации  steady\_state\_criteria = 0.02; % Критерий ±2% от уставки  % Счетчик для проверки условия установившегося значения  derivative\_count = 0;  duration\_threshold = 100; % Продолжительность для проверки    % Параметры поиска лучших коэффициентов  best\_time = Inf; % Лучшее время переходного процесса  best\_Kp = 0;  best\_Ti = 0;  best\_Kd = 0;  best\_Td = 0;  best\_overshoot = Inf; % Лучшее перерегулирование  best\_Tmax = Inf;    % Параметры для поиска  Kp\_values = 0.1:0.001:0.3; % Диапазон значений Kp  Ti\_values = 700:1:900; % Диапазон значений Ti  Kd\_values = 1:1:100; % Диапазон значений Ti  Td\_values = 0.01:0.01:10; % Диапазон значений Td    % Генерация сигналов 7 раз и их обработка  num\_experiment = 7; % Количество экспериментов    % Начало цикла перебора коэффициентов  for Kp = Kp\_values  for Ti = Ti\_values  for Kd = Kd\_values  for Td = Td\_values  summed\_signal = zeros(1, N); % Сумма отфильтрованных сигналов  average\_summed\_signal = zeros(1, N); % Усреднённый отфильтрованный сигнал  for trial = 1:num\_experiment  transition\_time = NaN; % Время переходного процесса  error\_integral = 0; % Интеграл ошибки  previous\_error = 0; % Предыдущее значение ошибки  u = ones(1, N); % Управляющее воздействие  noisy\_signal = zeros(1, N); % Сигнал с шумами  filtered\_derivative = 0; % Фильтрованная производная  % Моделирование системы  for i = 1:N-1  error = setpoint - x(1,i); % Вычисляем ошибку (разница между уставкой и текущей температурой)  error\_integral = error\_integral + error \* h; % Интегрируем ошибку  error\_derivative = (error - previous\_error) / h; % Дифференциальная ошибка  previous\_error = error;  % Фильтрация D-составляющей (последовательный фильтр первого порядка)  filtered\_derivative = (Td / (Td + h)) \* filtered\_derivative + (h / (Td + h)) \* error\_derivative;  % Управляющее воздействие (ПИД-регулятор с фильтром)  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Kd \* filtered\_derivative);  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i)) \* h + x(:,i); % Дискретное моделирование  % Добавляем шум в температуру рабочей камеры  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*setpoint); % Генерация шума в пределах ±3%  noisy\_signal(i+1) = x(1,i+1) + noise;  end  summed\_signal = summed\_signal + noisy\_signal; % Добавление текущего отфильтрованного сигнала в общую сумму  end  average\_summed\_signal = summed\_signal / num\_experiment; % Усреднение отфильтрованного сигнала  for i = 1:N  % Проверка установившегося состояния  if isnan(transition\_time)  % Рассчитываем отклонение от уставки  deviation = abs(average\_summed\_signal(i) - setpoint);  relative\_deviation = deviation / abs(setpoint);  % Проверка на отклонение в пределах 2% от уставки  deviation\_met = relative\_deviation <= steady\_state\_criteria;  % Если отклонение соответствует критерию, увеличиваем счётчик  if deviation\_met  derivative\_count = derivative\_count + 1;  % Если сигнал удерживается в пределах отклонения 100 секунд  if derivative\_count >= duration\_threshold  transition\_time = t(i) - duration\_threshold; % Фиксируем время переходного процесса  end  else  derivative\_count = 0; % Сброс счётчика при выходе за пределы отклонения  end  end  end  % Расчет перерегулирования  Tmax = max(average\_summed\_signal(1,:));  A2 = Tmax - setpoint; % Максимальное отклонение от уставки  overshoot\_ratio = (A2 / setpoint) \* 100; % Перерегулирование в процентах  % Обновление наилучших параметров, если найдено меньшее время переходного процесса  if ~isnan(transition\_time) && transition\_time < best\_time && overshoot\_ratio <= 4  best\_time = transition\_time;  best\_Kp = Kp;  best\_Ti = Ti;  best\_Kd = Kd;  best\_Td = Td;  best\_overshoot = overshoot\_ratio;  best\_Tmax = Tmax;  best\_response = average\_summed\_signal(1,:); % Сохраняем ответ для построения графика  end  end  end  end  end  if best\_overshoot >= 4  fprintf('Система не сбалансировалась\n');  fprintf('overshoot\_ratio: %.2f\n', overshoot\_ratio);  fprintf('best\_overshoot: %.2f\n', best\_overshoot);  else  % Вывод коэффициентов, времени переходного процесса и перерегулирования  fprintf('Время переходного процесса: %.2f секунд\n', best\_time);  fprintf('Лучший Kp: %.4f\n', best\_Kp);  fprintf('Лучший Ti: %.2f\n', best\_Ti);  fprintf('Лучший Kd: %.2f\n', best\_Kd);  fprintf('Лучший Td: %.4f\n', best\_Td);  fprintf('Tmax: %.4f\n', best\_Tmax);  fprintf('Перерегулирование: %.4f%%\n', best\_overshoot);    % % Получение информации о переходном процессе через stepinfo  % info = stepinfo(x(1,:), t); % Здесь x(1,:) - это выходная величина, а t - время  % % Вывод информации о переходном процессе  % fprintf('Время переходного процесса (stepinfo): %.2f секунд\n', info.SettlingTime);    % Построение графика усреднённого сигнала  figure;  plot(t, best\_response, 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Average Signal');  title('Усреднённый сигнал с лучшими коэффициентами');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  grid on;  end  toc  end |

**Эксперимент 1:**

% Параметры для поиска

Kp\_values = 0.1:0.001:0.3; % Диапазон значений Kp

Ti\_values = 700:1:900; % Диапазон значений Ti

Kd\_values = 1:1:100; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 0.01:0.01:10; % Диапазон значений Td

**Эксперимент 1:**

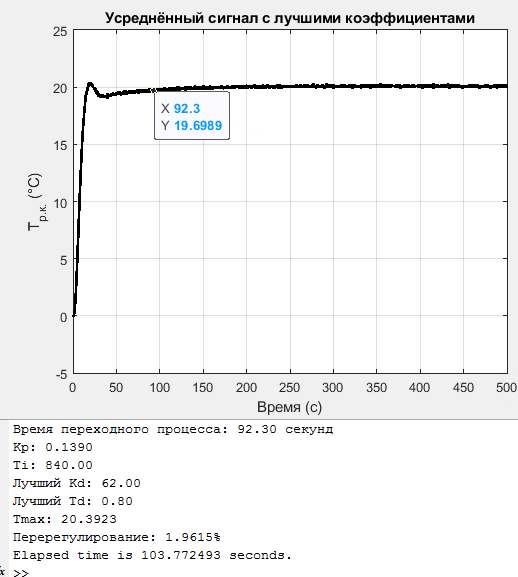
% Параметры для поиска

Kp = 0.139;

Ti = 840;

Kd\_values = 1:1:100; % Диапазон значений Ti

Td\_values = 0.1:0.1:10; % Диапазон значений Td



**Эксперимент 2: лучшие коэффициенты:**

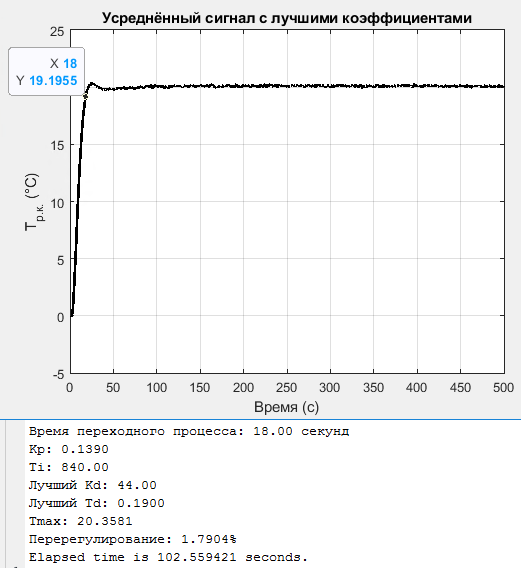
% Параметры для поиска

Kp = 0.139;

Ti = 840;

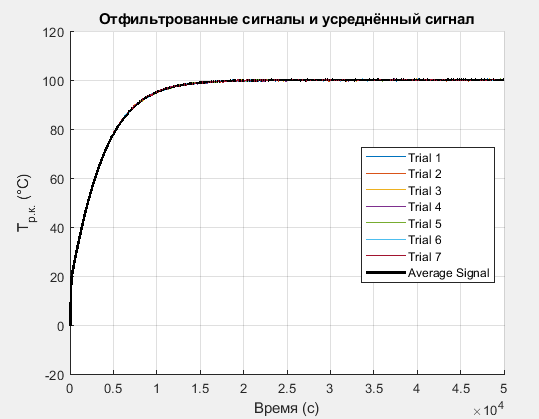
Kd\_values = 1:1:100; % Диапазон значений Ti

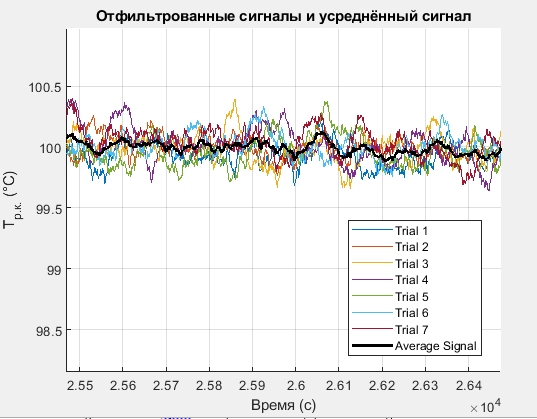
Td\_values = 0.01:0.01:10; % Диапазон значений Td



# **Не актуальное. ПИД регулятор с фильтром и шумами. Моделирование сигнала 7 раз и усреднение.**

|  |
| --- |
| %function PI\_regulator\_ustavka\_nonauto()  % Время моделирования  t\_total = 50000; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага  % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 100; % Уставка — желаемая температура  % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры и теплота  % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T];  B = [0; 0; k/T];  % Параметры для стабилизации  transition\_time = NaN; % Время переходного процесса  derivative\_threshold = 0.01; % Пороговое значение производной для установившегося состояния  steady\_state\_criteria = 0.02; % Критерий ±1% от уставки  % Счетчик для проверки условия производной  derivative\_count = 0;  duration\_threshold = 500; % Продолжительность для проверки  % Переменные для усреднения  average\_filtered\_signal = zeros(1, N); % Усреднённый отфильтрованный сигнал  summed\_filtered\_signal = zeros(1, N); % Сумма отфильтрованных сигналов  % Генерация сигналов 7 раз и их обработка  num\_experiment = 7; % Количество экспериментов  figure;  hold on;  for trial = 1:num\_experiment  % Параметры для поиска  Kp = 0.0006; % Значение параметра Kp  Ti = 2000; % Значение параметра Ti  Td = 500; % Дифференциальное время    error\_integral = 0; % Интеграл ошибки  previous\_error = 0; % Предыдущее значение ошибки  u = ones(1, N); % Управляющее воздействие    % Параметры для шумов и фильтрации  filter\_window = 50; % Размер окна для скользящего среднего  d\_filter\_window = 50; % Размер окна фильтрации для D-составляющей  d\_filter\_buffer = zeros(1, d\_filter\_window); % Буфер для фильтрации D-составляющей  temp\_filter\_buffer = zeros(1, filter\_window); % Буфер для фильтрации температуры    % Массивы для хранения данных  noisy\_signal = zeros(1, N); % Сигнал с шумами  filtered\_signal = zeros(1, N); % Отфильтрованный сигнал  d\_filtered\_signal = zeros(1, N); % Отфильтрованная D-составляющая  % Обнуление начальных условий для текущего эксперимента  x(:,1) = [0; 0; 0];  temp\_filter\_buffer = zeros(1, filter\_window);  noisy\_signal = zeros(1, N);  filtered\_signal = zeros(1, N);    % Моделирование системы  for i = 1:N-1  % Вычисляем ошибку (разница между уставкой и текущей температурой)  error = setpoint - x(1,i);  % Интегрируем ошибку  error\_integral = error\_integral + error \* h;  % Дифференциальная ошибка  error\_derivative = (error - previous\_error) / h;  previous\_error = error;  % Обновление буфера для фильтрации D-составляющей  d\_filter\_buffer = [d\_filter\_buffer(2:end), error\_derivative];  d\_filtered\_signal(i+1) = sum(d\_filter\_buffer) / d\_filter\_window;  % ПИ-регулятор с фильтром для D-составляющей  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Td \* d\_filtered\_signal(i+1));  % Дискретное моделирование  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i)) \* h + x(:,i);  % Добавляем шум в температуру рабочей камеры  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*setpoint); % Генерация шума в пределах ±3%  noisy\_signal(i+1) = x(1,i+1) + noise;  % Обновление буфера для фильтрации температуры  temp\_filter\_buffer = [temp\_filter\_buffer(2:end), noisy\_signal(i+1)];  filtered\_signal(i+1) = sum(temp\_filter\_buffer) / filter\_window;  end    % Добавление текущего отфильтрованного сигнала в общую сумму  summed\_filtered\_signal = summed\_filtered\_signal + filtered\_signal;    % Построение графика для текущего эксперимента  plot(t, filtered\_signal, 'LineWidth', 1, 'DisplayName', ['Trial ' num2str(trial)]);  end  % Усреднение отфильтрованного сигнала  average\_filtered\_signal = summed\_filtered\_signal / num\_trials;  % Построение графика усреднённого сигнала  plot(t, average\_filtered\_signal, 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Average Signal');  title('Отфильтрованные сигналы и усреднённый сигнал');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  legend;  grid on; |





# **Не актуальное. Вывод и усреднение времени каждого переходного процесса. Идея была уменьшить время моделирования. Сравнить сумму времени переходного процесса и вывод. Надо доделать.**

|  |
| --- |
| % Время моделирования  t\_total = 50000; % Общее время моделирования (в секундах)  h = 1; % Шаг по времени (в секундах)  t = 0:h:t\_total; % Вектор времени  N = length(t); % Количество шагов на основе времени моделирования и шага  % Параметры системы  c = 4200; % Удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C)  mp = 0.192; % Масса воды в рубашке, кг  mp\_k = 0.011; % Масса воды в рабочей камере, кг  k1 = 0.547; % Коэффициент теплопередачи в среду  k2 = 1.05; % Коэффициент теплопередачи между рубашкой и камерой  T = 2.9; % Постоянная времени системы  k = 592.2; % Коэффициент управляющего воздействия  setpoint = 100; % Уставка — желаемая температура  % Начальные условия [T\_р.к., T\_p, Q\_H]  x = zeros(3, N); % Массив для хранения результатов (температур и теплоты)  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Начальные температуры в камере, рубашке и начальная теплота  % Матрицы системы  A = [-k2/(c\*mp\_k), k2/(c\*mp\_k), 0;  k2/(c\*mp), -(k2/(c\*mp) + k1/(c\*mp)), 1/(c\*mp);  0, 0, -1/T]; % Матрица состояния  B = [0; 0; k/T]; % Матрица управления  % Параметры для стабилизации  derivative\_threshold = 0.01; % Пороговое значение производной для установившегося состояния  steady\_state\_criteria = 0.02; % Критерий ±2% от уставки  duration\_threshold = 5000; % Время, необходимое для признания устойчивого состояния  % Переменные для усреднения сигналов  average\_filtered\_signal = zeros(1, N); % Усреднённый сигнал  summed\_filtered\_signal = zeros(1, N); % Сумма всех отфильтрованных сигналов  transition\_times = zeros(1, 7); % Массив для хранения времени переходного процесса каждого эксперимента  % Генерация сигналов 7 раз для проверки устойчивости  num\_experiment = 7; % Количество экспериментов  figure;  hold on; % Готовим график для отображения всех экспериментальных данных  % Цикл по количеству экспериментов  for trial = 1:num\_experiment  % Параметры ПИ-регулятора  Kp = 0.0006; % Пропорциональный коэффициент  Ti = 2000; % Время интегрирования  Td = 500; % Время дифференцирования    % Начальные условия для регулятора  error\_integral = 0; % Интегральная ошибка  previous\_error = 0; % Предыдущая ошибка  u = ones(1, N); % Управляющее воздействие (инициализация)  % Настройки для фильтрации  filter\_window = 50; % Окно для фильтрации сигнала  d\_filter\_window = 50; % Окно для фильтрации D-составляющей  d\_filter\_buffer = zeros(1, d\_filter\_window); % Буфер для фильтрации D-составляющей  temp\_filter\_buffer = zeros(1, filter\_window); % Буфер для фильтрации температуры    % Массивы для хранения сигналов  noisy\_signal = zeros(1, N); % Сигнал с шумами  filtered\_signal = zeros(1, N); % Отфильтрованный сигнал  d\_filtered\_signal = zeros(1, N); % Отфильтрованная D-составляющая  % Обнуление начальных условий для текущего эксперимента  x(:,1) = [0; 0; 0]; % Сброс состояния системы  temp\_filter\_buffer = zeros(1, filter\_window); % Очистка буфера фильтрации температуры  noisy\_signal = zeros(1, N); % Очистка массива шумов  filtered\_signal = zeros(1, N); % Очистка массива отфильтрованных сигналов  transition\_time = NaN; % Сброс времени переходного процесса    % Моделирование системы  derivative\_count = 0; % Сброс счётчика устойчивости  for i = 1:N-1  % Вычисление ошибки (разницы между уставкой и текущей температурой камеры)  error = setpoint - x(1,i);  % Интегральная ошибка  error\_integral = error\_integral + error \* h;  % Дифференциальная ошибка  error\_derivative = (error - previous\_error) / h;  previous\_error = error;  % Фильтрация дифференциальной составляющей  d\_filter\_buffer = [d\_filter\_buffer(2:end), error\_derivative];  d\_filtered\_signal(i+1) = sum(d\_filter\_buffer) / d\_filter\_window;  % Вычисление управляющего воздействия  u(i) = Kp \* (error + (1/Ti) \* error\_integral + Td \* d\_filtered\_signal(i+1));  % Дискретное моделирование системы  x(:,i+1) = (A\*x(:,i) + B\*u(i)) \* h + x(:,i);  % Добавление случайного шума в измерение температуры  noise = (rand() - 0.5) \* (0.03\*setpoint); % Шум в пределах ±3% от уставки  noisy\_signal(i+1) = x(1,i+1) + noise;  % Фильтрация температуры  temp\_filter\_buffer = [temp\_filter\_buffer(2:end), noisy\_signal(i+1)];  filtered\_signal(i+1) = sum(temp\_filter\_buffer) / filter\_window;  % Проверка устойчивого состояния  if isnan(transition\_time)  deviation = abs(filtered\_signal(i+1) - setpoint); % Отклонение от уставки  relative\_deviation = deviation / abs(setpoint); % Относительное отклонение    deviation\_met = relative\_deviation <= steady\_state\_criteria; % Проверка отклонения в пределах критерия    if deviation\_met  derivative\_count = derivative\_count + 1;  if derivative\_count >= duration\_threshold  transition\_time = t(i) - duration\_threshold; % Фиксируем время переходного процесса  end  else  derivative\_count = 0; % Сброс счётчика, если сигнал выходит за пределы критерия  end  end  end    % Сохраняем время переходного процесса текущего эксперимента  transition\_times(trial) = transition\_time;  % Суммируем все отфильтрованные сигналы  summed\_filtered\_signal = summed\_filtered\_signal + filtered\_signal;  end  % Усреднение всех экспериментов  average\_filtered\_signal = summed\_filtered\_signal / num\_experiment;  % Вывод времени переходного процесса для каждого эксперимента  fprintf('Время переходного процесса для каждого эксперимента:\n');  for trial = 1:num\_experiment  fprintf('Эксперимент %d: %.2f секунд\n', trial, transition\_times(trial));  end  % Усреднённое время переходного процесса  average\_transition\_time = mean(transition\_times);  % Расчёт характеристик системы  Tmax = max(average\_filtered\_signal); % Максимальное значение температуры  A2 = Tmax - setpoint; % Перерегулирование  overshoot\_ratio = (A2 / setpoint) \* 100; % Перерегулирование в процентах  % Вывод результатов  fprintf('Среднее время переходного процесса для всех экспериментов: %.2f секунд\n', average\_transition\_time);  if overshoot\_ratio >= 4  fprintf('Система не сбалансировалась\n');  else  fprintf('Лучшее время переходного процесса (по среднему сигналу): %.2f секунд\n', transition\_time);  fprintf('Kp: %.4f\n', Kp);  fprintf('Ti: %.2f\n', Ti);  fprintf('Tmax: %.4f\n', Tmax);  fprintf('A2: %.4f\n', A2);  fprintf('Перерегулирование: %.4f%%\n', overshoot\_ratio);  % Построение графика усреднённого сигнала  plot(t, average\_filtered\_signal, 'k', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Average Signal');  title('Отфильтрованные сигналы и усреднённый сигнал');  xlabel('Время (с)');  ylabel('T\_{р.к.} (°C)');  legend;  grid on;  end |

**Так как время каждого и отфильтрованного отличается, нужно складывать и фильтровать, и время считать по отфильтрованному.**