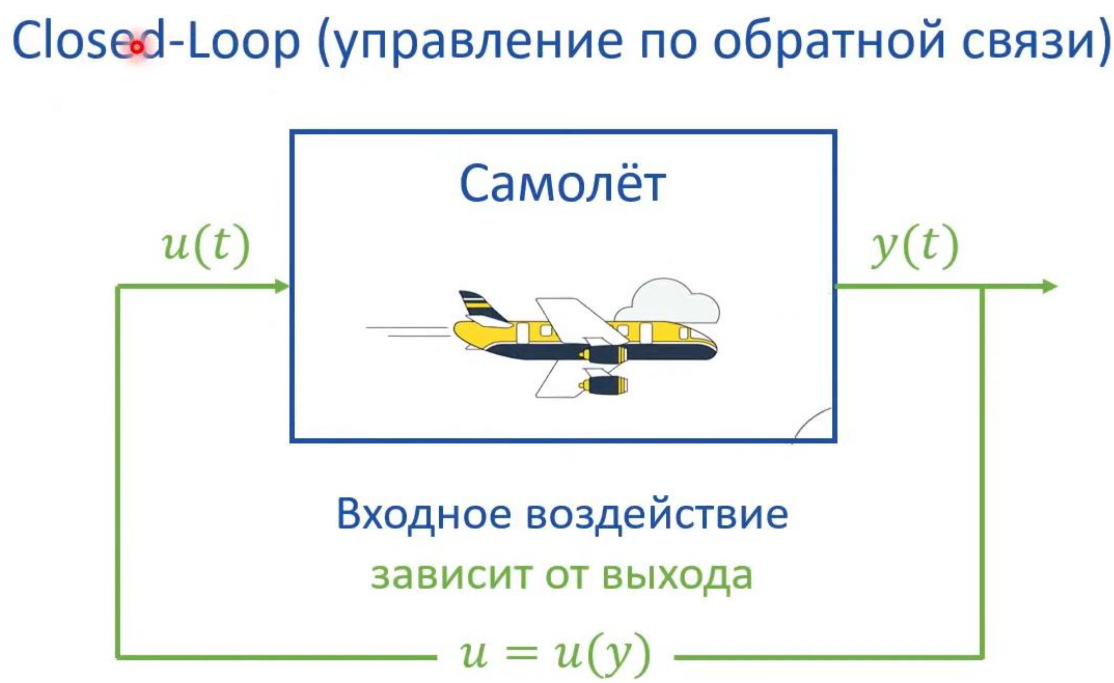
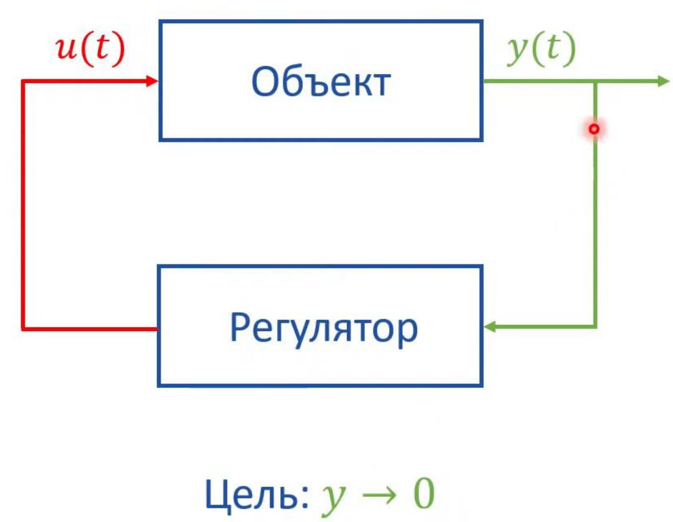
Регуляторы и астатизмы

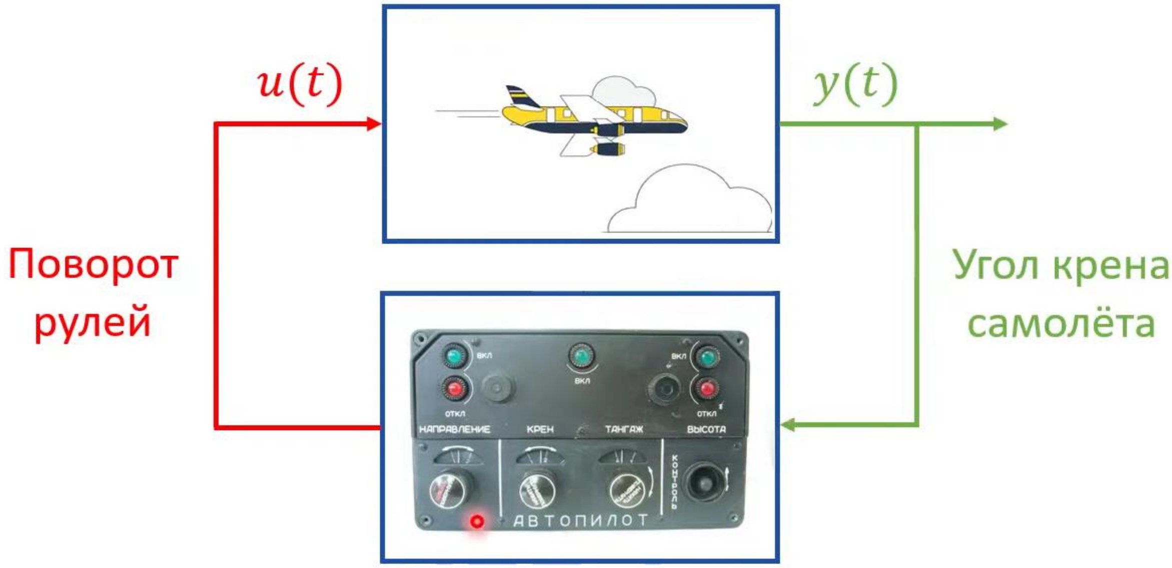
Open-Loop vs Closed-Loop

Таким способом можно управлять довольно простыми объектами (например: стиральная машина и т.д.), однако управлять таким образом более сложными объектами достаточно проблематично (самолет).



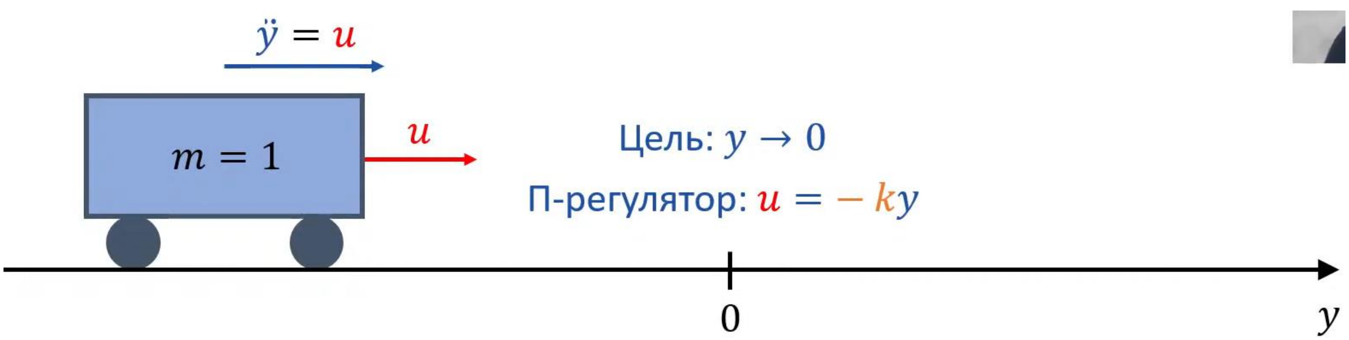
Задача стабилизации





Цель: $y \to 0$

Задача стабилизации: простейший пример



Как будет двигаться тележка при использовании П-регулятора?

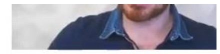
Дифференциальное уравнение: $\ddot{y} = -ky$

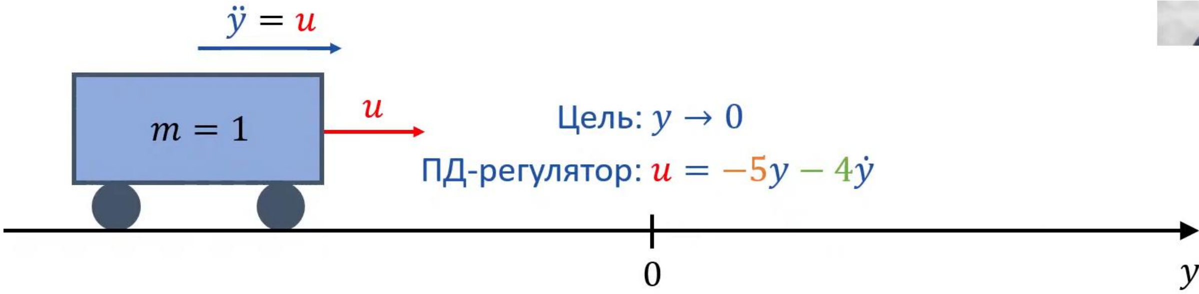
Характеристическое уравнение: $\lambda^2 + k = 0$

Алгебраические корни: $\lambda_{1,2} = \pm\sqrt{k}i$

Соответствующие моды: $\sin(\sqrt{k}t)$, $\cos(\sqrt{k}t)$

Общее решение: $y(t) = c_1 \sin(\sqrt{k}t) + c_2 \cos(\sqrt{k}t)$





Цель: $y \to 0$

ПД-регулятор: $u = -5y - 4\dot{y}$

Как будет двигаться тележка при использовании этого ПД-регулятора?

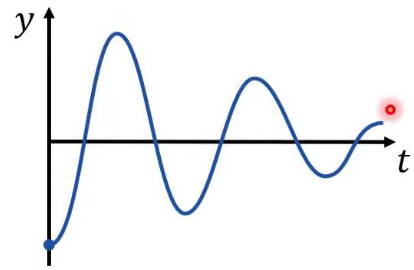
Дифференциальное уравнение: $\ddot{y} = -5y - 4\dot{y}$

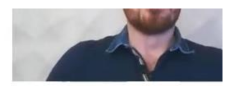
Характеристическое уравнение: $\lambda^2 + 4\lambda + 5 = 0$

Алгебраические корни: $\lambda_{1,2} = -2 \pm i$

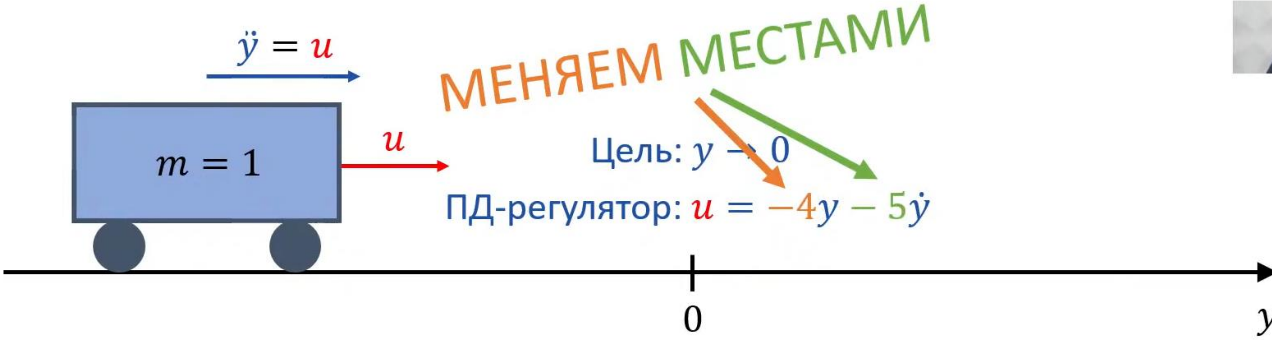
Соответствующие моды: $e^{-2t}\sin t\,, e^{-2t}\cos t$

Общее решение: $y(t) = c_1 e^{-2t}\sin t + c_2 e^{-2t}\cos t$





МЕНЯЕМ МЕСТАМИ



Цель: $y \to 0$

ПД-регулятор: $u = -4y - 5\dot{y}$

Как будет двигаться тележка при использовании такого ПД-регулятора?

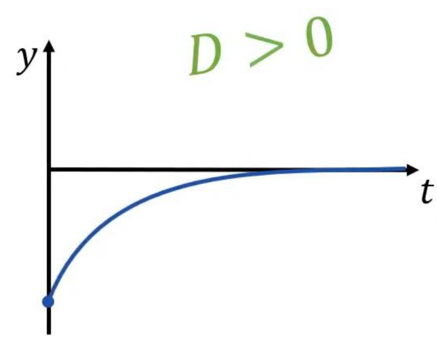
Дифференциальное уравнение: $\ddot{y} = -4y - 5\dot{y}$

Характеристическое уравнение: $\lambda^2 + 5\lambda + 4 = 0$

Алгебраические корни: $\lambda_1 = -4 \quad \lambda_2 = -1$

Соответствующие моды: $e^{-4t}, \;\; e^{-t}$

Общее решение: $y(t) = c_1 e^{-4t} + c_2 e^{-t}$



Задача стабилизации: абстрактный пример

Объект

$$\ddddot{y} - 2\dddot{y} + 3\ddot{y} - 4\dot{y} + 5y = u$$

Регулятор

$$u = 0$$

Замкнутая система

$$\ddddot{y} - 2\dddot{y} + 3\ddot{y} - 4\dot{y} + 5y = 0$$

Объект

$$\dddot{y} - 2\ddot{y} + 3\ddot{y} - 4\dot{y} + 5y = u$$

Регулятор

$$u = k_0 y$$

Замкнутая система

$$\dddot{y} - 2\ddot{y} + 3\ddot{y} - 4\dot{y} + (5 - k_0)y = 0$$

Объект

$$\dddot{y} - 2\ddot{y} + 3\ddot{y} - 4\dot{y} + 5y = u$$

Регулятор

$$u = k_0 y + k_1 \dot{y}$$

Замкнутая система

$$\dddot{y} - 2\ddot{y} + 3\ddot{y} + (-4 - k_1)\dot{y} + (5 - k_0)y = 0$$

Объект

$$\dddot{y} - 2\ddot{y} + 3\ddot{y} - 4\dot{y} + 5y = u$$

Регулятор

$$u = k_0 y + k_1 \dot{y} + k_2 \ddot{y}$$

Замкнутая система

$$\dddot{y} - 2\ddot{y} + (3 - k_2)\ddot{y} + (-4 - k_1)\dot{y} + (5 - k_0)y = 0$$

Объект

$$\dddot{y} - 2\ddot{y} + 3\ddot{y} - 4\dot{y} + 5y = u$$

Регулятор

$$u = k_0 y + k_1 \dot{y} + k_2 \ddot{y} + k_3 \ddot{y}$$

Замкнутая система

$$\dddot{y} + (-2 - k_3)\ddot{y} + (3 - k_2)\ddot{y} + (-4 - k_1)\dot{y} + (5 - k_0)y = 0$$

Данную систему сможет стабилизировать только ПДДД регулятор

Чем больше производных использует регулятор,
тем устойчивее он может сделать систему

$$u = k_0 y + k_1 \dot{y} + k_2 \ddot{y} + k_3 \ddot{y} + \cdots$$

$$W_{\text{рег}}(p) = k_0 + k_1 p + k_2 p^2 + k_3 p^3 + \cdots$$

Но такой регулятор физически нереализуем
(порядок числителя больше порядка знаменателя)

$$u = k_0 y + k_1 \dot{y} + k_2 \ddot{y} + k_3 \dddot{y} + \cdots$$

$\approx \dot{y}$ $\approx \ddot{y}$ $\approx \dddot{y}$

Производные можно вычислять приближённо

$$\dot{y} \approx \frac{p}{0.0001p + 1}[y]$$

Но это всё равно опасно,
потому что усиливаются шумы

Задача слежения

Цель управления

$$y \to g$$

$$(e \to 0)$$

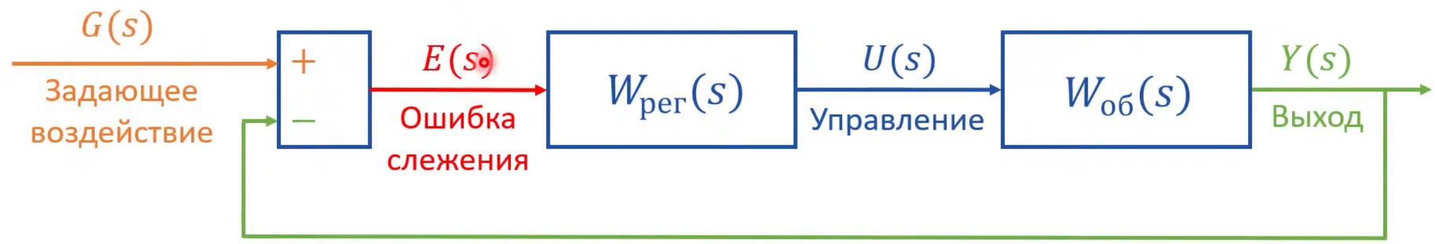
Цель управления

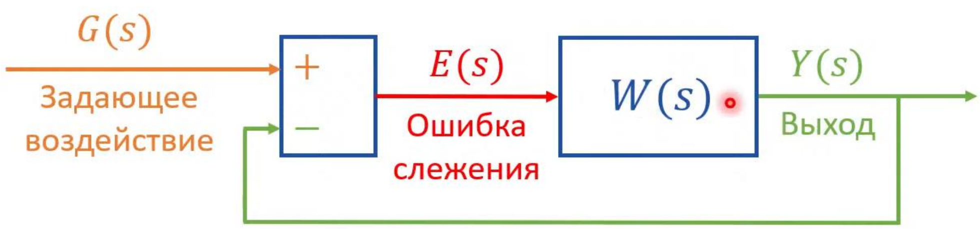
$$y \to g$$

$$(e \to 0)$$

Передаточные функции замкнутой системы

Можно записать с помощью передаточных функций

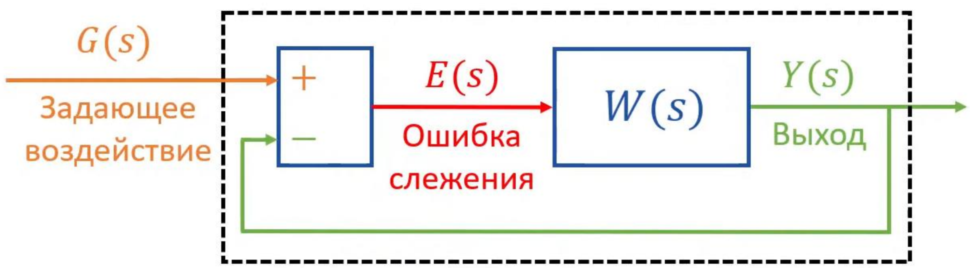




Передаточная функция разомкнутой системы

$W(s)$

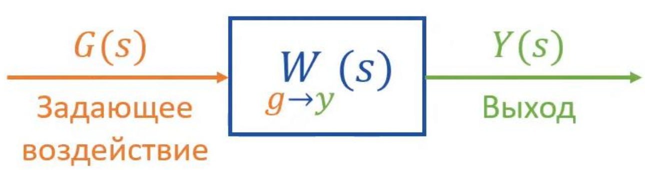
$$W(s) = W_{\text{рег}}(s) \cdot W_{\text{об}}(s)$$



Передаточная функция разомкнутой системы

$W(s)$

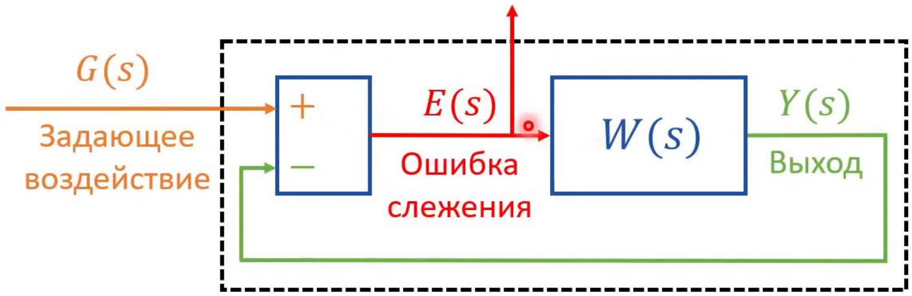
Заменим на один блок

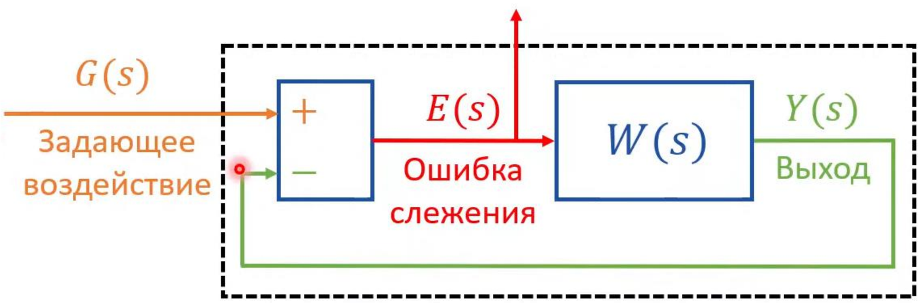


Передаточная функция замкнутой системы

$W_{g\to y}(s)$

Если для нас важна ошибка слежения,
мы можем выбрать её в качестве выхода

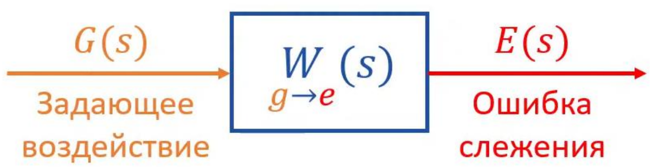




Передаточная функция разомкнутой системы

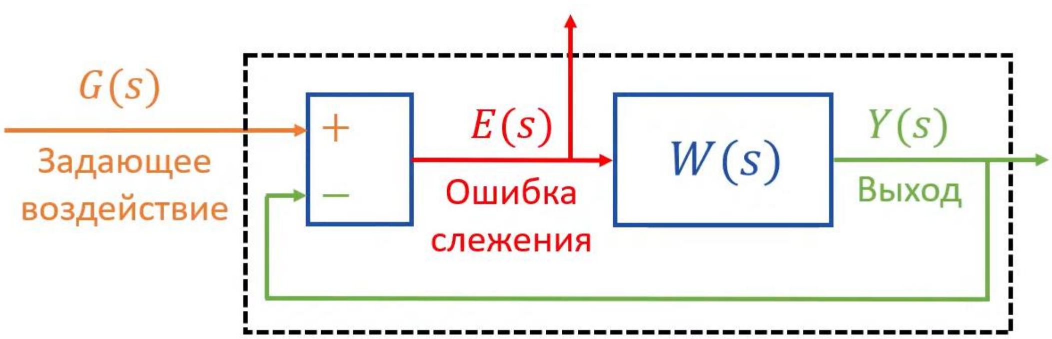
$$W(s)$$

Заменим на один блок



Передаточная функция по ошибке

$$W_{g\to e}(s)$$



$$G - Y = E \qquad E \cdot W = Y$$

Выражаем связь между G и Y

$$(G - Y) \cdot W = Y$$

$$G \cdot W = Y \cdot (1 + W) \qquad \frac{Y}{G} = \frac{W}{(1 + W)}$$

Выражаем связь между G и E

$$E \cdot W = G - E$$

$$(1 + W) \cdot E = G \qquad \frac{E}{G} = \frac{1}{(1 + W)}$$

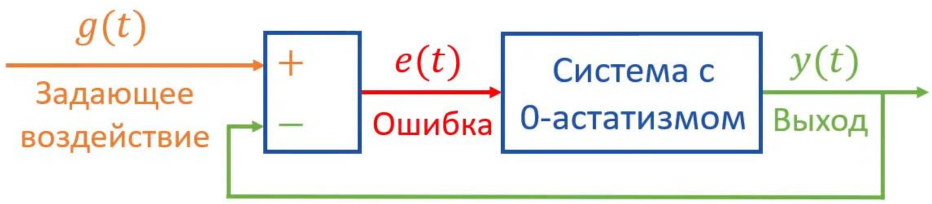
Передаточная функция от G к Y

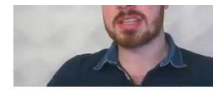
$$\underset{g\to y}{W} = \frac{W}{(1+W)}$$

Передаточная функция от G к E

$$\underset{g\to e}{W} = \frac{1}{(1+W)}$$

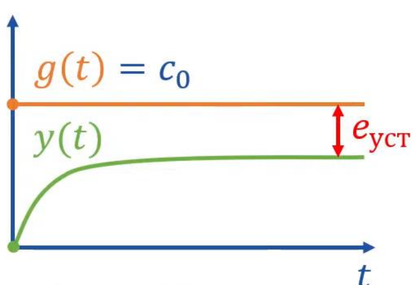
Порядок астатизма: нулевой





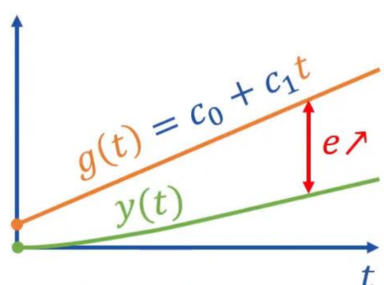
Если задающее воздействие будет

... постоянным



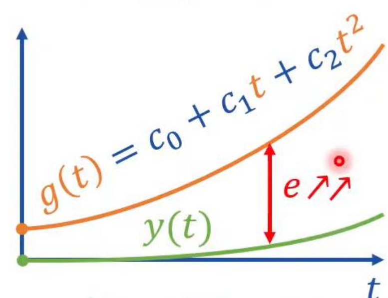
$$\lim_{t\to+\infty} e(t) = e_{\text{уст}}$$

... линейным



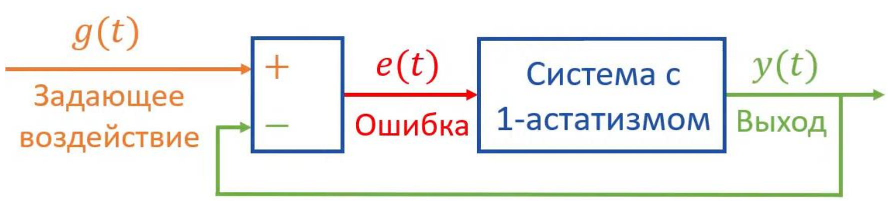
$$\lim_{t\to+\infty} e(t) = \infty$$

... квадратичным



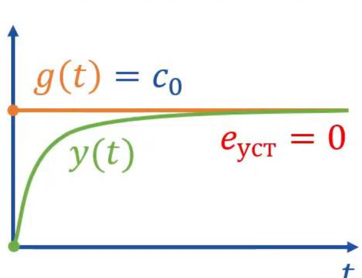
$$\lim_{t\to+\infty} e(t) = \infty$$

Порядок астатизма: первый



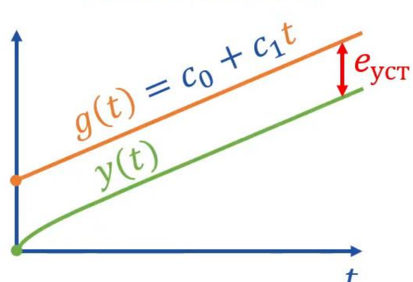
Если задающее воздействие будет

... постоянным



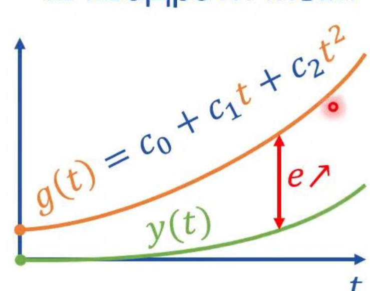
$$\lim_{t\to+\infty} e(t) = 0$$

... линейным



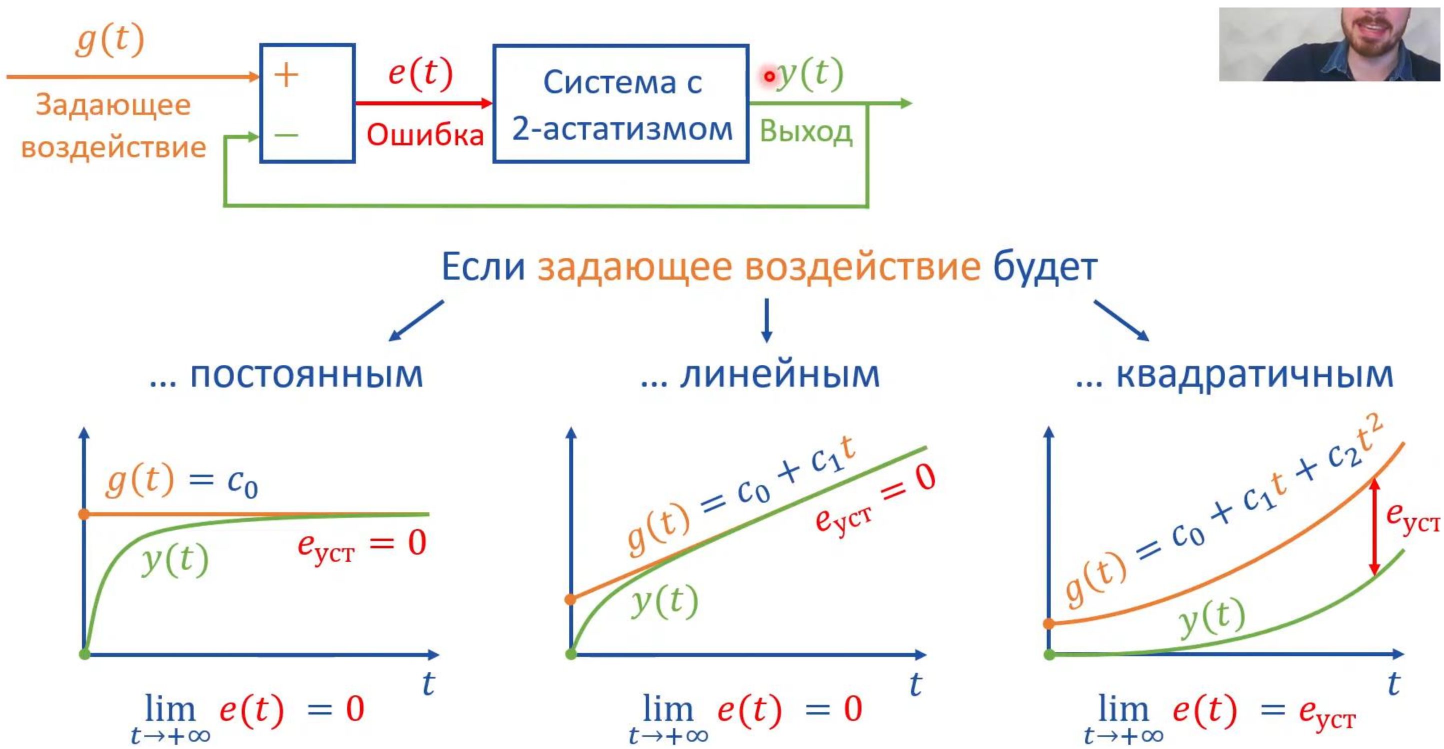
$$\lim_{t\to+\infty} e(t) = e_{\text{уст}}$$

... квадратичным

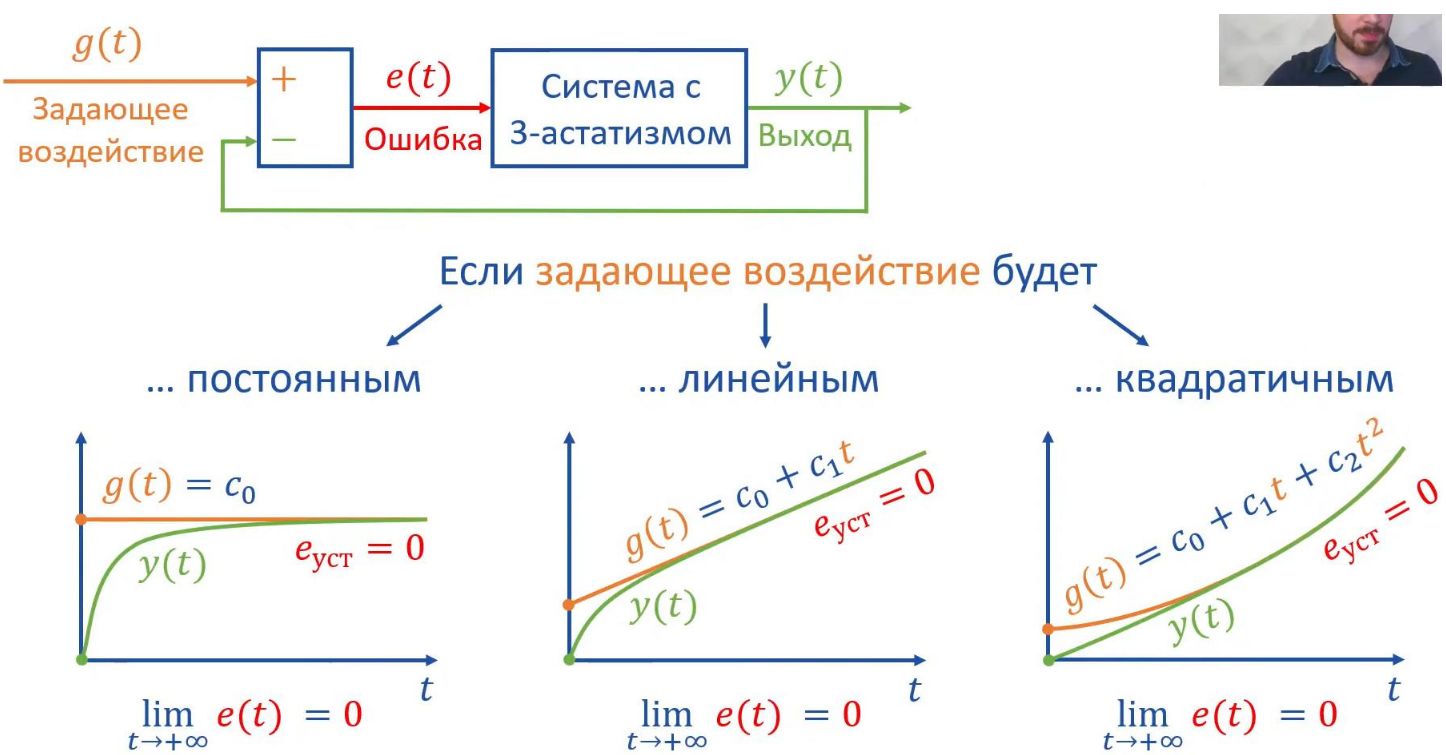


$$\lim_{t\to+\infty} e(t) = \infty$$

Порядок астатизма: второй



Порядок астатизма: третий



Если все полюса $sY(s)$ имеют строго отрицательную вещественную часть, то

$$\lim_{t\to+\infty} y(t) = \lim_{s\to 0} sY(s)$$

В противном случае предел $\lim_{t\to+\infty} y(t)$ не существует или равен бесконечности

Знаем: $Y(s) = \dfrac{7s^2 + 63s + 150}{s(s+3)(s+5)^2}$

Хотим узнать: $\lim_{t\to+\infty} y(t)$

$$Y(s) = \frac{2}{s} - \frac{2}{s+3} + \frac{1}{(s+5)^2}$$

$$y(t) = 2 - 2e^{-3t} + te^{-5t}$$

$$\lim_{t\to+\infty} y(t) = 2$$

$$sY(s) = \frac{7s^2 + 63s + 150}{(s+3)(s+5)^2}$$

$$\lim_{s\to 0} sY(s) = \frac{150}{3\cdot 5^2} = 2$$

$$\lim_{t\to+\infty} y(t) = 2$$

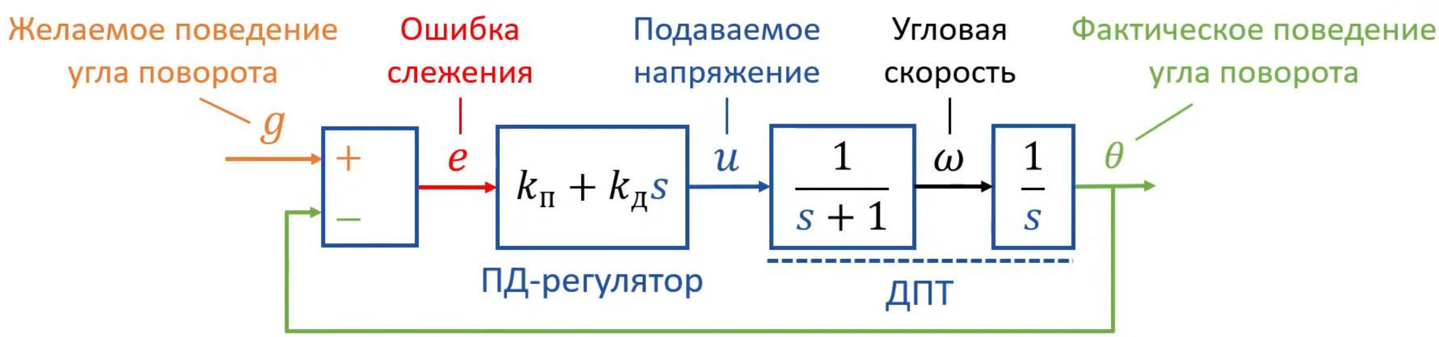
Знаем: $Y(s) = \dfrac{7s^2 + 63s + 150}{s(s-3)(s+5)^2}$ Хотим узнать: $\lim\limits_{t \to +\infty} y(t)$

$$sY(s) = \frac{7s^2 + 63s + 150}{(s-3)(s+5)^2}$$

$$\lim_{s \to 0} sY(s) = \frac{150}{-3 \cdot 5^2} = -2$$

$$\cancel{\lim_{t \to +\infty} y(t) = -2}$$

Двигатель постоянного тока с ПД-регулятором



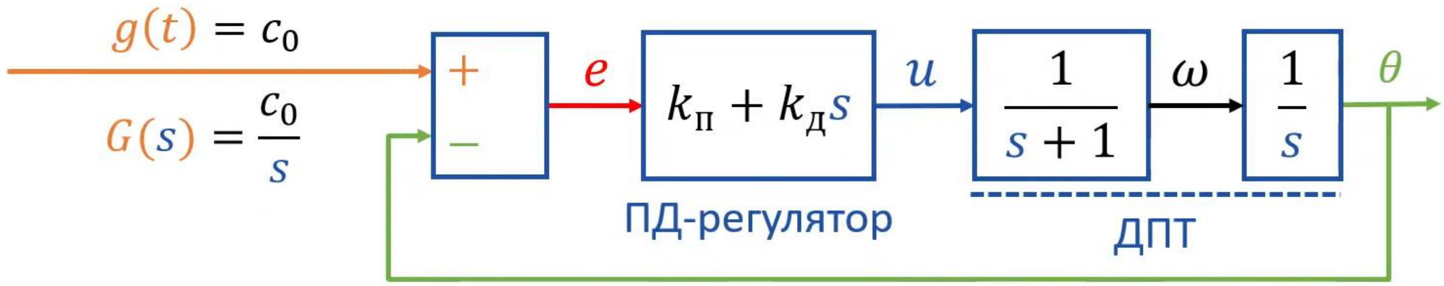
Передаточная функция по ошибке

$$W_{g \to e}(s) = \frac{1}{1 + W(s)} = \frac{1}{1 + (k_п + k_д s) \cdot \left(\frac{1}{s+1}\right) \cdot \frac{1}{s}}$$

$$W_{g \to e}(s) = \frac{1}{1 + W(s)} = \frac{1}{1 + \dfrac{k_п + k_д s}{s(s+1)}}$$

$$W_{g \to e}(s) = \frac{1}{1 + W(s)} = \frac{s(s+1)}{s^2 + (1 + k_д)s + k_п}$$

Рассмотрим постоянное задающее воздействие



Передаточная функция по ошибке

$$W_{g\to e}(s) = \frac{s(s+1)}{s^2 + (1 + k_д)s + k_п}$$

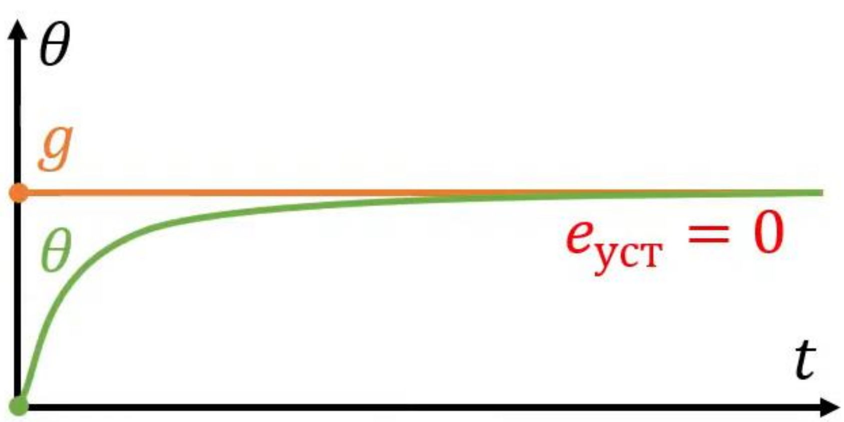
Ошибка слежения

$$E(s) = W_{g\to e}(s) \cdot G(s)$$

$$E(s) = \frac{s(s+1)}{s^2 + (1 + k_д)s + k_п} \cdot \frac{c_0}{s} \qquad E(s) = \frac{(s+1)\cdot c_0}{s^2 + (1 + k_д)s + k_п}$$

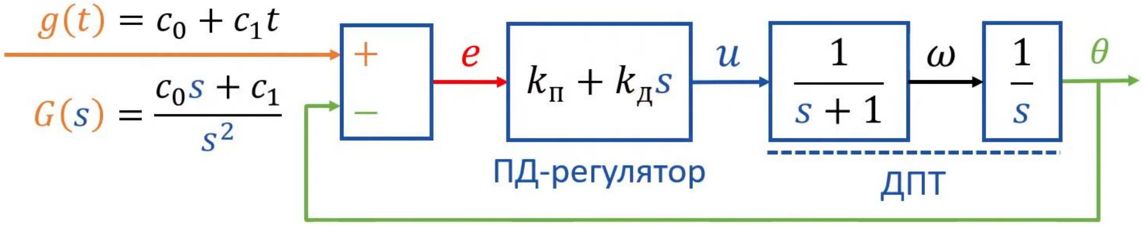
Установившаяся ошибка

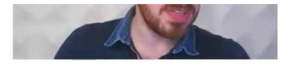
$$e_{уст} = \lim_{s\to 0} s \cdot E(s) = 0$$



Рассмотрим линейно растущее задающее воздействие

$$g(t) = c_0 + c_1 t \xrightarrow{\mathcal{L}} G(s) = \frac{c_0 s + c_1}{s^2}$$





Передаточная функция по ошибке

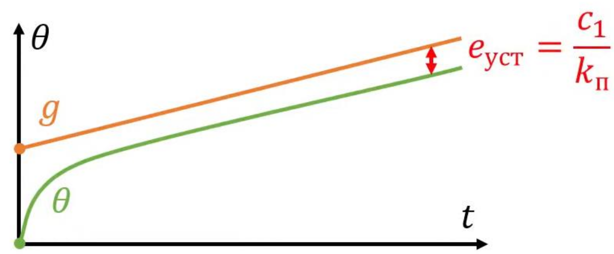
$$\underset{g\to e}{W}(s) = \frac{s(s+1)}{s^2 + (1+k_д)s + k_п}$$

Ошибка слежения

$$E(s) = \frac{(s+1)\cdot(c_0 s + c_1)}{\left(s^2 + (1+k_д)s + k_п\right)\cdot s}$$

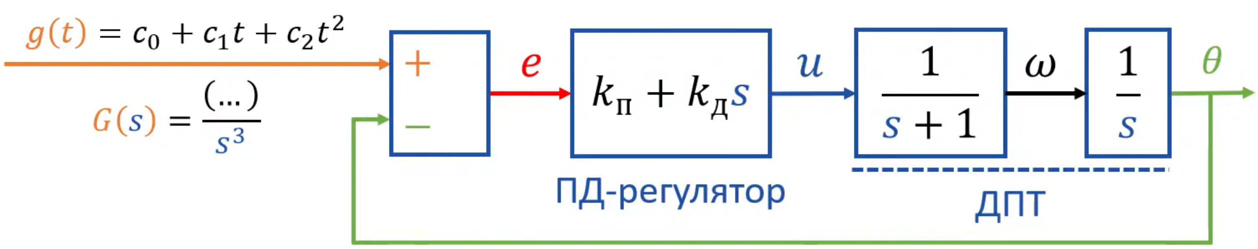
Установившаяся ошибка

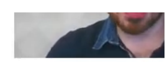
$$e_{уст} = \lim_{s\to 0} s \cdot E(s) = \frac{c_1}{k_п}$$



Рассмотрим квадратично растущее задающее воздействие

$$g(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 \xrightarrow{\mathcal{L}} G(s) = \frac{(\dots)}{s^3}$$





Передаточная функция по ошибке

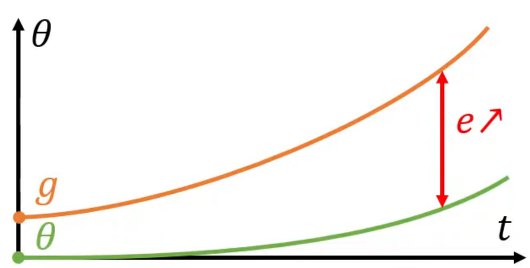
$$\underset{g\to e}{W}(s) = \frac{s\cdot(\dots)}{(\dots)}$$

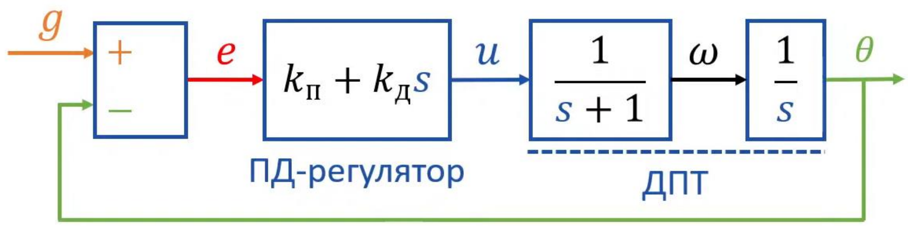
Ошибка слежения

$$E(s) = \frac{(\dots)}{(\dots)\cdot s^2}$$

Установившаяся ошибка

$$\lim_{s\to 0} s \cdot E(s) = \lim_{s\to 0} \frac{(\dots)}{(\dots)\cdot s} = \infty$$

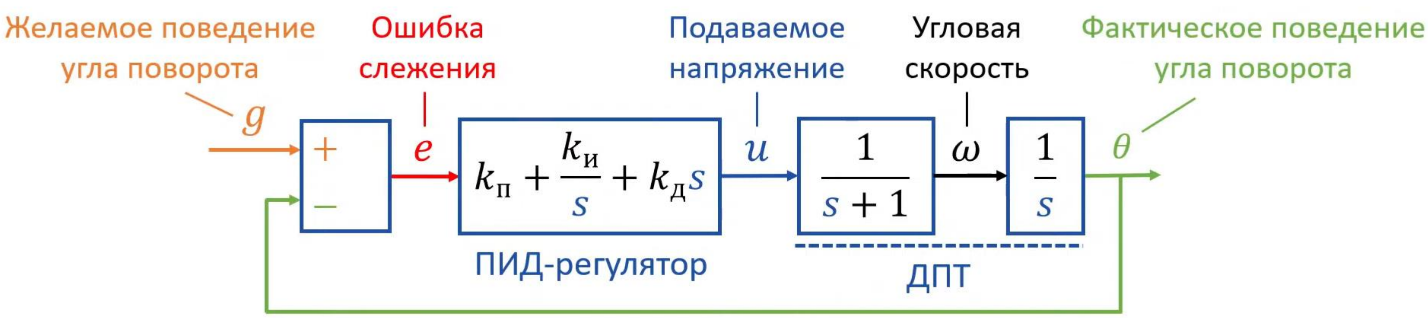




Какой порядок астатизма имеет система?

1

Двигатель постоянного тока с ПИД-регулятором

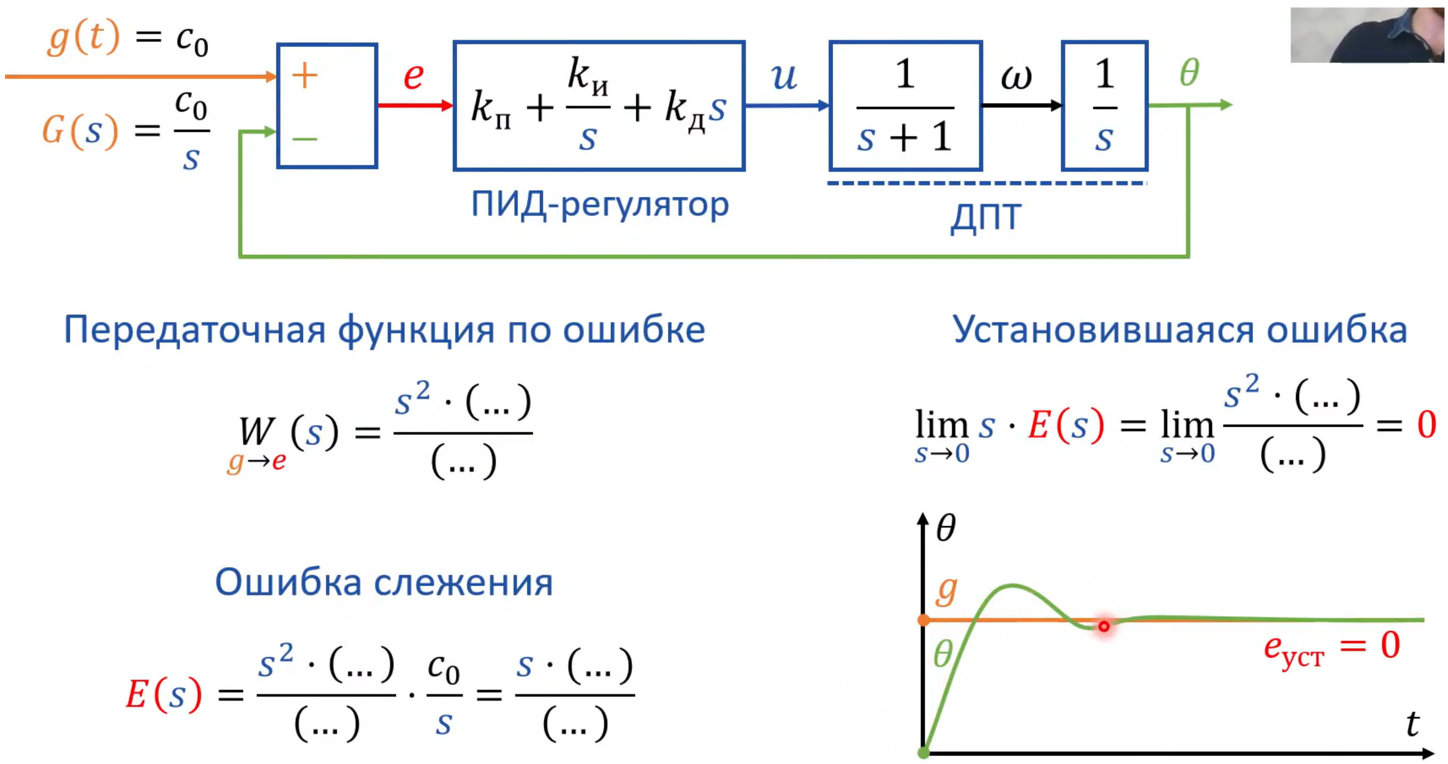


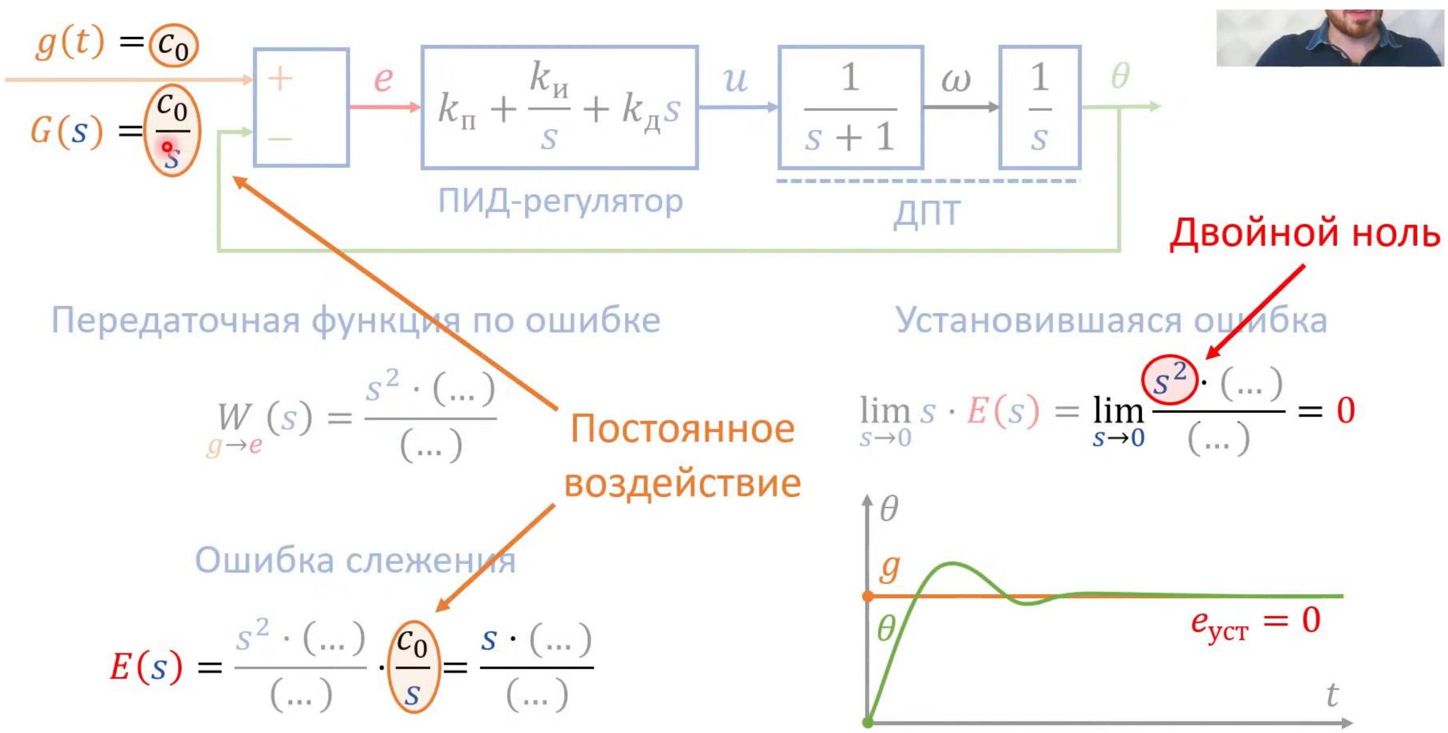
Передаточная функция по ошибке

$$\underset{g\to e}{W}(s) = \frac{1}{1 + W(s)} = \frac{1}{1 + \left(k_п + \frac{k_и}{s} + k_д s\right) \cdot \left(\frac{1}{s+1}\right) \cdot \frac{1}{s}}$$

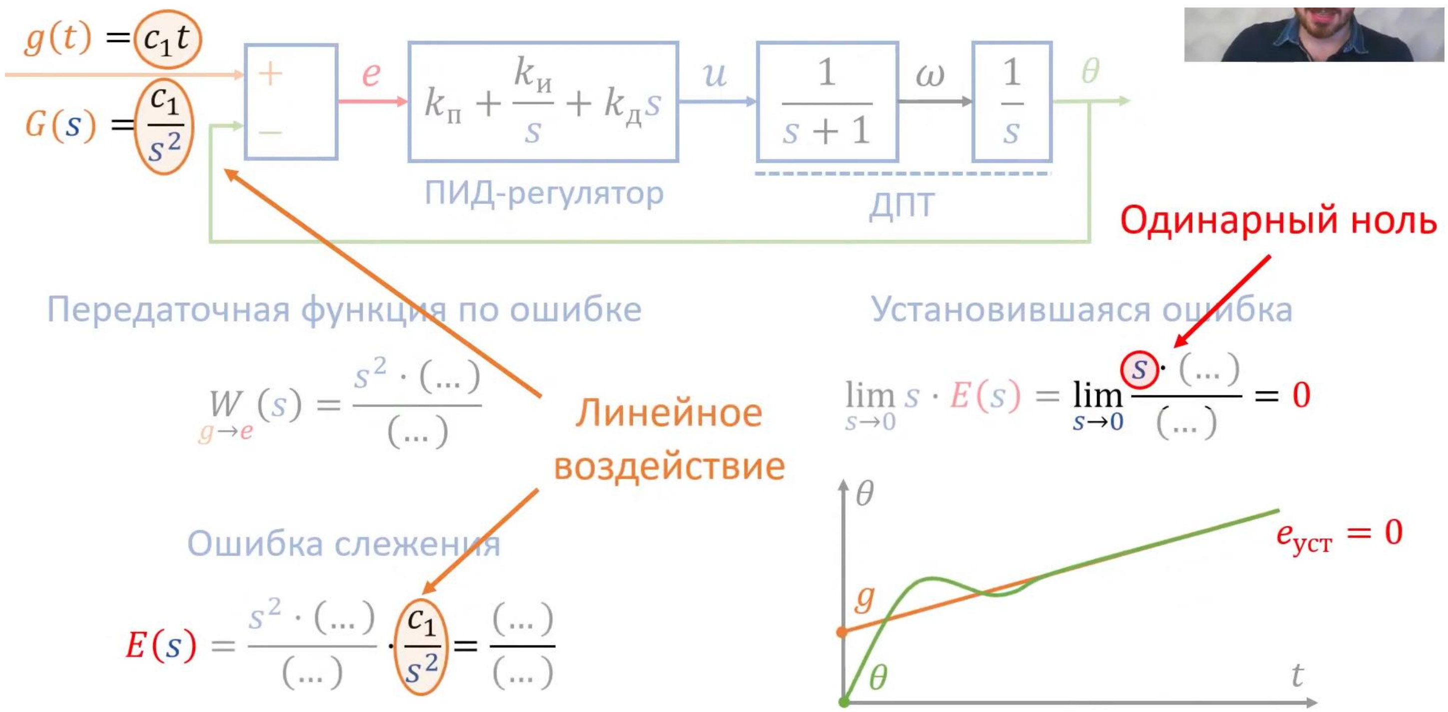
$$\underset{g\to e}{W}(s) = \frac{s^2(s+1)}{s^3 + (1 + k_д)s^2 + k_п s + k_и}$$

Рассмотрим постоянное задающее воздействие

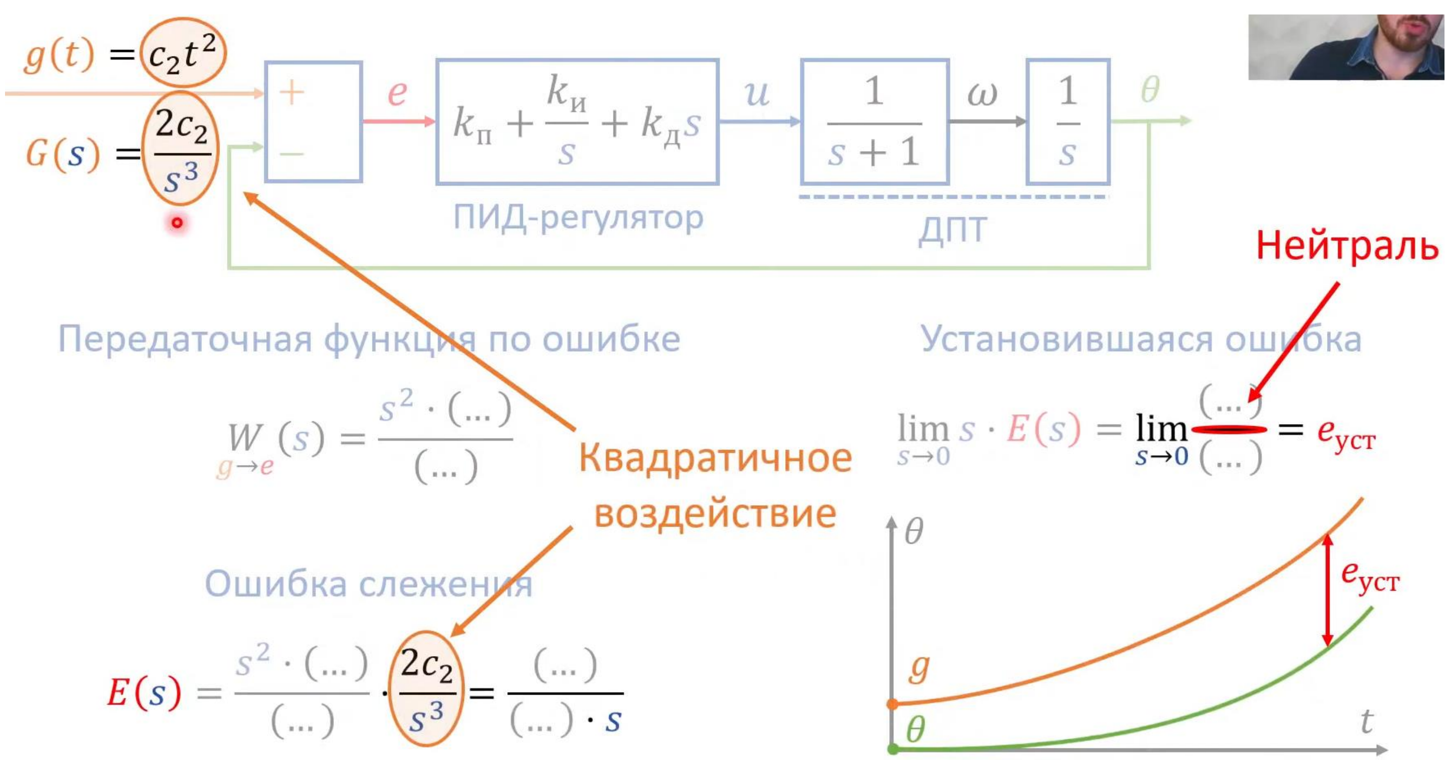




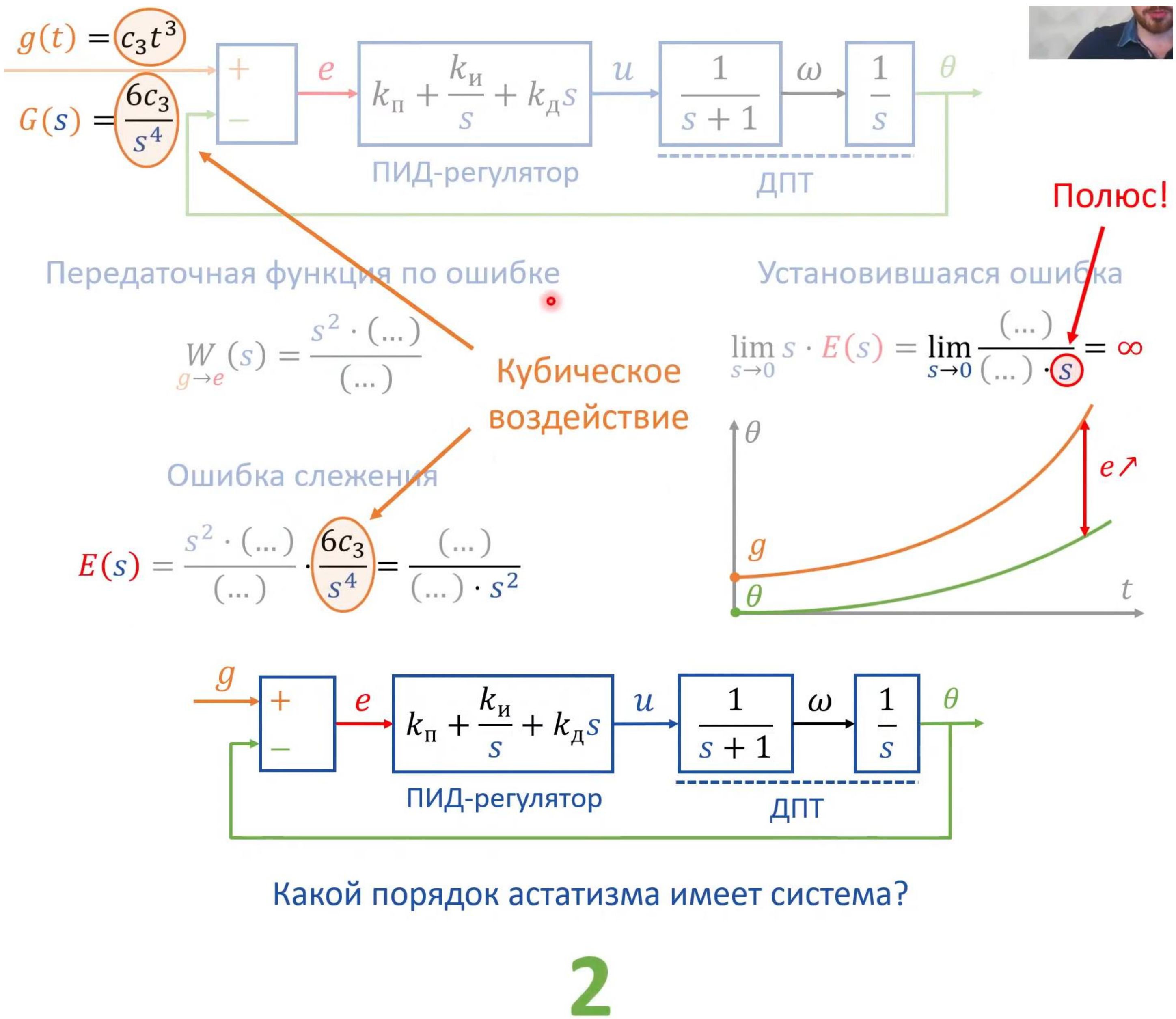
Рассмотрим линейно растущее задающее воздействие



Рассмотрим квадратично растущее задающее воздействие

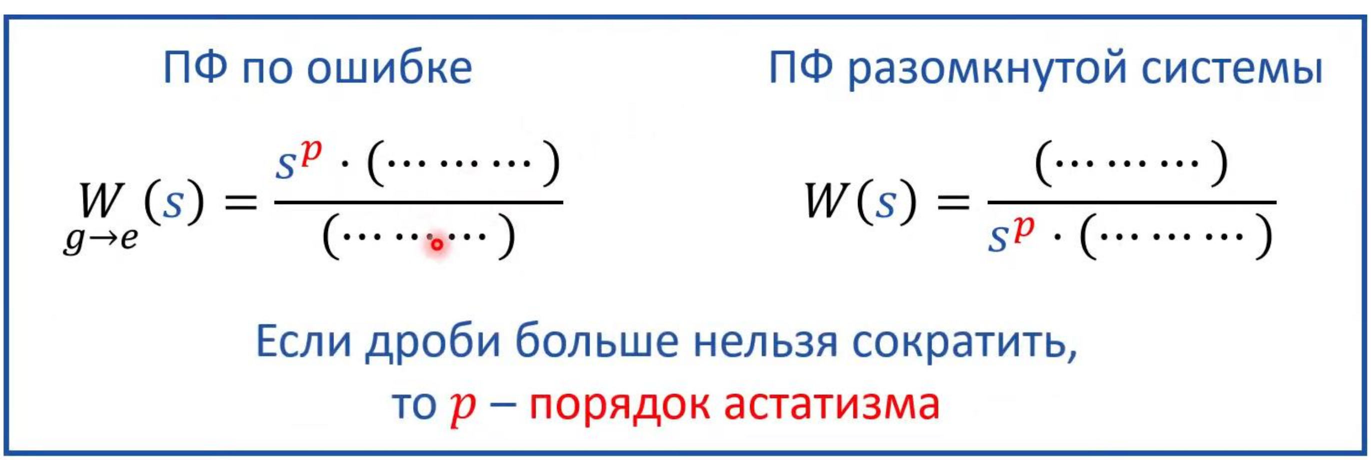


Рассмотрим кубически растущее задающее воздействие

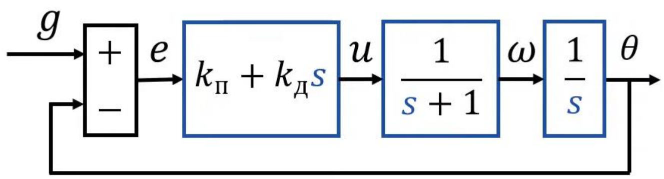


Астатизм и передаточные функции

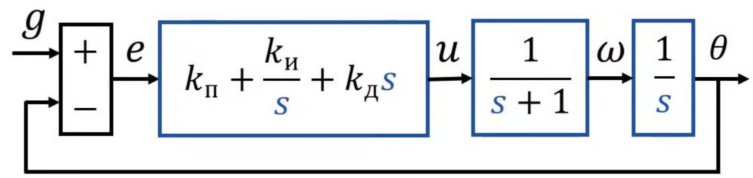
Как определить порядок астатизма по передаточным функциям?



ДПТ + ПД-регулятор



ДПТ + ПИД-регулятор

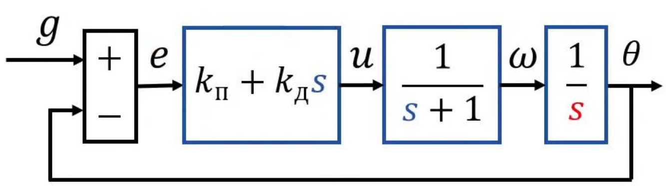


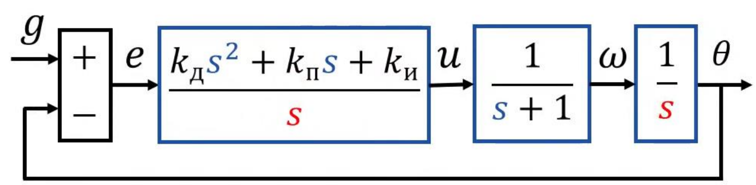
$$\underset{g\to e}{W}(s) = \frac{s(s+1)}{s^2 + (1+k_д)s + k_п}$$

$$\underset{g\to e}{W}(s) = \frac{s^2(s+1)}{s^3 + (1+k_д)s^2 + k_п s + k_и}$$

Астатизм первого порядка

Астатизм второго порядка





Один чистый интегратор

$\Downarrow$

Астатизм первого порядка

Два чистых интегратора

$\Downarrow$

Астатизм второго порядка

Что значит слово астатизм?

Астатизм – нестатичность, подвижность системы

Чем больше порядок астатизма, тем точнее слежение системы за быстрыми сигналами

Общие мысли про ПИД-регуляторы

Передаточная функция обобщённого ПИД-регулятора

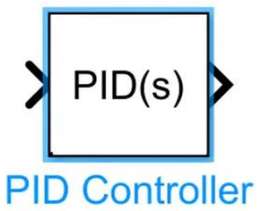
$$\boxed{\ldots + k_{д3}s^3 + k_{д2}s^2 + k_{д1}s + k_п + \frac{k_{и1}}{s} + \frac{k_{и2}}{s^2} + \frac{k_{и3}}{s^3} + \cdots}$$

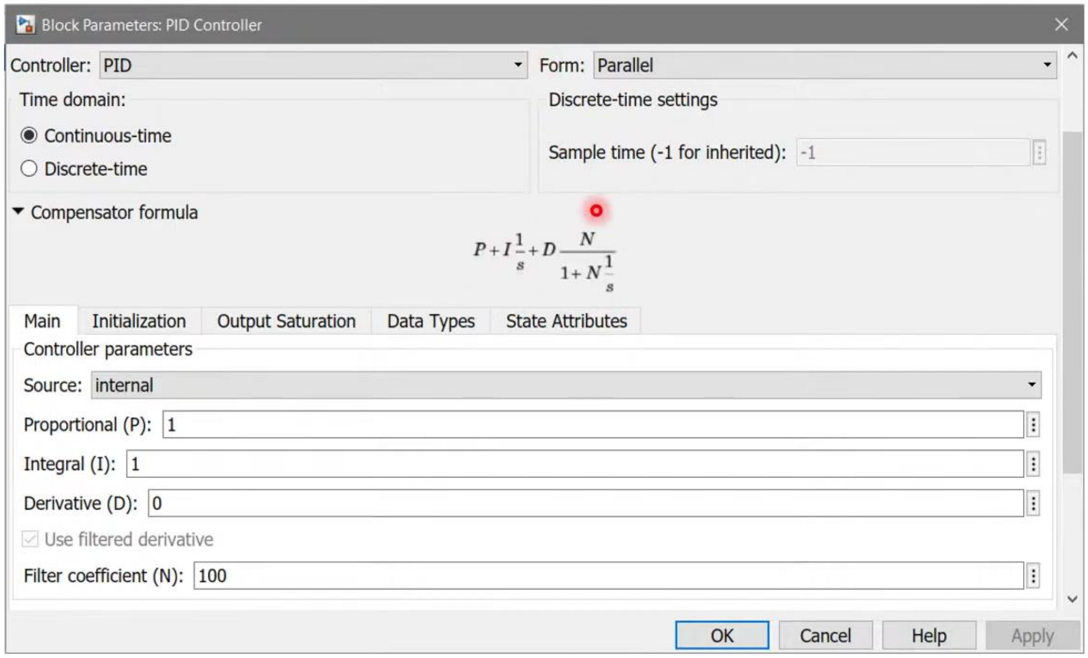
Улучшают устойчивость

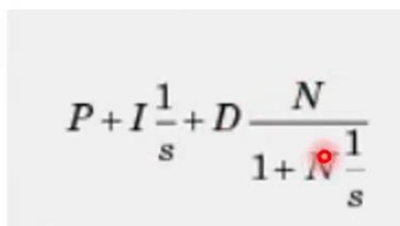
Повышают порядок астатизма

Дифференциальные составляющие усиливают шумы,
да и реализованы могут быть только приближённо

Интегральные составляющие повышают порядок системы и ухудшают её устойчивость





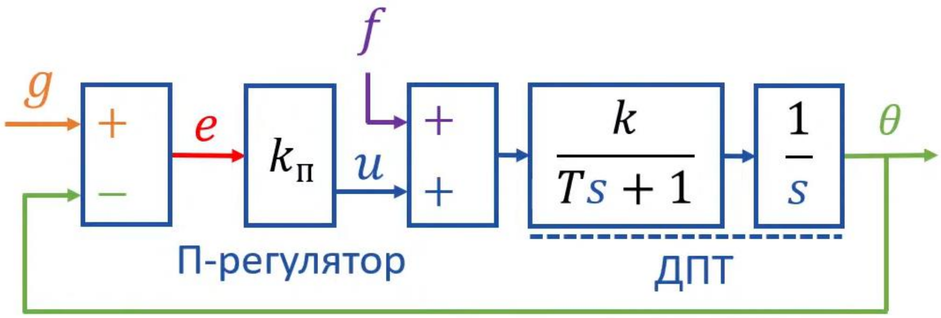


$$P + I\frac{1}{s} + D\frac{N}{I + N\frac{1}{s}} \xrightarrow[N \to \infty]{} P + I\frac{1}{s} + Ds$$

Матлабовский ПИД-регулятор

Истинный ПИД-регулятор

Настоящий двигатель с П-регулятором

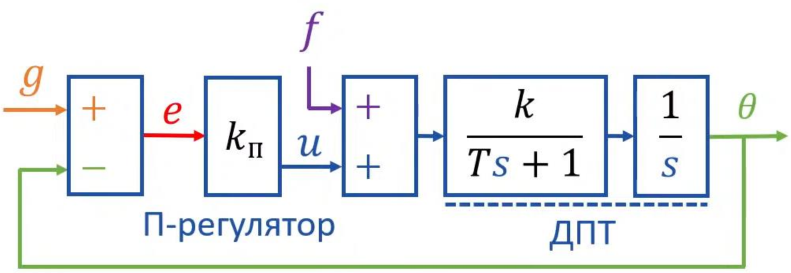


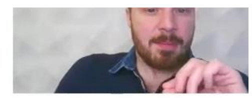
$$\underset{g\to e}{W}(s) = \frac{E(s)}{G(s)} = \frac{(Ts+1)\cdot s}{Ts^2 + s + kk_п}$$

Астатизм первого порядка
по задающему воздействию

$$\underset{f\to e}{W}(s) = \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{-k}{Ts^2 + s + kk_п}$$

Астатизм нулевого порядка
по внешнему возмущению





$k = 114.49, °/(В \cdot с)$

$T = 0.077, с$

$$g(t) = c_0 \qquad G(s) = \frac{c_0}{s}$$

Постоянное задающее воздействие

$$f(t) = f_0 \qquad F(s) = \frac{f_0}{s}$$

Постоянное внешнее возмущение

$$E(s) = \underset{g\to e}{W}(s)\cdot G(s) + \underset{f\to e}{W}(s)\cdot F(s)$$

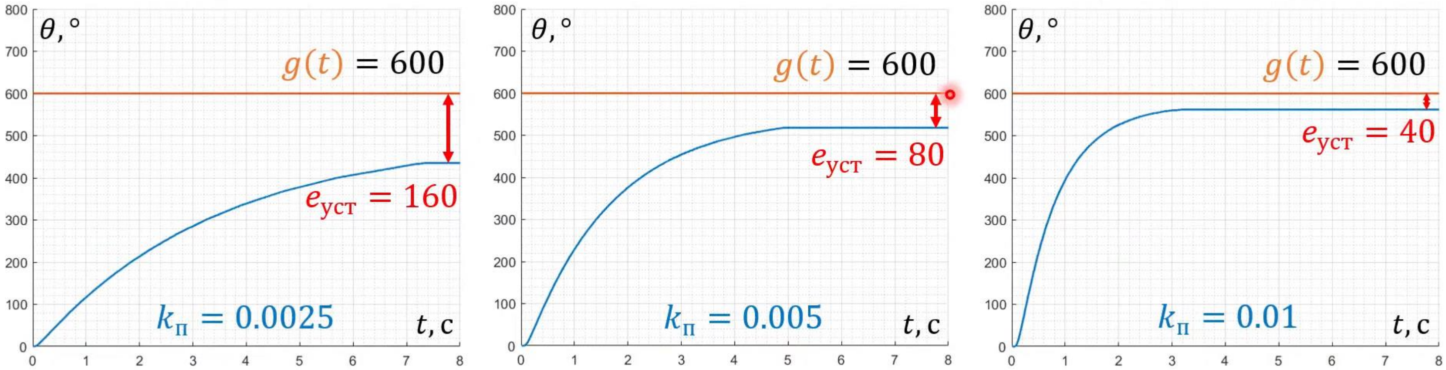
$$g(t) = c_0 \qquad G(s) = \frac{c_0}{s}$$

$$f(t) = f_0 \qquad F(s) = \frac{f_0}{s}$$

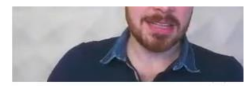
$$E(s) = \frac{(Ts+1)\cdot s}{Ts^2 + s + kk_п}\cdot\left(\frac{c_0}{s}\right) + \frac{-k}{Ts^2 + s + kk_п}\cdot\left(\frac{f_0}{s}\right)$$

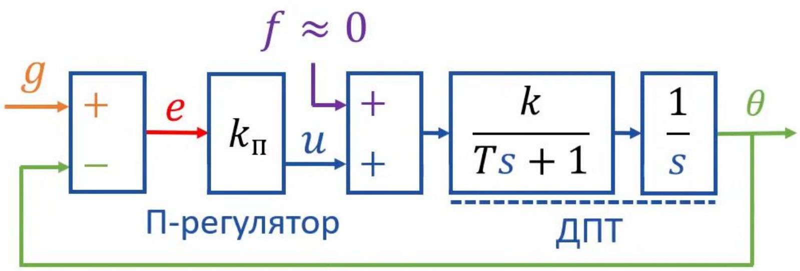
Установившаяся ошибка обратно
пропорциональна коэффициенту регулятора

$$e_{уст} = 0 + \left(-\frac{f_0}{k_п}\right) = -\frac{f_0}{k_п}$$



Рассмотрим линейно и квадратично растущее задающее воздействие (в этом случае сила трения покоя будет примерно равна 0)





$k = 114.49, °/(\text{В} \cdot \text{с})$

$T = 0.077, \text{с}$

$$g(t) = c_0 + c_1 t$$

$$G(s) = \frac{c_0 s + c_1}{s^2}$$

Линейно растущее задающее воздействие

$$E(s) = \underset{g \to e}{W}(s) \cdot G(s)$$

$$g(t) = c_0 + c_1 t$$

$$G(s) = \frac{c_0 s + c_1}{s^2}$$

Линейно растущее задающее воздействие

$$E(s) = \frac{(Ts + 1) \cdot s}{Ts^2 + s + kk_\text{п}} \cdot \left(\frac{c_0 s + c_1}{s^2}\right)$$

$$e_\text{уст} = \frac{c_1}{kk_\text{п}}$$

Установившаяся ошибка обратно пропорциональна коэффициенту регулятора

$$g(t) = c_0 + c_1 t$$

$$G(s) = \frac{c_0 s + c_1}{s^2}$$

Линейно растущее задающее воздействие

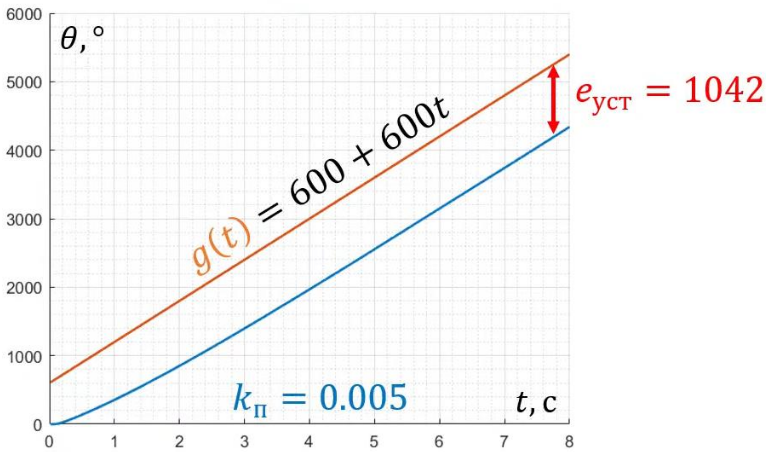
$$E(s) = \frac{(Ts+1)\cdot s}{Ts^2 + s + kk_п} \cdot \left(\frac{c_0 s + c_1}{s^2}\right)$$

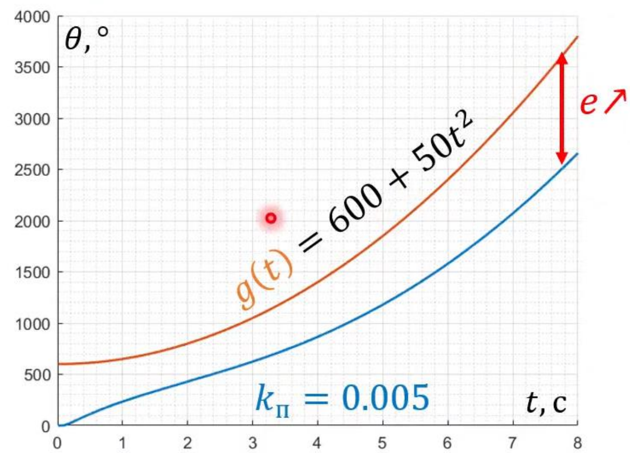
$$e_{уст} = \frac{c_1}{kk_п}$$

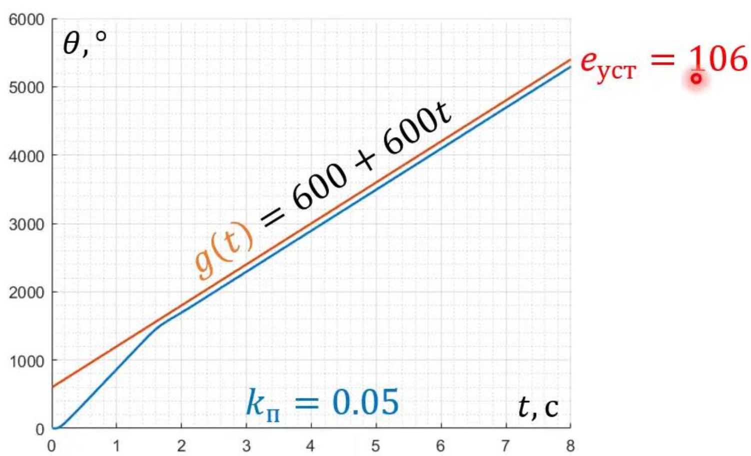
Для значений

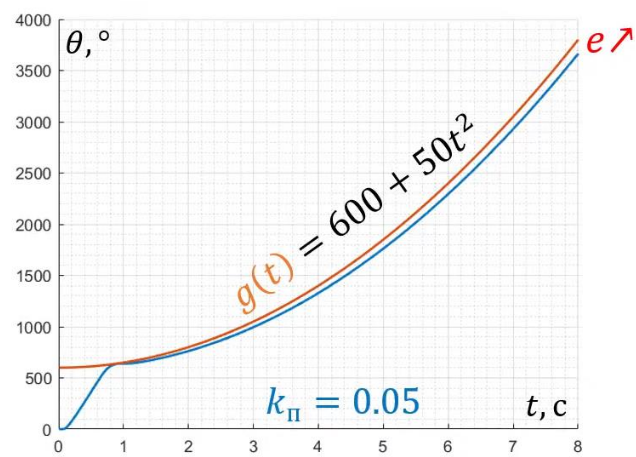
$$g(t) = 600 + 600t$$
$$k_п = 0.005$$

$$e_{уст} = \frac{600}{114 \cdot 0.005} = 1050$$

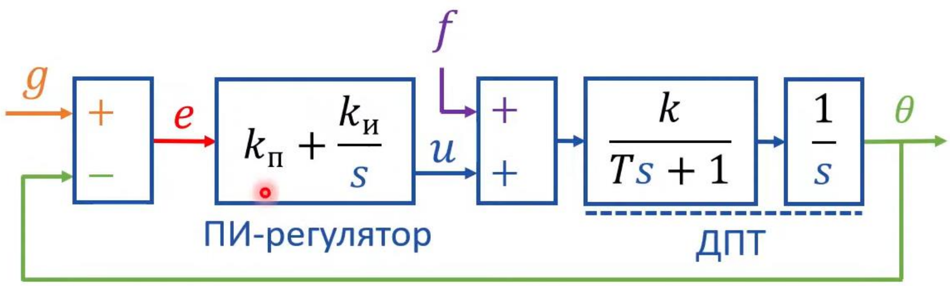








Настоящий двигатель с ПИ-регулятором

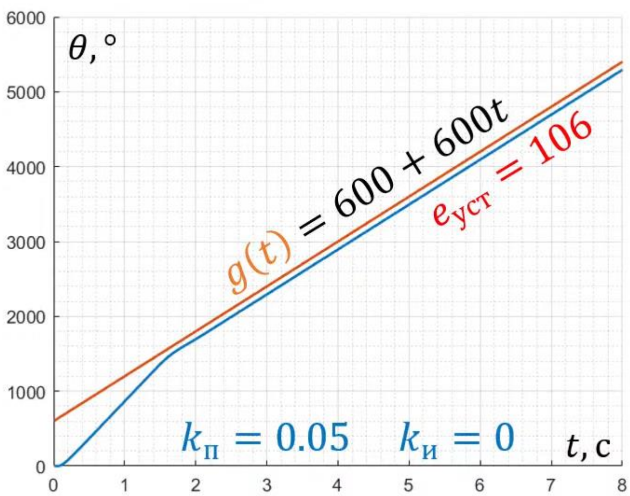


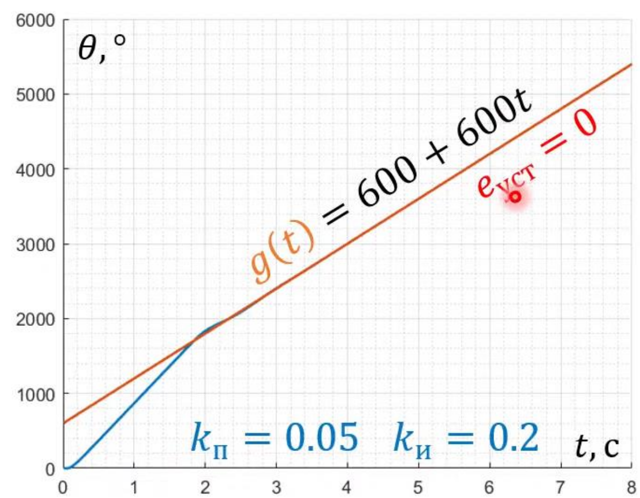
$$\underset{g\to e}{W}(s) = \frac{E(s)}{G(s)} = \frac{(Ts+1)\cdot s^2}{Ts^3 + s^2 + kk_п s + k_и}$$

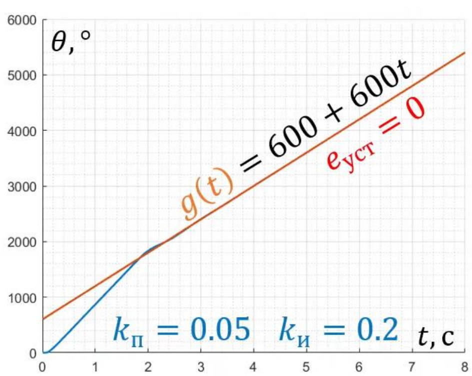
$$\underset{f\to e}{W}(s) = \frac{E(s)}{F(s)} = \frac{-ks}{Ts^3 + s^2 + kk_п s + k_и}$$

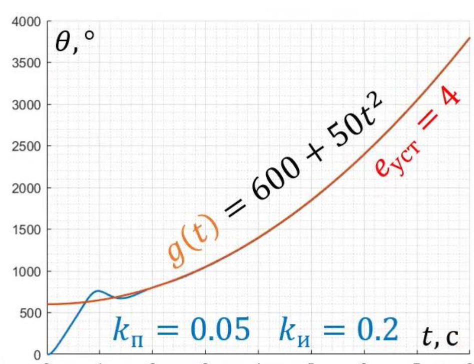
Астатизм второго порядка
по задающему воздействию

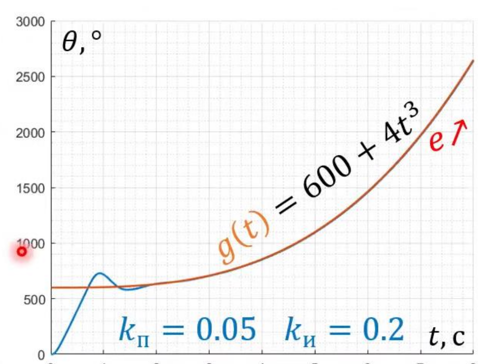
Астатизм первого порядка
по внешнему возмущению

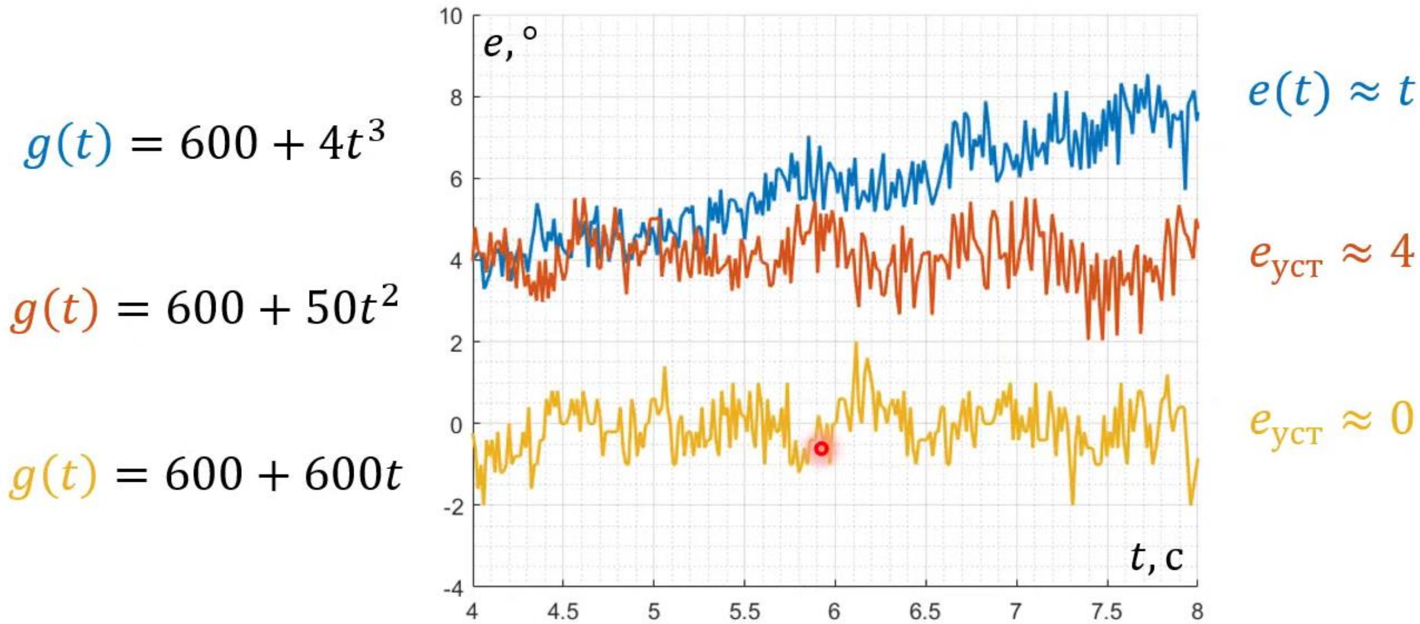




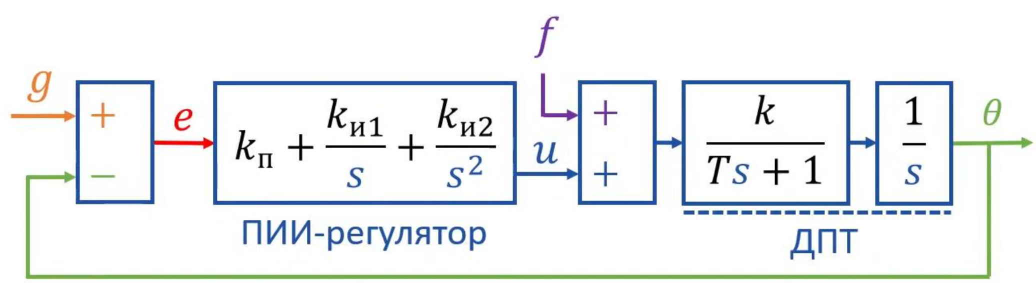








Настоящий двигатель с ПИИ-регулятором

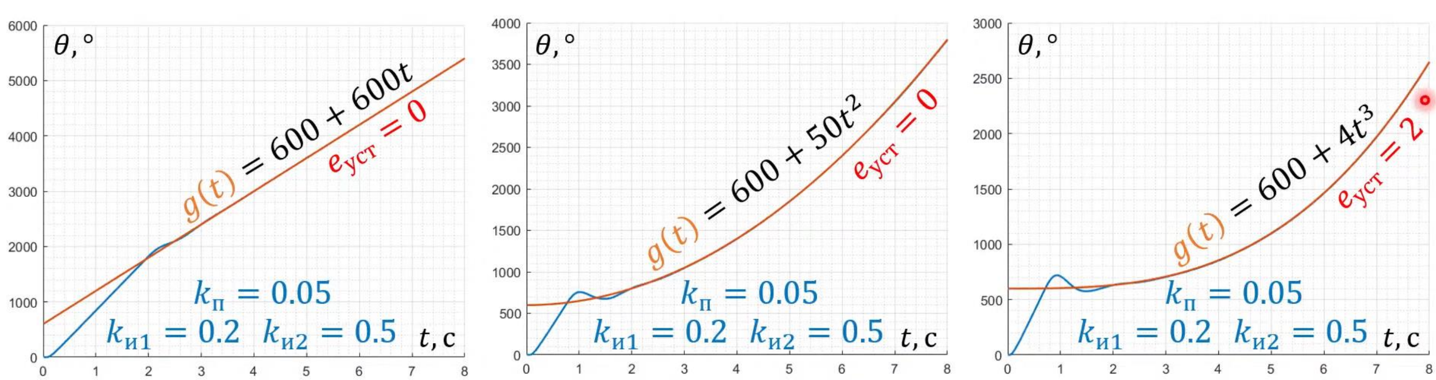


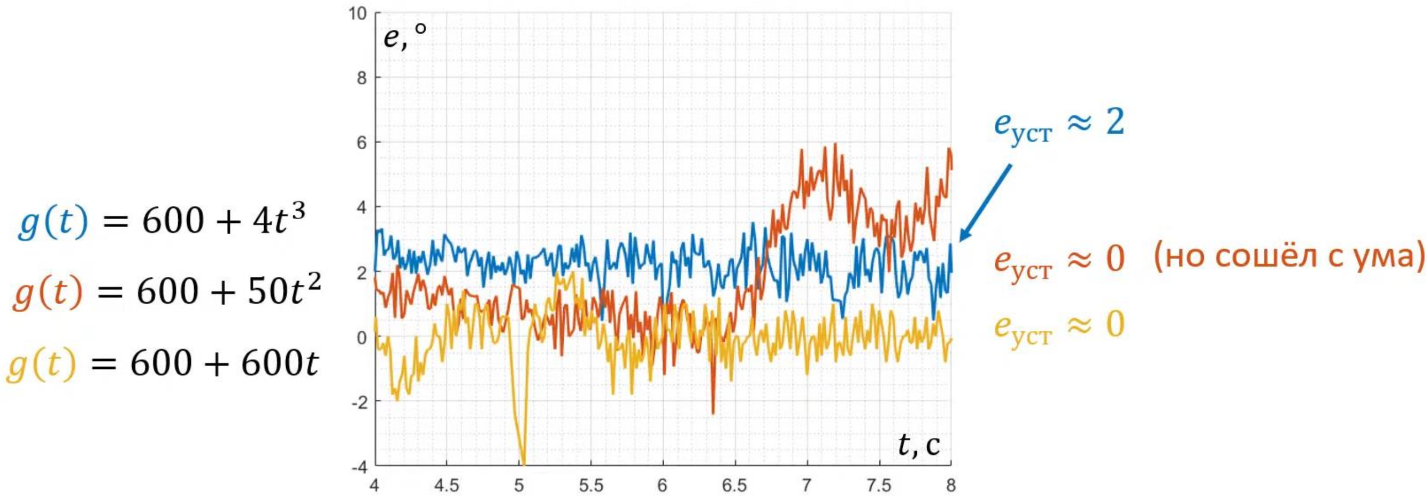
$$W_{g\to e}(s) = \frac{(Ts+1)\cdot s^3}{Ts^4 + s^3 + kk_{\text{п}}s^2 + k_{\text{и}1}s + k_{\text{и}2}}$$

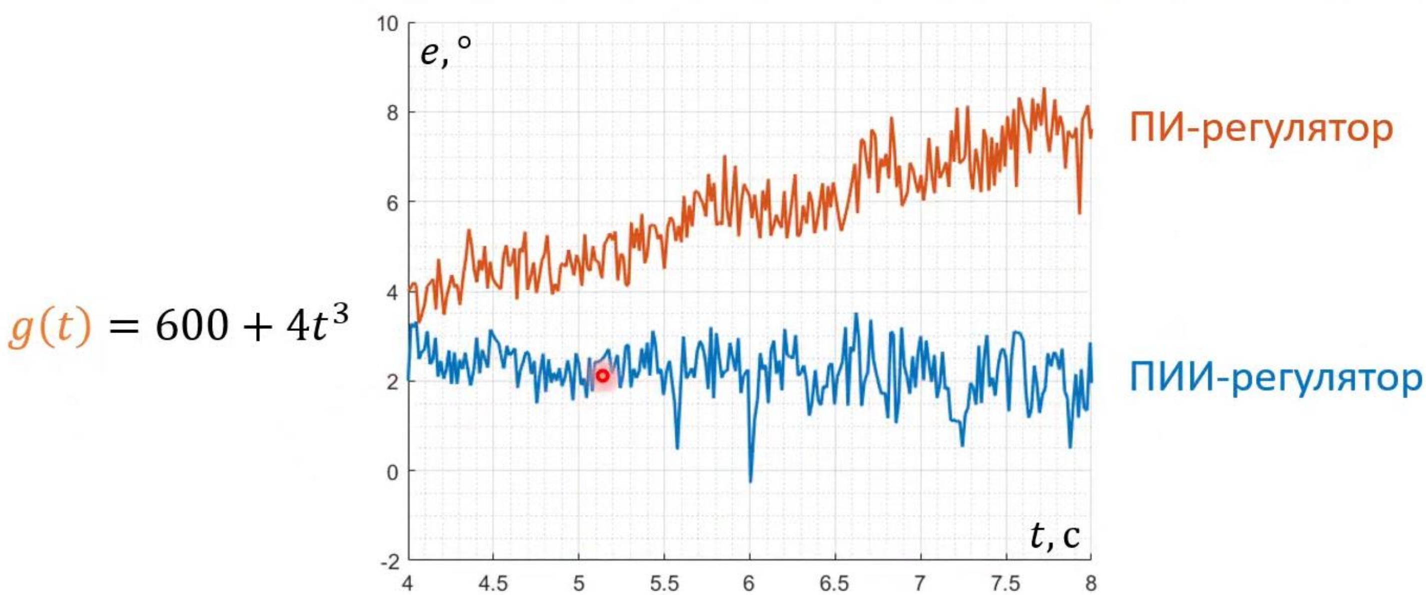
$$W_{f\to e}(s) = \frac{-ks^2}{Ts^4 + s^3 + kk_{\text{п}}s^2 + k_{\text{и}1}s + k_{\text{и}2}}$$

Астатизм третьего порядка по задающему воздействию

Астатизм второго порядка по внешнему возмущению







Самый общий вид линейного регулятора

Передаточная функция ПИД-регулятора

$$\frac{k_{д1}s^2 + k_{п}s + k_{и1}}{s}$$

Как это скучно…

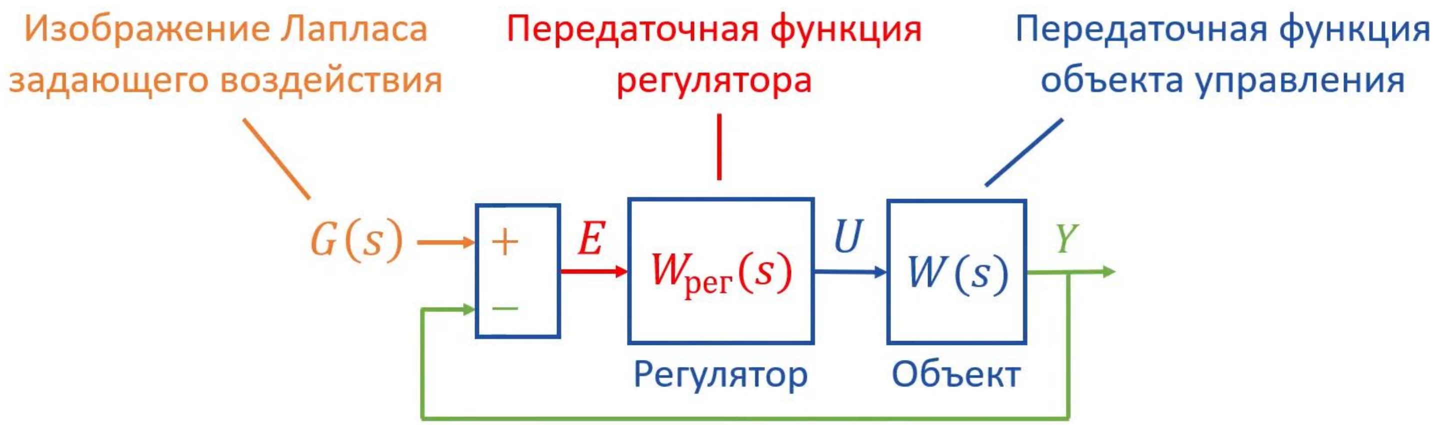
Передаточная функция ПИИИДДД-регулятора

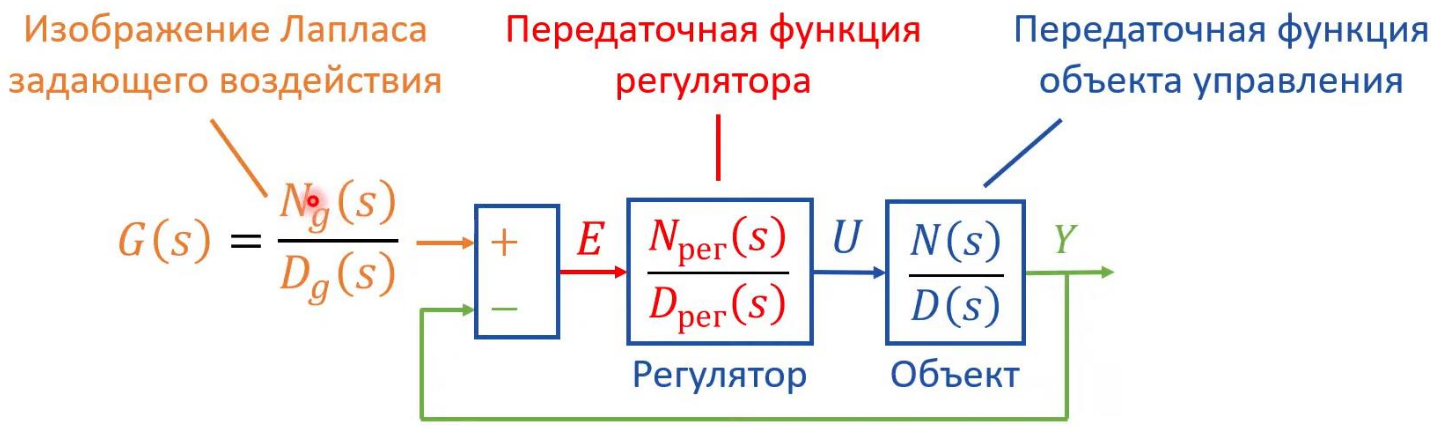
$$\frac{k_{д3}s^6 + k_{д2}s^5 + k_{д1}s^4 + k_{п}s^3 + k_{и1}s^2 + k_{и2}s + k_{и3}}{s^3}$$

Самый общий вид линейного регулятора третьего порядка

$$\boxed{\dfrac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}}$$

Принцип внутренней модели





Если все корни $D_g(s)$ отрицательные, то $\lim\limits_{t \to +\infty} g(t) = 0$

Предположим, что корни $D_g(s)$ неотрицательные

$$E = \underset{g \to e}{W} \cdot G$$

$$E = \frac{1}{1 + \frac{N_{\text{рег}}}{D_{\text{рег}}} \cdot \frac{N}{D}} \cdot \frac{N_g}{D_g}$$

$$E = \frac{D_{\text{рег}} D}{D_{\text{рег}} D + N_{\text{рег}} N} \cdot \frac{N_g}{D_g}$$

$$E = \underset{g \to e}{W} \cdot G$$

Должны полностью сократиться, иначе у $E(s)$ будут положительные полюса

$$E = \frac{D_{\text{рег}} D}{D_{\text{рег}} D + N_{\text{рег}} N} \cdot \frac{N_g}{D_g}$$

$$E = \frac{D_{\text{рег}} D}{D_{\text{рег}} D + N_{\text{рег}} N} \cdot \frac{N_g}{D_g}$$

Принцип внутренней модели

Для успешного слежения необходимо, чтобы полюса разомкнутой системы (регулятор + объект) включали в себя полюса задающего воздействия

$$E = \frac{D_{\text{рег}} D}{D_{\text{рег}} D + N_{\text{рег}} N} \cdot \frac{N_g}{D_g}$$

Слежение!

Порядок синтеза регулятора

1. Выбираем $D_{\text{рег}}$ так, чтобы корни $D_{\text{рег}} D$ включали в себя корни D_g

$$E = \frac{D_{\text{рег}} D}{\boxed{D_{\text{рег}} D + N_{\text{рег}} N}} \cdot \frac{N_g}{D_g}$$

Устойчивость!

Порядок синтеза регулятора

1. Выбираем $D_{\text{рег}}$ так, чтобы корни $D_{\text{рег}} D$ включали в себя корни D_g
2. Выбираем $N_{\text{рег}}$ так, чтобы корни $D_{\text{рег}} D + N_{\text{рег}} N$ были отрицательными

Настоящий двигатель со специальным регулятором

Знаем общий вид задающего воздействия

$$g(t) = A\cos(t + \varphi)$$

Хотим найти регулятор, который точнее других сможет проследить за ним

$$g(t) = A\cos(t+\varphi)$$

$$G(s) = \frac{c_1 s + c_2}{s^2+1}$$

Амплитуда и фаза влияют на числитель

Знаменатель (полюса) определяется частотой

Принцип внутренней модели

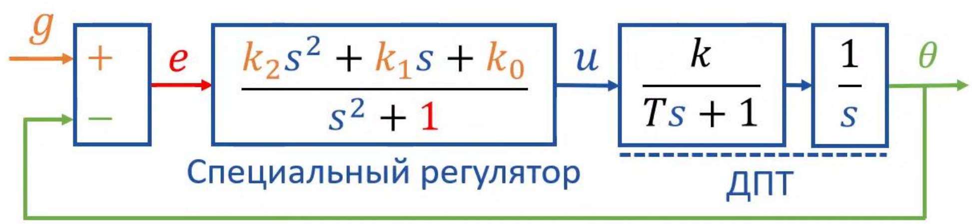
Устойчивость

$$W_{\text{рег}}(s) = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s^2+1}$$

Слежение

$$g(t) = A\cos(t+\varphi)$$

$$G(s) = \frac{c_1 s + c_2}{s^2+1}$$



Амплитуда и фаза влияют на числитель

Знаменатель (полюса) определяется частотой

$$W_{g\to e}(s) = \frac{(Ts+1)\cdot s\cdot(s^2+1)}{Ts^4 + s^3 + (T+kk_2)s^2 + (1+kk_1)s + kk_0}$$

Готовы сократиться!

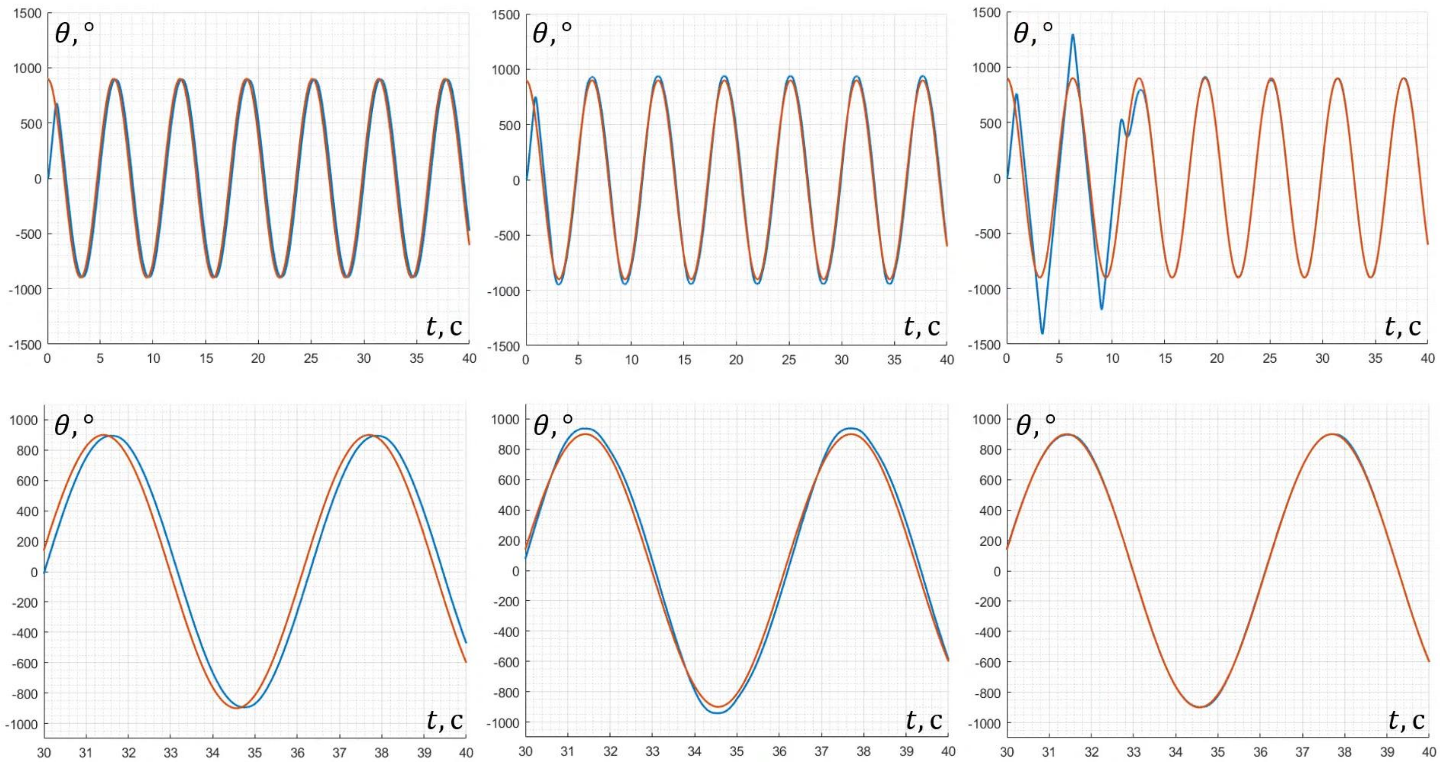
Коэффициенты помогут добиться отрицательных корней знаменателя

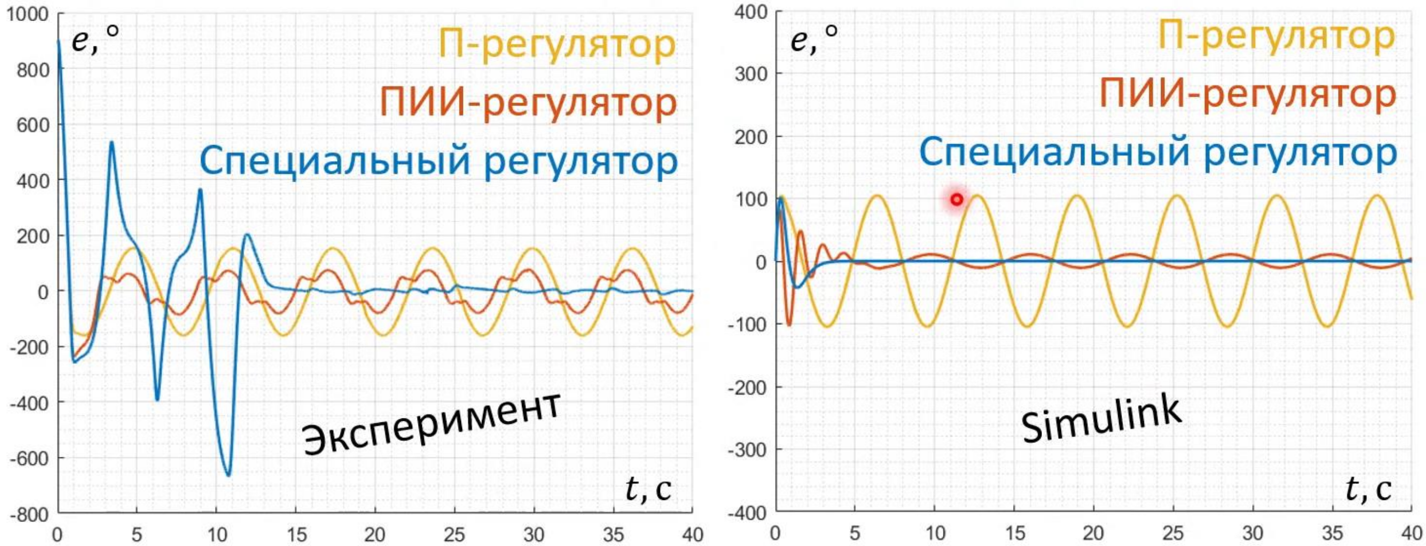
Кто лучше проследит за задающим воздействием?

$$g(t) = 900\cos(t)$$

$k_{\text{п}}$	VS	$k_{\text{п}} + \frac{k_{\text{и}1}}{s} + \frac{k_{\text{и}2}}{s^2}$	VS	$\frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s^2+1}$
П-регулятор		ПИИ-регулятор		Специальный регулятор
СИЛЬНЫЙ И ОПЫТНЫЙ		**НЕВЕРОЯТНО ПОДВИЖНЫЙ**		**КАКОЙ-ТО СТРАННЫЙ**

$\boxed{k_{п}}$	VS	$\boxed{k_{п} + \frac{k_{и1}}{s} + \frac{k_{и2}}{s^2}}$	VS	$\boxed{\frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s^2 + 1}}$
П-регулятор		ПИИ-регулятор		Специальный регулятор





За внешними воздействиями такого вида
наш странный регулятор проследит точнее всех

$g(t) = 900\cos(t) \qquad g(t) = 400\sin(t) \qquad g(t) = -100\sin(t + 52°) \qquad \cdots$

$$\boxed{\frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s^2 + 1}}$$

Специальный регулято