



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

---

**Кафедра релейной защиты и автоматизации энергосистем**

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3**

**По курсу «Теория автоматического управления и системы автоматического  
управления»**

**Тема: «определение настроечных параметров регулятора методом ручного подбора»**

Выполнил:	Воложанин А. С.
Группа:	Э-13М-24
Вариант:	1
Проверил:	Дегтярев Д. А.

Москва, 2024

## Предварительный отчёт (подготовка)

**Цель работы:** закрепление теоретических знаний и приобретение практических навыков определения качества процесса управления системы автоматического управления в установившихся и переходных режимах прямыми и косвенными методами, а также настройки типовых регуляторов.

1. Привести исходные данные: привести структурную схему и передаточные функции всех элементов системы.

### Исходные данные.

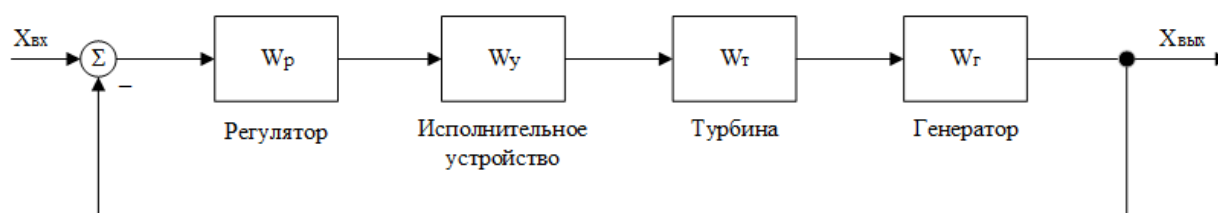


Рисунок 1 – Структура АСУ с регулятором

Таблица 1 – Перечень используемых элементов

Наименование элемента		Условное обозначение	Передаточная функция
генератор		$W_{\Gamma}$	$\frac{1}{T_{\Gamma} \cdot p + 1}$
турбина	гидравлическая	$W_T$	$\frac{0,01 \cdot T_{\Gamma T} \cdot p + 1}{0,05 \cdot T_{\Gamma} \cdot p + 1}$
	паровая		$\frac{k_{\Pi T}}{T_{\Pi T} \cdot p + 1}$
исполнительное устройство		$W_y$	$\frac{k_y}{T_y \cdot p + 1}$
регулятор	пропорциональный (П)	$W_p$	$k_{p.п}$
	пропорционально-интегральный (ПИ)		$k_{p.п} + \frac{k_{p.и}}{p}$
	пропорционально-дифференциальный (ПД)		$k_{p.п} + k_{p.д} \cdot p$
	пропорционально-интегральный дифференциальный (ПИД)		$k_{p.п} + \frac{k_{p.и}}{p} + k_{p.д} \cdot p$

Таблица 2 – Параметры звеньев по вариантам

№ Варианта	$k_y$	$T_y, \text{с}$	$T_r, \text{с}$	Турбина	$T_{гт}, \text{с}$	$T_{пт}, \text{с}$	$k_{пт}$	Обратная связь	$k_{ос}$	$T_{ос}, \text{с}$
3	22	20.0	8.0	Гидро-	1.0	-	-	АЖ	4	3.0

Таблица 3 – Предельные показатели качества

№ Варианта	Время регулирования, с	Показатель колебательности	Перерегулирование, %	Тип регулятора
3	13	1,19	24	ПИД, П

2. Привести эквивалентные передаточные функции с регулятором и без регулятора.

$$W_T = \frac{0,01 \cdot T_{гт} \cdot p + 1}{0,05 \cdot T_r \cdot p + 1}$$

$$W_r = \frac{1}{T_r \cdot p + 1}$$

$$W_y = \frac{k_y}{T_y \cdot p + 1}$$

$$W_{p1} = k_{п.п} + \frac{k_{п.и}}{p} + k_{п.д} \cdot p$$

$$W_{p2} = k_{п.п}$$

Эквивалентная передаточная функция без регулятора:

$$\begin{aligned}
 W_p(p) &= W_y \cdot W_T \cdot W_r = \frac{k_y}{T_y \cdot p + 1} \cdot \frac{0,01 \cdot T_{гт} \cdot p + 1}{0,05 \cdot T_r \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{T_r \cdot p + 1} = \\
 &= \frac{k_y \cdot 0,01 \cdot T_{гт} \cdot p + k_y}{(T_y \cdot p + 1)(0,05 \cdot T_r \cdot p + 1)(T_r \cdot p + 1)} = \\
 &= \frac{k_y \cdot 0,01 \cdot T_{гт} \cdot p + k_y}{(0,05 \cdot T_y T_r p^2 + T_y p + 0,05 \cdot T_r p + 1)(T_r \cdot p + 1)} = \\
 &= \frac{k_y \cdot 0,01 \cdot T_{гт} \cdot p + k_y}{(0,05 \cdot T_y T_r^2 p^3 + T_y T_r p^2 + 0,05 T_r^2 p^2 + T_r p + 0,05 T_y T_r p^2 + T_y p + 0,05 T_r p + 1)} \\
 &= \frac{k_y \cdot 0,01 \cdot T_{гт} \cdot p + k_y}{0,05 \cdot T_y T_r^2 p^3 + (T_y T_r + 0,05 T_r^2 + 0,05 T_y T_r) p^2 + (T_r + T_y + 0,05 T_r) p + 1}
 \end{aligned}$$

$$W_p(p) = \frac{22 \cdot 0,01 \cdot p + 22}{0,05 \cdot 20 \cdot 8^2 p^3 + (20 \cdot 8 + 0,05 \cdot 8^2 + 0,05 \cdot 20 \cdot 8)p^2 + (8 + 20 + 0,05 \cdot 8)p + 1}$$

$$W_p(p) = \frac{0,22p + 22}{64p^3 + 173p^2 + 28,4p + 1} =$$

$$= \frac{22p + 2200}{6400p^3 + 17300p^2 + 2840p + 100}$$

Эквивалентная передаточная функция замкнутой системы:

$$W_{oc}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc} \cdot p + 1} = \frac{4}{3 \cdot p + 1}$$

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p) \cdot W_{oc}(p)} = \frac{\frac{22p + 2200}{6400p^3 + 17300p^2 + 2840p + 100}}{1 + \left( \frac{22p + 2200}{6400p^3 + 17300p^2 + 2840p + 100} \right) \cdot \frac{4}{3p + 1}} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot (33p^2 + 3311p + 1100)}{4800p^4 + 14575p^3 + 6455p^2 + 807p + 2225}$$

Эквивалентная передаточная функция системы с ПИД-регулятором:

$$W_{p\text{ПИД}}(p) = W_{p1} \cdot W_p(p) = \left( k_{p.п} + \frac{k_{p.и}}{p} + k_{p.д} \cdot p \right) \cdot \frac{22p + 2200}{6400p^3 + 17300p^2 + 2840p + 100}$$

$$W_{3\text{ПИД}}(p) = \frac{\left( k_{p.п} + \frac{k_{p.и}}{p} + k_{p.д} \cdot p \right) \cdot (22p + 2200)}{6400p^3 + 17300p^2 + 2840p + 100 + \left( k_{p.п} + \frac{k_{p.и}}{p} + k_{p.д} \cdot p \right) \cdot (2p + 2200)}$$

Эквивалентная передаточная функция системы с П-регулятором:

$$W_{p\Pi}(p) = W_{p2} \cdot W_p(p) = (k_{p.п}) \cdot \frac{22p + 2200}{6400p^3 + 17300p^2 + 2840p + 100}$$

$$W_{3\Pi}(p) = \frac{(k_{p.п}) \cdot (22p + 2200)}{6400p^3 + 17300p^2 + 2840p + 100 + (k_{p.п}) \cdot (22p + 2200)}$$

### 3. Оценка показателей качества процесса управления для схемы без регулирования.

#### 1) Прямые оценки качества переходного процесса:

Прямые методы — это методы, позволяющие судить о показателях качества непосредственно по кривой переходного процесса.

Переходная характеристика замкнутой системы:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ W_3(p) \cdot \frac{1}{p} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{0,5 \cdot (33p^2 + 3311p + 1100)}{4800p^4 + 14575p^3 + 6455p^2 + 807p + 2225} \cdot \frac{1}{p} \right\}$$

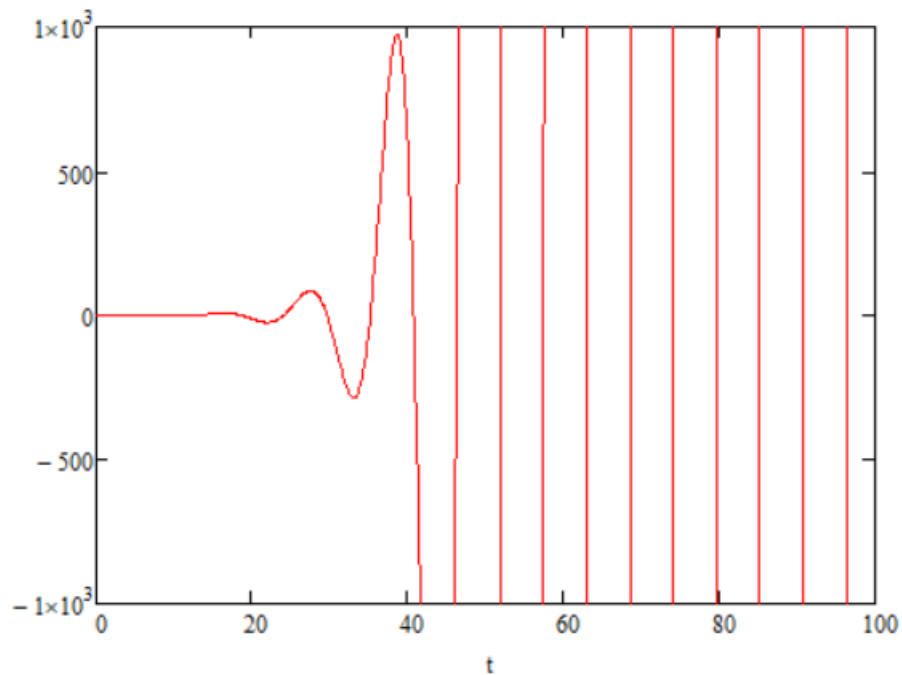


Рисунок 2 – Переходная характеристика замкнутой системы

По кривой переходного процесса можно сделать вывод, что система является неустойчивой и не достигает установившегося значения при отсутствии регулятора. В связи с этим отсутствует возможность оценить качество переходного процесса прямым методом.

## 2) Корневая оценка качества переходного процесса:

Корневой метод позволяет судить о качестве переходного процесса по корням числителя и знаменателя передаточной функции замкнутой системы. Корни числителя называются "нулями", а корни знаменателя – "полюсами". Влияние нулей на переходный процесс оценить очень тяжело, поэтому в основном оценку ведут по полюсам.

Произведем расчет полюсов (корней знаменателя) переходной характеристики.

$$4800p^4 + 14575p^3 + 6455p^2 + 807p + 2225 = 0$$

$$\lambda_{1,2} = -0,141 \pm j0,453$$

$$\lambda_3 = -2,5$$

$$\lambda_4 = -0,824$$

Данные для расчета времени регулирования и степени колебательности:

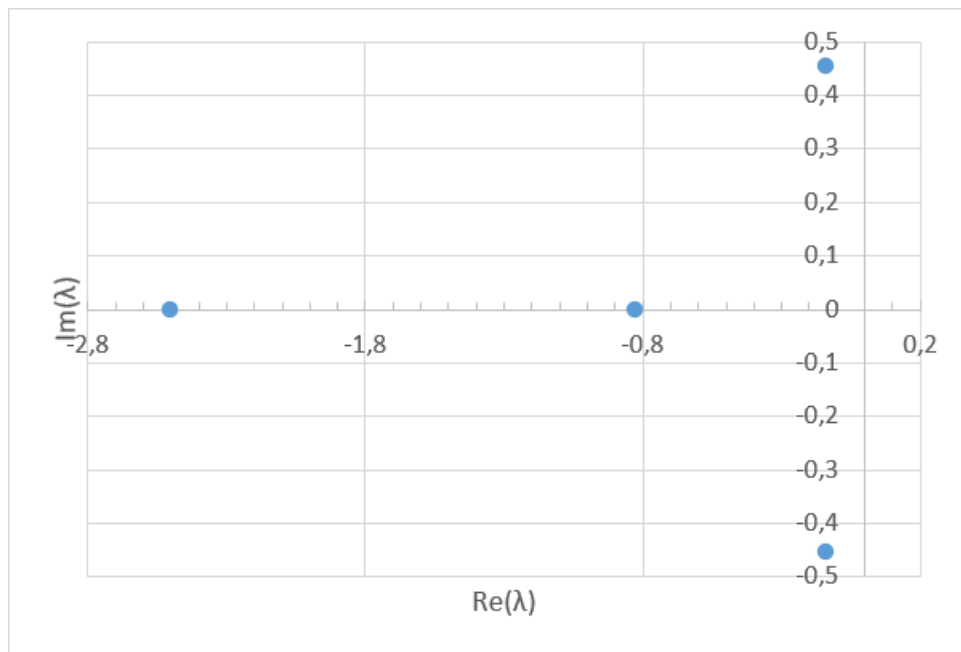


Рисунок 3 – Данные крайних полюсов

В связи с этим отсутствует возможность оценить качество переходного процесса по распределению корней на комплексной плоскости.

### 3) Частотная оценка качества переходного процесса:

Частотные показатели (критерии) качества САУ оценивают по графикам ее частотных характеристик (АФЧХ, АЧХ, ФЧХ, ЛАЧХ, ЛФЧХ). Оценка качества управления по амплитудно-частотной характеристике замкнутой САУ.

Данные максимума АЧХ:

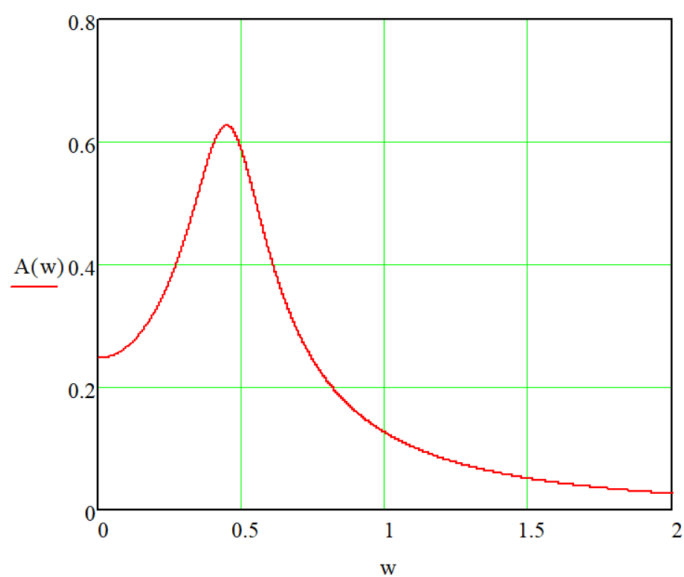


Рисунок 4 – Данные АЧХ

Колебательность:

$$M = \frac{A_{3\max}}{A_3(0)} = \frac{0,627}{0,247} = 2,54$$

Резонансная частота:

$$\omega_p = 0,45$$

Полоса пропускания:

$$f(\omega_0) \leq 0,707 \cdot A_3(0) = 0,707 \cdot 0,45 = 0,318$$

Частота среза:

$$\omega_{cp} = 0,746$$

Время переходного процесса:

$$t_n \cong (n) \frac{2\pi}{\omega_{cp}} = (\infty) \frac{2\pi}{0,746} = \infty \text{ с}$$

где  $n$  — число колебаний на графике переходного процесса.

#### 4) Интегральная оценка качества переходного процесса:

Интегральный метод оценивания основан на сравнении установившегося значения переходной характеристики с текущим. Т.к. переходная характеристика заданной системы не имеет установившегося значения, проведение оценки невозможно.

#### 4. Оценка показателей качества процесса управления для схемы с П-регулятором.

В первую очередь необходимо определить коэффициенты П-регулятора:

Для определения коэффициентов, используем метод подбора параметров (ручной). Для этого в программе Python смоделируем САУ с П-регулятором и будем изменять коэффициенты до тех пор, пока переходная характеристика не достигнет нужных значений показателей качества процесса управления.

Коэффициент пропорциональности:

$$k_{p.n} = 0,06$$

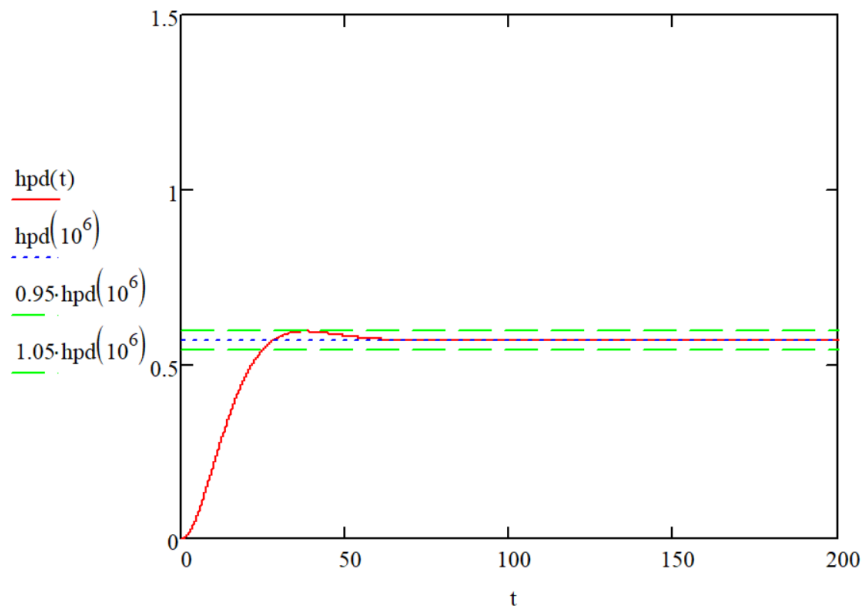


Рисунок 5 – Переходная характеристика САУ с П-регулятором

1) Прямые оценки качества переходного процесса:

Ошибка регулирования:

$$\varepsilon = 0,431$$

Степень затухания:

$$\varphi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = \frac{0,597 - 0,541}{0,597} = 0,042$$

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{h_{max1} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% = \frac{0,597 - 0,541}{0,597} \cdot 100\% = 4,25\% < 20\%$$

Колебательность можно определить только качественно:

$$N = \frac{t_p}{T_k} < 1 \text{ с}$$

2) Корневая оценка переходного процесса:



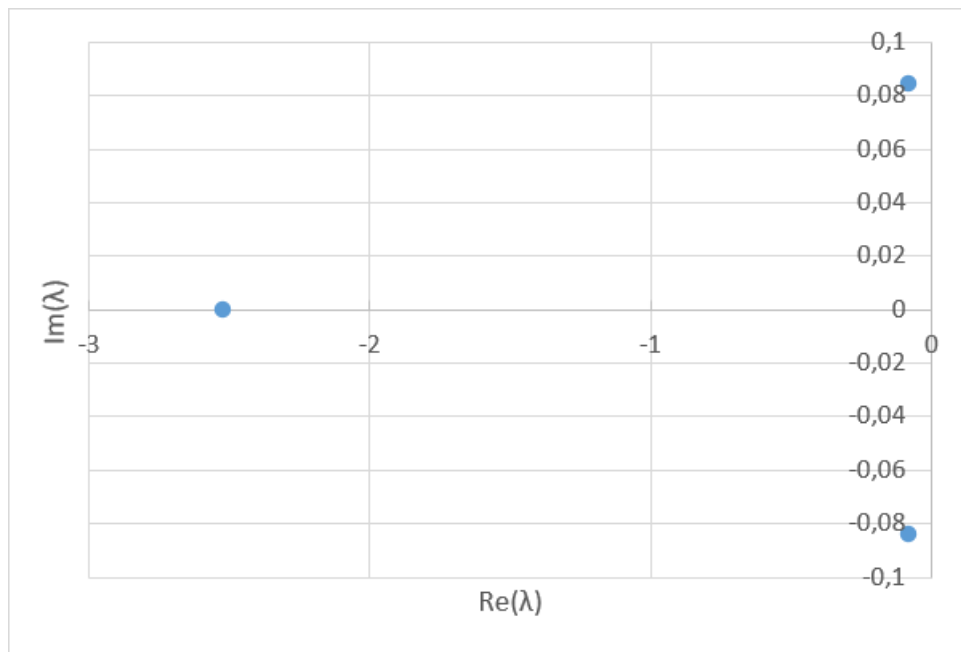


Рисунок 6 – Полюсы САУ с П-регулятором

Время регулирования:

$$t_{\text{пер}} = \frac{3}{a_{\min}} = \frac{3}{0,085} = 35,3 \text{ с}$$

Степень колебательности:

$$\mu = \left| \frac{j\omega}{a_{\kappa}} \right| = \tan \varphi_{\max} = \frac{0,084244}{0,085} = 0,991$$

Перерегулирование:

$$\sigma = e^{\frac{-\pi}{\mu}} \cdot 100\% = e^{\frac{-\pi}{0,991}} \cdot 100\% = 4,2\%$$

Степень затухания:

$$\varphi = 1 - e^{\frac{-2\pi}{\mu}} = 1 - e^{\frac{-2\pi}{0,991}} = 0,998$$

3) Частотная оценка переходного процесса:

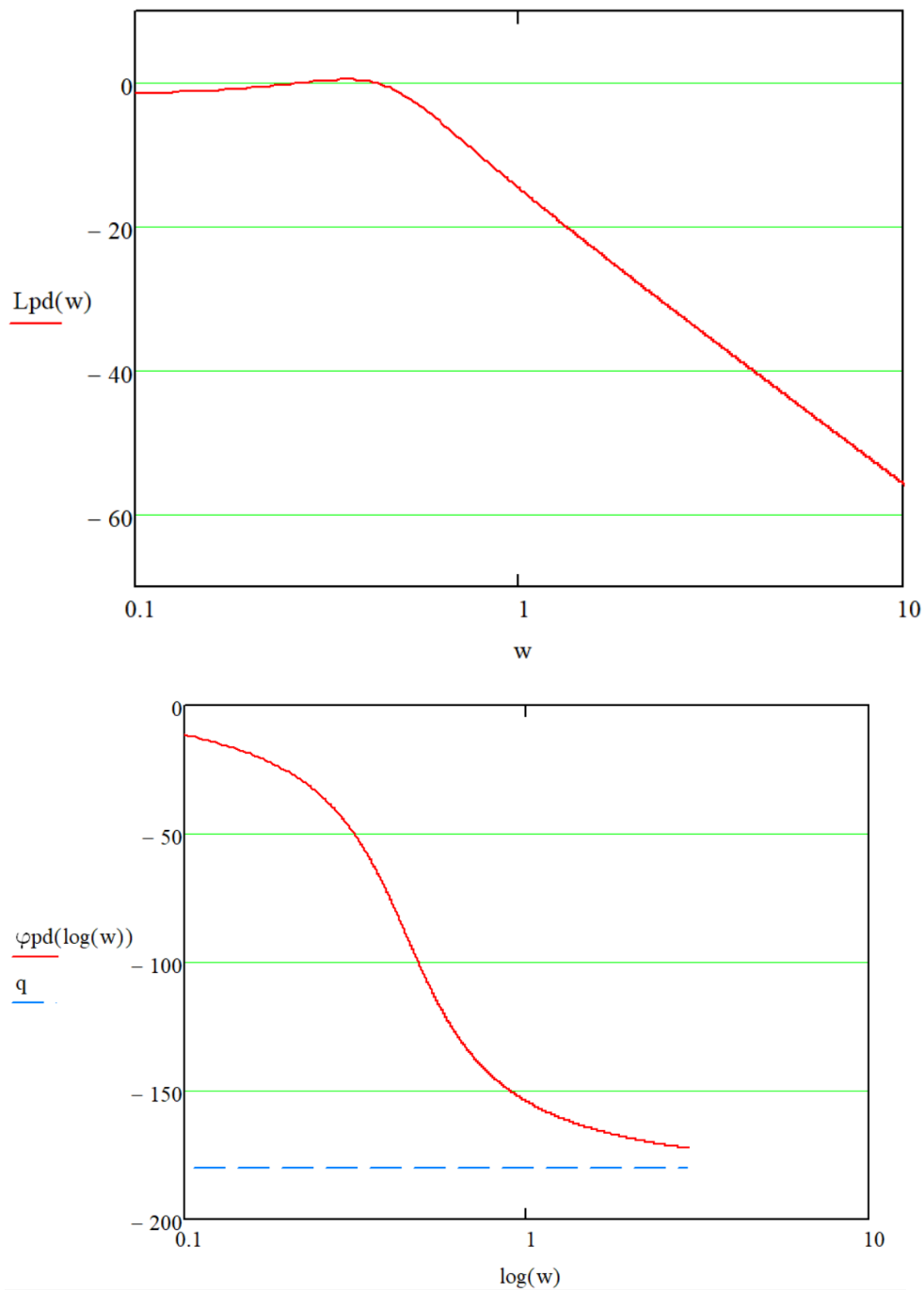


Рисунок 7 – ЛАЧХ и ЛФЧХ САУ с П-регулятором

Запас по амплитуде: 25.1

Запас по амплитуде: 27,6, дБ

Частота  $w_{cg}$ : 0.81, рад/с

**Вывод:** САУ с П-регулятором приходит в установившееся состояние более чем за 15 сек., у переходного процесса с таким регулятором низкая колебательность и низкая степень затухания; огромнейшим недостатком такой системы является большая ошибка регулирования, следовательно П-регулятор для данной САУ не подходит в качестве регулятора.

5. Оценка показателей качества процесса управления для схемы с ПИД-регулятором.

В первую очередь необходимо определить коэффициенты ПИД-регулятора:

Для определения коэффициентов, используем метод подбора параметров (ручной). Для этого в программе Python смоделируем САУ с ПИД-регулятором и будем изменять коэффициенты до тех пор, пока переходная характеристика не достигнет нужных значений показателей качества процесса управления.

Коэффициент пропорциональности:

$$K_{p.п} = 0,095$$

Интегральный коэффициент:

$$K_{p.и} = 0,0055$$

Дифференциальный коэффициент:

$$K_{p.д} = 0,0085$$

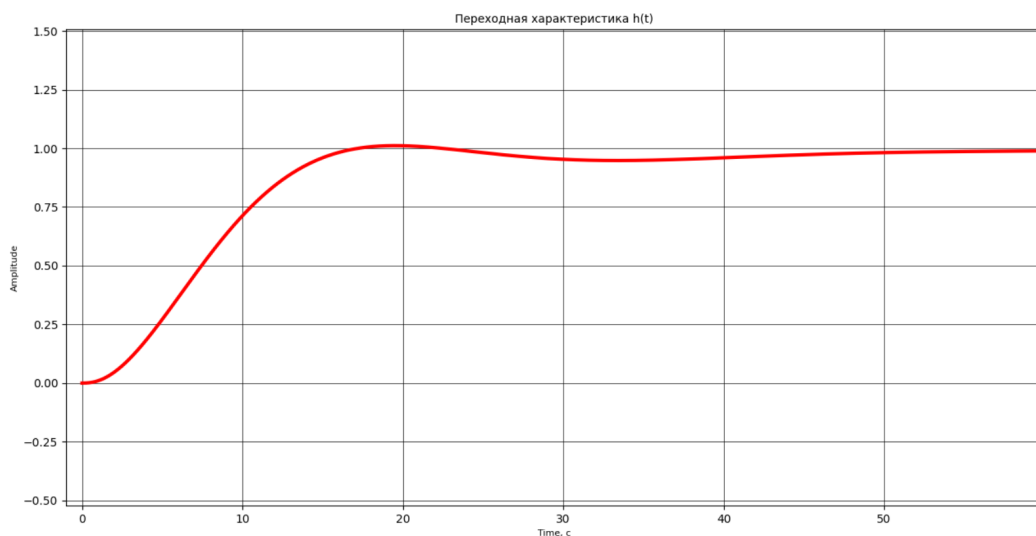


Рисунок 8 – Переходная характеристика САУ с ПИД-регулятором

1) Прямые оценки качества переходного процесса:

Ошибка регулирования:

$$\varepsilon = 0$$

Степень затухания:

$$\varphi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = \frac{1,03 - 1}{1,03} = 0,019$$

Время переходного процесса:

$$t_p = 14,3 \text{ с} < 15 \text{ с}$$

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{h_{max1} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% = \frac{1,03 - 1}{1,03} \cdot 100\% = 1,9\% < 20\%$$

Колебательность можно определить только качественно:

$$N = \frac{t_p}{T_k} < 1 \text{ с}$$

2) Корневая оценка переходного процесса:

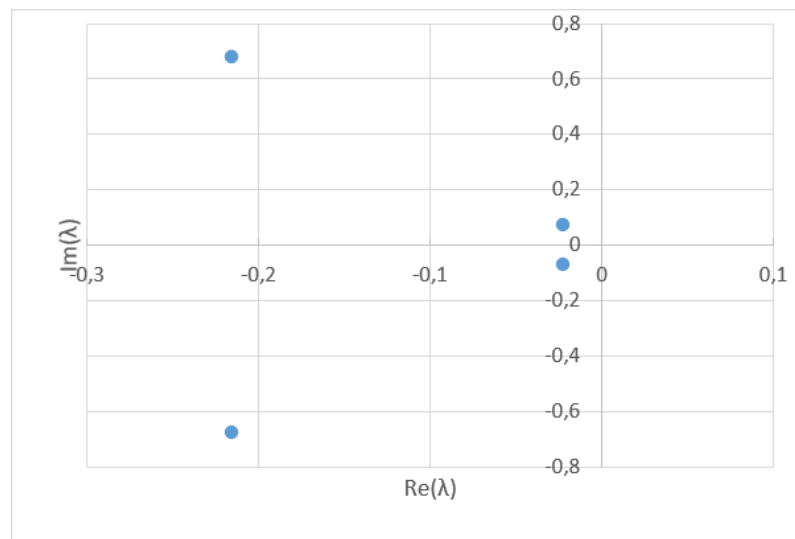


Рисунок 9 – Полюсы САУ с ПИД-регулятором

Время регулирования:

$$t_{\text{per}} = \frac{3}{a_{\min}} = \frac{3}{0,02206} = 136 \text{ с}$$

Степень колебательности:

$$\mu = \left| \frac{j\omega}{a_k} \right| = \tan \varphi_{\max} = \frac{0,07214}{0,02206} = 3,27$$

Перерегулирование:

$$\sigma = e^{\frac{-\pi}{\mu}} \cdot 100\% = e^{\frac{-\pi}{3,27}} \cdot 100\% = 0,383\%$$

Степень затухания:

$$\varphi = 1 - e^{\frac{-2\pi}{\mu}} = 1 - e^{\frac{-2\pi}{3,27}} = 0,854$$

### 3) Частотная оценка переходного процесса:

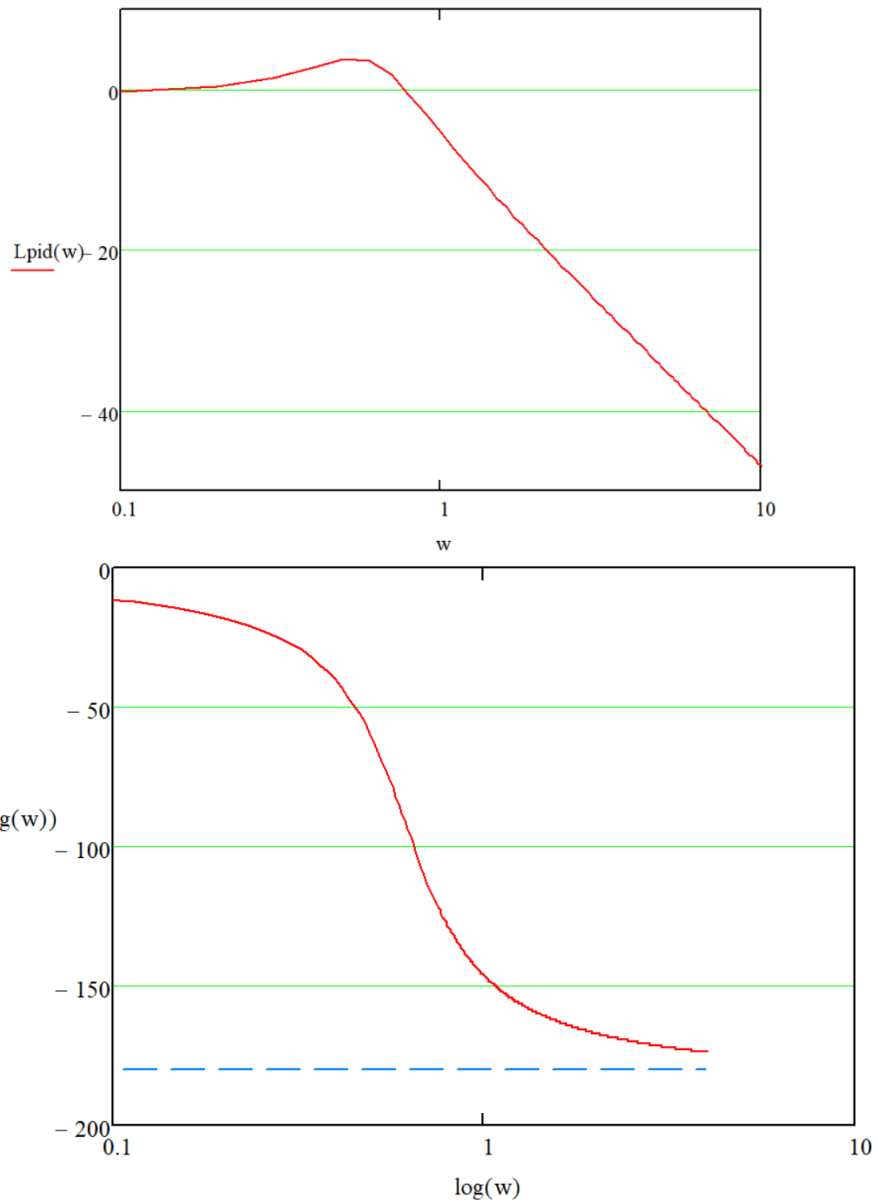


Рисунок 10 - ЛАЧХ и ЛФЧХ САУ с ПИД-регулятором

Запас по амплитуде: 18.13

Запас по амплитуде: 25.17, дБ

Частота  $w_{cg}$ : 0.81, рад/с

#### 4) Интегральная оценка переходного процесса:

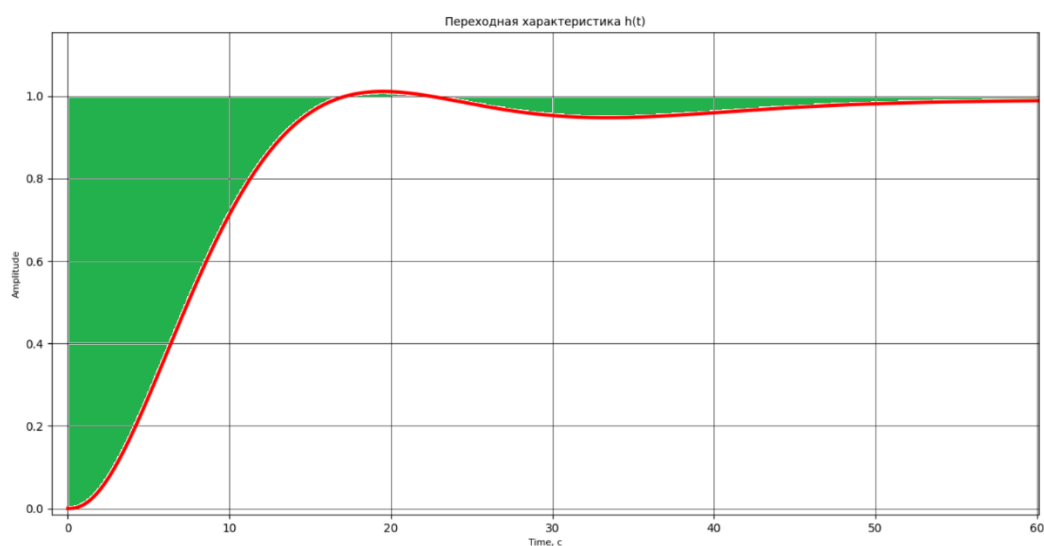


Рисунок 11 - Интегральная оценка САУ с ПИД-регулятором

**Вывод:** САУ с ПИД-регулятором характеризуется быстрым затуханием колебаний, низкой колебательностью и низкой степенью затухания; важным достоинством такой системы является малая ошибка регулирования (нулевая) в установившемся режиме; следовательно ПИД-регулятор можно использовать в качестве регулятора для данной системы.