

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого**  
**Институт энергетики**  
**Высшая школа энергетического машиностроения**

**Отчёт по практической работе №3**  
по дисциплине «Теория автоматического регулирования»  
«Выбор параметров пассивно-дифференцирующего звена»

Выполнили:

Студент гр.3231303/21201 п/г 2 \_\_\_\_\_ А. К. Дмитриев

Студент гр.3231303/21201 п/г 2 \_\_\_\_\_ А. Д. Ярошевич

Принял:

Доцент ВШЭМ \_\_\_\_\_ В. А. Суханов

Санкт-Петербург  
2025

## **Реферат**

Отчет объемом 14 страниц содержит 9 рисунков, одну таблицу.

В данной практической работе проведено корректирование системы автоматического регулирования (САР) паровой турбины с помощью пассивно-дифференцирующего звена для улучшения качества переходного процесса. Цель работы состояла в поиске параметров этого звена.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС, ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕЕ ЗВЕНО, ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ, ПРИБЛИЖЕННАЯ МОДЕЛЬ.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1 Описание исследуемой САР и исходные данные .....	4
2 Система уравнений, описывающих переходные процессы в исследуемой САР и её перевод в программный вид .....	5
3 Методика исследования .....	7
4 Результаты численного моделирования .....	8
4.1 Набор данных 1 .....	9
4.2 Набор данных 2 .....	11
Заключение .....	12
Литература .....	13

## Введение

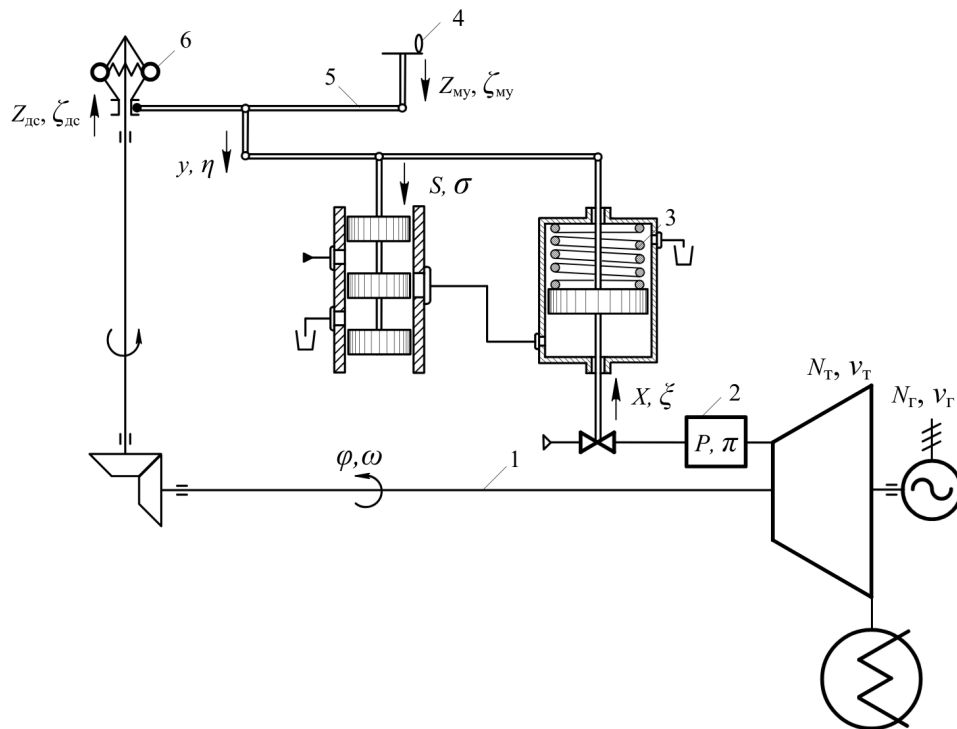
Цель работы состоит в коррекции САР для достижения требуемых динамических характеристик при сохранении заданной величины установившейся ошибки регулирования. Коррекция располагаемой САР производится путём выбора рациональных параметров корректирующего звена заданной структуры. В ходе исследования использовались классические методы теории автоматического регулирования [1]. Работа проведена с помощью пакетов `DifferentialEquations.jl` [2] и `Makie.jl` [3] языка программирования Julia в среде Pluto.

Задача работы заключается в поиске значений параметров корректирующего пассивно-дифференцирующего звена, при которых запас устойчивости скорректированной САР будет повышен до заданных величин, а величина перерегулирования максимально снижена.

Актуальность исследования заключается в анализе возможности повышения качества переходного процесса САР без внесения существенных изменений в её конструкцию.

## 1 Описание исследуемой САР и исходные данные

Объектом исследования является система регулирования угловой скорости ротора паровой турбины, схема которой изображена на рисунке 1.1. В рамках этой работы считается, что паровой ёмкостью можно пренебречь.



1 — ротор турбогенератора; 2 — паровая ёмкость между регулирующим клапаном и соплами турбины; 3 — сервомотор; 4 — механизм управления; 5 — управляющий рычаг; 6 — датчик угловой скорости ротора;  $\varphi$  — относительное изменение угловой скорости ротора (величина, характеризующая ошибку регулирования);  $\pi$  — относительное изменение давление пара перед соплами турбины;  $\xi$  — относительное изменение положения регулирующего клапана (или поршня сервомотора);  $\eta$  — относительное изменение положения выходной координаты элемента сравнения;  $\nu_T$  — относительное изменение нагрузки на генераторе;  $\zeta_{му}$  — относительное изменение положения механизма управления

Рисунок 1.1 — Принципиальная схема САР ПТУ

Значения параметров САР, представленные двумя наборами данных, указаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Значения параметров САР

Набор	$T_a$	$T_s$	$\delta_\omega$
1 (№3)	5	0.4	0.06
2 (№17)	10	0.6	0.06

## 2 Система уравнений, описывающих переходные процессы в исследуемой САР и её перевод в программный вид

В работе рассматриваются представления САР в структурной форме:

Схема располагаемой САР изображена на рисунке 2.1. Эта система, подготовленная для анализа средствами DifferentialEquations.jl, записана в функции, приведённой на листинге 2.1.

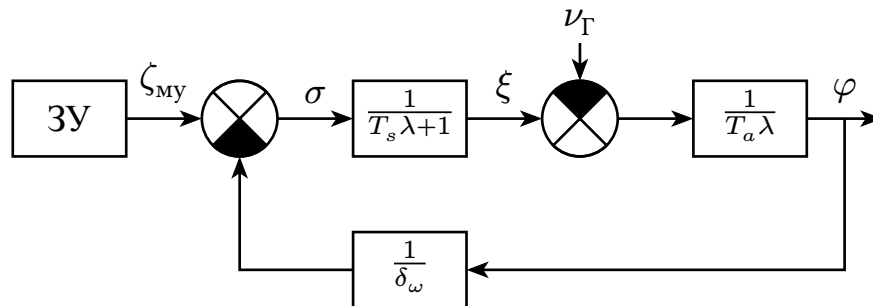


Рисунок 2.1 — Структурная схема располагаемой САР

Листинг 2.1 — Функция, описывающая располагаемую САР

```
1 function simulate_system_ras()
2     (; Ta, Ts, δω, νГ, tspan) = taskparams
3     u0 = [0.0, 0.0]
4
5     function system!(du, u, p, t)
6         φ, ξ = u
7         σ = -φ / δω
8         du[1] = (ξ - νГ(t)) / Ta
9         du[2] = (σ - ξ) / Ts
10    end
11
12    prob = ODEProblem(system!, u0, tspan)
13    solve(prob, Tsit5(), reltol=1e-6, abstol=1e-6)
14 end
```

Так как устойчивость располагаемой системы считается недостаточной, её предлагается скорректировать с помощью пассивно-дифференцирующего звена с передаточной функцией  $\frac{T_1\lambda+1}{T_2\lambda+1}$ . Схема скорректированной САР изображена на рисунке 2.2. Эта система, подготовленная для анализа средствами DifferentialEquations.jl, записана в функции, приведённой на листинге 2.2.

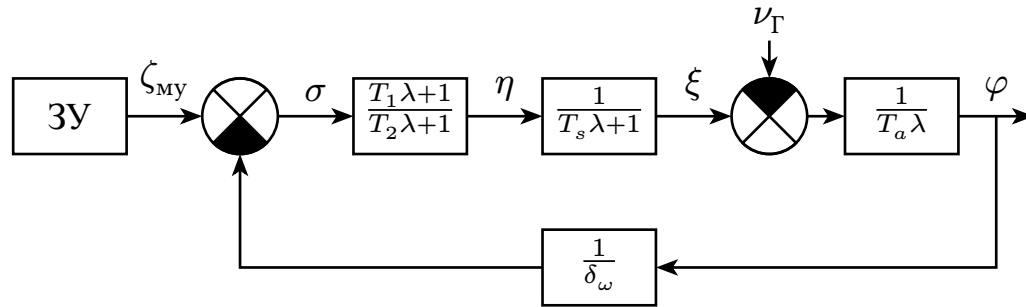


Рисунок 2.2 — Структурная схема скорректированной САР

Листинг 2.2 — Функция, описывающая скорректированную САР

```

1  function simulate_system_cor(T1, T2)
2      (; Ta, Ts, δω, νr, tspan) = taskparams
3      u0 = [0.0, 0.0, 0.0]
4
5      function system!(du, u, p, t)
6          φ, ξ, η = u
7          σ = -φ / δω
8          du[1] = (ξ - νr(t)) / Ta
9          du[2] = (η - ξ) / Ts
10         du[3] = (-T1 * du[1] / δω + σ - η) / T2
11     end
12
13     prob = ODEProblem(system!, u0, tspan)
14     solve(prob, Tsit5(), reltol=1e-6, abstol=1e-6)
15 end

```

### 3 Методика исследования

Задачей исследования является выбор значений параметров  $T_1$  и  $T_2$  последовательного пассивно-дифференцирующего звена, которые обеспечили бы существенное сокращение величины перерегулирования и снижение колебательности регулируемой величины  $\varphi(t)$ .

Методика, описанная в учебном пособии [1], подразумевает построение логарифмических частотных характеристик разомкнутой системы, по которым определяется частота среза располагаемой системы  $\omega_{\text{ср}}^{\text{расп}}$  и выбирается параметр  $T_1 = 1/\omega_{\text{ср}}^{\text{расп}}$ , после чего выбирается  $T_2 \approx 0.1 \cdot T_1$ , из соображений максимальной устойчивости по фазе  $60^\circ < \gamma < 90^\circ$ .

Однако, построение именно таких характеристик для этой цели не является самым наглядным вариантом, и явно было выбрано в качестве рекомендуемой методики с учётом простоты их построения без специализированного ПО. Построение АФЧХ позволяет наглядно показать запас устойчивости по фазе с помощью полярных координат, величину и положение частоты среза с помощью логарифмического цветового градиента потому что точек близко к  $(0,0)$  много, тогда как нам важно рассматривать градиент значений  $\omega$  у значения  $\omega_{\text{ср}}$ , располагающегося на единичной окружности.

Таким образом, с помощью АФЧХ будет определена частота среза располагаемых систем, а также запас устойчивости по фазе. Запас устойчивости по амплитуде в работе не рассматривается. С помощью АФЧХ скорректированной системы будет показано увеличение запаса устойчивости по фазе. С помощью построения и сравнение графиков переходной функции располагаемой и скорректированной системы будет показано улучшение качества переходного процесса.



## 4 Результаты численного моделирования

### 4.1 Набор данных 1

На рисунке 4.1 изображена АФЧХ располагаемой системы, построенная с помощью передаточной функции

$$W_{\text{расп}_1}(\lambda) = \frac{1}{\delta_{\omega_1} T_{a_1} \lambda \cdot (T_{s_1} \lambda + 1)}, \quad (4.1)$$

откуда найдена частота среза  $\omega_{\text{ср}_1}^{\text{расп}} = 2.41 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Определяются параметры корректирующего звена:  $T_{1_1} = 1/\omega_{\text{ср}_1}^{\text{расп}} = 0.42 \text{ с}$ ;  $T_{2_1} = 0.1 \cdot T_{1_1} = 0.04 \text{ с}$ . По этим параметрам построена изображенная на рисунке 4.2 АФЧХ корректируемой системы с помощью передаточной функции

$$W_{\text{корр}_1}(\lambda) = \frac{1}{\delta_{\omega_1} T_{a_1} \lambda \cdot (T_{s_1} \lambda + 1)} \cdot \frac{T_{1_1} \lambda + 1}{T_{2_1} \lambda + 1}; \quad (4.2)$$

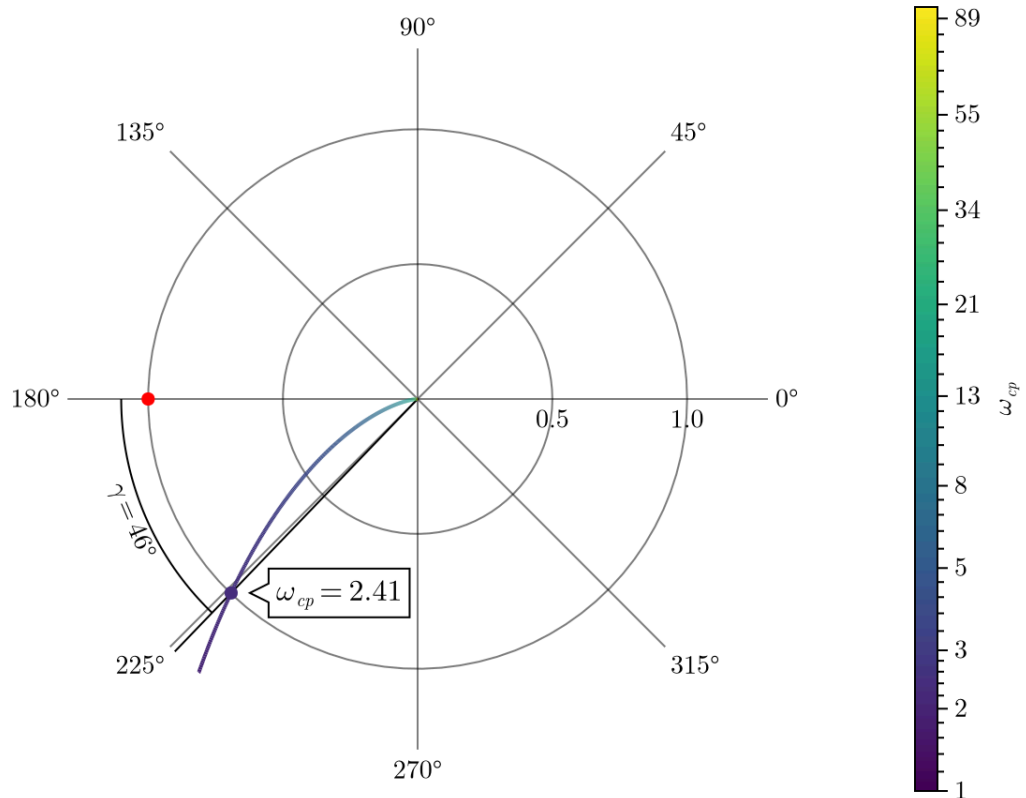


Рисунок 4.1 — АФЧХ располагаемой САР по набору данных 1

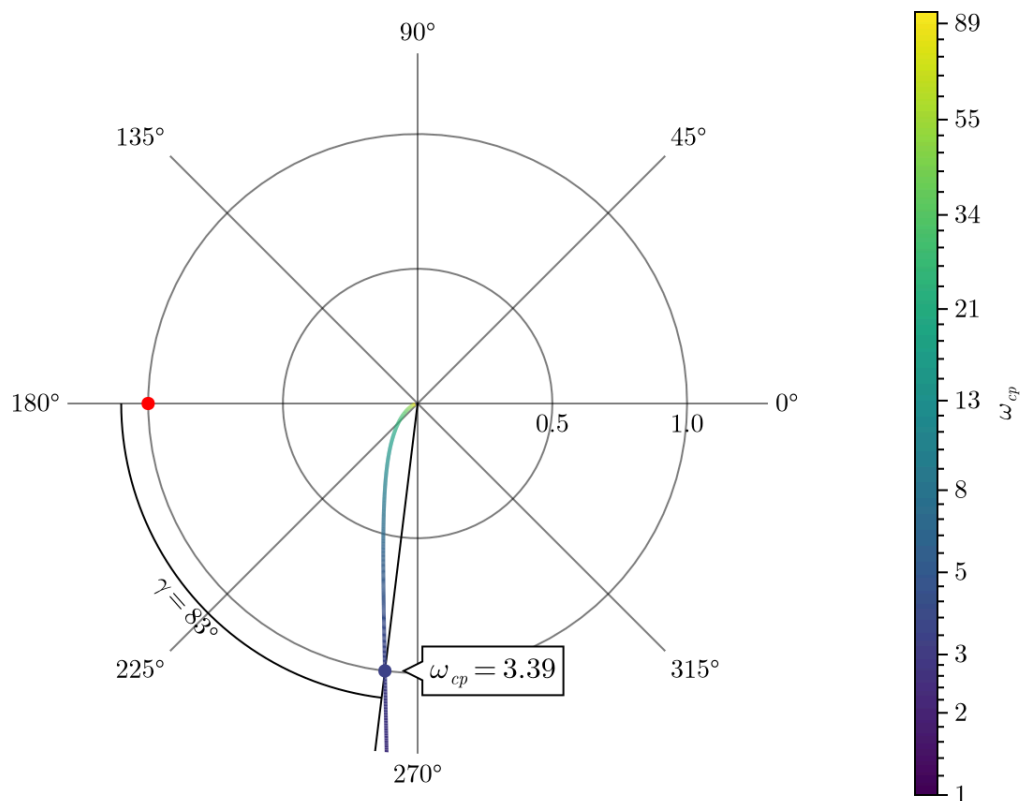


Рисунок 4.2 — АФЧХ скорректированной САР по набору данных 1

Из сравнения АЧХ до и после коррекции видно, что запас устойчивости по фазе вырос с  $46^\circ$  до  $83^\circ$ , что соответствует условию.

На рисунке 4.3 изображены графики переходных процессов располагаемой и скорректированной системы. Эффект перерегулирования ликвидирован, установившаяся ошибка регулирования не изменилась.

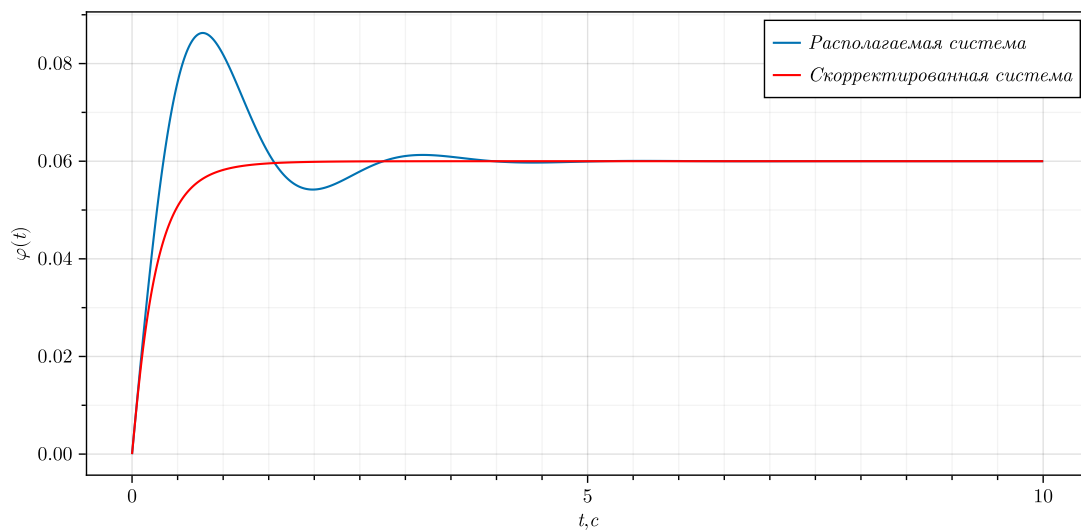


Рисунок 4.3 — Графики переходных процессов располагаемой и скорректированной системы по набору данных 1

## 4.2 Набор данных 2

На рисунке 4.4 изображена АФЧХ располагаемой системы, построенная с помощью передаточной функции

$$W_{\text{расп}_2}(\lambda) = \frac{1}{\delta_{\omega_2} T_{a_2} \lambda \cdot (T_{s_2} \lambda + 1)}, \quad (4.3)$$

откуда найдена частота среза  $\omega_{\text{ср}_2}^{\text{расп}} = 1.31 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ . Определяются параметры корректирующего звена:  $T_{1_2} = 1/\omega_{\text{ср}_2}^{\text{расп}} = 0.76 \text{ с}$ ;  $T_{2_2} = 0.1 \cdot T_{1_2} = 0.08 \text{ с}$ . По этим параметрам построена изображенная на рисунке 4.5 АФЧХ корректируемой системы с помощью передаточной функции

$$W_{\text{корр}_2}(\lambda) = \frac{1}{\delta_{\omega_2} T_{a_2} \lambda \cdot (T_{s_2} \lambda + 1)} \cdot \frac{T_{1_2} \lambda + 1}{T_{2_2} \lambda + 1}; \quad (4.4)$$

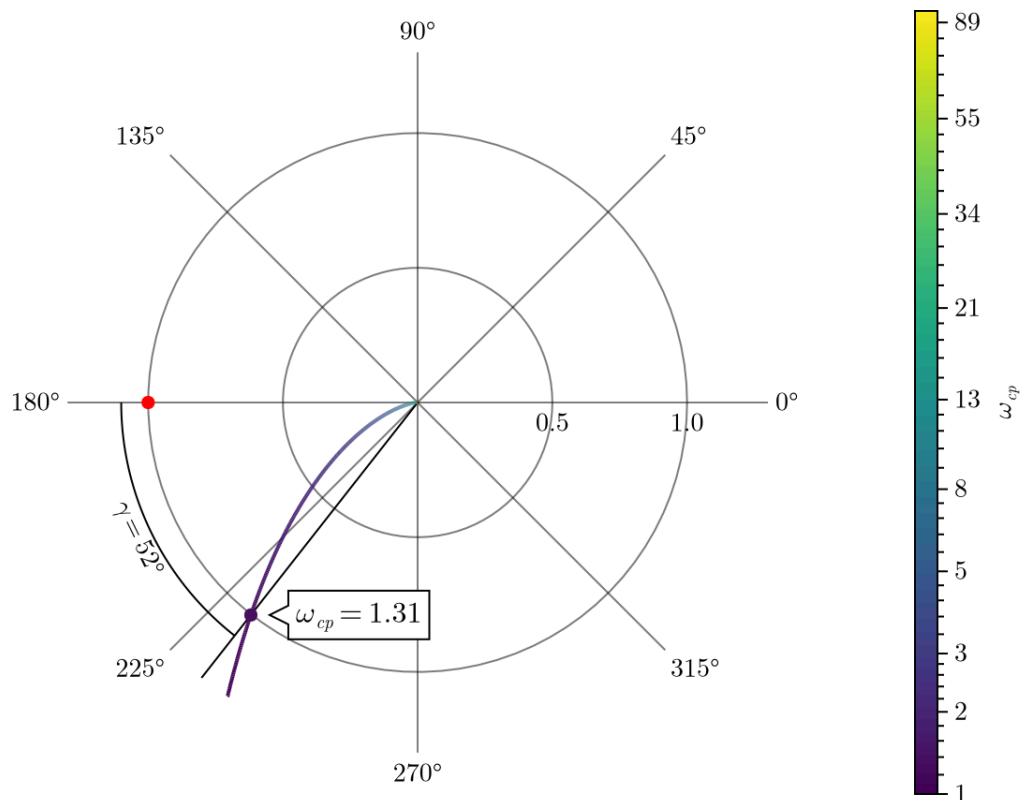


Рисунок 4.4 — АФЧХ располагаемой САР по набору данных 2

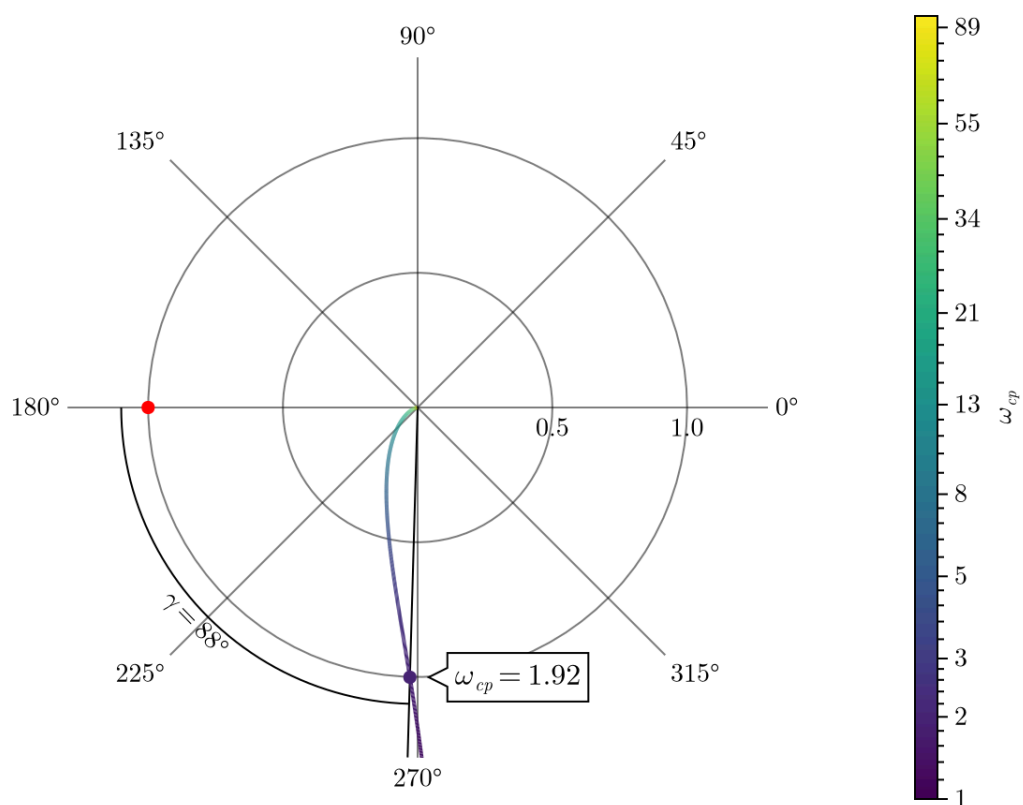


Рисунок 4.5 — АФЧХ скорректированной САР по набору данных 2

Из сравнения АЧХ до и после коррекции видно, что запас устойчивости по фазе вырос с  $52^\circ$  до  $88^\circ$ , что соответствует условию.

На рисунке 4.6 изображены графики переходных процессов располагаемой и скорректированной системы. Эффект перерегулирования ликвидирован, установившаяся ошибка регулирования не изменилась.

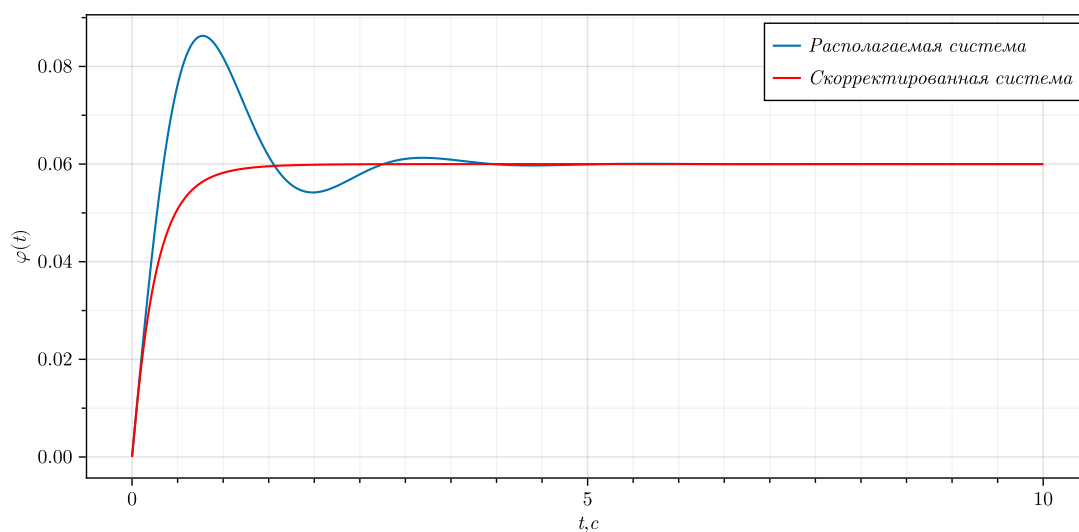


Рисунок 4.6 — Графики переходных процессов располагаемой и скорректированной системы по набору данных 2

## **Заключение**

Были определены параметры корректирующего пассивно-дифференцирующего звена, обеспечивающие требуемый запас устойчивости по фазе, а также минимизирующие величину перерегулирования. Таким образом, показано, что применение корректирующего звена позволяет повысить устойчивость системы и качество переходного процесса.

## Литература

1. Егоршин В.П., Маспанов С.Н., Суханов В.А. Теория автоматического регулирования и автоматизация энергетических установок. учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2021.
2. Rackauckas C., Nie Q. Differentialequations.jl—a performant and feature-rich ecosystem for solving differential equations in julia // Journal of Open Research Software. Ubiquity Press, 2017. т. 5, № 1. с. 15.
3. Danisch S., Krumbiegel J. Makie.jl: Flexible high-performance data visualization for Julia // Journal of Open Source Software. The Open Journal, 2021. т. 6, № 65. с. 3349.