

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

**Отчёт по практической работе №1**  
по дисциплине «Теория автоматического регулирования»  
«Исследование влияния параметров САР паровой турбины на качество  
переходных процессов»

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 17 страниц, содержит две таблицы и 10 рисунков.

В данной практической работе было проведено исследование влияния параметров системы автоматического регулирования (САР) паровой турбины на качество переходных процессов. Основная цель состояла в анализе изменения переходных процессов при варьировании параметров САР: постоянные времени ротора, паровой емкости, сервомотора, а также степени неравномерности датчика угловой скорости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС, РОТОР, ПАРОВАЯ ЕМКОСТЬ, СЕРВОМОТОР, СТЕПЕНЬ НЕРАВНОМЕРНОСТИ.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 3  |
| 1 Описание исследуемой САР и исходные данные .....   | 4  |
| 2 Система уравнений, описывающих переходные процессы в исследуемой<br>САР и её перевод в программный вид ..... | 5  |
| 3 Методика исследования .....  | 7  |
| 4 Результаты численного моделирования .....  | 10 |
| 4.1 Варьирование $T_a$ .....   | 11 |
| 4.2 Варьирование $T_\pi$ .....   | 12 |
| 4.3 Варьирование $T_s$ .....   | 13 |
| 4.4 Варьирование $\delta_\omega$ .....   | 14 |
| 5 Анализ результатов численного моделирования .....  | 14 |
| Заключение .....   | 15 |
| Литература .....   | 16 |

## **Введение**

Цель работы состоит в исследовании влияния параметров САР на качество переходных процессов и в анализе качества переходных процессов в системе автоматического регулирования (САР) угловой скорости ротора паровой турбины. 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.

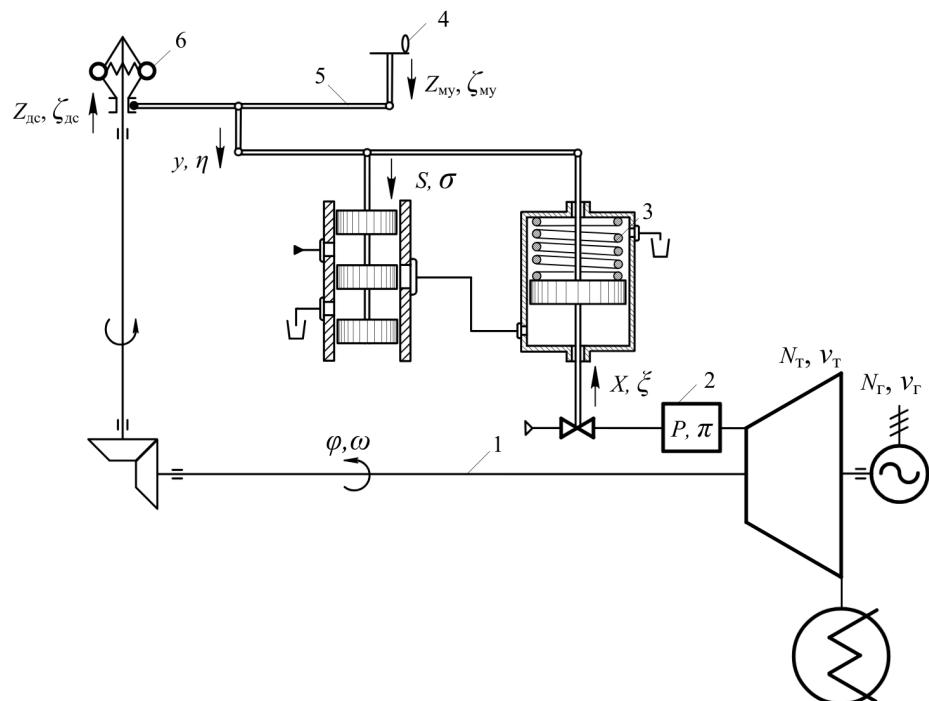
Задача исследования заключается в анализе влияния параметров  $T_a, T_\pi, T_s$  и  $\delta_\omega$  системы автоматического регулирования на качество переходных процессов.

Актуальность исследования заключается в:

1. Повышении экономичности процесса получения энергии на электростанциях;
2. Улучшении эксплуатационных характеристик систем регулирования турбоагрегатов;
3. Значительном увеличение срока службы систем автоматического регулирования турбин САР и повышении их надежности;
4. Качественном повышении показателей переходных процессов и быстродействия, снижение стоимости САР и в итоге снижении стоимости вырабатываемой электроэнергии.

## 1 Описание исследуемой САР и исходные данные

Объектом исследования является система регулирования угловой скорости ротора паровой турбины без промежуточного перегрева пара, принципиальная схема которой изображена на рисунке 1.1.



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;  $v_r$  — относительное изменение нагрузки на генераторе;  $\zeta_{my}$  — относительное изменение положения механизма управления

Рисунок 1.1 — Принципиальная схема САР ПТУ

Исходные значения параметров САР указаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Значения параметров САР

| $T_a$ | $T_\pi$ | $T_s$ | $\delta_\omega$ |
|-------|---------|-------|-----------------|
| 7     | 0.4     | 0.7   | 0.12            |

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

В работе рассматривается представление САР в виде линейной математической модели в стандартной форме:

$$\begin{cases} T_a \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \pi - \nu_r \\ T_\pi \cdot \frac{d\pi}{dt} + \pi = \xi \\ T_s \cdot \frac{d\xi}{dt} + \xi = \eta \\ \eta = -\frac{\varphi}{\delta_\omega} + \zeta_{my} \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $T_a$  — постоянная времени ротора;  
 $T_\pi$  — постоянная времени паровой ёмкости;  
 $T_s$  — постоянная времени сервомотора;  
 $\delta_\omega$  — величина, пропорциональная коэффициенту усиления разомкнутой системы;  
 $\eta$  — относительное изменение положения выходной координаты элемента сравнения;  
 $\varphi$  — относительное изменение угловой скорости ротора турбины и генератора. Характеризует ошибку регулирования;  
 $\pi$  — относительное изменение давления пара в паровой ёмкости;  
 $\xi$  — относительное изменение положения регулирующего органа;  
 $\zeta_{my}$  — относительное изменение положения механизма управления турбиной;  
 $\nu_r$  — относительное изменение нагрузки на генераторе.

Эта система уравнений, подготовленная для анализа средствами DifferentialEquations.jl, записана в функции, приведённой на листинге 2.1.

## Листинг 2.1 — Функция, описывающая исследуемую САР

```
1  function simulate_system();
2      Ta = 7,
3      Tπ = 0.4,
4      Ts = 0.7,
5      δω = 0.12,
6      νг = t -> t >= 2 ? -1 : 0.0,
7      u0 = [0.0, 0.0, 0.0],
8      tspan = (0.0, 30.0)
9  )
10     function system!(du, u, p, t)
11         φ, π, ξ = u
12         η = -φ / δω
13         du[1] = (π - νг(t)) / Ta
14         du[2] = (ξ - π) / Tπ
15         du[3] = (η - ξ) / Ts
16     end
17
18     prob = ODEProblem(system!, u0, tspan)
19     solve(prob, Tsit5(), reltol=1e-6, abstol=1e-6)
20 end
```

Рассмотрим листинг 2.1 построчно:

- На строчках 2-9 задаются значения параметров САР  $T_a, T_\pi, T_c, \delta_\omega$  согласно выданному варианту, а также закон зависимости внешнего воздействия от времени  $\nu_g(t)$ , начальные условия  $u_0$  и время симуляции;
- На строчках 10-16 описана собственно исследуемая система;
- На строчке 18 из уравнения, начальных условий и времени симуляции формулируется задача `prob` для решателя;
- На строчке 19 происходит решение системы уравнений с помощью выбранного решателя `Tsit5()` и выбранных коэффициентов для него; Результат представляет из себя численную зависимость  $\varphi(t)$  для одного режима САР.

### 3 Методика исследования

Первым шагом исследования является поиск значений варьируемых параметров, при которых система теряет устойчивость по Ляпунову, то есть не существует  $\delta(\varepsilon)$  для любого  $\varepsilon$ , при котором все величины  $\varphi_{t>t_0} \leq \delta(\varepsilon)$ . В результате анализа с помощью двухстороннего бинарного поиска получено, что для параметров  $T_s, T_\pi$  и  $\delta_\omega$  таких значений нет, а критическим значением  $T_a$  является  $T_{a_k} = 2.125$ , что демонстрирует рисунок 3.1, на котором изображено решение системы уравнений на большом промежутке времени. Видно, что это предельное значение, при котором  $\varphi_{t\geq t_0} \leq \delta(\varepsilon)$ , при более высоких значениях  $T_a$  каждый следующий пик  $\varphi(t)$  будет выше предыдущего, то есть не будет существовать  $\delta(\varepsilon)$ , при котором выполняется условие, а значит система не будет устойчива по Ляпунову.

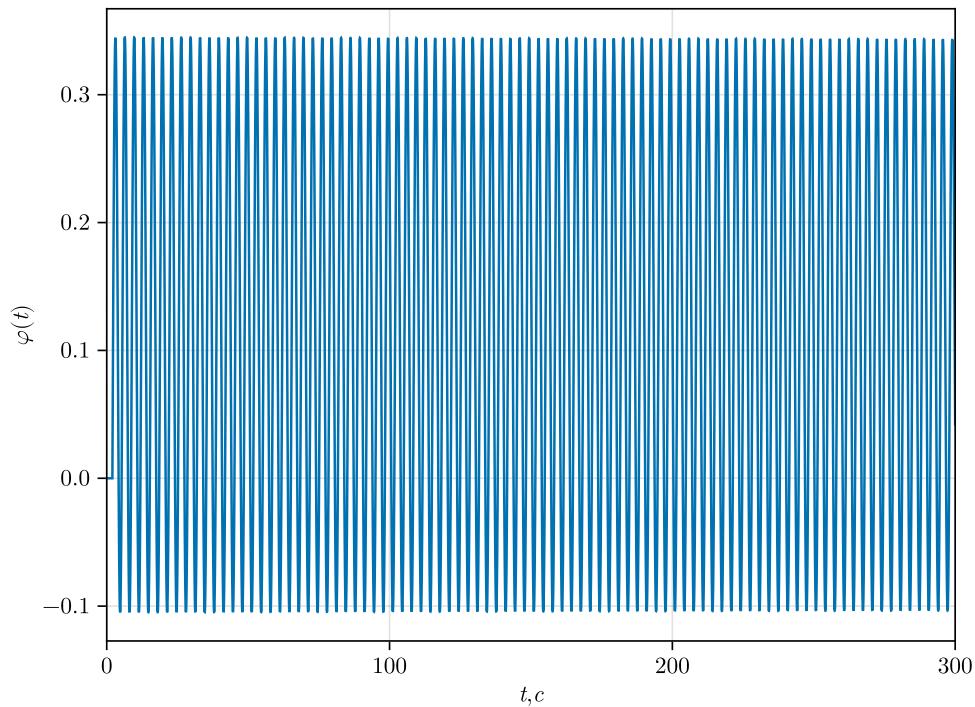


Рисунок 3.1 — График зависимости  $\varphi(t)$  от  $t$  при  $T_{a_k} = 2.125$

Таким образом, можно назначить промежутки для варьирования параметров САР. Для  $T_s, T_\pi$  и  $\delta_\omega$  промежутки произвольного размера назначены симметрично их исходным значениям из соображения наглядности. Для  $T_a$  промежуток назначен с учётом  $T_{a_k}$ , чтобы продемонстрировать потерю устойчивости системы. Назначенные промежутки указаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Назначение промежутков варьирования

| Параметр        | Исходное значение | Промежуток        |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| $T_a$           | $7c$              | $2.125c — 10c$    |
| $T_\pi$         | $0.4c$            | $0.4c — 1c$       |
| $T_s$           | $0.7c$            | $0.2c — 0.6c$     |
| $\delta_\omega$ | $0.12\%$          | $0.08\% — 0.16\%$ |

По итогам варьирования параметров САР и решения системы описывающих её уравнений получены трёхмерные графики в координатах, отражающих зависимость  $\varphi$  от  $t$  и варьируемого параметра САР, а также двумерные графики зависимости параметров переходного процесса от варьируемого параметра САР.

Для вычисления установившейся ошибки регулирования  $\varphi_0$  производится визуальная оценка времени переходного процесса по полученным трёхмерным графикам, после чего берётся значение  $\varphi(t)$  при  $t$  заведомо больше  $t_n$ . Ответственная за это функция приведена на листинге 3.2.

Листинг 3.2 — Функция для вычисления  $\varphi_\infty$

```

1  function compute_static_errors(solutions)
2      static_errors = [sol[1,end] for sol in solutions]
3  end

```

Для поиска времени переходного процесса используется функция, приведённая на листинге 3.3. В ней при обратном ходе по времени происходит поиск значения времени, при котором значение  $\varphi(t)$ , отличается от  $\varphi_0$  больше, чем на допуск 5%.

### Листинг 3.3 — Функция для вычисления $t_{\pi}$

```
1 function find_settling_time(sol, phi_steady; tolerance=0.05)
2     times = sol.t
3     phi_values = sol[1, :]
4     lower = phi_steady * (1 - tolerance)
5     upper = phi_steady * (1 + tolerance)
6
7     # Идем с конца к началу
8     for i in length(phi_values):-1:1
9         if !(lower <= phi_values[i] <= upper)
10            return i < length(times) ? times[i+1] : times[end]
11        end
12    end
13    return times[1]
14 end
```

Для вычисления максимальной динамической ошибки регулирования  $\varphi_{\max}$  используется функция, приведённая на листинге 3.4. В ней берётся наибольшее по модулю значение  $\varphi$ , так как  $\varphi_0 = 0$ .

### Листинг 3.4 — Функция для вычисления $\varphi_{\max}$

```
1 function compute_dynamic_errors(sol)
2     maximum(abs.(sol[1, :]))
3 end
```

## 4 Результаты численного моделирования

### 4.1 Варьирование $T_a$

На рисунке 4.1 изображён трёхмерный график зависимости  $\varphi(t)$  от  $T_a$ .  
На рисунке 4.2 изображены графики зависимости  $t_n$ ,  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_{\infty}$  от  $T_a$ .

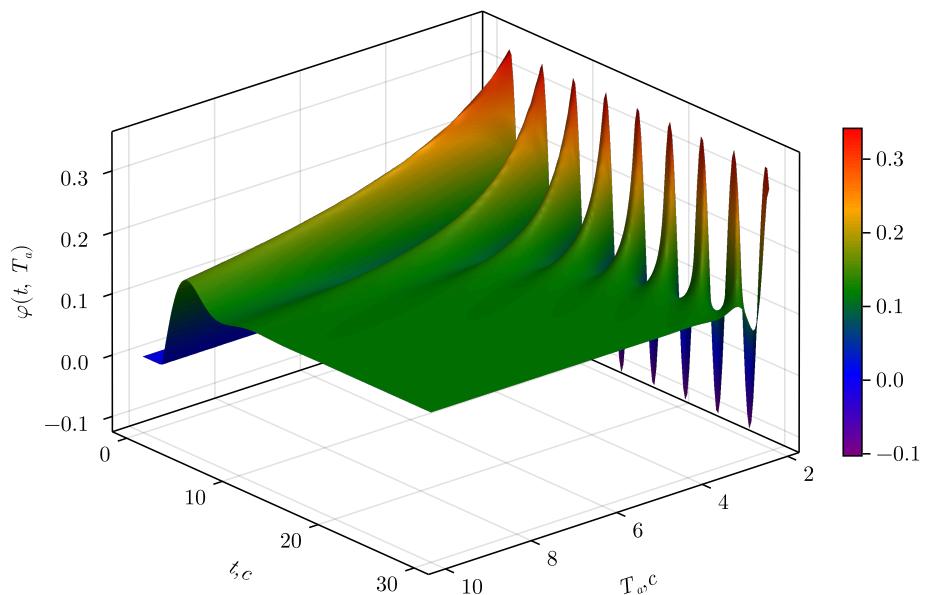


Рисунок 4.1 — График зависимости  $\varphi(t)$  от  $T_a$

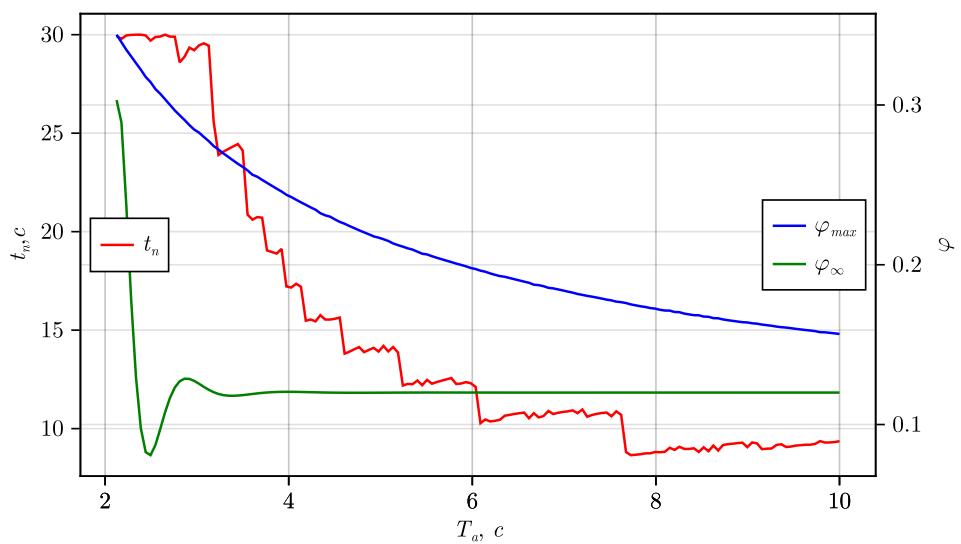


Рисунок 4.2 — Графики зависимости  $t_n$ ,  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_{\infty}$  от  $T_a$

## 4.2 Варьирование $T_\pi$

На рисунке 4.3 изображён трёхмерный график зависимости  $\varphi(t)$  от  $T_\pi$ .  
 На рисунке 4.4 изображены графики зависимости  $t_n$ ,  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_\infty$  от  $T_\pi$ .

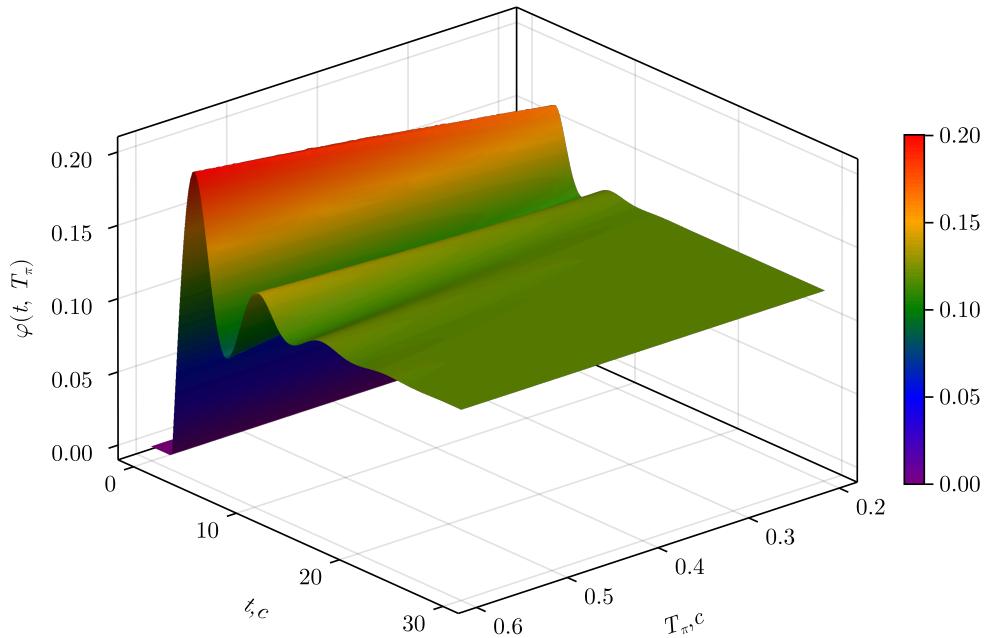


Рисунок 4.3 — График зависимости  $\varphi(t)$  от  $T_\pi$

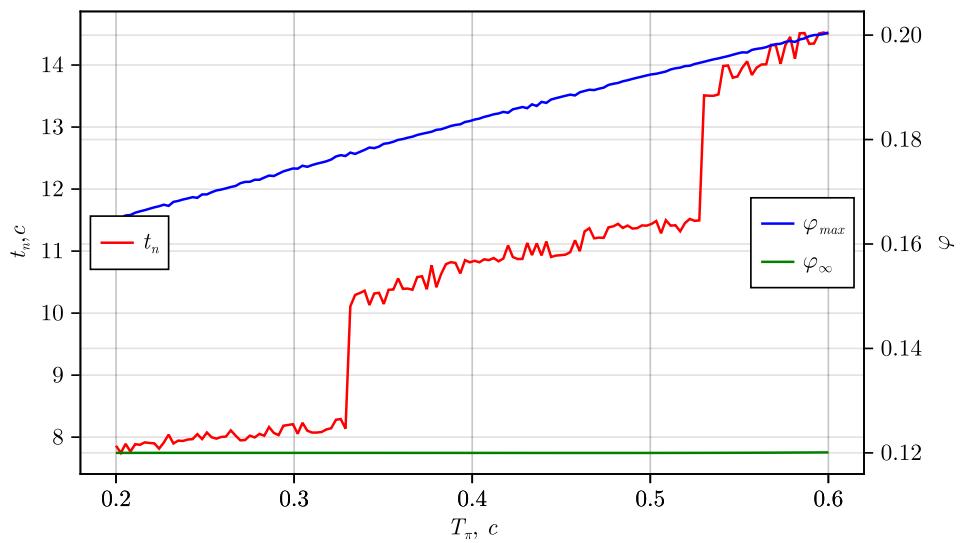


Рисунок 4.4 — Графики зависимости  $t_n$ ,  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_\infty$  от  $T_\pi$

### 4.3 Варьирование $T_s$

На рисунке 4.5 изображён трёхмерный график зависимости  $\varphi(t)$  от  $T_s$ .  
 На рисунке 4.6 изображены графики зависимости  $t_n$ ,  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_{\infty}$  от  $T_s$ .

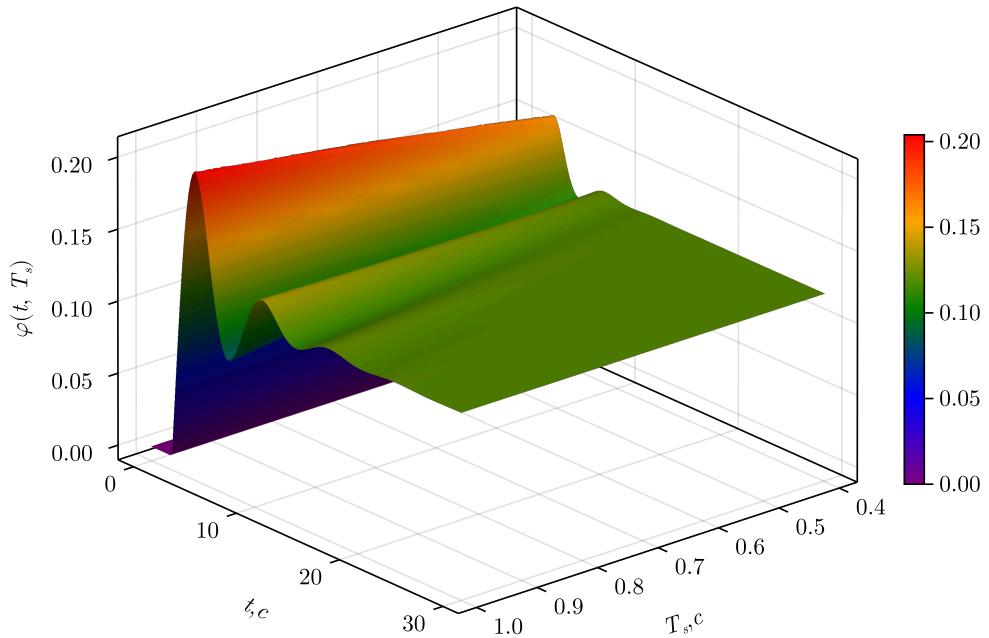


Рисунок 4.5 — График зависимости  $\varphi(t)$  от  $T_s$

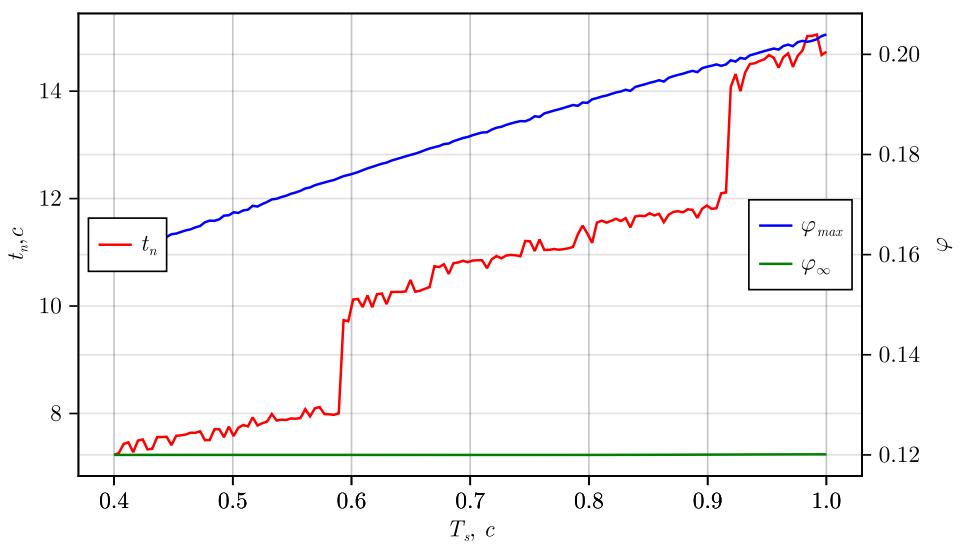


Рисунок 4.6 — Графики зависимости  $t_n$ ,  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_{\infty}$  от  $T_s$

#### 4.4 Варьирование $\delta_\omega$

На рисунке 4.7 изображён трёхмерный график зависимости  $\varphi(t)$  от  $\delta_\omega$ .  
 На рисунке 4.8 изображены графики зависимости  $t_n$ ,  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_\infty$  от  $\delta_\omega$ .

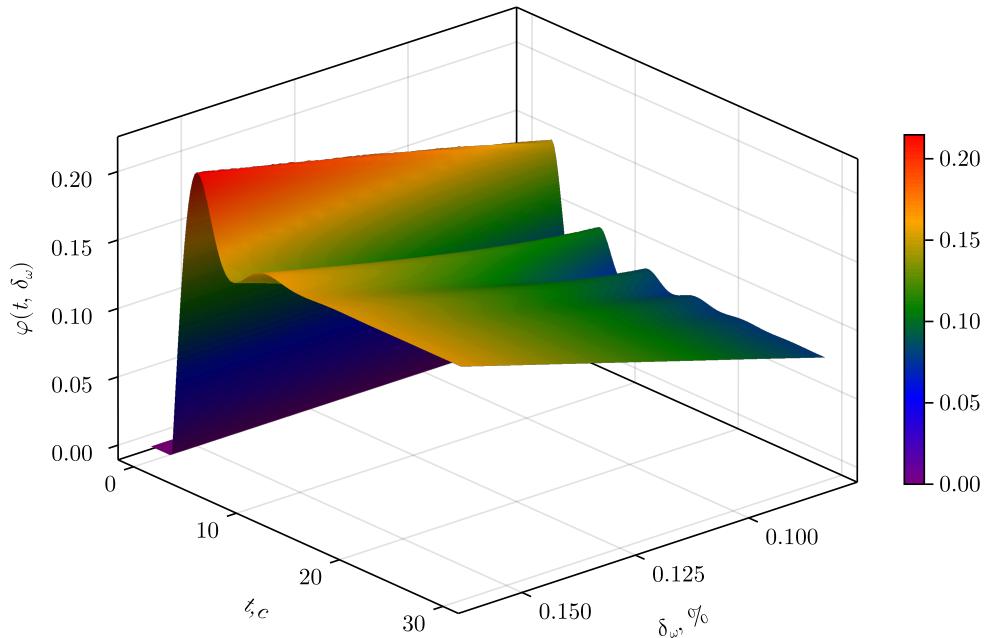


Рисунок 4.7 — График зависимости  $\varphi(t)$  от  $\delta_\omega$

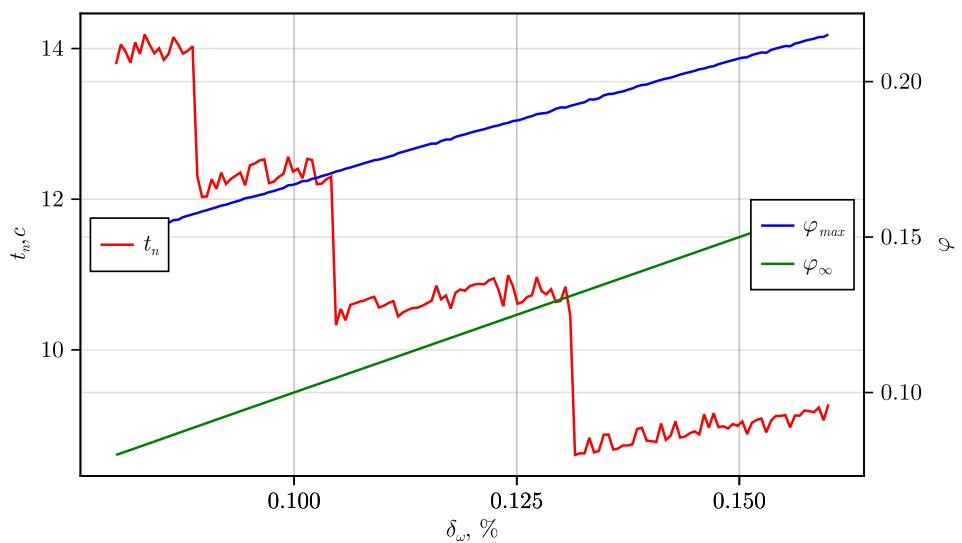


Рисунок 4.8 — Графики зависимости  $t_n$ ,  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_\infty$  от  $\delta_\omega$

## 5 Анализ результатов численного моделирования

Из анализа графиков зависимости времени переходного процесса  $t_{\pi}$  от варьируемых параметров САР следует, что:

1. Изменение  $t_{\pi}$  происходит ступенчато, что, как видно из объёмных графиков, связано с «горбами», возникающими при колебаниях и методом определения этой величины, связанной с допуском. Наивысшая точка «горба» находится в его середине, по мере его уменьшения или увеличения сначала проходить допуск будут его крайние точки, но не центр, а с прохождением центра «горба» в допуск в него попадает вся его длина;
2. При увеличении  $T_a$  и  $\delta_{\omega}$  величина времени переходного процесса падает, тогда как при увеличении  $T_s$  и  $T_{\pi}$  это значение растёт.

Из анализа графиков зависимости максимальной динамической ошибки регулирования  $\varphi_{\max}$  от варьируемых параметров САР следует, что:

1. С ростом  $T_{\pi}$ ,  $T_s$  и  $\delta_{\omega}$  значение динамической ошибки регулирования растёт, тогда как с ростом  $T_a$  её значение падает;
2. При варьировании  $T_{\pi}$ ,  $T_s$  и  $\delta_{\omega}$  значение максимальной динамической ошибки изменяется линейно, тогда как при варьировании  $T_a$  значение изменяется нелинейно. Скорость этого уменьшения уменьшается с ростом  $T_a$ .

Из анализа графиков зависимости статической ошибки регулирования  $\varphi_{\infty}$  от варьируемых параметров САР следует, что:

1. При варьировании параметров  $T_s$  и  $T_{\pi}$ , а также  $T_a$ , исключив участок неустойчивости, значение  $\varphi_{\infty}$  остаётся неизменным и численно равным значению коэффициента обратной связи  $\delta_{\omega} = 0.12$ ;
2. С ростом  $\delta_{\omega}$  значение  $\varphi_{\infty}$  линейно растёт.

## **Заключение**

По итогам проведения численного моделирования изменения параметров переходного процесса при варьировании параметров САР конденсационной паровой турбины без промежуточного перегрева пара получено, что:

- Для уменьшения времени переходного процесса  $t_{\pi}$  следует увеличивать значения  $T_a$  и  $\delta_\omega$  и уменьшать значения  $T_s$  и  $T_\pi$ ;
- Для уменьшения максимальной динамической ошибки регулирования  $\varphi_{\max}$  следует увеличивать значение  $T_a$  и уменьшать значения  $T_\pi$ ,  $T_s$  и  $\delta_\omega$ ;
- Для уменьшения статической ошибки регулирования  $\varphi_\infty$  следует уменьшать величину  $\delta_\omega$ ;
- При уменьшении величины постоянной времени ротора  $T_a$  система может потерять устойчивость по Ляпунову.

## **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.