

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

Отчёт по практической работе №2
по дисциплине «Теория автоматического регулирования»
«Редуцирование модели САР паровой турбины до колебательного 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

В данной лабораторной работе проведено редуцирование модели системы автоматического регулирования (САР) паровой турбины до одного колебательного звена. Основная цель состояла в поиске параметров этого звена:

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС, КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ЗВЕНО.

СОДЕРЖАНИЕ

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	9
4.1	Варьирование T_a	10
4.2	Варьирование T_π	10
5	Анализ результатов численного моделирования	10
	Заключение	11

Введение

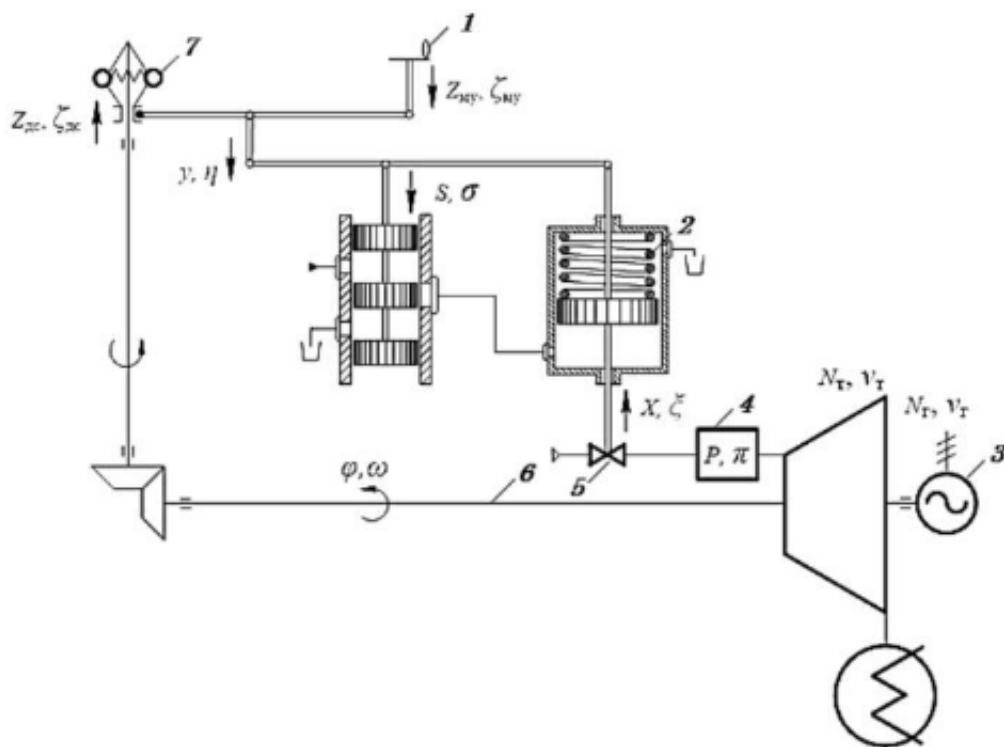
Цель работы состоит в редуцировании математической модели САР конденсационной паровой турбины без промежуточного перегрева и отбора пара до единичного колебательного звена. Работа проведена с помощью пакетов DifferentialEquations.jl и Plots.jl языка программирования Julia в среде Pluto.

Задача работы заключается в поиске значений параметров колебательного звена, при которых его переходная функция будет эквивалентна исходной переходной функции модели САР ПТУ.

Актуальность исследования заключается в упрощении математической модели, что позволит тратить меньше ресурсов на симуляцию.

1 Описание исследуемой САР и исходные данные

Объектами исследования являются система регулирования угловой скорости ротора паровой турбины без промежуточного перегрева пара, принципиальная схема которой изображена на рисунке 1.1, и колебательное звено.



1 — механизм управления; 2 — сервомотор (гидравлический усилитель);
3 — генератор; 4 — паровая ёмкость между регулирующим клапаном и соплами турбины;
5 — регулирующий клапан; 6 — ротор турбогенератора; 7 — датчик угловой
скорости ротора; φ — относительное изменение угловой скорости ротора (величина,
характеризующая ошибку регулирования); π — относительное изменение давление пара
перед соплами турбины; ξ — относительное изменение положения регулирующего клапана
(или поршня сервомотора); η — относительное изменение положения выходной
координаты элемента сравнения; ν_r — относительное изменение нагрузки на генераторе;
 $\zeta_{\text{мн}}$ — относительное изменение положения механизма управления

Рисунок 1.1 — Принципиальная схема САР угловой скорости ротора

Исходные значения параметров САР указаны в таблицы 1.1.

Таблица 1.1 — Назначение промежутков варьирования

T_a	T_π	T_s	δ_ω
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:

$$\begin{cases} T_a \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \pi - \nu_r \\ T_\pi \cdot \frac{d\pi}{dt} + \pi = \xi \\ T_s \cdot \frac{d\xi}{dt} + \xi = \eta \\ \eta = -\frac{\varphi}{\delta_\omega} + \zeta_{\text{му}} \end{cases}$$

где T_a — постоянная времени ротора;

T_π — постоянная времени паровой ёмкости;

T_s — постоянная времени сервомотора;

δ_ω — величина, пропорциональная коэффициенту усиления разомкнутой системы;

η — относительное изменение положения выходной координаты элемента сравнения;

φ — относительное изменение угловой скорости ротора турбины и генератора. Характеризует ошибку регулирования;

π — относительное изменение давления пара в паровой ёмкости;

ξ — относительное изменение положения регулирующего органа;

$\zeta_{\text{му}}$ — относительное изменение положения механизма управления турбиной;

ν_r — относительное изменение нагрузки на генераторе.

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

Колебательное звено также представлено его передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\zeta T s + 1}$$

где K — коэффициент усиления;

T — постоянная времени звена;

s — переменная Лапласа;

ζ — величина затухания.

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      ηr = 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 - ηr(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 строках 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 $\nu_r(t)$, начальные условия u_0 и время симуляции;
- На строках 10-16 описана собственно исследуемая система;
- На строке 18 из уравнения, начальных условий и времени симуляции формулируется задача `prob` для решателя;
- На строке 19 происходит решение системы уравнений с помощью выбранного решателя `Tsit5()` и выбранных коэффициентов точности для него; Результат представляет из себя численную зависимость $\varphi(t)$ для одного режима САР.

3 Методика исследования

Таким образом, можно назначить промежутки для варьирования параметров САР. Для T_s , T_π и δ_ω промежутки произвольного размера назначены симметрично их исходным значениям из соображения наглядности. Для T_a промежутков назначен с учётом T_{a_k} , чтобы продемонстрировать потерю устойчивости системы. Назначенные промежутки указаны в таблице 3.2.

Таблица 3.2 — Назначение промежутков варьирования

Параметр	Исходное значение	Промежуток
T_a	$7c$	$2.125c - 10c$
T_π	$0.4c$	$0.4c - 1c$
T_s	$0.7c$	$0.2c - 0.6c$
δ_ω	0.12%	$0.08\% - 0.16\%$

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

Для вычисления установившейся ошибки регулирования φ_0 производится визуальная оценка времени переходного процесса по полученным трёхмерным графикам, после чего берётся значение $\varphi(t)$ при t заведомо больше t_π . Ответственная за это функция приведена на листинге 3.2.

Листинг 3.2 — Функция для вычисления φ_∞

```
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 φ_0 больше, чем на допуск 5%.

Листинг 3.3 — Функция для вычисления t_{π}

```

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 φ_{\max} используется функция, приведённая на листинге 3.4. В ней берётся наибольшее по модулю значение φ , так как $\varphi_0 = 0$.

Листинг 3.4 — Функция для вычисления φ_{\max}

```

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

```

4 Результаты численного моделирования

4.1 Варьирование T_α

4.2 Варьирование T_π

5 Анализ результатов численного моделирования

Из анализа графиков зависимости времени переходного процесса t_n от варьируемых параметров САР следует, что:

1. Изменение t_n 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 проходят 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 δ_ω величина времени переходного процесса падает, тогда как при увеличении T_s и T_π это значение растёт.

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

1. С ростом T_π , T_s и δ_ω значение динамической ошибки регулирования растёт, тогда как с ростом T_a её значение падает;
2. При варьировании T_π , T_s и δ_ω 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 φ_∞ от варьируемых параметров САР следует, что:

1. При варьировании параметров T_s и T_π , а также T_a , исключив участок неустойчивости, значение φ_∞ остаётся неизменным и численно равным значению коэффициента обратной связи $\delta_\omega = 0.12$;
2. С ростом δ_ω значение φ_∞ 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_{Π} следует увеличивать значения T_a и δ_{ω} и уменьшать значения T_s и T_{π} ;
- Для уменьшения максимальной динамической ошибки регулирования φ_{\max} следует увеличивать значение T_a и уменьшать значения T_{π} , T_s и δ_{ω} ;
- Для уменьшения статической ошибки регулирования φ_{∞} следует уменьшать величину δ_{ω} ;
- При уменьшении величины постоянной времени ротора T_a система может потерять устойчивость по Ляпунову.