

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

ФАКУЛЬТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОТЕХНИКИ

Лабораторная работа №4

**«Параметрический синтез и исследование цифровой системы
управления с ПД-регулятором и объектом в виде
последовательно включенных апериодического и
интегрирующего звеньев из условия обеспечения заданного по
качеству переходного процесса»**

по дисциплине Системы управления в электроприводе

Выполнил: Студент группы
R34362 Ванчукова Т. С.
Преподаватель: Ловлин С.Ю.

Санкт-Петербург, 2023

Содержание

Задание	3
Ход работы.....	5
Задание 1. Моделирование Д-регулятора.....	5
Задание 1.1. Работа цифрового Д-регулятора	5
Задание 1.2. Цифровой ПД-регулятор – апериодическое звено первого порядка	6
Задание 1.3. Поиск эквивалентного числа запаздывания	7
Задание 2. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\varepsilon = 0$	8
Задание 2.1. Синтез регулятора	8
Задание 2.2. Моделирование работы системы, настроенной на технический оптимум.....	9
Задание 2.3	11
Задание 3. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\varepsilon = T_0$	14
Задание 3.1. Аппроксимация апериодическим звеном	14
Задание 3.2. Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования	15
Задание 4. Синтез системы из условия обеспечения в ней «биномиальной настройки» и провести моделирование согласно заданиям №2 и №3	17
Результаты работы	24
Выводы	26

Задание

Задание 1

- 1.1 Снять временные диаграммы, иллюстрирующие работу цифрового Д-регулятора при постоянном и линейно нарастающем входных воздействиях на входе регулятора для случая вычислительной задержки $\varepsilon = 0$. Представить схему модели.
- 1.2 Проанализировать работу разомкнутой системы «Цифровой ПД-регулятор – апериодическое звено первого порядка с постоянной времени T и единичным коэффициентом передачи» в режиме компенсации постоянной времени T при значениях коэффициента $K_d = \frac{T}{T_0}$ и $K_d = \frac{1}{\exp(\frac{T_0}{T}) - 1}$. Снять временные диаграммы работы.
- 1.3 Построить непрерывную модель цифрового ПД-регулятора, учитывающую неполную компенсацию цифровым регулятором постоянной объекта T .

Определить величину малой некомпенсированной постоянной $T_{\mu r}$, учитывающей в непрерывной модели неполную компенсацию цифровым ПД-регулятором постоянной объекта T . Искомая величина $T_{\mu r}$ определяется в режиме моделирования, когда процессы в исследуемой цифровой системе и эквивалентной модели максимально приближены друг к другу. Максимальное приближение процессов имеет место при минимальном значении функционала

$$F = \int abs(y - y_{\varepsilon}(T_{\mu ri}))dt,$$

где y – процесс в цифровой системе, $y_{\varepsilon}(T_{\mu ri})$ – процесс в эквивалентной системе при некотором значении постоянной $T_{\mu r}$.

Результаты моделирования занести в Таблица 1, построить зависимость $F = \varphi(T_{\mu ri})$.

Режим моделирования $T_0 = 1$; $T = 5 - 10$; $T_{\mu r} = (0.1, 0.4, 0.9)T_0$. Снять временные диаграммы, иллюстрирующие работу. Представить схему модели.

Задание 2. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\varepsilon = 0$

- 2.1 Построить эквивалентную модель и осуществить ее настройку на «оптимум по модулю».

- 2.2 Построить полную эквивалентную модель системы, учитывающую динамические свойства цифрового ПД-регулятора в виде системы, содержащей объект управления, аналоговый П-регулятор, компенсирующий постоянную времени T ПД-регулятора, а также находящееся в цепи обратной связи апериодическое звено первого порядка с единичным коэффициентом передачи и постоянной времени $T_{\text{зап}}$. Величину постоянной времени $T_{\text{зап}}$ считать равной $\frac{T_0}{2}$.
- 2.3 Осуществить настройку полной эквивалентной модели системы на «оптимум по модулю» при малой некомпенсированной постоянной времени, определяемой на основании соотношения $T_{\mu} = T_{\mu r} + T_{\text{зап}}$. Снять осциллограммы переходных процессов для значений $T_0 = 1, 0.5$; $T_1 = 10, 5$; параметры переходных процессов занести в Таблица 2. Представить схему модели.

Задание 3. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\varepsilon = T_0$.

- 3.1 Снять временные диаграммы, иллюстрирующие работу цифрового ПД-регулятора при постоянном и линейно нарастающем входных воздействиях на входе регулятора для случая вычислительной задержки $\varepsilon = T_0$. Представить схему модели.
- 3.2 Построить цифровую модель системы и полную эквивалентную модель, учитывающие вычислительную задержку $\varepsilon = T_0$.
- 3.3 Осуществить настройку полной эквивалентной модели системы на «оптимум по модулю» при малой некомпенсированной постоянной времени, определяемой на основании соотношения $T_{\mu} = T_{\mu r} + T_{\text{зап}} + T_0$. Снять осциллограммы переходных процессов для значений $T_0 = 1; 0.5$; $T_1 = 10, 5$; параметры переходных процессов занести в Таблица 3. Представить схему модели.

Задание 4. Осуществить синтез системы из условия обеспечения в ней «биномиальной настройки» и провести моделирование согласно пп.2, 3.

Ход работы

Задание 1. Моделирование Д-регулятора

Задание 1.1. Работа цифрового Д-регулятора

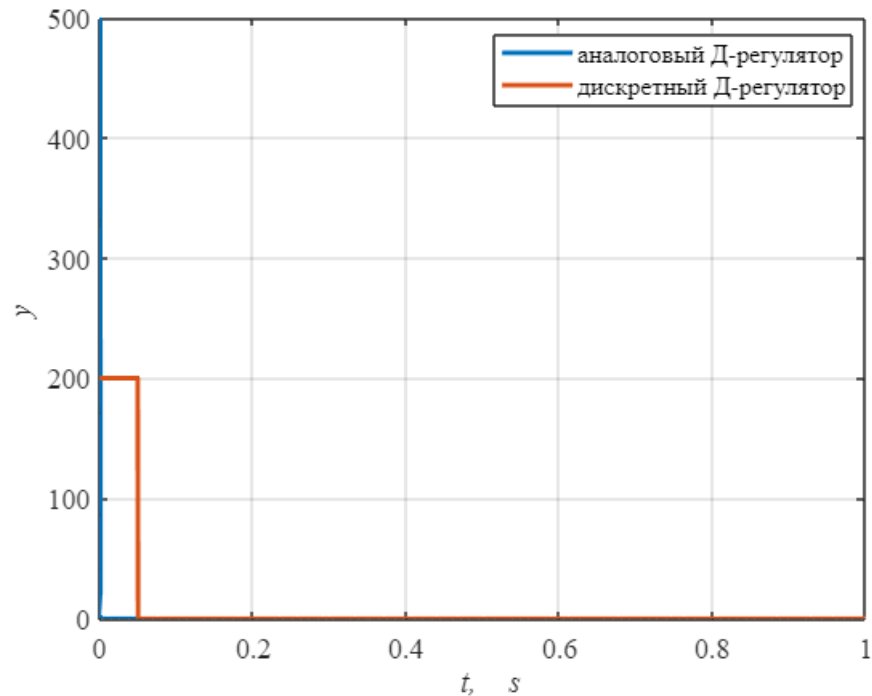


Рисунок 1 – Графики выхода аналогового и цифровых Д-регуляторов при постоянном входном воздействии

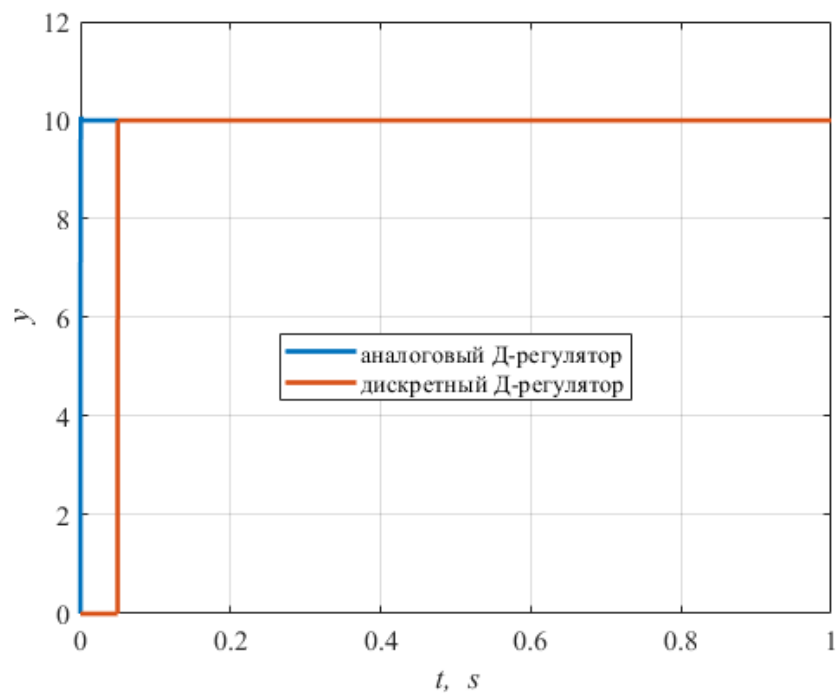


Рисунок 2 – Графики выхода аналогового и цифровых Д-регуляторов при линейно-возрастающем входном воздействии

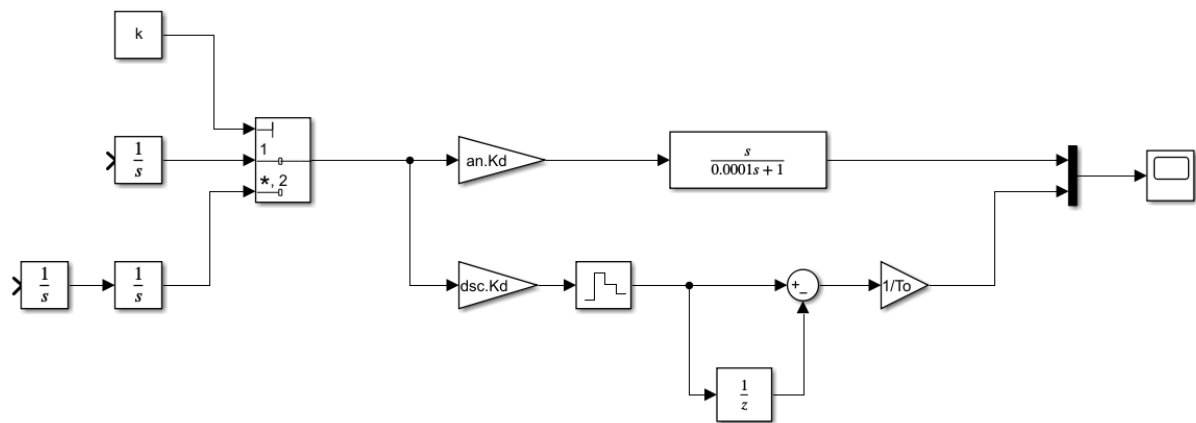


Рисунок 3 – Схема моделирования

Задание 1.2. Цифровой ПД-регулятор – апериодическое звено первого порядка

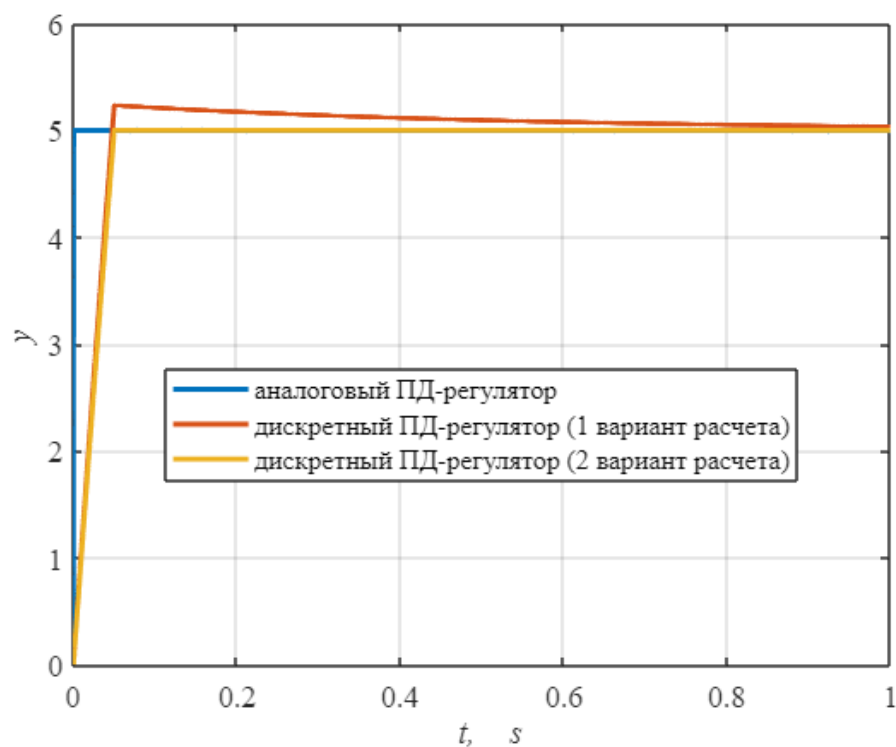


Рисунок 4 – Графики выхода аналогового и цифровых ПД-регуляторов при двух вариантах расчета значения коэффициента K_d

В первом варианте использовали следующую формулу для вычисления K_d : $K_d = \frac{T}{T_0}$. Для второго варианта: $K_d = \frac{1}{\exp(\frac{T_0}{T}) - 1}$.

Видим, что второй вариант лучше, так как нет перерегулирования.

Коэффициент $K_d = \frac{1}{\exp(\frac{T_0}{T}) - 1}$ позволяет компенсировать Д-звено.

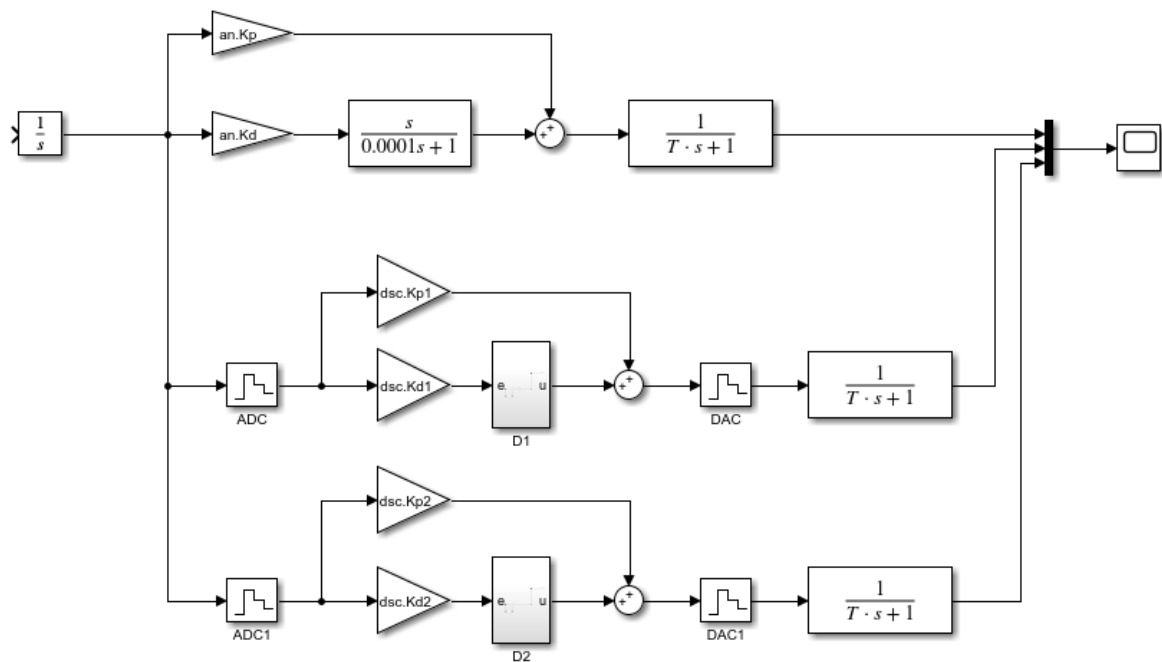


Рисунок 5 – Схема моделирования

Задание 1.3. Поиск эквивалентного числа запаздывания

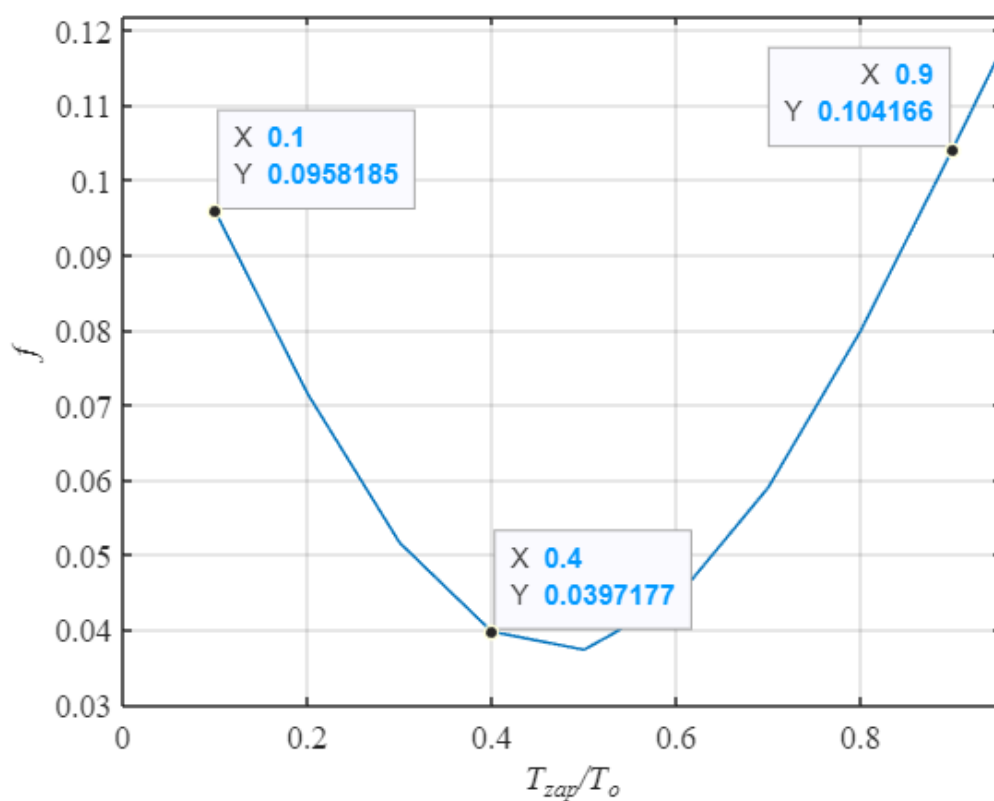


Рисунок 6 – График функционала системы

Видим по Рисунок 6, что $T_{\mu r} = 0.5$. Моделирование при $T_{\mu r} = 0.5$ представлено Рисунок 7.

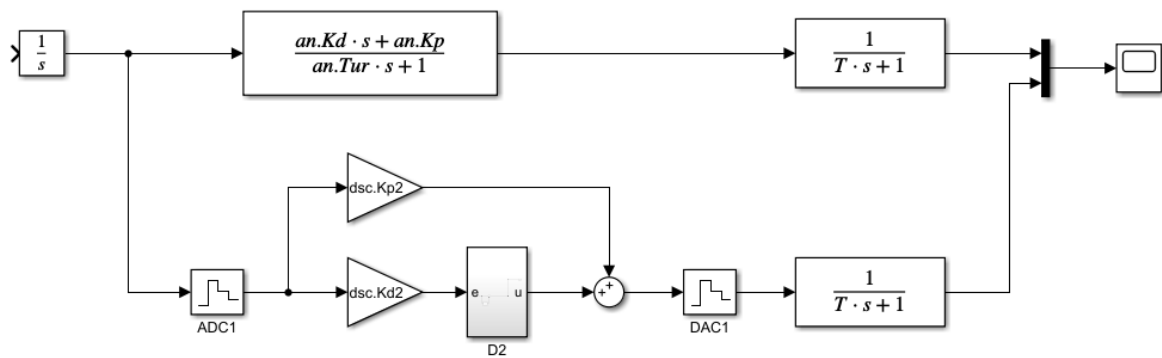


Рисунок 7 – Схема моделирования

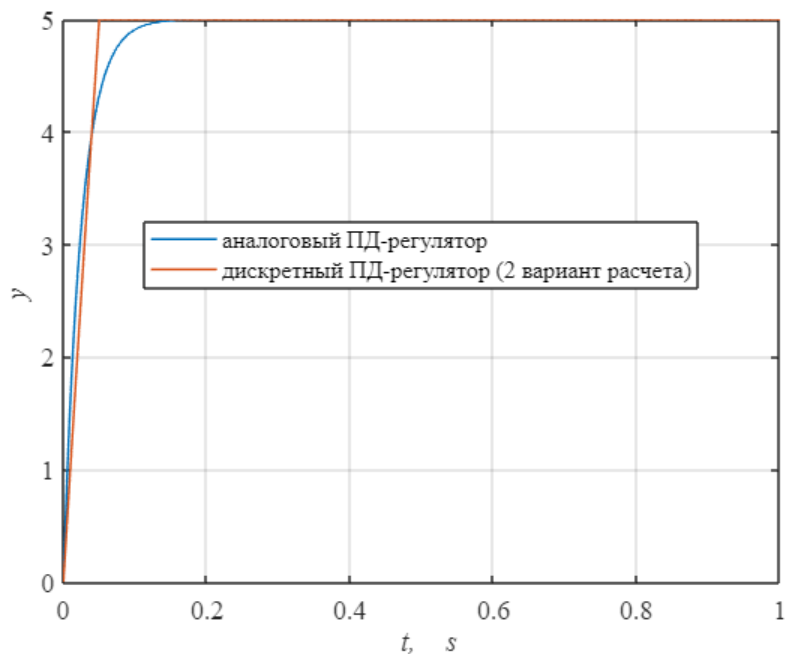


Рисунок 8 – Результаты моделирования

Задание 2. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\varepsilon = 0$

Задание 2.1. Синтез регулятора

Передаточная функция разомкнутой системы, настроенной на технический оптим.

$$T_t = 0.005$$

$$T_\mu = T_t$$

$$W_{ol} = \frac{1}{2T_\mu s(T_\mu s + 1)}$$

$$W_{ob} = Ce \cdot \frac{kdw}{(J \cdot s)}$$

$$W_{reg} = \frac{W_{ol}}{W_{ob}} = \frac{J (T_t s + 1)}{2Ce \cdot T_\mu \cdot kdw (T_\mu s + 1)}$$

Д-регулятор должен компенсировать T_t и T_μ .

Задание 2.2. Моделирование работы системы, настроенной на технический оптимум

$$\begin{aligned} Tt &= 0.005 \\ To &= 0.1 \cdot Tt \\ Tur &= 0.5 \cdot To \end{aligned}$$

Вводим запаздывание: $Tu = Tur$

$$Kg = \frac{J}{2 \cdot Ce \cdot Tu \cdot kdw}$$

Аналоговый ПД-регулятор:

$$\begin{aligned} Kda &= Kg \cdot Tt, \\ Kpa &= Kg \cdot 1. \end{aligned}$$

Цифровой ПД-регулятор:

$$Kd2dg = Kg \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{T_o}{T_t}\right) - 1},$$

$$Kp2dg = Kg \cdot 1.$$

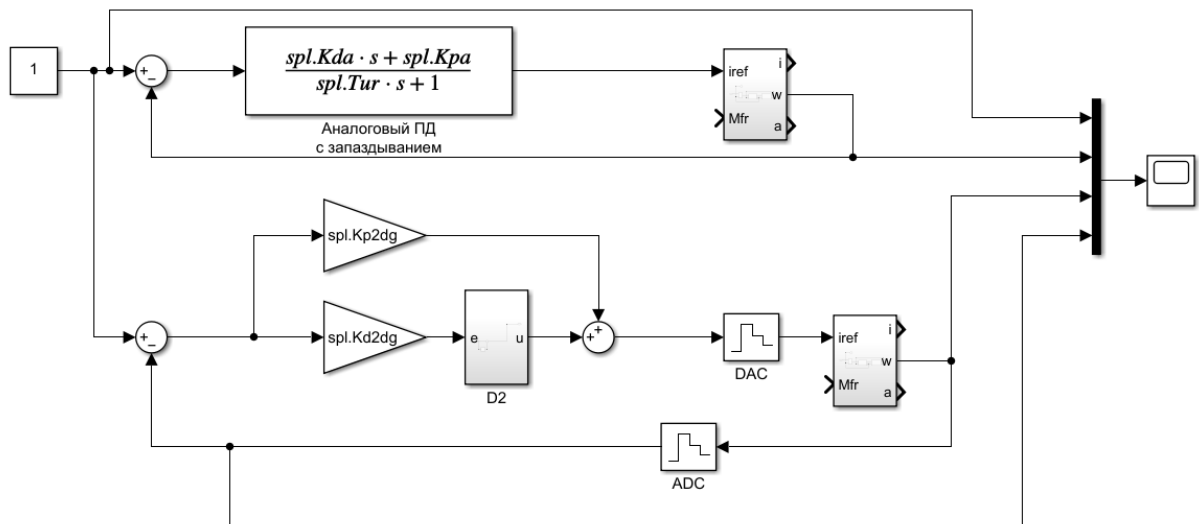


Рисунок 9 – Схема моделирования системы, настроенной на технический оптимум

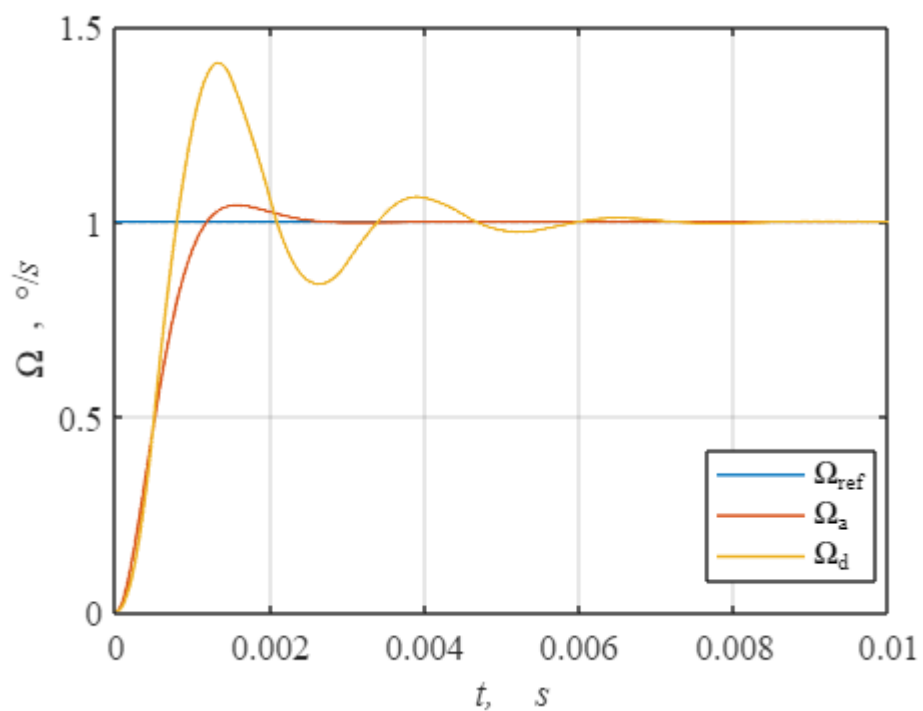


Рисунок 10 – График моделирование работы, настроенный на технический оптимум ($T_o = 0.1 \cdot T_t$)

Найдем время переходного процесса для входа в 5%.

$$t_{p1} = t_1 - t_0 = 3 \cdot T_\mu$$

$$t_{p2} = t_{end} - t_0 = 16.8 \cdot T_\mu$$

t_0 – время начала переходного процесса

t_{p1} – максимальные значения t , при котором справедливо:

$$\varepsilon(t_1) \geq D, D = 0.05 \cdot |y_0 - y_{ss}|$$

t_{p2} – максимальное значения t , при котором справедливо:

$$\varepsilon(t_1) \leq D, D = 0.05 \cdot |y_0 - y_{ss}|$$

Вычислим перерегулирование Δy :

$$\Delta y = \frac{|\sup(y) - y_{ss}|}{|y_0 - y_{ss}|} = 40.9 \%$$

Задание 2.3

Аппроксимация апериодическим звеном

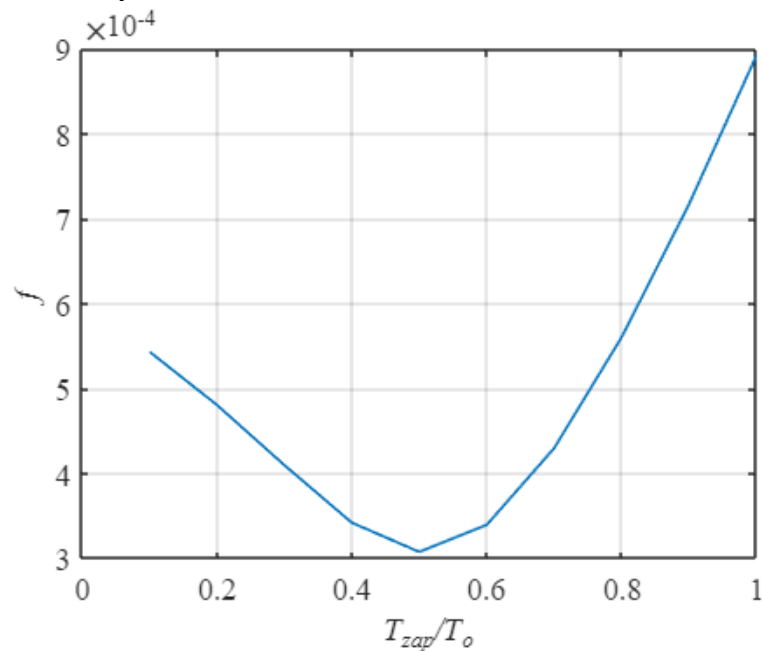


Рисунок 11 – График функционала системы

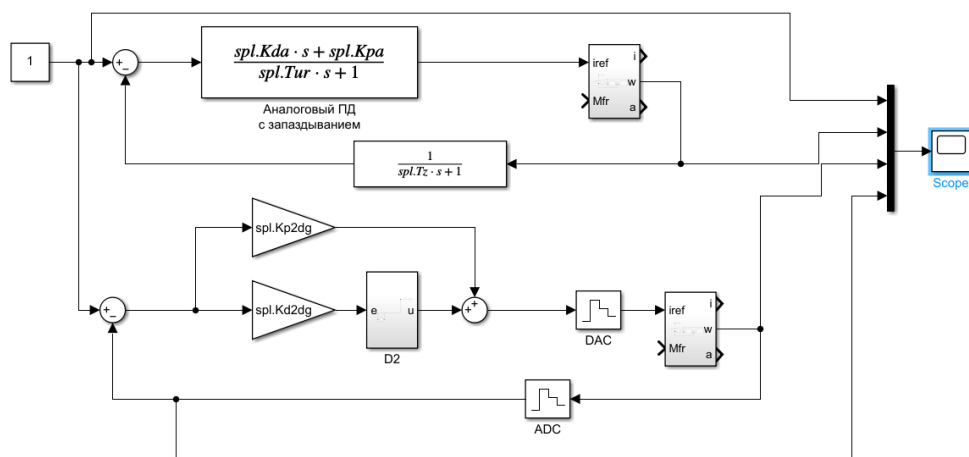


Рисунок 12 – Схема моделирования

Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

$$\begin{aligned}T_o &= 0.5 \cdot T_t \\T_{ur} &= 0.5 \cdot T_o \\T_z &= 0.5 \cdot T_o \\T_u &= T_{ur} + T_z\end{aligned}$$

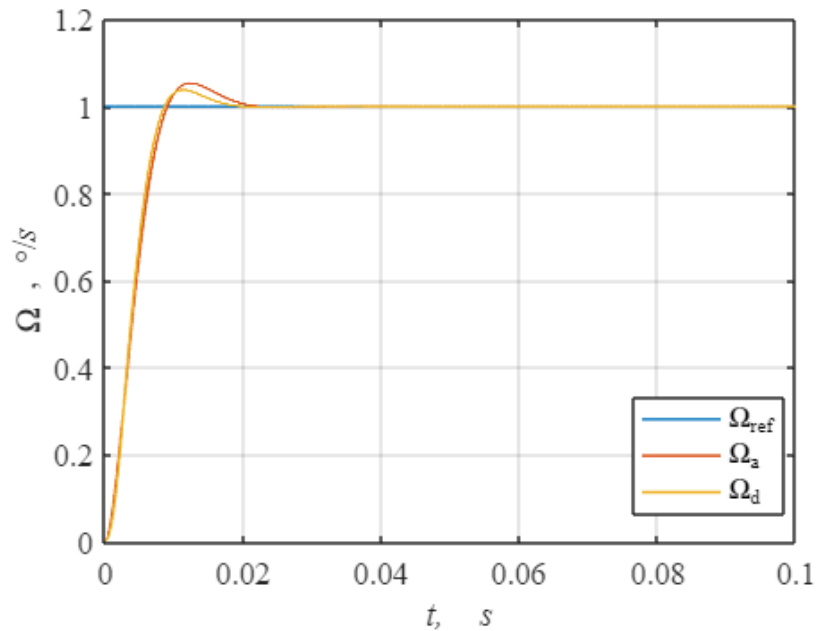


Рисунок 13 – График моделирование работы, настроенный на технический оптимум ($T_o = 0.5 \cdot T_t$)

Найдем время переходного процесса для входа в 5%.

$$\begin{aligned}t_{p1} &= t_1 - t_0 = 3 \cdot T_\mu \\t_{p2} &= t_{end} - t_0 = 3 \cdot T_\mu\end{aligned}$$

Вычислим перерегулирование Δy :

$$\Delta y = 3.8 \%$$

$$T_o = 1 \cdot T_t$$

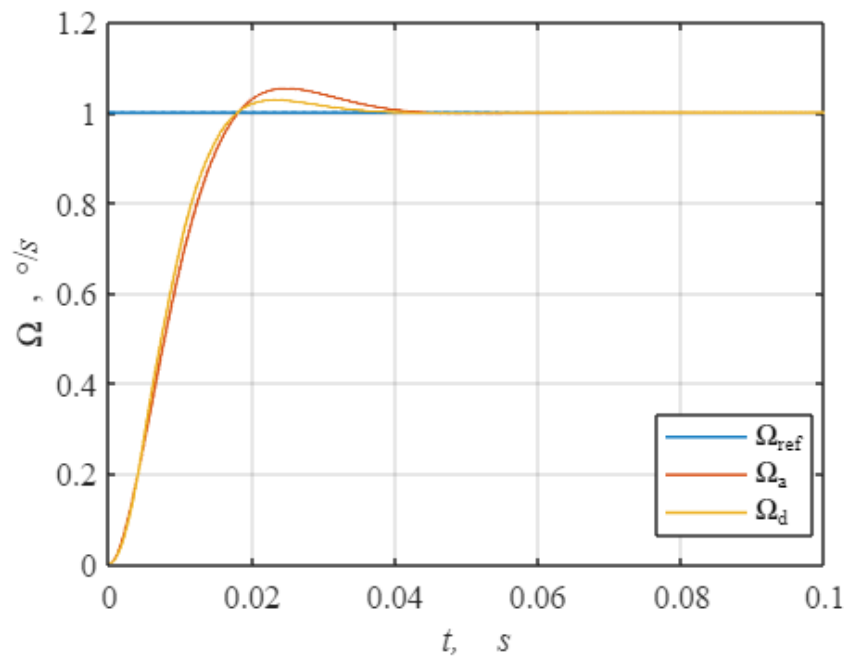


Рисунок 14 – График моделирование работы, настроенный на технический оптимум ($T_o = 1 \cdot T_t$)

Найдем время переходного процесса для входа в 5%.

$$t_{p1} = t_1 - t_0 = 3.1 \cdot T_\mu$$

$$t_{p2} = t_{end} - t_0 = 3.1 \cdot T_\mu$$

Вычислим перерегулирование Δy :

$$\Delta y = 2.8 \%$$

Рисунок 16. Схема моделирования

Задание 3.2. Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

$$T_o = 0.5 \cdot T_t$$

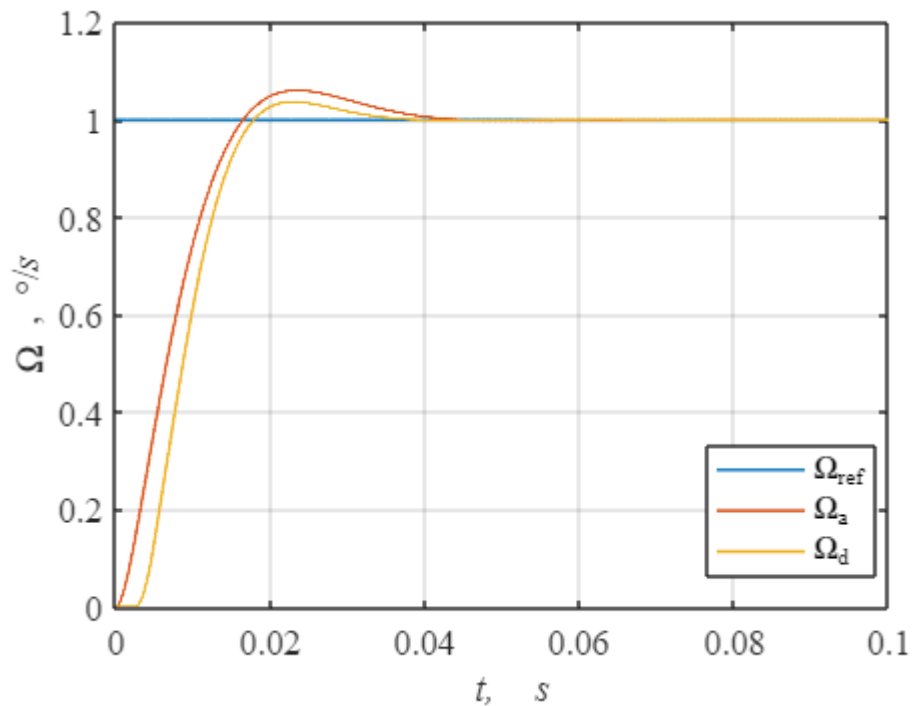


Рисунок 17 – График моделирование работы, настроенный на технический оптимум ($T_o = 0.5 \cdot T_t$)

Найдем время переходного процесса для входа в 5%.

$$t_{p1} = t_1 - t_0 = 3.2 \cdot T_\mu$$
$$t_{p2} = t_{end} - t_0 = 3.2 \cdot T_\mu$$

Вычислим перерегулирование Δy :

$$\Delta y = 3.6 \%$$

$$T_o = 1 \cdot T_t$$

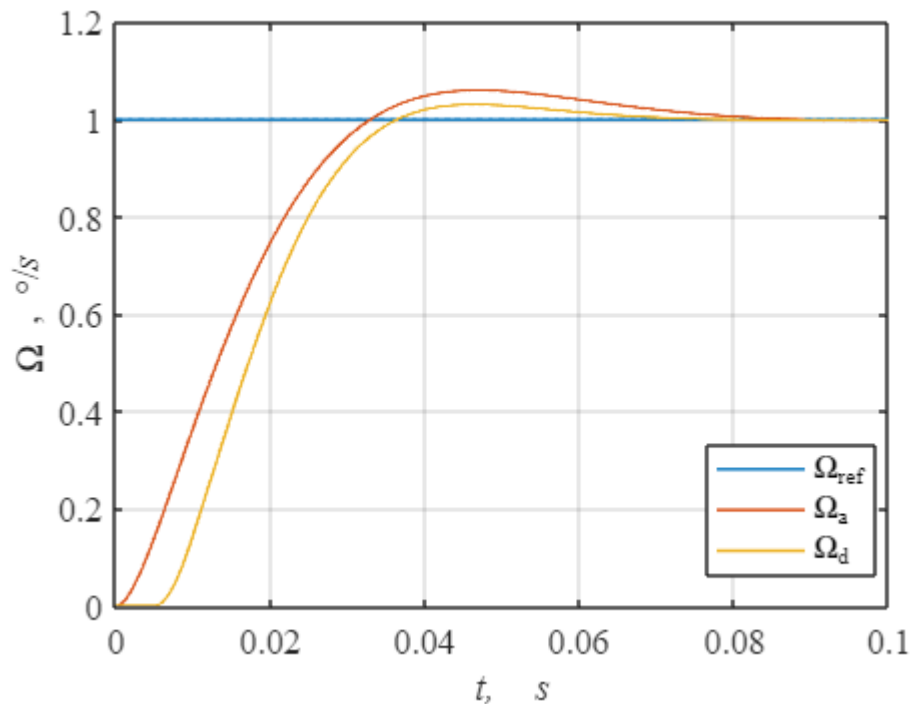


Рисунок 18 – График моделирование работы, настроенный на технический оптимум ($T_o = 1 \cdot T_t$)

Найдем время переходного процесса для входа в 5%.

$$t_{p1} = t_1 - t_0 = 3.2 \cdot T_\mu$$

$$t_{p2} = t_{end} - t_0 = 3.2 \cdot T_\mu$$

Вычислим перерегулирование Δy :

$$\Delta y = 3.1 \%$$

С ПД-регулятором не должно быть отличий в системе (имеется в виду быстроедействие цифровой и аналоговой систем), потому что ПД-регулятор сдвигает фазу в 90 градусов, и система становится более устойчивой, в отличие от ПИ-регулятора, что мы и можем наблюдать, сравнив графики лабораторной работы №3 и №4.

Задание 4. Синтез системы из условия обеспечения в ней «биномиальной настройки» и провести моделирование согласно заданиям №2 и №3

Задание 4.2

Синтез регулятора

Передаточная функция разомкнутой системы, настроенной на технический оптимум.

$$\begin{aligned}
 T_t &= 0.005 \\
 T_\mu &= T_t \\
 W_{ol} &= \frac{1}{3T_\mu s(T_\mu s + 1)} \\
 W_{ob} &= Ce \cdot \frac{kdw}{(J \cdot s)} \\
 W_{reg} &= \frac{W_{ol}}{W_{ob}} = \frac{J(T_t s + 1)}{3Ce \cdot T_\mu \cdot kdw (T_\mu s + 1)}
 \end{aligned}$$

Моделирование работы системы, настроенной на технический оптимум

$$\begin{aligned}
 Tt &= 0.005 \\
 To &= 0.1 \cdot Tt \\
 Tur &= 0.5 \cdot To
 \end{aligned}$$

Вводим запаздывание: $Tu = Tur$

$$Kg = \frac{J}{3 \cdot Ce \cdot Tu \cdot kdw}$$

Аналоговый ПД-регулятор:

$$\begin{aligned}
 Kda &= Kg \cdot Tt, \\
 Kpa &= Kg \cdot 1.
 \end{aligned}$$

Цифровой ПД-регулятор:

$$\begin{aligned}
 Kd2dg &= Kg \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{T_o}{T_t}\right) - 1}, \\
 Kp2dg &= Kg \cdot 1.
 \end{aligned}$$

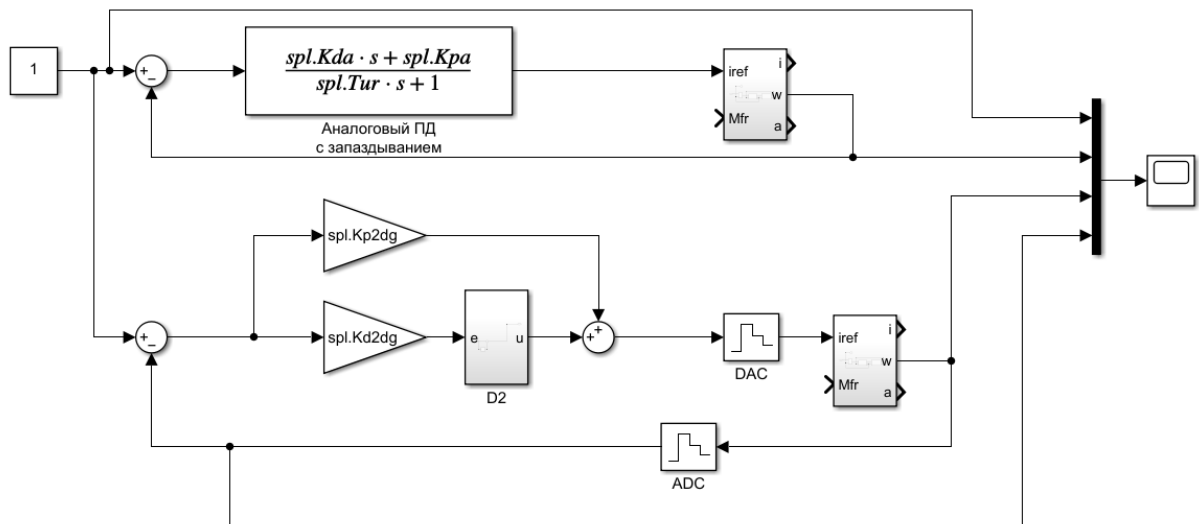


Рисунок 19 – Схема моделирования системы, настроенной на технический оптимум

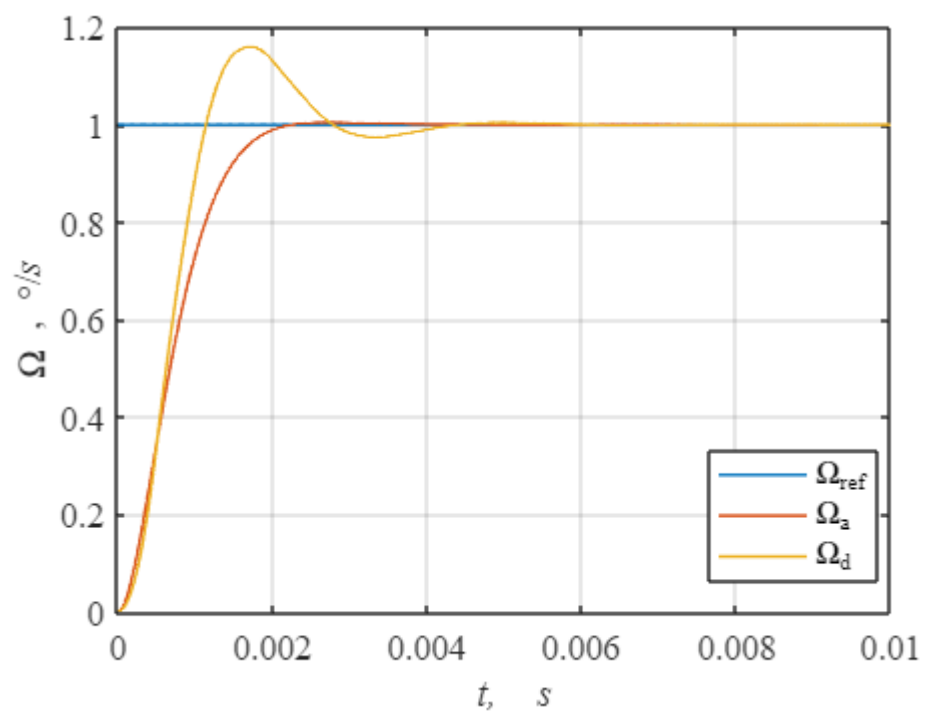


Рисунок 20 – График моделирование работы, настроенный на технический оптимум ($T_o = 0.1 \cdot T_t$)

Найдем время переходного процесса для входа в 5%.

$$t_{p1} = t_1 - t_0 = 4.3 \cdot T_\mu$$

$$t_{p2} = t_{end} - t_0 = 9.8 \cdot T_\mu$$

t_0 – время начала переходного процесса

Вычислим перерегулирование Δu :

$$\Delta y = \frac{|\sup(y) - y_{ss}|}{|y_0 - y_{ss}|} = 16 \%$$

Аппроксимация апериодическим звеном

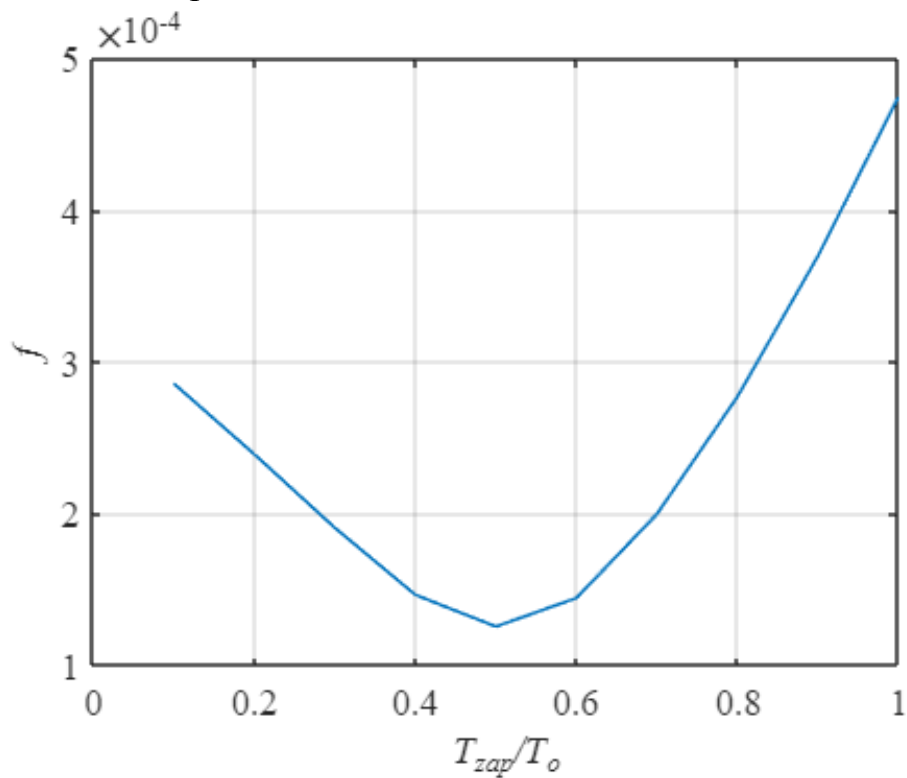


Рисунок 21 – График функционала системы

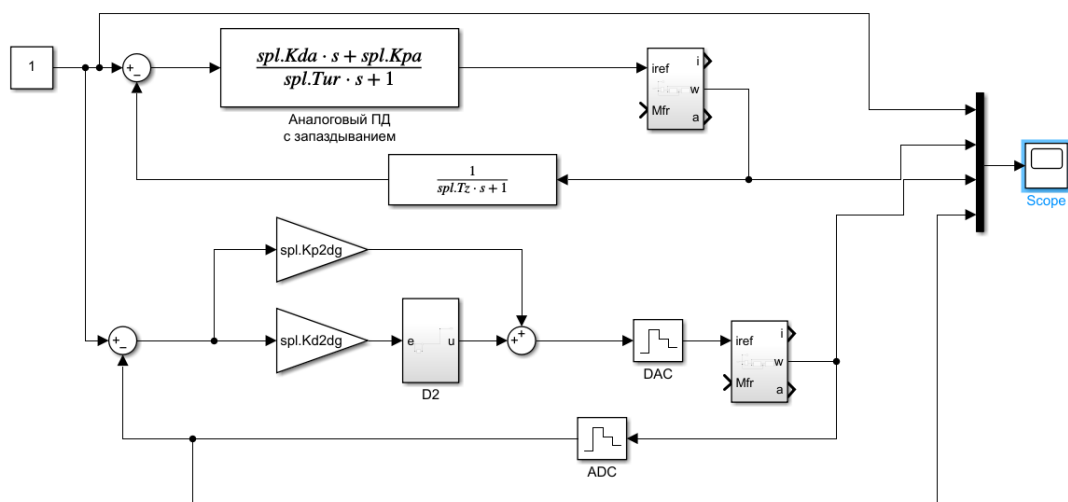


Рисунок 22 – Схема моделирования

Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

$$\begin{aligned}T_o &= 0.5 \cdot T_t \\T_{ur} &= 0.5 \cdot T_o \\T_z &= 0.5 \cdot T_o \\T_u &= T_{ur} + T_z\end{aligned}$$

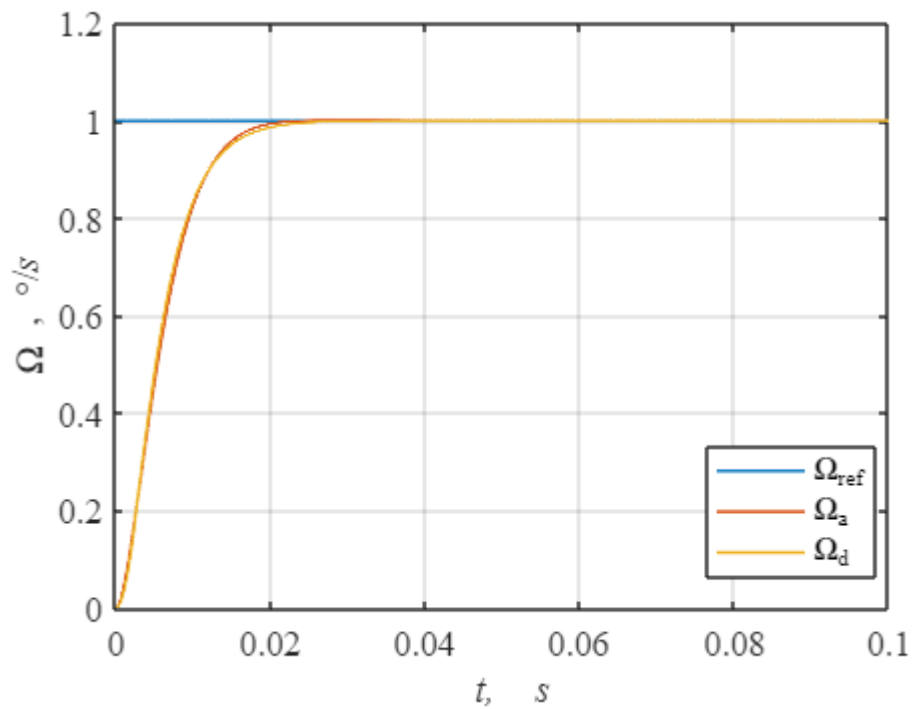


Рисунок 23 – График моделирование работы, настроенный на технический оптимум ($T_o = 0.5 \cdot T_t$)

Найдем время переходного процесса для входа в 5%.

$$\begin{aligned}t_{p1} &= t_1 - t_0 = 6 \cdot T_\mu \\t_{p2} &= t_{end} - t_0 = 6 \cdot T_\mu\end{aligned}$$

Вычислим перерегулирование Δy :

$$\Delta y = 0 \%$$

$$T_o = 1 \cdot T_t$$

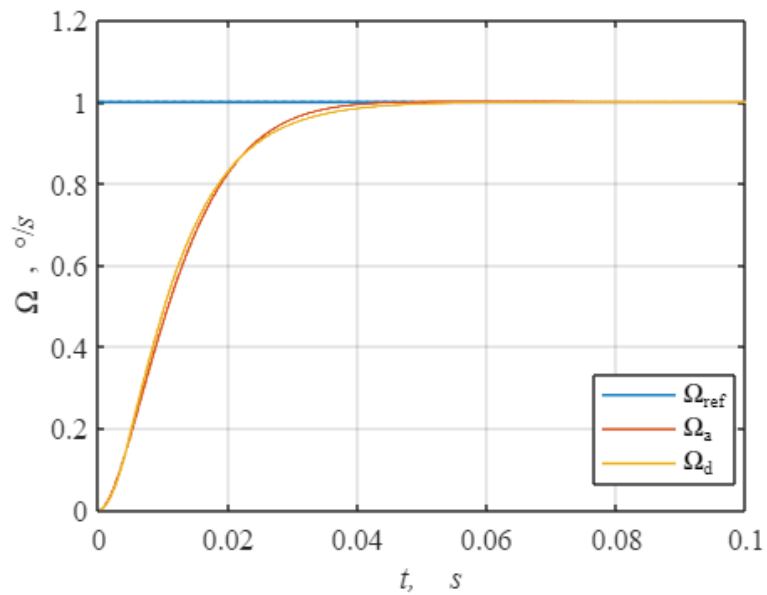


Рисунок 24 – График моделирование работы, настроенный на технический оптимум ($T_o = 1 \cdot T_t$)

Найдем время переходного процесса для входа в 5%.

$$t_{p1} = t_1 - t_0 = 6.1 \cdot T_\mu$$

$$t_{p2} = t_{end} - t_0 = 6.1 \cdot T_\mu$$

Вычислим перерегулирование Δy :

$$\Delta y = 0 \%$$

Задание 4.3

Аппроксимация апериодическим звеном

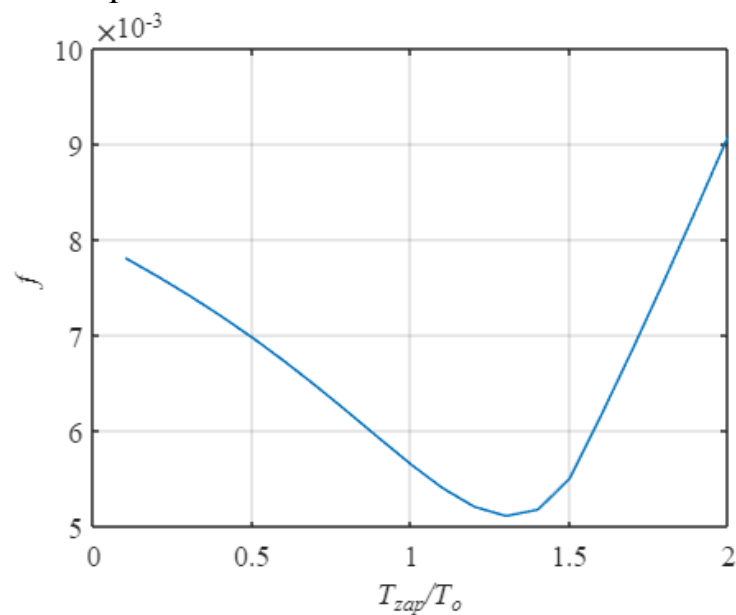


Рисунок 25. График функционала системы

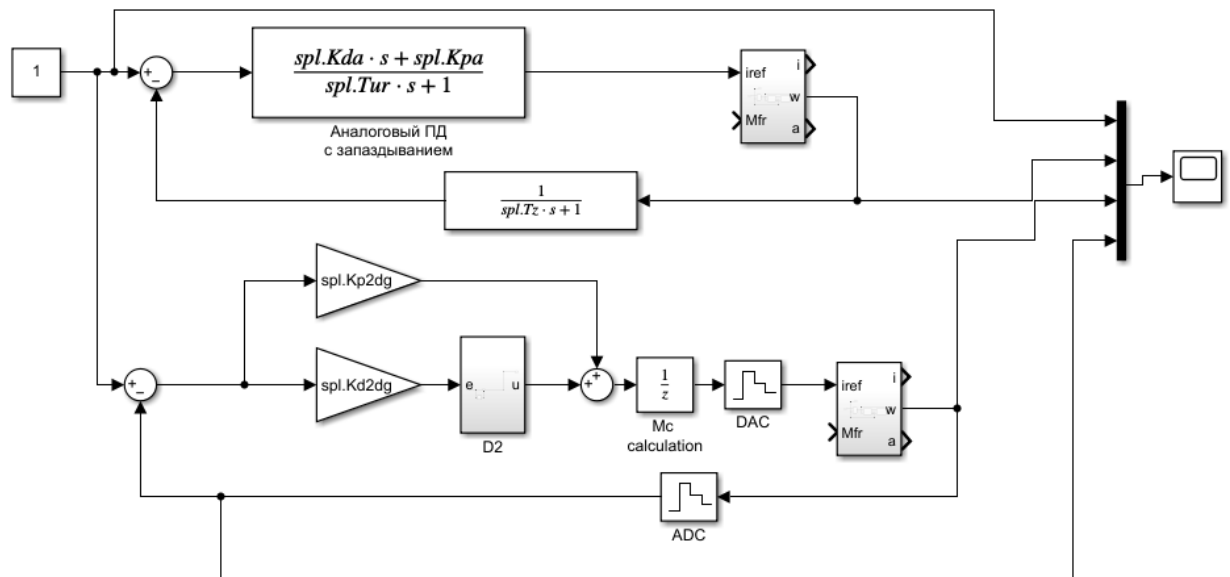


Рисунок 26. Схема моделирования

Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

$$T_o = 0.5 \cdot T_t$$

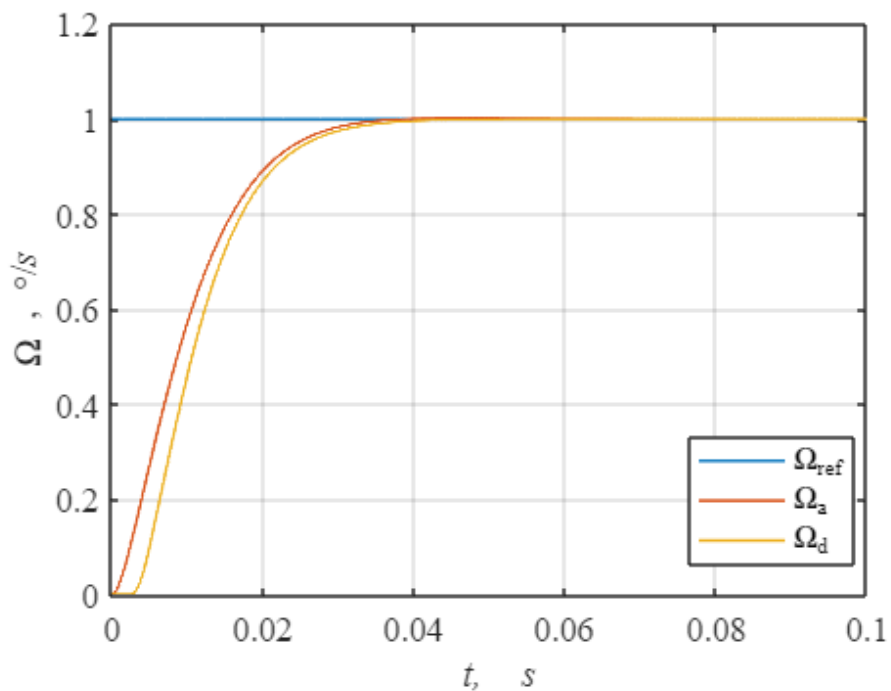


Рисунок 27 – График моделирование работы, настроенный на технический оптимум ($T_o = 0.5 \cdot T_t$)

Найдем время переходного процесса для входа в 5%.

$$t_{p1} = t_1 - t_0 = 5.8 \cdot T_\mu$$

$$t_{p2} = t_{end} - t_0 = 5.8 \cdot T_\mu$$

Вычислим перерегулирование Δy :

$$\Delta y = 0 \%$$

$$T_o = 1 \cdot T_t$$

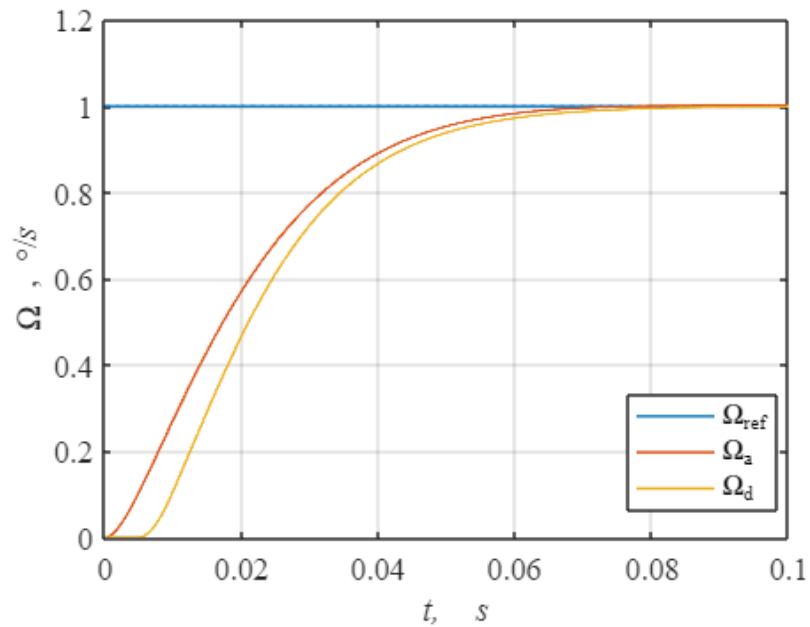


Рисунок 28 – График моделирование работы, настроенный на технический оптимум ($T_o = 1 \cdot T_t$)

Найдем время переходного процесса для входа в 5%.

$$t_{p1} = t_1 - t_0 = 5.8 \cdot T_\mu$$

$$t_{p2} = t_{end} - t_0 = 5.8 \cdot T_\mu$$

Вычислим перерегулирование Δy :

$$\Delta y = 0 \%$$

Результаты работы

Таблица 1

$T_{\text{зап}}$	$0.1 \cdot T_0$	$0.4 \cdot T_0$	$0.9 \cdot T_0$
F	0.096	0.04	0.1

Таблица 2

T_1	T_μ	$t_{p1}, \text{с}$	$t_{p2}, \text{с}$	$\Delta y, \%$
$T_1 = 0.5$	0.00025	3	3	3.8
$T_1 = 1$	0.005	3.1	3.1	2.8

Таблица 3

T_1	T_μ	$t_{p1}, \text{с}$	$t_{p2}, \text{с}$	$\Delta y, \%$
$T_1 = 0.5$	0.005	3.2	3.2	3.6
$T_1 = 1$	0.01	3.2	3.2	3.1

Таблица 4

T_1	T_μ	$t_{p1}, \text{с}$	$t_{p2}, \text{с}$	$\Delta y, \%$
$T_1 = 0.5$	0.0025	6.0	6.0	0
$T_1 = 1$	0.005	6.1	6.1	0

Таблица 5

T_1	T_μ	$t_{p1}, \text{с}$	$t_{p2}, \text{с}$	$\Delta y, \%$
$T_1 = 0.5$	0.0045	5.8	5.8	0
$T_1 = 1$	0.009	5.8	5.8	0

Выводы

В процессе выполнения работы исследовали систему управления с ПД-регулятором и объектом в виде последовательно включенных апериодического и интегрирующего звеньев из условия обеспечения заданного по качеству переходного процесса.

При расчете коэффициента K_d для моделирования ПД-регулятора было выяснено, что лучше использовать $K_d = \frac{1}{\exp\left(\frac{T_0}{T}\right) - 1}$, чем $K_d = \frac{T}{T_0}$, так как нет перерегулирования. Коэффициент $K_d = \frac{1}{\exp\left(\frac{T_0}{T}\right) - 1}$ позволяет компенсировать Д-звено.

В ходе проведенного исследования было определено, что при величине периода дискретности управления $T_0 = 0.5$ (при вводе задержки $T_0 = 1.5$) обеспечивается качество переходного процесса в исследуемой цифровой системе, близкое к процессу в эквивалентной непрерывной системе.

При настройке системы на биномиальный оптимум увеличилось время переходного процесса, перерегулирование уменьшилось по сравнению с техническим оптимумом. При вводе задержки значение перерегулирование равно 0. при величине периода дискретности управления $T_0 = 0.5$ (при вводе задержки $T_0 = 1.3$) обеспечивается качество переходного процесса в исследуемой цифровой системе, близкое к процессу в эквивалентной непрерывной системе.