

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ**  
**ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ**  
**ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

**по курсу «Компьютерное управление мехатронными системами»**  
**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**

Автор работы: Кирбаба Д.Д.

Группа: R3438

Преподаватель: Ловлин С.Ю.

Санкт-Петербург

2024

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы .....	4
2. Ход работы .....	4
1. Исходные данные .....	4
2. Моделирование цифрового Д-регулятора.....	4
3. Цифровой ПД-регулятор – апериодическое звено первого порядка .....	7
4. Непрерывная модель цифрового ПД-регулятора, учитывающая неполную компенсацию цифровым регулятором постоянной объекта $T$ .....	9
5. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\epsilon = 0$ . Настройка на технический оптимум .....	12
Синтез регулятора .....	12
Моделирование работы системы настроенной на технический оптимум .....	13
Моделирование полной эквивалентной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора. Аппроксимация апериодическим звеном .....	15
Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования.....	17
6. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\epsilon = T_0$ . Настройка на технический оптимум .....	19
Моделирование полной эквивалентной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора. Аппроксимация апериодическим звеном .....	20
Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования.....	21
7. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\epsilon = 0$ . Настройка на биномиальный оптимум .....	23
Синтез регулятора .....	23
Моделирование работы системы настроенной на биномиальный оптимум .....	24

Моделирование полной эквивалентной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора. Аппроксимация апериодическим звеном .....	25
Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования .....	26
8. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\epsilon = T_0$ . Настройка на биномиальный оптимум .....	28
Моделирование полной эквивалентной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора. Аппроксимация апериодическим звеном .....	28
Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования .....	29
3. Выводы .....	31

## 1. Цель работы

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

## 2. Ход работы

### 1. Исходные данные

Сопротивление обмоток двигателя $R$ , Ом	10.8
Индуктивность обмоток двигателя $L$ , Гн	0.023
Момент инерции $J$ , кг·м <sup>2</sup>	91.95
Константа противо-ЭДС $C_e$	2
Константа момента $C_m$	2
Коэффициент передачи датчика скорости, $180/\pi$	57.3

Таблица 1. Исходные данные.

### 2. Моделирование цифрового Д-регулятора

Исследуем временные диаграммы работы аналогового и цифрового Д-регуляторов при постоянном и линейно нарастающем воздействиях на входе регулятора для случая вычислительной задержки  $\epsilon = 0$ .

Зададим равные коэффициенты  $an.K_d = dsc.K_d = 3$ .

Схема модели:

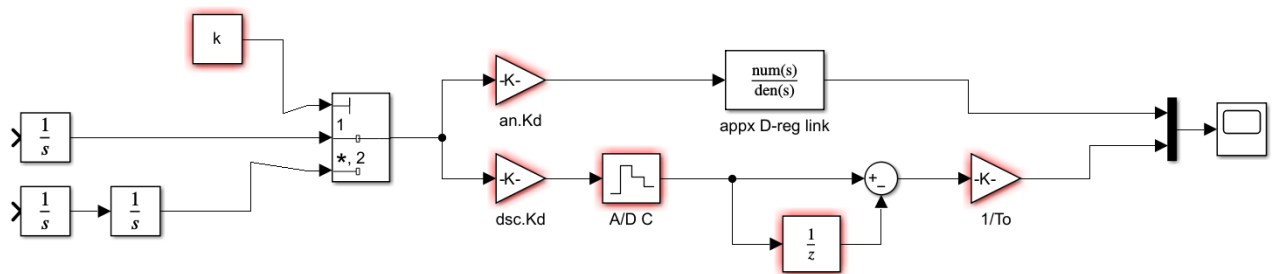


Рисунок 1. Схема моделирования эквивалентных цифрового и аналогового Д-регуляторов.

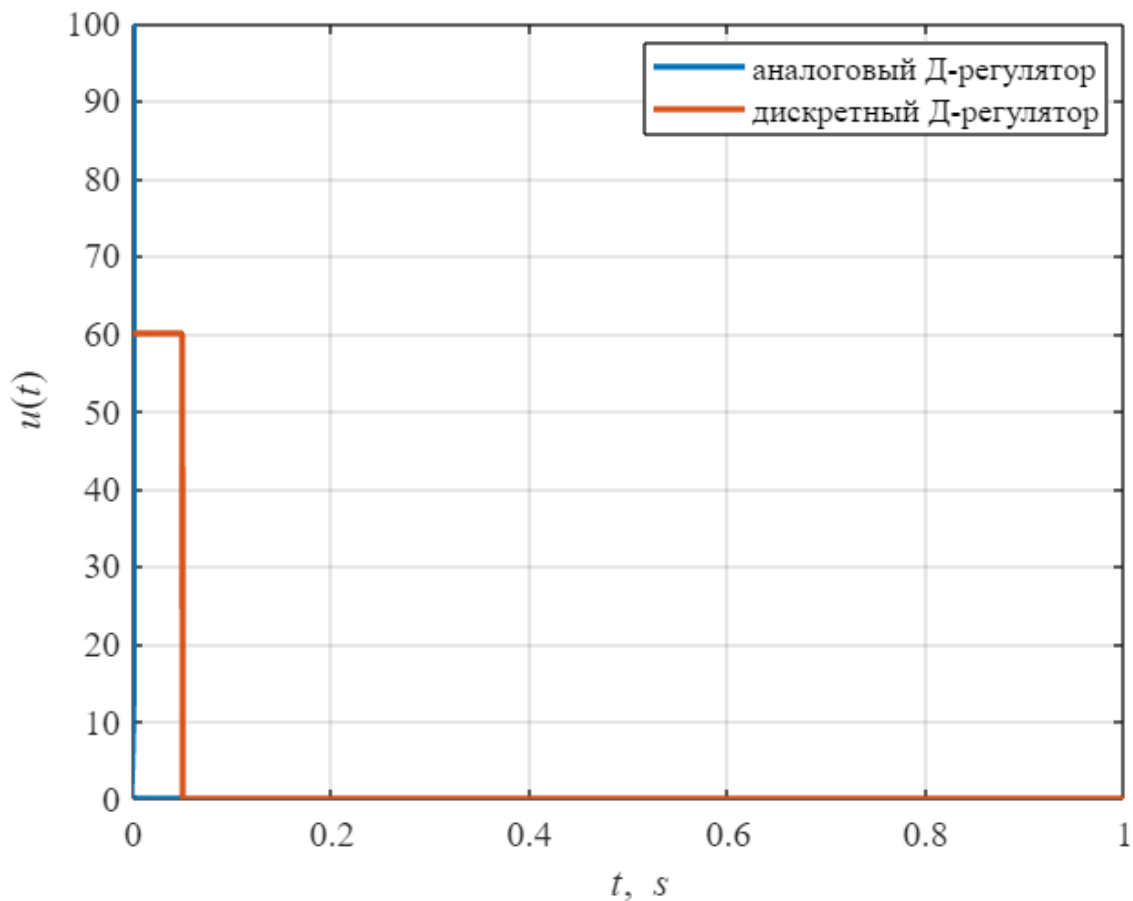


Рисунок 2. Графики работы аналогового и дискретного Д-регуляторов при постоянном входном воздействии.

Синий график (аналоговый) идет до бесконечности в случае, если мы бы смогли реализовать идеальное дифференцирующее звено. В данном случае мы реализовываем его в виде передаточной функции:

$$W(s) = \frac{s}{0.0001s + 1}$$

При стремлении коэффициента в знаменателе у переменной  $s$  к 0, график будет иметь всё большее значение в начале переходного процесса.

Красный график (дискретный) имеет другую форму.

Разница между аналоговым и цифровым Д-регулятором в том, что цифровой регулятор имеет кусочно-постоянный сигнал управления, с шириной равной периоду дискретизации, а аналоговый в идеальном случае является функцией Хевисайда в момент  $t \rightarrow +0$ . А одинаковое у обоих сигналов — энергия ими переносимая (площадь по графиками), она равна коэффициенту регулятором  $an.Kd = dsc.Kd = 3$ .

Поэтому с точки зрения энергии воздействия оба регулятора аналогичны, с точки зрения формы сигнала — существенно различны.

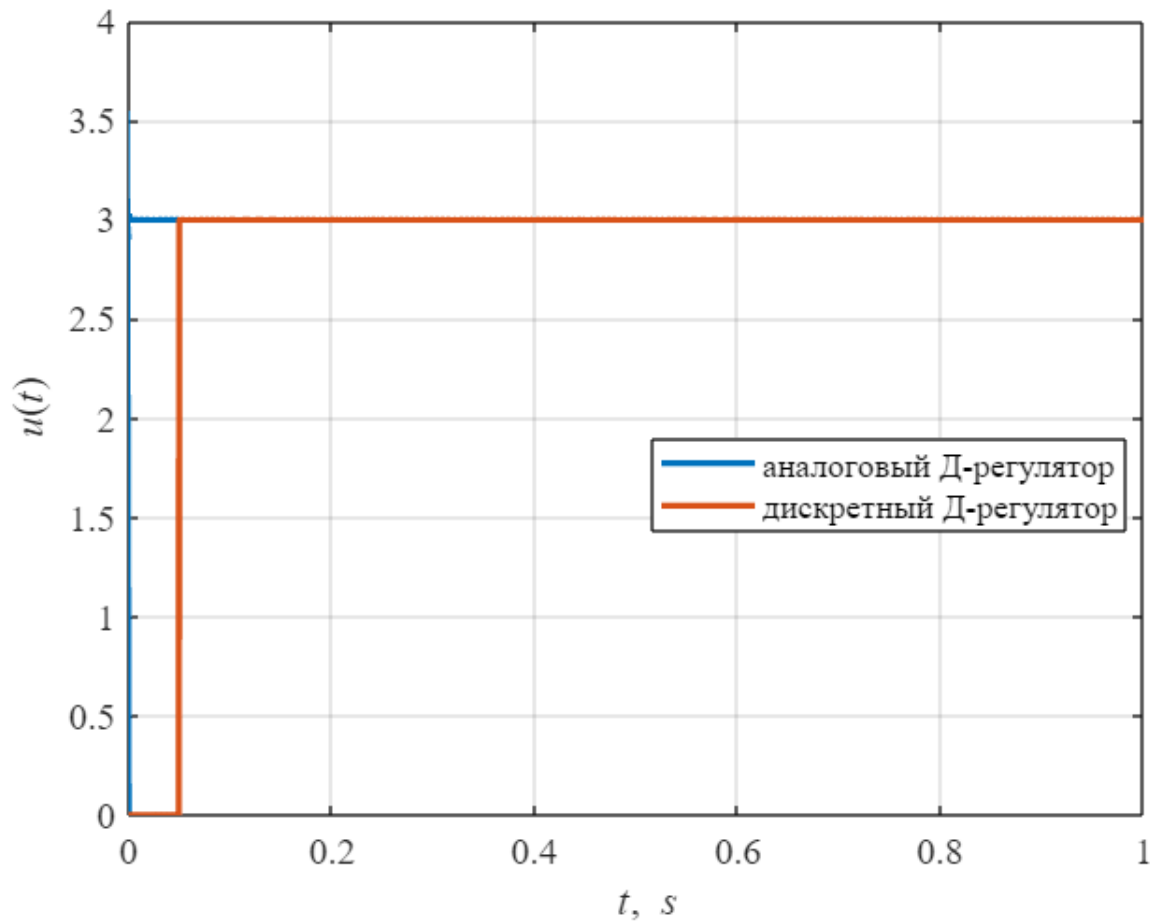


Рисунок 3. Графики работы аналогового и дискретного Д-регуляторов при линейно-возрастающем входном воздействии.

В случае линейно-возрастающего входа оба графика приходят к значению 3, но аналоговый приходит моментально (с учетом  $0.0001 \rightarrow 0$ ), а аналоговый отстает на 1 такт дискретизации.

Для компенсации отставания дискретного регулятора нам опять же придется вводить в аналоговой системе эквивалентное запаздывание, чтобы учесть переход от аналоговой к цифровой системы.

### 3. Цифровой ПД-регулятор – апериодическое звено первого порядка

Проанализируем 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

$$K_d = \frac{T}{T_0}, \quad K_d = \frac{1}{e^{T_0/T} - 1}$$

Пусть  $T = 0.5$  с.

Суть компенсации постоянной времени  $T$ , заключается в том, чтобы составляющие ПД-регулятора в числителе давали  $Ts + 1$ , чтобы это сократилось со знаменателем апериодического звена и будет получаться безинерционное звено (в идеальном случае).

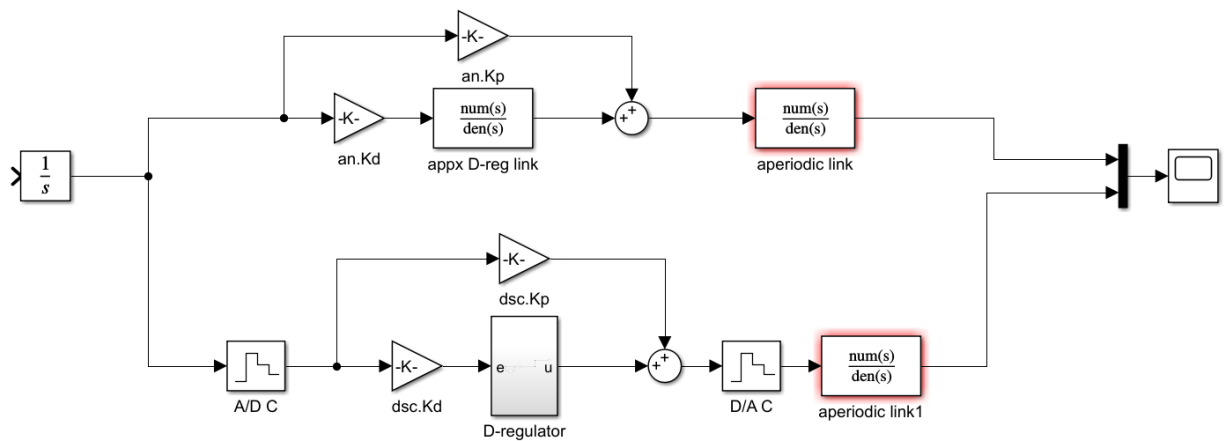


Рисунок 4. Схема моделирования системы "Цифровой и аналоговый ПД-регулятор - апериодическое звено первого порядка" в режиме компенсации постоянной времени  $T$ .

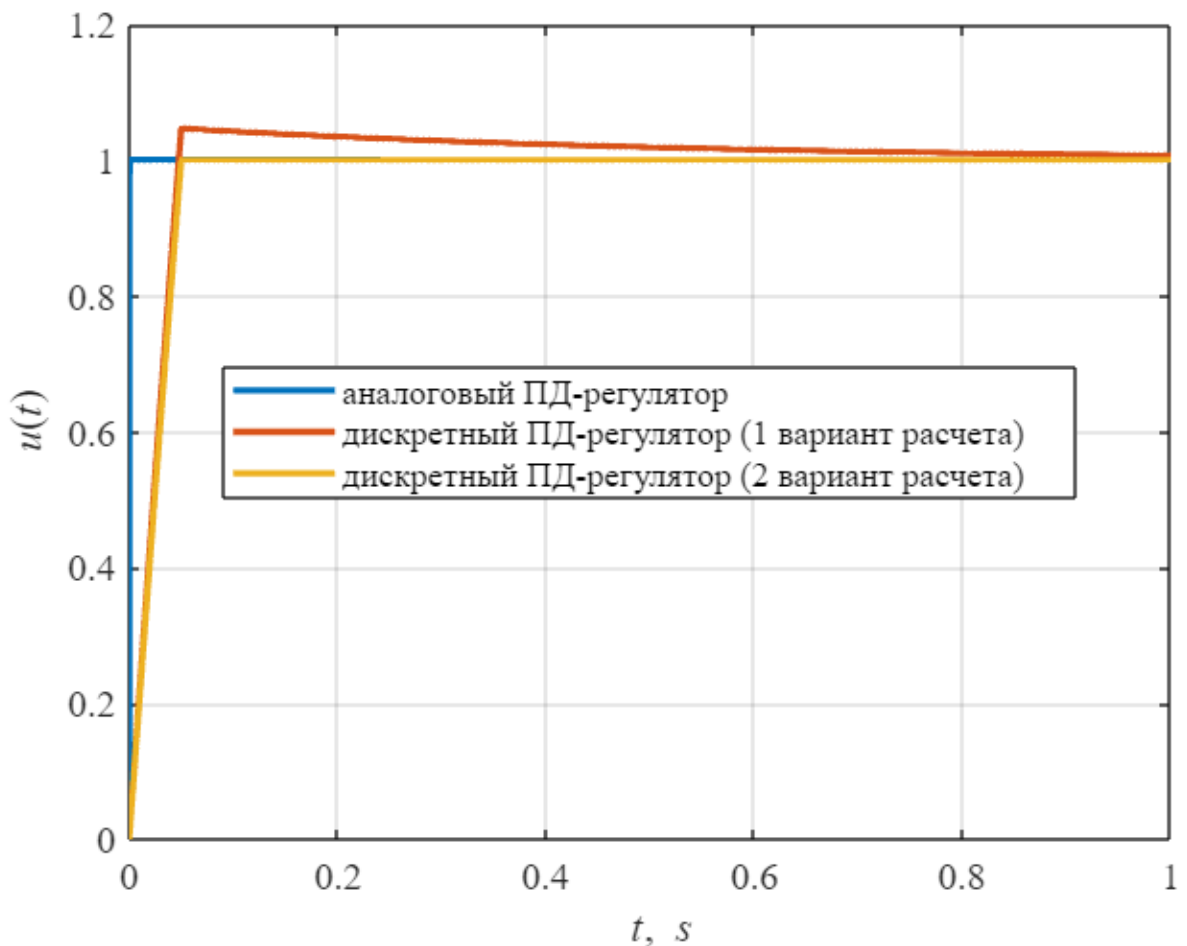


Рисунок 5. Временные диаграммы работы системы "ПД-регулятор - апериодическое звено первого порядка" в режиме компенсации постоянной времени.

Синий график (аналоговый регулятор) в результате компенсации моментально выходит на единицу. Красный график (дискретный регулятор с 1 вариантом расчета  $K_d = T/T_0$ ) выходит с некоторым перерегулированием, а желтый график (дискретный регулятор со 2 вариантом расчета  $K_d = \frac{1}{e^{T_0/T} - 1}$ ) точно выходит на единицу.

Второй вариант расчета дает решение задачи на переходный процесс в апериодическом звене с постоянной времени  $T$ . И найденные коэффициенты позволяют скомпенсировать данное звено.

Добавим коэффициент усиления сигнала  $K_g$ , тогда расчет коэффициентов ПД-регуляторов будет следующим:

$$K_d = K_g \cdot \frac{T}{T_0}, \quad K_d = K_g \cdot \frac{1}{e^{T_0/T} - 1}$$



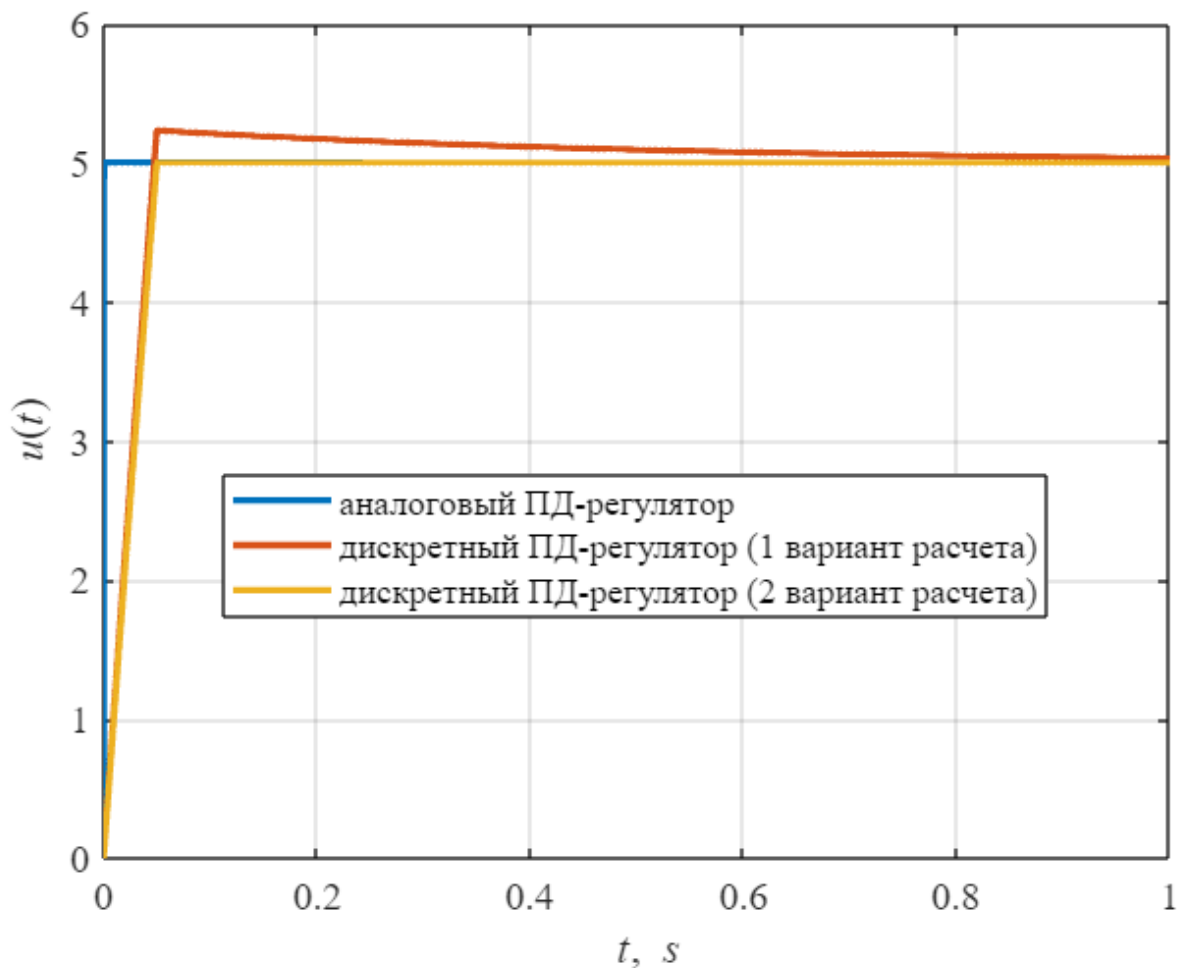


Рисунок 6. Временные диаграммы работы системы "ПД-регулятор - апериодическое звено первого порядка" в режиме компенсации постоянной времени с усилением  $K_g = 5$ .

#### 4. Непрерывная модель цифрового ПД-регулятора, учитывающая неполную компенсацию цифровым регулятором постоянной объекта $T$

Найдем такое апериодическое звено (которое будет добавлять необходимое запаздывание к аналоговому регулятору), которое максимально приблизит аналоговую систему к цифровой.

Определим величину малой некомпенсированной постоянной  $T_{\mu_{reg}}$ , учитывающей в непрерывной модели неполную компенсацию цифровым ПД-регулятором постоянной объекта  $T$ . Искомая величина  $T_{\mu_{reg}}$  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:

$$F = \int abs\left(y - y_{et}\left(T_{\mu_{reg_i}}\right)\right) dt,$$

где  $y$  – процесс в цифровой системе,  $y_{et}(T_{\mu_{reg_i}})$  – процесс в эквивалентной системе при некотором значении постоянной  $T_{\mu_{reg}}$ .

Случай  $T = 5 \cdot T_0, T_0 = 0.05$

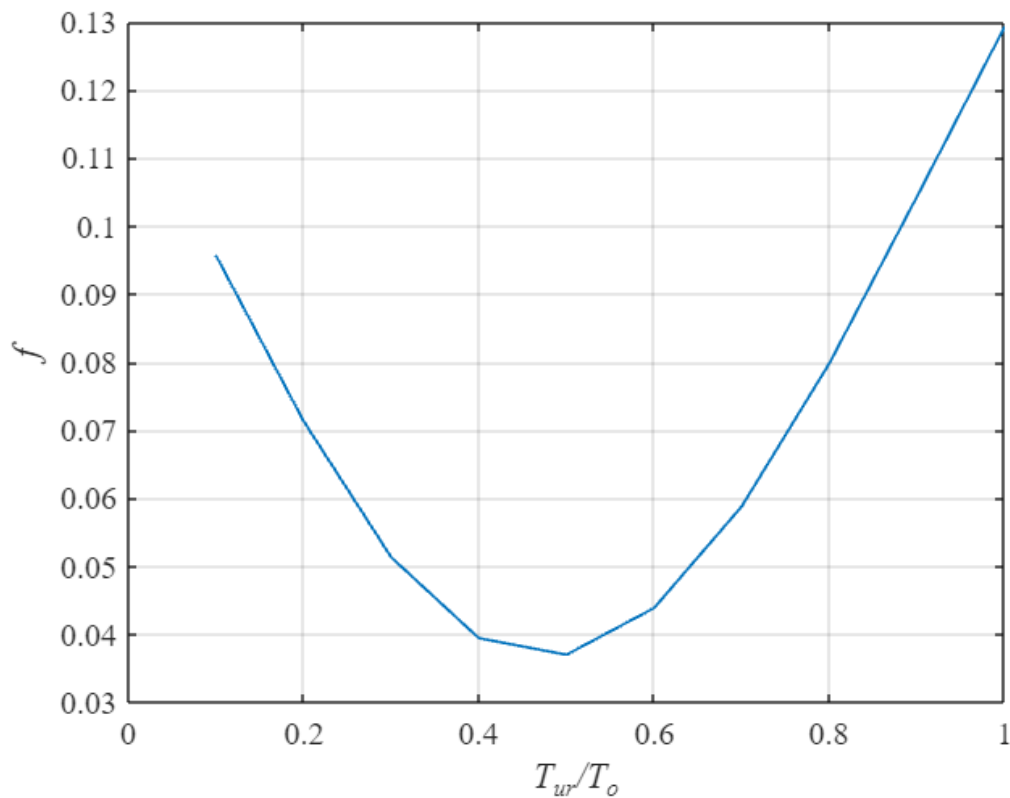


Рисунок 7. График функционала  $F$  при  $T = 5 \cdot T_0$ .

Наиболее близкие процессы имеем при  $T_{\mu_{reg}} = 0.5 \cdot T_0$ .

Промоделируем систему с данным значением

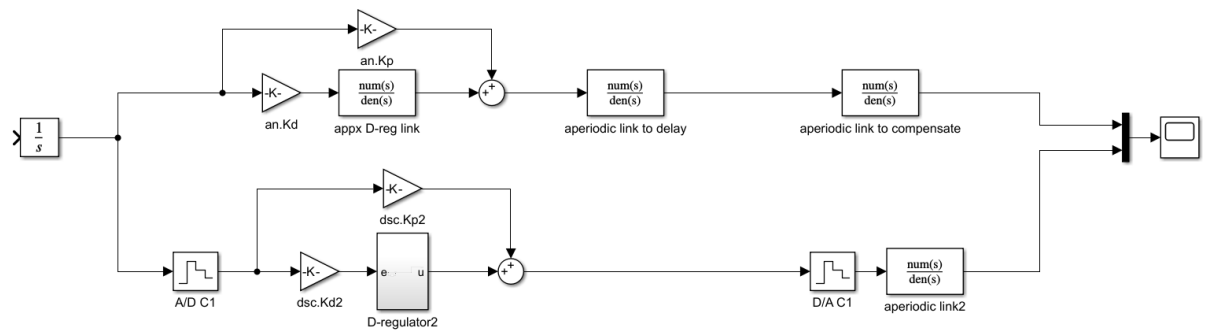


Рисунок 8. Схема моделирования аналогового ПД-регулятора с аperiodическим звеном для добавления эквивалентной задержки.

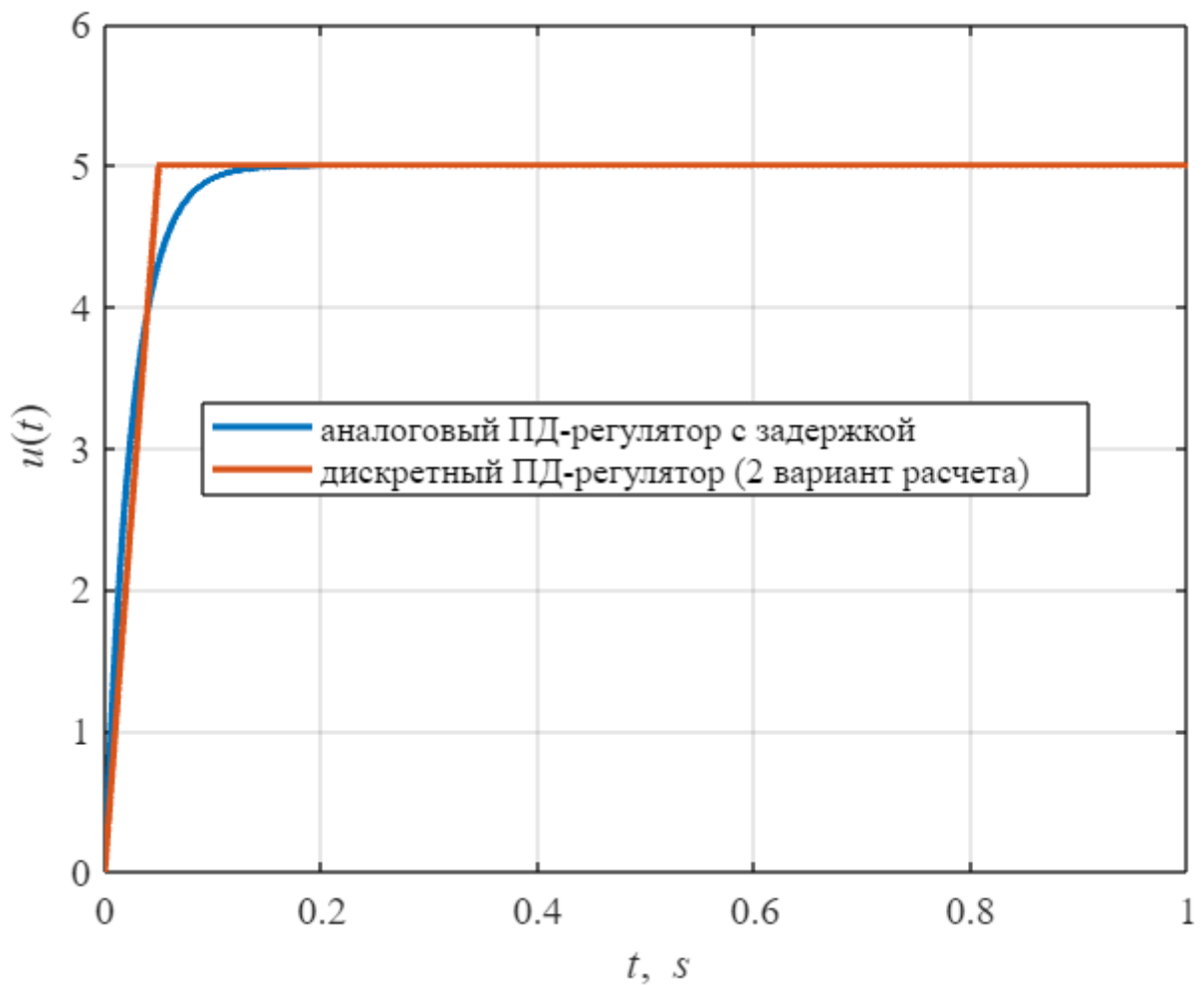


Рисунок 9. Временные диаграммы систем с дискретным ПД-регулятором и эквивалентным аналоговым ПД-регулятором при  $T = 5 \cdot T_0$ ,  $T_{\mu_{reg}} = 0.5 \cdot T_0$ .

Видим, что всё равно переходные процессы будут отличаться, так как в одном случае мы подаем дискретный сигнал управления, а в другом –

непрерывный. Однако, они наиболее близки друг к другу в смысле минимизации функционала  $F$ .

В итоге, можем сделать вывод, что можно аппроксимировать дискретность с помощью апериодического звена 1-го порядка с определенной из задачи минимизации функционала постоянной  $T_{\mu_{reg}}$ .

## **5. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\epsilon = 0$ .**

### **Настройка на технический оптимум**

#### **Синтез регулятора**

Передаточная функция контура тока:

$$W_{crl} = \frac{1}{T_t s + 1}$$

Передаточная функция объекта:

$$W_{ob2} = \frac{C_e \cdot kdw}{Js}$$

Передаточная функция технического оптимума:

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

Передаточная функция регулятора:

$$W_{reg} = \frac{W_{tech}}{W_{crl} \cdot W_{ob2}} = \frac{J(T_t s + 1)}{2C_e kdw T_\mu (T_\mu s + 1)}$$

Получается, что ПД-регулятор, который мы будем синтезировать должен компенсировать постоянную времени  $T_t$ , то есть  $T_t$  мы будем использовать для расчета Д-коэффициента через экспоненту (2 способ вычисления). А коэффициент  $T_\mu$  будет равняться  $0.5 \cdot T_o$ , которое было вычислено ранее и данный параметр будет определять быстродействие нашей системы.

## Моделирование работы системы настроенной на технический оптимум

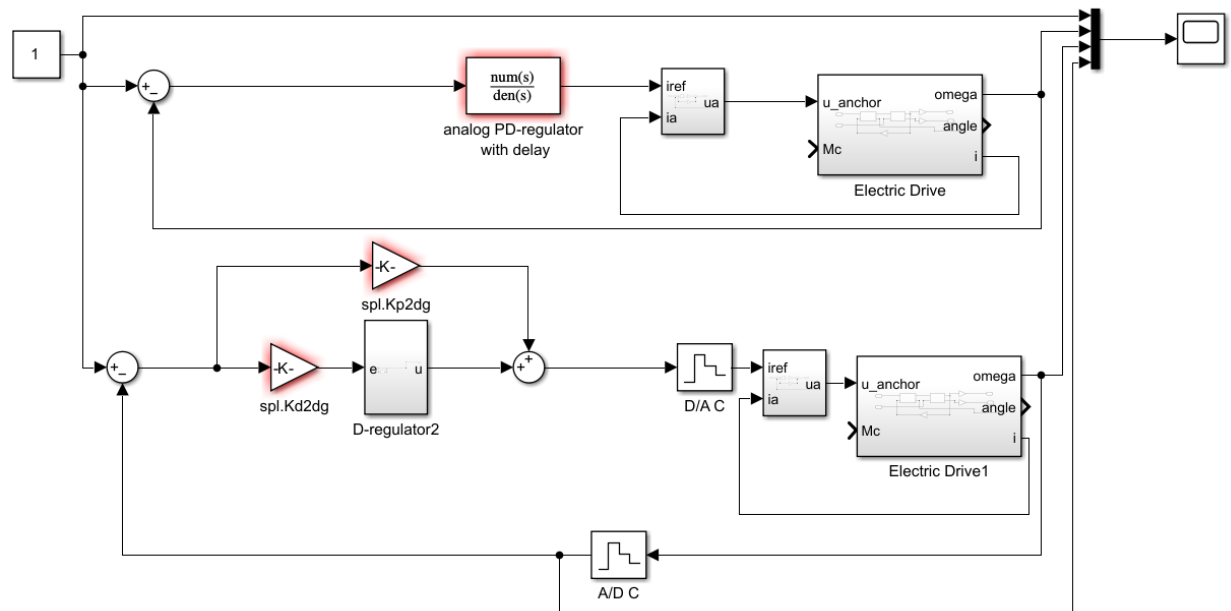


Рисунок 10. Схема моделирования системы, настроенной на технический оптимум для случая отсутствия вычислительной задержки и без учета задержки дискретного ПД-регулятора.

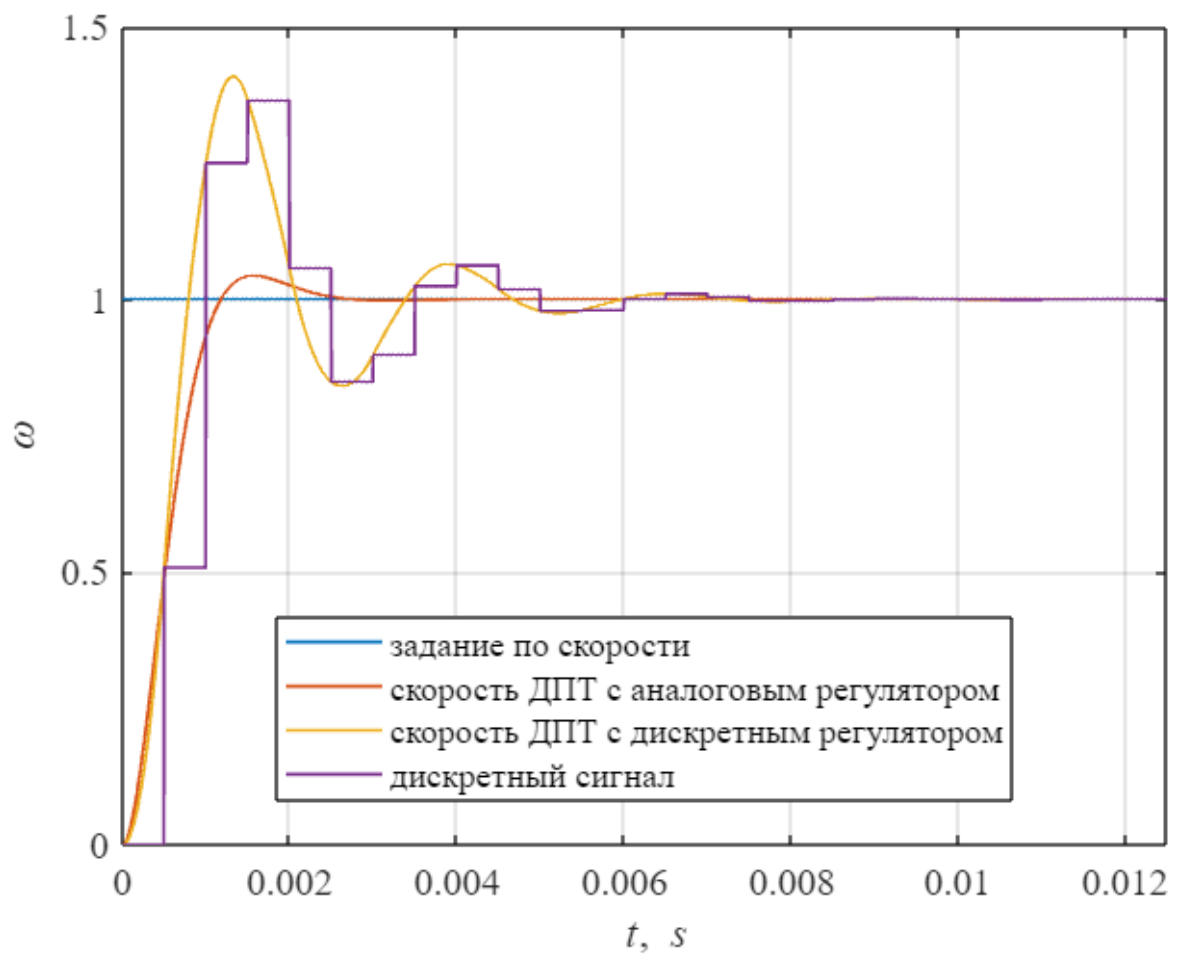


Рисунок 11. Графики переходных процессов системы, настроенной на технический оптимум для случая отсутствия вычислительной задержки и без учета задержки дискретного ПД-регулятора.

Видим, что красный график (система, управляемая аналоговым регулятором) соответствует техническому оптимуму.

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

$t_{p1} = 3.0 \cdot T_{\mu}$  — время первого входа в 5% зону

$t_{p2} = 16.8 \cdot T_{\mu}$  — время переходного процесса (5% зона)

$\Delta u = 40.8\%$  — перерегулирование

## Моделирование полной эквивалентной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора. Аппроксимация апериодическим звеном

Теперь добавим звено запаздывания в контур скорости аналогового регулятора.

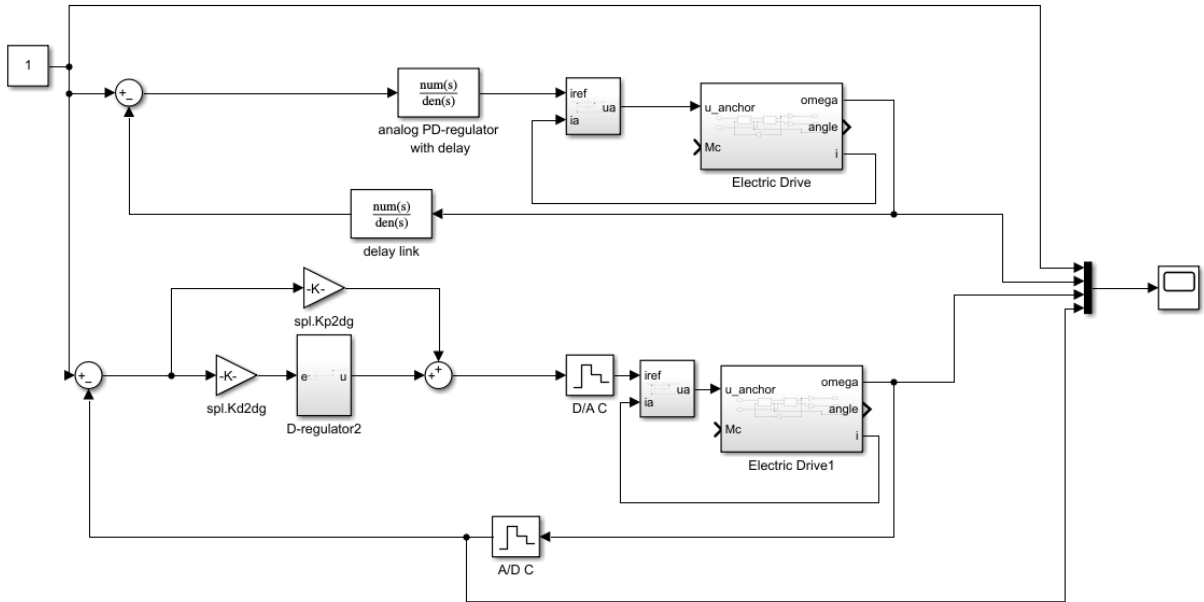


Рисунок 12. Схема моделирования эквивалентной системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора и настроенной на технический оптимум без учета вычислительной задержки.

Для поиска коэффициента  $T_z$  у звена запаздывания будем минимизировать функционал близости между переходными процессами с аналоговым и дискретным регуляторами.

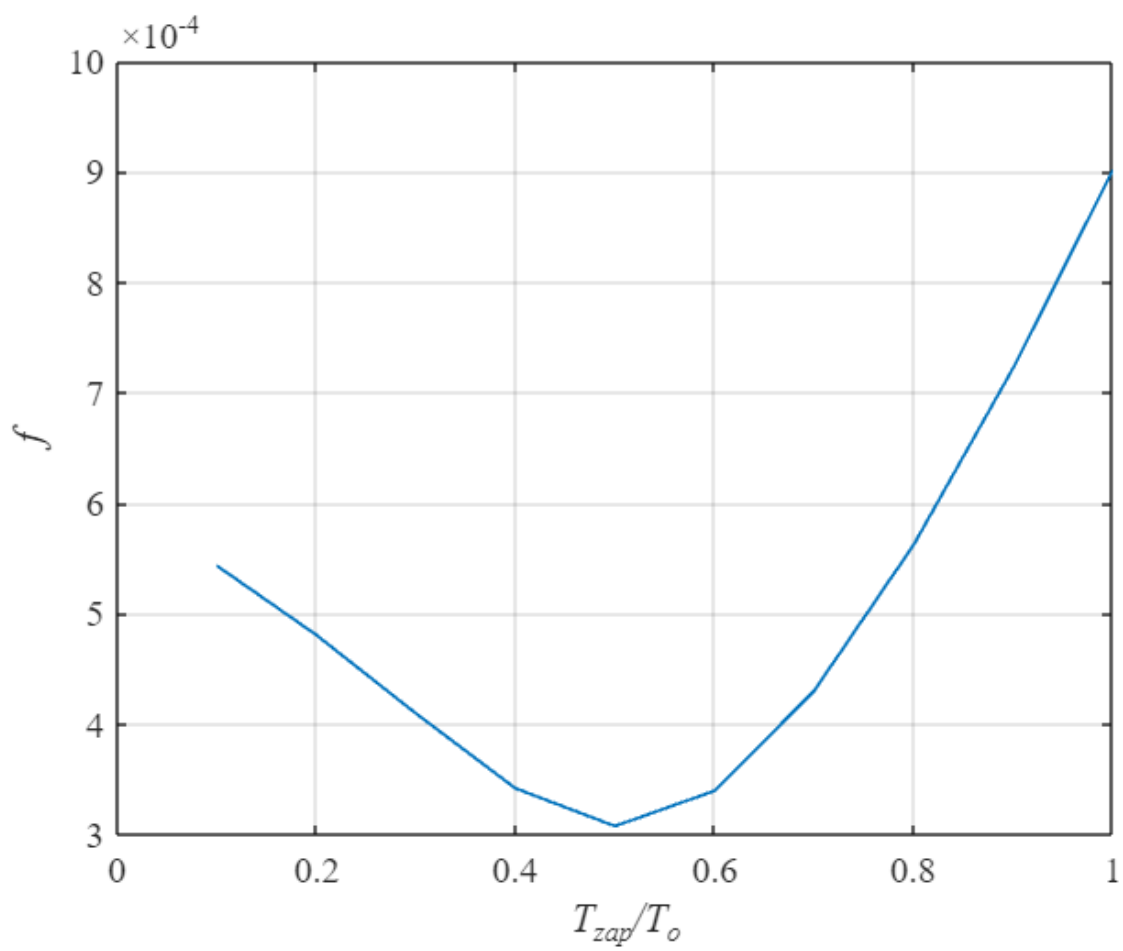


Рисунок 13. График функционала близости.

Оптимальное значение  $T_z = 0.5 \cdot T_0$



## Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

Случай  $T_0 = 0.1T_t$

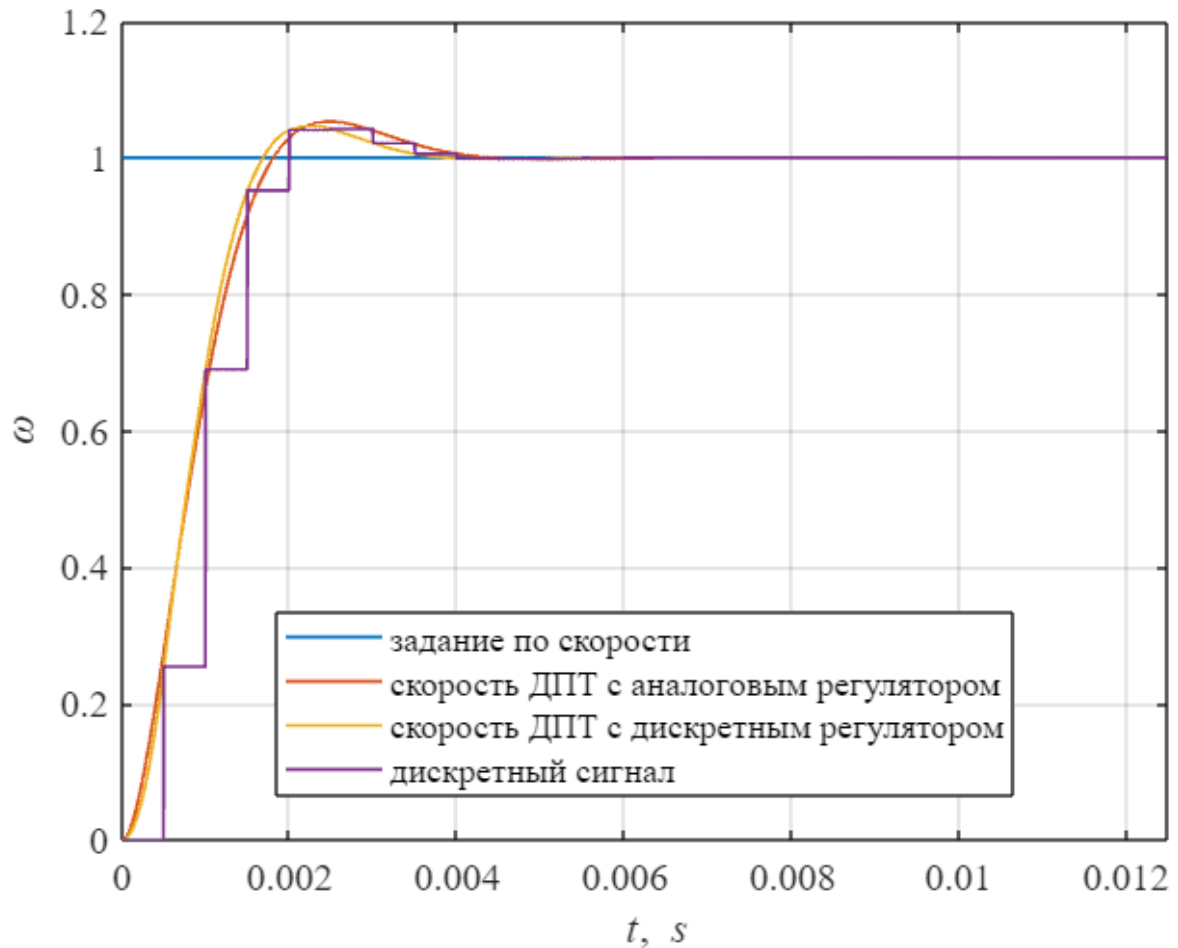


Рисунок 14. Система, настроенная на технический оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая отсутствия вычислительной задержки при  $T_0 = 0.1T_t$ .

Получили технический оптимум, как и требовалось.

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

$t_{p1} = 3.0 \cdot T_\mu$  — время первого входа в 5% зону

$t_{p2} = 3.0 \cdot T_\mu$  — время переходного процесса (5% зона)

$\Delta u = 4.7\%$  — перерегулирование

Случай  $T_0 = 0.5T_t$

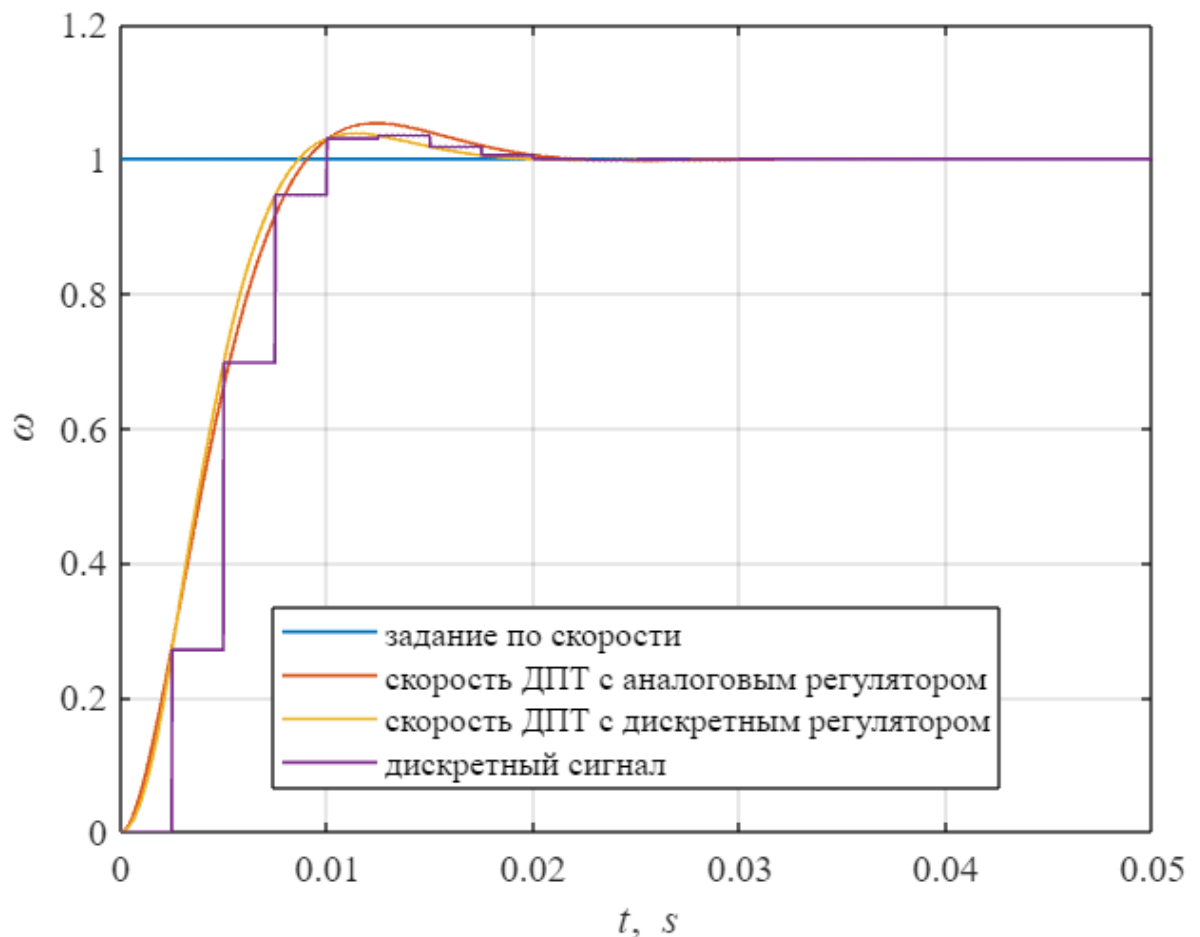


Рисунок 15. Система, настроенная на технический оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая отсутствия вычислительной задержки при  $T_0 = 0.5T_t$ .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

$t_{p1} = 3.0 \cdot T_\mu$  – время первого входа в 5% зону

$t_{p2} = 3.0 \cdot T_\mu$  – время переходного процесса (5% зона)

$\Delta y = 3.8\%$  – перерегулирование

	$t_{p1}$	$t_{p2}$	$\Delta y$
$T_o = 0.1T_t$	$3.0 \cdot T_\mu$	$3.0 \cdot T_\mu$	4.7%
$T_o = 0.5T_t$	$3.0 \cdot T_\mu$	$3.0 \cdot T_\mu$	3.8%

Таблица 2. Параметры переходных процессов.

Быстродействие осталось то же самое, а перерегулирование уменьшилось при большем  $T_0$ .

## 6. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки $\epsilon = T_0$ . Настройка на технический оптимум

Вычисления в цифровой системе управления, вообще говоря, занимают время (определенное количество вычислительных тактов). Данную вычислительную задержку тоже необходимо учитывать при синтезе цифровой системы.

Для реализации вычислительной задержки используем блок *Unit Delay*, который задерживает сигнал на 1 такт дискретизации. На микроконтроллере регулятор рассчитывается не моментально, поэтому появляется вычислительная задержка.

Пусть вычислительная задержка равна периоду дискретизации:  $\epsilon = T_0$ .

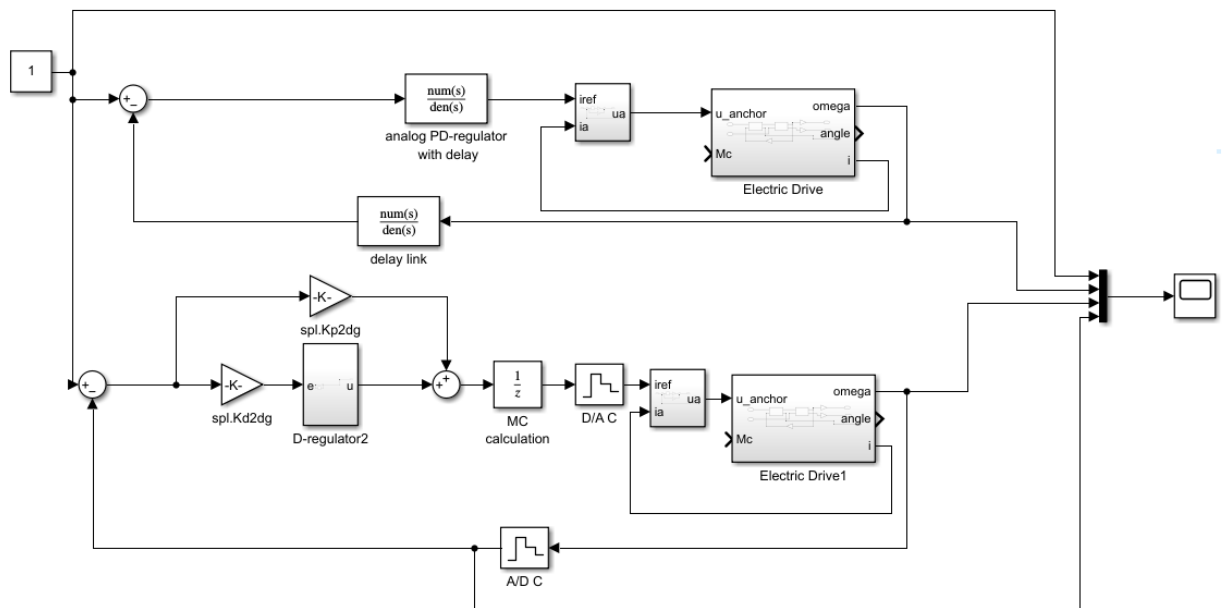


Рисунок 16. Схема моделирования эквивалентной системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора и настроенной на технический оптимум с наличием вычислительной задержки  $\epsilon = T_0$ .

**Моделирование полной эквивалентной модели системы,  
учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора.  
Аппроксимация апериодическим звеном**

Для поиска коэффициента  $T_z$  у звена запаздывания будем минимизировать функционал близости между переходными процессами с аналоговым и дискретным регуляторами.

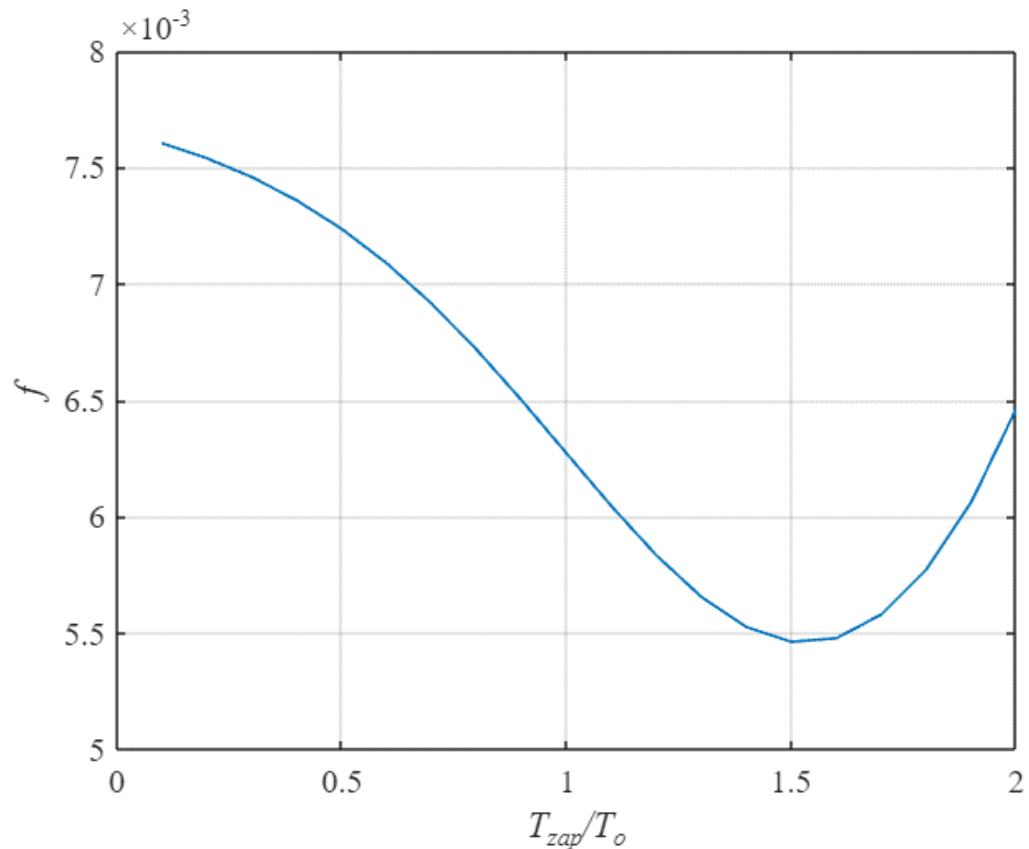


Рисунок 17. График функционала близости.

Оптимальное значение  $T_z = 1.5 \cdot T_0$

## Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

Случай  $T_0 = 0.1T_t$

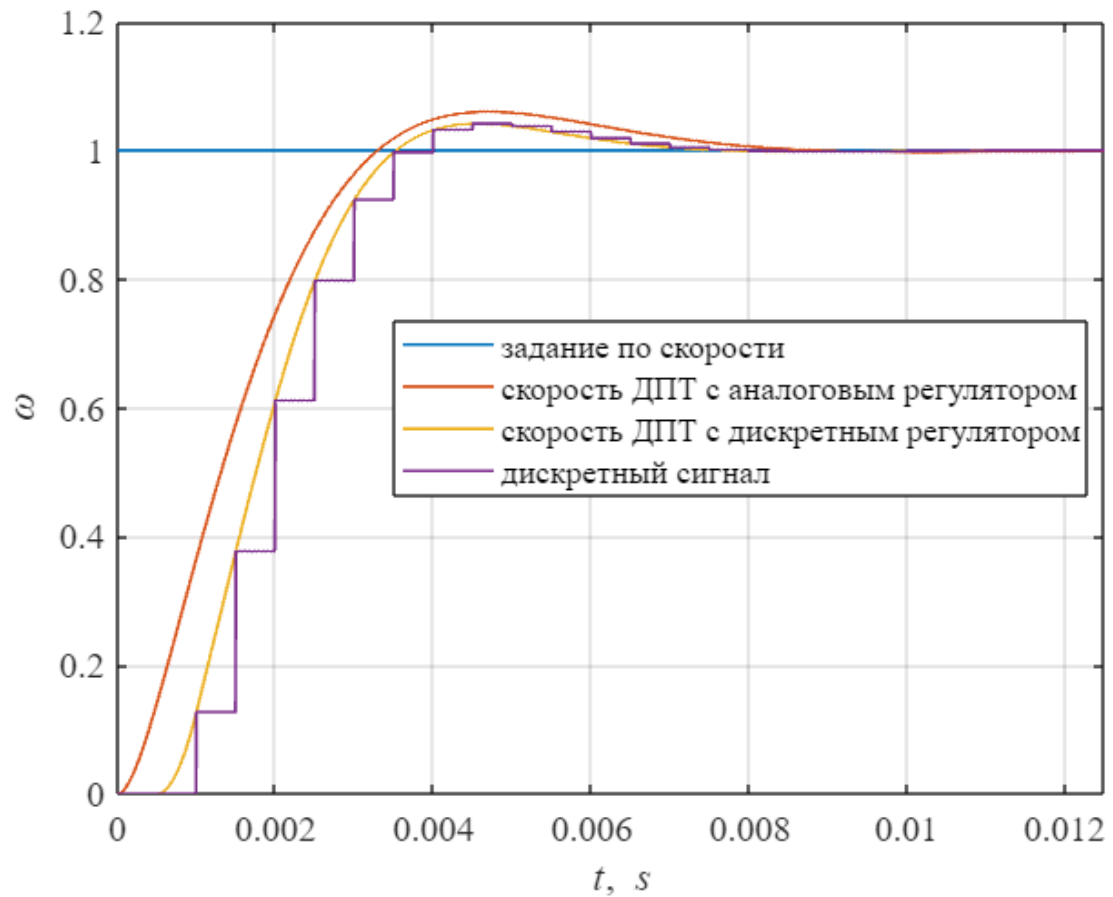


Рисунок 18. Система, настроенная на технический оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая наличия вычислительной задержки  $\epsilon = T_0$  при  $T_0 = 0.1T_t$ .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

$t_{p1} = 3.2 \cdot T_\mu$  — время первого входа в 5% зону

$t_{p2} = 3.1 \cdot T_\mu$  — время переходного процесса (5% зона)

$\Delta u = 4.1\%$  — перерегулирование

Случай  $T_0 = 0.5T_t$

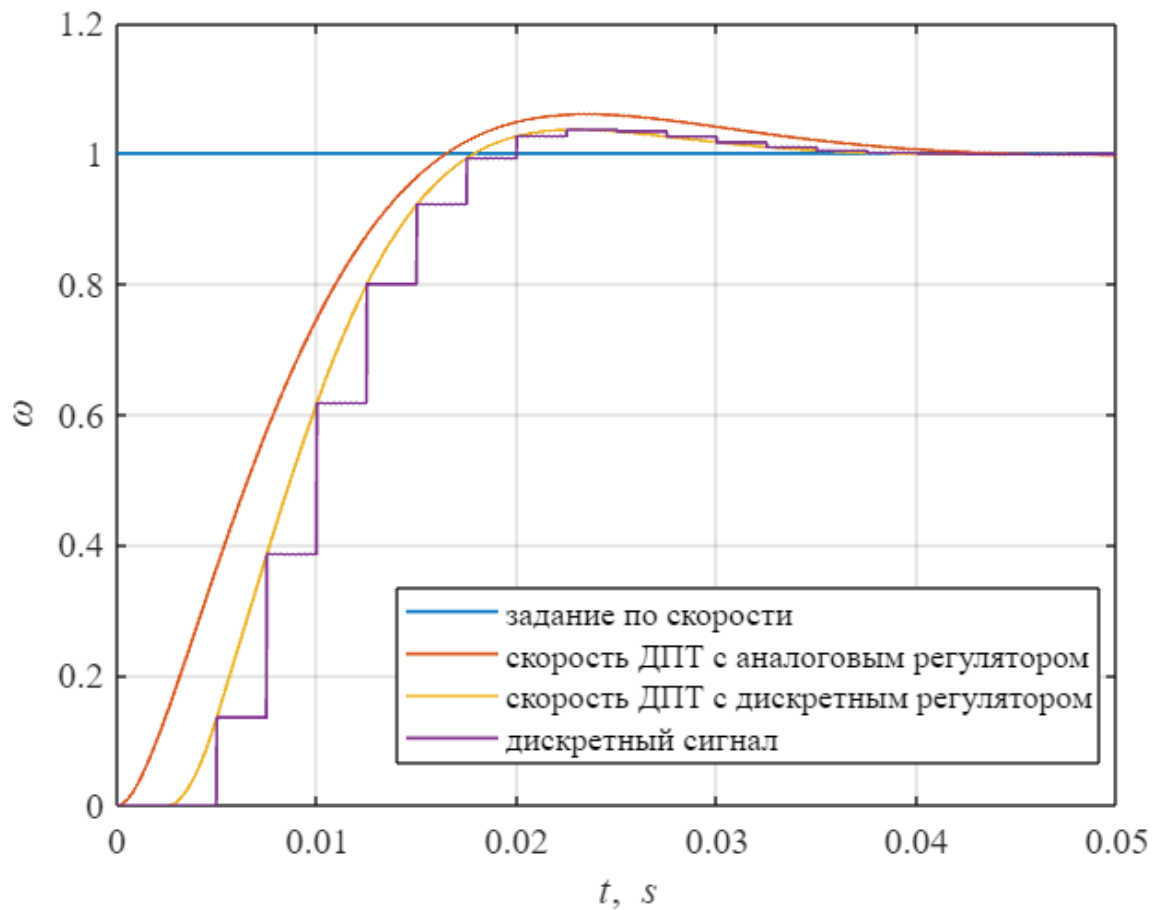


Рисунок 19. Система, настроенная на технический оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая наличия вычислительной задержки  $\epsilon = T_0$  при  $T_0 = 0.5T_t$ .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

$t_{p1} = 3.2 \cdot T_\mu$  – время первого входа в 5% зону

$t_{p2} = 3.2 \cdot T_\mu$  – время переходного процесса (5% зона)

$\Delta y = 3.7\%$  – перерегулирование

	$t_{p1}$	$t_{p2}$	$\Delta y$
$T_o = 0.1T_t$	$3.2 \cdot T_\mu$	$3.1 \cdot T_\mu$	4.1%
$T_o = 0.5T_t$	$3.2 \cdot T_\mu$	$3.2 \cdot T_\mu$	3.7%

Таблица 3. Параметры переходных процессов.

При наличии вычислительной задержки, переходный процесс системы с дискретным регулятором имеет задержку от эквивалентной аналоговой системы.

Также при увеличении  $T_0$  у нас уменьшилось перерегулирование, а время переходных процессов осталось прежним.

Это является свойством ПД-регулятора, так как в отличие от интегрального регулятора ПД-регулятор сдвигает фазу в сторону  $+90^\circ$  и система становится более устойчивой.

**7. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки  $\epsilon = 0$ .  
Настройка на биномиальный оптимум**

**Синтез регулятора**

Передаточная функция контура тока:

$$W_{crl} = \frac{1}{T_t s + 1}$$

Передаточная функция объекта:

$$W_{ob2} = \frac{C_e \cdot kdw}{Js}$$

Передаточная функция биномиального оптимума:

$$W_{tech} = \frac{1}{3T_\mu s (T_\mu s + 1)}$$

Передаточная функция регулятора:

$$W_{reg} = \frac{W_{tech}}{W_{crl} \cdot W_{ob2}} = \frac{J(T_t s + 1)}{3C_e kdw T_\mu (T_\mu s + 1)}$$

## Моделирование работы системы настроенной на биномиальный оптимум

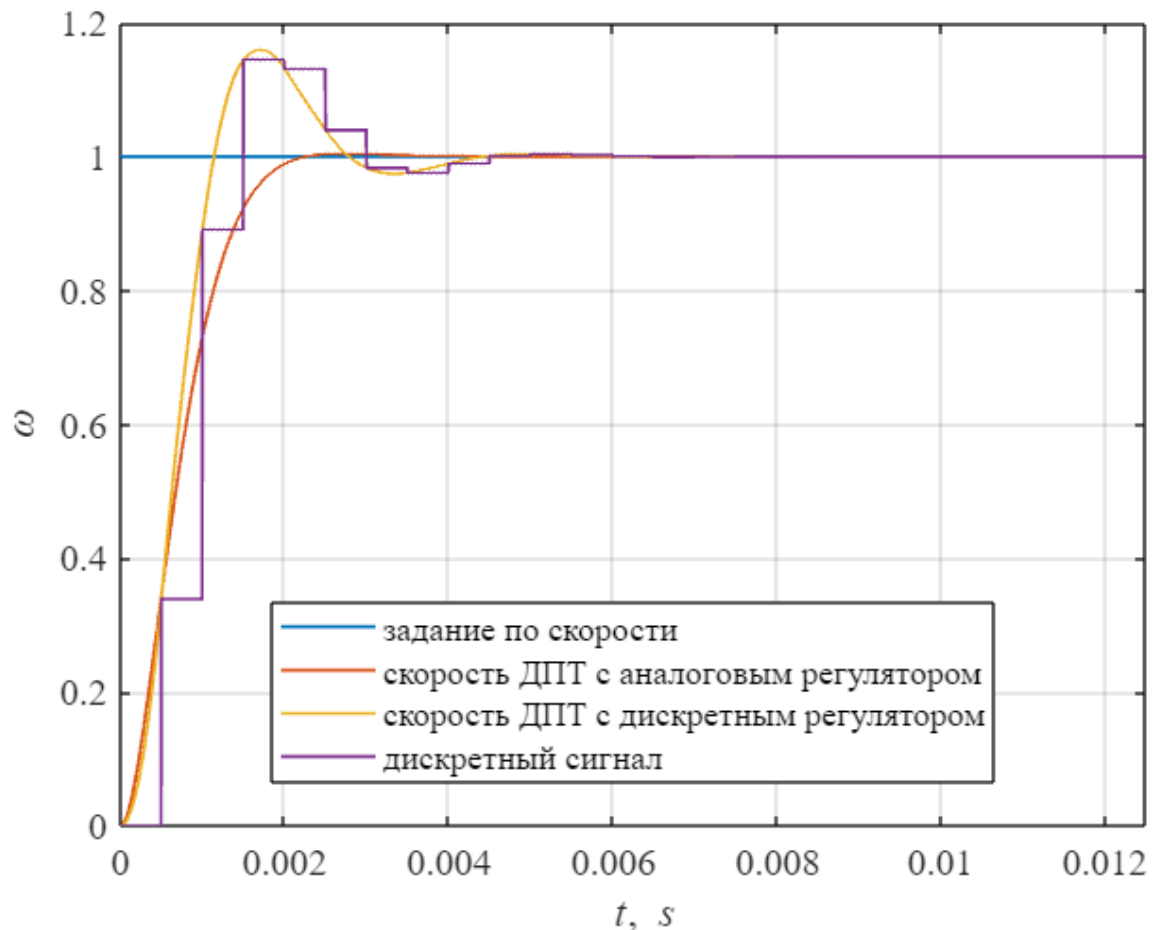


Рисунок 20. Графики переходных процессов системы, настроенной на биномиальный оптимум для случая отсутствия вычислительной задержки и без учета задержки дискретного ПД-регулятора.

Видим, что красный график (система, управляемая аналоговым регулятором) соответствует биномиальному оптимуму.

Настройка на биномиальный оптимум прошла успешно, так как перерегулирование значительно меньше чем у аналогичной системы настроенной на технический оптимум.

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

$t_{p1} = 4.3 \cdot T_{\mu}$  — время первого входа в 5% зону

$t_{p2} = 9.8 \cdot T_{\mu}$  — время переходного процесса (5% зона)

$\Delta u = 16.0\%$  — перерегулирование



**Моделирование полной эквивалентной модели системы,  
учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора.  
Аппроксимация аperiодическим звеном**

Теперь добавим звено запаздывания в контур скорости аналогового регулятора.

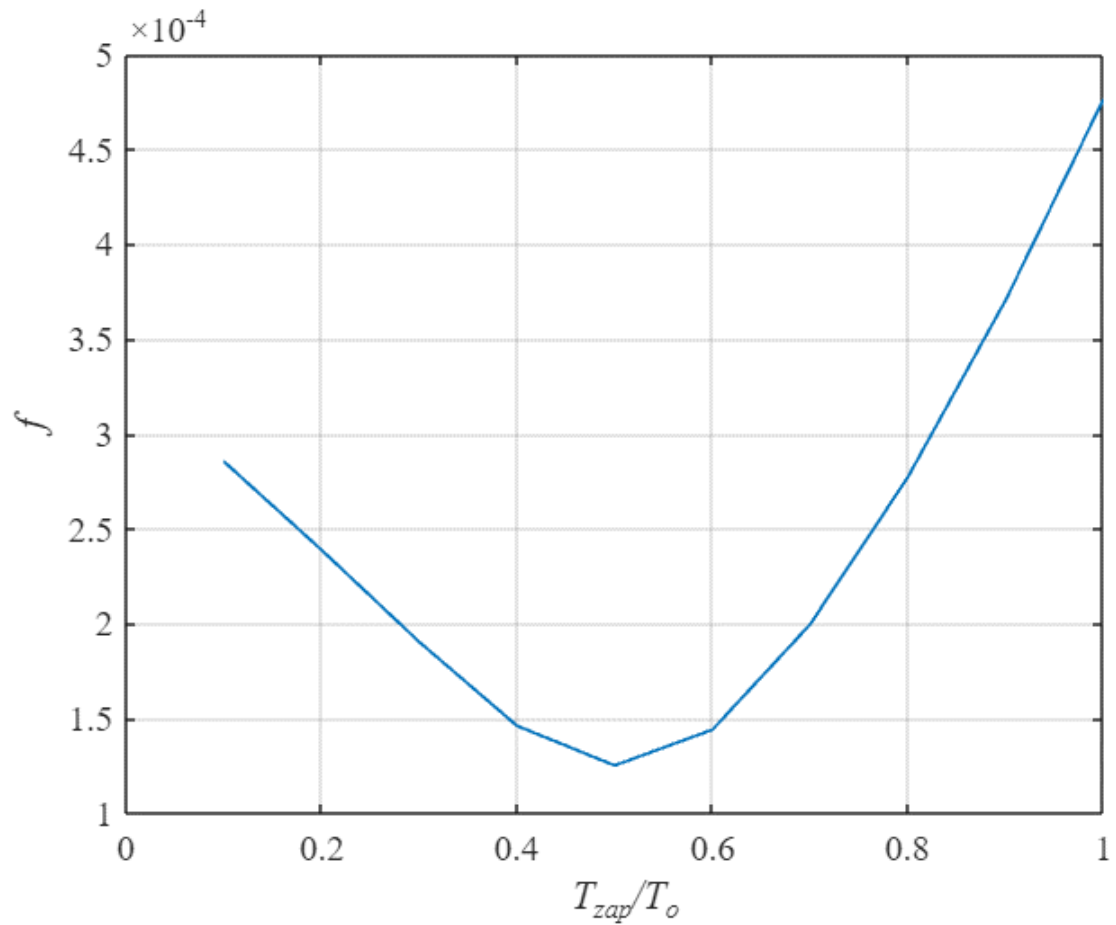


Рисунок 21. График функционала близости.

Оптимальное значение  $T_z = 0.5 \cdot T_o$

## Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

Случай  $T_0 = 0.1T_t$

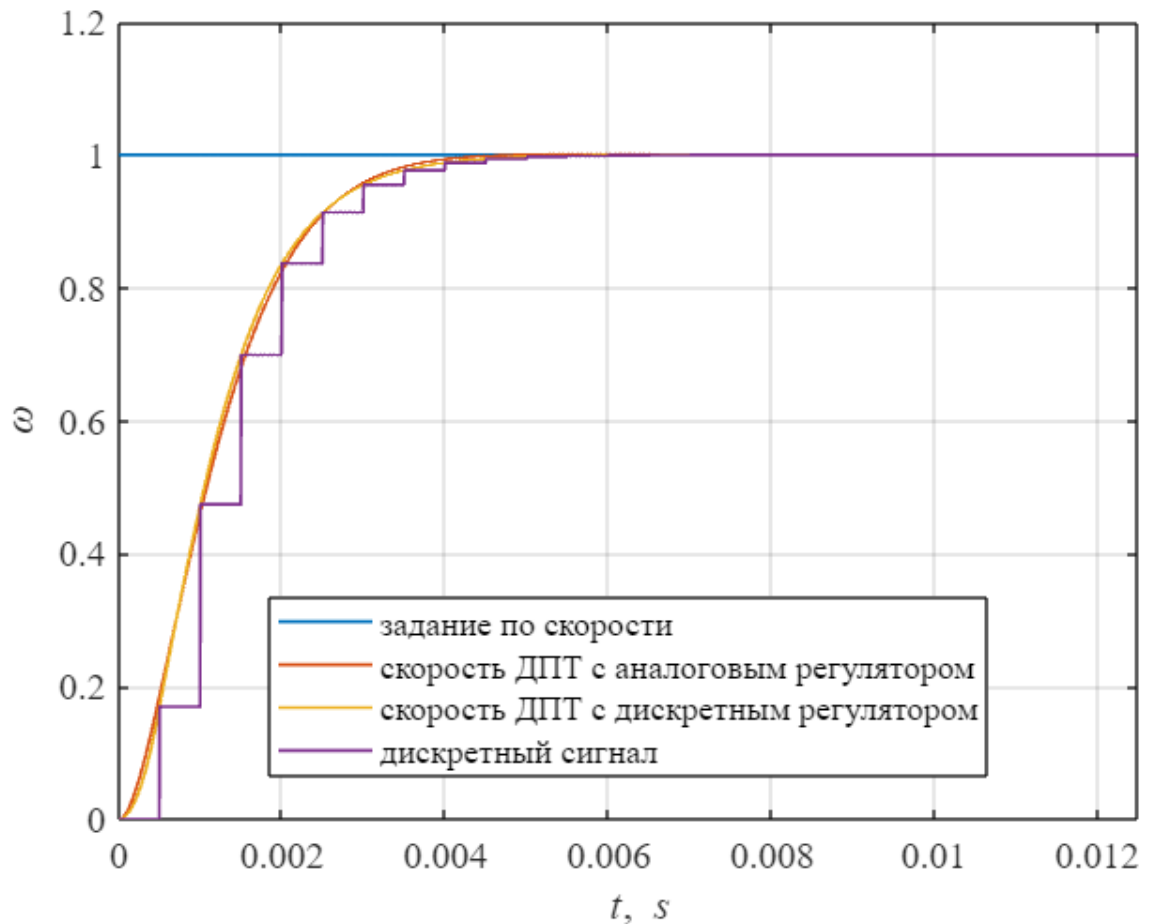


Рисунок 22. Система, настроенная на биномиальный оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая отсутствия вычислительной задержки при  $T_0 = 0.1T_t$ .

Получили биномиальный оптимум, как и требовалось.

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

$t_{p1} = 5.8 \cdot T_\mu$  — время первого входа в 5% зону

$t_{p2} = 5.0 \cdot T_\mu$  — время переходного процесса (5% зона)

$\Delta y = 0\%$  — перерегулирование

Случай  $T_0 = 0.5T_t$

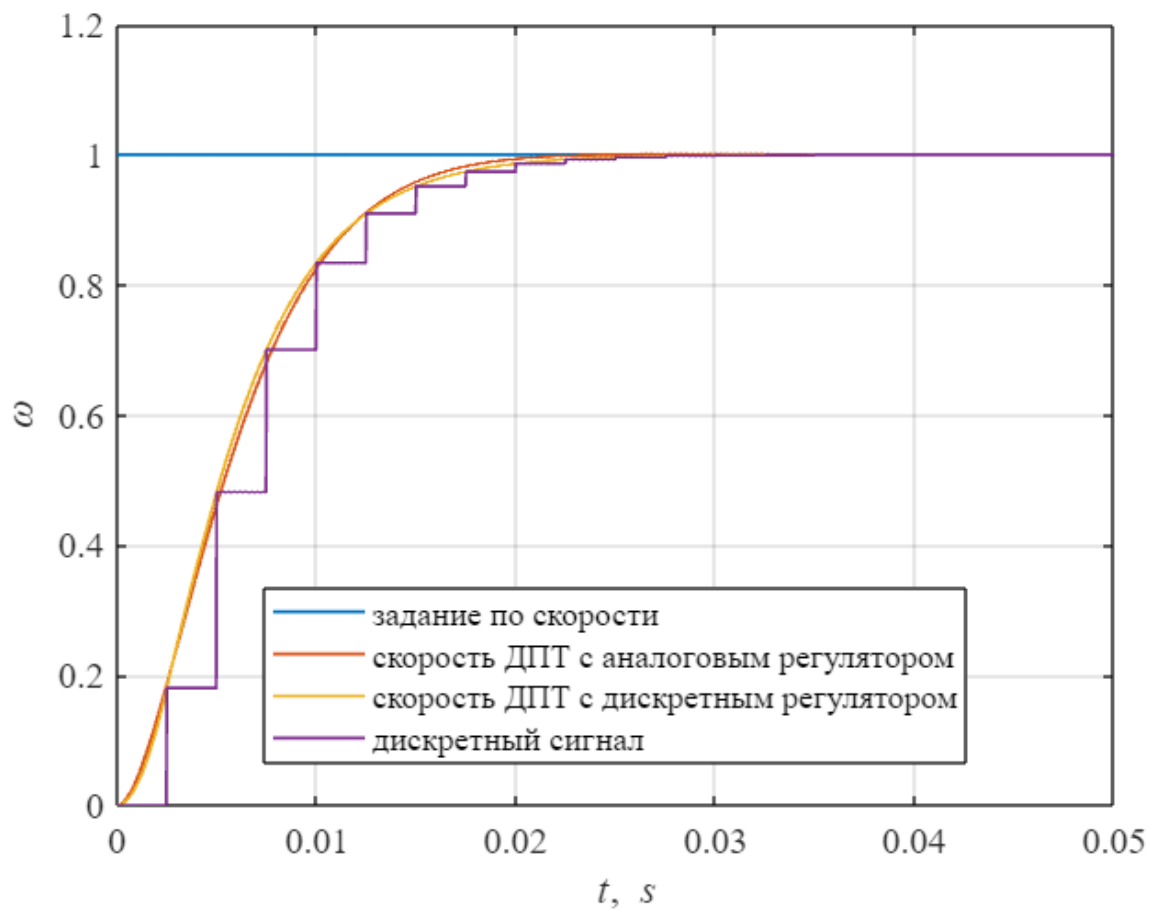


Рисунок 23. Система, настроенная на биномиальный оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая отсутствия вычислительной задержки при  $T_0 = 0.5T_t$ .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

$t_{p1} = 6.0 \cdot T_\mu$  – время первого входа в 5% зону

$t_{p2} = 6.0 \cdot T_\mu$  – время переходного процесса (5% зона)

$\Delta y = 0\%$  – перерегулирование

	$t_{p1}$	$t_{p2}$	$\Delta y$
$T_o = 0.1T_t$	$5.8 \cdot T_\mu$	$5.8 \cdot T_\mu$	0%
$T_o = 0.5T_t$	$6.0 \cdot T_\mu$	$6.0 \cdot T_\mu$	0%

Таблица 4. Параметры переходных процессов.

**8. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки  $\epsilon = T_0$ .  
Настройка на биномиальный оптимум**

**Моделирование полной эквивалентной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора.  
Аппроксимация апериодическим звеном**

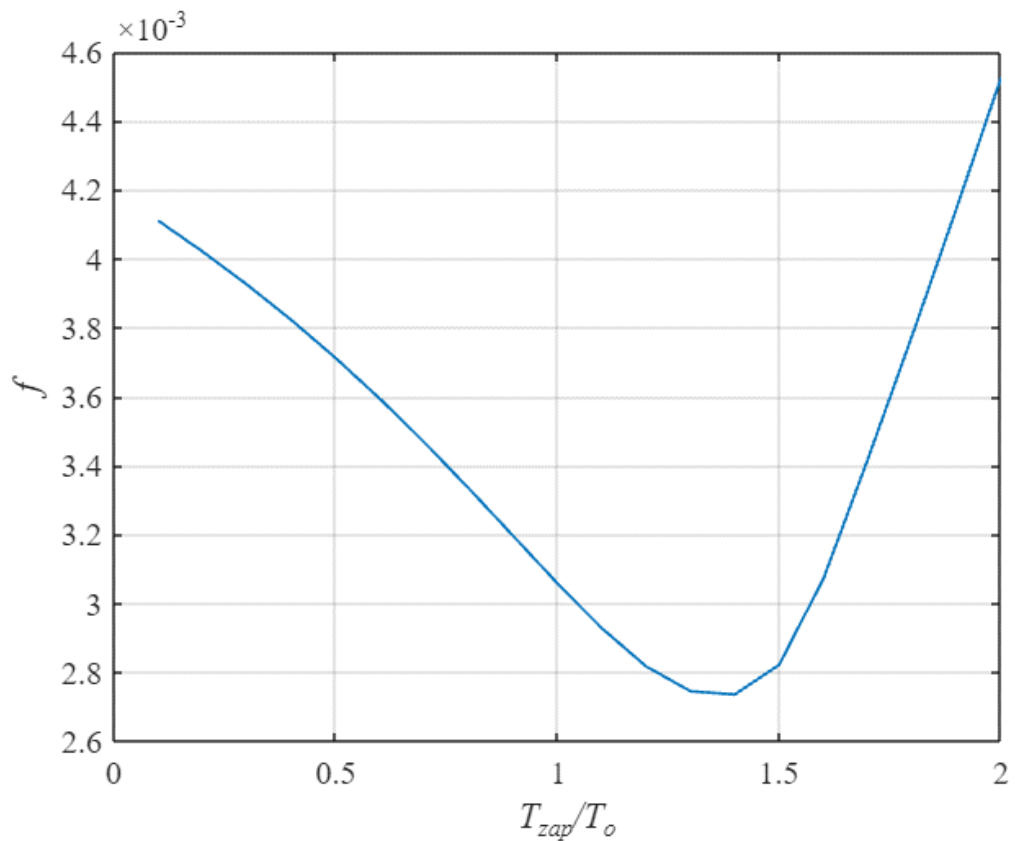


Рисунок 24. График функционала близости.

Оптимальное значение  $T_z = 1.4 \cdot T_0$

## Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

Случай  $T_0 = 0.1T_t$

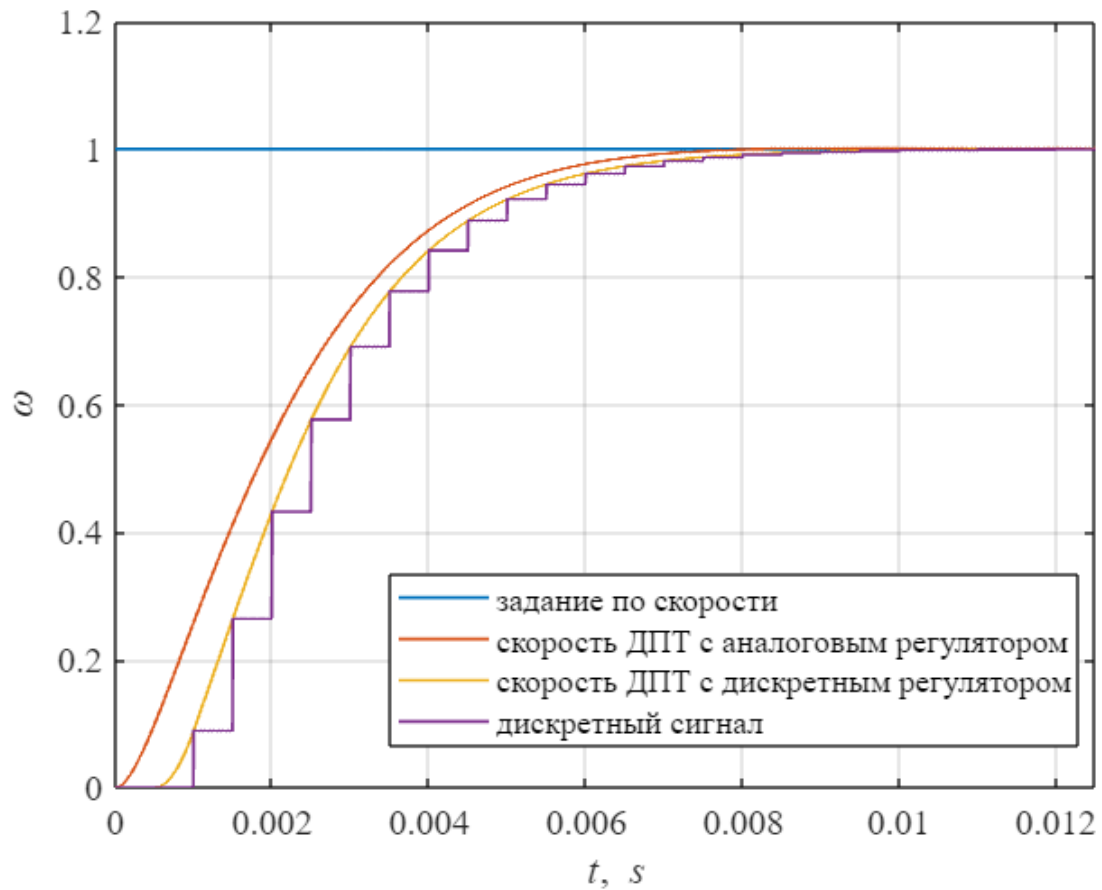


Рисунок 25. Система, настроенная на биномиальный оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая наличия вычислительной задержки  $\epsilon = T_0$  при  $T_0 = 0.1T_t$ .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

$t_{p1} = 5.9 \cdot T_\mu$  — время первого входа в 5% зону

$t_{p2} = 5.9 \cdot T_\mu$  — время переходного процесса (5% зона)

$\Delta y = 0\%$  — перерегулирование

Случай  $T_0 = 0.5T_t$

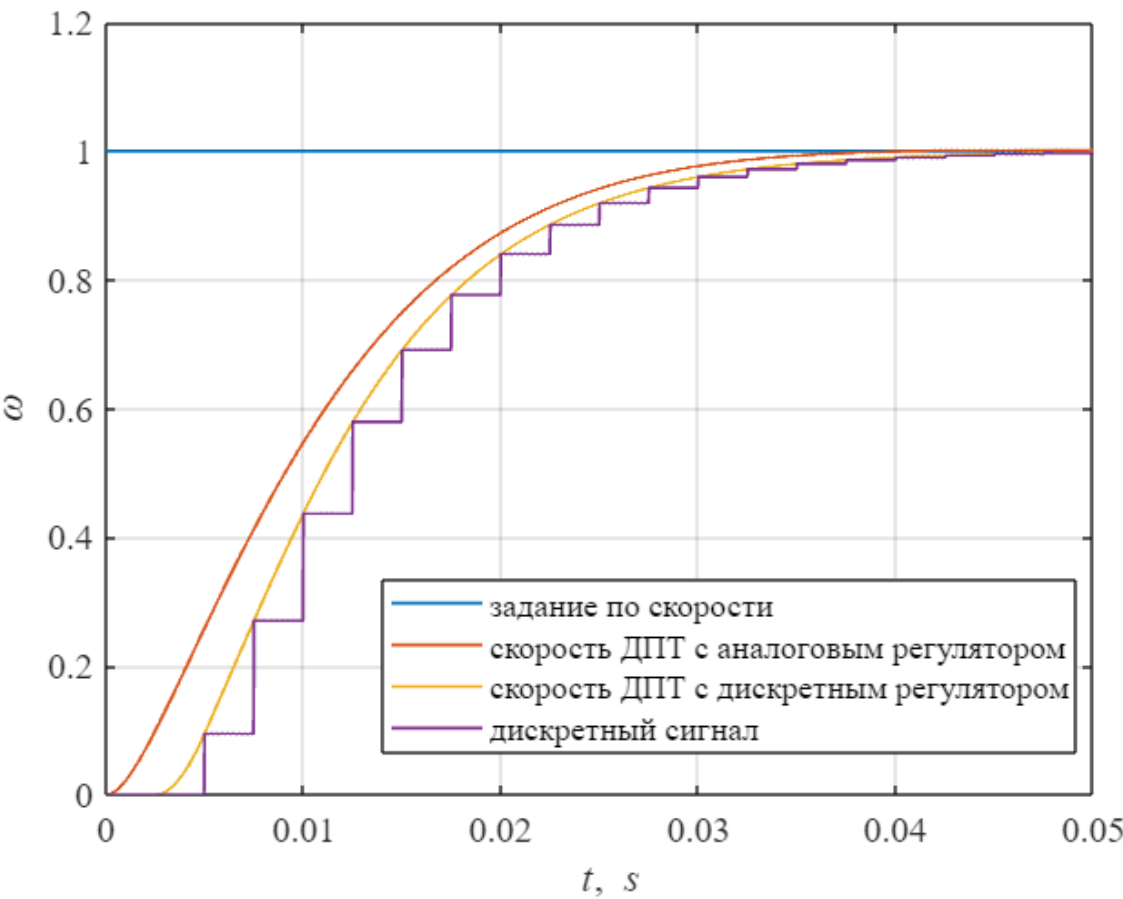


Рисунок 26. Система, настроенная на биномиальный оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая наличия вычислительной задержки  $\epsilon = T_0$  при  $T_0 = 0.5T_t$ .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

$t_{p1} = 5.9 \cdot T_\mu$  – время первого входа в 5% зону

$t_{p2} = 5.9 \cdot T_\mu$  – время переходного процесса (5% зона)

$\Delta y = 0\%$  – перерегулирование

	$t_{p1}$	$t_{p2}$	$\Delta y$
$T_o = 0.1T_t$	$5.9 \cdot T_\mu$	$5.9 \cdot T_\mu$	0%
$T_o = 0.5T_t$	$5.9 \cdot T_\mu$	$5.9 \cdot T_\mu$	0%

Таблица 5. Параметры переходных процессов.

### 3. Выводы

В данной лабораторной работе проводился синтез и исследование цифровой системы управления с ПД-регулятором и объектом в виде последовательно включенных апериодического и интегрирующего звеньев из условия обеспечения заданных переходных процессов (технический и биномиальный оптимумы).

В пункте 1 исследовалась цифровая система с Д-регулятором. Была выявлена разница между аналоговым и цифровым Д-регулятором, которая состоит в том, что цифровой регулятор имеет кусочно-постоянный сигнал управления, с шириной равной периоду дискретизации, а аналоговый в идеальном случае является функцией Хевисайда в момент  $t \rightarrow +0$ . А одинаковое у обоих сигналов - энергия ими переносимая (площадь по графиками), она равна коэффициенту регулятором  $an.Kd = dsc.Kd = 3$ . Поэтому с точки зрения энергии воздействия оба регулятора аналогичны, с точки зрения формы сигнала - существенно различны.

Объектом управления является электрический привод с ДПТ независимого возбуждения. Управление состояло из 2-х контуром: контур управления током якоря и контур управления скорости вращения.

Цифровой ПД-регулятор может скомпенсировать апериодическое звено первого порядка с постоянной времени  $T$ . Суть компенсации постоянной времени  $T$ , заключается в том, чтобы составляющие ПД-регулятора в числителе давали  $Ts + 1$ , чтобы это сократилось со знаменателем апериодического звена и будет получаться безинерционное звено (в идеальном случае).

Аппроксимировать дискретность с помощью апериодического звена 1-го порядка с определенной из задачи минимизации функционала постоянной  $T_{\mu_{reg}}$ .

Итак, после введения данного звена, мы в итоге синтезировали управление, которое учитывает динамические свойства ПД-регулятора. Также в последнем пункте мы учитывали вычислительную задержку, которая появляется из-за того, что на микроконтроллере регулятор рассчитывается не мгновенно. Учет данной вычислительной задержки состоит в добавлении слагаемого  $Tz$  в постоянную времени  $T\mu = Tt + Tz$ .

При наличии вычислительной задержки, переходный процесс системы с дискретным регулятором имеет задержку от эквивалентной аналоговой системы.

Также при увеличении  $T_0$  у нас уменьшилось перерегулирование, а время переходных процессов осталось прежним. Это является свойством ПД-

регулятора, так как в отличие от интегрального регулятора ПД-регулятор сдвигает фазу в сторону  $+90^\circ$  и система становится более устойчивой.

Вообще говоря, известно, что Д-составляющую вводят в систему для большей устойчивости переходных процессов, однако добавление Д-составляющих увеличивает шумы в системе, так как вычитать их можно только приближенно.

В результате выполнения работы мы имеем две системы, настроенные на биномиальный и технический оптимумы. По рассчитанным показателям качества, можем заключить, что биномиальный оптимум имеет перерегулирование меньше относительно технического, однако быстродействие у него меньше технического.