**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](#_Toc155995947)

[2. Ход работы 4](#_Toc155995948)

[1. Исходные данные 4](#_Toc155995949)

[2. Моделирование цифрового Д-регулятора 4](#_Toc155995950)

[3. Цифровой ПД-регулятор – апериодическое звено первого порядка 7](#_Toc155995951)

[4. Непрерывная модель цифрового ПД-регулятора, учитывающая неполную компенсацию цифровым регулятором постоянной объекта 9](#_Toc155995952)

[5. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки . Настройка на технический оптимум 12](#_Toc155995953)

[Синтез регулятора 12](#_Toc155995954)

[Моделирование работы системы настроенной на технический оптимум 13](#_Toc155995955)

[Моделирование полной эквивалентной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора. Аппроксимация апериодическим звеном 15](#_Toc155995956)

[Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования 17](#_Toc155995957)

[6. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки . Настройка на технический оптимум 19](#_Toc155995958)

[Моделирование полной эквивалентной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора. Аппроксимация апериодическим звеном 20](#_Toc155995959)

[Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования 21](#_Toc155995960)

[7. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки . Настройка на биномиальный оптимум 23](#_Toc155995961)

[Синтез регулятора 23](#_Toc155995962)

[Моделирование работы системы настроенной на биномиальный оптимум 24](#_Toc155995963)

[Моделирование полной эквивалентной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора. Аппроксимация апериодическим звеном 25](#_Toc155995964)

[Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования 26](#_Toc155995965)

[8. Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки . Настройка на биномиальный оптимум 28](#_Toc155995966)

[Моделирование полной эквивалентной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора. Аппроксимация апериодическим звеном 28](#_Toc155995967)

[Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования 29](#_Toc155995968)

[3. Выводы 31](#_Toc155995969)

# 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.

# Ход работы

## Исходные данные

|  |  |
| --- | --- |
| Сопротивление обмоток двигателя , Ом |  |
| Индуктивность обмоток двигателя , Гн |  |
| Момент инерции , кг |  |
| Константа противо-ЭДС |  |
| Константа момента |  |
| Коэффициент передачи датчика скорости, |  |

Таблица 1. Исходные данные.

## 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 .

Зададим равные коэффициенты

Схема модели:

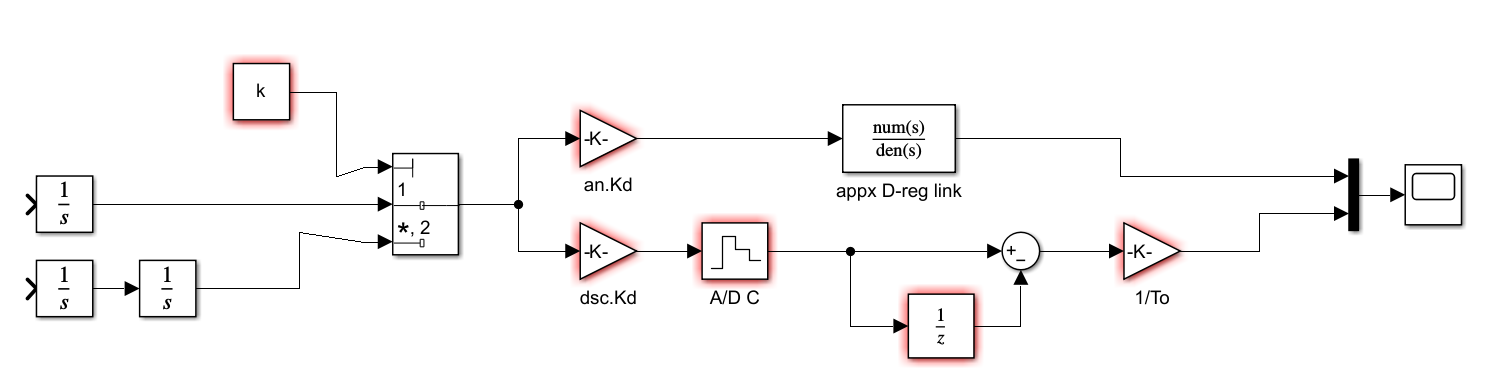


Рисунок 1. Схема моделирования эквивалентных цифрового и аналогового Д-регуляторов.

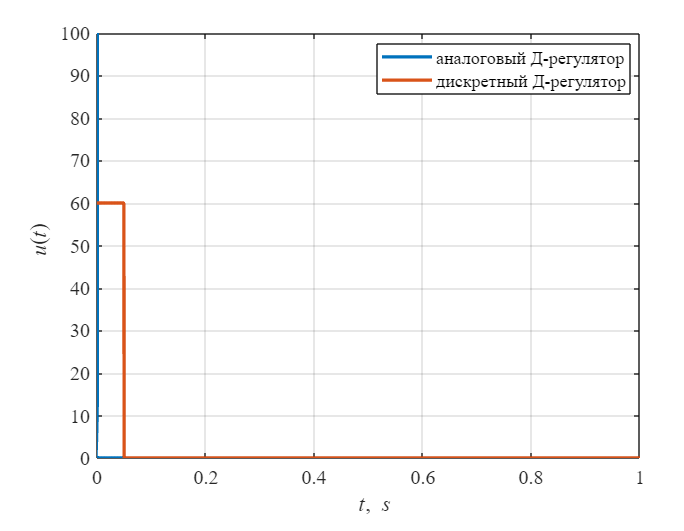


Рисунок 2. Графики работы аналогового и дискретного Д-регуляторов при постоянном входном воздействии.

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

При стремлении коэффициента в знаменателе у переменной 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 . А одинаковое у обоих сигналов - энергия ими переносимая (площадь по графиками), она равна коэффициенту регулятором .

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

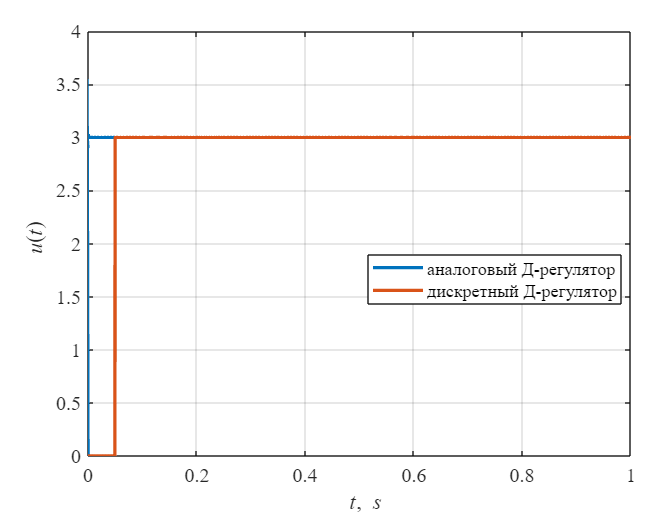


Рисунок 3. Графики работы аналогового и дискретного Д-регуляторов при линейно-возрастающем входном воздействии.

В случае линейно-возрастающего входа оба графика приходят к значению 3, но аналоговый приходит моментально (с учетом ), 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.

## Цифровой ПД-регулятор – апериодическое звено первого порядка

Проанализируем работу разомкнутой системы «Цифровой ПД-регулятор – апериодическое звено первого порядка с постоянной времени и единичным коэффициентом передачи» в режиме компенсации постоянной времени при значениях коэффициента

Пусть

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

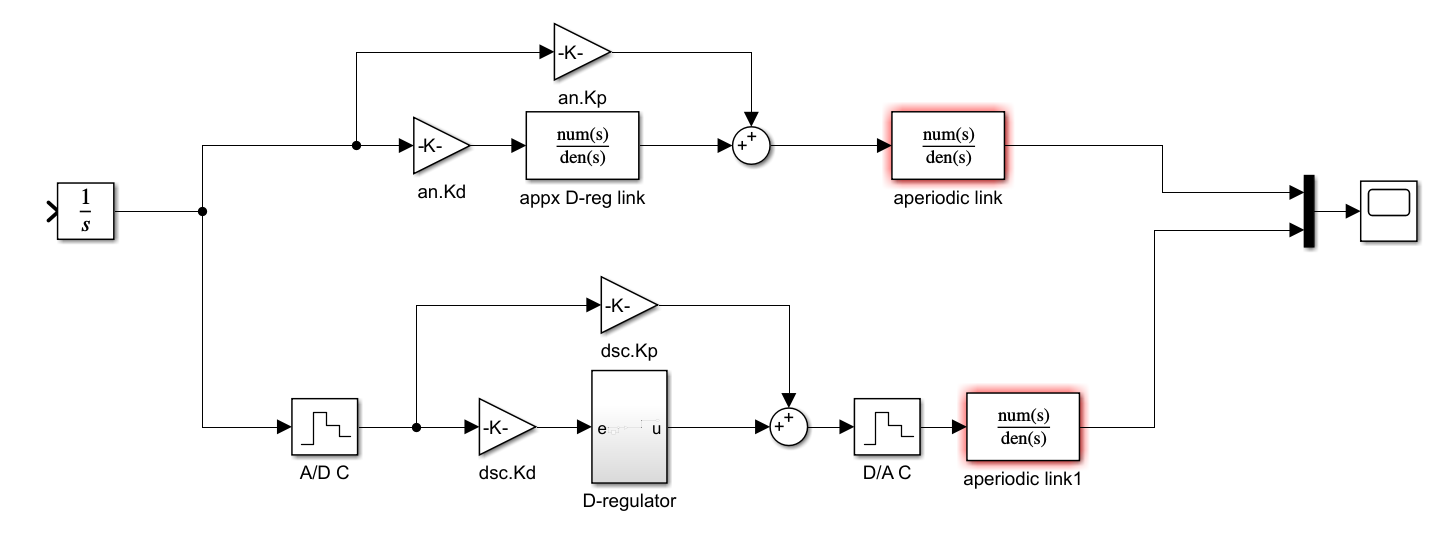


Рисунок 4. Схема моделирования системы "Цифровой и аналоговый ПД-регулятор - апериодическое звено первого порядка" в режиме компенсации постоянной времени T.

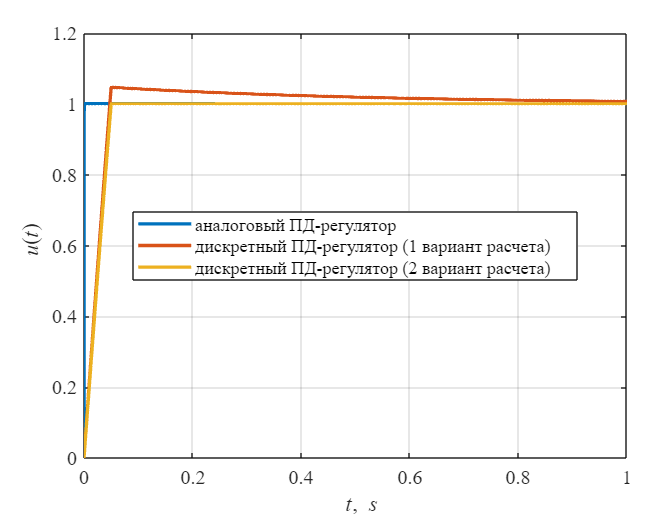


Рисунок 5. Временные диаграммы работы системы "ПД-регулятор - апериодическое звено первого порядка" в режиме компенсации постоянной времени.

Синий график (аналоговый регулятор) в результате компенсации моментально выходит на единицу. Красный график (дискретный регулятор с 1 вариантом расчета ) выходит с некоторым перерегулированием, а желтый график (дискретный регулятор со 2 вариантом расчета ) точно выходит на единицу.

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

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

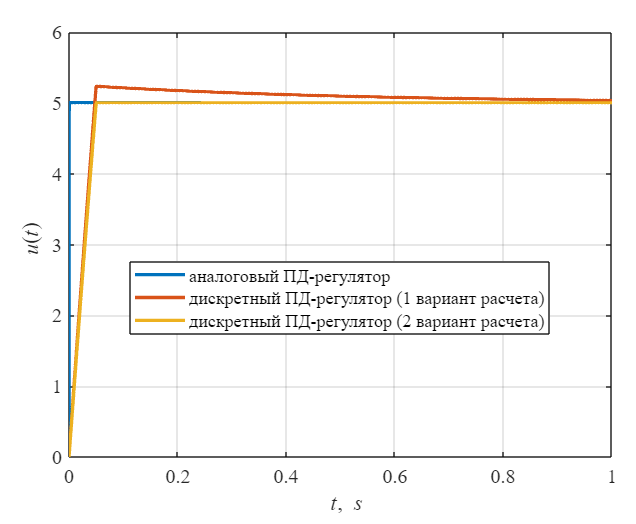


Рисунок 6. Временные диаграммы работы системы "ПД-регулятор - апериодическое звено первого порядка" в режиме компенсации постоянной времени c усилением .

## Непрерывная модель цифрового ПД-регулятора, учитывающая неполную компенсацию цифровым регулятором постоянной объекта

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

Определим величину малой некомпенсированной постоянной , учитывающей в непрерывной модели неполную компенсацию цифровым ПД-регулятором постоянной объекта . Искомая величина 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:

где – процесс в цифровой системе, – процесс в эквивалентной системе при некотором значении постоянной .

Случай

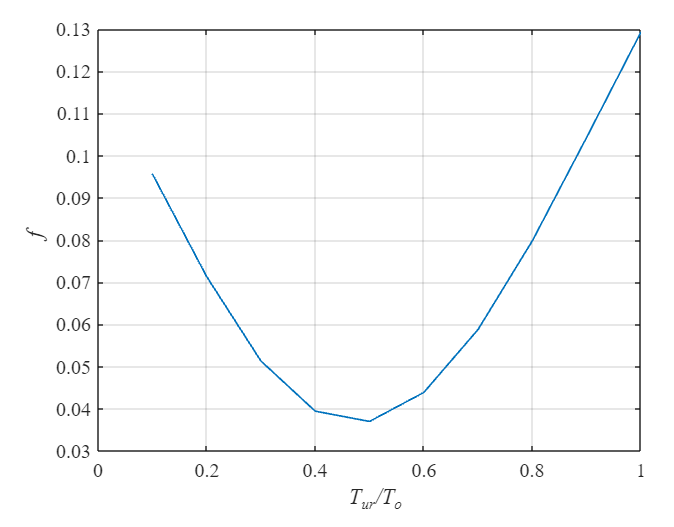


Рисунок 7. График функционала при

Наиболее близкие процессы имеем при .

Промоделируем систему с данным значением

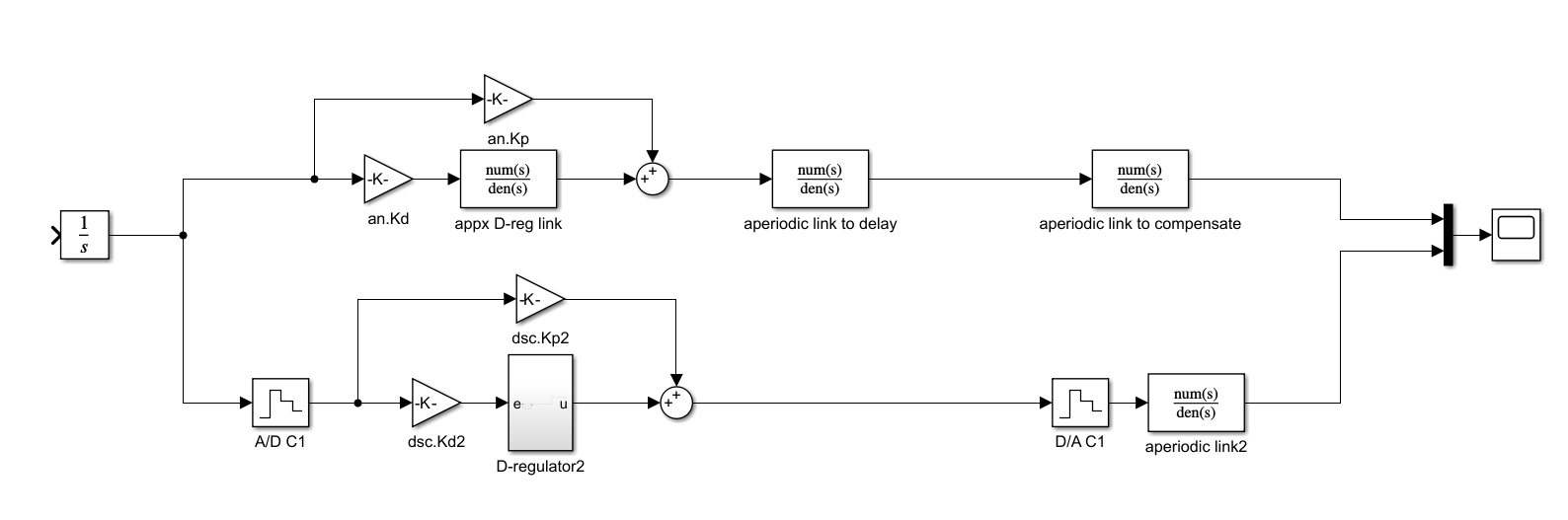


Рисунок 8. Схема моделирования аналогового ПД-регулятора с апериодическим звеном для добавления эквивалентной задержки.

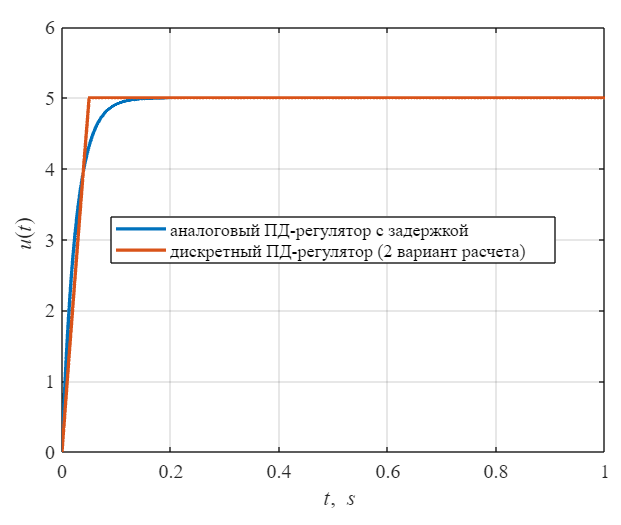


Рисунок 9. Временные диаграммы систем с дискретным ПД-регулятором и эквивалентным аналоговым ПД-регулятором при .

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 .

В итоге, можем сделать вывод, что можно аппроксимировать дискретность с помощью апериодического звена 1-го порядка с определенной из задачи минимизации функционала постоянной .

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

### Синтез регулятора

Передаточная функция контура тока:

Передаточная функция объекта:

Передаточная функция технического оптимума:

Передаточная функция регулятора:

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

### Моделирование работы системы настроенной на технический оптимум

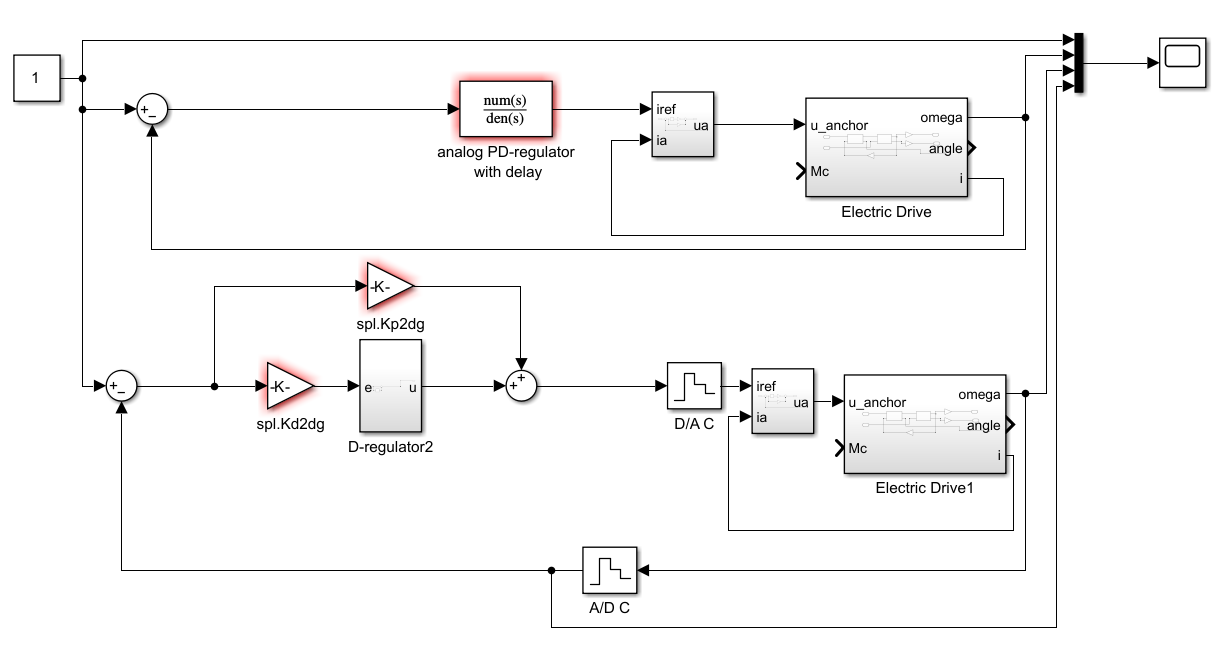


Рисунок 10. Схема моделирования системы, настроенной на технический оптимум для случая отсутствия вычислительной задержки и без учета задержки дискретного ПД-регулятора.

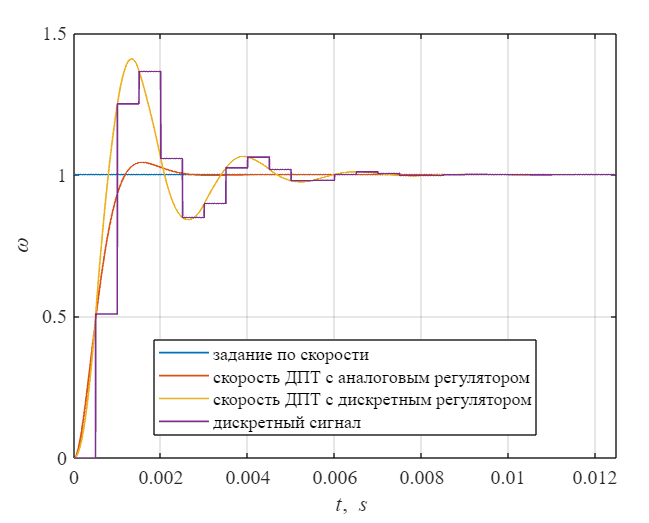


Рисунок 11. Графики переходных процессов системы, настроенной на технический оптимум для случая отсутствия вычислительной задержки и без учета задержки дискретного ПД-регулятора.

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

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

время первого входа в 5% зону

время переходного процесса (5% зона)

перерегулирование

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

Теперь добавим звено запаздывания в контур скорости аналогового регулятора.

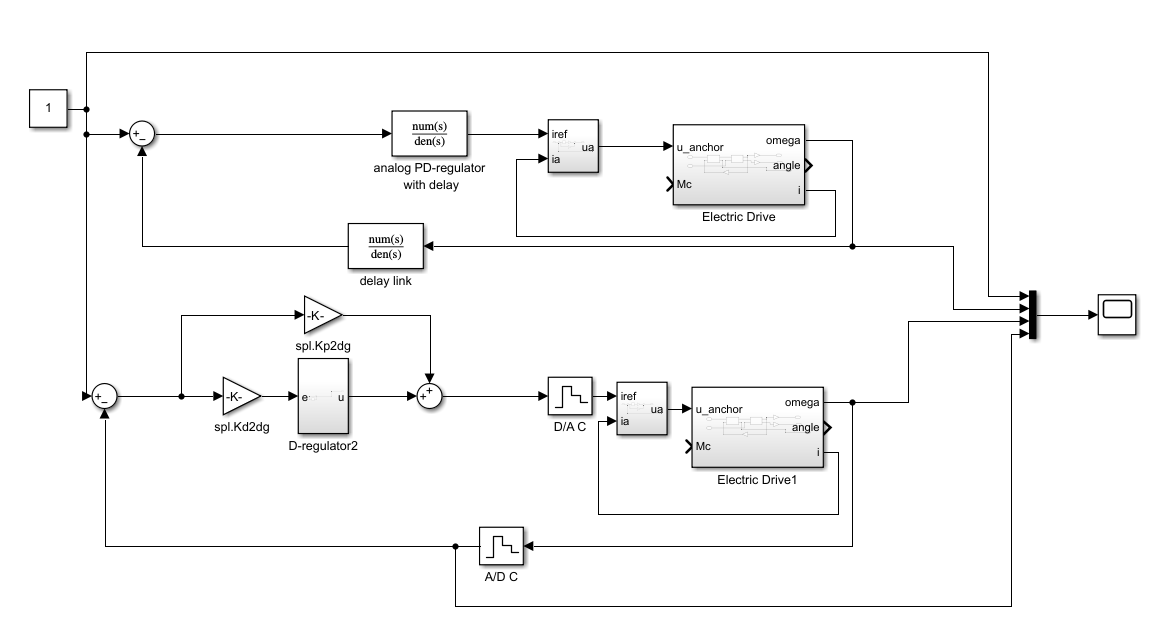


Рисунок 12. Схема моделирования эквивалентной системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора и настроенной на технический оптимум без учета вычислительной задержки.

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

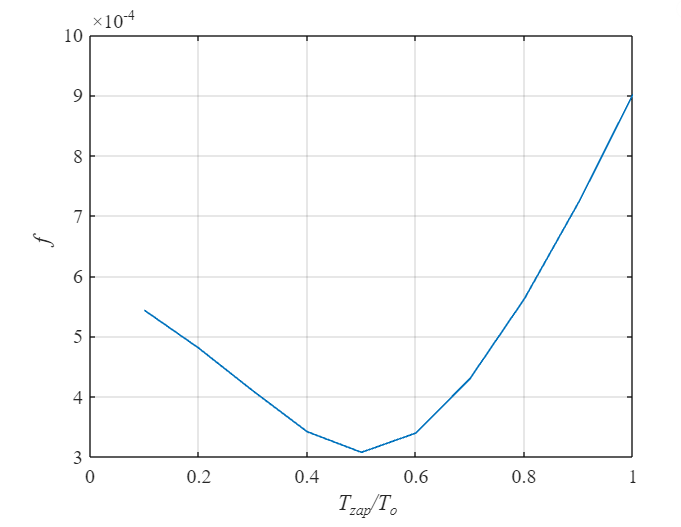


Рисунок 13. График функционала близости.

Оптимальное значение

### Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

Случай

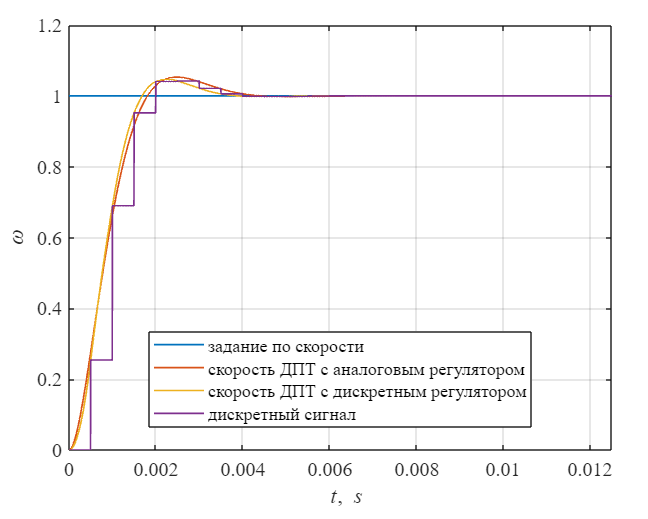


Рисунок 14. Система, настроенная на технический оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая отсутствия вычислительной задержки при .

Получили технический оптимум, как и требовалось.

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

время первого входа в 5% зону

время переходного процесса (5% зона)

перерегулирование

Случай

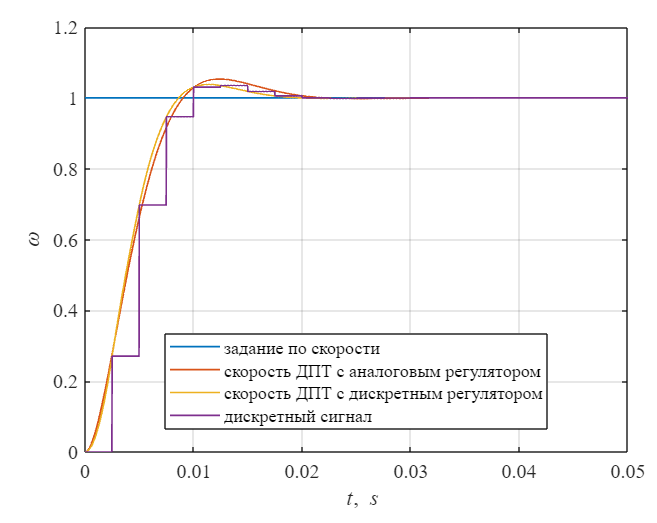


Рисунок 15. Система, настроенная на технический оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая отсутствия вычислительной задержки при .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

время первого входа в 5% зону

время переходного процесса (5% зона)

перерегулирование

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Таблица 2. Параметры переходных процессов.

Быстродействие осталось то же самое, а перерегулирование уменьшилось при большем

## Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки . 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: 𝜖 = 𝑇𝑜.

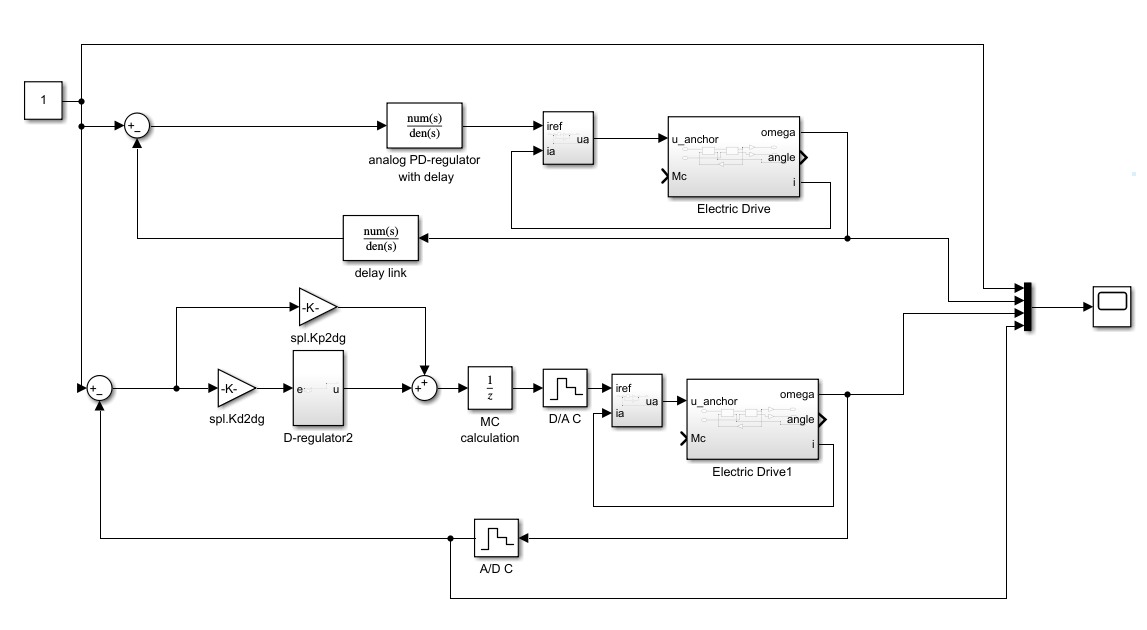


Рисунок 16. Схема моделирования эквивалентной системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора и настроенной на технический оптимум с наличием вычислительной задержки .

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

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

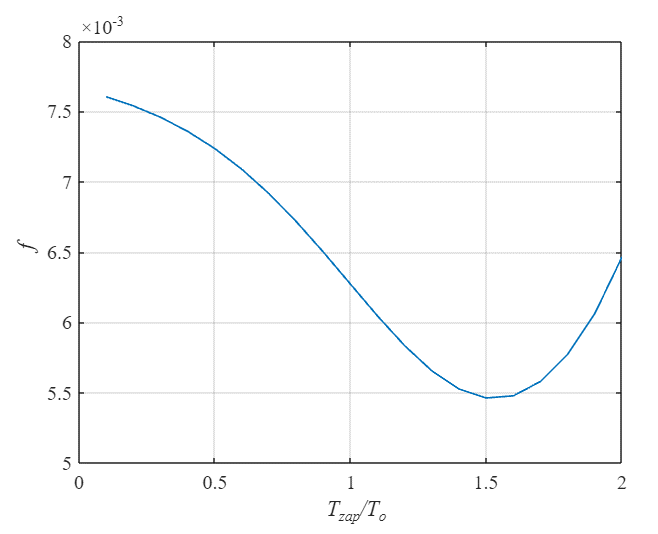


Рисунок 17. График функционала близости.

Оптимальное значение

### Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

Случай

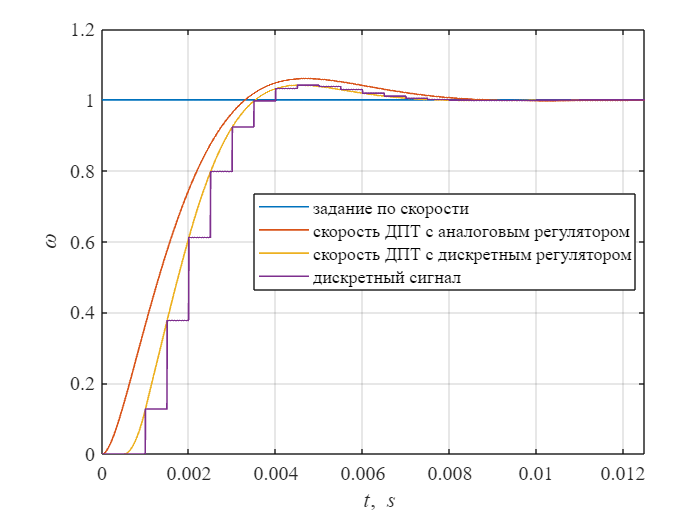


Рисунок 18. Система, настроенная на технический оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая наличия вычислительной задержки при .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

время первого входа в 5% зону

время переходного процесса (5% зона)

перерегулирование

Случай

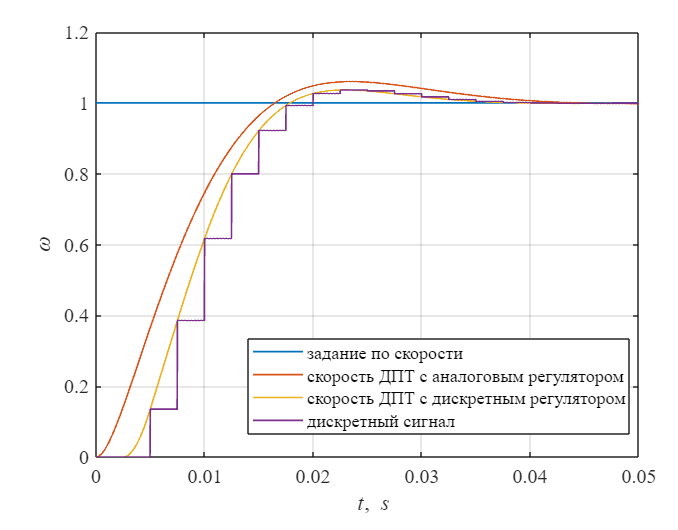


Рисунок 19. Система, настроенная на технический оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая наличия вычислительной задержки при .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

время первого входа в 5% зону

время переходного процесса (5% зона)

перерегулирование

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Таблица 3. Параметры переходных процессов.

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

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

Это является свойством ПД-регулятора, так как в отличии от интегрального регулятора ПД-регулятор сдвигает фазу в сторону и система становится более устойчивой.

## Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки . Настройка на биномиальный оптимум

### Синтез регулятора

Передаточная функция контура тока:

Передаточная функция объекта:

Передаточная функция биномиального оптимума:

Передаточная функция регулятора:

### Моделирование работы системы настроенной на биномиальный оптимум

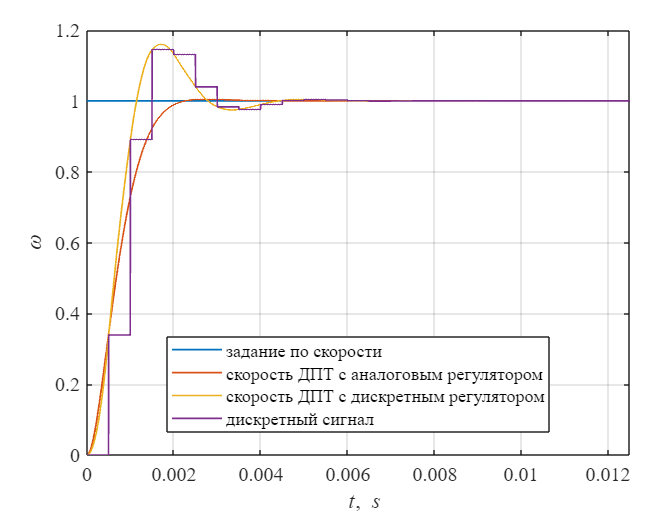


Рисунок 20. Графики переходных процессов системы, настроенной на биномиальный оптимум для случая отсутствия вычислительной задержки и без учета задержки дискретного ПД-регулятора.

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:

время первого входа в 5% зону

время переходного процесса (5% зона)

перерегулирование

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

Теперь добавим звено запаздывания в контур скорости аналогового регулятора.

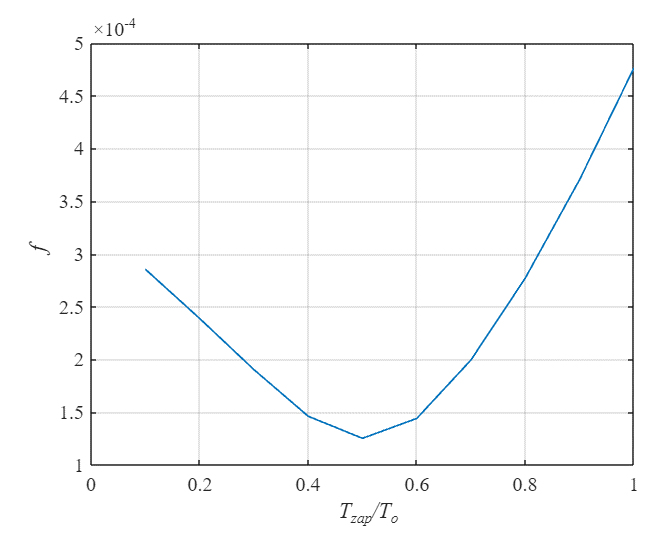


Рисунок 21. График функционала близости.

Оптимальное значение

### Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

Случай

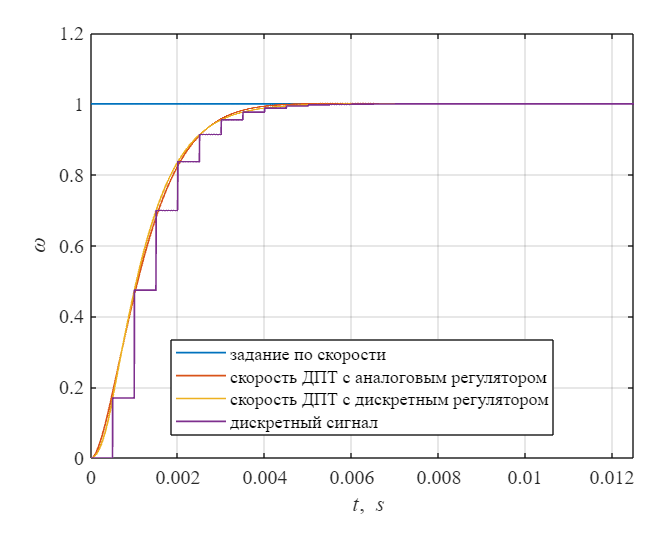


Рисунок 22. Система, настроенная на биномиальный оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая отсутствия вычислительной задержки при .

Получили биномиальный оптимум, как и требовалось.

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

время первого входа в 5% зону

время переходного процесса (5% зона)

перерегулирование

Случай

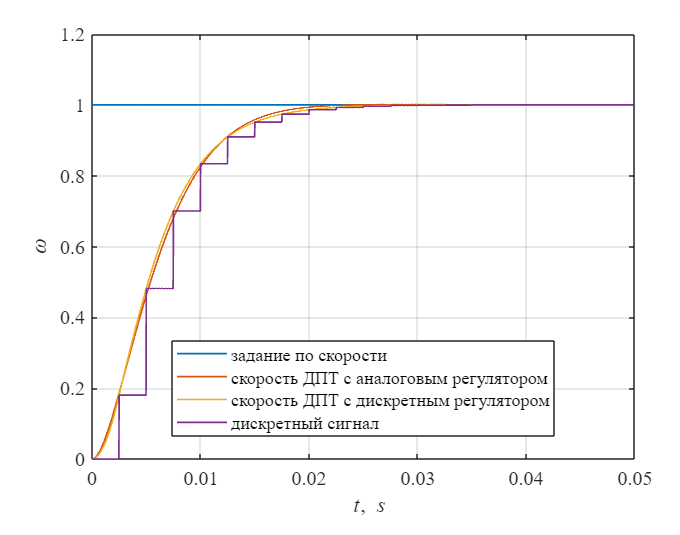


Рисунок 23. Система, настроенная на биномиальный оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая отсутствия вычислительной задержки при .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

время первого входа в 5% зону

время переходного процесса (5% зона)

перерегулирование

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Таблица 4. Параметры переходных процессов.

## Синтез системы с использованием эквивалентной непрерывной модели системы, учитывающей динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая вычислительной задержки . Настройка на биномиальный оптимум

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

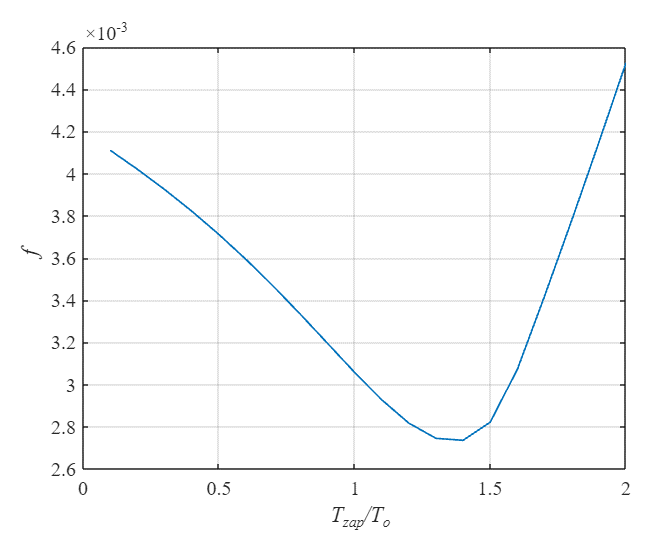


Рисунок 24. График функционала близости.

Оптимальное значение

### Синтез цифрового ПД-регулятора методом переоборудования

Случай

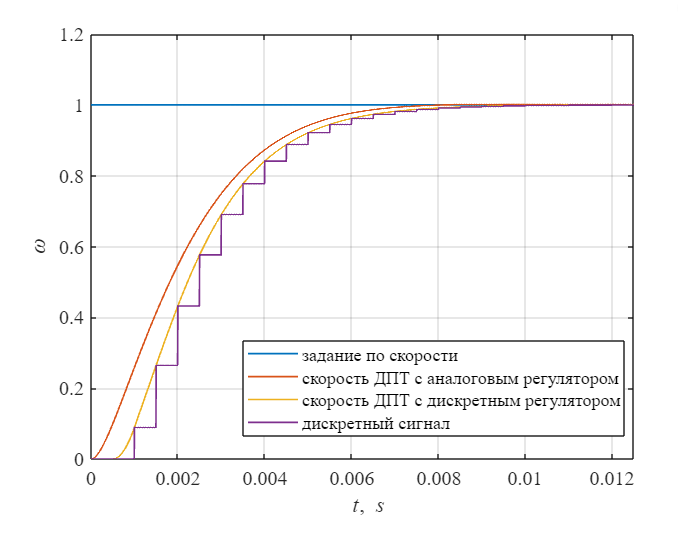


Рисунок 25. Система, настроенная на биномиальный оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая наличия вычислительной задержки при .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

время первого входа в 5% зону

время переходного процесса (5% зона)

перерегулирование

Случай

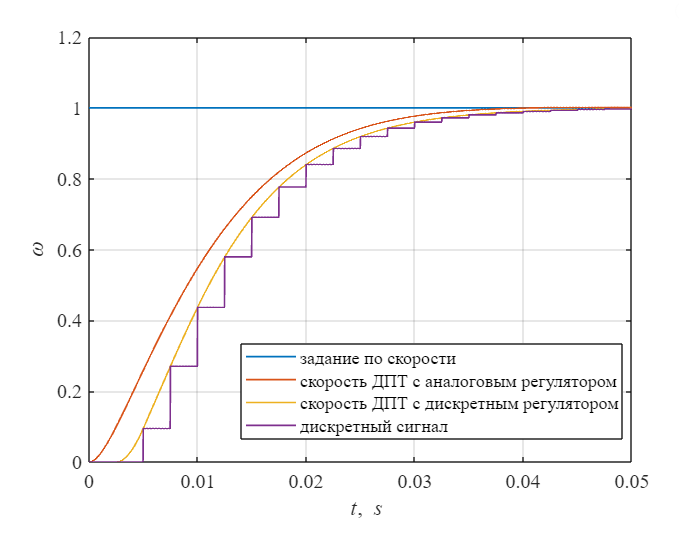


Рисунок 26. Система, настроенная на биномиальный оптимум, учитывающая динамические свойства цифрового ПД-регулятора для случая наличия вычислительной задержки при .

Показатели качества переходного процесса ДПТ с дискретным регулятором контура тока:

время первого входа в 5% зону

время переходного процесса (5% зона)

перерегулирование

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

Таблица 5. Параметры переходных процессов.

# 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 . А одинаковое у обоих сигналов - энергия ими переносимая (площадь по графиками), она равна коэффициенту регулятором . 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 . Суть компенсации постоянной времени , заключается в том, чтобы составляющие ПД-регулятора в числителе давали , 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 .

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 𝑇𝜇 = 𝑇𝑡 + 𝑇𝑧 .

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

Также при увеличении у нас уменьшилось перерегулирование, а время переходных процессов осталось прежним. Это является свойством ПД-регулятора, так как в отличии от интегрального регулятора ПД-регулятор сдвигает фазу в сторону 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 вычилять 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 биноминальный оптимум имеет перерегулирование меньше относительно технического, однако быстродействие у него меньше технического.