**ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГООБРАЗОВАНИЯ (АССОЦИАЦИЯ)**

**«КИСЛОВОДСКИЙ ГУМАНИТАРНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

Факультет Инженерный

Кафедра Систем автоматического управления

Направление Управление в технических системах

К защите допустить:

Зав. кафедройд.т.н., проф. Гайдук А.Р.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2018 г.

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

к выпускной квалификационной работе

На тему:

**«СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ»**

Руководитель работы: д.т.н., проф. Гайдук А.Р.

(должность, ученая степень и звание)

Консультанты:

по экономическому разделу к.э.н. Курданов М.Д.

по разделу безопасности и экологичности Сербулова Т.Н.

Студентка: Леонова Анастасия Сергеевна, гр.241

(фамилия, имя, отчество, группа)

Кисловодск 2018

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГООБРАЗОВАНИЯ (АССОЦИАЦИЯ)**

**«КИСЛОВОДСКИЙ ГУМАНИТАРНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

Факультет Инженерный

Кафедра Систем автоматического управления

Направление Управление в технических системах

**ЗАДАНИЕ**

на выпускную квалификационную работу

|  |
| --- |
| **Леоновой Анастасии Сергеевне** |

|  |  |
| --- | --- |
| 1. Тема работы: | «Система автоматизированного проектирования дискретных систем управления» |

утверждена приказом по вузу№\_\_\_\_\_«\_\_\_\_» 2018г.

2. Срок сдачи студентом законченного проекта 2018 г.

3. Исходные данные к проекту Разработать систему автоматизированного проектирования дискретных систем управления, которая обеспечивает заданные показатели качества системы управления, такие как астатизм первого порядка, перерегулирование, время регулирования.

3.1 Алгоритм синтеза и программное приложение реализовать с помощью пакета Matlab

4. Содержание пояснительной записки

1. Введение.

2. Системы автоматического управления.

3. Метод синтеза дискретных систем управления.

4. Примеры синтезадискретных систем управления.

5. Безопасность и экологичность разработки.

6. Технико-экономическое обоснование разработки.

7. Заключение.

8. Список литературы.

9. Приложение, листинг программного продукта.

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных демонстрационных материалов)

|  |
| --- |
| 1. Постановка задачи управления (1 слайд) |
| 2. Модель цифровой системы (1 слайд) |
| 3. Требования к синтезируемой системе управления (1 слайд) |
| 4. Структурная схема реализации программы (1 слайд)  5. Пример синтеза дискретной системы управления (1 слайд) |
| 5. Безопасность и экологичность разработки (1 слайд) |
| 6. Технико-экономическое обоснование разработки (1 слайд) |

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов)

Технико-экономическое обоснование к.э.н /Курданов М.Д./

Безопасность и экологичность /Сербулова Т.Н./

|  |  |
| --- | --- |
| 7. Дата выдачи задания |  |

|  |  |
| --- | --- |
| **Руководитель** | **д.т.н., проф.** /Гайдук А.Р./ |

(подпись)

|  |  |
| --- | --- |
| Задание принял к исполнению (дата) |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Подпись студентки | /Леонова А. С./ |

УДК 62-50.05.531

«Система автоматизированного проектирования дискретных систем управления »

Выпускная квалификационная работа

Леонова Анастасия Сергеевна Кисловодск, КГТИ, 2018 г.

**РЕФЕРАТ**

Выпускная квалификационная работа (ВКР) содержит 115 листов,   
 в том числе 19 рисунков, 6 таблиц и 24 листаприложения.

Ключевые слова: дискретная система, цифровое устройство управления, микроконтроллер,алгоритм, показатель качества, безопасность, экологичность, экономическое обоснование.

Данная выпускная квалификационная работа посвящена разработке системы автоматизированного проектирования дискретных систем управления.В первом разделе работыописываютсяразличные методы синтезасистем управления, а так же излагаются особенности синтеза дискретных систем.Во втором разделе приводится методика и алгоритм аналитического синтеза дискретных систем по заданным показателям качества.

В третьем разделе рассматриваются примеры синтеза дискретных систем управления. Приводятся примеры аналитического и автоматизированного синтеза дискретных систем управления. В этом же разделе излагается порядок синтеза дискретной системы управления с применение программы “ДСУ”в пакете MATLAB.Даются результаты моделирования синтезированных дискретных системуправления.

Четвертый и пятый разделы посвящены вопросам безопасности, экологичности и технико-экономическому обоснованию разработанной программы.

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ВВЕДЕНИЕ** 5

**1. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**………………… 13

1.1. Особенности синтеза систем автоматического управления …………. 13

1.2. Нормированные характеристики систем управления…………………. 25

**2. СИНТЕЗ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**…………………29

2.1. Методика аналитического синтеза по заданным показателям качества 29

2.2. Алгоритм автоматизированного синтеза……………………………….. 36

**3.ПРИМЕРЫ СИНТЕЗА**……………………………………………………… 39

3.1. Аналитический синтез дискретной системы управления……………… 39

3.2. Порядок синтеза ДСУ в пакете MATLAB………………………………49

3.3. Автоматизированный синтез ДСУ ……………………………………… 55

**4. БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ**………. 66

4.1. Системный анализ на случай отказа работы компьютера……………… 66

4.2. Анализ опасных и вредных факторов……………………………………. 69

4.3. Мероприятия по обеспечению оптимальных условий труда

Оператора………………………………………………………………… 72

4.4. Обеспечение пожарной безопасности………………………………....... 74

4.5. Защита окружающей среды……………………………………………… 76

**5.ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА**……... 79

5.1. Маркетинговое исследование рыночных перспектив разработки…….. 79

5.2. Выбор и обоснование базы сравнения…………………………………... 80

5.3. Расчет затрат на этапе проектирования…………………………………. 81

5.4.Определение показателей эффективности……………………………… 84

5.5. Расчет и сопоставление эксплуатационных расходов…………………. 84

55.6. Сводные экономические показатели по разработке………………….. 86

5.7. Функционально стоимостный анализ…………………………………... 87

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ** 89

**Список используемоЙ литературы**………………………………. 90

**ПРИЛОЖЕНИЕ**…………………………………………………………………... 91

**ВВЕДЕНИЕ**

Созданию любого объекта предшествует проектирование, означающее описание объекта, который должен быть создан. При этом под объектом проектирования понимают любой «объект», ещё не существующий в действительности, например, машину, процесс, систему, вычислительный комплекс и т.д.

Цель процесса проектирования состоит, прежде всего, в том, чтобы на основе априорной, т.е. заданной изначально, и апостериорной информации, получаемой в процессе проектирования, разработать техническую документацию, требуемую для изготовления объекта проектирования.

Проектирование – это процесс создания прототипа, прообраза объекта, необходимого для изготовления этого объекта. Проектирование, по существу представляет собой процесс управления с обратной связью (рис. 1). Техническое задание формирует входы или уставки, которые сравниваются с результатами проектирования, и, если они не совпадают, цикл проектирования повторяется вновь до тех пор, пока ошибка (отклонение от заданных технических требований) не окажется в допустимых пределах.

Процесс проектирования осуществляется системой проектирования, т.е. совокупностью взаимодействующих друг с другом проектировщиков и необходимых для проектирования технических средств. По существу, системы проектирования могут рассматриваться как сложные человеко-машинные многоконтурные, многомерные системы управления с обратной связью, требующие сбора, передачи, переработки и использования информации для достижения цели проектирования. Они должны быть подчинены тому или иному критерию оптимизации, например критерию наименьшей продолжительности или максимального быстродействия при ограниченных затратах, или критерию быстрейшей окупаемости спроектированной системы и т.д.

Для уменьшения времени проектирования необходимо увеличивать быстроту прохождения полезных сигналов и препятствовать влиянию помех, т.е. сигналов, не несущих полезной информации. Такими помехами могут явиться неверные или неточные промежуточные результаты, или неудачный выбор структуры системы проектирования, когда сигналы, необходимые для принятия решений на каком-либо нижнем уровне, попадают на верхние уровни, где они могут быть не только бесполезными, но и вредными. Из сказанного видно, что системный подход, принципы и методы теории управления представляют собой существенный интерес для рациональной организации процессов проектирования.



Рисунок 1– Проектирование как процесс управления с обратной связью

Процесс проектирования можно также представить в виде иерархии решений, которую удобно изобразить при помощи графа. Принимая точку О (рис. 2) за формулировку проблемы, варианты её решения можно представить отрезками , ,  и т.д. Каждому варианту соответствует несколько подпроблем: , , , , , ,,  и т.д. Принятие варианта  требует решения подпроблем , , а принятие варианта  – подпроблем , ,  и т.д.

Иногда может оказаться возможным получить приемлемые решения для всех подпроблем, и в этом случае проектировщик должен выбрать вариант, который наилучшим образом удовлетворит цели проектирования.

Предположим, например, что после выбора варианта  и решения всех связанных с ним подпроблем , и  обнаруживается, что решения для подпроблем следующего уровня не существует. Тогда необходимо отбросить вариант  и попытаться найти решение для других проблем, связанных с вариантами  и . Если, однако, окажется, что ни одна из подпроблем и  не может быть решена, то необходимо вернуться обратно к точке разветвления предыдущего, более высокого уровня (в данном случае к точке О).



Рисунок 2 –Процесс проектирования как иерархия принятия решений

Выбор вариантов  является творческим, трудно формализуемым процессом. Но по мере продвижения вниз по дереву сложность формализации уменьшается, и реализация её решения упрощается.

В связи с бурным развитием вычислительной техники в конце прошлого века появилось понятие «автоматизация проектирования» (АПр). Вначале этот термин применяли во всех тех случаях, когда ЭВМ использовали для расчётов, связанных с проектированием. Но сейчас этот термин приобрёл более специфический смысл, относящийся к интерактивным системам, т.е. к человеко-машинным системам, в которых проектировщик и ЭВМ при решении задач проектирования взаимодействуют друг с другом. При помощи Апр результаты проектирования систем, в которых использовались новые идеи и технические средства, могут быстро сообщаться проектировщику в удобной для него форме. Благодаря этому за короткий промежуток времени можно глубоко проникнуть в суть проблем, связанных с проектированием. Кроме облегчения анализа и синтеза, АПр позволяет создавать необходимую документацию и проверять полученные результаты.

Таким образом, в настоящее время АПр систем управления (СУ) связывают с созданием систем автоматизированного проектирования (САПР) СУ, предназначенных в основном для решения задач научно-исследовательского, эскизного и, частично, технического проектирования.

САПР, согласно определению, рекомендуемому ГОСТом, – это комплекс программно-технических средств АПр, взаимосвязанных с необходимыми подразделениями проектной организации или коллективом специалистов, выполняющих АПр.

Выше было показано, что САПР можно рассматривать как системы управления с обратной связью. Поэтому можно дать следующее определение, подчёркивающее управленческий аспект САПР, т.е. САПР – это человеко-машинная или автоматизированная система управления технологическим процессом производства технической документации, необходимой для изготовления проектируемого объекта.

Общим для всех САПР является то, что они вне зависимости от объекта проектирования могут сами рассматриваться как автоматизированные системы управления технологическими процессами производства технической документации. Поэтому развитие общей теории систем автоматизированного управления одновременно является развитием теоретических основ САПР любых объектов. Но САПР систем автоматического и автоматизированного управления техническими объектами имеют ряд характерных для них особенностей, отличающих их от большинства САПР других технических объектов.

Этими особенностями являются:

1. При проектировании СУ основные трудности и наибольшая трудоёмкость связаны с выбором структуры, информационных потоков, функциональных, динамических, логических и алгоритмических связей между подсистемами, в отличие от проектирования, например, сооружений, машин и т.д., когда основное внимание сосредоточено на этапах конструкторского и технологического проектирования.
2. Вычислительные машины, люди и потоки информации между ними входят в состав не только САПР СУ, но и являются составными элементами проектируемой системы управления. Поэтому САПР АСУ ТП может рассматриваться не только как обобщённая модель процесса проектирования АСУ определённого класса, но и как информационно-динамическая модель конкретной системы управления в процессе её нормальной эксплуатации, т.к. информационные потоки и необходимость их обработки существует не только в процессе проектирования, но и при нормальной эксплуатации СУ.
3. В настоящее время практика проектирования СУ состоит в том, что в начале проектируются технологические процессы, а уже потом – управляющая ими система. Поэтому при проектировании последней объект управления необходимо рассматривать как малоизменяемую часть системы, большинство свойств и характеристик которой фиксировано.
4. Математические модели СУ составляются в условиях существенно неполной информации об объекте управления, о действующих на него возмущениях, а также в условиях неполной измерительной информации и при наличии помех.
5. Системам управления обычно адекватны не статические, а логико-динамические модели высокой размерности, учитывающие принципиальную структурную особенность систем управления, представляющих собой системы с обратной связью, для которых важными условиями работоспособности является динамическая устойчивость, наблюдаемость и поведение в динамике.
6. САПР СУ должны предусматривать возможности исследования вопроса о рациональном распределении функций между человеком и ЭВМ в процессе эксплуатации системы управления.
7. АСУ характеризуются пространственной разнесённостью подсистем, объединяемых в единую систему рационально спроектированными потоками информации между ними.

Итак, САПР АСУ ТП можно рассматривать как модель проектируемой системы, в которой учтены основные виды динамического и информационного между её частями, включая проектировщиков.

Разработка теории и методики автоматизированного проектирования АСУ технологическими процессами и техническими объектами представляет собой, несомненно, очень сложную проблему, прежде всего в связи с трудностью формализации, или математического описания и составления моделей протекания этих процессов. Действительно, если предположить, что процессы управления можно описать при помощи дифференциальных уравнений, то эти уравнения содержат в общем случае нелинейности, переменные и распределённые параметры, имеют десятки и сотни переменных со сложными взаимодействиями и возмущениями. Поэтому, с первого взгляда составление модели такого процесса может показаться безнадёжной задачей. Однако в случае АСУ ТП существует ряд факторов, облегчающих её решение:

* знание физической и химической сущности технологических процессов, накопленный опыт и интуиция, часто позволяющие уменьшить сложность математического описания процессов;
* большинство процессов проявляют себя как низкочастотные, что ведёт к уменьшению числа переменных, необходимых для их описания;
* часто требуется, чтобы основным режимом работы было установившееся состояние, отклонение от которого должно быть наименьшим;
* сложный технологический процесс осуществляется совокупностью хотя и взаимодействующих друг с другом, но всё же отдельных машин и аппаратов, что указывает на возможность декомпозиции и децентрализации управления на основе разбиения процессов на подпроцессы и сведения системы управления к иерархической структуре.

Цель и содержание автоматизированного проектирования АСУ ТП следующие:

1. Составление математической модели управления и внешней среды по имеющейся априорной информации и результатам идентификации действующих объектов или их физических моделей.
2. Структурный синтез, включающий составление предварительной структурной схемы АСУ на основании анализа особенностей технологического процесса, определение необходимых информационных потоков, оценку возможности получения измерительной информации, нахождение точек приложения управляющих воздействий, учёт возможностей декомпозиции системы и распределения функций управления по соответствующим уровням (распределённые системы).
3. Составление математической и имитационной модели всей системы управления.
4. Синтез законов регулирования, управления, координации и алгоритмов их реализации.
5. Определение режимов интерактивного взаимодействия в реальном масштабе времени с ЭВМ, входящими в состав СУ.
6. Анализ полученных результатов при помощи средств имитационного и полунатурного моделирования.
7. Формулировка требований и рекомендаций по выбору ЭВМ и других технических средств, входящих в состав СУ.
8. Уточнение и внесение коррективов в техническое задание.
9. Составление документации.

Системы автоматизированного проектирования, выполняющие первые шесть из перечисленных выше пунктов, иногда называют системами автоматизированного синтеза.

В современных системах управления широко используют элементы и подсистемы, входные и выходные сигналы которых имеют дискретный характер. К таким элементам, прежде всего, следует отнести управляющие ЭВМ и микроконтроллеры, обмен информацией между которыми и остальными частями системы может происходить лишь в дискретные моменты времени. Подобные системы называются дискретными или непрерывно-дискретными.

В данной работе рассматривается система автоматизированного синтеза цифрового управления. Как правило, цифровое устройство управления (ЦУУ) периодически с некоторым периодом *Т* вычисляет значение управляющего воздействия, которое затем превращается в непрерывный сигнал, поступающий в качестве управления на исполнительное устройство. Отличительной особенностью дискретных систем с ЦУУ по сравнению с другими импульсными системами является то, что длительность импульсов, формируемых ЦАП, равна периоду следования этих импульсов.

**1. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

**1.1 Особенности синтеза дискретных систем**

**Задача синтеза цифровых устройств управления.**В системах автоматического управления всегда можно выделить две группы элементов. К первой группе относятся функционально необходимые элементы системы. Это некоторый объект, в котором протекает управляемый процесс, регулирующий орган объекта и его привод (исполнительный механизм и усилитель мощности). К этой же группе относятся измерительные и преобразующие элементы (датчики, нормирующие и согласующие преобразователи и т.п.). Они предназначены для сбора и преобразования информации о ходе управляемого процесса и возмущениях, приложенных к объекту. Выбор этих элементов чаще всего осуществляется, исходя из энергетических, точностных, конструктивных и других соображений.

В ряде случаев система управления, состоящая только из функционально необходимых элементов (нескорректированная система), может функционировать, выполняя свое назначение. Но чаще всего эта система является неустойчивой или же имеет низкое качество процесса управления. Для придания проектируемой системе управления требуемых свойств необходимо ввести в систему дополнительные элементы, которые и образуют вторую группу элементов систем автоматического управления. Это усилители-формирователи, интеграторы, корректирующие RC-цепочки, элементы дополнительных обратных связей, компенсаторы и т.п.

Совокупность элементов, вводимых в систему для придания ей требуемых динамических свойств в переходном и установившемся режиме, образует устройство управления (корректирующее устройство). Выходным сигналом этого устройства управления является управляющее воздействие (управление), поступающее на вход усилителя мощности привода регулирующего органа.

Задача определения структуры и параметров устройства управления называется задачей синтеза (задачей коррекции) системы управления.

Так как к моменту решения задачи синтеза функционально необходимые элементы системы уже выбраны, то их совокупность называют неизменяемой частью, заданной частью или объектом управления. Таким образом, далее под объектом управления подразумевается совокупность указанных выше функционально необходимых элементов, связанная с управляемым процессом. На вход этого объекта управления поступает управление , сформированное в устройстве управления, а его выходной величиной является управляемая переменная . При этом предполагается, что математическая модель объекта управления известна и представлена уравнениями в переменных состояния.

Уравнения в переменных состояния рассматриваемого в данной работе объекта с одним управлением  и одним выходом  имеют вид

.

Подставляя выражение  в уравнение состояния, получим

, .

Последние уравнения описывают указанную выше нескорректированную систему автоматического управления.

Известно большое число методов решения задачи синтеза. Очень часто структурой устройства управления задаются априори. Затем задаются параметры выбранного устройства управления, исходя из условий устойчивости и требований к качеству переходного процесса. Как правило, такой подход приводит к синтезу системы управления методом последовательных приближений, точнее к последовательному усложнению структуры устройства управления и увеличению числа варьируемых параметров.

Наряду с этим существуют аналитические методы синтеза. В этом случае, исходя из условий функционирования системы и требований к её качеству, сначала определяется оптимальная или подходящая в том или ином смысле характеристика замкнутой системы, например, её уравнения в переменных состояния или, чаще всего - передаточная функция вход-выход. Затем уже определяются уравнения устройства управления так, чтобы при заданной модели объекта управления замкнутая система имела найденную характеристику, а устройство управления было физически реализуемым.

В настоящее время наиболее рациональным путем построения устройств управления является использование цифровых вычислителей (ЦВ), микропроцессоров или микро-ЭВМ.

Система с цифровым управляющим устройством (ЦУУ) помимо собственно цифрового вычислителя (ЦВ) и непрерывного объекта управления (НОУ), как показано на рис. 1, включает аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи (АЦП и ЦАП). При работе системы АЦП формируют двоичные коды , , соответствующие дискретным значениям ,  непрерывных величин ,  в моменты времени , кратные периоду квантования по времени , т.е. , 



Рисунок 1.1 –Функциональная схема системы с цифровым устройством управления

Вычислитель ЦВ периодически (тоже с периодом ) по соответствующему алгоритму рассчитывает значения управления , двоичные коды  которого с помощью ЦАП преобразуются в непрерывное управление , поступающее на непрерывный объект управления.

Обычно число разрядов АЦП и ЦАП достаточно велико, так что квантованием по уровню можно пренебречь (по крайней мере, в первом приближении). В этом случае сигналы на выходах АЦП и ЦВ можно считать решетчатыми функциями , , , которые соответствуют непрерывным сигналам , , .Коды  на входе ЦАП изменяются только в моменты времени , , поэтому его выходной сигнал  можно рассматривать как последовательность импульсов постоянной длительности  и переменной амплитуды .

Коэффициенты передачи АЦП -  и ЦАП -  обычно выбираются так, что . Поэтому при расчетах систем с цифровым управлением АЦП можно рассматривать как идеальные ключи, работающие с периодом , а ЦАП – как формирователь прямоугольных импульсов.Длительность этих импульсов равна периоду квантования по времени , а амплитуда . Это позволяет представить расчетную схему системы с цифровым управлением в виде, показанном на рис. 2.



Рисунок 1.2 –Расчётная схема системы с цифровым устройством управления

На этом рисунке ЦУУ это совокупность АЦП и ЦВ, а ПНЧ -приведенная непрерывная часть - совокупность ЦАП и НОУ. Если непрерывный объект управления имеет передаточную функцию , то приведенная непрерывная часть (ПНЧ) системы описывается передаточной функцией

,

Для вычисления кодов  правления  цифровому вычислителю, естественно, требуется некоторый алгоритм. Этот алгоритм может выбираться на основе часто используемых типовых законов управления. Например, это может быть П-закон, при котором алгоритм вычисления управления  имеет вид

 (1.1)

где  – отклонение, сигнал ошибки системы,  - параметр настройки цифрового устройства управления (ЦУУ), реализующего П-закон. Очень часто алгоритм ЦУУ строится на основе ПИ-закона, при котором

 (1.2)

Здесь  и  – также параметры настройки ЦУУ, реализующего ПИ-закон. Создаются алгоритмы работы ЦУУ и на основе других типовых законов управления.

Как видно при цифровой реализации указанных законов в соответствии с выражениями (2.1), (2.2) учитывается запаздывание на такт. Это запаздывание обусловлено затратами времени  на преобразование сигналов датчиков в цифровую форму, выполнение необходимых математических операций по расчету управления  и обратное преобразование цифровых кодов  в непрерывное управляющее воздействие.

# Если время мало по сравнению с периодом следования импульсов , то им обычно пренебрегают. В этом случае в правых частях выражений (2.1), (2.2) и аналогичных им индекс заменяется индексом .

Чаще всего, однако, быстродействия современных ЦВМ недостаточно, так что указанное запаздывание необходимо учитывать. В дальнейшем будем считать, что запаздывание близко к периоду следования импульсов управления , т.е.

 (1.3)

Именно в этих случаях в дискретных алгоритмах учитывается запаздывание на один такт или период .

При выбранном законе управления, например в виде (2.1) или (2.2), задача синтеза сводится к определению численных значений его параметров настройки.

Однако в общем случае для обеспечения повышенных требований к качеству системы (например, второй или третий порядок астатизма, небольшое время регулирования и перерегулирование) простейшие законы управления оказываются недостаточными. В этом случае применяют более сложные алгоритмы вычисления , процедура синтеза которых включает определение и структуры, и параметров ЦУУ. Ниже рассматриваются некоторые из таких методов синтеза.

**Модальное дискретное управление***.* Как и в непрерывном случае, модальное дискретное управление, применяется при построении систем управления различными объектами. При этом обычно предполагается, что объект управления задан своими уравнениями в переменных состояния, например, вида

, (1.4)

где элементы матрицы  и вектора  имеют известные численные значения.

Однако при модальном управлении, в отличие от схемы, изображенной на рис. 1.2, в ЦВ вместо кодов  управляемой переменной поступают формируемые АЦП также с периодом коды , соответствующие значениям всех переменных состояния ,  ОУ, которые измеряются специальными датчиками.

Дискретное модальное управление, по аналогии с непрерывным, ищется в виде



. (1.5)

Коэффициенты  необходимо выбрать таким образом, чтобы корни характеристического уравнения замкнутой системы (1.4), (1.5) имели заданные значения.

Управление (1.5) является идеализированным в том смысле, что оно не учитывает указанных выше затрат времени в управляющем устройстве на измерение и преобразование сигналов, а также на расчет управления. Как отмечалось выше, управление (1.5) можно применять, если указанные затраты времени, по крайней мере на порядок, меньше периода квантования , и их влиянием на свойства системы управления можно пренебречь.

Рассматривая далее модальное управление, будем предполагать, что все переменные состояния измеряются, преобразуются АЦП и поступают в ЦУУ.

Для вывода соотношений, позволяющих вычислить значения коэффициентов , в равенстве (1.5), найдем уравнение дискретной системы с модальным управлением. Для этого подставим равенство (1.5) в уравнение (1.4). В результате получим

. (1.6)

Далее найдем характеристический полином замкнутой системы (1.6). Переходя в этом равенстве к z-изображениям при нулевых начальных условиях и проведя очевидные преобразования, получим

. (1.7)

Отсюда следует, что характеристический полином замкнутой системы (1.6) определяется выражением

. (1.8)

С использованием свойств определителей правую часть этого равенства можно представить так

, (1.9)

где

(1.10)

характеристический полином заданного объекта управления (1.4). При этом полином  имеет степень *n-*1, т.е. ровно *n* произвольных коэффициентов, , .

Степень характеристического полинома замкнутой системы также равна *n*, т.е. равна числу варьируемых коэффициентов в управлении (1.5). Поэтому выбором этих коэффициентов можно обеспечить любые, заданные значения корней характеристического полинома (1.8) или (1.9).

В общем случае это можно осуществить, если объект (1.4) является полностью управляемым, т.е. если , где матрица . При этом процедура расчета коэффициентов  из (1.5) полностью аналогична этой процедуре в непрерывном случае.

В частности, если заданное уравнение (1.4) объекта представлено в канонической управляемой форме, то полином

. (1.11)

В этом случае коэффициенты , в соответствии с выражениями (1.9)-(1.11) определяются по формулам

 (1.12)

где  - коэффициенты желаемого полинома, корни которого равны заданным полюсам системы.

**Пример 1*.*** Для объекта

(1.13)

найти модальное управление (5), при котором корни характеристического уравнения (полюсы) замкнутой системы будут равны ,.

Переходя к решению задачи, прежде всего, отмечаем, что в данном случае уравнение объекта представлено в канонической управляемой форме, поэтому коэффициенты его характеристического полинома  равны , , а корни , . Так как один из корней больше единицы по модулю, то заданный объект без управления является неустойчивым. Поэтому модальное управление должно быть стабилизирующим.

Желаемый полином, корни которого равны заданным, очевидно, имеет вид:

,

т.е. , .

В данном случае уравнение объекта представлено в канонической управляемой форме, поэтому по формулам (1.12) находим

, .

Следовательно, искомое модальное управление определяется выражением

.

Проверим полученный результат. Подставляя найденное управление в уравнение (1.13) при , получим

.

Отсюда следует, что характеристический полином синтезированной системы равен

.

Таким образом, при найденном управлении корни характеристического уравнения (полюсы) замкнутой системы имеют заданные значения, т.е. качество процесса управления соответствует заданным полюсам.

**Модальное управление с запаздыванием***.* Предположим теперь, что быстродействие ЦВ не велико, поэтому время  на преобразование сигналов и расчет управления, в соответствии с условием (1.3), сравнимо с периодом квантования. В этом случае запаздыванием пренебречь нельзя и модальное управление берется в следующей форме

 (1.14)

Здесь для вычисления значения управления, соответствующего моменту времени , используются данные, полученные в -м такте. Уравнение замкнутой системы (1.4), (1.14), очевидно, имеет вид

.

Запишем это уравнение в *z*-изображениях при нулевых начальных условиях 

.

Умножим обе части этого равенства на *z* и приведем подобные. В результате получим

.

Снова используя указанное выше свойство определителей, заключаем, что в данном случае характеристический полином замкнутой системы определяется выражением

. (1.15)

Отсюда следует, что при наличии запаздывания в ЦУУ на один такт степень характеристического полинома замкнутой системы равна *n*+1, а число варьируемых коэффициентов модального управления с запаздыванием – (1.14), по-прежнему, *n*. Следовательно, для обеспечения произвольного расположения всех корней характеристического полинома не хватает одного коэффициента.

Поэтому при использовании управления (1.14) (с запаздыванием на один такт) можно обеспечить только такое расположение корней характеристического уравнения (1.15) замкнутой системы, при котором один из коэффициентов её характеристического полинома равен соответствующему коэффициенту характеристического полинома (1.10) заданного дискретного объекта управления (1.4).

Рассмотрим процедуру расчета коэффициентов , в управлении (1.14) на следующем примере.

**Пример 2*.*** Предположим объект управления тот же, что и в предыдущем примере, т.е. описывается уравнением (1.13). Требуется найти одно из возможных дискретных модальных управлений с запаздыванием на такт, при котором обеспечивается устойчивость замкнутой системы.

Решение. В данном случае , поэтому в соответствии с выражением (1.14) управление

 (1.16)

При этом характеристический полином замкнутой системы согласно (1.15) с учетом того, что , равен

.

Так как

,

то подставляя в предыдущее выражение, найдем

. (1.17)

Таким образом, корни характеристического полинома замкнутой системы нужно задать так, чтобы их сумма равнялась 1,5. При этом для обеспечения устойчивости замкнутой системы модуль каждого из них должен быть меньше единицы.

В данном случае корни можно задать, например, так: ; ; . Тогда желаемый полином

. (1.18)

Сравнивая полиномы  (1.18) и  (1.17), получаем

; .

Следовательно, искомое управление с запаздыванием на такт имеет вид . Как и ранее, для проверки полученного результата подставим найденное управление в уравнение объекта (1.13). В результате получим

.

Перейдя в этом выражении к *z*-изображениям, найдем, что характеристический полином синтезированной замкнутой системы определяется выражением



.

Сравнивая полученный полином с выражением (1.18), заключаем, что синтезированная дискретная система имеет заданные при её синтезе корни характеристического уравнения.

На основе изложенного можно заключить, что дискретное модальное управление с запаздыванием на такт не всегда может быть реализовано. Действительно, если в общем случае коэффициент  характеристического полинома (1.10) заданного объекта (1.4) не будет равен сумме *n* комплексных чисел, каждое из которых по модулю меньше единицы, то задача определения коэффициентов управления (1.14), очевидно, не будет иметь решения. В этих случаях для построения модального управления необходимо более точно учитывать запаздывание, вносимое АЦП, ЦВ и ЦАП, непосредственно при выводе уравнения дискретной модели объекта.

Отметим также, что при синтезе астатических систем с модальным управлением выбор желаемых корней характеристического полинома должен удовлетворять дополнительному условию астатизма заданного порядка дискретных систем управления.

Кроме того, как отмечалось выше, для реализации модального управления типа (1.5) или (1.14) необходимо прямое измерение всех переменных состояния объекта управления.

В целом же можно считать, что модальное управление при определенных условиях позволяет обеспечить желаемое расположение полюсов дискретных САУ, но предполагает доступность прямому измерению всех переменных состояния системы. При этомдля получения приемлемого качества процесса управления необходимо выбирать желаемые значения полюсов, так, чтобы переходный процесс системы был близок к желаемому. Как правило, это требует нескольких итераций. В этом смысле рассмотренный ниже метод синтеза по желаемым показателям качества является более рациональным, тем более что он не требует измерения переменных состояния.

**1.2 Нормированные характеристики систем управления**

Наличие жесткой связи между коэффициентами передаточной функции системы и показателями её качества позволяет построить так называемые нормированные (стандартные) передаточные функции. Эти функции строятся таким образом, чтобы система управления, с некоторым порядком астатизма по задающему воздействию, и описывающаяся стандартной передаточной функцией, имела бы небольшие значения прямых показателей качества .

В общем случае передаточную функцию астатической по задающему воздействию системы можно записать следующим образом:

Здесь  – порядок астатизма системы по задающему воздействию,  – стандартные коэффициенты (берутся из таблиц),  – временной масштабный коэффициент.

При  выражение (1.19) описывает стандартные передаточные функции. Коэффициенты , этих функций для различных значений *n* и  табулированы и приводятся во многих книгах по автоматическому управлению.

Смысл коэффициента  поясняется на рис.1.3, где приведены переходные характеристики  систем с передаточными функциями (1.19) при различных значениях этого коэффициента (его значениями помечены соответствующие графики). Доказано что, время регулирования  таких систем удовлетворяет равенству

, (1.20)

где  – длительность переходного процесса в системе с передаточной функцией (1.19) при . Поэтому при , переходной процесс указанных систем является более продолжительным, а при  – более коротким, чем при .

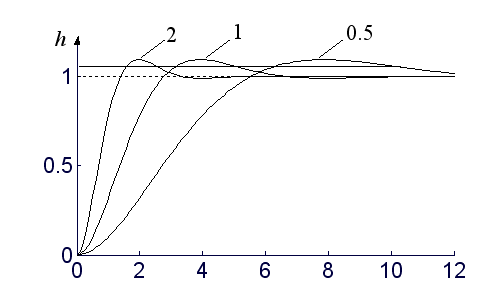


Рисунок 1.3 – Переходные характеристики систем

Одним из основных свойств стандартных передаточных функций является следующее. Порядок астатизма, перерегулирование и колебательность системы с изменением коэффициента не изменяются, т.е. остаются такими же, как и при . Это позволяет сначала выбрать стандартную передаточную функцию системы по требуемым значениям порядка астатизма, перерегулирования и колебательности, а затем – значение коэффициента  по требуемому времени регулирования.

Коэффициенты ,  некоторых стандартных передаточных функций (1.19) при  с различным порядком астатизма  и с различной степенью знаменателя , а также соответствующие значения перерегулирования и времени регулирования приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

В таблице 1.1 указывается также характер распределения корней знаменателя стандартной передаточной функции на комплексной плоскости (см. рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Распределение корней на комплексной плоскости

Подчеркнем, что в таблице 1.1 приведены значения времени регулирования , найденные по соответствующим переходным функциям при .

### Таблица 1.1– Стандартные передаточные функции

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Поря-док  аста-  тизма, | Сте-  пень  знаме-  нателя, | | Коэффициенты | | | | | | Пере-  регу-  лиро-  вание, | Время  регу-  лиро-  вания, | Примечание |
|  |  |  |  |  |  |
| *1* | | 2 | 1 | 2 | 1 |  |  |  | нет | 4,75 | *Кратные корни* |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 1 |  |  | нет | 6,31 |
| 4 | 1 | 4 | 6 | 4 | 1 |  | нет | 7.7 |
| 5 | 1 | 5 | 10 | 10 | 5 | 1 | нет | 9,2 |
| *1* | | 1 | 1 | 1 |  |  |  |  | нет | 3 | *Минимальное время регулирования* |
| 2 | 1 | 1,38 | 1 |  |  |  | 5 | 2,86 |
| 3 | 1 | 2,39 | 2,05 | 1 |  |  | нет | 4,34 |
| 4 | 1 | 2,8 | 3,8 | 2,6 | 1 |  | 5 | 4,6 |
| 5 | 1 | 3,64 | 5,46 | 5,3 | 2,6 | 1 | нет | 5,7 |
| *1* | | 1 | 1 | 1 |  |  |  |  | нет | 3 | *Распределение Баттерворса* |
| 2 | 1 | 1,41 | 1 |  |  |  | 4 | 2,92 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 |  |  | 8 | 5,89 |
| 4 | 1 | 2,613 | 3,414 | 2,613 | 1 |  | 11 | 6,86 |
| 5 | 1 | 3,236 | 5,236 | 5,236 | 3,236 | 1 | 13 | 7,70 |
| *2* | | 1 | 1 | 1 |  |  |  |  | нет | 3 | *Арифметическая прогрессия* |
| 2 | 1 | 2,5 | 1 |  |  |  | 10 | 3,6 |
| 3 | 1 | 6,35 | 5,1 | 1 |  |  | 10 | 7,0 |
| 4 | 1 | 11,8 | 16,3 | 7,2 | 1 |  | 10 | 12 |
| 5 | 1 | 18 | 38 | 29 | 9 | 1 | 10 | 18 |
| *3* | | 3 | 1 | 6,7 | 6,7 | 1 |  |  | 10 | 1,52 | *Геометрическая прогрессия* |
| 4 | 1 | 7,9 | 15 | 7,9 | 1 |  | 20 | 4,4 |
| 5 | 1 | 18 | 69 | 69 | 18 | 1 | 20 | 8,6 |

В таблице 1.2 приведены параметры стандартных передаточных функций систем с астатизмом первого порядка и с особо малым перерегулированием. В связи с этим здесь, при определении времени регулирования , значение  в отличие от таблицы 1.1, принято равным 0,02.

Таблица 1.2– Стандартные передаточные функции

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Поря-док  аста-  тизма, | Сте-  пень  знаме-  нателя, | | Коэффициенты | | | | | | | Пере-  регу-  лиро-  вание, | Время  регу-  лиро-  вания, | Примечание |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 1 | | 2 | 1 | 1,82 | 1 |  |  |  |  | 0,10 | 4,82 | Особо малое перерегули-  рование, |
| 3 | 1 | 2,20 | 1,90 | 1 |  |  |  | 1,65 | 4,04 |
| 4 | 1 | 2,80 | 3,50 | 2,20 | 1 |  |  | 0,89 | 4,81 |
| 5 | 1 | 3,40 | 5,40 | 4,90 | 2,70 | 1 |  | 1,29 | 5,43 |
| 6 | 1 | 4,05 | 7,55 | 8,70 | 6,50 | 3,15 | 1 | 1,63 | 6,04 |

Стандартные передаточные функции являются очень удобным средством выбора желаемых передаточных функций при синтезе систем автоматического управления. В частности, они позволяют синтезировать системы с заданными первичными показателями качества, такими как порядок астатизма , перерегулирование , колебательность  и время регулирования . Однако для реализации соответствующих передаточных функций систем управления обычно требуются устройства управления повышенной сложности и применение комбинированного управления по выходу и воздействиям.

**2. МЕТОД СИНТЕЗ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

**2.1 Методика аналитического синтеза дискретных систем по заданным показателям качества**

В рассматриваемом ниже методе синтеза предполагается, что в соответствии с техническим заданием необходимо синтезировать систему управления с астатизмом первого порядка по задающему воздействию и с определенными первичными показателями качества такими, как время регулирования и перерегулирование. Фактически здесь требуется найти разностное уравнение, описывающее алгоритм работы ЦУУ, при котором указанные первичные показатели качества синтезируемой замкнутой системы будут не хуже заданных.

Перейдем к изложению метода синтеза. При этом будем считать, что структура проектируемой системы управления соответствует, приведенной на рис. 1.1, причем выполняются все указанные ранее предположения в отношении АЦП и ЦАП так, что расчетную схему синтезируемой системы с цифровым управлением можно представить в виде, показанном на рис. 2.1



Рисунок 2.1– Расчетная схема системы с цифровым управлением

Передаточная функция дискретного объекта управления (ДОУ) может быть получена либо из уравнений в переменных состояния непрерывного объекта, либо на основе его передаточной функции по формуле

 (2.1)

где*Z* – символ *z*-преобразования, а  - период следования импульсов на выходе АЦП, ЦВМ и ЦАП, ,  – некоторые полиномы с известными коэффициентами. Обозначим , .

Соответствующее (2.1) уравнение вход-выход дискретного объекта управления, очевидно, имеет вид

, (2.1)

Так как, согласно рис. 2.1, на вход ЦУУ поступают переменные  и , а на его выходе формируется , то уравнение ЦУУ с учетом запаздывания на период можно записать так

, (2.3)

где , ,  – некоторые неизвестные полиномы. Именно эти полиномы должны быть найдены в результате решения задачи синтеза, так как переход от уравнения (2.3) к соответствующему алгоритму работы ЦУУ типа (1.2), (1.12) или (1.16) при выполнении условий физической реализуемости не представляет каких-либо сложностей.

Множитель  в правой части (2.3) в соответствии с условием (1.3) учитывает запаздывание на такт, которое возникает в ЦУУ из-за указанных выше затрат времени на определение . Поэтому условия физической реализуемости уравнения (2.3) имеют вид

, . (2.4)

Для удобства введем обозначения , , . Тогда условия (2.2) будут эквивалентны неравенствам

, . (2.5)

В общем случае степени и коэффициенты полиномов ,  и  в (2.3) можно определить, исходя из различных условий. Например, это можно сделать по условиям астатизма и минимальной, конечной длительности переходных процессов.

Ниже коэффициенты указанных полиномов отыскиваются на основе требований к порядку астатизма системы по отношению к задающему воздействию, времени регулирования, перерегулированию и, конечно, устойчивости.

Перейдем к изложению методики синтеза дискретной системы (2.2), (2.3) с ЦУУ.

Необходимые качества синтезируемой системы управления учитываются в процедуре синтеза с помощью желаемой передаточной функции

, (2.6)

где  и  – некоторые полиномы, а – целое число.

В рассматриваемо методе синтеза функция  (2.6) определяется по передаточной функции  вспомогательной непрерывной системы, порядок астатизма которой по отношению к задающему воздействию – , время регулирования –  и перерегулирование –  совпадают с заданными значениями этих показателей , , и  для проектируемой дискретной системы (2.3), (2.3) с ЦУУ.

Передаточная функция  определяется следующим образом. Из таблиц 1 и 2 нормированных передаточных функций по степени  полинома  из (2.2), порядку астатизма  и перерегулированию  выбираются коэффициенты ,  нормированной передаточной функции

. (2.7)

Здесь  – временной масштабный коэффициент.

Из этой же таблицы выбирается значение времени регулирования , которое используется для вычисления требуемого значения коэффициента  по формуле

, (2.8)

Подставляя полученное значение в (27), получим желаемую передаточную функцию , т.е.

. (2.9)

Далее находятся полиномы  и  желаемой передаточной функции (2.6) дискретной системы по формуле аналогичной (2.1):

. (2.10)

Таким образом, с помощью соотношений (2.7) –(2.10), полиномы  и  желаемой передаточной функции  (2.6), при которой проектируемая дискретная система имеет требуемые порядок астатизма, перерегулирование и длительность переходных процессов (при запаздывании в ЦУУ на один период) найдены. При этом параметр  остается пока неизвестным.

Следующий этап рассматриваемой методики синтеза связан с реализацией найденной передаточной функции , т.е. с определением полиномов ,  и  из уравнения ЦУУ (2.3). Эти полиномы удобнее всего определить путем приравнивания  и передаточной функцией системы (2.2), (2.3). В результате, с учетом условий физической реализуемости передаточных функций системой с частично заданной структурой, получаем равенство

. (2.11)

Здесь  – вспомогательный множитель, а  и  - определяемые ниже параметры. Полином

, (2.12)

где  – коэффициент при старшей степени  полинома  из уравнения объекта (2.2).

Вспомогательный множитель  и полином  введены в правую часть (2.11) для выполнения условий физической реализуемости передаточной функции (2.6).

Будем предполагать, что нули  полинома  из уравнения (2.2) удовлетворяют условию

,  (2.13)

т.е. на комплексной плоскости они располагаются внутри окружности единичного радиуса.

Если нули полинома , найденного для заданного объекта управления, не удовлетворяют условию (2.13), то имеется две возможности проведения синтеза. Во-первых, можно изменить конструкцию объекта так, чтобы условие (2.13) оказалось выполненным. Во-вторых, можно выбрать полином  в (2.6) так, чтобы среди его нулей оказались все те нули полинома , которые не удовлетворяют условию (2.13). Разумеется, система с соответствующей передаточной функцией  должна иметь требуемые показатели качества процесса управления.

При выполнении условия (2.13) полиномы ,  и  определяются следующим образом.

Из условия равенства знаменателей в (2.11) вытекает с учетом представления (2.12) полиномиальное уравнение

. (2.14)

В общем случае непрерывная часть может содержать некоторое число чистых интеграторов. Поэтому полином  можно представить следующим образом

, (2.15)

где  – число единичных нулей полинома , т.е. число чистых интеграторов в непрерывном ОУ, a такой полином, что .

С другой стороны, по условию синтеза замкнутая система должна иметь порядок астатизма по задающему воздействию равный . Поэтому в соответствии с уравнением (2.14) при условии, что , полиномы  и  имеют вид

, , (2.16)

где , a,  – вспомогательные полиномы. С учетом (2.16) полиномиальное уравнение (2.14) переходит в следующее:

, (2.17)

где полиномы

, . (2.18)

При решении полиномиальных уравнений типа (2.17) сначала определяются степени и  искомых полиномов , . При этом необходимо учесть следующие ограничения:

– индекс желаемой передаточной функции замкнутой системы должен быть не меньше индекса объекта управления с учетом запаздывания на такт в ЦУУ, т.е.

, (2.19)

где , ;

– степени полиномов  и  должны быть не больше степени полинома , т.е.

, ; (2.20)

– число коэффициентов полиномов ,  должно быть не меньше числа уравнений в алгебраической системе эквивалентной полиномиальному уравнению (2.17) , т.е.

; (2.21)

– степень полинома в левой части (2.17) должна быть равна степени полинома в его правой части, т.е.

. (2.22)

Учет всех ограничений (2.19) – (2.22) при условиях ,  приводит к следующим соотношениям, которые определяют искомые параметры и степени полиномов:

, , (2.23)

, . (2.24)

При этом , а степень ,

Обозначим  – степень полинома , т.е. , a также коэффициенты полиномов

, , (2.25)

 ,  . (2.26)

С учетом введенных обозначений (2.18), (2.25) и (2.26) систему алгебраических уравнений, эквивалентную полиномиальному уравнению (2.17), можно записать следующим образом:

 (2.27)

В результате решения системы (2.27) определяются численные значения коэффициентов  и  полиномов (2.25), а затем по (2.16) находятся полиномы , .

Из условия равенства числителей в (2.11) вытекает соотношение

, (2.28)

которое определяет полином .

Таким образом, приведенные соотношения (2.4) – (2.28) позволяют найти полиномы ,  и  и записать уравнение ЦУУ (2.3) с численными коэффициентами.

Для получения разностного уравнения ЦУУ, описывающего алгоритм вычисления значений управления , умножаем обе части полученного уравнения (2.3) на , а затем переходим к оригиналам. Вытекающее из полученного разностного уравнения выражение, определяющее  как функцию предыдущих значений управления и управляемой переменной, т.е. , , , и является искомым алгоритмом работы ЦУУ.

На этом формальная процедура синтеза САУ с ЦУУ заканчивается.

Однако для завершения процесса синтеза необходимо промоделировать полученную систему и убедиться, что полученный алгоритм работы ЦУУ обеспечивает требуемые показатели качества процесса управления. При этом целесообразно объект управления моделировать по его непрерывной модели в переменных состояния, а ЦУУ по его алгоритму функционирования с учетом квантования по уровню и по времени задающего воздействия и управляемой переменной.

**2.2 Алгоритм автоматизированного синтеза**

**Шаг 1.**На первом шаге вводятся полиномы коэффициентов числителя и знаменателя (ввод производится по запросу из командной строки MATLAB). По условию степень полинома числителя должна быть не больше степени знаменателя. Производится ввод заданных показателей качества, таких как время регулирования и перерегулирование, а так же периода квантования по времени.

**Шаг 2.**На втором шаге формируется модель объекта управления в виде передаточной функции

.

В MATLABэто осуществляется при помощи функции *tf*. Так же здесь проводится проверка заданного объекта на устойчивость.

**Шаг 3.**На третьем этапе работы программы производится переход от непрерывной модели объекта управления к дискретной. Это может происходить двумя способами: либо по уравнениям в переменных состояния, либо по передаточной функции объекта управления (см. формулу 1.19) с использованием таблицы *z*-преобразований.

**Шаг 4.**На данном шаге синтеза в зависимости от порядка системы пользователю предлагается таблица значений коэффициентов желаемой передаточной функции. В ней содержится несколько вариаций коэффициентов, в зависимости от некоторых условий и параметров (например, при кратных корнях характеристического уравнения, при минимальном времени регулирования и т.д.). Нажатием кнопки меню пользователем производится выбор наиболее подходящих коэффициентов. В результате по этим коэффициентам формируется желаемая модель системы.

**Шаг 5.**Переход от непрерывной желаемой передаточной функции системы к дискретной осуществляется таким же образом, как описано в пункте 4. Далее по формуле (2.8) находятся полиномы  и .

**Шаг 6.**По формуле (2.23) вычисляются значения параметров  и . По (2.24) определяются степени полиномов  и , необходимые для составления системы алгебраических уравнений (2.27). Далее следует составление и решение системы (2.27), из которой определяются численные значения коэффициентов  и  полиномов  и .

**Шаг 7.**На седьмом этапе по формулам (2.16) и (2.28) находятся полиномы ,  и . Согласно выражению (2.3) записывается уравнение ЦУУ с численными коэффициентами.

**Шаг 8.**Объединяя уравнение ЦУУ с полученной ранее дискретной моделью объекта, получаем искомую модель системы с цифровым управлением.

**Шаг 9.** На последнем шаге осуществляется моделирование полученной системы, вывод графика переходного процесса на экран. Это позволяет убедиться в том, что полученный алгоритм работы ЦУУ является правильным, т.е. обеспечивает требуемые показатели качества (порядок астатизма, время регулирования, перерегулирование) процесса управления.

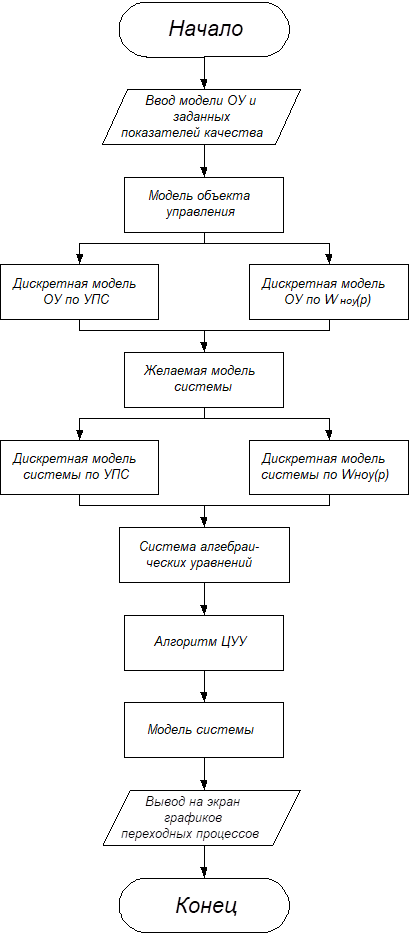


Рисунок 2.1– Алгоритм синтеза системы с ЦУУ

**3. ПРИМЕРЫ СИНТЕЗА**

**3.1.Аналитический синтез дискретной системы управления**

Для большей наглядности предлагаемой в работе процедуры синтеза дискретных систем управления, покажем на примере сначала синтез системы управления вручную, а затем с помощью программы автоматизированного синтеза “ДСУ” в MATLAB. Блок-схема этой программы и ее листинг приведены в приложении.

**Пример 3.1.**Найдем аналитически (вручную) алгоритм функционирования ЦУУ, обеспечивающий астатизм первого порядка по задающему воздействию, время регулирования не более 2,5 с и перерегулирование не более 5 %, в системе управления непрерывным объектом с передаточной функцией

.

При этом период квантования *Т* = 0,8 с.

**Решение**. Подставляя заданные  и *Т* = 0,8 в выражение (2.1) и выполняя *z*-преобразование, получим





.

Подставляя в последнее выражение Т=0,8, получим

.

Следовательно, в рассматриваемом случае полиномы , , а их степени , . При этом по (2.4) , а полином ; по (2.15) , а полином .

Нуль полинома , очевидно равен , т.е. удовлетворяет условию (2.13). Поэтому желаемую передаточную функцию  будем искать в виде (2.6) с произвольным полиномом .

Так как в данном случае , , а , то в соответствии с изложенной выше методикой выбираем из таблицы 1 коэффициенты нормированной передаточной функции астатической системы второго порядка: , ,  и  с. Поэтому по формуле (2.8) при  с и *Т* = 0,8 с находим . Подставляя значения , ,  и , ,  в формулы (2.7) и (2.9), получим



Выполняя *z*-преобразование в соответствии с выражением (2.10), найдем полиномы , , т.е. , .

Здесь целесообразно проверить удовлетворяют ли полученные значения коэффициентов полиномов  и  условию астатизма первого порядка. В нашем случае имеем 0,712 = 0,712 , т.е. указанное условие удовлетворяется. Отметим, что при указанном способе определения полиномов  и , оно может не выполняться лишь из-за ошибок округления. Поэтому при не выполнении условия астатизма, необходимо округлить коэффициенты этих полиномов так, чтобы указанное условие выполнялось.

Переходим к реализации построенной желаемой передаточной функции замкнутой системы. В нашем случае , а , поэтому по формуле  находим , а по формулам (2.18) – (2.26) получаем, , , , , , , , , . Далее no (2.27) записываем систему



Решение этой системы с учетом равенств (2.25) и (2.16) приводит к полиномам

, .

Затем по формуле (2.28) находим

,

подставляя в (2.3) найденные выражения для полиномов, получим разностное уравнение ЦУУ

. (3.1)

Для получения алгоритма ЦУУ умножим обе части последнего уравнения на , раскроем скобки, перейдем к оригиналам и перенесем в правую часть все слагаемые, кроме . В результате получим

. (3.2)

Полученное выражение (3.1) представляет собой алгоритм вычисления значений управляющего воздействия в замкнутой системе управления для заданного объекта. Другими словами, это выражение (3.1) описывает искомый алгоритм функционирования ЦУУ.

Как видно, для вычисления  цифровым устройством управления, которое происходит в течение  такта, необходимы только измеренные в этом же  такте и предыдущие значения воздействия , управляемой переменной , а также два предыдущих значения управляющего воздействия.

Для моделирования замкнутой системы использовалась программа*Simulink.* Схема наборасинтезированной системы в этой программе приведена на рис. 3.1.

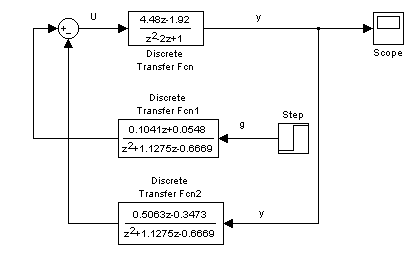


Рисунок 3.1– Схема полученной системы с ЦУУ, построенная в *Simulink*

Запуская схему, приведенную на рис. 3.1, получим график переходного процесса, который показан на рис. 3.2.

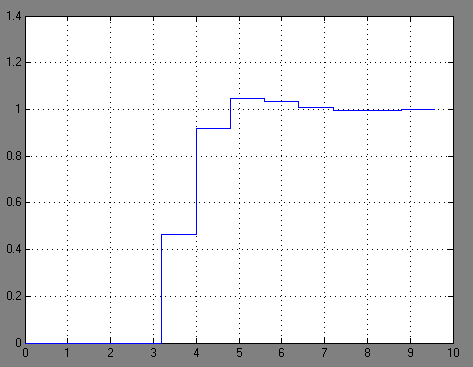


Рисунок 3.2– График переходного процесса, полученный в *Simulink*.

Анализируя полученный график, можно заключить, что поставленная задача выполнена. Т.к. полученное цифровое управление обеспечивает время регулирования примерно 2,4 – 2,5 с и перерегулирование не более 5 %.

**Пример 3.2**. Требуется снова вручную найти алгоритм функционирования ЦУУ, обеспечивающий астатизм первого порядка по задающему воздействию, время регулирования не более 3 с и перерегулирование не более 5 %, в системе управления непрерывным объектом с передаточной функцией

.

При этом период квантования *Т* = 1.2 с.

**Решение.** Подставляя заданные  и*Т* = 1.2 в выражение (2.1) и выполняя *z*-преобразование, получим

.

Следовательно, в рассматриваемом случае полиномы , , а их степени , .

При этом по (2.4) , а полином ; по (2.15) , а полином .

Нуль полинома , очевидно равен , т.е. удовлетворяет условию (2.13). Поэтому желаемую передаточную функцию  будем искать в виде (2.6) с произвольным полиномом .

Так как в данном случае , , а , то в соответствии с изложенной выше методикой выбираем из таблицы 1 коэффициенты нормированной передаточной функции астатической системы второго порядка: , ,  и с. Поэтому по формуле (2.8) при с и *Т*=1.2 с находим . Подставляя значения , ,  и , ,  в формулы (2.7) и (2.9), получим



Выполняя *z*-преобразование в соответствии с выражением (2.10), найдем полиномы , ,

т.е. , .

Здесь целесообразно проверить удовлетворяют ли полученные значения коэффициентов полиномов  и  условию астатизма первого порядка. В нашем случае имеем 0,9796 = 0,9796 , т.е. указанное условие удовлетворяется. Отметим, что при указанном способе определения полиномов  и , оно может не выполняться лишь из-за ошибок округления. Поэтому при не выполнении условия астатизма, необходимо округлить коэффициенты этих полиномов так, чтобы указанное условие выполнялось.

Переходим к расчету полиномов , L(z) и Q(z). В нашем случае , поэтому по формуле  находим , а по формулам (2.18) – (2.26) получаем , , , , , , ,, , .

Далее пo (2.27) записываем систему



Решение этой системы с учетом равенств (2.25) и (2.16) приводит к полиномам

,

.

Затем по формуле (2.28) находим

,

подставляя в (2.3) найденные выражения для полиномов, получим разностное уравнение ЦУУ

. (3.3)

Для получения алгоритма ЦУУ умножим обе части последнего уравнения на , раскроем скобки, перейдем к оригиналам и перенесем в правую часть все слагаемые, кроме . В результате получим

 (3.4)

Полученное выражение представляет собой алгоритм вычисления значений управляющего воздействия в замкнутой системе управления для заданного объекта. Как видно, для вычисления  цифровым устройством управления, которое происходит в течение  такта, необходимы только измеренные в этом же  такте и предыдущие значения воздействия , управляемой переменной , а также два предыдущих значения управляющего воздействия.

Для моделирования будем использовать программу *Simulink.*

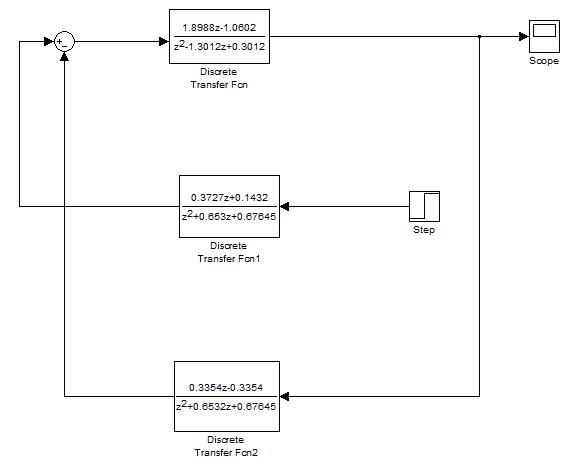


Рисунок 3.3– Схема полученной системы с ЦУУ, построенная в *Simulink*

Запустим схему и получим график переходного процесса, который выглядит следующим образом:

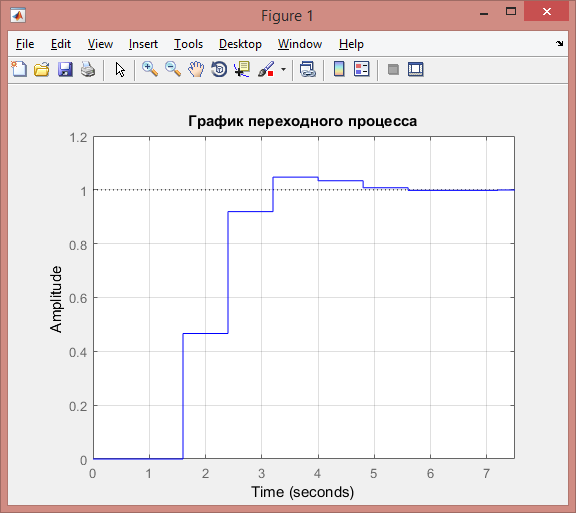


Рисунок 3.4 – График переходного процесса, полученный в *Simulink*

Анализируя полученный график, можно заключить, что поставленная задача выполнена, так как полученное цифровое управление обеспечивает время регулирования примерно 3 с и перерегулирование не более 5 %.

Далее приведем пример синтеза ДСУ более сложным объектом 3-го порядка.

**Пример 3.3**. Требуется найти алгоритм функционирования ЦУУ, обеспечивающий астатизм первого порядка по задающему воздействию, время регулирования не более 1 с и перерегулирование не более 10 %, в системе управления непрерывным объектом с передаточной функцией

При этом период квантования *Т* = 0.1 с.

**Решение.** Подставляя заданные  и *Т* = 0.1 в выражение (2.1) и выполняя *z*-преобразование, получим

Следовательно, в рассматриваемом случае полиномы

, а их степени ,.

В данном случае ,, а , то в соответствии с изложенной выше методикой выбираем из таблицы 1 коэффициенты нормированной передаточной функции астатической системы второго порядка: и . Поэтому по формуле (2.8) приc и *Т*=0.1 с находим. Подставляя значения, ,  и в формулы (2.7) и (2.9), получим

Выполняя *z*-преобразование в соответствии с выражением (2.10), найдем полиномы , т.е., .

Здесь целесообразно проверить удовлетворяют ли полученные значения коэффициентов полиномов  и  условию астатизма первого порядка. В нашем случае имеем 0,0704 = 0,0704, т.е. указанное условие удовлетворяется. Отметим, что при указанном способе определения полиномов  и , оно может не выполняться лишь из-за ошибок округления. Поэтому при не выполнении условия астатизма, необходимо округлить коэффициенты этих полиномов так, чтобы указанное условие выполнялось.

Переходим к расчету полиномов , L(z) и Q(z). В нашем случае , поэтому по формуле  находим , а по формулам (2.18) – (2.26) получаем , , , , , , , ,

,

.

Далее пo (2.27) записываем систему

Решение этой системы с учетом равенств (2.25) и (2.16) приводит к полиномам

Затем по формуле (2.28) находим

подставляя в (2.3) найденные выражения для полиномов, получим разностное уравнение ЦУУ

(3.5)

Для получения алгоритма ЦУУ умножим обе части последнего уравнения на, раскроем скобки, перейдем к оригиналам и перенесем в правую часть все слагаемые, кроме .

В результате получим разностное уравнение ЦУУ:

(3.6)

Полученное выражение представляет собой алгоритм вычисления значений управляющего воздействия в замкнутой системе управления для заданного объекта. Как видно, для вычисления  цифровым устройством управления, которое происходит в течение  такта, необходимы только измеренные в этом же  такте и предыдущие значения воздействия , управляемой переменной , а также два предыдущих значения управляющего воздействия.

В результате моделирования замкнутой системы, получается переходная функция системы, показанная на рис 3.5



Рисунок 3.5 – Переходной процесс цифровой системы

Для сравнения приведем также ряд примеров синтеза ДСУ с применением разработанной программы.

**3.2. Порядок синтеза ДСУ в пакете MATLAB**

На основе приведенного выше алгоритма синтеза ДСУ в данной работе построена программа автоматизированного синтеза ДСУ, реализованная в пакете MATLAB. Порядок синтеза с помощью этой программы состоит в следующем.

1.Поместить файл“ДСУ” с разработанной программой на рабочий компьютер с программойMatlab.

|  |
| --- |
| 2. Запустить программу Matlab |
|  |

|  |
| --- |
| 3. Создаем новый скрипт в среде Matlab |
|  |

Здесь и в дальнейшем окружностью красного цвета показаны кнопки которые необходимо “кликнуть” для ввода соответствующей команды.

|  |
| --- |
| 4. Открываем скрипт программы и указываем путь к файлу“ДСУ” |
|  |
| 5. Выбираем файл “ДСУ”программы проектирования |
|  |

|  |
| --- |
| 6. После выбора файла на экране монитора появится скрипт программы.Скрипт необходимо запустить. |
|  |

|  |
| --- |
| 7. Ввод данных для расчета цифрового устройства управления. |
|  |
| Этот пункт алгоритма выполняется в следующей последовательности:   * Вводится степень знаменателя- n * Вводятся коэффициенты полинома знаменателя   c 1-го по (n+1)-й(А1,А2,…Аn)   * Вводится степень числителя- m * Вводятся коэффициенты полинома числителя c 1-го по (m+1)-й(В1,В2,…Вm) * Вводится желаемое время регулирования- tp * Вводитсяжелаемый период квантования -Т * Вводитсязаданный порядок астатизма к задающему воздействию -vg |
| 8. После ввода всех необходимых данных нажимаем клавишу Enter. Происходит автоматический расчёт перехода от НОУ к дискретной модели и определяется степень знаменателя желаемой передаточной функции непрерывной системы. По окончании расчета на экране монитора появляются предлагаемые программной коэффициенты знаменателя подходящих нормированных передаточных функций. Оператор выбирает наилучшие, по его мнению, коэффициенты, путем нажимания кнопки, соответствующей номеру выбранной строки с коэффициентами знаменателя. |
|  |

|  |
| --- |
| 9.После выбора необходимых коэффициентов происходит автоматический расчет желаемой передаточной функции дискретной системы, а затем решение системы алгебраических уравнений, которые определяют численные коэффициенты 3-х уравнений ЦУУ. |
|  |
| 10. Три типа рассчитанных в зависимости от вида измеряемых переменных уравнений ЦУУвыводится на экран монитора, как показано влевой части следующего рисунка: |
|  |
| 11. Далее программа автоматически выводит приведенную ниже переходную функцию синтезированной ДСУ. |
|  |

**3.3. Пример автоматизированного синтезаДСУ**

Для большей наглядности работы разработанной программы приведем математические соотношения, которые выполняются программой в процессе автоматизированного синтеза с применением программы “ДСУ’ длятех же3-х объектов, что и выше.

**Автоматизированный синтез ДСУ для объекта из примера 3.1.**:

1. Вводится обращение к программе

2.Вводится передаточная функция непрерывного объекта управления:

а) Вводится степень знаменателя *n*=2

б) Вводятсякоэффициенты полинома знаменателя c 1-го по (*n*+1)-й

А(1)= 1

А(2)= 0

А(3)= 0

в) Вводится степень числителя *m*=1

г) Вводятся коэффициенты полинома числителя c 1-го по (*m*+1)-й

B(1)= 4

B(2) = 4

После ввода этих данных на экране монитора, как было показано выше, появляется функции:

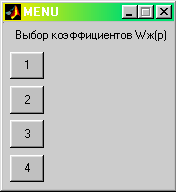
Ttransfer function:

Ttransfer function:

В результате определения желаемой передаточной функции непрерывной системы MATLAB выводит на экран монитора ее вид:

Кроме того, выводятся строки с коэффициентами знаменателей подходящих стандартных нормированных передаточных функций:

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер строки | Коэффициенты | | | Перерегулирование sigma% | Время регулирования | Примечание |
|  |  |  |
| 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 4,75 | Кратные корни |
| 2 | 1 | 1,38 | 1 | 5 | 2,86 | Минимальное время регулирования |
| 3 | 1 | 1,41 | 1 | 8 | 2,92 | Распределение Баттерворса |
| 4 | 1 | 1,82 | 1 | 0,1 | 4,82 | Особо малое перегулирование, delta=2% |



Оператор нажимает1 - если наиболее подходящие коэффициенты содержатся в 1-ой строке

2 - eсли во 2-ой строке

3 - eсли в 3-ей строке

4 - eсли в 4-ой строке ,

После этого программа выводит на экран монитора желаемую передаточную функцию непрерывной системы и её Z-преобразование:

Ttransfer function:

Одновременно программа выводит на экран монитора уравнение ЦУУ с численными коэффициентами, которое в данном случае имеет вид

(1\*z^3+1.1275\*^2-0.66687\*z^1)\*u=

=(0.104102\*z^2+0.054837\*z^1)\*g-(0.5063\*z^2-0.34733\*z^2)\*y.

На основе этого выражения оператор вручную записывает соответствующий алгоритм работы ЦУУ, как показано выше. Смотри переход от выражение (3.1) к выражению (3.2). Далее программа автоматически формирует уравнение замкнутой дискретной системы и осуществляет его моделирование в MATLAB. Результатом этого моделирования является график переходной функции, которой в данном случае имеет вид приведенной на рис. 3.6. Сравнивая графики полученный вручную (рис. 3.2.) с графиком, выданным программой (рис. 3.6) легко заключить, что они имеет аналогичный вид. Аналогичный же вид имеют и алгоритмы работы ЦУУ, полученные вручную и с помощью программы “ДСУ”.

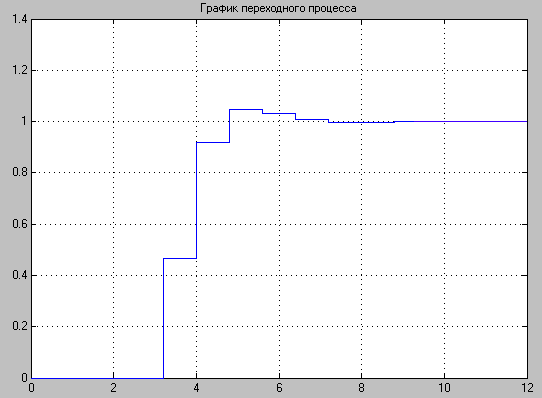


Рисунок 3.6 – График переходного процесса

**Автоматизированный синтез ДСУ для объекта из примера 3.2.**

1. Вводится обращение к программе

2.Ввод передаточной функции непрерывного объекта управления

а) Вводится степень знаменателя *n*=2

б) Вводятся коэффициенты полинома знаменателя c 1-го по (*n*+1)-й

А(1)= 1

А(2)= 0

А(3)= 0

в) Вводится степень числителя *m*=1

г) Вводятся коэффициенты полинома числителя c 1-го по (*m*+1)-й

B(1)= 2

B(2)= 1

После ввода этих данных на экране монитора, как было показано выше, появляется функции:

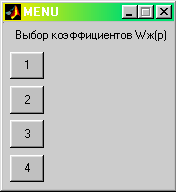
Ttransfer function:

Ttransfer function:

В результате определения желаемой передаточной функции непрерывной системы MATLAB выводит на экран монитора ее вид:

Кроме того, выводятся строки с коэффициентами знаменателей подходящих стандартных нормированных передаточных функций

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер строки | Коэффициенты | | | Перерегулирование sigma% | Время регулирования | Примечание |
|  |  |  |
| 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 4,75 | Кратные корни |
| 2 | 1 | 1,38 | 1 | 5 | 2,86 | Минимальное время регулирования |
| 3 | 1 | 1,41 | 1 | 8 | 2,92 | Распределение Баттерворса |
| 4 | 1 | 1,82 | 1 | 0,1 | 4,82 | Особо малое перегулирование, delta=2% |



Оператор нажимает1 - если наиболее подходящие коэффициенты содержатся в 1-ой строке

2 - eсли во 2-ой строке

3 - eсли в 3-ей строке

4 - eсли в 4-ой строке ,

После этого программа выводит на экран монитора желаемую передаточную функцию непрерывной системы и её Z-преобразование:

Ttransfer function:

Ttransfer function:

Одновременно программа выводит на экран монитора уравнение ЦУУ с численными коэффициентами имеет вид:

1. Если измеряются g и y, то уравнение ЦУУ выглядит следующим образом:

S1 = '(1+0.64109\*z^(-1)-0.66974\*z^(-2))\*u(z) = (0.3676\*z^(-1)+0.14339\*z^(-2))\*g(z) - (0.70125\*z^(-1)-0.19026\*z^(-2))\*y(z)'

2. Если измеряются eps и y:

S2 = '(1+0.64109\*z^(-1)-0.66974\*z^(-2))\*u(z) = (0.3676\*z^(-1)+0.14339\*z^(-2))\*eps(z) - (0.33365\*z^(-1)-0.33365\*z^(-2))\*y(z)'

3. Если измеряются eps и g:

S3 = '(1+0.64109\*z^(-1)-0.66974\*z^(-2))\*u(z) = (0.70125\*z^(-1)-0.19026\*z^(-2))\*eps(z) - (0.33365\*z^(-1)-0.33365\*z^(-2))\*g(z)'

На основе этого выражения оператор вручную записывает соответствующий алгоритм работы ЦУУ, как показано выше. Смотри переход от выражение (3.3) к выражению (3.4). Далее программа автоматически формирует уравнение замкнутой дискретной системы и осуществляет его моделирование в MATLAB. Результатом этого моделирования является график переходной функции, которой в данном случае имеет вид приведенной на рис. 3.7. Сравнивая графики полученный вручную (рис. 3,4.) с графиком, выданным программой (рис. 3.7.) легко заключить, что они имеет аналогичный вид. Аналогичный же вид имеют и алгоритмы работы ЦУУ, полученные вручную и с помощью программы “ДСУ”.

График переходного процесса имеет аналогичный вид, и это естественно, т.к. совпали уравнения ЦУУ в первом и во втором случае.

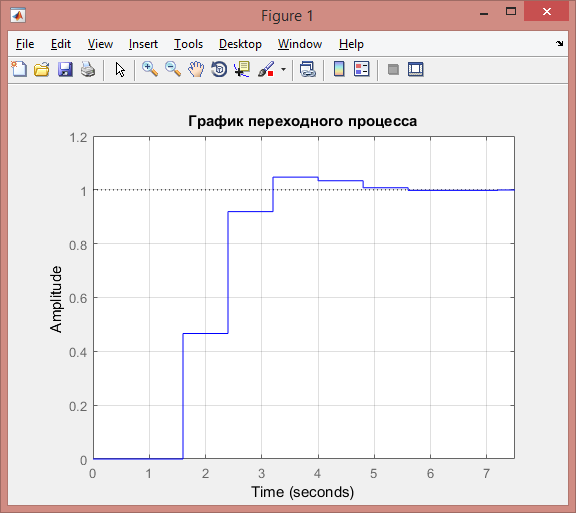


Рисунок 3.7 –Автоматизированный синтез ДСУ для объекта изпримера 3.3.:

1. Вводится обращение к программе

2.Ввод передаточной функции непрерывного объекта управления

а) Вводится степень знаменателя *n*=3

б) Вводятсякоэффициенты полинома знаменателя c 1-го по (*n*+1)-й

A(1)=0.04

A(2)=0.58

A(3)=0

A(4)=1

в) Вводится степень числителя m=1

г) Вводятсякоэффициенты полинома числителя

B(1)=10

B(2)=50

После ввода этих данных на экране монитора, как было показано выше, появляется функции.

Ttransfer function:

Continuous-time transfer function.

В результате определения желаемой передаточной функции непрерывной системы MATLAB выводит на экран монитора ее вид:

Кроме того, выводятся строки с коэффициентами знаменателей подходящих стандартных нормированных передаточных функций:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер строки | Коэффициенты | | | | Перерегулирование sigma% | Время регулирования | Примечание |
|  |  |  |  |
| 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | нет | 6,31 | Кратные корни |
| 2 | 1 | 2,39 | 2,05 | 1 | нет | 4,34 | Минимальное время регулирования |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 8 | 5,89 | Распределение Баттерворса |
| 4 | 1 | 2,20 | 1,90 | 1 | 1,65 | 4,04 | Особо малое перегулирование, delta=2% |

Оператор нажимает1 - если наиболее подходящие коэффициенты содержатся в 1-ой строке

2 - eсли во 2-ой строке

3 - eсли в 3-ей строке

4 - eсли в 4-ой строке ,

После этого программа выводит на экран монитора желаемую передаточную функцию непрерывной системы и её Z-преобразование:

Continuous-time transfer function.

Одновременно программа выводит на экран монитора уравнение ЦУУ с численными коэффициентами, которое в данном случае имеет вид

1. Если измеряются g и y, то уравнение ЦУУ выглядит следующим образом:

S1 =

'(1+0.36438\*z^(-1)-1.6491\*z^(-2)-0.26779\*z^(-3)+0.55251\*z^(-4))\*u(z) = (0.015005\*z^(-1)+0.046416\*z^(-2)+0.0091468\*z^(-3))\*g(z)-(1.7707\*z^(-1)-3.3395\*z^(-2)+1.939\*z^(-3)-0.29957\*z^(-4))\*y(z)'

2. Если измеряются eps и y:

S2 =

'(1+0.36438\*z^(-1)-1.6491\*z^(-2)-0.26779\*z^(-3)+0.55251\*z^(-4))\*u(z) = (0.015005\*z^(-1)+0.046416\*z^(-2)+0.0091468\*z^(-3))\*eps(z) - (1.7557\*z^(-1)-3.386\*z^(-2)+1.9298\*z^(-3)-0.29957\*z^(-4))\*y(z)'

3. Если измеряются eps и g:

S3 =

'(1+0.36438\*z^(-1)-1.6491\*z^(-2)-0.26779\*z^(-3)+0.55251\*z^(-4))\*u(z) = (1.7707\*z^(-1)-3.3395\*z^(-2)+1.939\*z^(-3)-0.29957\*z^(-4))\*eps(z) - (1.7557\*z^(-1)-3.386\*z^(-2)+1.9298\*z^(-3)-0.29957\*z^(-4))\*g(z)'

На основе этого выражения оператор вручную записывает соответствующий алгоритм работы ЦУУ, как показано выше. Смотри переход от выражение (3.5) к выражению (3.6). Далее программа автоматически формирует уравнение замкнутой дискретной системы и осуществляет его моделирование в MATLAB. Результатом этого моделирования является график переходной функции, которой в данном случае имеет вид приведенной на рис. 3.8. Сравнивая графики полученный вручную (3.5) с графиком, выданным программой (рис. 3.8) легко заключить, что они имеет аналогичный вид. Аналогичный же вид имеют и алгоритмы работы ЦУУ, полученные вручную и с помощью программы “ДСУ”.



Рисунок 3.4 – График переходного процесса

Из вышесказанного можно сделать вывод, что цель проекта выполнена. Разработанная система автоматизированного проектирования позволяет синтезировать системы управления с заранее заданными показателями качества.

**4. БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**4.1. Системный анализ на случай отказа работы компьютера**

Для повышения надёжности (безотказности) работы компьютера необходимо эффективным образом проанализировать возможные аварийные ситуации и причины их вызывающие.

В качестве метода анализа возможных источников опасности выберем системный анализ. Его цель – выявить причины, влияющие на появление нежелательных событий и разработать мероприятия, уменьшающие вероятность их появления.

Причины возникновения нежелательного события можно определить и как совокупность условий, отсутствие которых исключает это событие. Все причины образуют иерархическую структуру, при которой одна причина подчинена другой, переходит в другую или в несколько других причин. Графическое изображение таких зависимостей напоминает ветвящееся дерево, поэтому используется термин «дерево причин».

В качестве головного события в дереве причин отказа, изображенном на рис4.1, будем считать отказ устройства.

Причиной может служить: отказ электрической схемы, который в свою очередь может произойти вследствие дефектного разъёма для стыковки с ЭВМ или выхода из строя интерфейсной микросхемы. Интерфейс может не работать, если не работает микросхема USB или микропроцессор. Микропроцессор в свою очередь не будет работать, если не работает кварцевый резонатор или при не правильной работе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). К нарушениям работы ПЛИС относятся: некачественная пайка или производственный дефект при изготовлении микросхемы.

Также причиной отказа устройства может служить остановка устройства. Данное событие происходит по вине оператора, если он запустил не ту что надо программу загрузки или не сбросил устройство кнопкой «сброс» после очередного цикла записи.

При отсутствии питающего напряжения или несоответствии их нормам также нельзя будет добиться работоспособности устройства, которое может быть вызвано неисправностью блока питания или при обрыве внутренних преобразователей напряжения.

Результаты анализа возможных причин отказа разрабатываемого устройства представлены на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Дерево отказов

**4.2 Анализ опасных и вредных факторов**

# Синтез цифрового устройства управления осуществляется программно с помощью компьютера.

Использование компьютера должно сопровождаться соблюдением определённых мер безопасности. В противном случае это может привести к заметному ухудшению самочувствия пользователя, а при постоянной работе даже к возникновению серьёзных заболеваний. Таких как ухудшение зрения, быстрая утомляемость, аллергические реакции на электромагнитное и другие виды излучений.

В список опасных факторов, неблаготворно влияющих на человека при работе с компьютером, можно включить следующие:

– воздействие различных полей и излучений;

– ортопедический фактор – нарушение нормального функционирования опорно-двигательного аппарата пользователя;

– воздействие на зрительный анализатор (быстрая утомляемость глаз);

* шумовые воздействия;
* психологические расстройства;
* возможность поражения электрическим током.

Рассмотрим более подробно каждый из этих факторов.

**Излучение работающего монитора** является негативным фактором работы компьютера, влияющим на пользователя и окружающую среду. Излучение делят на три группы:

* рентгеновское излучение;
* электростатические поля;
* электромагнитные поля.

Воздействие рентгеновского излучения незначительно и мощность дозы воздействия значительно уменьшается пропорционально квадрату расстояния от экрана.

Электростатическое излучение, попадая на кожу человека, может вызвать аллергическую реакцию (в виде сыпи) а также повреждение глаз. Данного воздействия можно практически полностью избежать, установив на монитор специальный антистатический фильтр.

Воздействия электромагнитных полей являются наиболее опасными. По­льзователь, работающий за компьютером, подвергается облучению эле­кт­ромагнитными полями нескольких диапазонов:

* низкочастотное излучение – 50-60 Гц (трансформаторы блоков питания, электропроводка, кадровая частота дисплеев);
* частоты от 16 кГц до 4 МГц (вызваны работой электронно-лучевых трубок дисплеев);
* высокие частоты – от 100 до 1000 МГц (тактовые частоты процессоров).

Исследования Российских ученых показали, что систематическое воздействие электромагнитных полей постоянной частоты и малой интенсивности на организм человека приводит к десинхронизации работы подсистем организма и возникновению стресса. При продолжении постоянного облучения организм переходит в состояние истощения, которое характеризуется снижением активности щитовидной железы и половых желез, угнетением лимфатической и иммунной системы, а также системы соединительной ткани.

**Ортопедический фактор**. Отрицательное воздействие этого фактора проявляется в нарушении нормального функционирования опорно-двигательного аппарата человека-оператора.

Работая с компьютером, пользователь может часами находиться в фиксированных позах. Это обстоятельство, в той или иной форме, может стать причиной развития такого заболевания, как синдром длительных статических нагрузок (СДСН), возникающего вследствие ухудшения кровообращения в мышцах.

Одной из форм СДСН является запястный синдром, который может появиться при длительной работе с клавиатурой. В результате возникают болевые ощущения при движении кисти и пальцев. СДСН также может возникнуть из-за длительного нахождения человека в сидячем положении. В этом случае возникает перенапряжение мышц спины и ног. Это проявляется в виде болезненных ощущений в нижней части спины. У пользователя, которому приходится долго работать с мышью, может возникнуть СДСН, поражающий плечо и руку. При неправильном расположении дисплея могут страдать мышцы шеи и спины.

**Воздействия на зрительный анализатор**проявляются в виде быстрой утомляемости глаз (астенопии), так как работа оператора, в течение всего рабочего дня, связана с ПЭВМ. Кроме этого возможно нарушение фокусировки зрения.

**Шум** является одним из наиболее распространенных вредных факторов. Действие шума не ограничивается воздействием только на органы слуха. Люди, работающие в условиях повышенного шума, жалуются на быструю утомляемость, головную боль, бессонницу. Ослабляется внимание, страдает память, а, следовательно, снижается производительность труда, растет количество ошибок в работе программистов и операторов.

Источниками шума в помещении с ПЭВМ являются вентиляторы в блоке питания компьютера, принтеры и высокоскоростные устройства чтения компакт-дисков. Также шум может быть внешним. Уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБА.

**Психологические расстройства**в данном случае могут быть обусловлены монотонностью труда. К факторам, способствующим развитию монотонии, относятся: постоянный фоновый шум и вибрация, недостаточное освещение, некомфортный микроклимат, непрерывная концентрация внимания в условиях малого объёма профессионально значимой информации.

Установлено, что монотонный труд вызывает, прежде всего, изменения функционального состояния ЦНС. Степень влияния монотонных трудовых процессов на психофизиологическое состояние оператора во многом определяется его индивидуальными особенностями и зависит от типа нервной системы, темперамента, свойств личности и др.

Другой потенциально возможной опасностью для жизни человека при работе в лаборатории является **поражение электрическим током**.

В лаборатории все токоведущие части электрооборудования изолированы. Расположение светильников исключает к ним доступ без специальных приспособлений. Система защиты электрооборудования – контурное заземление. При работе за дисплеем, оператор не подвергается непосредственно опасности поражения электрическим током. Поэтому лабораторию можно считать помещением без повышенной опасности поражения электротоком.

**4.3. Мероприятия по обеспечению оптимальных условий труда оператора**

На основе анализа условий труда человека-оператора, рекомендуется провести следующие мероприятия по улучшению условий труда.

Для поддержания норм микроклимата рекомендуется применять:

* увлажнители воздуха;
* кондиционирование;
* системы отопления.

Предотвратить появление СДСН может правильная организация рабочего места. Кроме того, если рабочее место организовано неправильно, то у оператора, кроме СДСН, может развиться сутулость или искривление позвоночника. Итак, рабочее место должно соответствовать следующим требованиям:

* высота рабочей поверхности стола должна регулироваться в пределах 680-800 мм;
* рабочее кресло должен быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья. Конструкция его должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с закругленным передним краем; регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400-550 мм и углам наклона вперед до  и назад до ; стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм, шириной 50-70 мм.
* клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

Для профилактики заболевания глаз при работе с дисплеями следует придерживаться следующих рекомендаций:

* дисплей не должен быть повернут экраном в сторону окна. В случае его расположения возле окна, необходимо расположить его перпендикулярно стеклу, для предотвращения бликов на экране (на РМ окно располагается позади дисплея);
* свет от осветительных ламп не должен падать на дисплей с углом более  от вертикали;
* освещенность рабочего места необходимо поддерживать в пределах двух третьих от нормальной освещенности;
* при освещении рабочего места неприемлемо использование мигающих источников света, например люминесцентных ламп;
* интерьер, на фоне которого установлен дисплей, должен быть неярким, не бросающимся в глаза. Блестящие предметы необходимо из него исключить, заменив их, по возможности, на матовые. Освещенность интерьера должна быть примерно такая же, как и у дисплея. Соотношение яркости экрана и окружения не должно превышать 3:1;
* при работе желательно использовать специальные противобликовые фильтры.

Для уменьшения уровня внешнего и внутреннего шума рекомендуется:

* использовать, для отделки помещения, звукопоглощающий материал с максимальным коэффициентом звукопоглощения в области частот 63-8000 Гц;
* размещать сильно шумящие устройства вне помещения с ПЭВМ.

Рекомендуемые меры по снижению воздействия электромагнитных полей и излучений:

* экран дисплея должен находиться не ближе 76 см от лица человека;
* рекомендуется устанавливать на экран монитора специальные фильтры; фильтр всегда должен быть заземлен, то есть, снабжен проводом, присоединённым к экрану;
* при перерывах в работе с компьютером, если нет надобности его выключать, необходимо выключить дисплей.

Деятельность оператора является эмоционально напряженной, интеллектуальной. Значимость работы, ответственность могут привести к нервному перенапряжению. Поэтому необходимо предусмотреть меры психологической релаксации.

Для обеспечения оптимальной работоспособности и сохранения здоровья пользователя ЭВМ на протяжении рабочей смены должны быть установлены регламентированные перерывы в зависимости от продолжительности рабочей смены.

В целях профилактики зрительного утомления и перенапряжения необходимо применять выполнение специальных упражнений для глаз, соблюдать рекомендации по организации активного отдыха.

**4.4. Обеспечение пожарной безопасности**

Причинами возникновения пожаров в лаборатории, где используются компьютеры и электрооборудование, может стать, например, перегрузка электрической сети, нарушение правил эксплуатации электроприборов, курение в лаборатории и т.д. Наиболее опасной из них является короткое замыкание.

При коротком замыкании в местах соединений проводов сопротивление практически равно нулю, в результате чего ток, проходящий по поверхности и токоведущим частям аппаратов и машин, достигает больших значений. Токи короткого замыкания на несколько порядков превышают номинальные токи проводников, токоведущих частей и достигают сотен и тысяч ампер. Такие токи могут не только перегреть, но и воспламенить изоляцию, расплавить токоведущие части и провода. Плавление металлических деталей машин и аппаратов сопровождается обильным разметом искр, которые в свою очередь способны воспламенить близкорасположенные горючие материалы и вещества, послужив тем самым причиной пожара.

В связи с этим в лабораториях следует применять только защищенные электропроводки. Допускается и открытая проводка изолированных проводов, но при условии невозможности механического повреждения. Соединительные и осветительные коробки должны быть пыленепроницаемыми.

Необходимо также предусмотреть выключатели для отключения питания всех приборов в лаборатории.

Вентиляция рабочего места позволяет уменьшить концентрацию в воздухе легковоспламеняющихся веществ.

Курение допускается только в специально отведенных местах или комнатах обозначенных соответствующими надписями и обеспеченных урнами с водой.

В лабораториях должны быть предусмотрены средства для тушения пожаров (например, огнетушитель ОХП-10) и средства связи для быстрого вызова пожарной части в случае возникновения пожара.

Также тушения пожаров можно использовать воду, водяной пар или специальные химические средства. Вода является наиболее дешевым и распространенным средством огнетушения. Однако воду нельзя применять для тушения электроустановок, находящихся под напряжением, во избежание поражения электрическим током через струю воды.

Тушение пожара целесообразно осуществлять с помощью воздушно-механической пены, образуемой в результате интенсивного механического перемешивания водного раствора пенообразователей (ПО-1 и ПО-6) с воздухом, которое осуществляется в специальном пеногенераторе (ГВП-600 и ГВХП-200).

Из химических средств огнетушения широкое применение получила углекислота (). Углекислота применяется для тушения пожаров в закрытых помещениях и может быть использована в электроустановках, находящихся под напряжением вследствие низкой ее электропроводности. Ручные углекислотные огнетушители типов ОУ-5 и ОУ-8 предназначены для тушения небольших очагов всех видов загорания.

Итак, в случае возникновения пожара в лаборатории следует немедленно выключить электропитаниелаборатории рубильником и воспользоваться огнетушителем. В случае большого очага возгорания необходимо вызвать пожарную службу.

**4.5. Защита окружающей среды**

В нашей стране в условиях научно-технического прогресса охрана окружающей среды стала одной из самых острых и актуальных проблем. Еще более усложнилась обстановка в этой области за последние десять лет, когда значительный рост выпуска изделий электронной промышленности повлек за собой совершенствование технологии изготовления на базе новых достижений физико-технических процессов. Это привело к резкому увеличению количества токсичных и химических веществ, вредных выбросов, загрязняющих среду рабочих мест, воздушное пространство и территории предприятий.

Практическая реализация конкретных мер по охране окружающей среды определяется инженерно-техническими мероприятиями и решениями, которые принимаются на основе использования достижений науки, возможностей технологии.

При производстве системы, наиболее вредными процессами являются:

* обработка фольгированного стеклотекстолита и металлов;
* изготовление печатных плат (фотолитография, травление);
* покрытие лаком печатных плат;
* монтаж электрических соединений блока методом пайки.

Большинство материалов, применяемых при изготовлении печатных плат, являются опасными для здоровья и жизни человека и окружающей среды. Кроме того, на определенном этапе изготовления печатной платы образуются и попадают в атмосферу вещества первого класса опасности. Так хлорированные углеводы при действии на них солнечного света, превращаются в газ фосген - очень вредное вещество. Процессы обезжиривания, травления, электрохимической обработки и химического фрезерования сопровождаются выделением паров щелочей. При цианистом меднении и серебрении образуетсяцианистый водород (чувствуется запах миндаля) - сверхтоксичное вещество. А при реагенной очистке отработанных вод от соединений циана может образоваться хлорциан - вещество, так же относящееся к высшей группе опасности.

В настоящее время, почти все электромонтажные соединения радио­электронной аппаратуры осуществляются пайкой. Технологический процесс пайки включает в себя формовку выводов, удаление изоляции, лужение. При монтаже устройства, в результате формовки выводов радиодеталей, удаления изоляции, всегда остаются твердые отходы, которые, во избежание загрязнения природной среды, необходимо удалять в централизованном порядке.

Для нейтрализации вредных выделений необходимо в производственных помещениях применять вентиляцию, а чтобы вредные вещества не попадали в атмосферу, на вентиляцию следует устанавливать сухие пылеуловители типа конических циклонов СК-ЦИ-33, СК-ЦИ-34М и фильтры типа "Фильтр 550", улавливающего пыль мокрым способом.

При настройке и наладке проектируемой системы могут возникнуть паразитные излучения СВЧ диапазона. Для предотвращения данных ситуаций необходимо использовать экранирующие перегородки. Правильное применение экранирования аппаратуры СВЧдиапазона является гарантией безопасности человека.

В процессе проектирования и окончания службы устройства образуется большое количество отходов, из-за которых при нерациональном использовании можно повредить экосистему окружающей среды. При соответствующей обработке образовавшиеся отходы могут быть вновь использованы как сырье для производства промышленной продукции. В будущем большая доля потребностей в сырье будет восполняться продуктами переработки отходов промышленного производства.

Для полного использования отходов в качестве вторичного сырья разработана их промышленная классификация, которая подразделяет, например, лом и отходы металлов по физическим признакам на классы, по химическому составу - на группы и марки, по показателям качества - на сорта (ГОСТ 1639-71).

Переработку целесообразно проводить в местах образования отходов, что сокращает затраты на погрузочно-разгрузочные работы, снижает безвозвратные потери при их перевалке и транспортировке и высвобождает транспортные средства.

Основные операции первичной обработки отходов - сортировка, разделка и механическая обработка. Сортировка заключается в разделении лома и отходов по видам металлов. Разделка лома состоит в удалении неметаллических деталей. Механическая обработка включает рубку, резку, пакетирование и брикетирование на прессах.

В результате вышеперечисленных действий при производстве разрабатываемого устройства, нанесение ущерба природе и человеку будет снижено.

**5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

**5.1. Маркетинговое исследование рыночных перспектив разработки**

**Исследование спроса.**Прежде, чем производить продукт, необходимо знать, нужен ли он вообще, т.е. знать потребность в нём. Далее потребность находит своё отражение в спросе. Если нет спроса, то не следует ориентировать произведённый продукт на этот рынок, а исследовать другие, где он может быть.

Удовлетворить запросы потребителей – непростая задача. Прежде всего, нужно хорошо изучить потребителя, т.е. ответить на вопросы: кто покупает, по какой цене, какое количество, с какой целью, для удовлетворения каких потребностей, где покупает. Для этого проводят маркетинговые исследования.

Исследование программного рынка, представленного в сети Интернет показало, что программы, позволяющие синтезировать астатические системы с ЦУУ, отсутствуют, поэтому данная разработка представляет коммерческий интерес. Она представляет ценный продукт с точки зрения производителей вычислительной техники и микроконтроллеров, так как может быть включена в их стандартное программное обеспечение.

**Оценка конкурентоспособности***.* Успех в конкурентной борьбе в большей степени определяется тем, насколько удачно выбран тип конкурентного поведения организации и насколько умело он реализуется на практике.

Конкурентоспособность изделия – это его способность противостоять на рынке изделиям, выполняющим аналогичные функции. При этом конкуренцию составляют не только изделия той же технологически конструктивной группы, но и любой товар, выполняющий аналогичные функции. Конкурентоспособность определяется многими факторами. Одни факторы определяют характеристики самого продукта, другие зависят от темпов технического развития товарной группы, к которой относится изделие, третьи – от рыночной конъюнктуры.

Данный продукт является конкурентоспособным, поскольку, как отмечалось выше, аналогичные продукты на рынке отсутствуют.

Его конкурентоспособность определяется совокупностью тех показателей качества системы управления, которые он позволяет обеспечить.

**Подход к ценообразованию***.* Цена остаётся важным показателем, несмотря на повышение роли неценовых факторов. Цена, если она правильно определена, окажет решающее воздействие на процесс покупки товара. Определим стратегию ценообразования, как ценообразование по нацеленной прибыли (производящая фирма ставит цель по прибыли, которую она собирается достичь, и цены устанавливает с учётом достижения этой цели), а так же из технических показателей.

**5.2. Выбор и обоснование базы сравнения**

Базой сравнения может быть любое устройство, работающее аналогично представленному. Пусть база сравнения – цифровое устройство управления, построенное на аналоговых элементах, а не на микроконтроллере.

Проведем сравнение разработанной системы управления и системы, являющейся базой сравнения:

* точность: у разработанной системы точность значительно выше;
* интерфейс: разработанная система предусматривает более удобный для учёта и контроля интерфейс;
* надежность: более высокая, чем у базы сравнения;
* технологичность: выше у разработанной системы, т.к. производство цифровых элементов, в частности микроконтроллеров, является стандартным.

Составим таблицу критериев качества и найдем относительный и интегральный показатели качества методом экспертных оценок (таблица 4.1).

Таблица 5.1– Таблица критериев качества

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Критерий качества | Вес  критерия,  *q* | Новая разработка | | База сравнения | |
| Качество, *k* | Взвешенная  оценка, *qk* | Качество, *k* | Взвешенная  оценка, *qk* |
| Точность | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,6 | 0,3 |
| Надежность | 0,13 | 1 | 0,13 | 1 | 0,13 |
| Технологичность | 0,2 | 1 | 0,2 | 0,6 | 0,12 |
| Количество регул.  параметров | 0,08 | 1 | 0,08 | 0,9 | 0,072 |
| Экономичность | 0,05 | 1 | 0,05 | 0,6 | 0,03 |
| Наименьший вес | 0,04 | 1 | 0,04 | 0,7 | 0,028 |
| Суммарная оценка |  |  | 1 |  | 0,68 |

Таким образом, исходя из приведённой таблицы, можно рассчитать следующие параметры:

1. Интегральный показатель качества:

* база сравнения: ;
* новая разработка: .

1. Относительный показатель качества:

.

Итак, можно сделать вывод, что новая разработка почти в полтора раза лучше выбранной базы сравнения.

## **5.3. Расчет затрат на этапе проектирования**

Под проектированием будем понимать совокупность работ, которые необходимо выполнить, чтобы разработать систему или часть системы, или решить поставленную задачу.

Для расчета затрат на этапе проектирования необходимо определить продолжительность каждой работы (начиная с составления технического задания (ТЗ) и до оформления документации включительно). Продолжительность работ определяется либо по нормативам (при этом пользуются специальными справочниками), либо рассчитывают их по экспертным оценкам по формуле [8]:

, (5.1)

где **–** ожидаемая длительность работы;

 и  –наименьшая и наибольшая длительности работ, соответственно.

Расчеты длительностей работ на этапе проектирования сведены в табл.5.2.

Таблица 5.2 –Длительность работ на этапе проектирования

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Наименование работы | Длительность работы, дн. | | |
| *i* |  |  |  |
| 1 | Разработка ТЗ | 1 | 2 | 1 |
| 2 | Анализ ТЗ и работа с источниками | 12 | 20 | 12 |
| 3 | Составление плана работ | 1 | 1 | 1 |
| 4 | Построение математических моделей | 8 | 11 | 10 |
| 5 | Разработка алгоритмов | 21 | 29 | 25 |
| 6 | Синтез проделанной работы | 11 | 15 | 13 |
| 7 | Моделирование системы | 11 | 15 | 13 |
| 8 | Оформление пояснительной записки | 13 | 19 | 16 |

Длительность всего этапа дипломного проектирования составляет ровно 14 недель, отведенных на этап дипломного проектирования, т. е. длительность этапа проектирования  (день).

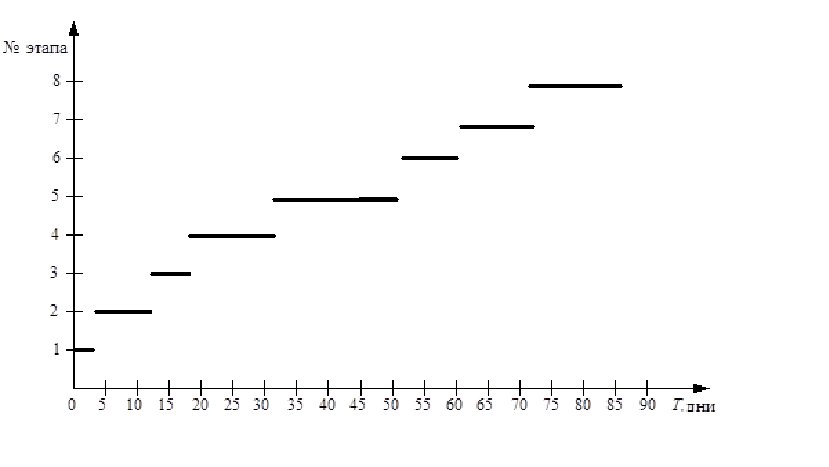


Рисунок5.1– Линейный график работ

Капитальные затраты на этапе проектирования  рассчитываются по формуле (5.2):

, (5.2)

где

 – затраты времени на разработку алгоритма работником *i*-ой категории, чел./дн;

****– средняя дневная заработная плата работника *i*-ой категории, руб./дн, 640руб/день (13440руб/месяц);

 – количество работников *i*-ой категории, ;

 – коэффициент дополнительной заработной платы, ;

 – коэффициент, учитывающий начисления на заработную плату,

Кн= 0,302;

 – коэффициент затрат на накладные расходы, ;

 – коэффициент рентабельности, учитывающий прибыль предприятия;

 – машинное время, необходимое для тестирования алгоритма;

 – эксплуатационные расходы, приходящиеся на один час машинного времени,=100руб/ч.

Таким образом, капитальные затраты на этапе проектирования составят

 руб.

## **5.4. Определение показателей эффективности**

Применение разработанного алгоритма позволяет автоматизировать процесс решения задач управления частотой вращения вала асинхронного двигателя. Дополнительные капитальные вложения  (руб/потребителя), связанные с внедрением разработанного продукта, определяются:

, (5.3)

где  – капитальные вложения в ЭВМ,  руб.;

 – полезный годовой фонд времени ЭВМ (за вычетом простоев в ремонте),  = 1960 ч/год;

 – машинное время, используемое потребителем для тех задач, которые он решает с помощью разработанного алгоритма, машино-ч/год (25% общего машинного времени);

 руб.

## **5.5. Расчет и сопоставление эксплуатационных расходов**

Расходы, связанные с эксплуатацией (функционированием) управляющего алгоритма, определяются по формуле (5.4):

 (5.4)

где  – срок службы алгоритма. Разработанный алгоритм управления может морально устареть, благодаря разработкам новых и более совершенных алгоритмов, поэтому его срок службы можно определить гипотетически, лет.

Величина  представляет собой амортизационные отчисления (руб/год).

Таким образом, расходы, связанные с эксплуатацией равны

 руб.

Экономия эксплуатационных расходов , получаемая у потребителя составит:

, (5.5)

где  – основная заработная плата *i*-го потребителя, решавшего эту задачу с помощью других алгоритмов, приходящаяся на общее количество решаемых им задач в течение года. В данном случае при проведении исследований требовался отдельный работник, следящий за ходом исследований в режиме реального времени, поэтому 5120 руб/год. В итоге, получим

 руб.

Общие расходы  с учетом прочих расходов составят (5% от суммы всех эксплуатационных расходов):

 руб.

## **5.6. Сводные экономические показатели по разработке**

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений  в новом варианте по сравнению с прежним составит:



лет, а это значит, что применение разработки является эффективным.

Критерием эффективности создания и внедрения прикладных программных продуктов (алгоритмов управления) является ожидаемый годовой экономический эффект, получаемый потребителем:

,(5.6)

где  – годовая экономия, которая складывается из экономии эксплуатационных расходов;

– нормативный коэффициент ().

 руб.

Сводные технико-экономические показатели выполненной разработки представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Сводные технико-экономические показатели разработки

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Наименование показателя | Значение |
| 1 | Затраты на использование ЭВМ, (руб./чел⋅ч) | 100 |
| 2 | Эксплуатационные расходы, (руб.) | 56000 |
| 3 | Капитальные затраты на разработку, (руб.) | 140000 |
| 4 | Срок окупаемости, (лет) | 2,5 |
| 5 | Ожидаемый годовой экономический эффект, (руб.) | 210000 |

**5.7. Функционально стоимостный анализ**

Задача функционально-стоимостного анализа (ФСА) – поиск новых, более экономичных вариантов осуществления анализируемым объектом своих функций на всех стадиях цикла «исследование – производство». Это достигается за счёт установления наилучшего соотношения между потребительной стоимостью изделия и затратами на его разработку, снижение материалоёмкости, фондоёмкости, энергоёмкости и трудоёмкости объекта, снижения себестоимости выпускаемой продукции и повышения её качества.

В данном случае произведём сравнение затрат при проектировании цифровой системы с помощью программы и вручную.

Анализ следует начинать с построения алгоритмов (для ручного и программного способов проектирования).



Рисунок5.2–Алгоритм проектирования вручную.

Как видно из представленного алгоритма, практически все операции и преобразования выполняются вручную, что влечёт за собой огромные затраты времени, привлечение большого числа специалистов, а вследствие этого и большие финансовые затраты. Наибольшую сложность представляет расчет ЦУУ для систем высокого порядка. Также при ручных вычислениях возможен большой процент ошибки.

Произведём расчёт стоимости процесса проектирования с АСУ.

Таблица 5.4–Расчёт стоимости процесса проектирования с АСУ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Наименование | Сумма, руб |
| 1 | Микроконтроллер | 3600 |
| 2 | Программа | 3000 |
| 3 | Дисплей | 5400 |
| 4 | Клавиатура | 350 |
| 5 | Принтер | 4200 |

Перечень устройств, приведённых в таблице5.4, позволяет организовать одно автоматизированное рабочее место (АРМ) для специалиста.

Итак, можно сделать вывод, что программное проектирование ЦУУ является более выгодным с точки зрения стоимости, т.к требует привлечения только одного специалиста, наличие одного АРМ позволяет производить расчёты быстро и качественно.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В настоящее время реализация устройств управления на цифровых вычислителях, микро- и мини-ЭВМ является наиболее распространённым. Это связано с тем, что цифровые устройства управления обладают рядом достоинств перед другими (реализованными, например, на аналоговых элементах). Главными из них является высокая точность, надёжность и недорогое производство. Поэтому применение цифровых (дискретных) систем является экономически целесообразным. В связи с этим в данной работе был получен алгоритм синтеза дискретных систем управления, а так же разработана программа для расчёта цифрового управления.

Разработанная программа позволяет находить цифровое устройство управления, которое обеспечиваетастатизм первого порядка, а так же заданные значения перерегулирования и времени регулирования.

Кроме того в работе проведено исследование вопросов безопасности, экологичности и проведено технико-экономическое обоснование разработки программы.

Программа позволяет синтезировать системы управления до десятого порядка. Такое ограничение связано с тем, что в литературе приведены коэффициенты нормированных передаточных функций только для систем от первого до десятого порядка. Программа может быть легко модернизирована для обеспечениявторого и третьего порядка астатизма систем управления, но лишь для систем только до пятого порядка.

**ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. “Автоматизированное проектирование систем автоматического управления” под редакцией Солодовникова. – М.: “Машиностроение”, 1990. – 332с.
2. А. А. Красовский, Г. С. Поспелов “Основы автоматики и технической кибернетики”. М. – Л.: “Госэнергоиздат”, 1962, 600с.
3. А. Р. Гайдук “Математические основы теории систем автоматического управления”. – М.: “Испо-Сервис”, 2002, 152с.
4. “Теория автоматического управления” под ред. Нетушила.
5. Т. Н. Бакаева “Безопасность жизнедеятельности. Часть II. Безопасность в условиях производства”. Таганрог: ТРТУ, 1997, 318с.
6. Е. Г. Непомнящий “Экономика и управление предприятием. Конспект лекций”. Таганрог: ТРТУ, 1999, 169 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

**Применение программы для синтеза систем управления.**

Программа для систем автоматизированного проектирования дискретных САУ реализована с помощью пакета Matlab.

1.Поместить файл“ДСУ” с разработанной программой на рабочий компьютер с программойMatlab.

2.

|  |
| --- |
| Запустить программу Matlab |
|  |

3.

|  |
| --- |
| Создаем новый скрипт в среде Matlab |
|  |

Здесь и в дальнейшем окружностью красного цвета показаны кнопки которые необходимо “кликнуть” для ввода соответствующей команды.

4.

|  |
| --- |
| Открываем скрипт программы и указываем путь к файлу“ДСУ” |
|  |

5.

|  |
| --- |
| Выбираем файл “ДСУ”программы проектирования |
|  |

6.

|  |
| --- |
| После выбора файла на экране монитора появится скрипт программы.Скрипт необходимо запустить. |
|  |

7.

|  |
| --- |
| Ввод данных для расчета цифрового устройства управления. |
|  |
| Этот пункт алгоритма выполняется в следующей последовательности:   * Вводится степень знаменателя- n * Вводятся коэффициенты полинома знаменателя   c 1-го по (n+1)-й(А1,А2,…Аn)   * Вводится степень числителя- m * Вводятся коэффициенты полинома числителя c 1-го по (m+1)-й(В1,В2,…Вm) * Вводится желаемое время регулирования- tp * Вводитсяжелаемый период квантования -Т * Вводитсязаданный порядок астатизма к задающему воздействию -vg |

8.

|  |
| --- |
| После ввода всех необходимых данных нажимаем клавишу Enter. Происходит автоматический расчёт перехода от НОУ к дискретной модели и определяется степень знаменателя желаемой передаточной функции непрерывной системы. По окончании расчета на экране монитора появляются предлагаемые программной коэффициенты знаменателя подходящих нормированных передаточных функций. Оператор выбирает наилучшие, по его мнению, коэффициенты, путем нажимания кнопки, соответствующей номеру выбранной строки с коэффициентами знаменателя. |
|  |

9.

|  |
| --- |
| После выбора необходимых коэффициентов происходит автоматический расчет желаемой передаточной функции дискретной системы, а затем решение системы алгебраических уравнений, которые определяют численные коэффициенты 3-х уравнений ЦУУ. |
|  |

10.

|  |
| --- |
| Три типа рассчитанных в зависимости от вида измеряемых переменных уравнений ЦУУвыводится на экран монитора, как показано влевой части следующего рисунка: |
|  |

11.

|  |
| --- |
| Далее программа автоматически выводит приведенную ниже переходную функцию синтезированной ДСУ. |
|  |

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

**Блок-схема программы проектирования ДСУ**



**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

**Листинг программы**

% Ввод непрерывной части и требуемых показателей качества

disp('-----Ввод передаточной функции непрерывной части системы------');

View('Wn.txt')

n=input('Введите степень знаменателя n ');

if n>8

error('Программа написана для n<=8');

end;

An=zeros(1, n+1);

disp('Введите коэффициенты полинома знаменателя');

for i=1:(n+1)

str=['A(' int2str(i) ')='];

An(i)=input(str);

end

m=input('Введитестепеньчислителяm ');

Bn=zeros(1, m+1);

ifm>=n

error('Степень числителя должна быть меньше степени знаменателя');

end;

disp('Введите коэффициенты полинома числителя');

for i=1:(m+1)

str=['B(' int2str(i) ')='];

Bn(i)=input(str);

end;

disp('------Ввод требуемых параметров системы управления------');

T=input('Период квантования, Т = ');

%sigma=input('Перерегулирование, sigma = ');

nyu0=input('Требуемый порядок астатизма (1 или 2), nyu0 = ');

tp=input('Время регулирования, tp = ');

% Переход от НОУ к дискретной модели

Wn=tf(Bn,An)

Wd=c2d(Wn,T,'zoh')

[B,A]=tfdata(Wd,'v');

n=length(A)-1;

ms=0;

for i=1:n

if B(i)==0

ms=ms+1;

else

break

end

end

m=n-ms;

B=B(ms+1:n+1);

betam=B(1);

B0=B/betam;

b=roots(B);

fori=1:m

ifabs(b(i))>=1

error('Непрерывная часть не является минимальнофазовой')

end

end

a=roots(A);

e=0.0001;

Awave=A;

pol1=[1 -1];

Avsp=[1];

nyu1=0;

for i=1:n

if abs(a(i)-1)<=e

[Awave,ost]=deconv(Awave,pol1);

Avsp=conv(Avsp,pol1); %(z-1)^nyu1

nyu1=nyu1+1;

end

end

% Синтез желаемой передаточной функции

disp(' -------Выбор коэффициентов нормированной передаточной функции-------');

if nyu0==1

if n==1

View('Delta11.txt')

disp('Для продолжения нажмите любую клавишу');

pause

delta=[1 1];

tpm=3;

end

if n==2

View('Delta12.txt')

vibor=menu(' Выборкоэффициентов Wж(p)','1','2','3','4' );

switch vibor

case 1

delta=[1 2 1];

tpm=4.75;

case 2

delta=[1 1.38 1];

tpm=2.86;

case 3

delta=[1 1.41 1];

tpm=2.92;

case 4

delta=[1 1.82 1];

tpm=4.82;

otherwise

error('Ошибкаввода')

end

end

if n==3

View('Delta13.txt')

vibor=menu(' Выборкоэффициентов Wж(p)','1','2','3','4' );

switch vibor

case 1

delta=[1 3 3 1];

tpm=6.31;

case 2

delta=[1 2.05 2.39 1];

tpm=4.34;

case 3

delta=[1 2 2 1];

tpm=5.89;

case 4

delta=[1 1.9 2.2 1];

tpm=4.04;

otherwise

error('Ошибкаввода')

end

end

if n==4

View('Delta14.txt')

vibor=menu(' Выборкоэффициентов Wж(p)','1','2','3','4' );

switch vibor

case 1

delta=[1 4 6 4 1];

tpm=7.7;

case 2

delta=[1 2.6 3.8 2.8 1];

tpm=4.6;

case 3

delta=[1 2.613 3.414 2.613 1];

tpm=6.86;

case 4

delta=[1 2.2 3.5 2.8 1];

tpm=4.81;

otherwise

error('Ошибкаввода')

end

end

if n==5

View('Delta15.txt')

vibor=menu(' Выборкоэффициентов Wж(p)','1','2','3','4' );

switch vibor

case 1

delta=[1 5 10 10 5 1];

tpm=9.2;

case 2

delta=[1 2.6 5.3 5.46 3.64 1];

tpm=5.7;

case 3

delta=[1 3.236 5.236 5.236 3.236 1];

tpm=7.70;

case 4

delta=[1 2.7 4.9 5.4 3.4 1];

tpm=5.43;

otherwise

error('Ошибкаввода')

end

end

if n==6

View('Delta16.txt')

vibor=menu(' Выборкоэффициентов Wж(p)','1','2','3' );

switch vibor

case 1

delta=[1 6 15 20 15 6 1];

tpm=10.5;

case 2

delta=[1 3.73 8.0 10.3 8.56 4.18 1];

tpm=6.22;

case 3

delta=[1 3.15 6.5 8.7 7.55 4.05 1];

tpm=6.04;

otherwise

error('Ошибкаввода')

end

end

if n==7

View('Delta17.txt')

vibor=menu(' Выборкоэффициентов Wж(p)','1','2' );

switch vibor

case 1

delta=[1 7 21 35 35 21 7 1];

tpm=11.9;

case 2

delta=[1 2.75 8.11 11.7 14.27 10.3 4.86 1];

tpm=7.04;

otherwise

error('Ошибкаввода')

end

end

if n==8

View('Delta18.txt')

vibor=menu(' Выборкоэффициентов Wж(p)','1','2' );

switch vibor

case 1

delta=[1 8 28 56 70 56 28 8 1];

tpm=13.1;

case 2

delta=[1 4.67 12.87 22.78 28.46 24.84 14.86 5.5 1];

tpm=7.7;

otherwise

error('Ошибкаввода')

end

end

end

if nyu0==2

if n==2

View('Delta22.txt')

disp('Для продолжения нажмите любую клавишу');

pause

delta=[1 2.5 1];

tpm=3.6;

end

if n==3

View('Delta23.txt')

disp('Для продолжения нажмите любую клавишу');

pause

delta=[1 5.1 6.35 1];

tpm=7.0;

end

if n==4

View('Delta24.txt')

disp('Для продолжения нажмите любую клавишу');

pause

delta=[1 7.2 16.3 11.8 1];

tpm=12;

end

if n==5

View('Delta25.txt')

disp('Для продолжения нажмите любую клавишу');

pause

delta=[1 9 29 38 18 1];

tpm=18;

end

if n==6

View('Delta26.txt')

disp('Для продолжения нажмите любую клавишу');

pause

delta=[1 11 45.8 92.3 82.3 27.7 1];

tpm=25;

end

if n==7

View('Delta27.txt')

disp('Для продолжения нажмите любую клавишу');

pause

delta=[1 12.7 40.2 106.7 165 118.5 33.6 1];

tpm=29;

end

if n==8

View('Delta28.txt')

disp('Для продолжения нажмите любую клавишу');

pause

delta=[1 12 48.5 129.6 225 238.6 151 34.7 1];

tpm=37;

end

end

% Дискретная желаемая модель системы

w0=tpm/(tp-T);

for i=1:n+1

Nzn(i)=delta(i)\*w0^(i-1);

end

if nyu0==1

Nch=Nzn(n+1);

end

if nyu0==2

Nch=[Nzn(n) Nzn(n+1)];

end

Wnorm=tf(Nch,Nzn)

Wish=c2d(Wnorm,T,'zoh')

[H0,H]=tfdata(Wish,'v');

eta=length(H)-1;

es=0;

for i=1:eta

if H0(i)==0

es=es+1;

else

break

end

end

eta0=eta-es;

H0=H0(es+1:eta+1);

H0

H

nyu=max(nyu0-nyu1,0);

k=eta0-m+1;

myu=n+nyu-eta0;

rwave=n-m;

lwave=n+nyu-1;

r=n+nyu;

d=eta+myu+k-1;

pol2=[1 0];

D=H;

for i=1:(myu+k-1)

D=conv(D,pol2);

end

D

d=length(D)-1;

Avsp=A;

Aline=A;

for i=1:nyu

Aline=conv(Avsp,pol1);

Avsp=Aline;

end

Aline

nline=length(Aline)-1;

% Решениесистемыалгебраическихуравнений

matr1=betam\*eye(lwave+1);

matr2=zeros(rwave+1,lwave+1);

matr3=[matr1; matr2];

for i=1:rwave+1

for j=1:nline+1

matr4(j+i-1,i)=Aline(nline+2-j);

end

end

MATRICA=[matr3 matr4]

for i=1:d+1

D0(i)=D(d+2-i);

end

D=D0';

lr=MATRICA\D;

% Составление уравнения ЦУУ с численными коэффициентами

Lwave=lr(1:lwave+1);

for i=1:lwave+1

L0(i)=Lwave(lwave+2-i);

end

Lwave=L0;

L=conv(Lwave,pol2);

l=length(L)-1;

Rwave=lr(lwave+2:lwave+rwave+2);

for i=1:rwave+1

R0(i)=Rwave(rwave+2-i);

end

Rwave=R0;

R=conv(B0,Rwave);

for i=1:nyu

R=conv(R,pol1);

end

Q=H0/betam;

for i=1:myu

Q=conv(Q,pol2);

end

q=length(Q)-1;

Qmod=deconv(Q,pol2);

Lmod=deconv(L,pol2);

disp('-----УравнениеЦУУсчисленнымикоэффициентамиимеетвид------');

% Уравнение ЦУУ при измерении g и y

zer1=zeros(1,r-q);

zer2=zeros(1,r-l);

Q1=[zer1, Q];

L1=[zer2, L];

str=[];

for i=1:length(R)

str1=[];

if R(i)>0

if i==1

str1=[num2str(R(i))];

else

str1=['+',num2str(R(i)) '\*z^(' int2str(1-i),')'];

end

end

if R(i)<0

str1=[num2str(R(i)) '\*z^(' int2str(1-i),')'];

end;

str=[str, str1];

end

Rstr=str;

str=[];

for i=1:(length(Q1)-1)

str1=[];

if Q1(i)>0

if i==1

str1=[num2str(Q1(i)) '\*z^(' int2str(-i),')'];

else

str1=['+',num2str(Q1(i)) '\*z^(' int2str(-i),')'];

end

end

if Q1(i)<0

str1=[num2str(Q1(i)) '\*z^(' int2str(-i),')'];

end;

str=[str, str1];

end

Qstr=str;

str=[];

for i=1:(length(L1)-1)

str1=[];

if L1(i)>0

if i==1

str1=[num2str(L1(i)) '\*z^(',int2str(-i),')'];

else

str1=['+',num2str(L1(i)),'\*z^(' ,int2str(-i),')'];

end

end

if L1(i)<0

str1=[num2str(L1(i)) '\*z^(',int2str(-i),')'];

end;

str=[str, str1];

end

Lstr=str;

disp('1. Если измеряются g и y, то уравнение ЦУУ выглядит следующим образом:');

S1=['(',Rstr,')\*u(z) = (',Qstr,')\*g(z) - (',Lstr,')\*y(z)']

% Уравнение ЦУУ при измерении eps и y

str=[];

for i=1:(length(L1)-1)

str1=[];

if L1(i)>0

if i==1

str1=[num2str(L1(i)-Q1(i)) '\*z^(',int2str(-i),')'];

else

str1=['+',num2str(L1(i)-Q1(i)),'\*z^(' ,int2str(-i),')'];

end

end

if L1(i)<0

str1=[num2str(L1(i)-Q1(i)) '\*z^(',int2str(-i),')'];

end;

str=[str, str1];

end

LQstr=str;

disp('2. Если измеряются eps и y:');

S2=['(',Rstr,')\*u(z) = (',Qstr,')\*eps(z) - (',LQstr,')\*y(z)']

% Уравнение ЦУУ при измерении eps и g

disp('3. Если измеряются eps и g:');

S3=['(',Rstr,')\*u(z) = (',Lstr,')\*eps(z) - (',LQstr,')\*g(z)']

% Построение графика переходного процесса

C0=conv(B,Q);

C0=deconv(C0,B0);

C1=conv(conv(pol2,R),A);

C2=conv(B,L);

zer=zeros(1,abs(length(C1)-length(C2)));

if length(C1)<length(C2)

C1=[zer,C1];

end

if length(C2)<length(C1)

C2=[zer,C2];

end

C=C1+C2;

C=deconv(C,B0);

gamma=length(C)-1;

Croot=roots(C);

Cvsp=C;

f=0;

for i=1:gamma

[Cvsp,ostC]=deconv(Cvsp, pol2);

if ostC==0

f=f+1;

else

break

end

end

gamma0=length(C0)-1;

C0root=roots(C0);

C0vsp=C0;

f0=0;

for i=1:gamma0

[C0vsp,ostC0]=deconv(C0vsp, pol2);

if ostC0==0

f0=f0+1;

else

break

end

end

C=C(1:gamma+1-min(f,f0));

gamma=length(C)-1;

C0=C0(1:gamma0+1-min(f,f0));

gamma0=length(C0)-1;

graf=tf(C0,C,T);

step(graf,'b',3\*tp), grid on

title('График переходного процесса')

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4**

**Стандартные нормированные передаточные функции**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Поря-док  аста-  тизма, | Сте-  пень  знаме-  нателя, | | Коэффициенты | | | | | | | | | | | | Пере-  регу-  лиро-  вание, | | Время  регу-  лиро-  вания, | | Примечание | |
|  | |  | |  | |  | |  | |  | |
| *1* | | 2 | 1 | | 2 | | 1 | |  | |  | |  | | нет | | 4,75 | | *Кратные корни* | |
| 3 | 1 | | 3 | | 3 | | 1 | |  | |  | | нет | | 6,31 | |
| 4 | 1 | | 4 | | 6 | | 4 | | 1 | |  | | нет | | 7.7 | |
| 5 | 1 | | 5 | | 10 | | 10 | | 5 | | 1 | | нет | | 9,2 | |
| *1* | | 1 | 1 | | 1 | |  | |  | |  | |  | | нет | | 3 | | *Минимальное время регулирования* | |
| 2 | 1 | | 1,38 | | 1 | |  | |  | |  | | 5 | | 2,86 | |
| 3 | 1 | | 2,39 | | 2,05 | | 1 | |  | |  | | нет | | 4,34 | |
| 4 | 1 | | 2,8 | | 3,8 | | 2,6 | | 1 | |  | | 5 | | 4,6 | |
| 5 | 1 | | 3,64 | | 5,46 | | 5,3 | | 2,6 | | 1 | | нет | | 5,7 | |
| *1* | | 1 | 1 | | 1 | |  | |  | |  | |  | | нет | | 3 | | *Распределение Баттерворса* | |
| 2 | 1 | | 1,41 | | 1 | |  | |  | |  | | 4 | | 2,92 | |
| 3 | 1 | | 2 | | 2 | | 1 | |  | |  | | 8 | | 5,89 | |
| 4 | 1 | | 2,613 | | 3,414 | | 2,613 | | 1 | |  | | 11 | | 6,86 | |
| 5 | 1 | | 3,236 | | 5,236 | | 5,236 | | 3,236 | | 1 | | 13 | | 7,70 | |
| *2* | | 1 | 1 | | 1 | |  | |  | |  | |  | | нет | | 3 | | *Арифметическая прогрессия* | |
| 2 | 1 | | 2,5 | | 1 | |  | |  | |  | | 10 | | 3,6 | |
| 3 | 1 | | 6,35 | | 5,1 | | 1 | |  | |  | | 10 | | 7,0 | |
| 4 | 1 | | 11,8 | | 16,3 | | 7,2 | | 1 | |  | | 10 | | 12 | |
| 5 | 1 | | 18 | | 38 | | 29 | | 9 | | 1 | | 10 | | 18 | |
| *3* | | 3 | 1 | | 6,7 | | 6,7 | | 1 | |  | |  | | 10 | | 1,52 | | *Геометрическая прогрессия* | |
| 4 | 1 | | 7,9 | | 15 | | 7,9 | | 1 | |  | | 20 | | 4,4 | |
| 5 | 1 | | 18 | | 69 | | 69 | | 18 | | 1 | | 20 | | 8,6 | |
| Поря-док  аста-  тизма, | Сте-  пень  знаме-  нателя, | | Коэффициенты | | | | | | | | | | | | | Пере-  регу-  лиро-  вание, | | Время  регу-  лиро-  вания, | | Примечание |
|  |  | |  | |  | |  | |  | |  | |
| 1 | | 2 | 1 | 1,82 | | 1 | |  | |  | |  | |  | | 0,10 | | 4,82 | | Особо малое перерегули-  рование, |
| 3 | 1 | 2,20 | | 1,90 | | 1 | |  | |  | |  | | 1,65 | | 4,04 | |
| 4 | 1 | 2,80 | | 3,50 | | 2,20 | | 1 | |  | |  | | 0,89 | | 4,81 | |
| 5 | 1 | 3,40 | | 5,40 | | 4,90 | | 2,70 | | 1 | |  | | 1,29 | | 5,43 | |
| 6 | 1 | 4,05 | | 7,55 | | 8,70 | | 6,50 | | 3,15 | | 1 | | 1,63 | | 6,04 | |