

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Клочков Юрий Сергеевич
Должность: Ректор
Дата подписания: 23.09.2026 09:44:14
Уникальный программный ключ:
3beb265d5d589e7ff4c954946f3ad99a1e70ac12

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт геологии и нефтегазодобычи

Кафедра «Кибернетические системы»

**РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК НЕПРЕРЫВНЫХ
И ДИСКРЕТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ**

методические указания для курсового проектирования
по дисциплине «Теория автоматического управления»
для обучающихся направлений

15.03.04-Автоматизация технологических процессов и производств,

27.03.04- Управление в технических системах

всех форм обучения

Составители:

Л.Н. Макарова

кандидат технических наук, доцент

Н.В. Лапик

старший преподаватель

Ю.В. Халилова

ассистент

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ ТЮМЕНЬ
ТИУ

Сертификат: 6FA44C50384686A8E7BD5E27735179BC 2018
Владелец: Ефремова Вероника Васильевна
Действителен: с 14.06.2022 до 07.09.2023

Макарова Л.Н. «Расчет оптимальных настроек непрерывных и дискретных регуляторов». Методические указания для курсового проектирования [Текст] / сост. Л.Н. Макарова, Н.В. Лапик, Ю.В. Халилова. Тюменский индустриальный университет.– 1-е изд.– Тюмень: Издательский центр БИК ТИУ 2018.– 32 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры Кибернетических систем
« 21 » ноября 2018 года, протокол № 4.

Аннотация

Методические указания для выполнения курсового(й) проекта (работы) предназначено для обучающихся по направлениям 15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств в нефтяной и газовой промышленности, 27.03.04 – Управление в технических системах и всех форм обучения, изучающих дисциплину «Теория автоматического управления»

В методических указаниях рассмотрены основные теоретические сведения о непрерывных и дискретных регуляторах, алгоритмы различных методов расчета оптимальных настроек непрерывных и дискретных регуляторов. Приведены примеры применения методов расчета и предложены варианты индивидуальных заданий для выполнения расчетов.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Назначение методических указаний	4
Требования к знаниям и умениям обучающихся	4
1. Содержание лабораторной работы	5
1.1. Цель работы	5
1.2. Основные теоретические сведения	5
1.3. Порядок выполнения работы	8
1.4. Задание к лабораторной работе	8
1.5. Техника безопасности при работе на персональном компьютере	9
1.6. Оборудование для работы	10
1.7. Отчетность по лабораторной работе	10
2. Пример выполнения лабораторной работы	10
2.1. Исследование свойств структурно-резервированных систем при общем резервировании с постоянно включенным резервом	10
2.2. Исследование свойств структурно-резервированных систем при общем резервировании замещением	13
3. Контрольные вопросы	19
4. Критерии оценки знаний обучающихся	19
Список литературы	19
Приложение	15

ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплины «Теория автоматического управления» позволит обучающемуся получить навыки в области разработки автоматизированных систем, использования основных методов построения математических моделей процессов, систем управления и их элементов.

Результаты изучения курса «ТАУ» используются при изучении дисциплин «Автоматизация технологических процессов и производств», «Диагностика и надежность автоматизированных систем», «Моделирование систем управления», «Электрический привод», «Надежность электроснабжения» и др.

Назначение методических указаний

Методические указания для контрольной работы разработаны для оказания помощи обучающимся заочной формы обучения в организации их самостоятельной работы над изучением материала, а также содержат рекомендации по выполнению контрольных работ.

Требования к знаниям и умениям обучающихся

В результате выполнения курсового(й) проекта (работы) обучающиеся должны:

знать:

- классификацию моделей систем и процессов, их виды и приемы моделирования;
- принципы и методологию функционального, имитационного и математического моделирования систем и процессов, методы построения моделирующих алгоритмов;
- методы построения математических моделей, их упрощения, технические и программные средства моделирования;

уметь:

- составлять структурные схемы производства, их математические модели в качестве объектов управления;
- использовать основные методы построения математических моделей процессов, систем, их элементов и систем управления;
- работать с выбранным типом из возможных программных систем, предназначенных для математического и имитационного моделирования;
- планировать модельный эксперимент и обрабатывать его результаты на персональном компьютере;

владеть: навыками работы с программной системой для математического и имитационного моделирования.

1 Цель выполнения курсового(й) проекта (работы)

В ходе выполнения курсового(й) проекта (работы) обучающиеся должны применить полученные в ходе теоретического изучения курса "Теория автоматического управления" знания к расчету контура регулирования, имеющего определенные запасы устойчивости и необходимые показатели качества.

2 Задание и исходные данные для выполнения

2.1.Задание для выполнения проекта (работы)

1. Рассчитать методами Зиглера-Никольса, Коуэна-Куна настройки непрерывных (П, ПИ, ПИД) регуляторов в одноконтурной системе регулирования (рисунок 2.1, 2.2) для объекта, заданного кривой отклика.

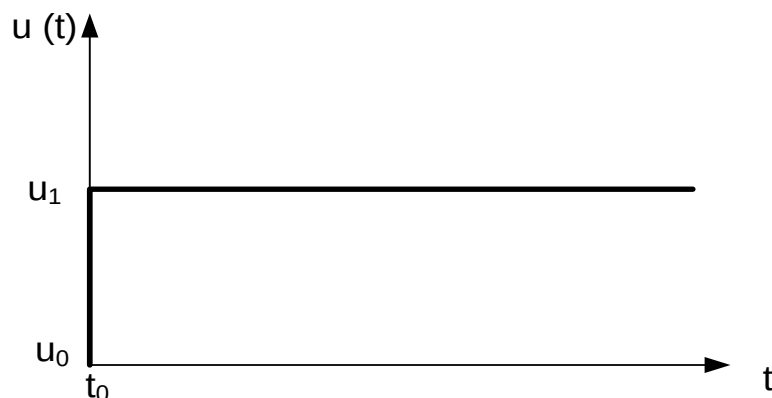


Рисунок 2.1 – График изменения управляющего воздействия $u(t)$

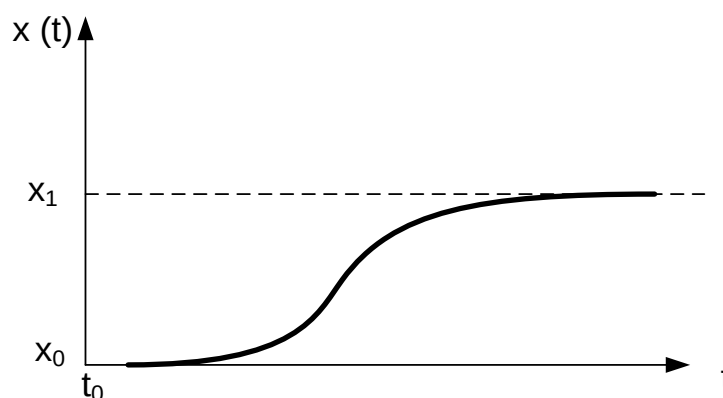


Рисунок 2.2 – Кривая отклика, $x(t)$ – реакция, изменение выходной величины

2. Для заданного объекта рассчитать настройки непрерывных ПИ и ПИД - регуляторов методом ограничения на частотный показатель колебательности.

3. Для этого же объекта провести расчет дискретных ПИ и ПИД-

регуляторов также методом ограничения на частотный показатель колебательности.

4. Используя полученную на основании известной кривой отклика передаточную функцию, рассчитать настройки дискретных регуляторов в среде Simulink пакета MatLab.

5. Провести анализ полученных результатов, сделать выводы. Расчеты дискретных регуляторов провести при условии, что в системе используются фиксаторы нулевого порядка.

2.2 Исходные данные для расчетов по вариантам

Индивидуальный вариант для выполнения проекта (работы) выбирается согласно распоряжения на курсовой проектирование, подготовленного преподавателем, из таблицы А.1 приложения А.

В расчетно-пояснительной записке для каждого использованного метода необходимо отразить следующие основные моменты:

- исходная структурная схема, преобразованная для проведения расчетов (с пояснениями);
- выбор метода расчета, его алгоритм;
- расчет исходного показателя качества для выбранного метода (с пояснениями);
- проверка показателей качества в контуре с найденными настройками;
- выводы по работе;
- список использованной литературы;
- содержание работы.

Для защиты курсового(й) проекта (работы) необходимо подготовить доклад на 5-6 минут, отражающий основные положения выполненной работы, и презентацию, иллюстрирующую доклад.

3 Содержание курсового проекта

3.1 Регулятор - как разновидность устройства управления

Контур регулирования, для которого необходимо выполнить расчет настроек приведен на рисунке 3.1. В него входят в том или ином виде два элемента: объект регулирования (ОУ) и устройство управления (как частный случай - регулятора) (УУ) [1,2].

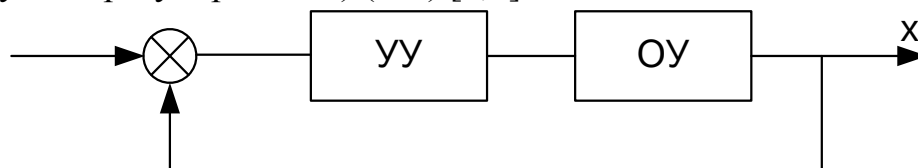


Рисунок 3.1- Структурная схема контура регулирования

В качестве объекта управления, устройства управления в технологическом контуре выступают те или иные технологические параметры (давление, температура, расход, расход топлива, степень открытия клапана и т.д.).

Контур регулирования должен сохранять устойчивость при всех режимах его работы, он должен иметь допустимые по технологии показатели качества как в установившихся, так и динамических режимах [3,4], что обеспечивается исключительно выбором типа и параметров устройства управления. Среди устройств управления получили распространение регуляторы, имеющие простейшие законы преобразования входной величины в выходную: пропорциональный (П), дифференциальный (Д), интегральный (И) и их комбинации. Передаточные функции непрерывных регуляторов приведены в приложении Б.

Параметры регуляторов (коэффициент передачи K_p ; постоянная времени интегрирования $T_{\text{и}}$; постоянная времени дифференцирования $T_{\text{д}}$) называются настройками регулятора и подбираются таким образом, чтобы обеспечить необходимый запас устойчивости и заданные показатели качества (прямые или косвенные). Тогда их называют оптимальными.

Методы определения настроек регуляторов зависят от свойств объекта (непрерывный, дискретный, с запаздыванием, без запаздывания и т. д.), от структурных особенностей САУ (одноконтурная, двухконтурная), но практически все они применяются, если известна передаточная функция объекта. Тип регулятора также зависит от свойств объекта.

3.2 Идентификация объекта по кривой отклика

Свойства объекта могут быть представлены в виде дифференциального уравнения, алгебраического уравнения в виде корреляционной зависимости, а также в форме передаточной функции.

Последняя может быть определена, если известна информация, как объект реагировал на изменение режима работы. Реакция системы на частичное ступенчатое изменение управляющего воздействия называется кривой отклика (или разгонной характеристикой).

Алгоритм получения кривой отклика [2,4]:

1) фиксируется установившееся значение входной и выходной величины (u_0 ; x_0);

2) в момент времени t_0 изменяется значение u_0 на $\pm(10-20\%)$ от u_0 ;

3) после окончания переходного процесса измеряется x_1 .

Кривая отклика обычно имеет вид двух графиков: на одном показано изменение управляющего воздействия, на другом собственно реакция объекта (рисунок 2.1, 2.2).

Вид передаточной функции можно представить с учетом характера кривой отклика.

Если кривая отклика имеет монотонный вид, есть запаздывание реакции по сравнению с управляющим воздействием, то передаточная функция объекта может быть представлена в виде последовательного соединения апериодического звена и звена чистого запаздывания:

$$W_{об} = \frac{K_o e^{-\tau_o p}}{T_o p + 1}, \quad (1)$$

где K_o – коэффициент передачи объекта;
 τ_o – постоянная времени запаздывания объекта;
 T_o – постоянная времени объекта.

Если принята гипотеза (1), то параметры могут быть найдены, например, методом касательной (рисунок 3.2).

Получение характеристик объекта по кривой отклика:

- 1) строится касательная с наибольшим углом наклона;
- 2) определяется время t_2 пересечения этой касательной линии x_1 ;
- 3) вычисляются параметры:

$$K_o = \frac{x_1 - x_0}{U_1 - U_0}; \quad (2)$$

$$\tau_o = t_1 - t_0; \quad (3)$$

$$T_o = t_2 - t_1, \quad (4)$$

где t_1 – момент времени, в который касательная пересекает ось абсцисс (в иных источниках, когда выходная величина начинает отслеживать изменение управления, приложенное в момент t_0)

($t_1 > t_0$), t_2 – значение времени, при котором касательная пересекает линию установившегося значения x_1 .

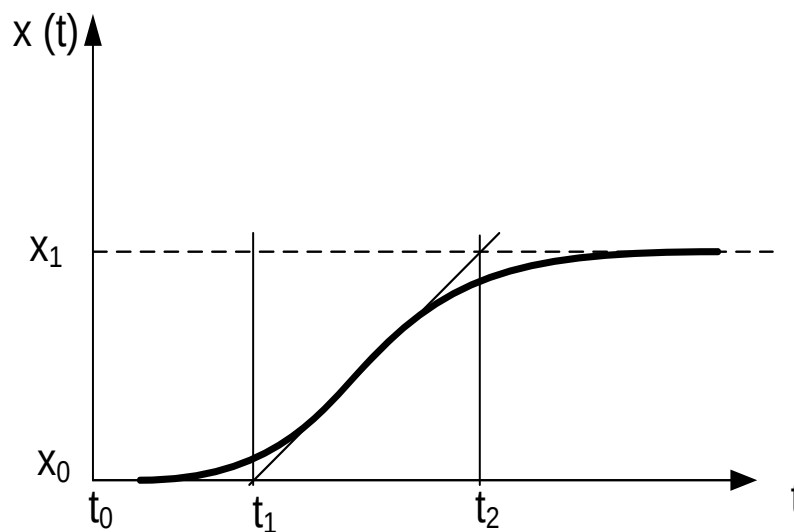


Рисунок 3.2 – Расчет параметров объекта по кривой отклика

Замечание. В формуле (2) коэффициент передачи K_o вычислен в абсолютных единицах, он может быть вычислен в безразмерном виде (5):

$$K_o = \frac{\frac{x_1 - x_0}{x_0}}{\frac{U_1 - U_0}{U_0}} \quad (5)$$

3.3 Расчет настроек непрерывных регуляторов по методу Зиглера-Никольса

Алгоритм расчета настроек регуляторов для объекта, заданного кривой отклика имеет ряд шагов:

- 1) выбор формы передаточной функции объекта;
- 2) выбор метода определения параметров объекта;
- 3) выбор типа регулятора;
- 4) расчет настроек регулятора;
- 5) проверка оптимальности настроек расчетом прямых (косвенных) показателей качества и сравнения с допустимыми значениями.

Расчет настроек регуляторов по данному методу выполняется в соответствии с таблицей 3.1.

Таблица 3.1

Настройки регуляторов по методу Зиглера – Никольса

Тип регулятора	k	T_u	T_d
П	$\frac{T_0}{K_0 \tau_0}$	-	-
ПИ	$\frac{0.9T_0}{K_0 \tau_0}$	$3\tau_0$	
ПИД	$\frac{1.2T_0}{K_0 \tau_0}$	$2\tau_0$	$0,5\tau_0$

3.4 Расчет настроек непрерывных регуляторов по методу Козна-Куна

Расчет настроек методом Козна -Куна использует тот же алгоритм, что и метод Зиглера-Никольса, настройки регуляторов рассчитываются согласно таблице 3.2.

Таблица 3.2

Настройки регуляторов по методу Козна-Куна

Тип регулятора	k	T_u	T_d
П	$\frac{T_0}{K_0\tau_0} \left[1 + \frac{\tau_0}{3T_0} \right]$	-	-
ПИ	$\frac{T_0}{K_0\tau_0} \left[0.9 + \frac{\tau_0}{12T_0} \right]$	$\frac{\tau_0 [30T_0 + 3\tau_0]}{9T_0 + 20\tau_0}$	
ПИД	$\frac{T_0}{K_0\tau_0} \left[\frac{4}{3} + \frac{\tau_0}{4T_0} \right]$	$\frac{\tau_0 [32T_0 + 6\tau_0]}{13T_0 + 8\tau_0}$	$\frac{4\tau_0 T_0}{11T_0 + 2\tau_0}$

3.5 Расчет настроек непрерывных регуляторов методом ограничения на частотный показатель колебательности

В данном методе запас устойчивости задается с использованием частотного показателя колебательности.

Частотный показатель колебательности M определяется по формуле (6):

$$M = \frac{A_{\max}(\omega)}{A(0)} = \frac{|\Phi(j\omega)|_{\max}}{|\Phi(0)|}, \quad (6)$$

где

$$\Phi(j\omega) = \frac{W_p(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_{oc}(j\omega)}, \quad (7)$$

где $W_p(j\omega)$ – АФЧХ разомкнутой системы,

$\Phi(j\omega)$ – АФЧХ замкнутой системы.

Если обратная связь единичная, т.е. ее передаточная функция имеет вид: $W_{oc}(s) = 1$, то формула (6) примет вид:

$$W_3(j\omega) = \frac{W_p(j\omega)}{1 + W_p(j\omega)}.$$

Если разомкнутая система астатическая порядка v (в ней есть одно или несколько интегрирующих звеньев, что соответствует наличию в знаменателе $W_p(s)$ множителя S^v), то $|W_3(0)| = 1$.

Для того, чтобы в замкнутой системе был запас устойчивости, АФЧХ разомкнутой системы должна проходить правее точки $(-1; j0)$.

Каждому значению частотного показателя колебательности

соответствует некоторый определенный запас устойчивости, т.е. некоторое расстояние от этой точки.

Линии равных значений частотного показателя колебательности представляют собой окружности с центром O и радиусом R .

Радиус окружности вычисляется по формуле (8):

$$R = \frac{M_{\text{дон}}}{M^2 - 1}, \quad (8)$$

а центр окружности O по формуле (9):

$$O = \left(-\frac{M_{\text{дон}}^2}{M^2 - 1}; 0 \right); \quad (9)$$

Доказательство приведено в приложении В.

Т.к. частотный показатель колебательности не должен превышать допустимого значения, то АФЧХ разомкнутой системы не должна заходить в область, ограниченную окружностью и построенную для $M_{\text{доп}}$, а только касаться её [3].

При касании АФЧХ разомкнутой системы окружности, параметры которой определены значением частотного показателя колебательности, в замкнутой системе имеется запас устойчивости, соответствующий M .

Положение АФЧХ зависит от постоянных времени регулятора и коэффициента передачи (параметры объекта остаются постоянными).

Для разных значений постоянных времени регулятора значение коэффициента передачи, обеспечивающее касание, будет изменяться, при этом запас устойчивости будет один и тот же, а вот прямые показатели качества (перерегулирование и время регулирования) будут различными.

С учетом интегрального показателя качества настройки будут обеспечивать лучшие прямые показатели качества, если отношение коэффициента передачи регулятора к постоянной времени интегрирования будет наибольшим.

Таким образом алгоритм подбора настроек ПИ– регулятора этим методом имеет ряд шагов:

- выбор типа регулятора с интегральной составляющей;
- выбор допустимого значения частотного показателя колебательности;
- расчет параметров окружности и построение ее на комплексной плоскости;
- выбор постоянной времени интегрирования регулятора и подбор его коэффициента передачи, обеспечивающего касание АФЧХ и окружности;
- определение графо-аналитическим методом K_p для ряда значений

T_u ;

- выбор оптимальных настроек по наибольшему отношению K_p/T_u ;
- проверка косвенных показателей качества для замкнутого контура, сравнение фактического значения $M_{факт}$ и допустимого $M_{доп}$;
- проверка прямых показателей качества, сравнение фактических значений с допустимыми.

Расчет считается выполненным удовлетворительно, если фактические значения показателей качества оказываются не хуже их допустимых значений.

Данный метод может применяться только для тех систем, где в разомкнутой цепи имеется либо в объекте, либо в регуляторе интегральная составляющая.

Выбор допустимого значения частотного показателя колебательности может быть выполнен на основании прямых показателей качества, которые в том или ином виде присутствуют в регламенте работы какой-либо установки (перерегулирование и время регулирования) по номограммам Солодовникова (приложение Г) [4].

Выбор интервала варьирования T_u целесообразно выбирать на основе наибольшей постоянной времени объекта $T_u \in [(0,5 \div 0,7)T_{o_{нпб.}}; (1,3 \div 1,5)T_{o_{нпб.}}]$, что позволяет компенсировать медленные составляющие объекта.

Расчеты удобно представлять в виде таблицы (таблица 3.3).

За оптимальные настройки принимаются те, для которых в строке K_p/T_u это отношение имеет наибольшее значение.

Таблица 3.3

Результаты расчета настроек регулятора

T_u						
K_p						
K_p/T_u			max			

В регуляторе ПИД-типа настраиваемых параметров уже три: K_p , T_u , T_d , т.к. передаточная функция такого регулятора с реальной дифференциальной составляющей, полученной включением балластного апериодического звена последовательно с идеальным дифференцирующим звеном, имеет вид (10):

$$W_{пид}(s) = K(1 + \frac{1}{T_u s} + \frac{T_d s}{\gamma T_d s + 1}), \quad (10)$$

где $0,1 \leq \gamma \leq 0,2$.

Для применения известного алгоритма расчета настроек ПИД-регулятора вводится параметр $\alpha = T_d/T_u$, который может рассчитываться либо задаваться заранее. В последнем случае расчет проводится для нескольких значений α . Для каждого α определяется свое оптимальное

значение настроек и для них строятся переходные характеристики, определяются прямые показатели качества.

Оптимальными настройками ПИД-регулятора считаются те, для которых показатели качества (перерегулирование и время регулирования) имеют лучшие значения.

Порядок расчета настроек непрерывных регуляторов методом ограничения на частотный показатель колебательности:

- 1) Построить контур регулирования для заданного объекта и регулятора.
- 2) Для выбранного значения частотного показателя колебательности рассчитать параметры окружности.
- 3) Записать передаточную функцию разомкнутой системы.
- 4) Выбрать интервал варьирования T_u .
- 5) Рассчитать оптимальные настройки, определить прямые показатели качества для каждого $M=1,1$.
- 6) Расчет провести для другого значения частотного показателя колебательности.
- 7) Результаты расчетов свести в таблицу 3.3, провести анализ полученных результатов, сделать вывод.

3.6 Расчет настроек дискретных регуляторов методом ограничение на частотный показатель колебательности

В реальных контурах регулирования объектом управления является какой-либо технологический параметр, изменяющийся во времени непрерывно (уровень, температура, давление, расход) [1]. Устройство управления в настоящее время в большинстве своем относится к дискретным элементам. Поэтому структурная схема такого контура имеет вид дискретно-непрерывный (рисунок 3.3).

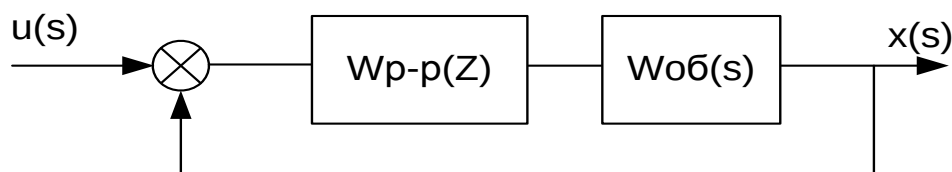


Рисунок 3.3 - Дискретно-непрерывная одноконтурная система

Структурная схема в системах такого вида для проведения расчетов схема может быть преобразована либо в непрерывную форму, либо в дискретную.

Преобразование в эквивалентную дискретную систему основывается на процессе получения дискретного сигнала с амплитудно-импульсной модуляцией из непрерывного сигнала путем квантования по времени и формирования прямоугольного импульса [2].

Квантование выполняется идеальным импульсным элементом, импульс формируется фиксатором нулевого порядка (экстраполятором, формирователем). Структурная схема приведена на рисунке 3.4.

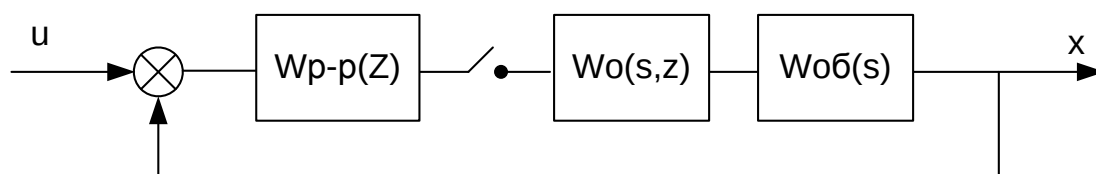


Рисунок 3.4 – Структурная схема, иллюстрирующая преобразование непрерывного сигнала

Последовательное соединение фиксатора и объекта называется приведенной непрерывной частью, для которой может быть найдена эквивалентная Z-передаточная функция, тогда структурная схема будет преобразована к дискретному виду (рисунок 3.5).

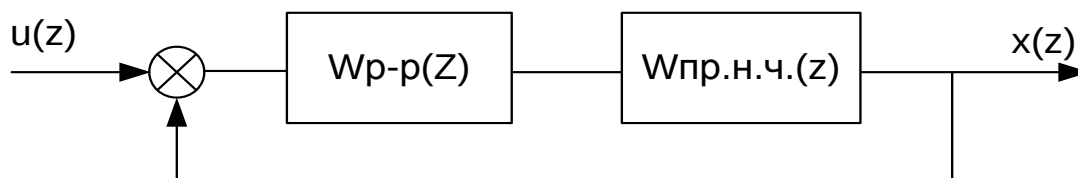


Рисунок 3.5 – Эквивалентная дискретная система

Передаточные функции дискретных регуляторов в форме дискретного Z-преобразования приведены в приложении Д.

Расчет Z-передаточной функции приведенной непрерывной части может быть выполнен разными методами, например, по формуле (11), если используется фиксатор нулевого порядка [3]:

$$W_{пр.н.ч.}(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z\left(\frac{W_{об}(s)}{s}\right), \quad (11)$$

либо в программе *MatLab* командой $c2d(W_{об}, T)$, где T – период квантования.

Период квантования выбирается с учетом трех основных требований:

- 1) он должен обеспечить сохранность информации, т.е. не может быть слишком большим;
- 2) он должен учитывать возможности функциональных элементов, входящих в устройство управления (измерительные элементы, контроллер), т.е. наоборот не должен быть слишком малым;
- 3) так как в структурной схеме используется Z - преобразование, то период квантования должен быть удобным при переходе к дискретной форме, обычно он выбирается как наибольший общий делитель всех постоянных времени объекта, включая постоянную времени запаздывания.

Учет требований теоремы Котельникова приводит к выбору периода квантования как половины наибольшего общего делителя всех постоянных

времени [4].

Для задания в программе *Matlab* Z-передаточной функции необходимо после перечисления коэффициентов числителя и знаменателя указать период квантования.

Например, для объекта с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{0.7 \cdot e^{-20s}}{40s + 1},$$

где $T_0=40$, $\tau_0=20$ и период квантования принят равным $T=20$ в программе *MatLab*:

```
sys1=tf([0,7], [40 1], 'inputdelay', 20)
sys2=c2d(sys1, 20)
```

При наличии в разомкнутой системе интегрального звена для расчета настроек дискретного регулятора может применяться метод расчета при ограничении на частотный показатель колебательности.

Идея и алгоритм метода остаются теми же для дискретного контура, что и для непрерывной системы, которые приведены в п.3.5.

Однако есть некоторые отличия, например, при построении АФХЧ разомкнутой системы. Параметр z в Z-преобразовании равен e^{pT} , где T - период квантования, при построении АФЧХ оператор p должен быть заменен на $j\omega$, т.е. $z(\omega)=e^{j\omega}$. Но

$$e^{j\omega T} = \cos \omega T + j \sin \omega T, \quad (12)$$

поэтому частота при построении АФЧХ дискретных систем изменяется в интервале $\omega \in [0; 2\pi/T]$ или $[-\pi/T; \pi/T]$, кроме того из-за нечетности синуса диапазон изменения частот может быть сокращен до $[0; \pi/T]$.

При расчете настроек дискретного ПИД- регулятора возможен тот же прием, что и для непрерывных ПИД-регуляторов, а именно выражение дифференциальной постоянной времени через интегральную составляющую с коэффициентом α , т.е. $T_d = \alpha T_u$.

3.7 Расчет настроек регуляторов П, ПИ, ПИД в среде MatLab

При расчете настроек в приложении *Simulink* необходимо построить контур, с указанием передаточной функции объекта, выбранного типа регулятора, заданных показателей качества.

3.8 Анализ полученных результатов

При выполнении курсового(й) проекта (работы) настройки регуляторов для одного и того же объекта рассчитываются различными методами. Необходимо выполнить анализ полученных результатов, сделать

ВЫВОДЫ.

4 Требования по оформлению пояснительной записки

По результатам работы над курсовым(й) проектом (работой) предоставляется расчетно-пояснительная записка в распечатанном виде на листах формата А4, в которой должны быть отражены следующие пункты:

- 1) титульный лист (пример оформления в приложении Ж);
- 2) цель работы;
- 3) исходные данные;
- 4) информация о методе расчета, алгоритм;
- 5) коды программ для расчета настроек в пакете *MatLab*;
- 6) результаты расчетов: таблицы, графики, анализ полученных результатов;
- 7) выводы по работе.

Требования к оформлению пояснительной записки: границы текста – слева, снизу и сверху 20мм, справа – 10мм; шрифт: *Times New Roman*, размер не менее 12, абзацный отступ – 1,25см, интервал одинарный.

5 Критерии оценки курсового проекта

Оценка работы студентов включает в себя следующие этапы:

№	Виды работы	Баллы
1	Изучение алгоритмов и выполнение расчетных работ	0-35
2	Оформление расчетно-пояснительной записки	0-20
3	Подготовка доклада и презентации	0-15
4	Защита и ответы на вопросы	0-30

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления [Текст] – С.-П.: Продукция, – 2003. – 743 с.
- 2 Воронов А.А. Теория автоматического управления. Т.1. Теория линейных систем автоматического управления – М.: Высшая Школа, 1986. – 368с.
- 3 Теория автоматического управления [Текст] // Под ред. Нетушила А.В., Т.1.–М.:ВШ, – 1972. – 372с.
- 4 Теория автоматического управления [Текст] // Под ред. Солодовникова В.В. – Кн 1. – М.: Машиностроение. – 1967. – 411с.
- 5 Теория автоматического управления // Под ред. Яковлева В.Б. – М.:В.Ш. – 2003. – 567с.
- 6 Ротач В.Я. Теория автоматического управления [Текст] – М.: МЭИ, 2004. – 387с.
- 7 Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими установками – М.: Энергоатомиздат, 1985.– 343 с.
- 8 Гудвин Г.К. Греббе С.Ф. Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления [Текст] – М.:Бином, 2004.– 911с.
- 9 Дорф Ричард К. Бишон Роберт Х. – Современные системы управления [Текст] – М.: Лаборатория базовых значений, – 2004. – 831с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Варианты индивидуальных заданий для выполнения курсового(й) проекта(работы)

Таблица А.1

Варианты индивидуальных заданий

Вариант	U ₀	U ₁	X ₀	X ₁	t ₀	t ₁	t ₂
1-1	7,3	8,5	19	33	0	3	9
1-2	7,1	8,7	18	31	0	4	16
1-3	7,4	9,1	12	17	0	5	25
1-4	7,5	10,5	7,3	14,2	1	6	31
1-5	7,6	7,9	12,1	14,2	3	7	31
1-6	8,3	9,2	17	22	2	4	10
1-7	8,5	11,3	18	23	2	5	14
1-8	8,6	10,7	17	19	2	6	22
1-9	8,7	12,5	14	17	2	7	27
1-10	8,8	11,8	15	22	2	8	32
1-11	9,1	10,5	22	28	1	5	13
1-12	9,2	11,4	17	25	3	6	15
1-13	9,3	12,7	18	22	3	7	23
1-14	9,4	12,9	19	27	3	8	28
1-15	10,1	13,4	17,5	24,5	3	9	33
1-16	5,3	7,5	41	48	2	8	20
1-17	5,6	6,2	31	38	2	7	22
1-18	5,9	7,3	28	32	3	8	28
1-19	5,8	6,9	27	43	4	9	29
1-20	6,3	7,2	29	45	4	10	34
2-1	1,2	1,5	8,2	8,9	2	5	14
2-2	1,5	2,1	7,1	9,2	2	6	22
2-3	1,6	2,1	8,2	9,2	2	7	22
2-4	1,7	2,2	7,2	9,1	2	8	26
2-5	1,8	2,3	6,2	9,2	2	9	30
2-6	1,3	1,5	7,3	8,5	3	5	11
2-7	1,5	1,7	6,3	7,2	3	6	18
2-8	1,4	1,8	5,1	7,1	3	7	19
2-9	1,5	1,9	4,7	5,8	3	8	23
2-10	1,4	2,3	4,3	5,2	3	9	27
2-11	2,1	2,5	0,3	0,8	4	6	14
2-12	2,2	2,7	0,8	1,2	4	7	16
2-13	2,3	3,1	0,9	1,5	4	8	20
2-14	2,3	3,2	1,2	1,7	4	9	24
2-15	2,4	3,3	1,3	2,1	4	10	28
2-16	2,5	3,5	3,2	4,8	5	7	15
2-17	2,3	3,6	3,1	4,9	5	8	17
2-18	2,4	3,6	3,2	5,1	5	9	21
2-19	2,7	3,2	3,0	5,2	5	10	25
2-20	2,6	3,5	3,1	5,2	5	11	23
2-21	2,5	3,2	1,4	1,8	1	2	5

Продолжение таблицы А.1

Вариант	U ₀	U ₁	X ₀	X ₁	t ₀	t ₁	t ₂
2-22	2,3	3,2	2,1	2,5	1	3	9
2-23	2,4	3,1	2,7	3,2	1	4	13
2-24	2,2	3,5	3,2	5,1	1	5	17
2-25	2,3	3,4	3,1	5,2	1	6	21
2-26	0,3	0,5	1,2	1,7	6	12	24
2-27	0,4	0,5	1,7	1,9	6	8	14
2-28	0,5	0,7	2,3	2,5	6	9	18
2-29	0,6	0,8	3,2	3,8	6	10	18
2-30	0,7	0,8	3,1	3,5	6	11	26
2-31	0,2	0,3	1,4	1,5	7	9	15
2-32	0,3	0,4	1,6	1,8	7	10	16
2-33	0,3	0,5	1,8	2,1	7	11	19
2-34	0,3	0,6	2,1	2,5	7	12	22
2-35	0,3	0,9	2,3	2,8	7	13	31
3-1	0,15	0,25	1,3	1,7	1	3	7
3-2	0,17	0,32	1,8	2,2	1	4	16
3-3	0,18	0,28	1,9	2,3	1	5	25
3-4	0,19	0,31	2,1	2,8	1	6	31
3-5	0,21	0,32	2,2	2,7	1	7	31
3-6	0,16	0,33	0,8	0,95	2	4	10
3-7	0,16	0,31	1,8	1,9	2	5	14
3-8	0,17	0,21	1,9	2,5	2	6	22
3-9	0,18	0,31	2,1	2,8	2	7	27
3-10	0,18	0,25	1,5	1,7	2	8	32
3-11	0,91	2,1	2,2	2,8	3	5	13
3-12	0,92	1,1	1,7	2,5	3	6	15
3-13	0,93	1,27	1,8	2,2	3	7	23
3-14	0,94	1,29	1,9	2,7	3	8	28
3-15	1,02	1,34	1,75	2,45	3	9	33
3-16	0,53	0,75	4,1	4,8	4	8	20
3-17	0,56	0,62	3,1	3,8	4	7	22
3-18	0,59	0,73	2,8	3,2	4	8	28
3-19	0,58	0,69	6,7	7,3	4	9	29
3-20	0,63	0,72	2,9	4,5	4	10	34
3-21	0,25	0,32	0,14	0,18	1	2	5
3-22	0,23	0,32	0,21	0,25	1	3	9
3-23	0,24	0,31	0,27	0,32	1	4	13
3-24	0,22	0,35	0,32	0,51	1	5	17
3-25	0,23	0,34	0,31	0,52	1	6	21
3-26	0,2	0,3	0,14	0,15	7	9	15
3-27	2,3	2,7	16	18	7	10	16
3-28	3,2	5,1	2,1	3,2	7	11	19
4-1	4	5	10	15	1	2	15
4-2	4	6	10	20	1	3	16
4-3	5	6	10	25	1	4	17
4-4	5	7	10	30	1	2	18

Продолжение таблицы А.1

Вариант	U_0	U_1	X_0	X_1	t_0	t_1	t_2
4-5	5	8	10	35	1	3	19
4-6	6	7	15	25	1	4	20
4-7	6	8	15	30	1	2	15
4-8	6	9	15	35	1	3	16
4-9	6	10	15	40	1	4	17
4-10	7	8	15	45	1	2	18
4-11	7	9	20	30	2	3	19
4-12	7	10	25	40	2	4	20
4-13	7	11	25	50	2	5	15
4-14	8	9	25	60	2	3	16
4-15	8	10	25	70	2	4	17
4-16	8	11	30	45	2	5	18
4-17	8	12	30	50	2	3	20
4-18	9	10	30	55	2	4	25
4-19	9	11	30	60	2	5	30
4-20	9	12	30	65	2	6	35
4-21	9	13	40	50	3	4	20
4-22	10	11	40	55	3	5	25
4-23	10	12	40	60	3	6	30
4-24	10	13	40	65	3	5	35
4-25	10	14	40	70	3	6	40

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1

Передаточные функции непрерывных регуляторов

Тип регулятора	Передаточная функция, W(p)
П	K_p
И	$\frac{K_p}{p} = \frac{1}{T_u p}$
Д (идеальный)	$K_p p = T_\delta p$
Д (реальный)	$\frac{T_\delta p}{\tau_\delta p + 1}; \quad \tau_\delta = \gamma \cdot T_\delta; \quad \gamma \in [0,01; 0,02]$
ПИ	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} \right)$
ПД	$K_p \left(1 + \frac{T_\delta p}{\tau_\delta p + 1} \right)$
ИД	$\left(\frac{1}{T_u p} + \frac{T_\delta p}{\tau_\delta p + 1} \right)$
ПИД	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} + \frac{T_\delta p}{\tau_\delta p + 1} \right)$

Таблица Б.2

Передаточные функции дискретных регуляторов

Закон регулирования	W(s)	D(z)	Коэффициенты
П	k	$\frac{k_p z}{z - 1}$	
Д	$k \left(\frac{T_\delta s}{T_\delta s + 1} \right)$	$\frac{k_p T_\delta}{T} \left(\frac{1}{z} - z \right)$	
И	$\frac{1}{T_u s}$	$\frac{k_p T_z}{z - 1}$	
ПИ	$k \left(1 + \frac{1}{T_u s} \right)$	$\frac{k_p (b_0 z + b_1)}{z}$	$b_0 = 1 + \frac{T}{T_u}$ $b_1 = -1$
ПИД	$k \left(1 + \frac{1}{T_u s} + \frac{T_\delta s}{T_\delta s + 1} \right)$	$\frac{k_p (b_0 z^2 + b_1 z + b_2)}{z(z - 1)}$	$b_0 = \left(1 + \frac{T}{T_u} + \frac{T_\delta}{T} \right)$ $b_1 = -\left(1 + \frac{2T_\delta}{T} \right)$ $b_2 = \frac{T_\delta}{T_0}$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Вывод геометрического места точек равного значения частотного показателя колебательности на комплексной плоскости

$$|W_3(j\omega)| = \left| \frac{W_p(j\omega)}{1 + W_p(j\omega)} \right| = M ;$$

$$W(j\omega) = U(\omega) + j \cdot V(\omega) = U + j \cdot V ;$$

$$|W(j\omega)| = \sqrt{U^2 + V^2} ;$$

$$|1 + W(j\omega)| = \sqrt{(1 + U)^2 + V^2} ;$$

$$M = \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{\sqrt{(1 + U)^2 + V^2}} \Rightarrow M^2 = \frac{U^2 + V^2}{(1 + U)^2 + V^2} ;$$

$$M^2(1 + U)^2 - U^2 + M^2V^2 - M^2 = 0 ;$$

$$(M^2 - 1)U^2 + 2 \cdot M^2 \cdot U + M^2 + V^2(M^2 - 1) = 0 \quad / \quad M^2 - 1 ;$$

$$U^2 + 2U \frac{M^2}{(M^2 - 1)} + \frac{M^4}{(M^2 - 1)^2} - \frac{M^4}{(M^2 - 1)^2} + \frac{M^2}{M^2 - 1} + V^2 = 0 ;$$

$$\left(U^2 + \frac{M^2}{(M^2 - 1)} \right)^2 + V^2 + \frac{-M^4 + M^4 - M^2}{(M^2 - 1)^2} = 0 ;$$

$$\left(U^2 + \frac{M^2}{(M^2 - 1)} \right)^2 + V^2 = \frac{M^2}{(M^2 - 1)^2} ,$$

что соответствует уравнению окружности $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Номограммы Солодовникова

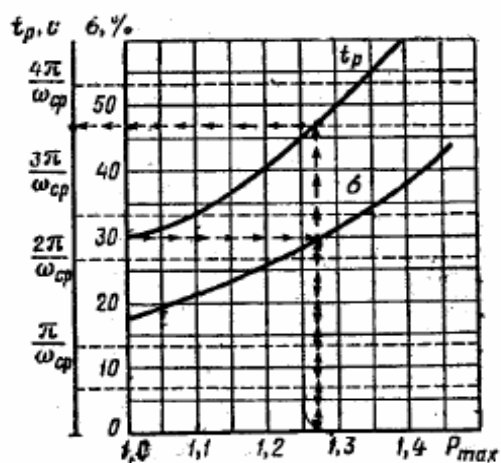


Рисунок Г.1- График для определения P_{max} и частоты среза по заданному перегулированию σ

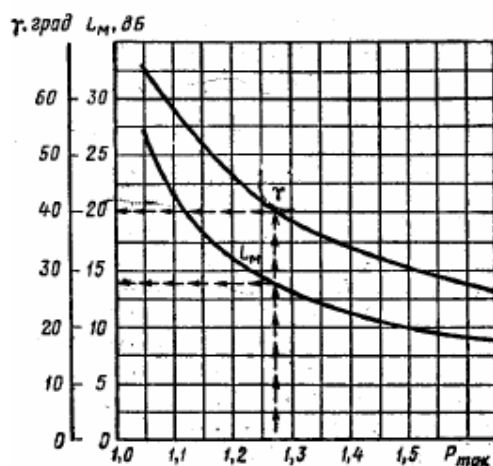


Рисунок Г.2- График для определения запаса по амплитуде и запаса по фазе

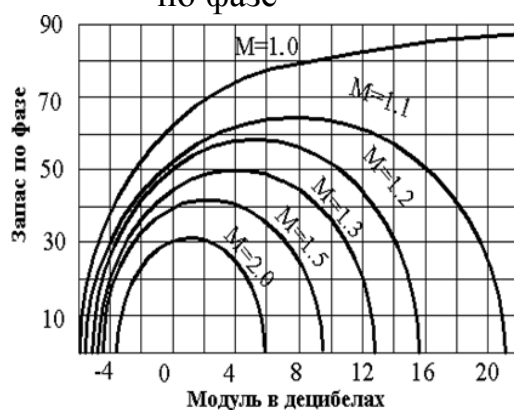


Рисунок Г.3 - Зависимость требуемого запаса по фазе от модуля в децибелах при различных показателях колебательности M

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Пример М-файл для расчета настроек непрерывного регулятора:

```
M_доп = 1,1
Kp=0.957;
Ti=33;
T=20;
M=1.1;
R=M/(M^2-1);
O=M^2/(M^2-1);
Wpr_n_ch=tf([0.2745],[1 -0.6065 0],T);
Wreg=tf([Kp*(1+T/Ti) -Kp],[1 -1],T);
Wsys=series(Wpr_n_ch,Wreg);
w=0:(pi/3000):(2*pi/T);
x=0:0.001:10;
nyquist(Wsys,w);
hold on
plot(R*((cos(x)-O/R)+i*sin(x)));
hold off
Kp/Ti
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Пример М-файла для дискретной системы

```
Mдоп = 1,1
Kp=0.957;
Ti=33;
T=20;
M=1.1;
R=M/(M^2-1);
O=M^2/(M^2-1);
Wpr_n_ch=tf([0.2745],[1 -0.6065 0],T);
Wreg=tf([Kp*(1+T/Ti) -Kp],[1 -1],T);
Wsys=series(Wpr_n_ch,Wreg);
w=0:(pi/3000):(2*pi/T);
x=0:0.001:10;
nyquist(Wsys,w);
hold on
plot(R*(cos(x)-O/R)+i*sin(x));
hold off
Kp/Ti
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Тюменский индустриальный университет»
Институт геологии и нефтегазодобычи

Кафедра кибернетических систем

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовому проекту

по дисциплине

«ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»

на тему

**«РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК НЕПРЕРЫВНЫХ И
ДИСКРЕТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ»**

ВАРИАНТ

Выполнил(а): _____

(Ф.И.О. студента, группа)

Проверил: _____

(Ф.И.О. преподавателя, должность)

Тюмень 20__ г.

Учебное издание

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК НЕПРЕРЫВНЫХ И ДИСКРЕТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Методические указания для курсового проектирования

Составители

МАКАРОВА Лидия Николаевна
ЛАПИК Наталья Владиславовна
ХАЛИЛОВА Юлия Владимировна

В авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. .
Тираж 20 экз. Заказ № .

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52