

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСИС»  
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра металлургических технологий и оборудования

**К.В. Лицин, А.Н. Шаповалов**

# **АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Методические указания  
по выполнению домашнего задания / контрольной работы  
по дисциплине «Автоматизация металлургического производства»  
для студентов направления подготовки 22.03.02 Металлургия,  
всех форм обучения

Новотроицк, 2023 г.

УДК 621.31  
ББК 31.211  
Л 65

**Рецензенты:**

*Зав. кафедрой электроэнергетики и электротехники  
Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС», к.п.н., доцент  
Мажирин Р.Е.*

*Зав. кафедрой электроники и микроэлектроники  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.Н. Носова», к.т.н., доцент  
Усатый Д.Ю.*

Лицин К.В., Шаповалов А.Н. Автоматизация металлургического производства: Методические указания по выполнению домашнего задания / контрольной работы. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСИС», 2023. – 55 с.

Методические указания по выполнению домашнего задания / контрольной работы предназначены для студентов направления подготовки 22.03.02 Металлургия (профиль «Металлургия черных металлов»), изучающих дисциплину «Автоматизация металлургического производства». В представленных методических указаниях рассмотрено применение программы Matlab и Excel для исследования и синтеза автоматических систем управления металлургического производства. В качестве примера выбрано прокатное производство. Приведено теоретическое обоснование основ автоматизации металлургического процесса. Представлен пример автоматизации системы регулирования толщины листа при прокате.

*Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСИС»*

© ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСИС»  
Новотроицкий филиал, 2023

## Содержание

Введение .....	4
1 Теоретическая часть .....	6
1.1 Основные понятия и определения .....	6
1.2 Особенности систем автоматизации металлургического производства .....	9
1.3 Структура автоматизированной системы управления .....	12
1.4 Законы регулирования .....	22
1.5 Основные условия и критерии устойчивости .....	24
1.6 Показатели качества регулирования .....	26
1.7 Регулирование координат автоматизированного электропривода .....	28
2 Задание на выполнение контрольной работы .....	35
3 Пример выполнения контрольной работы.....	38
3.1 Математическая модель системы управления .....	38
3.2 Анализ системы управления .....	42
3.3 Анализ качества системы управления .....	48
Список использованных источников .....	52
Приложение А.....	53

## Введение

Металлургия вообще, а прокатное производство в частности, характеризуются широким сортаментом производимой продукции, неоднородным составом сырья и заготовок, подверженностью технологических процессов различного рода возмущениям. В этих условиях актуальным является обеспечение оптимального управления технологическими процессами и агрегатами, так как нерациональное управление, неправильно выбранные режимы работы приводят к весьма большим потерям.

Металлургические предприятия входят в число тех, которые наиболее нуждаются в автоматизированном управлении технологическими процессами. Это напрямую связано с требованиями к непрерывности, а также нежелательного участия человека при выполнении многих операций. Автоматизация металлургического производства представляет собой совокупность определенных технологий, за счет которых осуществляется управление производственными процессами с минимальным привлечением к ним человеческого ресурса, путем использования средств автоматики. Автоматизация технологических процессов металлургического производства позволяет оптимально перераспределить энергетические, материальные и информационные возможности, что способствует замещению физического труда.

В представленных методических указаниях рассмотрены основные теоретические сведения и представлен пример автоматизации системы регулирования толщины листа при прокате.

Основная задача прокатного производства заключается в том, чтобы обеспечить прокат необходимого качества, т.е. добиться необходимых геометрических размеров, формы, состояния поверхности и пр.

Стадии процесса производства проката:

- подготовка металла;
- нагрев металла (при горячей прокатке);
- прокатка;
- отделка проката.

Прокатка металла осуществляется на основном оборудовании прокатного стана. Основное оборудование состоит из одной или нескольких рабочих клеток, в которых размещаются прокатные валки, а также приводы вращения прокатных валков.

Одна из величин, характеризующих прокатку – толщина проката (размер поперечного сечения прокатываемой полосы). В данном случае толщина проката – управляемая величина.

Толщина проката нестабильна по причине:

- ухудшения пластических свойств прокатываемого металла (и, как следствие, увеличение давления на валки);
- увеличения входной толщины металла (на выходе из предыдущей клетки);
- износа и тепловой деформации валков.

В результате толщина полосы, выходящей из стана, может иметь отклонение от требуемого значения. Поэтому клетки чистовой группы снабжаются системами регулирования толщины полосы.

Вариант контрольной работы выбирается в соответствии с номером в списке группы.

Выполненная контрольная работа должна содержать:

- титульный лист;
- задание с указанием исходных данных выбранного варианта;
- теоретические сведения;
- структурные схемы исследования;
- необходимые расчеты;
- результаты исследования (переходные процессы, оценка качественных показателей);
- заключение;
- список использованных источников.

# 1 Теоретическая часть

## 1.1 Основные понятия и определения

**Алгоритм функционирования устройства (системы)** – совокупность предписаний, ведущих к правильному выполнению технического процесса в каком-либо устройстве или в совокупности устройств (системе).

Например, электрическая система – совокупность устройств, обеспечивающих единство процессов генерирования, преобразования, передачи, распределения и потребления электрической энергии при обеспечении ряда требований к режимным параметрам (частоте, напряжению, мощности и т.д.). Электрическая система спроектирована таким образом, чтобы при нормальных условиях эксплуатации эти требования выполнялись, то есть правильно выполнялся технический процесс. В данном случае алгоритм функционирования электрической системы реализован в конструкции входящих в ее состав устройств (генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и т.д.) и в определенной схеме их соединения.

Однако надлежащему функционированию устройства (системы) могут мешать внешние обстоятельства (воздействия). Например, для электрической системы такими воздействиями могут быть: изменение нагрузки потребителей электрической энергии, изменение конфигурации электрической сети в результате переключений, короткие замыкания, обрывы проводов и т.д. Поэтому на устройство (систему) приходится оказывать специальные воздействия, направленные на компенсацию нежелательных последствий внешних воздействий и выполнение алгоритма функционирования. В связи с этим вводятся следующие понятия:

**Объект управления (ОУ)** – устройство (система), осуществляющее технический процесс и нуждающееся в специально организованных воздействиях извне для осуществления его алгоритма функционирования.

Объектами управления являются, например, как отдельные устройства электрической системы (турбогенераторы, силовые преобразователи электрической энергии, нагрузки), так и электрическая система в целом.

**Алгоритм управления** – совокупность предписаний, определяющая характер воздействий извне на объект управления, обеспечивающих его алгоритм функционирования.

Примерами алгоритмов управления являются алгоритмы изменения возбуждения синхронного генератора и расхода пара в их турбинах с целью компенсации нежелательного влияния изменения нагрузки потребителей на уровни напряжения в узловых точках электрической системы и частоту этого напряжения.

**Устройство управления (УУ)** – устройство, осуществляющее в соответствии с алгоритмом управления воздействие на объект управления.

Примерами устройств управления являются автоматический регулятор возбуждения (АРВ) и автоматический регулятор частоты вращения (АРЧВ) синхронного генератора.

**Автоматическая система управления (АСУ)** – совокупность взаимодействующих между собой объекта управления и устройства управления.

На рисунке 1.1 приведена обобщенная структурная схема АСУ.

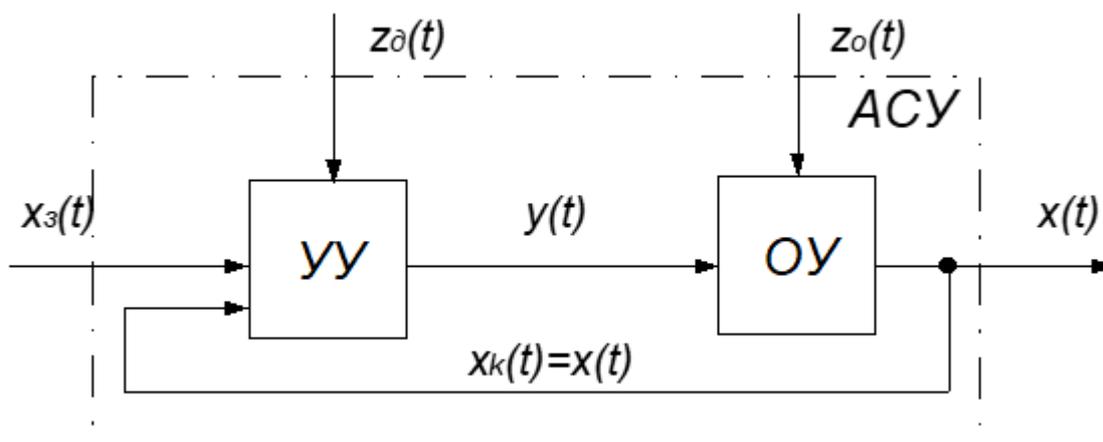


Рисунок 1.1 – Обобщенная структурная схема АСУ

В ней представленной системе имеются следующие сигналы.

**$x(t)$  – управляемая величина** – физическая величина, характеризующая состояние объекта.

Часто объект управления имеет несколько управляемых величин  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ...  $x_n(t)$ , тогда говорят об  $n$ -мерном векторе состояния объекта  $x(t)$  с перечисленными выше компонентами. Объект управления в этом случае называют многомерным.

Примерами управляемых величин в электрической системе являются: ток, напряжение, мощность, частота вращения и т.д.

**$z_o(t)$ ,  $z_d(t)$  – соответственно основное (действующее на объект управления) и дополнительное (действующее на устройство управления) возмущающие воздействия.**

Примерами основного возмущающего воздействия  **$z_o(t)$**  являются изменение нагрузки синхронного генератора, температуры охлаждающей его среды и т.п., а дополнительного возмущающего воздействия  **$z_d(t)$**  – изменение условий охлаждения УУ, нестабильность напряжения источников питания УУ и т.п.

**$y(t)$  – управляющее воздействие.**

Управляющее воздействие вырабатывается в управляющем устройстве в

соответствии с алгоритмом управления в зависимости от истинного и предписанного значений управляемой величины.

$x_k(t) = x(t)$  – **контрольное воздействие** – информация об истинном значении управляемой величины.

$x_3(t)$  – **задающее воздействие** – предписанное (желаемое) значение управляемой величины.

**Алгоритм управления (алгоритм функционирования управляющего устройства)** – зависимость управляющего воздействия от задающего воздействия, управляемой величины и дополнительного возмущающего воздействия.

Для одномерной АСУ алгоритм управления можно записать следующим образом:

$$y(t) = A_y[ x_3(t), x(t), z_d(t)]. \quad (1.1)$$

**Алгоритм функционирования объекта управления** – зависимость управляемой величины от управляющего и основного возмущающего воздействий.

Для одномерной АСУ алгоритм функционирования объекта можно записать следующим образом:

$$x(t) = A_o[ y(t), z_o(t)]. \quad (1.2)$$

Алгоритм функционирования объекта и алгоритм управления в совокупности образуют алгоритм функционирования АСУ.

Воздействия  $z(t)$  и  $x_3(t)$  являются внешними для рассматриваемой системы, а воздействия  $x_k(t)$  и  $y(t)$  – внутренними. Передача внешних и внутренних воздействий происходит через элементы АСУ, которые в совокупности образуют несколько цепей воздействий. На рисунке 1.1 можно указать, например, цепи воздействий от величины  $x_3(t)$  к величине  $y(t)$  и далее к  $x(t)$ , от  $z_o(t)$  к  $x(t)$ .

Различают три стороны любого воздействия:

– **энергетическая** – сторона, проявляющаяся в процессах преобразования и передачи энергии;

– **метаболическая** – сторона, проявляющаяся в процессах преобразования формы и состава вещества;

– **информационная** – сторона, связанная с переносом каждым воздействием определенной информации.

Информационная сторона наиболее важна для изучения процессов, происходящих в АСУ. Эти процессы заключаются в преобразовании сигналов.

**Сигнал в автоматике** – определенная физическая величина, отображающая в соответствии с принятой условностью информацию, содержащуюся в воздействии.

## 1.2 Особенности систем автоматизации металлургического производства

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) состоят обычно из нескольких уровней управления. На нижнем уровне работают автоматические системы регулирования (АСР) отдельными технологическими параметрами. Получая задания и уставки от верхних уровней, системы регулирования поддерживают технологические параметры на заданном уровне, который рассчитывается УВМ или задается оператором. Независимо от того, как именно осуществляется регулирование: регуляторами, микропроцессорами или самой УВМ в режиме прямого цифрового управления, - качество управления объектом в целом в значительной степени определяется качеством систем регулирования отдельных параметров.

Для создания работоспособной АСР, обеспечивающей требуемое качество регулирования, необходимо прежде всего знать свойства объекта регулирования (ОР), т.е. иметь его модель.

Различают ОР с сосредоточенными и распределенными параметрами. В объектах с сосредоточенными параметрами значения регулируемых величин в любой момент времени одинаковы во всех точках агрегата или аппарата (объекта). Например, в ресивере сжатого воздуха, регулируемой величиной в котором является давление, отсутствуют градиенты давлений как по высоте, так и по сечению аппарата, что позволяет отнести его к объектам с сосредоточенными параметрами. В объектах с распределенными параметрами значения регулируемых величин неодинаковы как в различных точках объекта в равновесном состоянии, так и переходном режиме. Такими объектами, например, являются трубопроводы, давление газа или жидкости в которых неодинаково по длине; теплообменники с трубчатыми змеевиками и роликовые нагревательные печи, в которых температура нагреваемого продукта также неодинакова по длине; доменные печи, в которых существуют градиенты давления и температуры по высоте и т.п.

Кроме того, уровень шихты в доменной печи также не является постоянной по сечению величиной. Существуют системы контроля (зонды), позволяющие его контролировать и соответственно управлять системой загрузки (вращающийся распределитель или лотковое устройство на доменной печи). Один и тот же объект может быть по одним параметрам являться объектом с распределенными параметрами, а по другим - с сосредоточенными. Агломашина в процессе работы имеет различную температуру шихты по длине аглоленты, но скорость аглоленты одинакова в любой точке ее.

Оценка объекта с точки зрения сосредоточенности или распределенности параметров важна при выборе принципов измерения, числа датчиков и места их установки, т.к. от этого будет зависеть объективность оценки состояния объекта

и значение управляющих воздействий.

Линейные ОР с сосредоточенными и постоянными во времени параметрами, имеющие одну входную и одну выходную величину, и с динамическими свойствами, описываемыми дифференциальными уравнениями не выше второго порядка, обычно называют простыми объектами. Такие объекты можно описать тем или иным типовым элементарным звеном. Все другие объекты относятся к сложным.

С точки зрения теории автоматического регулирования сложные объекты можно подразделять на ряд простых объектов, которые в свою очередь могут быть аппроксимированы типовыми элементарными звеньями. Таким образом, сложные объекты могут быть представлены как системы, составленные из ряда параллельно и последовательно соединенных типовых элементарных звеньев.

В ОР с одной регулируемой величиной и несколькими входными величинами достаточно ограничиться одной АСР, работающей по принципу отклонения, так как в этом случае для компенсации всех возмущений достаточно регулирующего воздействия только по одному параметру. В объектах с несколькими выходными величинами часто приходится создавать несколько отдельных АСР, при этом по каждой из регулируемых величин сложный объект можно рассматривать как простой с одной входной и одной выходной величинами. Например, скорость двигателя постоянного тока зависит от напряжения на якоре и от нагрузки. Возмущения по нагрузке, а также по напряжению в сети переменного тока компенсируются регулятором скорости посредством воздействий на управляемый выпрямитель. В нагревательных печах регулируется одновременно температура и давление в печи, причем по каждому параметру работает соответствующая АСР с регулятором температуры и давления.

При рассмотрении металлургических агрегатов в качестве объектов регулирования следует учитывать их следующие основные особенности:

1. Металлургические процессы в основных агрегатах и сами агрегаты являются, как правило, сложными процессами - сложными объектами. Разделение сложного объекта на элементарные звенья по их динамическим свойствам и физической сущности зачастую не совпадают. Так, например, при регулировании температуры металла в методической печи ОР в целом с точки зрения динамических свойств можно представить или одним динамическим звеном, входом которого служит расход топлива, а выходом температура металла, или двумя последовательно соединенными звеньями, у которых входом первого является расход топлива, а выходом - температура рабочего пространства печи; входом второго - температура рабочего пространства, а выходом - температура металла. С физической же точки зрения каждое из этих двух звеньев является отражением разнородных процессов.

Правильное представление о сложности ОР, его физических и динамиче-

ских особенностях является необходимым условием создания рациональной и эффективной АСР.

2. Подавляющее большинство металлургических объектов относится к объектам с распределенными параметрами. При этом вследствие физической сложности, многофакторности процессов получения и обработки металла все основные металлургические агрегаты являются многосвязными объектами, функционирование которых определяется рядом входных и выходных величин, испытывающих взаимные влияния. Например, изменение расхода газа, подаваемого к горелкам к методической печи, приводит к изменению температуры в рабочем пространстве печи, количества и состава продуктов сгорания, давления в рабочем пространстве и т.п.

3. Поскольку металлургические процессы представляют собой сложные комплексы взаимозависимых физико-химических явлений, то достаточно точные математические описания и универсальные теоретические математические модели реальных производственных процессов отсутствуют. Существующие математические модели строят на ряде упрощений и допущений и в основном посредством анализа экспериментальных данных.

4. Сложность основных металлургических объектов и разнообразие возмущений, приложенных в различных местах агрегатов, приводят к тому, что эти объекты характеризуются большим количеством контролируемых величин и управляющих воздействий.

Например, основными возмущениями, оказывающими влияние на ход кислородно-конверторного процесса, являются: колебания содержания кремния, марганца, серы, углерода и фосфора в чугуна; колебания химического состава и физического состояния (прочности, крупности) сыпучих материалов и стального лома; колебания температуры чугуна и содержания кислорода в дутье и т.д. Управляющими воздействиями являются целенаправленные изменения расхода дутья (кислорода); массы чугуна, стального лома, железной руды, известняка, марганцевой руды и других добавок сыпучих материалов; продолжительность продувки; расстояние между кислородной фурмой и уровнем ванны и др.

5. Основные параметры металлургических объектов трудно подвергать автоматическому контролю (резкие изменения хода технологического процесса во времени, высокая температура измеряемой и окружающей сред, наличие агрессивной пыли, вибрации и т.д.).

6. Металлургические объекты являются, как правило, нелинейными объектами, поведение которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, поэтому в тех случаях, когда это возможно, следует стремиться аппроксимировать нелинейные характеристики объектов линейными известными методами линеаризации.

7. Значительная материально- и энергоемкость металлургических объек-

тов, а также их большая единичная мощность и производительность, обуславливает возможность достижения значительных экономических эффектов, связанных с увеличением производительности, сокращением расходов сырья, топлива и энергий, улучшением качества готовой продукции при внедрении совершенных систем управления. Затраты на совершение АСР и АСУТП окупаются за небольшое время, как правило срок окупаемости составляет несколько месяцев.

Физическая природа регулируемых параметров в различных ОР может быть различной (давление, температура, расход, уровень или положение, скорость и т.п.). Для решения задач регулирования необходимо знать общие свойства ОР – его статические и динамические свойства вне зависимости от физической природы и конструктивных особенностей технологического агрегата и происходящего в нем процесса, так как именно эти характеристики определяют условия регулирования. Статические и динамические характеристики ОР необходимы для правильного выбора принципиальной схемы регулирования, регуляторов и расчета их настроек, средств измерений, регулирующих и исполнительных органов. Эти характеристики необходимы также для анализа устойчивости и качества АСР. Иными словами, расчет автоматических систем регулирования основывается на статических и динамических характеристиках объектов регулирования. При проектировании АСР статические и динамические характеристики ОР находят по теоретическим формулам или определяют экспериментально на действующих объектах или на их моделях.

### **1.3 Структура автоматизированной системы управления**

Изучение и математический анализ АСУ существенно облегчаются, если ее предварительно мысленно расчленим на типовые элементы, выявить физические взаимосвязи между ними и отобразить эти взаимосвязи схематично в какой-либо условной форме.

АСУ может быть разделена на части по различным признакам: назначению частей, алгоритмам преобразования информации, конструктивной обособленности. Соответственно различают следующие структуры и структурные схемы АСУ:

- функциональную;
- алгоритмическую;
- конструктивную.

В теории автоматического управления чаще всего имеют дело с функциональной и алгоритмической структурами (схемами). Поэтому рассмотрим их более подробно.

Функциональные и алгоритмические схемы состоят из условных изображений элементов и звеньев (обычно в виде прямоугольников) и различных свя-

зей, изображаемых в виде линий со стрелками, показывающих направление передачи воздействий. Каждая линия соответствует обычно одному сигналу или одному воздействию. Около каждой линии указывают физическую величину, характеризующую данное воздействие.

Обычно вначале составляют функциональную схему АСУ, а затем – алгоритмическую.

Структурные схемы могут составляться с большей или меньшей степенью детализации. Схемы, на которых показаны лишь главные или укрупненные части АСУ, называются обобщенными (рисунок 1.1).

Функциональная структура (схема) – структура (схема), отражающая функции (целевые назначения) отдельных частей АСУ.

Таковыми функциями могут быть:

- получение информации о состоянии объекта управления;
- преобразование сигналов;
- сравнение сигналов и т.п.

В качестве частей функциональной структуры (схемы) АСУ рассматриваются функциональные устройства. Названия устройств указывают на выполнение определенной функции. Например:

- датчик;
- усилитель;
- блок сравнения;
- управляющий блок;
- исполнительное устройство и т.п.

На рисунке 1.2 приведен пример функциональной схемы АСУ.

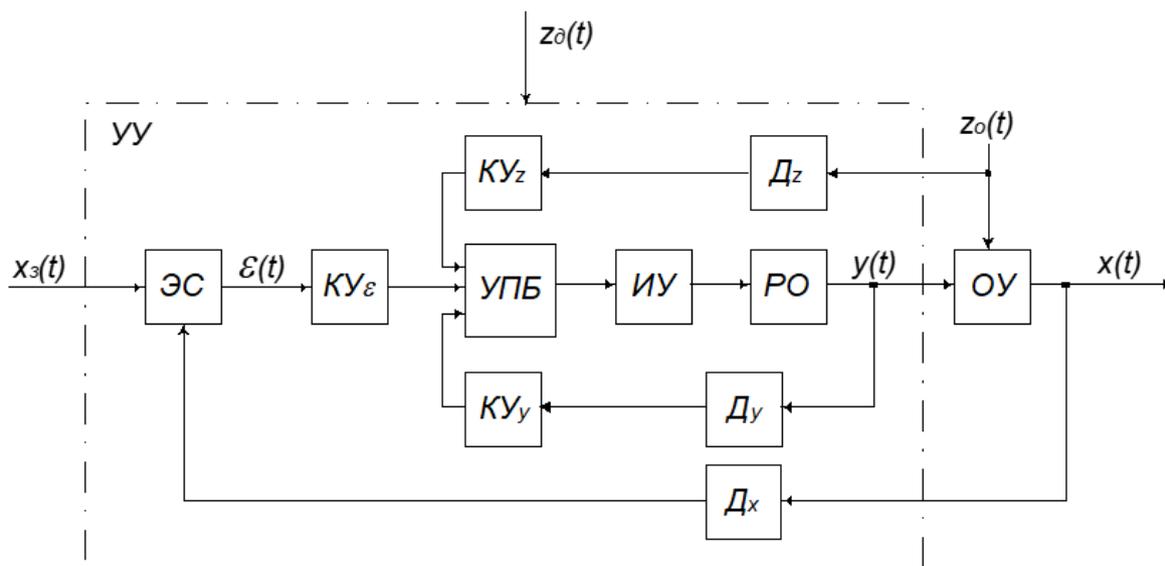


Рисунок 1.2 – Пример функциональной схемы автоматизированной системы управления

На рисунке 1.2 представлены следующие обозначения:

Д – датчик – предназначен для получения сигнала, пропорционального определенному воздействию;

ЭС – элемент сравнения – служит для получения сигнала, пропорционального отклонению управляемой величины  $x(t)$  от задающего воздействия  $x_3(t)$ ;

КУ – корректирующее устройство – предназначено для улучшения качества управления;

УПБ – усилительно-преобразующий блок – служит для усиления сигнала и придания ему определенной формы;

РО – регулирующий орган – служит для непосредственного воздействия на регулируемую среду (примеры РО: вентиль, задвижка, тиристор и т.п.);

ИУ – исполнительное устройство – предназначено для приведения в действие регулирующего органа (примеры ИУ: электродвигатель, электромагнит и т.п.).

Алгоритмическая структура (схема) – структура (схема), представляющая собой совокупность взаимосвязанных алгоритмических звеньев и характеризующая алгоритмы преобразования информации в АСУ.

При этом, алгоритмическое звено – часть алгоритмической структуры АСУ, соответствующая определенному математическому или логическому алгоритму преобразования сигнала.

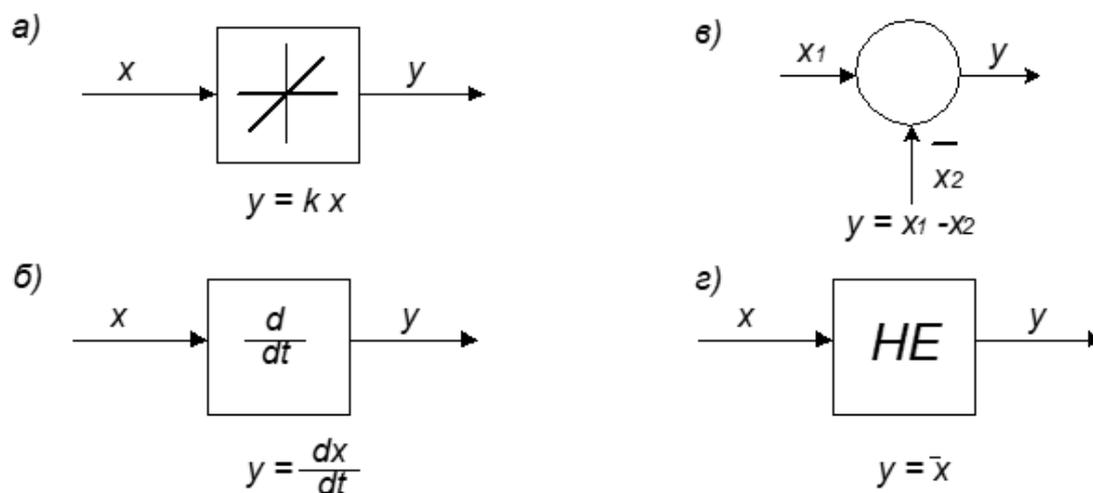
Если алгоритмическое звено выполняет одну простейшую математическую или логическую операцию, то его называют элементарным алгоритмическим звеном. На схемах алгоритмические звенья изображают прямоугольниками, внутри которых записывают соответствующие операторы преобразования сигналов. Иногда вместо операторов в формульном виде приводят графики зависимости выходной величины от входной или графики переходных функций.

Различают следующие виды алгоритмических звеньев:

- статическое;
- динамическое;
- арифметическое;
- логическое.

Статическое звено – звено, преобразующее входной сигнал в выходной мгновенно (без инерции).

Связь между входным и выходным сигналами статического звена описывается обычно алгебраической функцией. К статическим звеньям относятся различные безынерционные преобразователи, например, резистивный делитель напряжения. На рисунке 1.3 показано условное изображение элементарных алгоритмических звеньев.



а – статическое; б – динамическое; в – арифметическое; г – логическое  
 Рисунок 1.3 – Условные изображения элементарных алгоритмических звеньев

Динамическое звено – звено, преобразующее входной сигнал в выходной в соответствии с операциями интегрирования и дифференцирования во времени.

Связь между входным и выходным сигналами динамического звена описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями.

К классу динамических звеньев относятся элементы АСУ, обладающие способностью накапливать какой-либо вид энергии или вещества, например, интегратор на основе электрического конденсатора.

Арифметическое звено – звено, осуществляющее одну из арифметических операций: суммирование, вычитание, умножение, деление.

Наиболее часто встречающееся в автоматике арифметическое звено – звено, выполняющее алгебраическое суммирование сигналов, называют сумматором.

Логическое звено – звено, выполняющее какую-либо логическую операцию: логическое умножение («И»), логическое сложение («ИЛИ»), логическое отрицание («НЕ») и т.д.

Входной и выходной сигналы логического звена являются обычно дискретными и рассматриваются как логические переменные.

Конструктивная структура (схема) – структура (схема), отражающая конкретное схемное, конструктивное и прочее исполнение АСУ.

К конструктивным схемам относятся: кинематические схемы устройств, принципиальные и монтажные схемы электрические соединений и т. д. Так как ТАУ имеет дело с математическими моделями АСУ, то конструктивные схемы интересуют в значительно меньшей степени чем функциональные и алгоритмические.

Классификация АСУ может быть осуществлена по различным принципам и признакам, характеризующим назначение и конструкцию систем, вид применяемой энергии, используемые алгоритмы управления и функционирования и т.д.

Рассмотрим первоначально классификацию АСУ по наиболее важным для теории управления признакам, которые характеризуют алгоритм функционирования и алгоритм управления АСУ.

В зависимости от характера изменения задающего воздействия во времени АСУ разделяют на три класса:

- стабилизирующие;
- программные;
- следящие.

Стабилизирующая АСУ – система, алгоритм функционирования которой содержит предписание поддерживать значение управляемой величины постоянным:

$$x(t) \approx x_3 = \text{const.} \quad (1.3)$$

Знак  $\approx$  означает, что управляемая величина поддерживается на заданном уровне с некоторой ошибкой.

Стабилизирующие АСУ самые распространенные в промышленной автоматике. Их применяют для стабилизации различных физических величин, характеризующих состояние технологических объектов. Примером стабилизирующей АСУ является система регулирования возбуждения синхронного генератора.

Программная АСУ – система, алгоритм функционирования которой содержит предписание изменять управляемую величину в соответствии с заранее заданной функцией времени:

$$x(t) \approx x_3(t) = f_{\text{п}}(t). \quad (1.4)$$

Примером программной АСУ является система управления активной мощностью нагрузки синхронного генератора на электрической станции в течение суток. Управляемой величиной в системе служит активная мощность нагрузки  $P$  генератора. Закон изменения задания активной мощности  $P_3$  (задающего воздействия) определен как функция времени  $t$  в течение суток (рисунок 1.4).

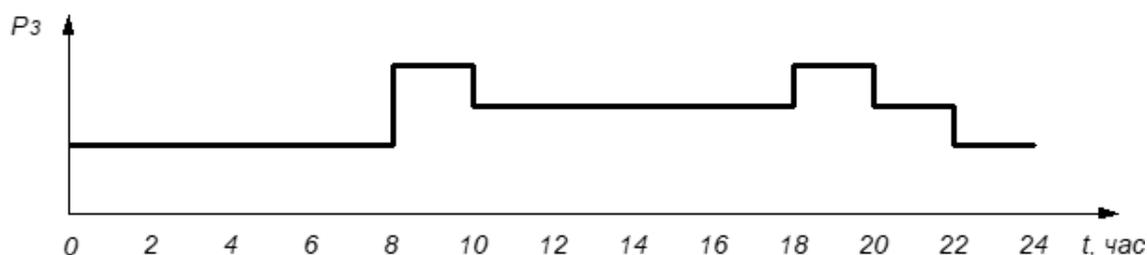


Рисунок 1.4 – Закон изменения задания активной мощности

Следящая АСУ – система, алгоритм функционирования которой содержит предписание изменять управляемую величину в соответствии с заранее известной функцией времени:

$$x(t) \approx x_3(t) = f_c(t). \quad (1.5)$$

Примером следящей АСУ является система управления активной мощностью нагрузки синхронного генератора на электрической станции в течение суток. Управляемой величиной в системе служит активная мощность нагрузки  $P$  генератора. Закон изменения задания активной мощности  $P_3$  (задающего воздействия) определяется, например, диспетчером энергосистемы и имеет неопределенный характер в течение суток.

В стабилизирующих, программных и следящих АСУ цель управления заключается в обеспечении равенства или близости управляемой величины  $x(t)$  к ее заданному значению  $x_3(t)$ . Такое управление, осуществляемое с целью поддержания, называется регулированием.

$$x(t) \approx x_3(t). \quad (1.6)$$

Управляющее устройство, осуществляющее регулирование, называется регулятором, а сама система – системой регулирования.

В зависимости от конфигурации цепи воздействий различают три вида АСУ:

- с разомкнутой цепью воздействий (разомкнутая система);
- с замкнутой цепью воздействий (замкнутая система);
- с комбинированной цепью воздействий (комбинированная система).

Разомкнутая АСУ – система, в которой не осуществляется контроль управляемой величины, т.е. входными воздействиями ее управляющего устройства являются только внешние (задающее и возмущающее) воздействия.

Разомкнутые АСУ можно разделить в свою очередь на два типа:

- осуществляющие управление в соответствии с изменением только задающего воздействия (рисунок 1.5, а);
- осуществляющие управление в соответствии с изменением и задающего и возмущающего воздействий (рисунок 1.5, б).

Алгоритм управления разомкнутой системы первого типа имеет вид

$$y(t) = A_y [x_3(t)]. \quad (1.7)$$

Чаще всего оператор  $A_y$  устанавливает пропорциональную связь между задающим воздействием  $x_3(t)$  и управляющим воздействием  $y(t)$ , а сама система в этом случае осуществляет программное управление.

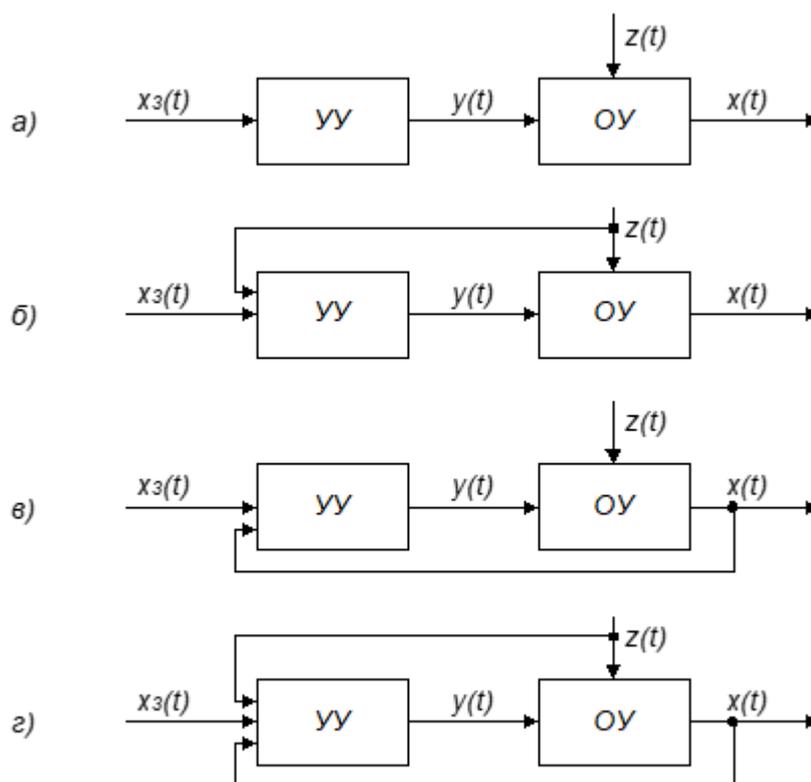


Рисунок 1.5 – Функциональные схемы АСУ: с разомкнутой (а, б), замкнутой (в) и с комбинированной (г) цепями воздействий

Системы первого типа работают с достаточной эффективностью лишь при условии, если влияние возмущений на управляемую величину невелико и все элементы разомкнутой цепи обладают достаточно стабильными характеристиками.

В системах управления по возмущению (рисунок 1.5 б) управляющее воздействие зависит от возмущающего и задающего воздействий:

$$y(t) = A_y [x_3(t), z(t)]. \quad (1.8)$$

В большинстве случаев разомкнутые системы управления по возмущению выполняют функции стабилизации управляемой величины.

Преимущество разомкнутых систем управления по возмущению – их быстрое действие: они компенсируют влияние возмущения еще до того, как оно проявится на выходе объекта. Но применимы эти системы лишь в том случае, если на управляемую величину действуют одно или два возмущения и есть возможность измерения этих возмущений. Например, сравнительно легко можно измерять температуру, расход воды, ток нагрузки генератора. Поэтому если эти величины действуют на объект как возмущения, то обычно стремятся стабилизиро-

вать их при помощи дополнительной системы или ввести в основную систему управления данным объектом сигнал, пропорциональный такому воздействию.

Замкнутая АСУ (АСУ с обратной связью) – система, в которой входными воздействиями ее управляющего устройства являются как внешнее (задающее), так и внутреннее (контрольное) воздействия.

Управляющее воздействие в замкнутой системе (рисунок 1.6, в) формируется в большинстве случаев в зависимости от величины и знака отклонения истинного значения управляемой величины от ее заданного значения:

$$y(t) = A_y[\varepsilon(t)], \quad (1.9)$$

где  $\varepsilon(t) = x_3(t) - x(t)$  – сигнал ошибки (сигнал рассогласования).

Замкнутую систему называют часто системой управления по отклонению. В замкнутой системе контролируется непосредственно управляемая величина и тем самым при выработке управляющего воздействия учитывается действие всех возмущений, влияющих на управляемую величину. В этом заключается преимущество замкнутых систем. Но из-за наличия замкнутой цепи воздействий в этих системах могут возникать колебания, которые в некоторых случаях делают систему неработоспособной. Кроме того, сам принцип действия замкнутых систем (принцип управления по отклонению) допускает нежелательные изменения управляемой величины: вначале возмущение должно проявиться на выходе, система “почувствует” отклонение и лишь потом выработает управляющее воздействие, направленное на устранение этого отклонения. Такая “медлительность” снижает эффективность управления. Несмотря на наличие определенных недостатков, этот принцип управления широко применяется при создании АСУ.

Комбинированная АСУ – система, в которой входными воздействиями ее управляющего устройства являются как внешние (задающее и возмущающее), так и внутреннее (контрольное) воздействия.

В комбинированных системах (рисунок 1.5, г) имеется две цепи воздействий – по заданию и по возмущению, и управляющее воздействие формируется согласно оператору:

$$y(t) = A_z[\varepsilon(t)] + A_v[z(t)]. \quad (1.10)$$

Эффективность работы комбинированной АСУ всегда больше, чем у порознь функционирующих замкнутой или разомкнутой систем.

В зависимости от способа выработки управляющего воздействия замкнутые АСУ разделяют на:

– беспойсковые;

– поисковые.

Беспоисковая АСУ – АСУ, в которой управляющее воздействие вырабатывается в результате сравнения истинного значения управляемой величины с заданным значением.

Такие системы применяют для управления сравнительно несложными объектами, характеристики которых достаточно хорошо изучены и для которых заранее известно в каком направлении и на сколько нужно изменить управляющее воздействие при определенном отклонении управляемой величины от заданного значения.

Поисковая АСУ – АСУ, в которой управляющее воздействие формируется с помощью пробных управляющих воздействий и путем анализа результатов этих пробных воздействий.

Такую процедуру поиска правильного управляющего воздействия приходится применять в тех случаях, когда характеристики объекта управления меняются или известны не полностью; например, известен вид зависимости управляемой величины от управляющего воздействия, но неизвестны числовые значения параметров этой зависимости. Поэтому поисковые системы называют еще системами с неполной информацией.

Наиболее часто принцип автоматического поиска управляющих воздействий применяют для управления объектами, характеристики которых имеют экстремальный характер. Целью управления является отыскание и поддержание управляющих воздействий, соответствующих экстремальному значению управляемой величины. Такие поисковые системы называют экстремальными (оптимальными) системами.

По такому принципу можно, например, строить АСУ режимом тепловой электрической станции в условиях нестабильности теплотворной способности топлива, температуры охлаждающей воды, режима нагрузки и т.д. с целью обеспечения минимума затрат на производство тепловой и электрической энергии.

Особый класс АСУ образуют системы, которые способны автоматически приспособливаться к изменению внешних условий и свойств объекта управления, обеспечивая при этом необходимое качество управления путем изменения структуры и параметров управляющего устройства. Они называются адаптивными (самоприспосабливающимися) системами. В составе адаптивной АСУ имеется дополнительное автоматическое устройство, которое меняет алгоритм управления основного управляющего устройства таким образом, чтобы АСУ в целом осуществляла заданный алгоритм функционирования. Алгоритм функционирования адаптивной АСУ предписывает обычно максимизацию показателя качества, который характеризует либо свойства процесса управления в АСУ в целом (быстродействие, точность и т.д.), либо свойства процессов, протекающих в объекте управления (производительность, достижение наивысшего коэффици-

ента полезного действия, минимизация затрат и т. д.). Поэтому адаптивные АСУ являются, как правило, еще и оптимальными.

По некоторым дополнительным признакам АСУ классифицируются следующим образом.

В зависимости от вида сигналов, действующих в системах, АСУ разделяют на:

- непрерывные;
- дискретные.

Непрерывная АСУ – АСУ, в которой действуют непрерывные (аналоговые), определенные в каждый момент времени сигналы.

Дискретная АСУ – АСУ, в которой действует хотя бы один дискретный, определенный только в некоторые моменты времени сигнал.

К дискретным АСУ относятся, например, АСУ, имеющие в своем составе цифровые вычислительные устройства: микропроцессоры, контроллеры, электронные вычислительные машины.

По степени зависимости управляемой величины в установившемся режиме от величины возмущающего воздействия АСУ делят на:

- статические;
- астатические.

Статическая АСУ – АСУ, в которой имеется зависимость управляемой величины в установившемся режиме от величины возмущающего воздействия.

Астатическая АСУ – АСУ, в которой отсутствует зависимость управляемой величины в установившемся режиме от величины возмущающего воздействия.

По виду дифференциальных уравнений, описывающих элементы АСУ они делятся на:

- линейные;
- нелинейные.

Линейные АСУ – АСУ, все элементы которых описываются линейными дифференциальными и/или алгебраическими уравнениями.

Нелинейные АСУ – АСУ, хотя бы один элемент которой описывается нелинейными дифференциальными и/или алгебраическими уравнениями.

В зависимости от принадлежности источника энергии, при помощи которого создается управляющее воздействие, различают АСУ:

- прямого действия;
- непрямого действия.

АСУ прямого действия – АСУ, в которой управляющее воздействие создается при помощи энергии объекта управления.

К ним относятся простейшие системы стабилизации (уровня, расхода, давления и т. п.), в которых воспринимающий элемент через рычажную систему не

посредственно действует на исполнительный орган (заслонку, клапан и т. д.).

## 1.4 Законы регулирования

В составе структуры САР содержится управляющее устройство, которое называется регулятором и выполняет основные функции управления, путем выработки управляющего воздействия  $U$  в зависимости от ошибки (отклонения), т.е.  $U = f(\Delta)$ . Закон регулирования определяет вид этой зависимости без учёта инерционности элементов регулятора. Закон регулирования определяет основные качественные и количественные характеристики систем.

Различают линейные и нелинейные законы регулирования. Кроме того, законы регулирования могут быть реализованы в непрерывном виде или в цифровом. Цифровые законы регулирования реализуются путем построения регуляторов с помощью средств вычислительной техники (микро ЭВМ или микропроцессорных систем).

Рассмотрим основные линейные законы регулирования. Простейшим является пропорциональный закон и регулятор в этом случае называют П- регулятором. При этом  $U=U_0+k\Delta$ , где  $U_0$ -постоянная величина,  $k$  - коэффициент пропорциональности. Основным достоинством П-регулятора является простота. По существу, это есть усилитель постоянного тока с коэффициентом усиления  $k$ . Недостатки П-регулятора заключаются в невысокой точности регулирования, особенно для объектов с плохими динамическими свойствами.

Интегральный закон регулирования и соответствующий И-регулятор реализует следующую зависимость:

$$U = U_0 + \frac{1}{T} \int_0^t \Delta dt, \quad (1.11)$$

где  $T$  – постоянная времени интегрирования.

Техническая реализация И-регулятора представляет собой усилитель постоянного тока с емкостной отрицательной обратной связью. И-регуляторы обеспечивают высокую точность в установившемся режиме. Вместе с тем И-регулятор вызывает уменьшение устойчивости переходного процесса и системы в целом.

Пропорционально-интегральный закон регулирования позволяет объединить положительные свойства пропорционального и интегрального законов регулирования. В этом случае ПИ-регулятор реализует зависимость

$$U = k_1\Delta + k_2 \frac{1}{T} \int_0^t \Delta dt. \quad (1.12)$$

Мощным средством улучшения поведения САР в переходном режиме является введение в закон регулирования производной от ошибки. Часто эта производная вводится в пропорциональный закон регулирования. В этом случае имеем пропорционально-дифференциальный закон регулирования, регулятор является ПД- регулятором, который реализует зависимость:

$$U = k_1\Delta + k_2 \frac{d\Delta}{dt}. \quad (1.13)$$

Кроме ПИ и ПД регуляторов, часто на практике используют ПИД - регуляторы, которые реализуют пропорционально–интегрально- дифференциальный закон регулирования:

$$U = k_1\Delta + k_2 \frac{d\Delta}{dt} + k_3 \frac{1}{T} \int_0^t \Delta dt \quad (1.14)$$

Среди нелинейных законов регулирования наиболее распространены релейные законы. Существуют двухпозиционный и трехпозиционный законы регулирования. Аналитически двухпозиционный закон регулирования записывается следующим образом:

$$U = \begin{cases} -U_{\max}, & \text{при } \Delta < 0 \\ U_{\max}, & \text{при } \Delta > 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

Трехпозиционный закон регулирования имеет следующий вид:

$$U = \begin{cases} -U_{\max}, & \text{при } \Delta < -\Delta_H \\ 0, & \text{при } -\Delta_H < 0 < \Delta_H \\ U_{\max}, & \text{при } \Delta > \Delta_H \end{cases} \quad (1.16)$$

На рисунке 1.6 представлены в графическом виде релейные законы регулирования.

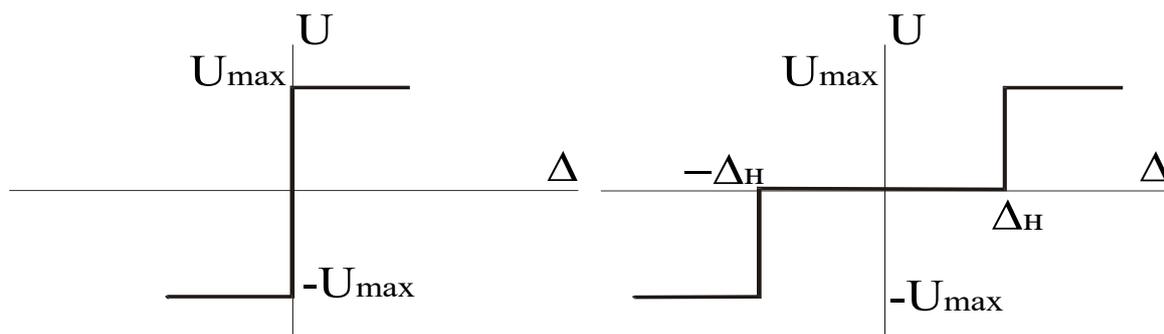


Рисунок 1.6 – Графическое представление релейных законов регулирования

При трехпозиционном законе регулирования величина  $\Delta_H$  определяет зону нечувствительности регулятора.

Применение релейных законов позволяет при высоком быстродействии получить такие результаты, которые невозможно осуществить с помощью линейных законов.

### 1.5 Основные условия и критерии устойчивости

Понятие устойчивости является важнейшей качественной оценкой динамических свойств САР. Устойчивость САР связана с характером её поведения после прекращения внешнего воздействия. Это поведение описывается свободной составляющей решенная дифференциального уравнения, которое описывает систему. Если свободная составляющая рабочего параметра объекта управления после прекращения внешнего воздействия стремится к нулю, то такая система является устойчивой. Другими словами - устойчивость системы это есть затухание ее переходных процессов.

Если свободная составляющая стремится к конечному значению или имеет вид гармонических колебаний с постоянной амплитудой, то система считается нейтральной. В том случае, если свободная составляющая неограниченно возрастает или имеет вид гармонических колебаний с возрастающей амплитудой, то система считается неустойчивой.

Оценка устойчивости производится на основе результатов исследования свободной составляющей, которая представляет собой решение однородного дифференциального уравнения при заданных начальных условиях:

$$(a_0 S^n + a_1 S^{n-1} + \dots + a_n) y = 0. \quad (1.17)$$

Решение уравнения (1.17) представляет собой сумму слагаемых, вид которых определяется значениями корней характеристического уравнения:

$$a_0 S^n + a_1 S^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (1.18)$$

Если система представлена в виде передаточной функции, то для анализа устойчивости используется ее собственный оператор (знаменатель передаточной функции).

Полученные корни характеристического уравнения могут быть представлены в виде точек на комплексной плоскости.

Для устойчивых систем необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения лежали слева от мнимой оси комплексной плоскости.

Если хотя бы один вещественный корень или пара комплексных сопряженных корней находится справа от мнимой оси, то система является неустойчивой. Если имеется нулевой корень или пара чисто мнимых корней, то система считается нейтральной (находящейся на границе устойчивости и неустойчивости). Таким образом, мнимая ось комплексной плоскости является границей устойчивости.

С целью упрощения анализа устойчивости систем разработано ряд специальных методов, которые получили название критерии устойчивости. Критерии устойчивости делятся на две разновидности: алгебраические и частотные. Алгебраические критерии являются аналитическими, а частотные – графоаналитическими. Критерии устойчивости позволяют также оценить влияние параметров системы на устойчивость.

***Алгебраический критерий устойчивости Гурвица.***

Алгебраический критерий Гурвица находит широкое применение при анализе САР. Первоначально, из коэффициентов уравнения (1.17) составляется матрица главного определителя:

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_n \end{vmatrix}$$

По диагонали матрицы от верхнего левого угла записываются по порядку все коэффициенты уравнения (1.17), начиная с  $a_1$ . Затем каждый столбец матрицы дополняется таким образом, чтобы вверх от диагонали индексы коэффициентов увеличивались, а вниз – уменьшались.

Для устойчивой системы необходимым и достаточным является то, чтобы при  $a_0 > 0$  все диагональные определители были также положительными, т.е.

$$\Delta_1 = a_1 > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0$$

и т.д.

Система будет нейтральной в том случае, если  $\Delta_n = 0$  и все предыдущие определители положительны.

***Частотный критерий устойчивости Михайлова.***

Критерий Михайлова предполагает построение годографа на комплексной плоскости. Для построения годографа из уравнения (1.17) путем подстановки  $S = j\omega$  получают аналитическое выражение вектора  $D(j\omega)$ :

$$D(j\omega) = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_n \quad (1.19)$$

Уравнение (1.19) является комплексным и может быть представлено в виде:

$$D(j\omega) = X + jY, \quad (1.20)$$

где

$$X = a_n - \omega^2 a_{n-2} + \omega^4 a_{n-4} - \dots,$$

$$Y = \omega(a_{n-1} - \omega^2 a_{n-3} + \omega^4 a_{n-5} - \dots)$$

Построение годографа производится по уравнению вектора  $D(j\omega)$  при изменении частоты от 0 до  $\infty$ .

Для случая устойчивости системы  $n$ -го порядка необходимо и достаточно, чтобы при  $\omega = 0$  годограф начинался на вещественной положительной оси и обходил против часовой стрелки  $n$  квадрантов, нигде не обращаясь в нуль.

Если годограф начинается в нулевой точке комплексной плоскости или проходит через эту точку при определенной частоте, то система считается нейтральной.

#### ***Частотный критерий устойчивости Найквиста.***

Данный критерий позволяет по амплитудно-фазовой частотной характеристике разомкнутой системы оценить устойчивость системы. АФЧХ может быть получена экспериментально или аналитически. Аналитическое построение АФЧХ производится обычными методами.

Для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы при изменении частоты от 0 до  $\infty$  не охватывала точку с координатами  $-1, j0$ . Если АФЧХ разомкнутой системы проходит через точку с координатами  $-1, j0$ , то система будет нейтральной.

Критерий Найквиста позволяет наглядно проследить влияние изменения параметров передаточной функции на устойчивость системы.

### **1.6 Показатели качества регулирования**

Кроме устойчивости САР анализируются с точки зрения качества регулирования. В общем случае качество регулирования представляет собой совокупность точности в установившемся режиме и качества переходных процессов.

Оценки качества могут быть прямыми и косвенными. В свою очередь прямые и косвенные могут быть статическими и динамическими. Динамические оценки характеризуют переходной процесс, а статические - установившийся режим.

Прямые оценки определяются непосредственно по переходной характери-

стике по каналу управления или возмущения (рисунок 1.7).

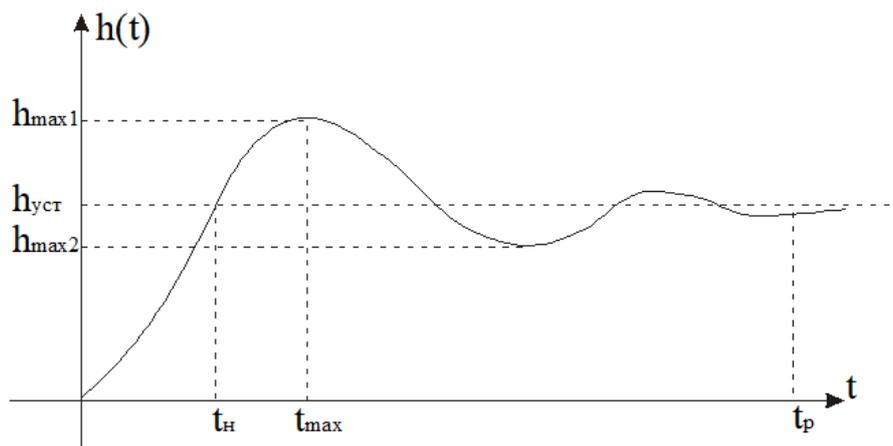


Рисунок 1.7 – Переходная характеристика

Если переходная характеристика представляет собой затухающие колебания, то система считается устойчивой. При этом допускается не более 2-3 колебаний. К основным прямым оценкам относятся следующие:

– перерегулирование. Перерегулирование есть разность между максимальным значением  $h_{\max 1}$  переходной характеристики и её установившимся значением, выраженная в процентах:

$$\sigma = \frac{|h_{уст} - h_{\max}|}{h_{уст}} \cdot 100\%. \quad (1.21)$$

В большинстве случаев требуется, чтобы перерегулирование не превышало 10 - 30%.

Время регулирования оценивает длительность переходного процесса. Так как теоретически длительность переходного процесса идеальных систем равно  $\infty$ , за время регулирования принимается тот интервал времени, по истечении которого отклонение переходной характеристики от установившегося значения не превышает некоторой заданной величины  $q$ . Значение  $q$  выбирают обычно равным 5%.

– Время регулирования,  $t_p$ . Оно представляет собой время, за которое регулируемая величина в переходном процессе начинает отличаться от установившегося значения менее, чем на заранее заданное значение, которое называется точность регулирования.

– Время нарастания,  $t_n$ . Оно характеризует первое пересечение переходного процесса с установившимся значением.

– Время достижения первого максимума,  $t_{\max}$ .

При заданных значениях  $\sigma$  и  $t_p$  переходная характеристика не должна вы-

ходить из определенной области, которая называется областью допустимых отклонений.

В статическом режиме САР оценивается коэффициентом статизма (астатизма):

$$\Delta = \frac{x - h_{уст}}{x}. \quad (1.22)$$

где  $x$  – задание;

$h_{уст}$  – установившееся значение рабочего параметра.

Рассмотренные выше оценки качества относятся к прямым. Вместе с тем существуют косвенные, среди которых наибольшее распространение получили интегральные оценки. Существует две разновидности интегральной оценки: линейная и квадратичная. Численно линейная интегральная оценка равна площади, ограниченной кривой ошибки или разности  $X - Y$ . Значение  $Y$  берется в пределах временного интервала от 0 до  $t_p$ . Линейная интегральная оценка определяется следующим выражением:

$$J_0 = \int_0^{t_p} (x - y) dt. \quad (1.23)$$

Эта оценка может быть применена только при монотонных переходных процессах при отсутствии колебаний.

Квадратичная интегральная оценка применяется как при монотонных, так и при колебательных переходных процессах и определяется следующим соотношением:

$$J_0 = \int_0^{t_p} (x - y)^2 dt \quad (1.24)$$

Недостаток квадратичной интегральной оценки заключается в том, что различные по характеру переходные процессы могут иметь одну и ту же величину оценки.

## **1.7 Связь качественных показателей и показателей системы автоматизации**

Математические методы теории автоматического управления являются основой для синтеза замкнутых систем регулирования с заданными статическими и динамическими показателями. Наиболее общие представления о возможностях реализации этих показателей даёт известная из теории автоматического управления связь основных показателей логарифмической амплитудной характеристики

(ЛАЧХ) разомкнутого контура регулирования.

Структурная схема любого контура регулирования представлена на рисунке 1.8.

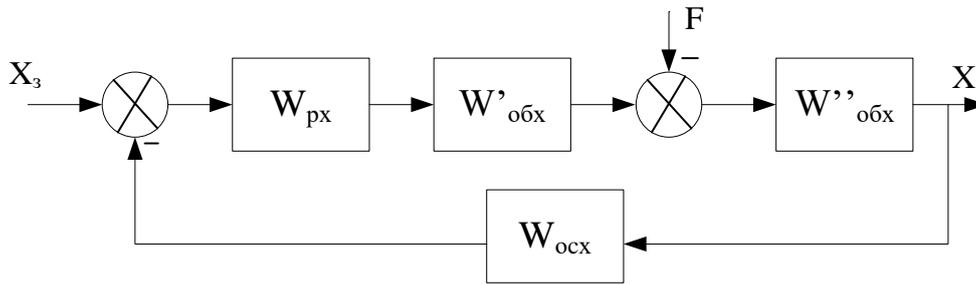


Рисунок 1.8 – Структурная схема контура регулирования

Для удобства определения ошибки регулирования схема может быть преобразована к единичной обратной связи (рисунок 1.9).

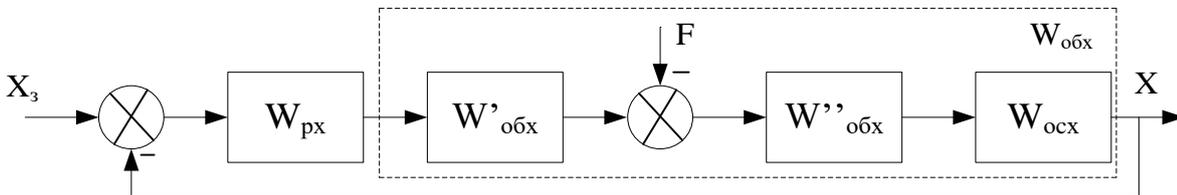


Рисунок 1.9 – Структурная схема контура регулирования с единичной обратной связью

При этом передаточная функция разомкнутого контура по управляющим воздействиям (при условии, что возмущающее воздействие  $F=0$ ) примет вид:

$$W_{раз}(p) = W_{px}(p) \cdot W_{обх}(p) = W_{px}(p) \cdot W'_{обх}(p) \cdot W''_{обх}(p) \cdot W_{осх}(p), \quad (1.25)$$

где  $W_{px}(p)$  и  $W_{обх}(p)$  – передаточные функции регулятора переменной  $x$  и объекта регулирования;

$W''_{обх}(p)$  – передаточная функция объекта по возмущающему воздействию  $F$ ;

$W_{осх}(p)$  – передаточная функция в цепи обратной связи контура регулирования.

Если для рассматриваемого контура определить передаточную функцию ошибки по управляющему и возмущающему воздействиям, то с их помощью можно получить известное из теории автоматического управления изображение суммарной ошибки:

$$\Delta X_{\Sigma} = \frac{X_3(p) + F(p) \cdot W''_{обх}(p) \cdot W_{оцх}(p)}{1 + W_{раз}(p)} \quad (1.26)$$

В общем случае применительно к системам автоматизированного электропривода передаточная функция разомкнутого контура регулирования может быть представлена в виде:

$$W_{раз}(p) = \frac{\kappa \cdot \prod_{j=1}^n (T_j p + 1)}{p^v \cdot \prod_{i=1}^m (T_i p + 1)}, \quad (1.27)$$

где  $v$  – порядок астатизма;

$m, n$  – число последовательно включенных инерционных и форсирующих звеньев;

$\kappa$  – коэффициент усиления разомкнутого контура

Для того чтобы после замыкания контура отрицательной обратной связью обеспечивалась требуемая точность и динамические показатели качества регулирования необходимо, чтобы ЛАЧХ разомкнутого контура имела вполне определенный вид и параметры (рисунок 1.10).

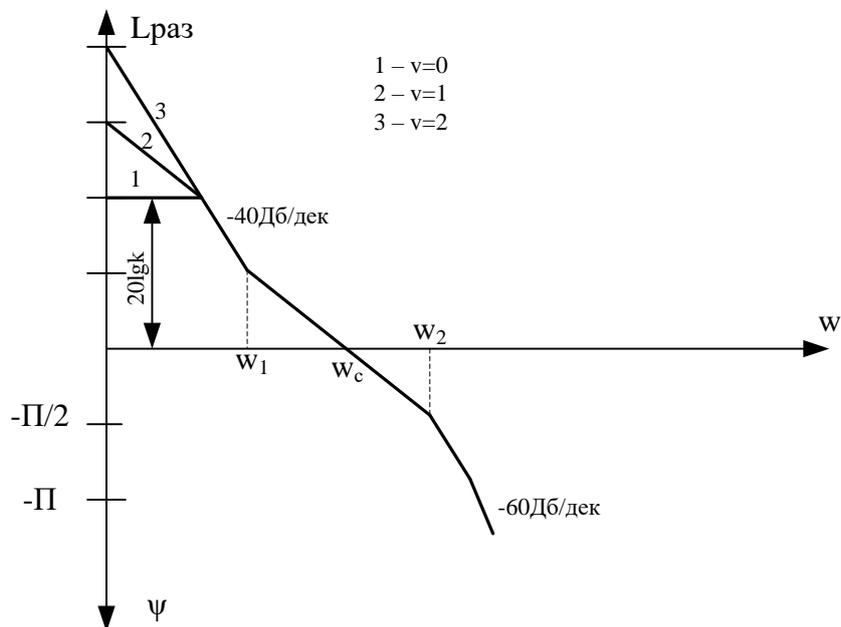


Рисунок 1.10 – ЛАЧХ разомкнутого контура

Чтобы удовлетворять требованиям, предъявляемым к электроприводу в отношении точности регулируемых параметров координат необходимо формировать низкочастотную область характеристики определенного вида. Эта область определяется коэффициентом « $\kappa$ » и порядком астатизма системы « $v$ ». Если  $v=0$ , то в разомкнутом контуре регулирования отсутствуют интегрирующие зве-

няя. Система является статической системой регулирования, при этом статическая ошибка регулирования определяется в соответствии с вышеприведенным уравнением и коэффициентом усиления контура «к».

Для получения требуемой точности необходимо предусмотреть коэффициент усиления, отвечающий условию:

$$K \geq \frac{X_{з\max}}{\Delta X_{\text{доп}}}, \quad (1.28)$$

где  $X_{з\max}$  – максимально заданная величина;  
 $\Delta X_{\text{доп}}$  – дополнительная ошибка регулирования.

Если требуется исключить статическую ошибку по заданию, то необходимо, чтобы в контуре был интегрирующий элемент ( $\nu=1$ ). При этом будет иметь место динамическая ошибка, возникающая при изменениях задания.

Увеличение порядка астатизма ( $\nu=2$ ) повышает в принадлежащем коэффициенте усиления «к» динамическую точность регулирования.

Динамические показатели качества регулирования определяются, главным образом, среднечастотной асимптотой ЛАЧХ (от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ ). Для получения достаточно запаса устойчивости необходимо, чтобы в районе частоты среза  $\omega_c$  был достаточно протяжённый участок с наклоном  $-20\text{Дб/дек}$ . Чем шире этот участок, тем больше (выше) на частоте среза запас по фазе  $\Delta\Psi(\omega_c) = -\Pi - \Psi(\omega_c)$ .

От запаса по фазе на частоте среза зависит колебательность и перерегулирование (рисунок 1.11)

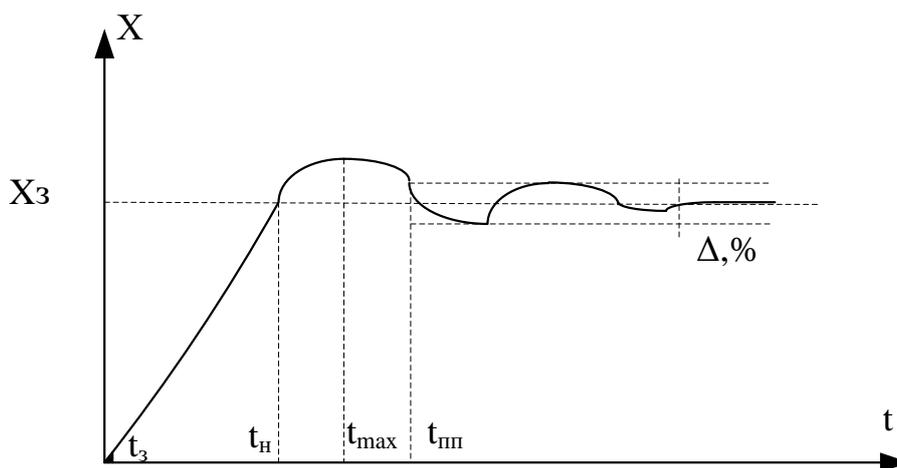


Рисунок 1.11 – Переходный процесс

Перерегулирование определяется выражением:

$$\sigma = \frac{X_{\max} - X_{уст}}{X_{уст}} \cdot 100\% = (1 - \sin[\Delta\Psi(\omega_c)]) \cdot 100\% \quad (1.29)$$

Частота среза ( $w_c$ ) определяет быстродействие контура регулирования. С ней связано время нарастания ( $t_n$ ):

$$t_n = \frac{1,5 - 2}{w_c} \quad (1.30)$$

Так же частотой среза связано время максимума:

$$t_{max} = \frac{\pi}{w_c} \quad (1.31)$$

Ближайшая нижняя частота сопряжения  $w_1$  влияет на перерегулирование. По мере приближения  $w_1$  к  $w_c$  запас по фазе  $\Delta\psi$  уменьшается и перерегулирование возрастает. Частота  $w_1$  определяет также время переходного процесса:

$$t_{III} = \frac{\pi}{w_c} + \frac{2}{w_1} \quad (1.32)$$

Ближайшая к частоте среза верхняя частота сопряжения  $w_2$  и вся высокочастотная ЛАЧХ сказываются лишь на начальном участке переходного процесса. Чем ближе  $w_2$  к  $w_c$ , тем больше участок запаздывания  $t_3$ .

Таким образом, требования к точности динамическим показателям электропривода при регулировании определённой координаты позволяют контролировать количественные характеристики желаемой ЛАЧХ разомкнутого контура.

При известной ЛАЧХ объекта регулирования переменной  $x$ - $L_{обх}(w)$ , желаемая ЛАЧХ разомкнутого контура  $L_{раз}(w)$  позволяет определить требуемую ЛАЧХ регулятора, вводимого в контур регулирования:

$$L_{PX}(w) = L_{РАЗ}(w) - L_{ОБХ}(w) \quad (1.33)$$

Далее решается техническая задача подбора по ЛАЧХ передаточной функции регулятора. На практике при проектировании электроприводов массового применения разработан инженерный метод последовательной коррекции. Этот метод позволяет получить определённые динамические свойства регулируемого электропривода, соответствующие так называемым стандартным настройкам.

Рассмотрим систему, представленную на рисунке 1.12.

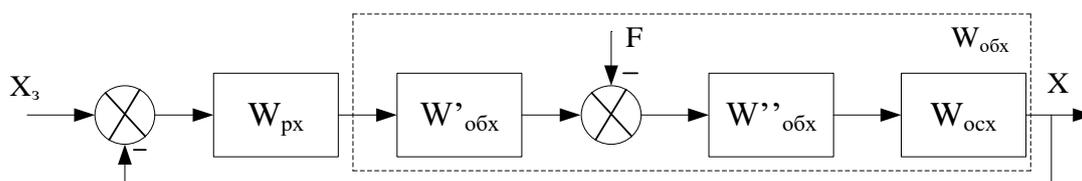


Рисунок 1.12 – Система регулирования

Примем, что в общем случае передаточная функция объекта регулирования будет иметь вид:

$$W_{ОБХ}(p) = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n}{\prod_{i=1}^m (T_i p + 1)}, \quad (1.34)$$

где  $T_i$  – постоянная времени объекта регулирования;

$K_i$  – коэффициент усиления, расположенный в порядке убывания по значению.

Предположим, что передаточная функция регулятора реализована в виде:

$$W_{РХ}(p) = \frac{\prod_{j=1}^l (T_j p + 1)}{K'_1 \cdot K'_2 \cdot \dots \cdot K'_n \cdot T_o p}, \quad (1.35)$$

где  $l$  – это число больших и средних постоянных времени.

Тогда передаточная функция разомкнутого контура будет иметь вид:

$$W_{РАЗ}(p) = W_{РХ}(p) \cdot W_{ОБХ}(p) = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n}{\prod_{i=1}^m (T_i p + 1)} \cdot \frac{\prod_{j=1}^l (T_j p + 1)}{K'_1 \cdot K'_2 \cdot \dots \cdot K'_n \cdot T_o p}. \quad (1.36)$$

Таким образом, формированием передаточной функции регулятора можно направленно изменять передаточную функцию разомкнутого контура.

Действительно, при  $K_1=K'_1$ ,  $K_2=K'_2$ , ...,  $K_n=K'_n$  и  $T_i=T_j$  передаточная функция видоизменится до:

$$W_{РАЗ}(p) = W_{РХ}(p) \cdot W_{ОБХ}(p) = \frac{1}{T_o p \cdot \prod_{i=l+1}^m (T_i p + 1)}. \quad (1.37)$$

В ней введением регулятора и подбора его параметров исключено «l» инерционных звеньев, обладающих большими и средними постоянными времени, сокращено  $n$  частных коэффициентов и введено интегрирующее звено.

Исключение из передаточной функции разомкнутого контура звеньев с большими и средними постоянными времени открывает возможности повышения быстродействия контура регулирования.

Эта операция, разумеется, не исключает реальные физические инерцион-

ные звенья из контура, однако их действия, замедляющие протекание переходных процессов компенсируется действием соответствующих форсирующих звеньев, содержащихся в регуляторе.

Пытаться компенсировать малые постоянные времени звеньев контура нецелесообразно, т.к. технические трудности реализации таких регуляторов существенно возрастают при уменьшении постоянных времени, а влияние на быстродействие привода, соответственно, убывает.

Достоинством использования последней формулы является возможность выбора постоянной времени  $T_0$ , которая и определяет быстродействие контура. Если выбрать  $T_0$  из условия, что  $T_0 > T_{i+1}$ , где  $T_{i+1}$  – наибольшая постоянная времени в контуре, то ЛАЧХ контура можно представить в виде, как показано на рисунке 1.13.

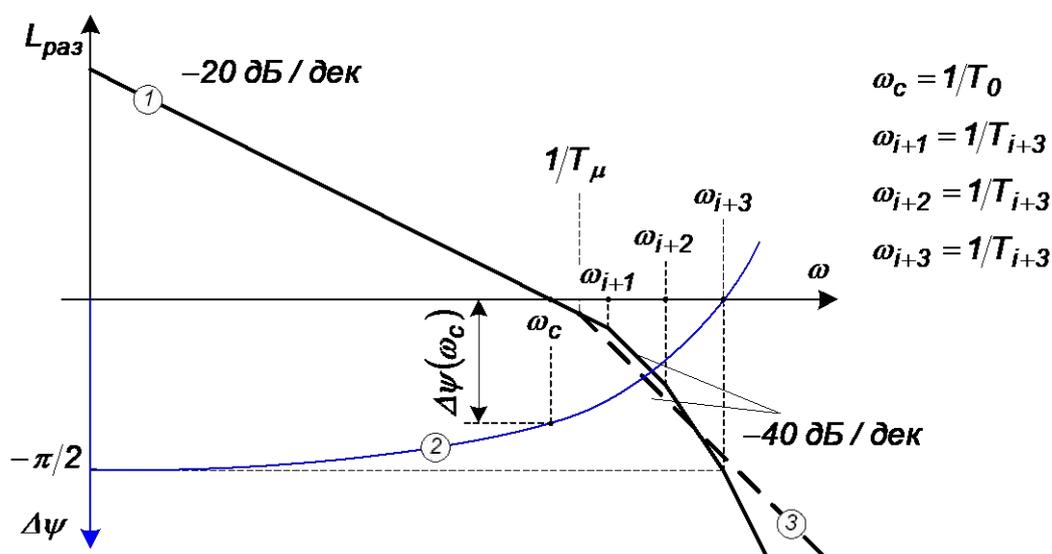


Рисунок 1.13 – Частотные характеристики контура регулирования при последовательной коррекции

Низкая и среднечастотная асимптота ЛАЧХ имеют наклон  $-20\text{дБ/дек}$  (прямая 1). Запас по фазе на частоте среза:

$$\Delta\Psi(\omega_c) = -\pi + \frac{\pi}{2} + \sum_{i+1}^m \arctg(T_i \cdot \omega_c) \quad (1.38)$$

Запас по фазе зависит от степени удалённости  $\omega_c$  от ближайшей частоты сопряжения. Углы  $\Delta\Psi(\omega_c)$  не велики, т.к. на соответствующих частотах сопряжения  $\arctg(T_i \cdot \omega_i) = \arctg 1 = \pi/4$ .

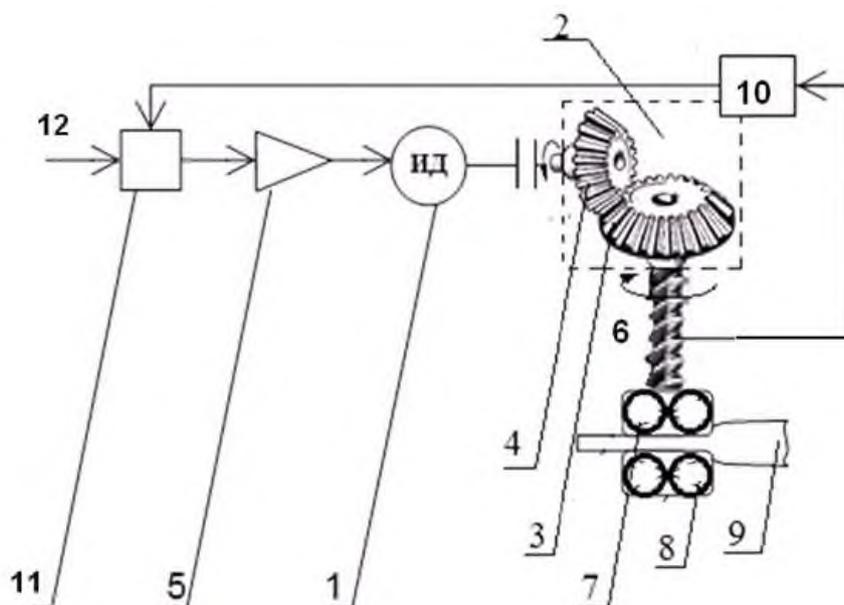
## 2 Задание на контрольную работу

Целью контрольной работы является разработка и анализ системы регулирования толщины листа при прокатке.

Для выполнения контрольной работы необходимо решить следующие задачи:

- разработать функциональную схему системы регулирования толщины листа при прокате;
- разработать структурную схему системы регулирования толщины листа при прокате;
- провести анализ устойчивости разработанной системы управления;
- проанализировать качественные показатели разработанной системы управления толщины листа при прокате.

Кинематическая схема системы регулирования толщины листа при прокатке представлена на рисунке 2.1



- 1 – исполнительный двигатель; 2 – кинематический редуктор; 3 – ведомая шестерня редуктора; 4 – ведущая шестерня редуктора; 5 – усилитель;  
6 – нажимной винт; 7 – рабочий валок; 8 – пассивный валок (с фиксировано-расположенным по высоте валом); 9 – лист проката;  
10 – оптический датчик положения валков; 11 – элемент сравнения;  
12 – эталонный сигнал

Рисунок 2.1– Кинематическая схема системы регулирования толщины листа при прокатке

Основные требования к системе по вариантам представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные требования к системе

№ варианта	Статическая ошибка воспроизведения сигнала, изменяющегося со скоростью 3 В/с	Время регулирования, с	Перерегулирование (не более), %
0.	0,03	0,3	25
1.	0,01	0,35	20
2.	0,02	0,2	40
3.	0,04	0,25	30
4.	0,01	0,23	35
5.	0,02	0,32	22
6.	0,01	0,28	25
7.	0,04	0,26	30
8.	0,02	0,27	32
9.	0,01	0,5	15
10.	0,02	0,25	30
11.	0,01	0,23	35
12.	0,04	0,2	40
13.	0,01	0,32	22
14.	0,02	0,3	24
15.	0,01	0,5	15
16.	0,04	0,35	20
17.	0,01	0,2	40
18.	0,02	0,35	20
19.	0,01	0,2	40
20.	0,04	0,25	30
21.	0,02	0,23	35
22.	0,01	0,5	15
23.	0,04	0,28	25
24.	0,01	0,26	30
25.	0,02	0,27	32
26.	0,01	0,28	25

Параметры неизменяемой части системы приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные требования к системе

№ варианта	Зона линейности усилителя мощности по входу	Максимальное выходное напряжение усилителя	Коэффициент передачи датчика обратной связи	Постоянная времени двигателя $T_d$ , с	Постоянная времени датчика $T_s$ , с	Коэффициент передачи исполнительного	Коэффициент передачи регулирующего	Коэффициент передачи объекта управления
0.	$\pm 4$	12	15	0,11	0,002	0,5	1,5	0,15
1.	$\pm 3$	12,1	13	0,09	0,003	0,4	1,1	0,11
2.	$\pm 5$	12,2	14	0,08	0,004	0,6	1,2	0,12
3.	$\pm 5$	12,4	14,5	0,1	0,001	0,4	1,3	0,13
4.	$\pm 4$	12,3	16	0,09	0,002	0,7	1,4	0,13
5.	$\pm 5$	11,8	12	0,12	0,001	0,3	1,2	0,14
6.	$\pm 3$	11,9	13	0,11	0,001	0,3	1,6	0,13
7.	$\pm 4$	11,8	14	0,12	0,003	0,6	1,4	0,16
8.	$\pm 6$	12,1	15	0,08	0,004	0,7	1,3	0,12
9.	$\pm 5$	11,8	12	0,08	0,004	0,7	1,3	0,12
10.	$\pm 4$	12,1	14	0,12	0,003	0,6	1,4	0,16
11.	$\pm 3$	12,2	13	0,11	0,001	0,3	1,6	0,13
12.	$\pm 6$	12,4	15	0,12	0,001	0,3	1,2	0,14
13.	$\pm 4$	12,3	16,5	0,1	0,001	0,4	1,3	0,13
14.	$\pm 3$	11,8	12,5	0,08	0,004	0,6	1,2	0,12
15.	$\pm 5$	11,8	13,5	0,09	0,003	0,4	1,1	0,11
16.	$\pm 6$	11,9	14,5	0,1	0,001	0,4	1,3	0,13
17.	$\pm 4$	12,2	15,5	0,11	0,001	0,6	1,2	0,15
18.	$\pm 5$	11,8	16,5	0,1	0,001	0,7	1,3	0,13
19.	$\pm 6$	11,9	13	0,08	0,001	0,3	1,2	0,12
20.	$\pm 4$	12,1	13,5	0,09	0,004	0,4	1,1	0,11
21.	$\pm 4$	12,3	14,5	0,1	0,003	0,6	1,3	0,13
22.	$\pm 3$	12,2	15,5	0,11	0,001	0,3	1,2	0,15
23.	$\pm 6$	12,4	13	0,08	0,001	0,5	1,2	0,12
24.	$\pm 4$	12,3	14	0,09	0,004	0,4	1,1	0,11
25.	$\pm 4$	12,1	14,5	0,1	0,002	0,6	1,3	0,13
26.	$\pm 3$	12,2	16	0,12	0,003	0,6	1,2	0,14

### 3 Пример выполнения контрольной работы

#### 3.1 Математическая модель системы управления

На основании рисунка 2.1 составим функциональную схему, которая будет иметь вид, представленный на рисунке 3.1.

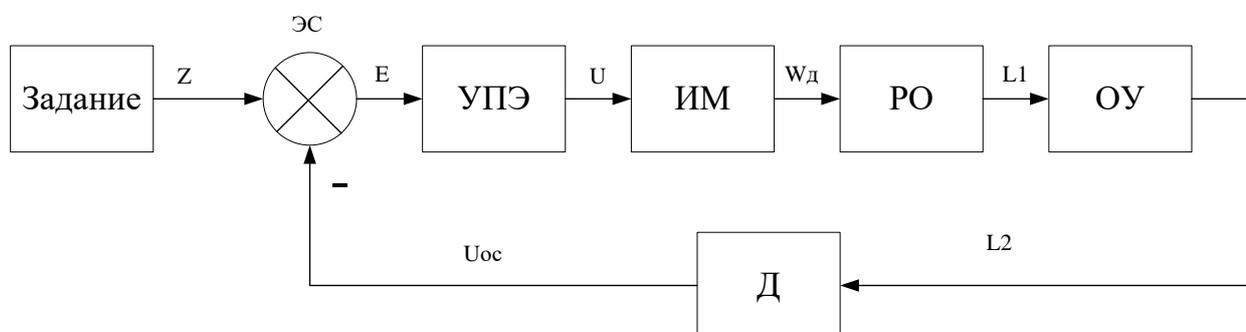


Рисунок 3.1 – Функциональная схема системы регулирования толщины листа при прокатке

На рисунке 3.1 обозначены следующие блоки:

- ЭС – элемент сравнения;
- УПЭ – усилительно-преобразовательный элемент;
- ИМ – исполнительный механизм;
- РО – регулирующий орган;
- ОУ – объект управления;
- Д – датчик обратной связи.

Сигналы имеют следующие обозначения и размерности:

- $Z$  – входной сигнал задания, В;
- $E$  – сигнал рассогласования, В;
- $U$  – управляющий сигнал на выходе усилительно-преобразовательного элемента, В;
- $W_d$  – скорость вращения на выходе исполнительного механизма, рад/с;
- $L_1$  – перемещение нажимного винта (РО), м;
- $L_2$  – перемещение рабочего валка, м;
- $U_{oc}$  – сигнал обратной связи, полученный с помощью оптического датчика, В.

Для составления структурной схемы необходимо составить передаточную функцию каждого из элементов, представленных на рисунке 1.2.

УПЭ предполагается безынерционным, но с ограниченной зоной линейности. Статическая характеристика данного элемента имеет вид, показанный на

рисунке 3.2.

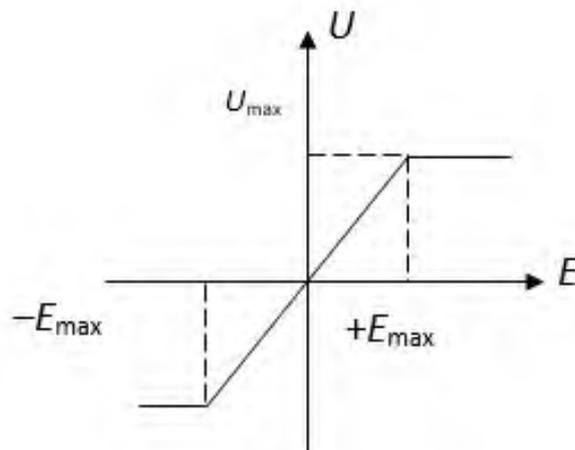


Рисунок 3.2 – Статическая характеристика УПЭ

Принимая, что УПЭ не обладает инерционностью, его передаточная функция будет иметь вид пропорционального звена, имеющего коэффициент усиления  $\kappa_y$ :

$$W_1(p) = \kappa_y = \frac{U_{\text{выхмакс}}}{U_{\text{вхмакс}}}, \quad (3.1)$$

где  $U_{\text{выхмакс}}$  – максимальное выходное напряжение усилителя, 12 В;  
 $U_{\text{вхмакс}}$  – зона линейности усилителя мощности по входу, 4В.

Подставляя значения, получим:

$$W_1(p) = \kappa_y = \frac{12}{4} = 3.$$

В качестве ИМ используется двигатель, отвечающий за поворот винта 6, посредством передачи скорости вращения вала якоря двигателя через редуктор 2. Он описывается уравнением:

$$T_d^2 \frac{d^2 \omega_d}{dt^2} + 2T_d \frac{d\omega_d}{dt} + \omega_d = k_d U(t), \quad (3.2)$$

где  $\omega_d$  – угловая скорость ИД;  
 $k_d$  – коэффициент наклона электромеханической характеристики;  
 $U$  – напряжение, питающее якорную цепь.

На основании выражения (3/2) составим передаточную функцию ИМ:

$$W_2(p) = \frac{k_d}{T_d^2 \cdot p^2 + 2T_d \cdot p + 1} = \frac{0,5}{0,11^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,11 \cdot p + 1} = \frac{0,5}{0,0121 \cdot p^2 + 0,22 \cdot p + 1} \quad (3.3)$$

В качестве РО используется редуктор и нажимной винт. Редуктор обеспечивает преобразование высокой скорости вращения ведущей шестерни 4 в более низкую скорость вращения ведомой шестерни 3, повышая при этом вращающий момент. Выходной и входной сигналы редуктора связаны соотношением:

$$w_3(t) = k_p w_d(t), \quad (3.4)$$

где  $k_p$  – коэффициент передачи редуктора.

Нажимной винт используется для преобразования движения из вращательного в поступательное и описывается уравнением

$$\frac{dL_1(t)}{dt} = k_n w_3(t), \quad (3.5)$$

где  $k_n$  – коэффициент нажимного винта.

Подставляя (3.4) в (3.5) получим:

$$\frac{dL_1(t)}{dt} = k_p k_n w_d(t). \quad (3.6)$$

Таким образом, на основании уравнения (3.6) передаточная функция РО будет иметь вид:

$$W_3(p) = \frac{k_{po}}{p} = \frac{1,5}{p}, \quad (3.7)$$

где  $k_{po}$  – коэффициент передачи регулирующего органа

В качестве ОУ используется рабочий вал, положение которого может быть описано:

$$\delta(t) = k_{вал} l(t), \quad (3.8)$$

где  $\delta(t)$  – положение рабочего вала.

Из уравнения (3.8) следует, что передаточная функция ОУ будет иметь вид:

$$W_4(p) = k_{oy}, \quad (3.9)$$

где  $k_{oy}$  – коэффициент передачи объекта управления.

Подставляя значение коэффициента передачи объекта управления из таблицы 2.2, получим:

$$W_4(p) = k_{oy} = 0,15.$$

В качестве  $D$  используется оптический датчик положения валков. Он излучает световой пучок, направленный на объект или специальный отражатель и анализирует отраженный свет. Полученные результаты измерений преобразуются в электрический сигнал:

$$T_c \frac{dU_{oc}(t)}{dt} + U_{oc}(t) = K_{oc} \delta(t), \quad (3.10)$$

На основании уравнения (3.10) получена передаточная функция  $D$ :

$$W_5(p) = \frac{K_{oc}}{T_c \cdot p + 1}, \quad (3.11)$$

где  $T_c$  – постоянная времени;

$K_{oc}$  – коэффициент передачи датчика обратной связи.

Подставляя значение коэффициента передачи объекта управления из таблицы 2.2, получим:

$$W_5(p) = \frac{15}{0,002 \cdot p + 1}.$$

На основании представленных передаточных функций составим структурную схему системы управления (рисунок 3.3).

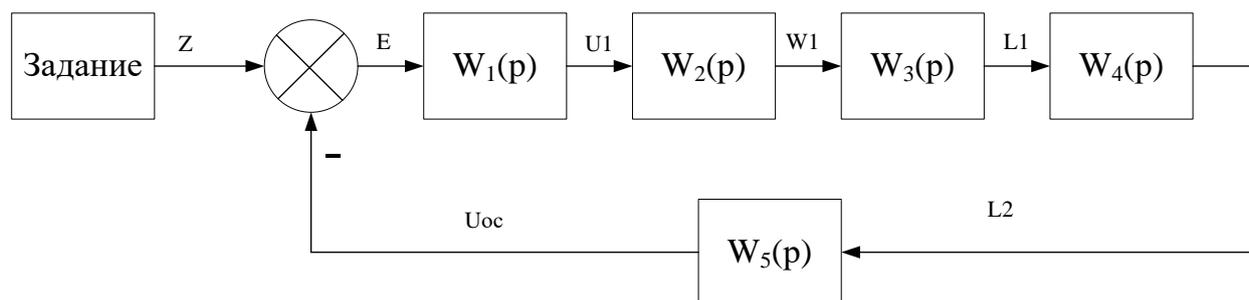


Рисунок 3.3 – Структурная схема системы регулирования толщины листа при прокатке

Ниже представлены все выведенные передаточные функции:

$$W_1(p) = k_y = \frac{U_{\text{выхмакс}}}{U_{\text{вхмакс}}} = \frac{12}{4} = 3;$$

$$W_2(p) = \frac{k_d}{T_d^2 \cdot p^2 + 2T_d \cdot p + 1} = \frac{0,5}{0,11^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,11 \cdot p + 1} = \frac{0,5}{0,0121 \cdot p^2 + 0,22 \cdot p + 1};$$

$$W_3(p) = \frac{k_{po}}{p} = \frac{1,5}{p};$$

$$W_4(p) = k_{oy} = 0,15;$$

$$W_5(p) = \frac{k_{oc}}{T_c \cdot p + 1} = \frac{15}{0,002 \cdot p + 1}.$$

### 3.2 Анализ системы управления

Для проведения анализа устойчивости системы необходимо получить передаточную функцию разомкнутой и замкнутой системы.

Передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид:

$$W_{PA3}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p) \quad (3.12)$$

Подставляя выражения необходимых передаточных функций, получим:

$$\begin{aligned} W_{PA3}(p) &= \frac{5,062}{2,42 \cdot 10^{-5} \cdot p^4 + 0,01254 \cdot p^3 + 0,222 \cdot p^2 + p} = \\ &= \frac{5,062}{p \cdot (2,42 \cdot 10^4 \cdot p^3 + 0,01254 \cdot p^2 + 0,222 \cdot p + 1)}. \end{aligned}$$

Передаточная функция замкнутой системы будет иметь вид:

$$W_{ЗАМ}(p) = \frac{W_{PA3}(p)}{1 + W_{PA3}(p)} \quad (3.13)$$

Подставляя выражения необходимых передаточных функций, получим:

$$W_{ЗАМ}(p) = \frac{5,062}{2,42 \cdot 10^{-5} \cdot p^4 + 0,01254 \cdot p^3 + 0,222 \cdot p^2 + p + 5,062}.$$

Процесс получения численных значений передаточных функций (3.12) и (3.13) проводился в программе Matlab. Листинг расчёта приведен в приложении А.

*Анализ устойчивости по алгебраическому критерию. Критерий Рауса-Гурвица.*

Согласно данному критерию все определители, составленные на основе характеристического уравнения замкнутой системы, должны быть больше нуля.

Характеристическое уравнение замкнутой системы (ее знаменатель) имеет

ВИД:

$$D(p) = 2,42 \cdot 10^{-5} \cdot p^4 + 0,01254 \cdot p^3 + 0,222 \cdot p^2 + p + 5,062$$

Из этого уравнения получены коэффициенты:

$$a_0 = 2,42 \cdot 10^{-5}$$

$$a_1 = 0,01254$$

$$a_2 = 0,222$$

$$a_3 = 1$$

$$a_4 = 5,062$$

Расчет необходимых определителей будем проводить с помощью программы MathCad.

$$\Delta_1 = a_1 = 0,01254 > 0$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.01254 & 1 \\ 0.0000242 & 0.222 \end{vmatrix} \rightarrow 0.00275968$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.01254 & 1 & 0 \\ 0.0000242 & 0.222 & 5.062 \\ 0 & 0.01254 & 1 \end{vmatrix} \rightarrow 0.0019636724008$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.01254 & 1 & 0 & 0 \\ 0.0000242 & 0.222 & 5.062 & 0 \\ 0 & 0.01254 & 1 & 0 \\ 0 & 0.0000242 & 0.222 & 5.062 \end{vmatrix} \rightarrow 0.0099401096928496$$

Система устойчива, т.к. отрицательных определителей нет.

*Анализ устойчивости по частотному критерию. Критерий Михайлова.*

Замкнутая система считается устойчивой, если годограф Михайлова в положительном направлении проходит такое же количество квадрантов, которое равно старшей степени характеристического уравнения.

Для этого необходимо взять характеристическое уравнение (знаменатель дроби) замкнутой системы:

$$D(p) = 2,42 \cdot 10^{-5} \cdot p^4 + 0,01254 \cdot p^3 + 0,222 \cdot p^2 + p + 5,062$$

Производим замену  $p=j\omega$ , имеем:

$$D(j\omega) = 2,42 \cdot 10^{-5} \cdot (j\omega)^4 + 0,01254 \cdot (j\omega)^3 + 0,222 \cdot (j\omega)^2 + (j\omega) + 5,062$$

Разложим характеристическое уравнение на две составляющие: действительную  $U(\omega)$  и мнимую  $V(j\omega)$ :

$$D(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$$

$$U(\omega) = 2,43 \cdot 10^{-5} \omega^4 - 0,222 \omega^2 + 5,062$$

$$V(\omega) = -0,01254 \omega^3 + 1 \omega$$

Решаем уравнения:  $U(\omega) = 0$  и  $V(\omega) = 0$ .

$$U(\omega) = 0$$

$$2,43 \cdot 10^{-5} \omega^4 - 0,222 \omega^2 + 5,062 = 0.$$

Это биквадратное уравнение.

$$\text{Делаем замену: } x = \omega^2 \quad 2,43 \cdot 10^{-5} x^2 - 0,222x + 5,062 = 0.$$

Решаем полученное квадратное уравнение, получим ответ:

$$x_1 = \frac{0,222 + 0,221}{0,0000484} = 9150,69;$$

$$x_2 = \frac{0,222 - 0,221}{0,0000484} = 22,86;$$

$$\omega_1 = \sqrt{x_1} = 95,66;$$

$$\omega_2 = \sqrt{x_2} = 4,78.$$

Решаем уравнение мнимой части:

$$V(\omega) = 0$$

$$-0,01254 \omega^3 + 1 \omega = 0$$

$$\omega \cdot (-0,01254 \omega^2 + 1) = 0$$

$$\omega_3 = 0$$

$$\omega_4 = \sqrt{\frac{1}{0,01254}} = 8,93.$$

На основании расчётов составим таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчета для построения годографа Михайлова

$\omega$	U	V
0	5,0625	0
4,78132	0	3,410625
8,929995	-12,48696	0
95,65925	0	-10881,2
97	58,6731	-11347,9

На основании таблицы 3.1 строим годограф Михайлова (рисунок 3.4).

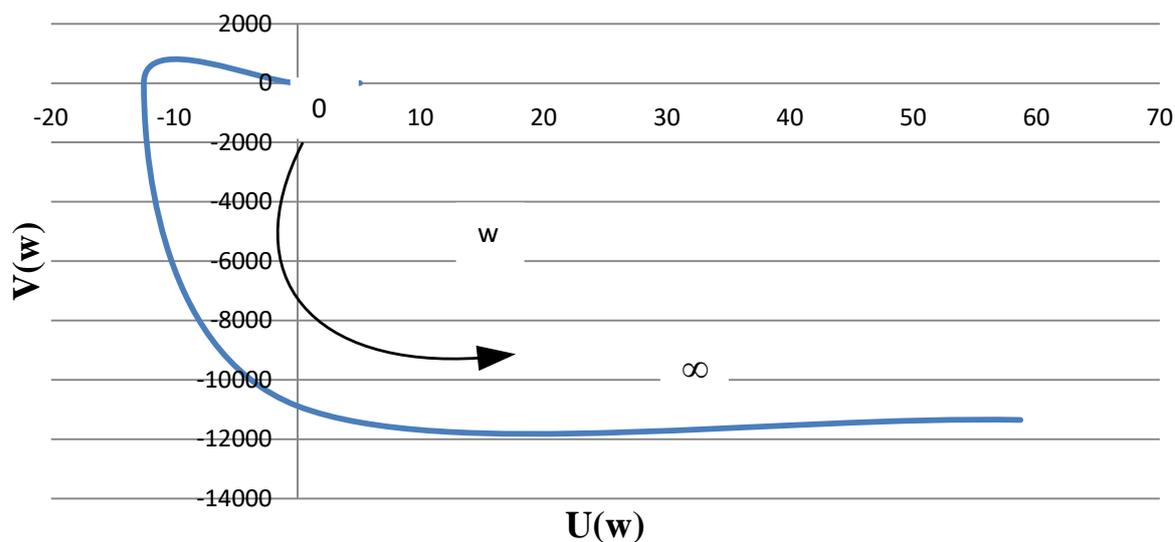


Рисунок 3.4 – Годограф Михайлова

Из рисунка 3.4 следует, что построенный годограф Михайлова охватывает 4 квадранта и поворачивается против часовой стрелки, начиная с вещественной оси. Старшая степень характеристического уравнения замкнутой системы также равна 4. Следовательно, рассмотренная система устойчива.

### Анализ устойчивости по корням характеристического уравнения

Система считается устойчивой, если корни характеристического уравнения (полюса) находятся в левой полуплоскости. Для построения диаграммы нулей-полюсов линейной системы воспользуемся командой `pzmap` в Матлаб (см. приложение А). В результате, получим диаграмму, представленную на рисунке 3.5.

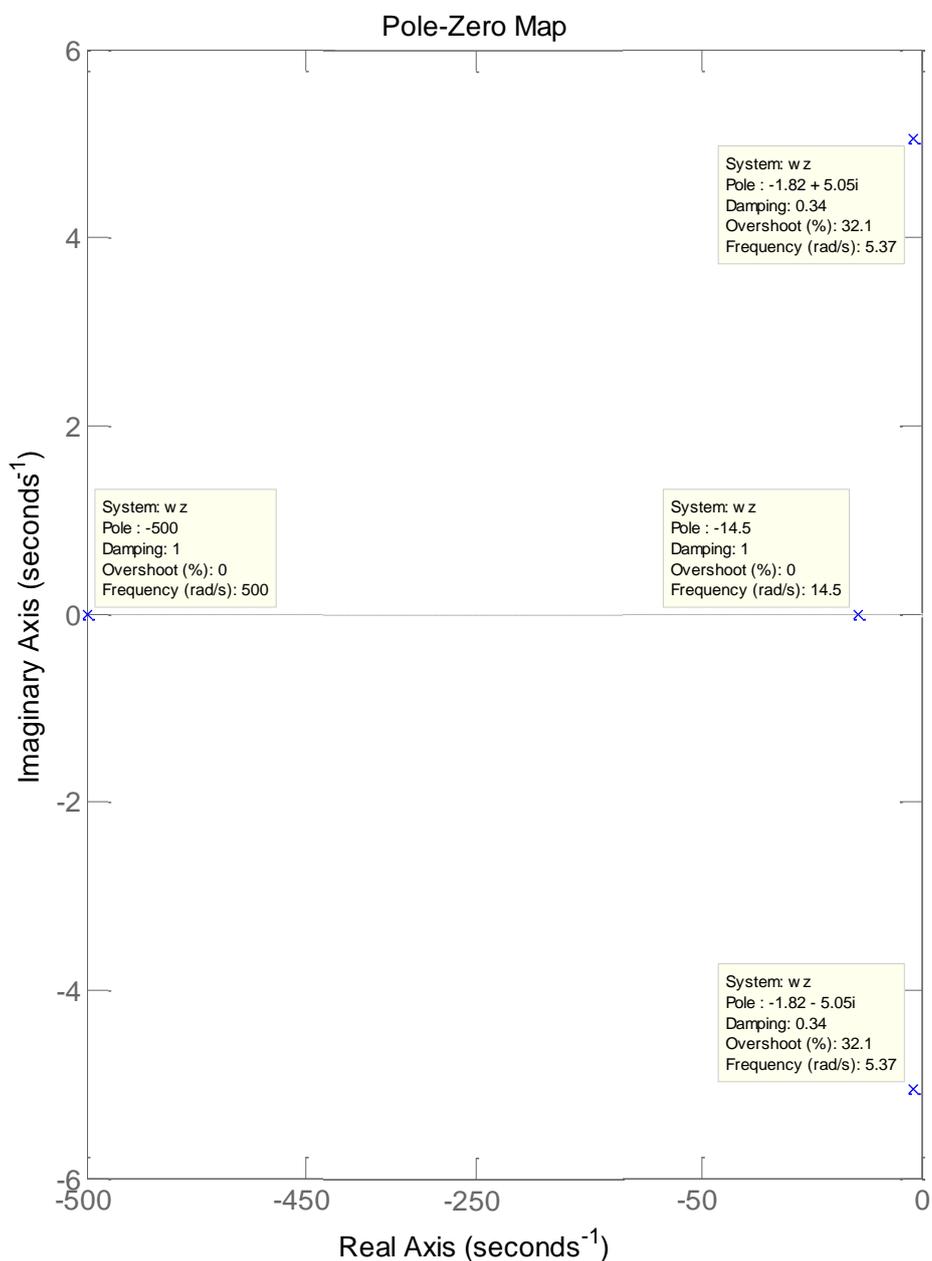


Рисунок 3.5 – Диаграмма нулей-полюсов линейной замкнутой системы

Из рисунка 3.5 очевидно, что в системе имеется четыре полюса (старшая степень характеристического уравнения равна 4), и все они расположены в левой (отрицательной) полуплоскости. Следовательно, система устойчива.

Анализ по результатам моделирования (по графику переходной характеристики).

Для проведения данного анализа в приложении Matlab Simulink была разработана модель, представленная на рисунке 3.6.

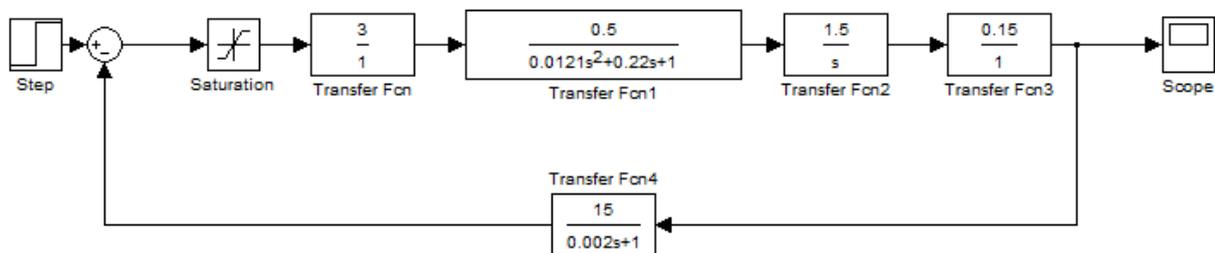


Рисунок 3.6 – Модель системы регулирования толщины листа при прокате в программе Matlab Simulink

Величина сигнала задания (блок «Step») равна «1». Зона линейности усилителя мощности по входу (блок «Saturation») равна  $\pm 4$ .

В данной модели был получен график переходного процесса, представленный на рисунке 3.7.

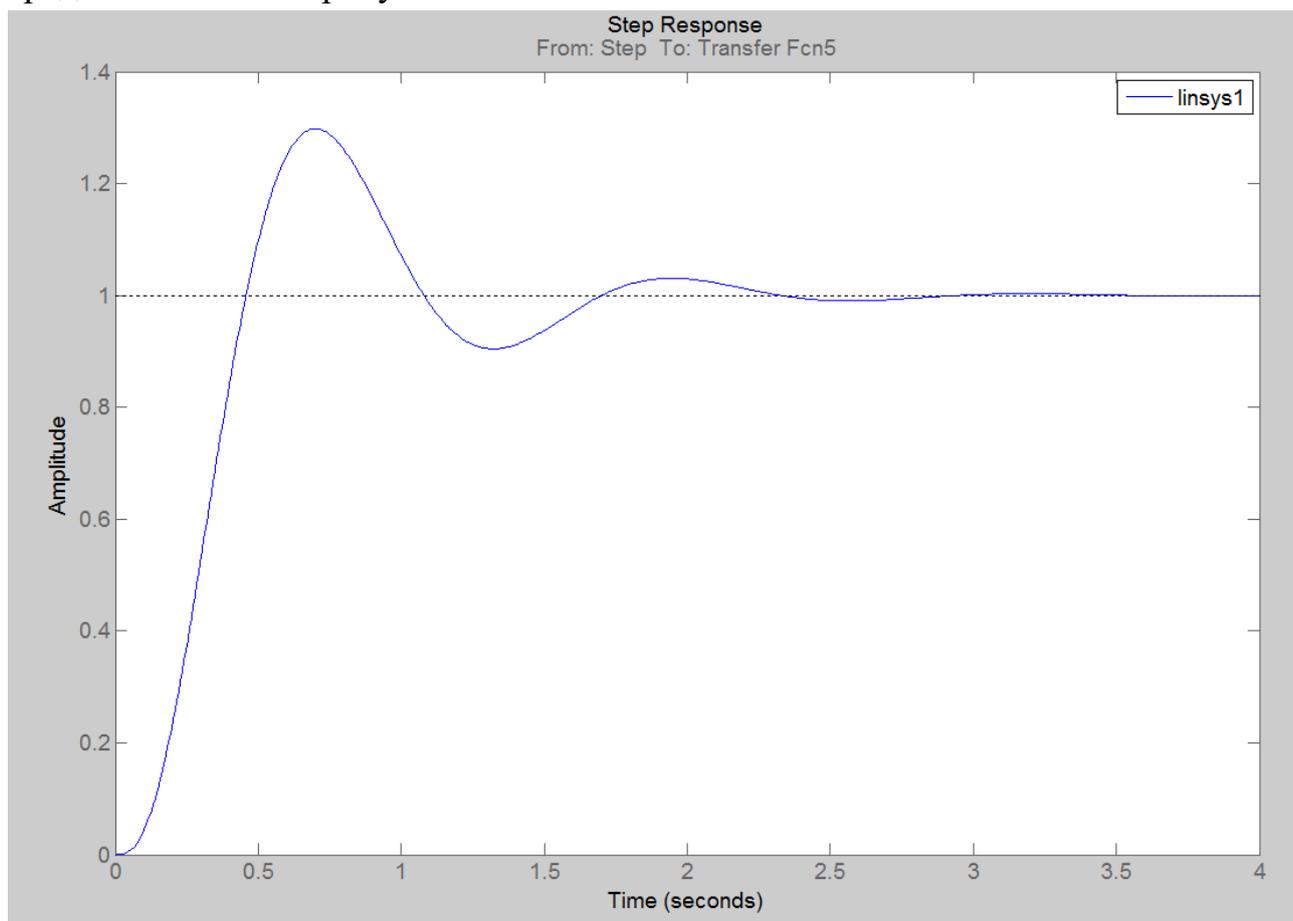


Рисунок 3.7 – График переходного процесса

Из рисунка 3.7 следует, что система устойчива, т.к. установившееся значение равно "1", т.е. сигналу задания.

### 3.3 Анализ качества системы управления

Исходно было указано, что система должна выполнять требования, представленные в таблице 2.1, вариант 0.

Проанализировать данные параметры возможно за счёт анализа системы, представленной на рисунке 3.6. В результате, получим график переходного процесса с установленными параметрами (рисунок 3.8). Параметры устанавливаются нажатием на график переходного процесса правой кнопкой мыши и выбором всех параметров качественных показателей («Characteristics»).

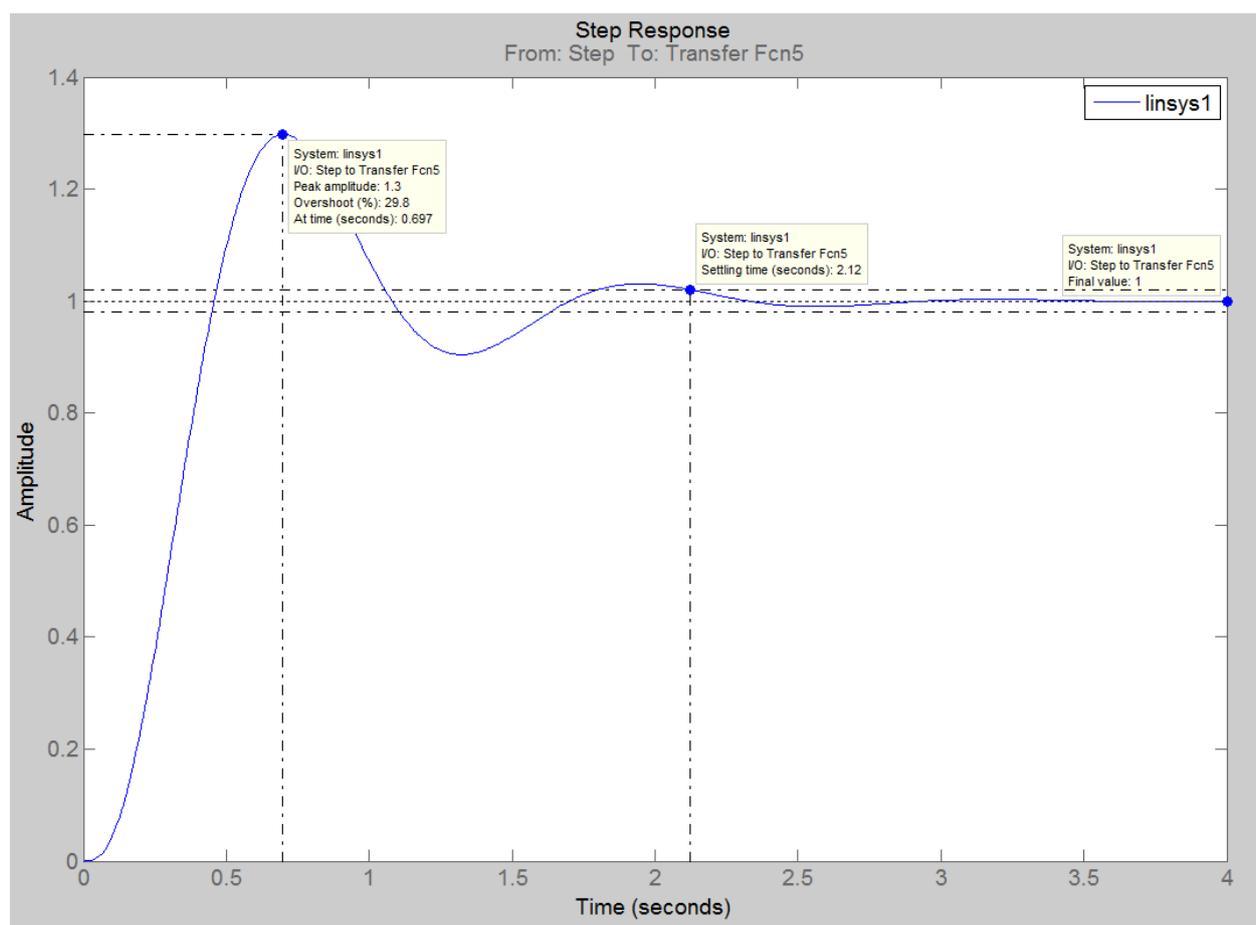


Рисунок 3.8 – График переходного процесса с качественными параметрами

Из рисунка 3.8 следует, что:

- статическая ошибка воспроизведения сигнала равна 0 (первое условие из требуемых выполняется)
- время регулирования – не более 2,12 с. (условие не выполняется);
- перерегулирование – не более 29,8% (условие не выполняется).

*Если установленные для вашего варианта условия качества (таблица 2.1) выполняются, то установка регулятора не требуется!*

Для выполнения требуемых условий необходимо в систему добавить ре-

гулятор. Для минимизации расчётов и удобства настройки регулятора воспользуемся готовым блоком «PID\_Controller», который имеется в библиотеке Matlab Simulink. В результате, модель примет вид (рисунок 3.9).

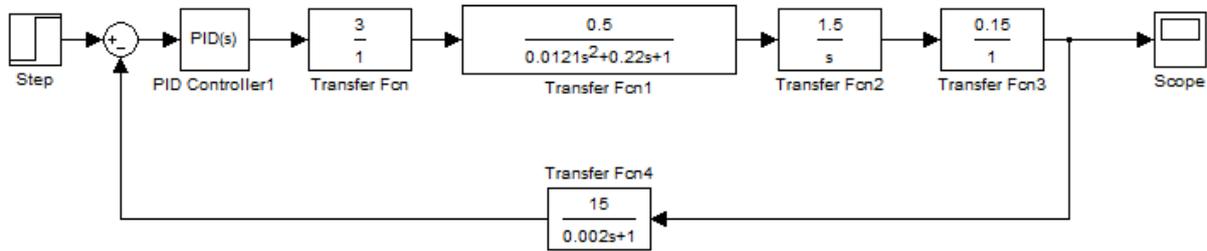


Рисунок 3.9 – Модель системы регулирования толщины листа с регулятором при прокате в программе Matlab Simulink

В процессе настройки было выявлено, что необходимые требования по быстродействию и перерегулированию системы можно реализовать только с помощью ПИД-регулятора. На рисунке 3.10 представлено окно настройки регулятора и коэффициенты регулирования.

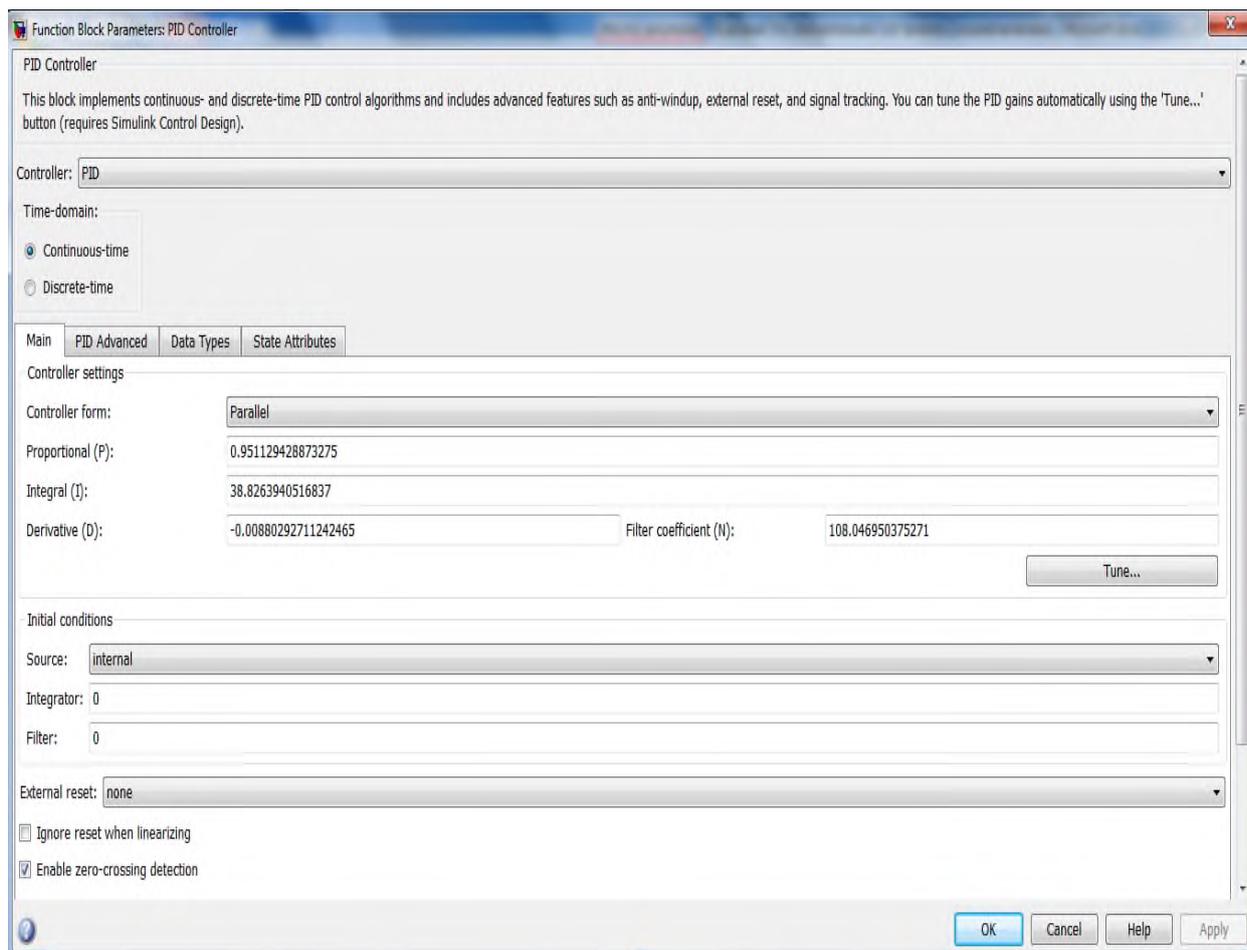


Рисунок 3.10 – Окно настройки ПИД-регулятора

Для приведения переходного процесса к оптимальному виду существуют такие правила (согласно пункту 1.7 теоретического раздела):

- увеличение пропорционального коэффициента усиления увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- при уменьшении интегральной составляющей ошибка регулирования быстрее уменьшается с течением времени;
- увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

Таким образом, при анализе схемы с разработанным регулятором получится переходный процесс, представленный на рисунке 3.11.

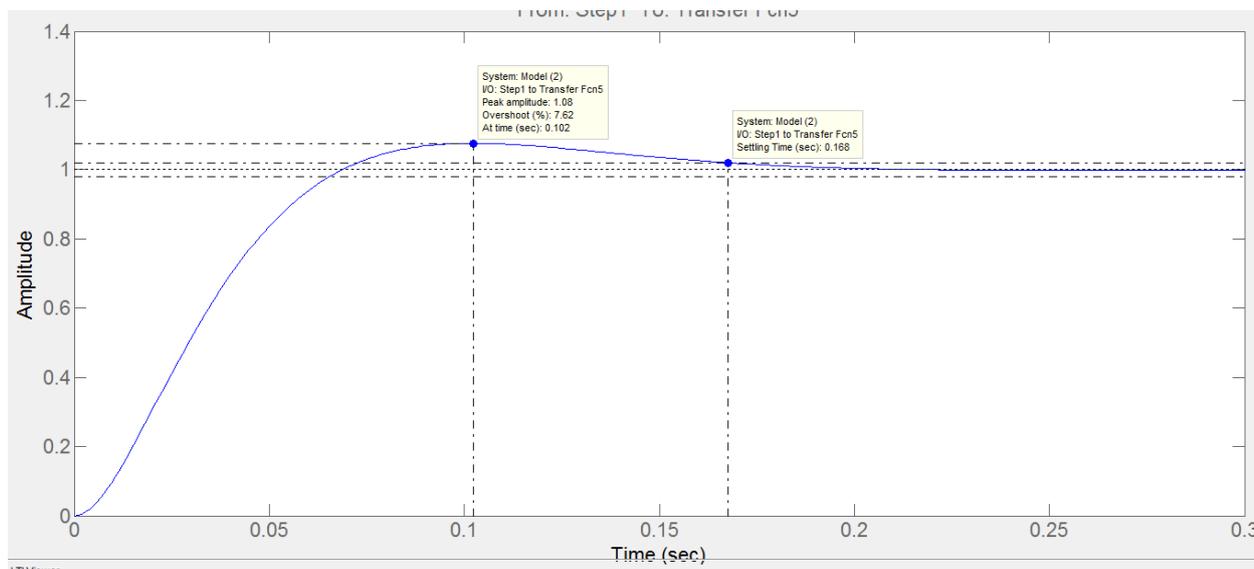


Рисунок 3.11 – График переходного процесса при введении в систему ПИД-регулятора

Качественные показатели переходного процесса:

- Время нарастания  $t_n = 0,046$  с.;
- Время переходного процесса  $t_{пт} = 0,168$  с.;
- Установившееся значение  $Y_{уст} = 1$ ;
- Перерегулирование  $\sigma = 7,62$  %.

Разработанная система с ПИД-регулятором полностью удовлетворяет всем требованиям.

На рисунке 3.12 представлены частотные характеристики рассматриваемой системы ЛАЧХ и ЛФЧХ.

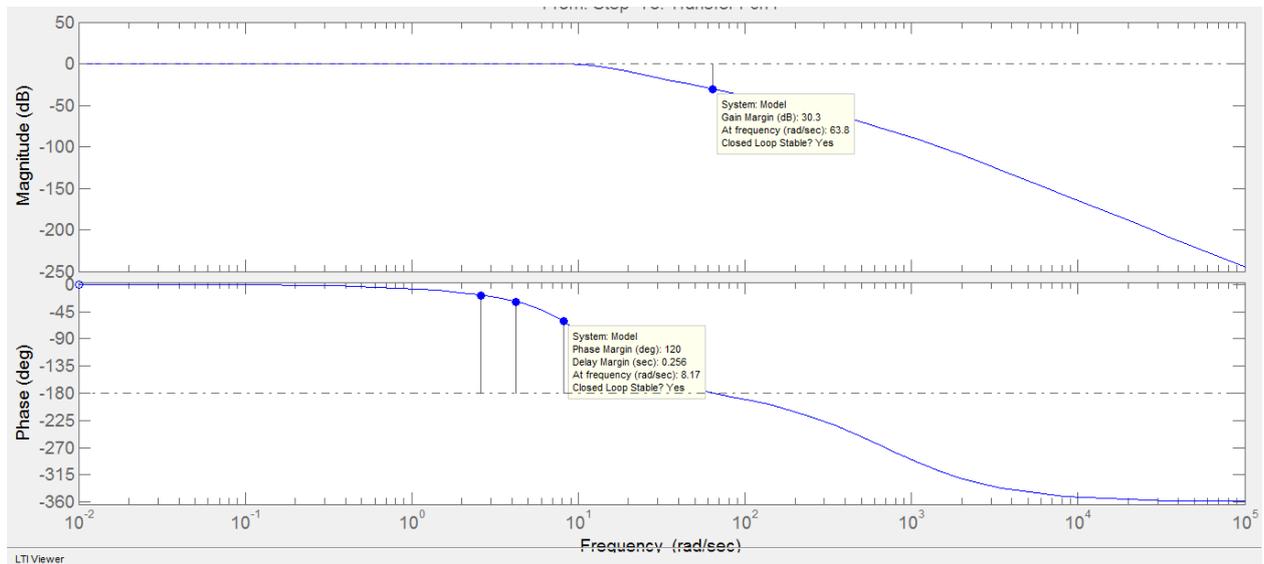


Рисунок 3.12 – ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы

Из рисунка 3.12 следует, что величина запаса по фазе равна  $130^{\circ}$ . Запас по амплитуде 30,3 Дб. Следовательно, система считается устойчивой.

Показатели устойчивости связаны с показателем колебательности. При уменьшении запаса устойчивости увеличивается колебательность системы. В данном случае, из ЛАЧХ (рисунок 3.12) следует, что  $M \approx A_{\max} = 1,17$ . При увеличении коэффициента  $K_{\max}$  (в нашем случае равного коэффициенту разомкнутой системы) будет происходить рост коэффициента колебательности. Следовательно, увеличится максимально возможное отношение амплитуды регулируемой величины к амплитуде гармонического задающего воздействия. В результате, система станет неустойчивой.

## Список использованных источников

1. Сигачева В.В., Шурыгин Д.А. Проектирование автоматизированных систем управления. – СПб.: ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2015. – 213 с.
2. Огороков Б.Н. Автоматизация металлургического производства: учебное пособие. – Москва: МИСИС, 1999. – 94 с.
3. Ткачев М.Ю., Еронько С.П. Контрольно-измерительные приборы и автоматизация металлургического производства: учебное пособие. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 256 с.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. / 4-е изд., перераб. и доп. – М.: СПб Изд-во, «Профессия», 2004. – 747 с.
5. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учеб. пособие для студентов вузов – М.: Физматлит, 2003 - Т. 1: Линейные системы. – 2003. – 287 с.
6. Инновационное металлургическое оборудование. Сталеплавильное производство: учебное пособие / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, С. А. Бедарев и др. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 276 с.
7. Бекаревич А.А., Миткевич Ю.Д. Информационные технологии и автоматизация в металлургии: учебное пособие – М.: МИСИС, 2012. – 71 с.
8. Теория автоматического управления / под ред. Соломенцева Ю.М. – М.: Высшая школа, 2000. – 268 с.

## Приложение А

>> w1=tf([3],[1]) – передаточная функция УПЭ

w1 =

3

Static gain.

>> w2=tf([0.5],[0.0121 0.22 1]) – передаточная функция ИМ

w2 =

0.5

-----

0.0121 s<sup>2</sup> + 0.22 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> w3=tf([1.5],[1 0]) – передаточная функция РО

w3 =

1.5

---

s

Continuous-time transfer function.

>> w4=tf([0.15],[1]) – передаточная функция ОУ

w4 =

0.15

Static gain.

>> w5=tf([15],[0.002 1]) – передаточная функция Д

w5 =

15

-----

0.002 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> wr=w1\*w2\*w3\*w4\*w5 – передаточная функция разомкнутой системы

wr =

5.062

-----

2.42e-05 s<sup>4</sup> + 0.01254 s<sup>3</sup> + 0.222 s<sup>2</sup> + s

Continuous-time transfer function.

>> wz=feedback(wr,[1]) – передаточная функция замкнутой системы

wz =

5.062

-----

$2.42e-05 s^4 + 0.01254 s^3 + 0.222 s^2 + s + 5.062$

Continuous-time transfer function.

>> pzmap(wz) – команда построения диаграммы нулей-полюсов

>> pzmap(wz) – команда построения диаграммы нулей-полюсов

ЛИЦИН КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ  
ШАПОВАЛОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

## АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Методические указания  
по выполнению домашнего задания / контрольной работы  
по дисциплине «Автоматизация металлургического производства»  
для студентов направления подготовки 22.03.02 Металлургия,  
всех форм обучения

Подписано в печать 23.11.2023 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег.№ 262	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 3,44

ФГАОУ ВО  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»  
Новотроицкий филиал  
462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.  
E-mail: [nf@misis.ru](mailto:nf@misis.ru)  
Контактный тел. 8 (3537) 67-97-29.

