

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович
Должность: ректор ФГБОУ ВО Вавиловский университет
Дата подписания: 29.09.2026 16:11:00
Уникальный программный ключ:
528682d78e671e566ab07f01fe1ba2172f735a12

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и
инженерии имени Н.И. Вавилова»**

Методические указания
по выполнению курсовых проектов по дисциплине
«Автоматизированные системы управления в мясной отрасли»

Направление подготовки
19.03.03 Продукты питания животного происхождения

Направленность (профиль)

Технология мяса и мясных продуктов

Саратов, 2026

Автоматизированные системы управления в мясной отрасли:
методические указания по курсовому проектированию для обучающихся по
направлению подготовки 19.03.03 Продукты питания животного происхождения /
Сост.: И.В. Мокрецов, ФГБОУ ВО Вавиловский университет. - Саратов, 2026. – 66 с.

СОДЕРЖАНИЕ:

Введение.....	4
1. Цель и задачи курсового проекта	4
2. Оформление курсового проекта.....	4
3. Общие указания по выполнению курсового проекта.....	5
4. Основные сведения из теории	
4.1. Общий порядок изображения функциональных схем автоматизации (ФСА).....	6
4.2. Способы и методика построения графических условных обозначений по ГОСТ 21. 404-85.....	8
4.3. Основные понятия теории автоматического регулирования:	
4.3.1. Функциональные схемы АСР и их принцип действия.....	12
4.3.2. Объекты регулирования, их передаточные функции и параметры.....	13
4.3.3. Регуляторы, их виды и законы регулирования.....	18
5. Порядок выполнения расчётов при выборе регулятора.	
5.1. Определение асимптотических параметров объекта и выбор вида регулятора.....	22
5.2. Методика расчёта непрерывного регулятора.	
5.2.1. Обоснование закона регулирования и вычисление его параметров.....	23
5.2.2. Моделирование процессов регулирования, происходящих в спроектированной АСР, на ПЭВМ с последующей коррекцией параметров регулятора.....	33
5.3. Методика расчёта релейного (двухпозиционного) регулятора.....	32
5.3.1. Графоаналитический способ расчёта регулятора.....	35
5.3.2. Аналитический метод расчёта регулятора.....	36
Литература.....	39
Приложения.....	40

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация производственных процессов является характерной чертой современного прогресса в технике и технологии. Автоматизация обеспечивает снижение доли ручного труда, выпуск высококачественной продукции, высокую технико-экономическую эффективность производства.

Курсовой проект имеет важное значение в подготовке инженера, при выполнении которого обучающийся подводит итог работы по изучению теоретической части дисциплины. Знания, полученные им, применяются для решения конкретной инженерной задачи.

Настоящее указание содержит некоторые теоретические сведения, методику расчетов и требования, предъявляемые к содержанию и оформлению пояснительной записки и графического материала курсового проекта.

Указания составлены для обучающихся на направлении 19.03.03 Продукты питания животного происхождения.

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Целью курсового проекта является: закрепление знаний, полученных обучающимся на аудиторных и самостоятельных занятиях; приобретение навыков решения простых инженерных задач по автоматизации типовых объектов мясомолочной промышленности и выдачи задания на их автоматизацию; получение опыта по использованию ПЭВМ для реализации подобных задач, а также по выполнению соответствующего раздела дипломного проекта.

При выполнении курсового проекта необходимо выполнить следующие задачи: осуществить анализ заданного технологического процесса и обосновать выбор параметров измерения, сигнализации и регулирования;

описать функциональную схему;

определить асимптотические параметры объекта регулирования;

произвести выбор вида и типа регулятора;

вычислить значения параметров выбранного регулятора.

2. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект состоит из пояснительной записки объемом 15-20 страниц и одного чертежа «Функциональная схема автоматизации технологического процесса», выполненный на листе формата А1 или А2.

В состав пояснительной записки входят:

1. Титульный лист.

2. Задание на проектирование.

3. Содержание.

4. Введение.

5. Основные разделы курсового проекта:

Анализ технологического процесса, обоснование выбора параметров измерения, сигнализации и регулирования.

Описание функциональной схемы автоматизации.

Обоснование выбора средств автоматизации.

Определение асимптотических параметров объекта регулирования и выбор вида регулятора.

Определение закона управления (типа регулятора).

Расчёт параметров регулятора.

6. Литература.

Пояснительная записка выполняется на стандартных листах писчей бумаги формата А4. Форма титульного листа приведена в приложении 2.

Функциональная схема автоматизации оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа 21.404-85.

Задание на курсовую работу обучающийся получает у преподавателя (приложение 7). Оно состоит из названия автоматизируемого технологического процесса, исходных данных для расчета автоматической системы регулирования одной из технологических переменных в виде численных значений параметров объекта регулирования ($K_{об}$, T_1 , T_2), максимально возможного процента хода регулирующего органа ($M\%$) и показателей качества переходного процесса ($\Delta Y_{\max}$, $T_p^{\max}$, $Y_{ост}^{\max}$ – для регуляторов непрерывного вида и A_m , $T_{км}$ – для двухпозиционных регуляторов). Кроме того, для последнего регулятора задаётся требуемое значение регулируемой величины X_3 .

3. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1. В введении курсового проекта, должна быть обоснована необходимость автоматизации конкретного технологического процесса, перечислены технико-экономические показатели (надёжность и ритмичность производства, себестоимость и качество продукции, доля ручного труда и т. д.), которые улучшаются после внедрения автоматических систем.

2. В первом разделе необходимо осуществить анализ технологической схемы в соответствии с темой курсового проекта и обосновать выбор параметров измерения, регулирования и сигнализации. С этой целью обучающийся изучает указанный в задании технологический процесс, определяет параметры, значение которых требуется измерять, регулировать, а также сигнализировать об их значениях. В результате этого на схеме должны быть указаны нумерация и места расположения датчиков, регуляторов, элементов индикации, сигнализации, коммутации, а также каналов прохождения сигналов. Схематично показывается их функциональное предназначение (в виде обозначений) и линии связи между ними. Всё это производится на базе знаний, полученных при изучении технологических дисциплин и оборудования соответствующей области. Теоретические основы этого раздела изложены в пунктах 4.1 и 4.2 настоящих методических указаний (МУ)

3. При описании функциональной схемы автоматизации, её состава и принципа действия необходимо показать роль элементов схемы в процессе автоматизации, их функциональные связи, расположение, также прохождение информационных и управляющих сигналов. При этом используется принятая в предыдущем разделе нумерация этих элементов и каналов связи.

4. При обосновании выбора средств автоматизации необходимо учитывать такие параметры, как диапазон изменения измеряемых величин, требуемая точность измерения, условия эксплуатации приборов (пожаро и электробезопасность, агрессивность, токсичность и физико-химические свойства среды), дальность

передачи информационных и управляющих сигналов. В результате такого выбора в разделе указывается маркировка прибора, его место установки, наименование измеряемого параметра и т.д. (приложение 6).

5. Вычисление асимптотических параметров объекта регулирования осуществляется с использованием численных значений кривой разгона. По полученным значениям этих параметров производится выбор вида регулятора. Порядок выполнения этого этапа описан в подразделах 4.3.2 и 5.1 МУ.

6. При выборе типа регулятора (закона управления) и расчёта его параметров учитываются требования, предъявляемые к качеству регулирования. Эти требования определяются такими показателями, как максимально возможный процент хода регулирующего органа $M\%$, максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины $\Delta U_{\max}$, максимально допустимое время регулирования $T_{p. \max}$ и установившееся отклонение $U_{\text{ост}}$. Для расчёта параметров регулятора используются формулы, соответствующие 20%-ному перерегулированию (Табл. 2). Расчёты, производимые на этом этапе, проиллюстрированы в подразделах 5.2.1 МУ - для непрерывного регулятора, 5.3.1 и 5.3.2 - для двухпозиционного.

7. Моделирование и исследование процессов регулирования, происходящих в спроектированной АСР, на ПЭВМ с последующей коррекцией параметров регулятора. Порядок выполнения этого этапа представлен в подразделе 5.2.2 МУ. Этот этап проектирования выполняется только в случае выбора непрерывного регулятора.

4. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

4.1. ОБЩИЙ ПОРЯДОК ИЗОБРАЖЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ (ФСА)

Структуру и объём автоматизации технологического оборудования определяет функциональная схема автоматизации, которая представляет собой чертеж с условным изображением технологического оборудования, коммуникаций, органов управления и средств автоматизации. На ФСА указывают все связи между технологическим оборудованием и элементом автоматики. Органы управления и средства автоматизации изображают на ФСА в соответствии с ГОСТом 21.404-85. Основные условно-графические и буквенные обозначения по ГОСТу приведены в приложениях 3,4,5. В основе обозначений приборов и средств автоматизации по ГОСТ 21.404-85 лежит функциональный признак - построение буквенных условных обозначений выполняется буквами латинского алфавита. Отборное устройство для всех постоянно подключенных приборов не имеет специального обозначения, а представляет собой тонкую сплошную линию, соединяющую технологический трубопровод или аппарат с первичным измерительным преобразователем или прибором.

При необходимости указания точного места расположения отборного устройства или точки измерения (внутри контура технологического аппарата) в конце тонкой линией изображается окружность диаметром 2 мм.

Подвод линий связи к символу прибора допускается изображать в любой точке окружности (сверху, снизу, сбоку). Если необходимо указать направление передачи сигнала на линиях связи допускается нанесение стрелок. В случае, когда обозначать

прибор и средство автоматизации по ГОСТу не представляется возможным, разрешается введение произвольных условных обозначений с расшифровкой их на схемах. Буквенные условные обозначения приведены в таблице приложения 4.

Для конкретизации определяемой величины около изображения прибора (справа от него) необходимо указывать наименование или символ измеряемой величины: ток, рН, О и т.д.

Буква «U» может быть использована для обозначения прибора, измеряющего несколько разнородных величин. Расшифровка измеряемых величин должна быть приведена около прибора или на поле чертежа. Резервные буквы используются для обозначения непредусмотренных ГОСТом величин. Применяемые величины обозначаются одной и той же буквой, с расшифровкой на схеме. Не допускается применять одну и ту же резервную букву для обозначений разных величин в пределах данного вида документации.

Дополнительные буквенные обозначения, отражающие функциональные признаки прибора приведены в таблице приложения 3.

Буква "Е" применяется для обозначения чувствительных элементов, например: термоэлектрических термометров, термометров сопротивления, сужающих устройств расходомеров и т.п.

Буква "Т" обозначает промежуточное преобразование-дистанционную передачу сигнала, например: бесшкальные манометры (дифманометры), манометрические термометры.

Буква "К" применяется для обозначений приборов, имеющих станцию управления.

Буква "У" рекомендуется для построения обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств.

Порядок построения условных обозначений с применением дополнительных букв следующий: на первом месте ставится буква, обозначающая измеряемую величину; на втором месте - одна из дополнительных букв: Е, Т, К или У, например, термометр сопротивления-ТЕ, сужающее устройство расходомера-РЕ.

При построении условных обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств надписи, расшифровывающие вид преобразования или операции, выполняемые вычислительным устройством, наносятся справа от графического изображения прибора, например, электропневматический преобразователь, установленный по месту Е/Р.

При построении обозначений комплектов средств автоматизации первая буква в обозначении каждого прибора, входящего в комплект, является наименованием измеряемой комплект величины. Например, в комплекте для измерения и регулирования температуры первичный измерительный преобразователь следует обозначить "ТЕ", вторичный регистрирующий прибор-"TR."; регулирующий блок-"ТС".

Все устройства, выполняемые в виде отдельных блоков и предназначенные для ручных операций, должны иметь на первом месте обозначений букву "Н", независимо от того, в какой комплект технических средств они входят. Например: кнопки (ключи для дистанционного управления, задатчики -"Н", байпасные панели дистанционного управления-"НС", переключатели электрических цепей измерения (управления)-"НС".

4.2. СПОСОБЫ И МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ ПО ГОСТ 21.404-85

Функциональные схемы автоматизации (ФСА) могут быть выполнены двумя способами:

- 1 способ - упрощенный,
- 2 способ - развернутый.

1 способ. При построении ФСА приборы и средства автоматизации изображают вблизи отборных устройств и измерительных преобразователей. При этом щиты и пульты в схемах не показывают (рис. 1).

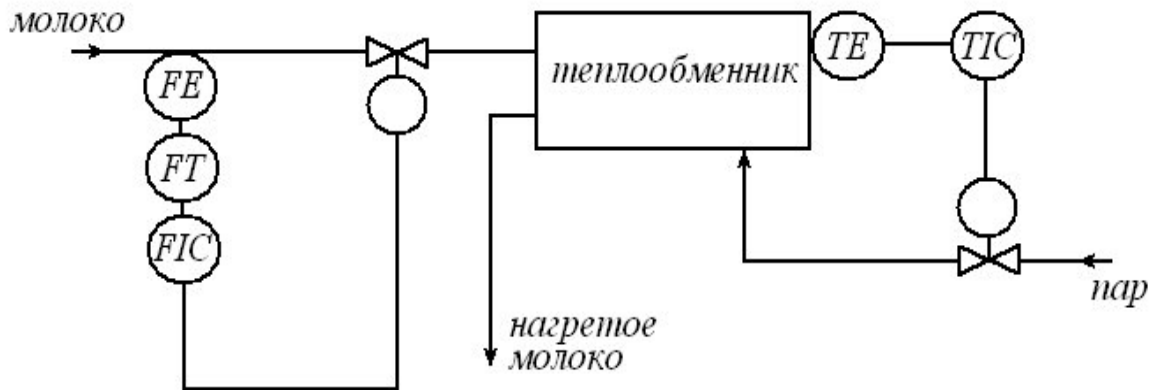


Рисунок 1 - ФСА теплообменника, выполненного упрощённым способом.

При изображении ФСА таким способом возникают трудности в чтении схем, т. к. на чертеже не находит отражение организация пунктов контроля и управления. Такие схемы дают лишь общие представления о принятых решениях и объеме автоматизации.

2 способ. Щиты и пульты изображают прямоугольниками, в зоне которых условно изображают установленные в щитах и пультах средства автоматизации. От них линии связи идут к элементам схемы, с которыми они взаимодействуют. Непосредственно на технологическом оборудовании и коммуникациях изображают измерительные преобразователи, исполнительные механизмы и регулирующие органы. Щиты и пульты управления отображают организацию пунктов контроля и управления технологическим процессом и располагаются в нижней части поля чертежа. Приборы и средства автоматизации, установленные вне щитов и пультов и не связанные непосредственно с технологическим оборудованием и коммуникациями, условно показывают в прямоугольнике "Приборы местные".

Приборы и средства автоматизации, представленные в распоряжение оператора, показывают в прямоугольнике "Щит управления" (рис.2).

В случае сложных ФСА в избежание большого количества изломов и пересечений линии связи обрывают и пунктируют. Для нижнего ряда номера должны следовать в возрастающем порядке, для верхнего ряда они могут располагаться произвольно. На участках линий связи над верхним прямоугольником указывают предельные рабочие значения измеряемых и регулируемых величин при установившемся режиме работы. Система нумерации средств автоматизации

предусматривает присвоение каждому комплекту аппаратуры в канале измерения или контуре регулирования порядковый номер, а каждой составной части комплекта (измерительному преобразователю, измерительному или регулирующему прибору, переключатель и т.п.)-буквенный или цифровой порядковый индекс (а, б, в... и т.д.; 1,2,3...). Полный номер каждого элемента комплекта аппаратуры состоит двух частей-1а,2б и т.д. или 1-1,2-1 и т.д. Электроаппаратуре, например, сигнальным лампам присваивают цифро-буквенные обозначения, применяемые в принципиальных электрических схемах-НЛ1, НЛ2. Отборные устройства, в которых преобразование измеряемого параметра не происходит (например, отбор давления), в схемах не нумеруют.

Методика построения графических условных обозначений является общей для обоих способов построения ФСА. В верхней части окружности находятся буквенные обозначения измеряемой величины и функционального признака прибора.

Порядок расположения буквенных обозначений (слева направо) следующий:

- обозначения основной измеряемой величины;

- обозначение, уточняющее (если это необходимо) основную измеряемую величину; обозначение функционального признака прибора.

Порядок буквенных обозначений функциональных признаков (если их несколько в одном приборе) должен быть следующим: "IRCSA".

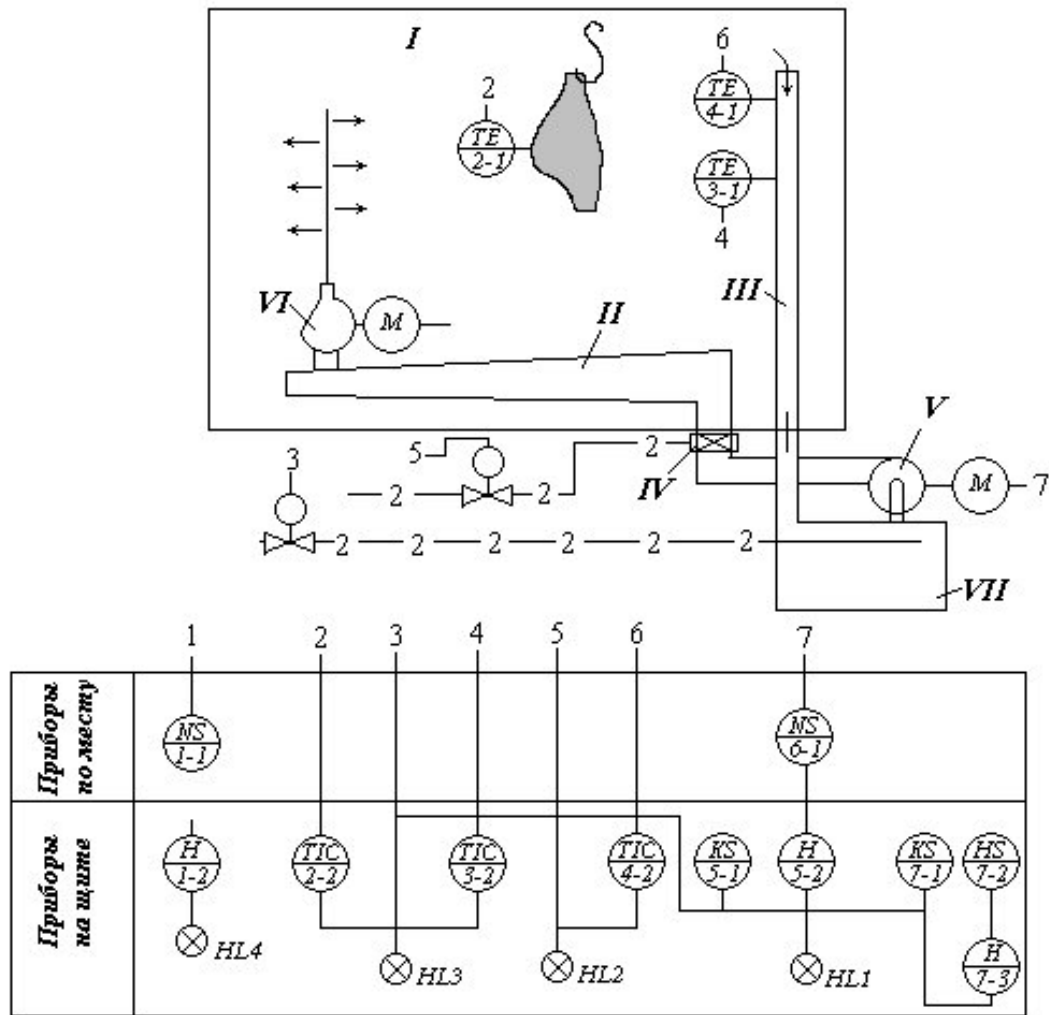


Рисунок 2 - ФСА размораживания мяса в полутушах

I-камера; II, III – воздуховоды, IV - калорифер; V, VI - вентиляторы, VII – камера смещения;

- 1- пусковая аппаратура;
- 2– измеритель-сигнализатор температуры в туше;
- 3- регулятор влажности;
- 4- регулятор температуры в камере;
- 5- программное устройство;
- 6- пусковая аппаратура;
- 7- программное устройство.

В нижней части окружности наносится позиционное обозначение (цифровое или буквенно-цифровое), служащее для нумерации комплекта измерения или регулирования (при упрощённом способе построения ФСА), или отдельных элементов комплекта (при развёрнутом способе построения ФСА). Если позиционное обозначение прибора не помещается в окружности, допускается нанести его за пределом окружности, либо применить вместо окружности эллипс.

При обозначении прибора следует указывать не все функциональные признаки прибора, а только те, которые используются в данной схеме.

При построении условного обозначения сигнализатора уровня, блок сигнализации которого является бесшкальным прибором, снабженным контактным устройством, следует писать:

а) "LS"- если прибор используется только для включения, выключения насоса, блокировок и т.д.

б) "LA"- если прибор используется только для сигнализации (местной или дистанционной);

в) "LSA"- если используются обе функции по подпунктам «а» и «б».

г) "LC"- если прибор используется для регулирования уровня.

Размеры графических условных обозначений приборов и средств автоматизации приведены в приложении 5.

Прямоугольники, которыми изображаются щиты и пульты имеют произвольные размеры, достаточные для нанесения графических условных обозначений приборов.

Толщина линий условных графических обозначений должна составлять 0,5-0,6 мм. Горизонтальная разделительная черта внутри обозначения прибора и линии связи выполняются линиями толщиной 0,2-0,3 мм.

Рекомендации по выбору аппаратуры систем автоматизации.

Прежде чем приступить к автоматизации технологического процесса необходимо тщательно изучить технологический процесс, выявить технологические переменные, определяющие протекание ТП и взаимосвязи между ними.

При выборе технических средств автоматизации следует учитывать: условия пожаро-взрывоопасности процесса; агрессивность и токсичность окружающей среды; -параметры и физико-химические свойства измеряемой среды; -дальность передачи сигналов информации от места установки измерительных преобразователей, исполнительных устройств; -требуемая точность и быстродействие приборов и регуляторов; -требования к стерильности и герметичности технологических аппаратов.

При выборе технических средств автоматизации следует ориентироваться на серийно выпускаемые. При этом предпочтение отдается Государственной системе промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП). Применение ГСП позволяет добиваться унификации системы.

Практика показывает, что предприятия мясо-молочной промышленности на 70 процентов оснащены электрическими средствами автоматизации. Широкое применение находят технические средства автоматики завода МЗТА и регулирующие устройства системы «Каскад», «Контур», АКЭСР.

При автоматизации взрыво- и пожароопасных ТП находят применение средства пневмоавтоматики.

Достоинством пневматических устройств автоматики является высокая надежность и достаточная простота. Дальность передачи информации в пневмоавтоматике достигает 300 м. Наиболее распространенные технические средства этой серии - приборы системы «Старт». Источником энергии для пневматических приборов является сжатый воздух давлением 0,14 МПа.

При выборе приборов, входящих в автоматическую систему регулирования, необходимо учитывать их совместимость по входным - выходным сигналам и конструктивным размерам.

Выбранные технические средства автоматизации, решающие задачи автоматического управления ТП должны быть оформлены в виде спецификации (см. приложение 6).

4.3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

4.3.1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ АСР И ИХ ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Регулированием называется процесс поддержания требуемого значения регулируемой величины $Y(t)$ или изменение её по заданной программе, которая задаётся заранее или поступает извне в ходе эксплуатации системы. Выходная величина, значение которой контролируется и поддерживается в ходе такого процесса, называется регулируемой или регулируемым параметром. Объект, в котором осуществляется регулирование, называется объектом регулирования (ОР).

Сущность процесса регулирования заключается в воздействии на объект регулирования таким образом, чтобы регулируемая величина стремилась бы к своему заданному значению $Y_{\text{зад}}$ с соответствующей точностью. Разность между заданным и текущим значениями регулируемой величины называется ошибкой регулирования или рассогласованием $\varepsilon(t) = Y_{\text{зад}} - Y(t)$. Сам процесс технически реализуется посредством автоматической системой регулирования (АСР). В общем случае такая система состоит из регулятора (Р-Р) и объекта регулирования (ОР) (рис. 3).

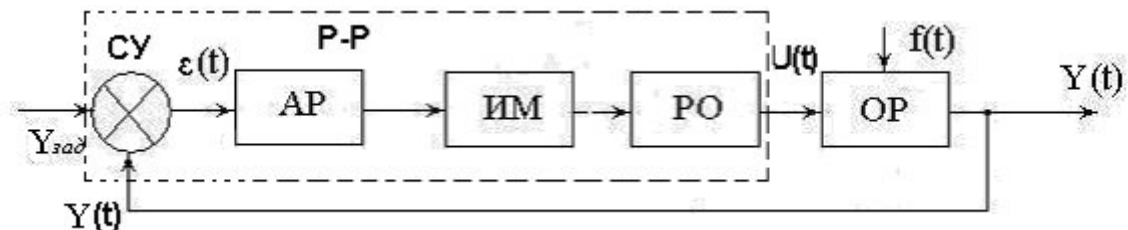


Рисунок 3 - Блок схема АСР

В состав Р-Р (рис. 3) входят такие устройства, как сравнивающее устройство (СУ) в виде сумматора, автоматический регулятор (АР), исполнительный механизм (ИМ) и регулирующий орган (РО).

В сумматоре осуществляется сравнение текущего значения регулируемого параметра $Y(t)$ с заданным $Y_{\text{зад}}$. и вырабатывается рассогласование $\varepsilon(t)$. Это рассогласование поступает в автоматический регулятор. Здесь, в соответствии с заданным законом регулирования, формируется управляющий сигнал. После чего через исполнительный механизм и регулирующий орган он оказывает управляющее воздействие $U(t)$ на ОР. При этом, выходная (регулируемая) величина $Y(t)$ должна стремиться к своему заданному значению, $Y_{\text{зад}}$, т.е. $Y(t) \rightarrow Y_{\text{зад}}$. Следовательно, принцип регулирования можно отобразить выражением $\varepsilon(t) \rightarrow 0$, при $t \rightarrow \infty$.

4.3.2. ОБЪЕКТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ, ИХ ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ

Следует отметить, что динамические свойства регулятора и объекта регулирования влияют на состояние АСР, определяя характер и особенности переходного процесса регулирования после возмущения АСР. Следовательно, для того, чтобы правильно выбрать регулятор, необходимо знать динамику объекта регулирования, т.е. иметь математическую модель объекта (дифференциальные уравнения, передаточные функции и т. д.). Такую модель можно получить аналитическим и экспериментальным путем.

Первый путь заключается в составлении дифференциального уравнения, описывающего динамику объекта. При этом выполняются следующие этапы. Выявляется физический закон, определяющий статику и динамику каждого элемента схемы. Таким законом может быть, например, закон сохранения вещества (объекты регулирования уровня, давления), закон сохранения энергии (объекты регулирования температуры) и другие основные законы физики. Преобразованное математическое выражение соответствующего закона и является исходным дифференциальным уравнением данного элемента системы. Далее полученные уравнения линеаризуются и записываются в операторной форме. Полученная совокупность уравнений описывает поведение всей системы, позволяя при этом определять операторы системы и её передаточные функции. Однако не всегда для определения упомянутых выше законов и их параметров имеется исходная информация.

В этом случае используют другой метод получения математической модели объекта, экспериментальный. Суть этого метода сводится к получению, опытным путём переходной функции $h(t)$. Для этого объект приводят в равновесное состояние, близкое к номинальному. Затем на вход подают скачкообразное возмущение и регистрируют изменяющиеся значения выходной величины до прихода ее к новому установившемуся значению. На основании экспериментально полученных данных строят график переходной функции объекта в координатах "X - Y". Где X - входное воздействие, Y- выходная величина. В дальнейшем такую функцию будем называть кривой разгона и обозначать $Y(t)$ или $h(t)$.

По этой характеристике можно также определять такие свойства объекта, как самовыравнивание и емкость.

Самовыравниванием называют свойство объекта самостоятельно (без участия регулятора) восстанавливать нарушенное равновесие притока вещества или энергии со стоком, в результате чего после некоторого времени (времени переходного процесса) выходная переменная Y объекта вновь принимает установившееся значение, не обязательно прежнее (рис. 4а). Объекты с самовыравниванием называют еще статическими объектами. Самовыравнивание является положительным свойством т. к. облегчает работу регулятора. Такие объекты в статическом режиме имеют установившееся значение выходной величины $Y_{уст.}$

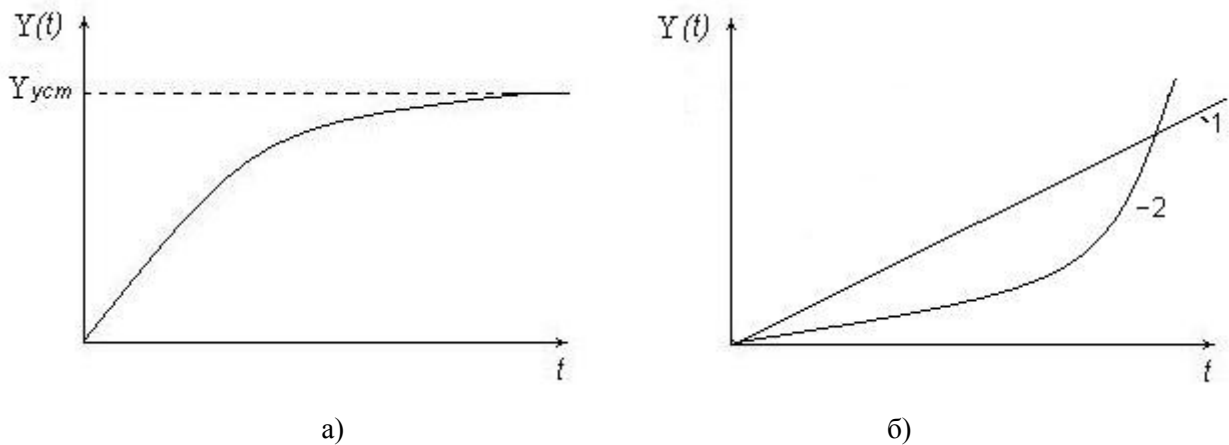


Рисунок 4 - Переходные функции объектов:
а- переходная функция статического объекта; б- переходные функции астатических объектов, линейный объект (прямая 1) и нелинейный (кривая 2).

К астатическим относятся объекты, в которых при постоянном воздействии регулируемая величина Y непрерывно изменяется и не имеет при этом установившегося значения (рис. 4б). В отдельных случаях выходная величина может изменяться по линейному закону (линия 1) а в некоторых - по нелинейному (кривая 2). Другими словами, астатические объекты не обладают свойством самовывравнивания.

Вид переходной характеристики зависит и от другого свойства объекта - ёмкости. Ёмкость - это способность объекта в процессе работы накапливать или истощать вещество, или энергию. Ёмкость является аккумуляющей способностью объекта. Ее физическая сущность различна в зависимости от характера объекта и происходящего в нем процесса. К примеру, для тепловых объектов емкостью является их теплоемкость. Различают одноемкостные, двухемкостные и многоемкостные объекты.

Динамика поведения объектов описывается дифференциальными уравнениями. Наиболее простое оно для одноемкостного объекта:

$$Tdy(t)/dt + y(t) = Kx(t). \quad (1)$$

Решением этого дифференциального уравнения является уравнение экспоненты:

$$y(t) = K x(t) (1 - e^{-t/T}) = y(\infty) (1 - e^{-t/T}), \quad (2)$$

где T - постоянная времени объекта;
 K - коэффициент передачи объекта;
 $x(t)$ - входное ступенчатое воздействие (возмущение-превышение притоком или расходом определенного значения);
 $y(t)$ - текущее значение выходной величины;
 t - текущее время;
 $y(\infty) = Y_k - Y(0)$ - приращение кривой разгона за время переходного процесса;

U_{∞} – конечное значение кривой разгона, т.е. её значение в установившемся режиме (переходный процесс закончился);

$U(0)$ – начальное значение кривой разгона, т.е. её значение при $t=0$.

В дальнейшем при проведении расчётов будем принимать, что $X_{вх} = 1$. Тогда в формуле (2) будем считать, что $K = u(\infty)$.

Решение (2) математически описывает кривую разгона одноемкостного объекта, график которой показан на рис. 5а.

Передаточная функция такого объекта соответствует передаточной функции апериодического звена 1-ого порядка и равна:

$$W(p) = K/(Tp+1),$$

где K , T – параметры функции.

Наличие второй емкости в двухемкостном объекте приводит к медленному изменению параметра в начальный период и появлению точки перегиба "S": Динамика двухемкостного объекта адекватна апериодическому звену (АЗ) второго порядка с дифференциальным уравнением:

$$T^2 d^2 y(t)/dt^2 + T dy(t)/dt + y(t) = Kx(t)$$

Решение такого уравнения аналитически отображает кривую разгона двухемкостного объекта. График этой кривой показан на рис. 5б.

Передаточная функция объекта в этом случае равна:

$$W(p) = K/(T^2 p^2 + 2\zeta Tp + 1),$$

где K , T – параметры функции;

ζ – коэффициент демпфирования.

Последнюю передаточную функцию при значении параметра $\zeta > 1$ (что, как правило, соответствует 2-ух емкостным объектам) можно записать в виде последовательности двух апериодических звеньев 1-ого порядка:

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (3)$$

где $K = u(\infty)$, $T_1 * T_2 = T$, $(T_1 + T_2) = 2T$ – параметры передаточной функции (3)

а)

б)

Рисунок 5 - Переходные функции объектов:

а- переходная функция одноемкостного объекта;

б- переходная функция двухемкостного объекта.

С целью упрощения расчетов переходную характеристику двухемкостного объекта аппроксимируют кривой одноемкостного объекта с запаздыванием. Для этого апериодическое звено 2-ого порядка заменяют последовательным соединением

двух звеньев: апериодическим звеном 1-ого порядка и звеном с «чистым» запаздыванием. В результате передаточная функция объекта приобретёт вид:

$$W_3(p) = \frac{K \times e^{-\tau_3 p}}{(Tp + 1)} \quad (4)$$

Определение параметров τ_3 , T эквивалентной передаточной функции $W_3(p)$ может быть осуществлено двумя способами: графическим и численным. В дальнейшем эти параметры будем называть асимптотическими.

Исходной информацией для их нахождения в обоих случаях является график переходной характеристики (кривой разгона) или её численные значения (табличные данные). При первом способе к переходной характеристике в точке ее перегиба «S» проводят касательную, как показано на рис. 5б, до пересечения с линией начального значения выходной величины и линией ее нового установившегося значения.

Отрезок времени, отсчитываемый от момента пересечения касательной с осью t до момента пересечения ее с линией нового установившегося значения выходной величины, принимается за постоянную времени объекта T . За время запаздывания τ_3 принимается отрезок, отсчитываемый от начала подачи возмущения до пересечения касательной с осью абсцисс.

Кроме графического метода можно воспользоваться численным. Для этого определяют абсциссы точек, ординаты которых равны:

$$Y(t^{II}) = 0,33 y(\infty) + Y(0);$$

$$Y(t^I) = 0,7 y(\infty) + Y(0),$$

где $y(\infty) = Y_k - Y(0)$ – приращение кривой разгона за время переходного процесса;

Y_k , $Y(0)$ – конечное и начальное соответственно значения кривой разгона.

По вычисленным значениям ординат, производя обратное преобразование, находим значения абсцисс t^{II} , t^I , по которым и определяются искомые асимптотические параметры:

$$\tau_3 = 0,5 (3t^{II} - t^I); \quad T = 1,25 (t^I - t^{II}) \quad (5)$$

Таким образом, при проектировании АСР динамику объекта можно описывать двояко либо точной передаточной функцией (3), либо приближённой (4). В первом случае используют достаточно точные методы анализа и синтеза АСР (частотные, корневые и т.д.). Во втором – приближённые (графоаналитические). В настоящем курсовом проекте предусматривается осуществить синтез АСР (расчёт регулятора и его параметров) приближённым способом, а анализ с последующей коррекцией параметров регулятора более точным, с использованием компьютерной техники. Рассмотрим порядок нахождения асимптотических параметров τ_3 , T аналитическим способом.

Пример 1.

Дана передаточная функция объекта регулирования:

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

где $K=1$, $T_1=20$, $T_2=40$.

Требуется определить асимптотические параметры τ_z и T .

Решение:

Используя программу «СИАМ» найдём значения переходной функции $h(t)$ (кривой разгона). С этой целью в режиме «F2-Блок» строим структурную схему

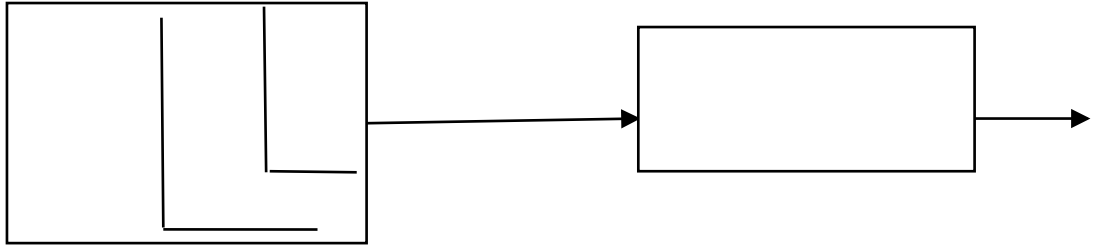


Рисунок 6 - Структурная схема ОР.

Величину входного воздействия принимаем равной единице $X_{вх.} = 1$. Остальные параметры в соответствии с исходными данными.

После составления структурной схемы производим расчёты на компьютере и фиксируем результат в виде таблицы 1.

Таблица 1

t	h(t)	t	h(t)	t	h(t)
0	0	12	0,067175	28	0,253426
1	0,00061	13	0,076991	30	0,278397
2	0,002379	14	0,087209	35	0,34005
3	0,005221	15	0,097788	40	0,399576
4	0,005056	16	0,108689	45	0,456094
5	0,013807	17	0,119875	50	0,509075
6	0,019402	18	0,131313	60	0,603527
7	0,025774	19	0,142971	70	0,682649
8	0,032859	20	0,154818	80	0,747645
9	0,040596	22	0,178971	90	0,800311
10	0,048929	24	0,203571	200	0,9867
11	0,057806	26	0,22844	600	1

Рекомендуется по данным табл.1 построить график характеристики разгона и найти значения искомых величин τ_z и T графическим способом, как показано на рис. 5б. После этого эти величины определяются аналитическим способом.

$$Y(\infty) = y(\infty) = Y_k - Y(0) = 1 - 0 = 1,$$

$$\text{Отсюда } Y(t^{\text{II}}) = 0,33y(\infty) = 0,33; Y(t^{\text{I}}) = 0,7y(\infty) = 0,7.$$

Найдём из табл.1 значения абсцисс, производя при этом интерполяцию.

$$t^{II}=34,19; \quad t^I=72,6.$$

Подставив эти значения аргументов в формулу (5), вычислим асимптотические параметры:

$$\begin{aligned}\tau_3 &= 0,5 (3t^{II}-t^I) = 0,5(3*34,19-72,6) = 14,99; \\ T &= 1,25 (t^I - t^{II}) = 1,25(72,6-34,19) = 48,01.\end{aligned}$$

В результате произведённых вычислений динамика объекта будет описываться уже не реальной, а эквивалентной передаточной функцией:

$$W_3(p) = \frac{K \times e^{-\tau_3 p}}{(Tp + 1)} \text{ с вычисленными асимптотическими параметрами } \tau_3 \text{ и } T.$$

Такая замена позволяет упростить синтез и анализ АСР, хотя и снижает точность полученных при этом результатов.

4.3.3. РЕГУЛЯТОРЫ, ИХ ВИДЫ И ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В настоящее время, наиболее часто в технологических процессах используются непрерывные и релейные (двухпозиционные) регуляторы. Рассмотрим основные типы этих регуляторов, методы их синтеза и анализа. В производстве, где требуется высокая точность, а процессы носят достаточно скоротечный характер, как правило, используются непрерывные регуляторы. Выбор такого регулятора, его закона управления (регулирования) и параметров этого закона называется синтезом АСР.

Закон регулирования является основной характеристикой автоматического регулятора и представляет собой уравнение, показывающее зависимость управляющего воздействия $U(t)$ (перемещение регулирующего органа и др.) от ошибки регулирования $\varepsilon(t)$, её производных и интеграла от неё.

Наиболее часто используются регуляторы, реализующие следующие законы регулирования:

- 1) пропорциональный (П);
- 2) интегральный (И);
- 3) пропорционально-интегральный (ПИ);
- 4) Пропорционально-дифференциальный (ПД);
- 5) пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД).

Пропорциональный (П) закон регулирования реализует уравнение вида:

$$U(t) = k_\varepsilon \varepsilon(t), \tag{6}$$

где k_ε - коэффициент усиления П-регулятора;

$U(t)$ -управляющее воздействие регулятора;

$\varepsilon(t)$ - ошибка регулирования, равная разности между текущим и заданным значениями регулируемой величины $Y_{\text{зад}} - Y(t)$.

В таком регуляторе управляющее воздействие $U(t)$ зависит только от значения ошибки регулирования $\varepsilon(t)$.

Недостатком П-регулятора является наличие остаточного отклонения регулируемой величины от заданного значения, т.е. установившейся ошибки в статическом режиме. Кроме того, для него характерно низкое качество регулирования в переходном режиме, т.к. здесь не учитывается скорость изменения ошибки $\varepsilon(t)$. Как правило, такие регуляторы используются редко.

Интегральный (И) закон регулирования описывается уравнением:

$$U(t) = 1/T_{\text{и}} \int \varepsilon(t) dt, \quad (7)$$

где $T_{\text{и}}$ - параметр настройки регулятора.

В И-регуляторе управляющее воздействие $U(t)$ пропорционально интегралу от ошибки регулирования $\varepsilon(t)$. Поэтому регулируемый орган будет перемещаться до тех пор, пока регулируемая величина не примет заданное значение, т.е. ошибка $\varepsilon(t)$ не станет равной нулю. АСР с такими регуляторами не используются, т.к. в этом случае они являются структурно неустойчивыми, а значит практически неприменимыми.

Интеграл может быть просто составной частью в выбранном ЗУ, например, в ПИ – регуляторе. Закон управления такого регулятора представляет собой сумму пропорционального и интегрального законов:

$$U(t) = k_{\varepsilon} \varepsilon(t) + 1/T_{\text{и}} \int \varepsilon(t) dt, \quad (8)$$

где k_{ε} - коэффициент усиления по сигналу ошибки;

$K_{\text{и}} = 1/T_{\text{и}}$ - коэффициент усиления по интегральной составляющей.

Достоинством ПИ-регулятора является отсутствие остаточного отклонения. Другими словами, системы с такими регуляторами обладают высокой точностью в установившемся режиме. Вместе с тем, динамический режим отличается низким качеством регулирования.

ПИД-закон регулирования - это сумма пропорционального, интегрального и дифференциального законов:

$$U(t) = k_{\varepsilon} \varepsilon(t) + 1/T_{\text{и}} \int \varepsilon(t) dt + 1/T_{\text{д}} d\varepsilon(t)/dt, \quad (9)$$

где $k_{\text{д}} = 1/T_{\text{д}}$ - коэффициент усиления по скоростной (дифференцирующей) составляющей ошибки.

Таким образом, управляющее воздействие с выхода регулятора, подаваемое на объект, в ПИД-законе пропорционально ошибке регулирования, интегралу от неё, а также скорости её изменения. Всё это позволяет добиваться высокого качества регулирования. ПИД-регулятор является наиболее сложным и применяется для объектов с высокими требованиями к качеству процесса регулирования.

Для оценки качества переходного процесса регулирования (рис. 7) применяются следующие показатели:

Рисунок 7 - График переходного процесса регулирования АСР, здесь Y_3 – заданное значение регулируемой величины; Y_∞ – установившееся значение регулируемой величины; $Y_{\max}$ – максимальное значение регулируемой величины.

1) $\Delta Y_{\max} = Y_{\max} - Y_3$ – максимальное динамическое отклонение регулируемой величины от её заданного значения (характеризует колебательность процесса регулирования);

2) $\sigma = (Y_{\max} - Y_\infty) / Y_\infty \cdot 100\%$ – перерегулирование, которое также характеризует колебательность процесса регулирования.

3) T_p – время регулирования, характеризующее быстродействие системы.

4) $Y_{\text{ост}} = Y_3 - Y_\infty$ – остаточное отклонение регулируемой величины от заданного значения (установившаяся ошибка), характеризующее точность АСР.

В зависимости от требований, вид переходного процесса может иметь апериодический или колебательный характер (рис. 8).

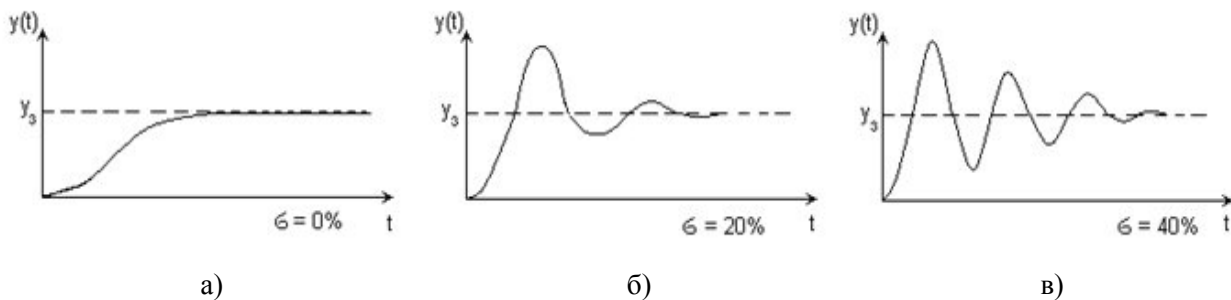
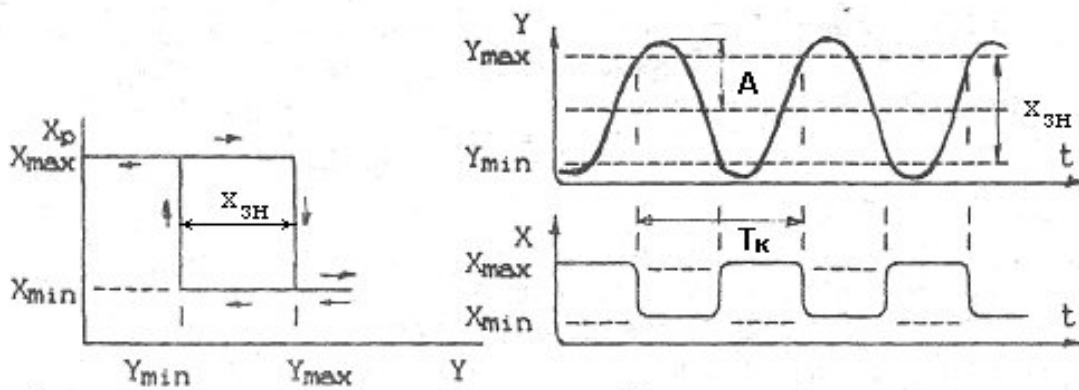


Рисунок 8 - Графики процессов регулирования:

- а - апериодический процесс с перерегулированием равным нулю;
- б - колебательный процесс с перерегулированием равным 20%;
- в - колебательный процесс с перерегулированием равным 40%

Среди рассмотренных процессов, с точки зрения колебательности предпочтительнее первый (а), т.к. перерегулирование равно нулю. Более низким качеством обладает второй (с перерегулированием 20%). Самое низкое качество в третьем (40%). Вместе с тем, повышение качества АСР влечёт за собой увеличение её стоимости. Следовательно, при проектировании необходимо учитывать это противоречие. Обычно считается вполне приемлемым перерегулирование в 20%, что в дальнейшем и будем учитывать при проектировании.

В производственных процессах, когда не требуется высокая точность, используют двухпозиционные регуляторы. Регулирующий орган в этом случае имеет два положения (открыт, закрыт). Следует отметить простоту, низкую стоимость и высокую надёжность подобных регуляторов.



а)

б)

Рисунок 9 - Характеристики двухпозиционного регулятора:

а - статическая характеристика, где Y - регулируемая величина, X_p - регулирующее воздействие; б - переходный процесс и изменение регулирующего воздействия

На рис. 9 показаны статическая характеристика (а), процесс регулирования и изменение управляющего воздействия (б). Из него видно, что процесс носит автоколебательный характер. Качество такого процесса оценивается такими показателями, как амплитуда (A) и период колебаний (T_k). На значение этих показателей оказывают влияние такие факторы как параметры объекта (его инерционность, запаздывание и т.д.), так и свойства регулятора. Одним из важнейших его свойств является наличие зоны нечувствительности X_{zn} и её величина, которая равна:

$$X_{zn} = Y_{max} - Y_{min}.$$

С её увеличением значение показателей A , T нарастает, качество регулирования снижается. При уменьшении же зоны наблюдается обратная картина, качество повышается. Таким образом, меняя величину зоны, можно добиваться требуемого качества регулирования.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЁТОВ ПРИ ВЫБОРЕ РЕГУЛЯТОРА

5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА И ВЫБОР ВИДА РЕГУЛЯТОРА

Предварительно, перед выбором вида регулятора выбирают канал регулирования, исходя из следующих соображений:

- из всех возможных каналов регулирования выбирают самый чувствительный, т.е. такой по которому, минимальное значение регулирующего воздействия вызывает максимальное изменение регулируемой величины;

- допустимый диапазон изменения регулирующего воздействия должен обеспечивать компенсацию максимально возможных возмущений, вызывающих изменение регулируемого параметра;

- время запаздывания τ_z и отношение τ_z/T по выбранному каналу должны быть

наименьшими;

-если изменение некоторых регулирующих воздействий приводит к изменению нескольких входных и выходных параметров объекта, то из этих регулирующих воздействий следует выбирать такое, при котором одновременно с достаточно большим коэффициентом передачи и компенсацией максимально возможных возмущений обеспечивается минимальное влияние на другие параметры - их изменения остаются в пределах, допустимых технологическими требованиями.

Итак, после того как канал регулирования выбран, к нему подбирается вид регулятора. Как известно, используются такие виды, как непрерывный, релейный (двухпозиционный) и импульсный. Выбор осуществляется в зависимости от значения величины отношения τ_3/T . Так при $0,2 < \tau_3/T < 1$ выбирают регулятор непрерывного действия, при $\tau_3/T < 0,2$ -регулятор релейного действия, а при $\tau_3/T > 1$ – регулятор импульсного' действия. Таким образом, для выполнения этого этапа проектирования необходимо выполнить следующие операции:

- по значениям параметров объекта T_1 , T_2 и K_0 (задание на проектирование) с использованием программы «СИАМ» строится график кривой разгона. При этом считается, что динамика этого объекта соответствует апериодическому звену второго порядка с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)};$$

- по полученному графику находятся параметры τ_3 и T (формулы 5), а затем отношение τ_3/T ;

-по величине этого отношения определяют вид регулятора: непрерывный, релейный или импульсный.

Построение кривой разгона и вычисление асимптотических параметров было рассмотрено в подразделе 4.3.2 на числовом примере 1.

Следует отметить, что в данном курсовом проекте рассматриваются только два вида: непрерывный и релейный.

Если был выбран непрерывный регулятор, то дальнейшие расчёты осуществляются в соответствии с подразделами 5.2.1 и 5.2.2. Если же –двухпозиционный, то в соответствии с 5.3.1 и 5.3.2.

5.2. МЕТОДИКА РАСЧЁТА НЕПРЕРЫВНОГО РЕГУЛЯТОРА

5.2.1 ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ВЫЧИСЛЕНИЕ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

После того как был выбран вид регулятора, нужно определить его тип или, другими словами, закон регулирования. В настоящее время для этого существуют различные методики. К ним относятся приближенные (графические и графоаналитические) и точные (численные, основанные на применении электронно-вычислительной техники).

Как уже было сказано выше, для выбора непрерывного регулятора будет использоваться графоаналитический способ /22/.

Этот способ основывается на том, что динамики объекта описывается эквивалентной передаточной функцией (4). Проведение расчётов производится с использованием заранее составленных графиков (рис.10-12), учитывающих как характеристики объектов, так и требования, предъявляемые к качеству процесса регулирования, в виде заданных значений показателей качества.

Для выбора регулятора непрерывного действия графоаналитическим методом необходимы следующие исходные данные:

- характеристики объекта: время запаздывания τ_z ; постоянная времени T ; отношение запаздывания к постоянной времени, τ_z / T ; коэффициент передачи объекта $K_{об}$, выраженный отношением единицы измерения регулируемого параметра к проценту хода регулирующего органа и максимально возможные возмущения по нагрузке ΔQ , выраженные в процентах хода регулирующего органа;

- технологические требования к качеству процесса регулирования, в виде: максимального динамического отклонения $\Delta Y_{max} = Y_{max} - Y_z$, выраженного в единицах измерения регулируемого параметра; допустимого перерегулирования σ_{max} , максимально допустимого времени регулирования T_p^{max} и остаточного отклонения $Y_{ост}^{max}$, выраженного в единицах измерения регулируемой величины.

Последующий выбор закона управления и его параметров должен основываться на выполнении следующих неравенств:

$$\Delta Y < \Delta Y_{max} \quad (10)$$

$$T_p < T_p^{max}; \quad (11)$$

$$Y_{ост} < Y_{ост}^{max}, \quad (12)$$

где ΔY , T_p и $Y_{ост}$ – показатели качества спроектированной системы.

Если условия (10)-(12) по окончании проектирования оказались не выполненными, то система не отвечает поставленному заданию и требуется её коррекция (выбрать другой регулятор или сменить его параметры или проделать то и другое).

Проверка выполнения условий (10)-(12) начинается с первого по следующей методике.

По указанным выше данным рассчитывают величину динамического коэффициента регулирования R_d , который показывает степень воздействия регулятора на объект и численно равен отношению величины максимально допустимого динамического отклонения к величине отклонения выходной величины в объекте без регулятора под воздействием того же возмущения:

Для статических объектов

$$R_d = \Delta Y_{max} / Y(\infty), \quad (13)$$

для астатических объектов

$$R_d = \text{tga} / Y(\infty), \quad (14)$$

здесь:

a - угол наклона переходной характеристики объекта.

Рисунок 10

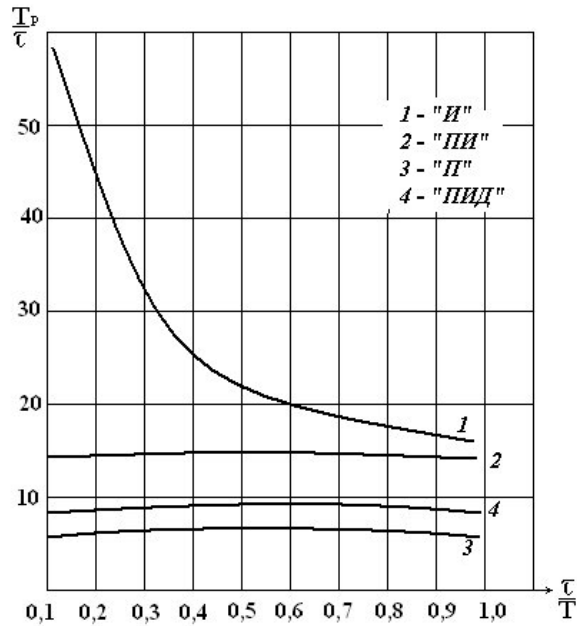


Рисунок 11

Далее, по графикам зависимости R_d от τ_3/T (рис.10) находят тип регулятора (П, ПИ, ПИД). Для этого на графике строят точку с координатами $(R_d, \tau_3/T)$. Тип регулятора (закон управления) выбирают по ближайшей кривой, расположенной ниже этой точки.

Например: По кривой разгона определили, отношение $\tau_3/T=0,5$. Из исходных данных известно, что $\Delta Y_{\max}=4$, $Y_k=57$, $Y(0)=67$.

Тогда $Y(\infty) = Y_k - Y(0) = 10$. Отсюда $R_d = \Delta Y_{\max} / Y(\infty) = 4/10 = 0,4$.

Входя в график на рис.10, по координатам $\tau_3/T=0,5$ и $R_d=0,4$ построим точку. Не трудно видеть, что она окажется между кривыми 4 и 2, выше первой и ниже второй. Следовательно, выбираем закон управления, соответствующий нижней кривой, т.е. 4ой (ПИД).

После выбора типа регулятора по этим графикам необходимо проверить, обеспечивается ли условие (11). Это делают по характеристикам (рис.11), отражающим зависимость относительного времени регулирования T_p/τ_3 от величины τ_3/T для различных регуляторов непрерывного действия. Используя их, можно найти для выбранного закона управления значение T_p . После чего производится проверка выполнения условия (11). Если оно не выполняется, то необходимо использовать другой закон управления и снова произвести проверку. И так до тех пор, пока не будет выполняться. В случае его выполнения считается, что закон выбран правильно.

Например: $\tau_3/T=0,5$; тип регулятора «ПИД». Тогда из графика (рисунок 11) можно определить, что отношение $T_p/\tau_3=9,1$. Отсюда $T_p=9,1\tau_3$. Зная значение параметра τ_3 , нетрудно вычислить величину T_p и проверить выполнение условия (11).

При выборе П-регулятора необходимо, кроме того, проверить выполнение условия (12). С этой целью по графику на рис. 12 Находим значение $Y_{\text{ост}}$. После чего и осуществляем эту проверку.

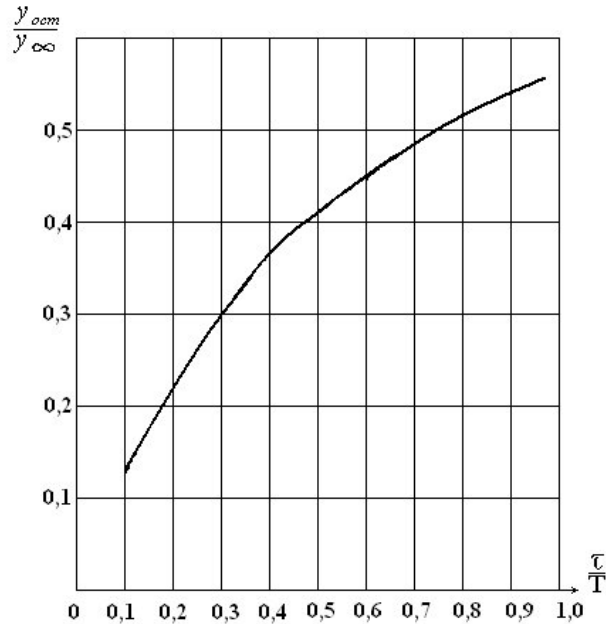


Рисунок 12

Если остаточное отклонение превышает допустимое $Y_{ост}^{max}$, то рекомендуется либо увеличить коэффициент передачи АСР, либо вместо П-регулятора выбрать ПИ- или ПИД- регулятор. Такая замена приведёт к тому, что остаточное отклонение $Y_{ост}$ станет равным нулю. Вместе с тем введение в закон управления интегральной составляющей ухудшит качество переходного процесса регулирования. Следовательно, указанный выше порядок проектирования необходимо будет повторить сначала. Все эти операции нужно проделывать до тех пор, пока не будут выполняться все условия (10)- (12).

Таким образом, последовательность действий при выборе вида и типа непрерывного регулятора следующая:

1. По исходным данным (T_1 , T_2 и K_0) строим график кривой разгона объекта с использованием программы «СИАМ».

2. По этому графику определяем асимптотические параметры объекта: время запаздывания τ_3 , постоянную времени T .

3. Вычисляем отношение τ_3 / T и выбираем вид регулятора.

4. Находим динамический коэффициент регулирования R_d . Затем по графику зависимости R_d от отношения τ_3 / T (рис.10) выбираем тип регулятора. Для этого необходимо, чтобы точка "а", определяемая на пересечении значений R_d и τ_3 / T , лежала бы выше соответствующей кривой $R_d (\tau_3 / T)$ или на ней.

5. По графикам, изображенным на рис.11 проверяем выполнение условия (11). Если требуемое время регулирования не обеспечивается, следует выбрать другой регулятор, который обеспечил бы выполнение этого требования. Затем с использованием графика, показанного на рис.12 проверяется выполнение условия (13). Если остаточное отклонение больше допустимого, следует либо увеличить коэффициент передачи разомкнутой системы K , либо выбрать более сложный регулятор, закон регулирования которого включал бы в свой состав интегральную составляющую от ошибки регулирования (ПИ, ПИД).

6. После выбора закона регулирования, обеспечивающего требуемые показатели качества, следует определить параметры настройки регулятора, которые зависят от свойств объекта регулирования и вида переходного процесса.

В таблице 2 приведены формулы выбора настроек k_p , T_i , T_d основных регуляторов для статических объектов.

Таблица 2

Применяемый регулятор	Предполагаемый переходный процесс		
	апериодический	20%-е перерегулирование	мин.интег. квадр.
"П"-рег-р	$k_p = \frac{0,6}{k \tau_3 / T}$	$k_p = \frac{0,7}{k \tau_3 / T}$	$k_p = \frac{0,9}{k \tau_3 / T}$
"ПИ"-рег-р	$k_p = \frac{0,3}{k \tau_3 / T}$ $T_i = 0,6 \cdot T$	$k_p = \frac{0,3}{k \tau_3 / T}$ $T_i = 0,7 \cdot T$	$k_p = \frac{1}{k \tau_3 / T}$ $T_i = T$
"ПИД"-рег-р	$k_p = \frac{0,95}{k \tau_3 / T}$ $T_i = 2,4 \cdot t$ $T_d = 0,4 \cdot t$	$k_p = \frac{1,2}{k \tau_3 / T}$ $T_i = 2 \cdot t$ $T_d = 0,4 \cdot t$	$k_p = \frac{1,4}{k \tau_3 / T}$ $T_i = 1,3 \cdot t$ $T_d = 0,5 \cdot t$

$k = Y(\infty)/M\%$ - коэффициент передачи объекта регулирования;

$M\%$ - максимально возможный процент хода регулирующего органа;

k_p – коэффициент передачи регулятора;

T_i – постоянная времени интегрирующей составляющей;

T_d – постоянная времени производной составляющей.

Размерности указанных величин следующие:

$$[k] = \frac{\text{единица измерения выходной переменной объекта}}{\% \text{ хода регулирующего органа (ХРО)}};$$

$$[k_p] = \frac{\% \text{ хода регулирующего органа (ХРО)}}{\text{единица измерения выходной переменной объекта}} \text{ Equation.3 ;}$$

$$[T] = [\tau_3] = [T_i] = [T_d] = c.$$

Пример 2а.

Дана передаточная функция объекта регулирования

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

$T_1 = 79c$, $T_2 = 91c$, $K = 10$. Начальное значение выходной величины объекта $Y_0 = 53$.

Требования к качеству проектируемой АСР:

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\% = 14\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 3,1^{\circ}C.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=450\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

Произвести выбор вида регулятора, закона управления и рассчитать параметры регулятора.

Решение

По значениям параметров T_1 , T_2 и K рассчитаем (с использованием компьютера) значения кривой разгона и сведём их в таблицу.

Таблица значений кривой разгона.

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	53	60	54,583	140	57,907	260	61,094	600	62,929
5	53,017	70	55,002	160	58,617	280	61,406	700	62,975
10	53,064	80	55,432	180	59,253	300	61,67	800	62,991
20	53,238	90	55,865	200	59,815	320	61,894	900	62,997
40	53,817	100	56,295	220	60,305	500	62,806	1000	62,999
50	54,184	120	57,129	240	60,73	550	62,882	1100	63

Выбор вида и типа регулятора. Расчёт его параметров.

Определение асимптотических параметров объекта регулирования и выбор вида регулятора

По исходным данным из табл. 1 строим кривую разгона в плоскости величин $Y(t)$

Рисунок 13 - График кривой разгона $Y(t)$

Для реализации синтеза регулятора, т.е. выбора его вида, определения типа и вычисления параметров, воспользуемся графоаналитическим методом.

В соответствии с формулой (5) рассчитаем асимптотические параметры τ_3 и T :

$$Y(\infty) = Y_K - Y_0 = 63 - 53 = 10^{\circ}\text{C}.$$

Отсюда:

$$Y(t'') = 0,33 Y_{\infty} + Y(0) = 0,33 \cdot 10 = 3,3^{\circ}\text{C} + 53^{\circ}\text{C} = 56,3^{\circ}\text{C};$$

$$Y(t^I) = 0,7 Y_{\infty} = 0,7 \cdot 10 + Y(0) = 7^{\circ}\text{C} + 53^{\circ}\text{C} = 60^{\circ}\text{C},$$

Производя обратное преобразование, т.е. поиск аргумента, с одновременным осуществлением интерполяции, получим

$$t^{II} = 100,12; \quad t^I = 207,562.$$

Подставляя полученные значения в формулу (5), получим

$$\tau_3 = 0,5 (3 \cdot 100,12 - 207,562) = 46,399\text{с},$$

$$T = 1,25 (207,562 - 100,12) = 134,3\text{с}.$$

$$\text{Найдём отношение } \tau_3/T = 0,345.$$

Известно, что при значениях отношения $0,2 < \tau_3/T < 1$ выбирается регулятор непрерывного действия. Следовательно, в данном примере должен быть выбран такой регулятор.

Определим асимптотические параметры графическим способом. С этой целью на графике кривой разгона в точке её перегиба построим касательную, как показано на (рис. 5). По точкам пересечения соответствующих уровней $Y(t)$ определяем

значения параметров τ_3 и T . На плоскости графика кривой разгона строим асимптотическую функцию Y_{ac} . Асимптотическая кривая разгона начинается из точки на оси времени с абсциссой равной τ_3 . Если параметры выбраны правильно, то обе кривые в установившемся положении должны совместиться. Значения функции Y_{ac} вычисляются по формуле переходной функции апериодического звена 1-ого порядка со сдвигом по времени $t - \tau_3$. Отсюда

$$Y_{ac} = Y(\infty) (1 - e^{-(t - \tau_3)/T}) + Y_n,$$

где $Y_n = 53$ – начальное значение функции.

При проведении расчётов будем считать, что аргумент $(t - \tau_3) = 0$, если эта разность окажется меньше или равна нулю.

Вычислим значения Y_{ac} и сведём их в таблицу.

Таблица значений асимптотической функции.

t	t- τ_3	Y(t)ac.	t	t- τ_3	Y(t)ac.	t	t- τ_3	Y(t)ac.
0	0	53	100	53,601	56,291	320	273,6	61,696
5	0	53	120	73,601	57,219	500	453,6	62,659
10	0	53	140	93,601	58,019	550	503,6	62,765
20	0	53	160	113,6	58,708	600	553,6	62,838
40	0	53	180	133,6	59,302	700	653,6	62,923
46,399	0	53	200	153,6	59,814	800	753,6	62,963
50	3,6008	53,265	220	173,6	60,254	900	853,6	62,983
60	13,601	53,963	240	193,6	60,634	1000	953,6	62,992
70	23,601	54,612	260	213,6	60,962	1100	1053,6	62,996
80	33,601	55,213	280	233,6	61,244	1200	1153,6	62,998
90	43,601	55,772	300	253,6	61,487	1400	1353,6	63

По табличным значениям построим график $Y_{ac}(t)$ в плоскости графика функции $Y(t)$.

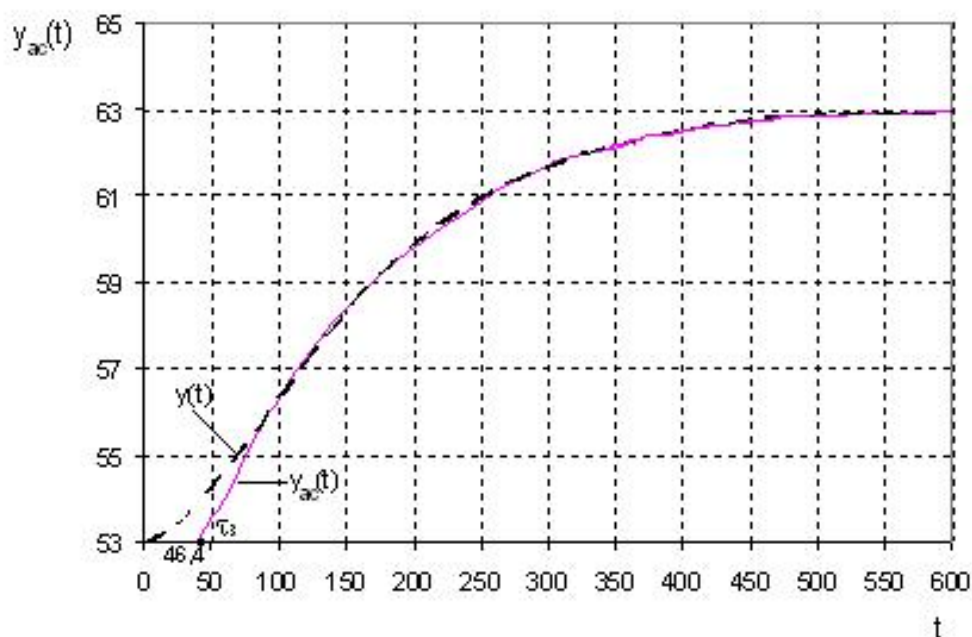


Рисунок 14 - График асимптотической кривой разгона $Y_{ас.}(t)$

Из рисунка видно, что что графики $Y(t)$ и $Y_{ас.}(t)$ совместились. Это говорит о правильности произведённых расчётов по определению асимптотических параметров и выборе вида регулятора.

Таким образом, при проведении дальнейших расчётов будем считать, что динамика объекта соответствует асимптотической кривой разгона. Из рис. 14 видно, что такая замена не влечёт за собой большой погрешности. Эта погрешность соответствует площади, лежащей между кривыми $Y_{ас.}(t)$ и $Y(t)$. Следовательно, переход от кривой $Y(t)$ к $Y_{ас.}(t)$ является, вполне, правомерным.

Определение закона управления, обеспечивающего требуемое качество регулирования.

Найдём значение динамического коэффициента

$$R_d = \Delta Y_{\max} / Y(\infty),$$

где $\Delta Y_{\max}$ - максимально допустимое отклонение регулируемой величины от её заданного значения, которое она может достигать в процессе стабилизации. Из исходных данных имеем $\Delta Y_{\max} = 3,1^{\circ}\text{C}$. Отсюда

$$R_d = 3,1/10 = 0,31.$$

По значениям $\tau_z/T = 0,345$ и $R_d = 0,31$ на графике рис.10 находим закон управления (ЗУ). В данном случае выбираем ЗУ - «ПИД». Таким образом, в состав ЗУ входят пропорциональная, интегральная и производная составляющие, т.е. он имеет вид

$$U(t) = k_{\varepsilon} \varepsilon(t) + k_i \int \varepsilon(t) dt + k_d d\varepsilon(t)/dt,$$

где $U(t)$ -управляющее воздействие регулятора;

$\varepsilon(t)$ - ошибка регулирования;

k_{ε} , k_i , k_d – параметры закона управления.

Выбор такого закона обеспечит выполнение условия (10).

Теперь необходимо проверить, будет ли выполняться требование по длительности процесса регулирования (условие 11), т.е.

$$T_p < T_p^{\max},$$

где T_p – время регулирования, которым будет обладать спроектированная система;

$T_p^{\max}$ –максимально допустимое время регулирования (задание на проектирование) $T_p^{\max}=450\text{с}$.

По графикам на рис.11 находим $T_p / \tau_z = 9,1$. Отсюда $T_p=9,1 \tau_z = 422,2\text{с}$. Не трудно видеть, что условие (11) выполняется.

Проводить проверку на точность в установившемся режиме в данном случае нет необходимости, т.к. объект регулирования является статическим, а в ЗУ присутствует интегральная составляющая. Следовательно, установившееся значение ошибки будет равно нулю.

Вычисление параметров регулятора.

Вычисление параметров регулятора будем осуществлять по формулам табл.2 при перерегулировании, равном 20%.

Предварительно найдём коэффициент передачи объекта регулирования.

$$K_{об} = Y(\infty)/M\% = 10/14 = 0,71^{\circ}\text{C}/\%$$

Вычислим параметры регулятора.

$$\text{Коэффициент передачи регулятора } K_p = 1,2 T / K_{об}\tau_z = 4,9\%/^{\circ}\text{C}.$$

$$\text{Постоянная времени интегральной составляющей } T_i = 2\tau_z = 92,8\text{с}.$$

$$\text{Постоянная времени производной составляющей } T_d = 0,4\tau_z = 19,56\text{с}.$$

Пример 2б.

Рассмотрим второй случай этого примера.

При этом изменим только требования к качеству регулирования:

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=21\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta U_{\max} = 4,2^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_p^{\max}=650\text{с}$.

Установившееся отклонение: $U_{ост}=0,5^{\circ}\text{C}$.

Решение

Ввиду того, что объект берётся тот же, асимптотические параметры будут иметь те же значения, т.е. $\tau_z=46,399\text{с}$, $T=134,3\text{с}$, $\tau_z/T=0,345$.

Решение задачи сводится определению закона управления и его параметров.

Определение закона управления, обеспечивающего требуемое качество регулирования.

Найдём значение динамического коэффициента

$$R_d = \Delta U_{\max} / U(\infty).$$

Из исходных данных имеем $\Delta U_{\max} = 4,2^{\circ}\text{C}$. Отсюда

$$R_d = 4,2/10 = 0,42.$$

По значениям $\tau_z/T = 0,345$ и $R_d = 0,42$ на графике рис.10 находим закон управления (ЗУ). В данном случае выбираем ЗУ- «ПИ». Таким образом, в состав ЗУ входят пропорциональная и интегральная составляющие, т.е. он имеет вид

$$U(t) = k_{\epsilon}\epsilon(t) + k_{\text{и}} \int \epsilon(t) dt,$$

где $U(t)$ -управляющее воздействие регулятора;

$\varepsilon(t)$ - ошибка регулирования;

$k_\varepsilon, K_{\text{и}}$ – параметры закона управления.

Таким образом, выбор такого закона обеспечивает выполнение условия (10).

Теперь необходимо проверить, будет ли выполняться требование по длительности процесса регулирования, т.е. условие (11)

По графикам рис.11 находим $T_p / \tau_z = 13,7$. Отсюда $T_p = 9,1 \tau_z = 635,6\text{с}$. Таким образом, условие (11) выполняется.

Проводить проверку на точность в установившемся режиме в данном случае нет необходимости и в этом примере, т.к. объект регулирования является статическим, а в ЗУ присутствует интегральная составляющая. Следовательно, установившееся значение ошибки будет равно нулю.

Вычисление параметров регулятора.

Вычисление параметров регулятора будем осуществлять по формулам табл.2 при перерегулировании, равном 20%.

Предварительно найдём коэффициент передачи объекта регулирования.

$$K_{об} = U_\infty / M\% = 10/21 = 0,476^\circ\text{C}/\%$$

Вычислим параметры регулятора.

$$\text{Коэффициент передачи регулятора } K_p = 0,7 \text{ Т} / K_{об} \tau_z = 4,26\%/^\circ\text{C}.$$

$$\text{Постоянная времени интегральной составляющей } T_{\text{и}} = 2T = 94\text{с}.$$

Пример 2в.

В этом примере также изменим требования, налагаемые на качество регулирования.

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\% = 17\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta U_{\text{max}} = 5,4^\circ\text{C}.$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p,\text{max}} = 300\text{с}.$

Установившееся отклонение: $U_{\text{ост}} = 3,5^\circ\text{C}.$

Решение

Как и в предыдущем примере необходимо только определить закон управления и вычислить его параметры.

Определение закона управления, обеспечивающего требуемое качество регулирования.

Последовательность решения будет аналогична предыдущим примерам.

Найдём значение динамического коэффициента

$$R_d = \Delta U_{\text{max}} / U(\infty),$$

Из исходных данных имеем $\Delta U_{\text{max}} = 5,4^\circ\text{C}$. Отсюда

$$R_d = 5,4/10 = 0,54.$$

По значениям $\tau_z/T = 0,345$ и $R_d = 0,54$ на графике рис.10 находим закон управления (ЗУ). В данном случае выбираем ЗУ- «П». Таким образом, в состав ЗУ входит только пропорциональная, составляющая, т.е. он имеет вид

$$U(t) = k_\varepsilon \varepsilon(t),$$

где $U(t)$ -управляющее воздействие регулятора;

$\varepsilon(t)$ - ошибка регулирования;

k_ε – параметр закона управления.

Выбранный закон обеспечивает выполнение условия (10).

Теперь необходимо проверить будет ли выполняться требование по длительности процесса регулирования, т.е. выполнение условия (11).

Из исходных данных $T_p^{\max} = 300\text{с}$.

По графикам рис.11 находим, что $T_p / \tau_z = 6,2$. Отсюда $T_p = 9,1 \tau_z = 287,6\text{с}$. Не трудно видеть, что условие (11) выполняется.

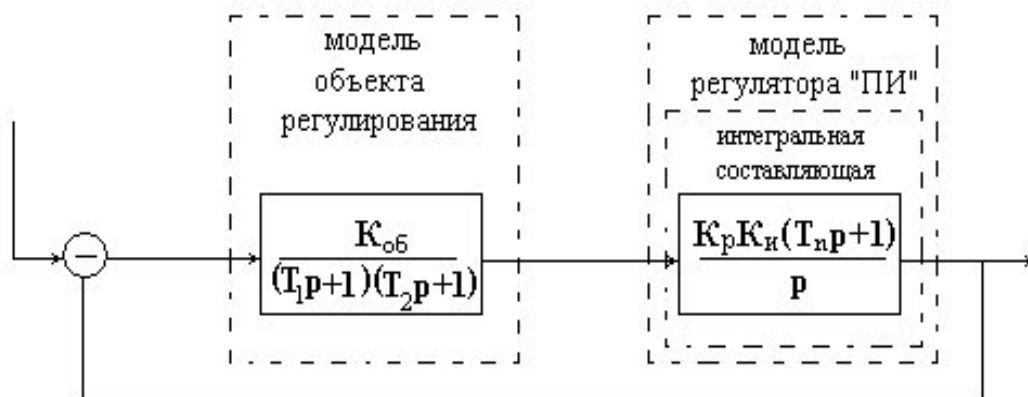
Ввиду того, что объект является статическим, а в законе управления отсутствует интегральная составляющая необходимо произвести проверку на точность в установившемся режиме. По отношению $T / \tau_z = 0,345$ и рис.12 определим, $U_{\text{ост}}/U(\infty) = 0,32$. Отсюда $U_{\text{ост}} = 3,2^\circ\text{C}$. Ошибка, которую будет иметь система в установившемся режиме меньше максимально допустимого значения. Требования по точности, т.е. условие (12), выполняется.

5.2.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИХ В СПРОЕКТИРОВАННОЙ АСР, НА ПЭВМ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КОРРЕКЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА

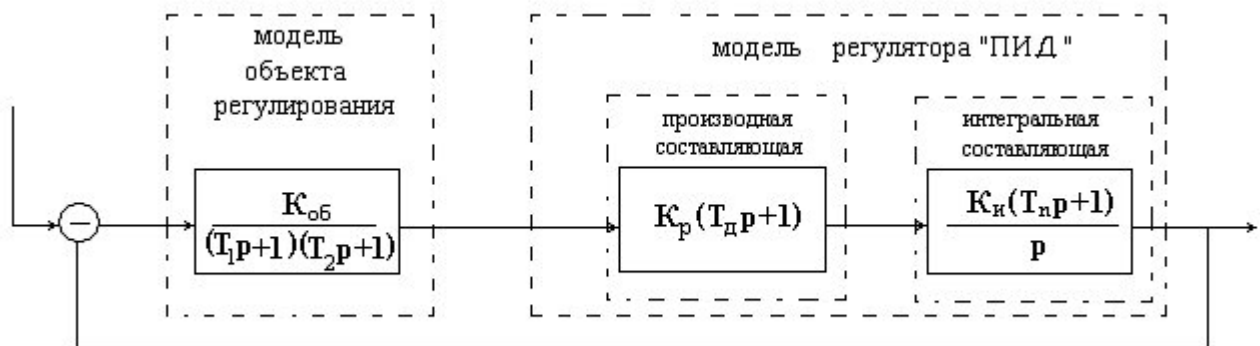
Для моделирования на ПЭВМ спроектированной АСР предлагается использовать компьютерную программу «СИАМ». Следует отметить, что осуществление синтеза регулятора с помощью этой программы несколько затруднительно. Это связано с необходимостью перебора множества значений параметров регулятора с целью нахождения таких, которые соответствовали бы заданным показателям качества. Поэтому в данном проекте предлагается эту программу применить только для проверки результатов, полученных графоаналитическим методом, а также с целью уточнения их значений.

Проверка и коррекция значений параметров регулятора производится по следующим этапам:

1. Моделируется на ЭВМ сконструированная система, т.е. набирается её структурная схема. Объект регулирования при этом описывается апериодическим звеном второго порядка T_1 , T_2 и $K_{об}$, значения которых берётся из задания на проектирование. Если в законе управления присутствует интегральная составляющая («ПИ» или «ПИД»), то в структурной схеме регулятора она может быть представлена в виде последовательности интегрирующего (ИЗ) и форсирующего (ФЗ) звеньев (рис.15а). При этом коэффициент ИЗ берётся равным $K_{и} = 1/T_{и}$, а постоянная времени ФЗ – равной $T_{и}$ (табл.2). Если был выбран закон ПИД, т.е. кроме интегральной составляющей имеется и производная, то последняя реализуется в виде ФЗ (рис 15б) с постоянной времени $T_{д}$ (табл.2). В случае выбора «П»- регулятора, его структурная схема представляет собой просто усилительное звено с коэффициентом K_p . Модель объекта будет такой же, как и при других законах.



а)



б)

Рисунок 15 - Структурные схемы

а- структурная схема АСР с «ПИ» регулятором;

б- структурная схема АСР с «ПИД» регулятором

2. Выбирается метод исследования (рекомендуется использовать метод Кутта-Мерсона) и производятся расчёты переходной функции модели АСР. При этом в качестве входного воздействия выбирается единичное ступенчатое, т.е. с $K=1$.

3. По окончании расчётов результат фиксируется в табличной форме или в виде графика процесса регулирования.

4. По полученным табличным (графическим) данным вычисляются показатели качества (ΔY , t_p , $Y_{ост}$), значения которых сравниваются с заданными в соответствие с формулами (10-12). Если эти неравенства не выполняются, то посредством программы «СИАМ» производится коррекция параметров регулятора. В этом случае для изменения показателей ΔY и t_p варьируют величиной T_d , а для изменения $Y_{ост}$ - величиной k_p (Рис.15). Подбор считается законченным, при выполнении условий (10-12). После этого делаются выводы о целесообразности применения спроектированной АСР и выполняется обоснование и выбор средств автоматизации, а также разработка спецификации на них.

5.3. МЕТОДИКА РАСЧЁТА РЕЛЕЙНОГО (ДВУХПОЗИЦИОННОГО) РЕГУЛЯТОРА

5.3.1. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЁТА РЕГУЛЯТОРА

При выборе релейного (двухпозиционного) регулятора (когда $\tau_3 / T < 0,2$) целью проектирования является определения зоны нечувствительности этого регулятора, обеспечивающую заданное качество регулирования. Требуемое качество определяется максимально допустимыми значениями амплитуды A_m и периода T_{km} колебаний. К исходным данным относятся также параметры объекта ($K_{об}$, τ_3 , T) и величина максимального возмущения ΔQ . Параметры объекта регулирования τ_3 , T являются асимптотическими. Порядок их вычисления показан в подразделе 5.1.

Идея проектирования сводится к определению посредством графиков (рис. 16 и 17) значений амплитуды A и периода колебаний T_k .

После чего они сравниваются с их заданными допустимыми значениями A_m , T_{km} . При этом должны выполняться следующие условия.

$$T_k < T_{km}; A < A_m \quad (15)$$

В случае выполнения этих условий проектирование регулятора считается выполненным. В противном случае, необходимо изменять (уменьшать) зону нечувствительности до тех пор, пока условие (15) не будет выполняться.

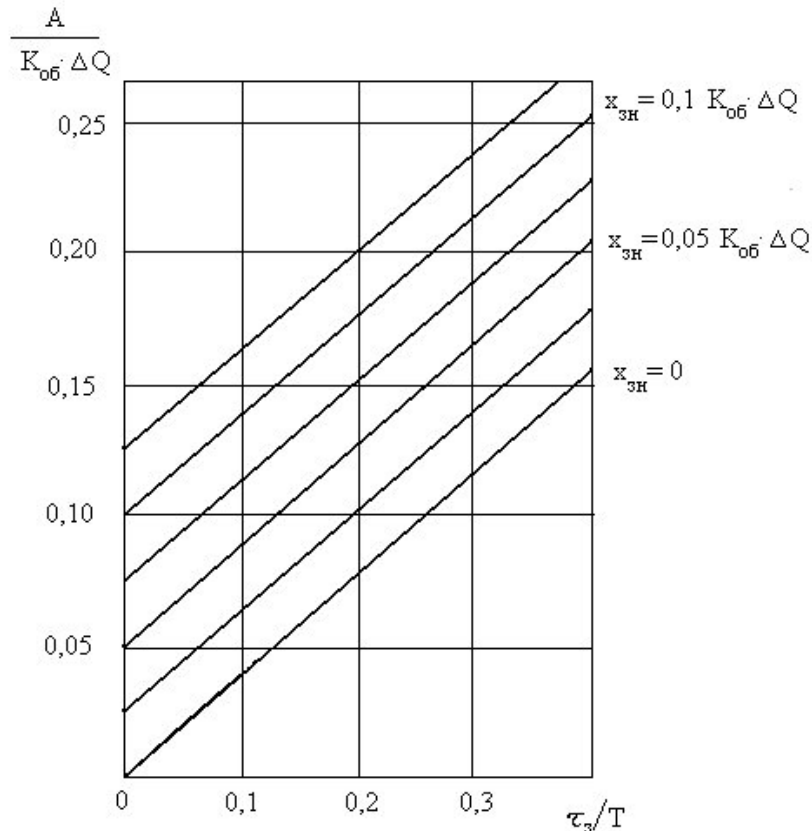


Рисунок 16

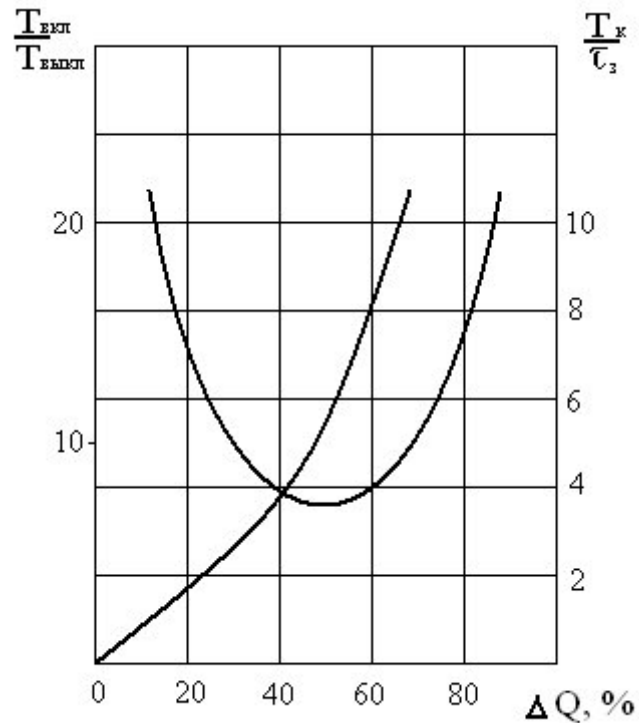


Рисунок 17

Здесь $X_{3н}$ - величина зоны нечувствительности.

Величину амплитуды колебаний при различных зонах нечувствительности можно определить по графику (рис. 16) зависимости $A / (K_{об} \Delta Q)$ от τ_3 / T . Зона нечувствительности регулятора $X_{3.н.}$ дана в виде параметра функции, изменяющегося от 0 до $0,1 K_{об} \Delta Q$. Из полученной по графику величины отношения $A / (K_{об} \Delta Q)$ можно определить величину амплитуды A . Значение периода колебаний T_k находится из функциональной зависимости T_k / τ_3 от ΔQ (рис. 17). На этом же графике показана функциональная зависимость отношения времени пребывания регулирующего органа в двух крайний положениях $T_{вкл}/T_{вык}$ от величины возмущения ΔQ (изменение нагрузки). Полученные значения показателей качества сравнивают с заданными. Если условие (15) выполняется, то выбор зоны нечувствительности сделан правильно, если же нет, то её необходимо уменьшить. Следует иметь в виду, что уменьшение такой зоны ограничено техническими, надёжностными и стоимостными факторами. Поэтому желательно выбрать её величину максимально возможной, но так, чтобы при этом выполнялось условие (15).

5.3.2. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЁТА РЕГУЛЯТОРА.

Задачу выбора зоны нечувствительности можно осуществить также и аналитическим способом. С этой целью могут быть использованы следующие зависимости амплитуды и периода колебаний от параметров объекта и искомой зоны.

$$A = X_{уст} - (X_{уст} - X_{3н}) e^{-\tau_3 / T}; \quad (16)$$

$$T_k = 2T \ln \{ (X_{max} + X_{уст}) / (X_{уст} - X_{max}) \}, \quad (17)$$

где $X_{уст}$ - установившееся значение выходной величины, которое она приобрела бы в случае отсутствия автоматического регулирования;

X_{max} - максимальное значение выходной величины, которое она приобретает в процессе регулирования;

$X_{зн}$ - величина зоны нечувствительности.

$$X_{уст} = K_{об} X_{вх}, \quad (18)$$

где $X_{вх}$ -входное управляющее воздействие;

$K_{об}$ -коэффициент передачи объекта.

$$X_{max} = X_3 + A, \quad (19)$$

где X_3 - заданное значение регулируемой величины;

A – амплитуда колебаний в установившемся режиме.

Формулы (16) и (17) справедливы при симметричном отклонении регулируемого параметра X от своего заданного значения X_3 , т.е. при $X_{max} = X_{min}$ (Рис.18). Здесь, X - регулируемая величина, $X_{min} = X_3 - A$ - минимальное значение выходной величины, которое она приобретает в процессе регулирования

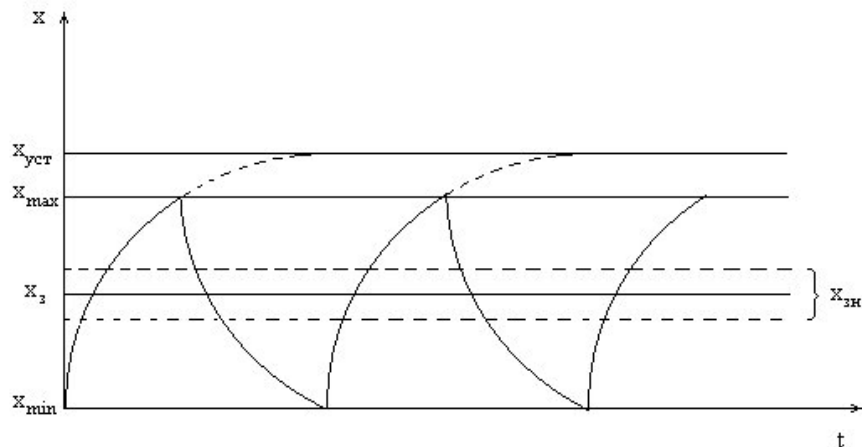


Рисунок 18 - Процесс двухпозиционного регулирования.

Пример 3

Для регулирования температуры объекта используется 2-ух позиционный регулятор. Входное регулирующее воздействие осуществляется посредством подачи напряжения $U_{вх} = 220В$ на тэны. Параметры объекта: $\tau_3=2мин$, $T=42мин$, $K_{об}=0,72$ град/В. Требования к режиму и качеству регулирования: $t_3=70^0C$, $A_M=8^0C$, $T_{км.}=90с$.

Решение:

1. Находим отношение $\tau_3/T=0,048<0,2$. Следовательно, для процесса стабилизации температуры выбираем 2-ух позиционный регулятор.

2. Определим установившееся значение температуры нагрева объекта при условии отсутствия регулятора в соответствии с формулой (18):

$$t_{уст.} = K_{об} U_{вх} = 0,72 * 220 = 158,04$$

3. По формуле (16) вычислим значение амплитуды A колебаний температуры в установившемся режиме. При этом примем, что зона нечувствительности составляет 5 градусов. Тогда получим:

$$A = t_{уст} - (t_{уст} - t_{зн}) e^{-\tau_3 / T} = 12^0,134C.$$

Из полученного результата видно, амплитуда колебаний превышает допустимое значение ($A_M = 8^0$), т.е. не выполняется условие (15). Варьируя значением зоны нечувствительности $t_{зн}$ найдём такое, при котором указанное условие будет выполняться. С этой целью построим график зависимости $A = F(t_{зн})$ в виде графика (рис.19) и таблицы 3.

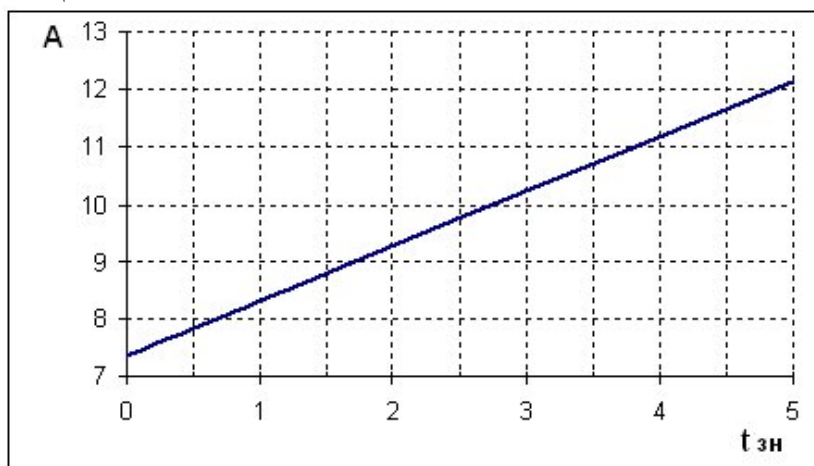


Рисунок 19 - График зависимости амплитуды A от зоны нечувствительности $t_{зн}$.

Таблица 3

Величина зоны нечувств.	Амплитуда колебаний	Величина зоны нечувств.	Амплитуда колебаний
$t_{зн}$	A	$t_{зн}$	A
0	7,366082354	1	8,319579309
0,05	7,413757202	2	9,273076264
0,1	7,46143205	3	10,22657322
0,2	7,556781745	4	11,18007017
0,5	7,842830832	5	12,13356713

Не трудно видеть, что при значении $t_{зн} = 0,5^0C$ наступает требуемое неравенство ($A = 7,8 < A_M = 8$). Дальнейшее уменьшение зоны приведёт к снижению надёжности регулятора. Поэтому, с точки зрения выполнения условия обеспечения требуемого значения амплитуды, величину зоны можно принять равной 0,5. Вместе с тем необходимо проверить также значение периода колебаний на выполнение условия (15). Используя формулу (17), найдём значение этого периода в установившемся режиме. При этом будем считать, что $t_{зн} = 0,5$.

$$T_K = 2T \ln \{ (t_{\max} + t_{уст}) / (t_{уст} - t_{\max}) \} = 89,23c.$$

Таким образом, и здесь условие (15) также выполняется. Следовательно, можно сделать вывод, что регулятор, обладающий зоной нечувствительности $t_{зн} = 0,5$, отвечает поставленным выше требованиям к качеству регулирования.

Литература

1. Иванов А.А. Автоматизация технологических процессов и производств : учебное пособие для студентов вузов по специальности "Автоматизация технологических процессов и производств" М. : Форум ; М. : Инфра-М, 2015. - 224 с.
2. Каргин В.А., Моисеев А.П. Автоматизация систем управления технологическими процессами : учебное пособие Саратов : Амирит, 2018. - 177 с
3. Молдабаева М. Н. Автоматизация технологических процессов и производств : учебное пособие / М. Н. Молдабаева. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. - 224 с.
4. Рачков М. Ю. Автоматизация технологических процессов и производств : учебник / М. Ю. Рачков. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. - 136 с.
5. Фурсенко С.Н., Якубовская Е.С., Волкова Е.С. Автоматизация технологических процессов : учебное пособие для студентов учреждений высшего сельскохозяйственного образования по техническим специальностям. Минск : Новое знание ; М. : Инфра-М, 2015. - 377 с. : ил..

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ

ВАРИАНТ 1

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	46	80	54,256	220	55,967
5	46,204	90	54,681	240	55,982
10	46,7	100	55,004	260	55,99
20	48,094	120	55,435	280	55,994
40	50,94	140	55,68	300	55,997
50	52,074	160	55,819	320	55,998
60	52,986	180	55,898	500	56
70	53,702	200	55,942		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Максимально допустимое установившееся отклонение: $Y_{\max_{\text{ост}}}^{\max}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 2

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	46	80	54,256	220	55,967
5	46,204	90	54,681	240	55,982
10	46,7	100	55,004	260	55,99
20	48,094	120	55,435	280	55,994
40	50,94	140	55,68	300	55,997
50	52,074	160	55,819	320	55,998
60	52,986	180	55,898	500	56
70	53,702	200	55,942		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=8\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 4^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=200\text{с}.$

Максимально допустимое установившееся отклонение: $Y_{\max_{\text{ост}}}^{\max}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 3

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	46	80	54,256	220	55,967
5	46,204	90	54,681	240	55,982
10	46,7	100	55,004	260	55,99
20	48,094	120	55,435	280	55,994
40	50,94	140	55,68	300	55,997
50	52,074	160	55,819	320	55,998
60	52,986	180	55,898	500	56
70	53,702	200	55,942		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=5\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta U_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.} = 100\text{с}$.

Максимально допустимое установившееся отклонение: $U_{\max_{\text{ост}}} = 3,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 4

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	65	80	70,884	220	74,712
5	65,071	90	71,517	240	74,81
10	65,262	100	72,069	260	74,874
20	65,891	120	72,953	280	74,918
40	67,612	140	73,591	300	74,946
50	68,514	160	74,041	320	74,965
60	69,375	180	74,354	500	74,999
70	70,169	200	74,567	550	75

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\% = 12\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta U_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.} = 220\text{с}$.

Максимально допустимое установившееся отклонение: $U_{\max_{\text{ост}}} = 0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 5

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	65	80	70,884	220	74,712
5	65,071	90	71,517	240	74,81
10	65,262	100	72,069	260	74,874
20	65,891	120	72,953	280	74,918
40	67,612	140	73,591	300	74,946
50	68,514	160	74,041	320	74,965
60	69,375	180	74,354	500	74,999
70	70,169	200	74,567	550	75

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\% = 10\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta U_{\max} = 4,1^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.} = 320\text{с}$.

Максимально допустимое установившееся отклонение: $U_{\max_{\text{ост}}} = 0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 6

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	65	80	70,884	220	74,712
5	65,071	90	71,517	240	74,81
10	65,262	100	72,069	260	74,874
20	65,891	120	72,953	280	74,918
40	67,612	140	73,591	300	74,946
50	68,514	160	74,041	320	74,965
60	69,375	180	74,354	500	74,999
70	70,169	200	74,567	550	75

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\% = 15\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max} = 180\text{с}$.

Максимально допустимое установившееся отклонение: $Y_{\max_{\text{ост}}} = 4^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 7

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	75	80	79,83	220	84,348
5	75,049	90	80,45	240	84,528
10	75,182	100	81,014	260	84,66
20	75,637	120	81,979	280	84,756
40	76,966	140	82,74	300	84,825
50	77,708	160	83,326	320	84,875
60	78,448	180	83,77	500	84,994
70	79,16	200	84,102	550	84,998
				600	84,999
				700	85

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\% = 20\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$\Delta Y_{\max} = 2,8^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max} = 230\text{с}$.

Максимально допустимое установившееся отклонение: $Y_{\max_{\text{ост}}} = 0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 8

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	75	80	79,83	220	84,348
5	75,049	90	80,45	240	84,528
10	75,182	100	81,014	260	84,66
20	75,637	120	81,979	280	84,756
40	76,966	140	82,74	300	84,825
50	77,708	160	83,326	320	84,875
60	78,448	180	83,77	500	84,994
70	79,16	200	84,102	550	84,998
				600	84,999
				700	85

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\% = 18\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$\Delta Y_{\max} = 4,1^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max} = 400\text{с}$.

Максимально допустимое установившееся отклонение: $Y_{\max_{\text{ост}}} = 0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 9

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	75	80	79,83	220	84,348
5	75,049	90	80,45	240	84,528
10	75,182	100	81,014	260	84,66

20	75,637	120	81,979	280	84,756
40	76,966	140	82,74	300	84,825
50	77,708	160	83,326	320	84,875
60	78,448	180	83,77	500	84,994
70	79,16	200	84,102	550	84,998
				600	84,999
				700	85

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=28\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 5,2^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=200\text{с}.$

Максимально допустимое установившееся отклонение: $Y_{\max_{\text{ост}}}^{\max}=4^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 10

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	87	80	90,266	220	95,302
5	87,026	90	90,789	240	95,643
10	87,097	100	91,295	260	95,92
20	87,354	120	92,234	280	96,143
40	88,171	140	93,063	300	96,322
50	88,669	160	93,777	320	96,466
60	89,194	180	94,381	500	96,942
70	89,731	200	94,886	550	96,969
				600	96,984
				700	96,996
				800	96,999
				900	97

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=13\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 3^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=360\text{с}.$

Максимально допустимое установившееся отклонение: $Y_{\max_{\text{ост}}}^{\max}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 11

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	87	80	90,266	220	95,302
5	87,026	90	90,789	240	95,643
10	87,097	100	91,295	260	95,92
20	87,354	120	92,234	280	96,143
40	88,171	140	93,063	300	96,322
50	88,669	160	93,777	320	96,466
60	89,194	180	94,381	500	96,942
70	89,731	200	94,886	550	96,969
				600	96,984
				700	96,996
				800	96,999
				900	97

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=25\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 4,2^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.}=540\text{с}$.

Максимально допустимое установившееся отклонение: $Y_{\max_{\text{ост}}}^{\max}=0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 12

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	87	80	90,266	220	95,302
5	87,026	90	90,789	240	95,643
10	87,097	100	91,295	260	95,92
20	87,354	120	92,234	280	96,143
40	88,171	140	93,063	300	96,322
50	88,669	160	93,777	320	96,466
60	89,194	180	94,381	500	96,942
70	89,731	200	94,886	550	96,969
				600	96,984
				700	96,996
				800	96,999
				900	97

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=12\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 5,4^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.}=250\text{с}$.

Максимально допустимое установившееся отклонение: $Y_{\max_{\text{ост}}}^{\max}=4^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 13

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	53	120	57,129	500	62,806
5	53,017	140	57,907	550	62,882
10	53,064	160	58,617	600	62,929
20	53,238	180	59,253	900	62,997
40	53,817	200	59,815	1000	62,999
50	54,184	220	60,305	1100	63
60	54,583	240	60,73	1200	63
70	55,002	260	61,094	1300	63
80	55,432	280	61,406	1400	63
90	55,865	300	61,67	1500	63
100	56,295	320	61,894		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=14\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 3,1^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.}=450\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 14

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	53	90	55,865	260	61,094	900	62,997
5	53,017	100	56,295	280	61,406	1000	62,999
10	53,064	120	57,129	300	61,67	1100	63
20	53,238	140	57,907	320	61,894	1200	63
40	53,817	160	58,617	500	62,806	1300	63
50	54,184	180	59,253	550	62,882	1400	63
60	54,583	200	59,815	600	62,929	1500	63
70	55,002	220	60,305	700	62,975		
80	55,432	240	60,73	800	62,991		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=21\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 4,2^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=650\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 15

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	53	90	55,865	260	61,094	900	62,997
5	53,017	100	56,295	280	61,406	1000	62,999
10	53,064	120	57,129	300	61,67	1100	63
20	53,238	140	57,907	320	61,894	1200	63
40	53,817	160	58,617	500	62,806	1300	63
50	54,184	180	59,253	550	62,882	1400	63
60	54,583	200	59,815	600	62,929	1500	63
70	55,002	220	60,305	700	62,975		
80	55,432	240	60,73	800	62,991		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=17\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 5, 4^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=300\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=3,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 16

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	53	120	56,647	500	62,674
5	53,014	140	57,382	550	62,789
10	53,053	160	58,066	600	62,865
20	53,198	180	58,693	700	62,945
40	53,688	200	59,26	800	62,978
50	54,004	220	59,766	900	62,991
60	54,35	240	60,214	1000	62,996
70	54,718	260	60,608	1100	62,999
80	55,1	280	60,953	1200	62,999
90	55,488	300	61,252	1300	63
100	55,879	320	61,511		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta U_{\max} = 2,5^0\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Установившееся отклонение: $U_{\text{ост}}=0,5^0\text{C}.$

ВАРИАНТ 17

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	54	80	59,623	220	63,645
5	54,065	90	60,258	240	63,76
10	54,239	100	60,818	260	63,838
20	54,821	120	61,73	280	63,892
40	56,439	140	62,405	300	63,927
50	57,303	160	62,891	320	63,952
60	58,137	180	63,236	500	63,999
70	58,915	200	63,478	550	64

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta U_{\max} = 2,5^0\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Установившееся отклонение: $U_{\text{ост}}=0,5^0\text{C}.$

ВАРИАНТ 18

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	61	80	66,36616	220	70,57572
5	61,05865	90	67,00143	240	70,70869
10	61,21788	100	67,56862	260	70,80096
20	61,7534	120	68,50755	280	70,86458
40	63,27237	140	69,2162	300	70,90821
50	64,09746	160	69,73828	320	70,93799
60	64,90343	180	70,11603	500	70,99836
70	65,66453	200	70,38555	550	70,99942
				600	70,99979
				700	70,99997
				800	71

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta U_{\max} = 2,5^0\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Установившееся отклонение: $U_{\text{ост}}=0,5^0\text{C}.$

ВАРИАНТ 19

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	76	80	82,97523	220	85,89738
5	76,10522	90	83,5656	240	85,93875
10	76,38065	100	84,0529	260	85,96358
20	77,25086	120	84,77293	280	85,97841
40	79,43669	140	85,23865	300	85,98724

50	80,49067	160	85,53315	320	85,99247
60	81,44098	180	85,71634	500	85,99994
70	82,26961	200	85,82889	550	85,99998
				600	86

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta U_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Установившееся отклонение: $U_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 20

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	71	90	74,63934	260	79,69708	900	80,99848
5	71,0248	100	75,1246	280	79,93718	1000	80,99948
10	71,09437	120	76,02905	300	80,13437	1100	80,99982
20	71,3421	140	76,83204	320	80,29588	1200	80,99994
40	72,12939	160	77,52971	500	80,89361	1300	80,99998
50	72,60706	180	78,12647	550	80,93736	1400	80,99999
60	73,11086	200	78,63103	600	80,96315	1500	81
70	73,62493	220	79,05386	700	80,98726		
80	74,13735	240	79,40578	800	80,9956		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta U_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Установившееся отклонение: $U_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 21

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	48	90	50,49369	260	55,51999	900	57,98414
5	48,01407	100	50,87974	280	55,85965	1000	57,99292
10	48,05423	120	51,63798	300	56,1562	1100	57,99684
20	48,20147	140	52,35935	320	56,41418	1200	57,99859
40	48,69705	160	53,03021	500	57,60912	1300	57,99937
50	49,01428	180	53,64376	550	57,73718	1400	57,99972
60	49,36137	200	54,1978	600	57,8236	1500	57,99987
70	49,72867	220	54,69318	700	57,9208		
80	50,10826	240	55,13263	800	57,96454		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta U_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Установившееся отклонение: $U_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 22

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	63	90	65,60436	260	70,73738	900	72,99182
5	63,01473	100	66,00573	280	71,07092	1000	72,99671

10	63,05676	120	66,79193	300	71,35926	1100	72,99868
20	63,21089	140	67,53676	320	71,60747	1200	72,99947
40	63,72945	160	68,22598	500	72,70166	1300	72,99979
50	64,06116	180	68,8527	550	72,80809	1400	72,99992
60	64,42382	200	69,415	600	72,87698	1500	72,99997
70	64,80723	220	69,91415	700	72,94984		
80	65,20302	240	70,35346	800	72,97969		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 23

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	72	100	75,48805	300	80,78658
5	72,01844	120	76,34108	320	80,99445
10	72,07076	140	77,12815	500	81,82618
20	72,2606	160	77,83756	550	81,89461
40	72,88623	180	78,46596	600	81,93631
50	73,27873	200	79,01526	700	81,9769
60	73,70214	220	79,49038	800	81,99168
70	74,14383	240	79,89788	900	81,99701
80	74,5937	260	80,24497	1000	81,99893
90	75,04383	280	80,53888		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 24

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	66	120	70,96181	500	75,91097
5	66,02338	140	71,7784	550	75,94986
10	66,08923	160	72,49173	600	75,97186
20	66,32525	180	73,1042	700	75,99119
40	67,08443	200	73,62315	800	75,99726
50	67,54994	220	74,05829	900	75,99915
60	68,04423	240	74,42011	1000	75,99974
70	68,55176	260	74,71891	1100	75,99992
80	69,0606	280	74,96426	1200	75,99997
90	69,56176	300	75,16476	1300	75,99999
100	70,0486	320	75,32794	1400	76

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 25

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	60	80	64,77938	220	69,00712	600	69,9898
5	60,05743	90	65,33898	240	69,21957	700	69,99694
10	60,21065	100	65,8463	260	69,38662	800	69,99908
20	60,7124	120	66,71358	280	69,51794	900	69,99973
40	62,08015	140	67,40767	300	69,62115	1000	69,99992
50	62,80451	160	67,95858	320	69,70227	1100	69,99998
60	63,50614	180	68,39389	500	69,96596	1200	69,99999
70	64,16736	200	68,73702	550	69,98136	1300	70

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\text{max}} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{\text{p. max.}}=150\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 26

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	80	100	86,61044	300	89,88683
5	80,06245	120	87,52157	320	89,92057
10	80,23088	140	88,20763	500	89,99678
20	80,79117	160	88,71413	550	89,99868
40	82,35014	180	89,08297	600	89,99946
50	83,18324	200	89,34892	700	89,99991
60	83,98936	220	89,5393	800	89,99998
70	84,74434	240	89,67484	900	90
80	85,43545	260	89,77096		
90	86,05756	280	89,83891		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\text{max}} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{\text{p. max.}}=150\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 27

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	74	100	80,04912	300	83,80811
5	74,05073	120	80,99776	320	83,86038
10	74,18905	140	81,74359	500	83,99222
20	74,65793	160	82,31801	550	83,99652
40	76,01105	180	82,75397	600	83,99845
50	76,75988	200	83,08134	700	83,99969
60	77,50164	220	83,3252	800	83,99994
70	78,21266	240	83,50577	900	83,99999
80	78,87861	260	83,63884	1000	84
90	79,49181	280	83,73656		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 28

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	70	100	74,85556	300	79,47376
5	70,03309	120	75,80166	320	79,58699
10	70,12495	140	76,60631	500	79,95449
20	70,44609	160	77,27652	550	79,97542
40	71,43081	180	77,8265	600	79,98673
50	72,00846	200	78,27291	700	79,99614
60	72,60391	220	78,6323	800	79,99888
70	73,19784	240	78,9198	900	79,99967
80	73,77668	260	79,14869	1000	79,9999
90	74,33122	280	79,33022	1100	79,99997

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 29

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	68	120	74,20848	500	77,96936
5	68,03904	140	74,99419	550	77,98399
10	68,14659	160	75,63291	600	77,99163
20	68,51762	180	76,14512	700	77,99772
40	69,6269	200	76,5519	800	77,99938
50	70,26253	220	76,87266	900	77,99983
60	70,90762	240	77,12426	1000	77,99995
70	71,54138	260	77,32082	1100	77,99999
80	72,14998	280	77,47393	1200	78
90	72,72472	300	77,59292	1300	78
100	73,26061	320	77,68523	1400	78

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 30

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	100	90	105,5878	260	109,6319
5	100,054	100	106,1368	280	109,7286
10	100,2006	120	107,0655	300	109,8001

20	100,6929	140	107,7912	320	109,8528
40	102,0911	160	108,3481	500	109,9907
50	102,8542	180	108,7703	550	109,9957
60	103,6039	200	109,0876	600	109,998
70	104,317	220	109,3247	700	109,9996
80	104,9805	240	109,5011	800	109,9999
				900	110

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=150\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 31

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	87	100	91,295	300	96,322
5	87,026	120	92,234	320	96,466
10	87,097	140	93,063	500	96,942
20	87,354	160	93,777	550	96,969
40	88,171	180	94,381	600	96,984
50	88,669	200	94,886	700	96,996
60	89,194	220	95,302	800	96,999
70	89,731	240	95,643	900	97
80	90,266	260	95,92		
90	90,789	280	96,143		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=13\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 30^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=360\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,50^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 32

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	0	240	7,729656	480	9,763
20	0,237768	260	8,094425	500	9,805773
40	0,817138	280	8,405825	520	9,840998
60	1,583381	300	8,670226	540	9,869966
80	2,43227	320	8,893672	560	9,893755
100	3,295204	340	9,081736	580	9,913268
120	4,128816	360	9,239451	600	9,929255
140	4,907372	380	9,371296	620	9,942341
160	5,617263	400	9,4812	640	9,953039
180	6,253041	420	9,572583	660	9,961778
200	6,814579	440	9,64839	680	9,96891
220	7,305075	460	9,711146	700	9,974727

Максимально возможный процент хода регулирующего органа:

$$M\% = 13\%.$$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max} = 460\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}} = 0,5^{\circ}\text{C}$

ВАРИАНТ 33

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	53	110	61,8	220	62,94
10	53,46	120	62,07	230	62,95
20	54,47	130	62,28	240	62,96
30	55,68	140	62,45	250	62,97
40	56,89	150	62,58	260	62,98
50	58	160	62,68	270	62,98
60	58,97	170	62,76	280	62,99
70	59,78	180	62,81	290	62,99
80	60,46	190	62,86	300	62,99
90	61,01	200	62,89		
100	61,45	210	62,92		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа:

$M\% = 14\%$.

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 3,1^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max} = 300\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}} = 0,5^{\circ}\text{C}$

ВАРИАНТ 34

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	46	100	54,12	200	55,83
10	46,4	110	54,5	210	55,86
20	47,32	120	54,81	220	55,89
30	48,42	130	55,06	230	55,92
40	49,56	140	55,26	240	55,93
50	50,62	150	55,41	250	55,95
60	51,56	160	55,54	300	55,99
70	52,38	170	55,64	350	56
80	53,07	180	55,72	400	56
90	53,64	190	55,78		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\% = 4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max} = 270\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}} = 0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 35

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	46	100	53,66	200	55,73
10	46,33	110	54,09	210	55,79
20	47,1	120	54,45	220	55,83

30	48,06	130	54,74	230	55,87
40	49,09	140	54,99	240	55,89
50	50,08	150	55,18	250	55,91
60	51	160	55,34	300	55,97
70	51,81	170	55,48	350	55,99
80	52,53	180	55,58	400	56
90	53,14	190	55,66		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=270\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 36

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	43	100	49,83	200	52,47
10	43,24	110	50,31	210	52,56
20	43,83	120	50,73	220	52,63
30	44,61	130	51,09	230	52,7
40	45,46	140	51,4	240	52,75
50	46,33	150	51,66	250	52,79
60	47,16	160	51,88	300	52,92
70	47,94	170	52,07	350	52,97
80	48,64	180	52,23	400	53
90	49,27	190	52,36		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=250\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 37

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	43	100	49,35	200	52,27
10	43,2	110	49,85	210	52,39
20	43,71	120	50,3	220	52,48
30	44,39	130	50,68	230	52,57
40	45,15	140	51,02	240	52,64
50	45,94	150	51,32	250	52,69
60	46,72	160	51,57	300	52,88
70	47,46	170	51,79	350	52,95
80	48,15	180	51,98	400	52,98
90	48,78	190	52,14		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=270\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 38

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	50	110	56,3	220	59,26
10	50,17	120	56,76	230	59,37
20	50,58	130	57,18	240	59,46
30	51,16	140	57,55	250	59,54
40	51,83	150	57,87	290	59,76
50	52,54	160	58,16	300	59,8
60	53,25	170	58,41	350	59,91
70	53,94	180	58,64	400	59,96
80	54,6	190	58,83	450	59,98
90	55,22	200	58,99	500	59,99
100	55,78	210	59,14		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа:

$M\% = 4\%$.

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$\Delta Y_{\text{max}} = 3,1^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{\text{p}}^{\text{max}} = 450\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$

ВАРИАНТ 39

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	50	110	56,84	230	59,57
10	50,2	120	57,29	240	59,64
20	50,7	130	57,68	260	59,75
30	51,38	140	58,02	280	59,83
40	52,14	150	58,32	290	59,86
50	52,93	160	58,58	300	59,88
60	53,71	170	58,79	350	59,95
70	54,45	180	58,98	400	59,98
80	55,14	190	59,14	450	59,99
90	55,77	200	59,28	500	60
100	56,34	220	59,49		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа:

$M\% = 14\%$.

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$\Delta Y_{\text{max}} = 4,1^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{\text{p}}^{\text{max}} = 450\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$

ВАРИАНТ 40

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	40	165	48,61	330	49,92
15	40,41	180	48,91	345	49,94
30	41,35	195	49,15	360	49,95

45	42,48	210	49,33	375	49,96
60	43,63	225	49,48	390	49,97
75	44,71	240	49,6	405	49,98
90	45,67	255	49,69	435	49,99
105	46,5	270	49,76	450	49,99
120	47,19	285	49,82	465	49,99
135	47,76	300	49,86	495	50
150	48,23	315	49,89		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta U_{\max} = 5^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.}=250\text{с}.$

Установившееся отклонение: $U_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 41

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	40	165	48,61	330	49,92
15	40,41	180	48,91	345	49,94
30	41,35	195	49,15	360	49,95
45	42,48	210	49,33	375	49,96
60	43,63	225	49,48	390	49,97
75	44,71	240	49,6	405	49,98
90	45,67	255	49,69	435	49,99
105	46,5	270	49,76	450	49,99
120	47,19	285	49,82	465	49,99
135	47,76	300	49,86	495	50
150	48,23	315	49,89		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=10\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta U_{\max} = 3^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.}=400\text{с}.$

Установившееся отклонение: $U_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 42

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	40	165	48,61	330	49,92
15	40,41	180	48,91	345	49,94
30	41,35	195	49,15	360	49,95
45	42,48	210	49,33	375	49,96
60	43,63	225	49,48	390	49,97
75	44,71	240	49,6	405	49,98
90	45,67	255	49,69	435	49,99
105	46,5	270	49,76	450	49,99
120	47,19	285	49,82	465	49,99
135	47,76	300	49,86	495	50
150	48,23	315	49,89		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=5\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max} = 250\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}} = 0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 43

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	60	165	68,41	330	69,88
15	60,38	180	68,73	345	69,91
30	61,25	195	68,99	360	69,93
45	62,32	210	69,2	375	69,94
60	63,43	225	69,37	390	69,96
75	64,47	240	69,5	405	69,97
90	65,41	255	69,61	435	69,98
105	66,24	270	69,69	450	69,98
120	66,94	285	69,76	465	69,99
135	67,52	300	69,81	495	69,99
150	68,01	315	69,85	330	69,88

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\% = 12\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 4^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max} = 400\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}} = 2^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 44

Таблица кривой разгона

	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	60	165	68,41	330	69,88
15	60,38	180	68,73	345	69,91
30	61,25	195	68,99	360	69,93
45	62,32	210	69,2	375	69,94
60	63,43	225	69,37	390	69,96
75	64,47	240	69,5	405	69,97
90	65,41	255	69,61	435	69,98
105	66,24	270	69,69	450	69,98
120	66,94	285	69,76	465	69,99
135	67,52	300	69,81	495	69,99
150	68,01	315	69,85		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\% = 12\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 4^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max} = 250\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}} = 2^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 45

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	75	165	82,6	330	84,73
15	75,27	180	83,01	345	84,78
30	75,91	195	83,35	360	84,82

45	76,74	210	83,64	375	84,86
60	77,65	225	83,88	390	84,88
75	78,56	240	84,08	405	84,91
90	79,43	255	84,25	435	84,94
105	80,23	270	84,39	450	84,95
120	80,95	285	84,5	465	84,96
135	81,58	300	84,59	495	84,97
150	82,13	315	84,67		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=12\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 4^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=250\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=5^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 46

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	40	165	48,01	330	49,83
15	40,31	180	48,38	345	49,86
30	41,04	195	48,69	360	49,89
45	41,98	210	48,94	375	49,91
60	42,98	225	49,15	390	49,93
75	43,96	240	49,32	405	49,95
90	44,87	255	49,45	435	49,97
105	45,69	270	49,56	450	49,97
120	46,41	285	49,65	465	49,98
135	47,03	300	49,72	495	49,99
150	47,56	315	49,78		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=8\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta Y_{\max} = 4^{\circ}\text{C}.$$

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=500\text{с}.$

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=3^{\circ}\text{C}.$

ВАРИАНТ 47

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	40	165	48,01	330	49,83
15	40,31	180	48,38	345	49,86
30	41,04	195	48,69	360	49,89
45	41,98	210	48,94	375	49,91
60	42,98	225	49,15	390	49,93
75	43,96	240	49,32	405	49,95
90	44,87	255	49,45	435	49,97
105	45,69	270	49,56	450	49,97
120	46,41	285	49,65	465	49,98
135	47,03	300	49,72	495	49,99
150	47,56	315	49,78		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=5\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.}=250\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=3,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 48

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	20	165	28,01	330	29,83
15	20,31	180	28,38	345	29,86
30	21,04	195	28,69	360	29,89
45	21,98	210	28,94	375	29,91
60	22,98	225	29,15	390	29,93
75	23,96	240	29,32	405	29,95
90	24,87	255	29,45	435	29,97
105	25,69	270	29,56	450	29,97
120	26,41	285	29,65	465	29,98
135	27,03	300	29,72	495	29,99
150	27,56	315	29,78		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=10\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 3^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.}=300\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=3,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 49

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	46	100	53,66	200	55,73
10	46,33	110	54,09	210	55,79
20	47,1	120	54,45	220	55,83
30	48,06	130	54,74	230	55,87
40	49,09	140	54,99	240	55,89
50	50,08	150	55,18	250	55,91
60	51	160	55,34	300	55,97
70	51,81	170	55,48	350	55,99
80	52,53	180	55,58	400	56
90	53,14	190	55,66		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:
 $\Delta Y_{\max} = 2,5^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max.}=270\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

ВАРИАНТ 50

Таблица кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	43	100	49,35	200	52,27
10	43,2	110	49,85	210	52,39
20	43,71	120	50,3	220	52,48
30	44,39	130	50,68	230	52,57

40	45,15	140	51,02	240	52,64
50	45,94	150	51,32	250	52,69
60	46,72	160	51,57	300	52,88
70	47,46	170	51,79	350	52,95
80	48,15	180	51,98	400	52,98
90	48,78	190	52,14		

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=4\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$\Delta Y_{\max} = 5^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=270\text{с}$.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

Форма титульного листа расчетно-пояснительной записки

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и
инженерии имени Н.И. Вавилова»**

Институт биотехнологии

Кафедра: «_____»

Дисциплина: «_____»

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Тема: «_____»

Работу выполнил: студент (группа, ФИО)

Руководитель: (уч. степень, звание, ФИО).

Саратов 20____ г.

Дополнительные указанные обозначения, отражающие функциональные признаки прибора по ГОСТ 21.404-85

Наименование	Обозначение
Чувствительный элемент (первичное преобразование)	Е
Дистанционная передача (промежуточное преобразование)	Т
Станция управления	К
Преобразование, вычислительные функции	У

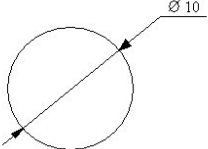
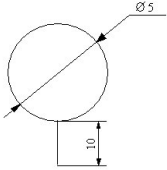
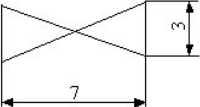
Буквенные условные обозначения по ГОСТ 21.404-85

Обозначение	Измеряемая величина		Функции, исполняемые прибором		
	осн. знач. первой буквы	доп. знач., уточняющее знач. первой буквы	отображ. информации	формирование выходного сигнала	доп. значение
A	-	-	Сигнализация	-	-
B	-	-	-	-	-
C	-	-	-	Рег-е, упр-е	-
D	Плотность	Разность, перепад	-	-	-
E	Любая эл. величина	-	-	-	-
F	Расход	Соотношение доля, дробь	-	-	-
G	Размер, положение, перемещение	-	-	-	-
H	Ручное воздействие	-	-	-	Верхн.предел изм. величины
I	-	-	Показание	-	-
J	-	Авт. переключение	-	-	-
K	-	-	-	-	-
L	Время, вр. программа Уровень	-	-	-	Нижн.предел изм. величины
M	-	-	-	-	-
N	Влажность	-	-	-	-
O	Резервная буква	-	-	-	-
P	Резервная буква Давление, вакуум	-	-	-	-
Q	Величина, характ. кач-во, состав и т.п.	Интегрирование, суммирование во времени	-	-	-
R	Радиоактивность	-	Регистрация	-	-
S	Скорость, частота	-	-	Вкл-е, откл-е, переключ-е, сигн-ция	-
T	-	-	-	-	-
U	Тем-ра Неск.	-	-	-	-
V	разнородных изм.	-	-	-	-
W	вел-н	-	-	-	-
X	Вязкость Масса Нерекоменд. рез-я	-	-	-	-

**Дополнительные обозначения, применяемые для построения преобразователей
сигналов и устройств по ГОСТ 21.404-85**

Наименование	Обозначение
Род сигнала:	
электрический	E
пневматический	P
гидравлический	G
Виды сигналов:	
аналоговый	A
дискретный	D
Операции, выполняемые вычислительным устройством:	
суммирование	S
умножение сигнала на постоянный коэффициент K	K
перемножение двух и более сигналов друг на друга	*
деление сигнала друг на друга	:
возведение величины f в степень n	f ⁿ
извлечение величины сигнала из корня степени n	$\sqrt[n]{f}$
логарифмирование	lg
дифференцирование	dx/dt
интегрирование	∫
изменение знака сигнала	x(-1)
ограничение верхнего значения сигнала	max
ограничение нижнего значения сигнала	min

**Размеры графических условных обозначений приборов и средств
автоматизации по ГОСТ 21.404-85**

Наименование	Обозначение
Первичный измерительный преобразователь (датчик), прибор (контролирующий, регулирующий):	
базовое обозначение	
допускаемое обозначение	
исполнительный механизм	
регулирующий орган	

Приложение 6

Спецификация на приборы и средства автоматизации

Номера по позиции	Наименование параметра, среда и место отбора импульса	Предельное значение параметра	Место установки	Наименование и характеристика	Тип	Кол-во
1-1	Температура питательной среды на выходе выдерживателя	150°C	трубопровод на выходе выдерживателя	Термопара Гр ХК с водозащищённым головкой, защищённая арматура – сталь ХНЮТ	ТХК 400У	1
1-2			Щит управления	Потенциометр показывающий и самопишущий. Гр ХК. Предел измерения 0-200°C с выходным пневматическим преобразователем	КСП -2-006	1
1-3			Щит управления	Устойство регулирующее пневматическое пропорциональное	ПР 2.8	1
1-4			трубопровод подачи пара в выдерживатель	Регулирующий клапан с мембранным исполнительным механизмом, диаметр основного прохода 50 мм	25 ч 32 нж (НЗ)	1

Бланк задания
на выполнение курсового проекта по дисциплине

« _____ »
Тема « _____ »

Исходные данные для проектирования:

1. Параметры объекта регулирования

$K=10$, $T_1=79$ с, $T_2=91$ с. Начальное значение выходной величины объекта $Y_0=53^{\circ}\text{C}$.

Примечание:

По усмотрению преподавателя параметры объекта могут сразу задаваться в виде табличных значений кривой разгона

Значения кривой разгона

t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)	t	Y(t)
0	53	60	54,583	140	57,907	260	61,094	600	62,929
5	53,017	70	55,002	160	58,617	280	61,406	700	62,975
10	53,064	80	55,432	180	59,253	300	61,67	800	62,991
20	53,238	90	55,865	200	59,815	320	61,894	900	62,997
40	53,817	100	56,295	220	60,305	500	62,806	1000	62,999
50	54,184	120	57,129	240	60,73	550	62,882	1100	63

2. Требования к качеству проектируемой АСР:

Максимально возможный процент хода регулирующего органа: $M\%=14\%$

Максимально допустимое динамическое отклонение регулируемой величины:

$\Delta Y_{\max} = 3,1^{\circ}\text{C}$.

Максимально допустимое время регулирования: $T_{p.\max}=450$ с.

Установившееся отклонение: $Y_{\text{ост}}=0,5^{\circ}\text{C}$.

Произвести выбор вида регулятора, закона управления и рассчитать параметры регулятора.