

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л.И. Медведева

РАЗДЕЛ ВКР

«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ»:

СТРУКТУРА, МЕТОДЫ, ОФОРМЛЕНИЕ

Электронное учебное пособие



Волжский
2020

ББК 74.026.65я73
УДК 519.8(07)
М 42

Рецензенты:

канд. тех. наук, начальник Волжского филиала ФБУ «Волгоградский ЦСМ»
Бельчанская Е.Н.,
канд. физ-мат. наук, доцент НИУ МЭИ в г. Волжском
Капля Е.В.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Медведева, Л.И.

Раздел ВКР «Математическое моделирование»: структура, методы, оформление [Электронный ресурс]: учебное пособие / Л.И. Медведева ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 1,59 МБ). – Волжский, 2020. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9948-3540-1

Учебное пособие содержит теоретический материал, необходимый для выполнения и защиты раздела выпускной квалификационной работы «Математическое моделирование», правила его оформления.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 05.03.04 и магистратуры 05.04.04. «Автоматизация технологических процессов и производств» всех форм обучения.

Ил. 38, табл. 7, библиограф.: 9 назв.

ISBN 978-5-9948-3540-1

© Волгоградский
государственный
технический
университет, 2020
© Волжский
политехнический
институт, 2020

Содержание

Введение	4
Глава 1. Раздел ВКР «Математическое моделирование»: структура	6
Глава 2. Раздел ВКР «Математическое моделирование»: методы	19
Глава 3. Раздел ВКР «Математическое моделирование»: оформление	68
Список литературы	72

Введение

Математическое моделирование технологического процесса имеет целью создание его модели в виде функциональных зависимостей, отражающих взаимосвязь между входными и выходными параметрами. Входными параметрами являются физические величины, определяющие состояние объекта и результат его функционирования, который оценивается значениями выходных параметров. Математическая модель представляет собой математический образ объекта и позволяет проводить анализ и исследование его поведения в различных условиях работы, не прибегая к натурному эксперименту.

Для разработки системы управления составляют статические и динамические модели объектов. Объектом управления принято считать технологический агрегат совместно с реализованным в нём технологическим процессом в соответствии с принятым технологическим регламентом или установленным режимом эксплуатации. Уравнения статики модели описывают объект в установившемся режиме работы и служат для получения статических характеристик. Уравнения динамики модели отражают изменения во времени входных и выходных параметров. Они позволяют оценить влияние возмущающих и управляющих воздействий на объект управления и получить передаточные функции по соответствующим каналам [1].

Выполнению раздела выпускной квалификационной работы «Математическое моделирование» предшествует предварительная работа по постановке научной проблемы и прогнозированию результатов исследования. Постановка проблемы понимается как обобщение конкретных сформулированных научных вопросов, касающихся предмета и цели будущего исследования, определение границы между знанием и незнанием о предмете. Такие вопросы формулируются на основе предварительного ознакомления со справочно-информационными изданиями, электронными базами данных и научной литературой в заданной области, оценки достаточности исходных материалов и/или разработанности методов исследования. Анализ и сопоставление полученных данных позволяет наметить цель, задачи, структуру и перспективы будущего исследования, смоделировать его ожидаемый результат.

Вслед за проблемой определяется объект и предмет исследования. Объект – это своеобразный носитель проблемы, то, на что направлена исследовательская деятельность. Понятие предмет исследования значительно уже и конкретнее объекта, это та сторона, та точка зрения, с которой исследователь познает целостный объект.

Следующий шаг – это формулировка цели и задач исследования. Цель представляет собой конечный результат, то, ради чего исследование выполнялось. Цель исследования конкретизируется в поставленных задачах, отражающих общий путь её достижения. Задачи исследования – это то, что требует решения в процессе исследования; вопросы, на которые должен быть получен ответ [2].

Таким образом, **целями** раздела ВКР «Математическое моделирование» являются:

1. Создание модели технологического процесса в виде функциональных зависимостей, отражающих взаимосвязь между входными и выходными параметрами.
2. Выработка у студента навыка анализа как объекта исследования, так и системы управления им.

Задачи исследования:

- исследование особенностей объекта управления;
- разработка математического описания объекта управления;
- оценка адекватности рассчитанной математической модели;
- выбор контура регулирования технологического параметра;
- расчет настроечных параметров выбранного закона регулирования;
- оценка показателей качества динамических характеристик системы регулирования с рассчитанными параметрами объекта управления и регулирующего устройства.

Глава 1. Раздел ВКР «Математическое моделирование»: структура

Структура раздела ВКР «Математическое моделирование» определяется задачами, которые необходимо решить для достижения поставленных целей.

1.1. Исследование особенностей технологического объекта управления

В качестве объектов управления (ОУ) можно понимать либо материальные объекты (помещения, установки, машины, выполняющие технологические процессы), либо непосредственно сами технологические процессы (ТП). Единого мнения по определению ОУ пока нет. С одной стороны, важна эффективность технологических процессов. И в этом смысле под ОУ целесообразно понимать именно сам процесс. Например, процессы массообмена, горения пламени, формирования биомассы, обработки и накопления информации. С другой стороны, большинство технологических процессов происходит в материальных объектах: ректификационных установках, теплообменниках, цехах, процессорах и т. п. И человек воздействует на эти процессы, как правило, с помощью материальных органов. Поэтому в качестве ОУ столь же обоснованно можно принимать материальные носители технологических процессов.

Технологический процесс как ОУ характеризуется несколькими качественными и количественными показателями, на которые влияет ряд возмущающих и управляющих воздействий. Одни возмущения, влияющие на ход ТП, можно контролировать (расход сырья, уровень продукта, температура реакции), а другие могут иметь случайный и неконтролируемый характер (поломки оборудования, параметры окружающей среды). Управляющие воздействия регламентируются распорядком дня, режимом работы технологического оборудования, производственными инструкциями и т. д.

Технологическая установка как ОУ характеризуется некоторыми показателями качества – технологическими параметрами, являющимися выходными координатами, а также искусственно создаваемыми входными воздействиями, прямо или косвенно влияющими на состояние ОУ (рис. 1.1).

Внутренние параметры не изменяются в процессе функционирования объекта. Например, внутренними параметрами методической нагревательной печи как объекта управления можно считать габариты печи, количество форсунок, их проходное сечение и т.п.

Внешние параметры объекта управления можно разделить на входные и выходные.

Выходные параметры (зависимые переменные, регулируемые величины) характеризуют качество управляемого процесса – цель управления.

Например, для нагревательной печи в качестве таких величин можно рассматривать температуру внутripечного пространства, температуру заготовок на выходе печи, перепад температуры по их длине и сечению и т.п.

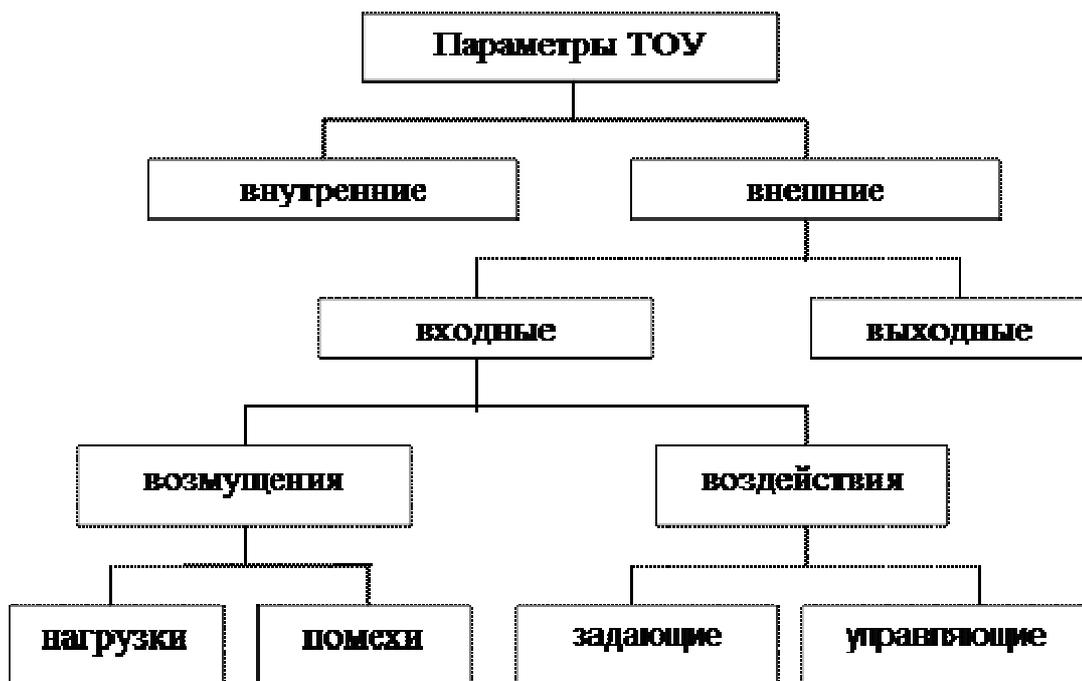


Рисунок 1.1 – Классификация параметров объекта управления

Входные параметры делятся на неуправляемые возмущения и управляемые воздействия.

Возмущения бывают двух видов: нагрузки и помехи.

Нагрузка – это полезное возмущение, которое не только допускается при нормальной работе объекта, но и неразрывно связано с его назначением.

Например, для штамповочного прессы нагрузкой является переменное сопротивление заготовки, из которой получают необходимое изделие.

Помеха – это вредное возмущение, мешающее нормальному функционированию объекта. *Например, для электропечи – это колебания питающего напряжения.*

Воздействия вырабатываются человеком или автоматическим устройством и тоже делятся на два вида: *задающие*, которые определяют требуемое значение выходной величины в штатном режиме работы объекта, и *управляющие*, которые призваны компенсировать действие возмущений случайного характера.

Описать любую техническую систему как объект управления – значит определить для нее все входные и выходные параметры [3].

Простейшие ОУ имеют одну выходную величину и соответственно одно входное воздействие. Например, у водонагревателя выходной величиной (параметром) является температура воды, а регулирующим воздействием – электрическое напряжение, подаваемое на электронагреватели. К простым можно отнести также технологические установки с несколькими входными и выходными координатами, если между этими координатами не существует функциональных взаимосвязей. Такой объект можно рассматривать как несколько простейших по соответствующим параметрам и каналам входных воздействий. Например, в процессе приготовления резиновой смеси при

смешивании исходных компонентов согласно рецептуре заполнение резиносмесителя вполне допустимо рассматривать как отдельные системы.

И, наконец, сложные объекты с несколькими взаимосвязанными входными и выходными координатами требуют учета взаимного влияния смежных воздействий и параметров.

Для выполнения математического моделирования из всего оборудования, используемого в технологическом процессе, выбирается аппарат, в котором протекают процессы, оказывающие наибольшее влияние на качественные показатели готового продукта. При этом:

- оборудование ОУ должно быть полностью механизировано и должно безотказно работать в межремонтный период;
- ОУ должен быть управляем, т.е. разделен на определенные зоны с возможностью воздействия на технологический режим в каждой из них изменением материальных и энергетических потоков;
- возможность воздействия на характеристики оборудования;
- возможность доступа обслуживающего персонала к местам установки датчиков, исполнительных механизмов, регулирующих органов;
- число возмущающих воздействий должно быть сведено к минимуму, что возможно в результате установки: ресиверов; емкостей с мешалками; теплообменников, уменьшающих амплитуду и частоту изменения таких параметров, как *давление, состав, температура* [4].

1.2. Разработка математического описания объекта управления

При построении математической модели различают аналитический, аналитико-экспериментальный и экспериментальный методы. Первый основывается на изучении физических и химических процессов и отражает уровень знаний о них. Если знания не точны или их не хватает, недостающие получают из эксперимента. Это и есть содержание второго метода. А когда совсем (или почти) ничего неизвестно, к объекту подходят как к «черному ящику», снимают ряд характеристик и их обрабатывают.

Сначала происходит изучение конструкции объекта и процессов, в нем протекающих. *При построении аналитической модели наиглавнейшим условием является понимание с чем, что и как происходит в процессе технологической операции или их последовательности.* Многие операции выполняются над всем объемом исходного продукта. Это полностью относится к химическому взаимодействию в реакторах. Но часто собственно технологическому переделу (количественному или качественному изменению) при физических взаимодействиях подвергается не исходный продукт в целом, а только одна из его составляющих. Например, в процессах фильтрации и сушки изменяются массы только жидкой фазы, а массы твердой фазы остаются практически неизменными.

Любая технологическая операция производится в конкретном аппарате, на конкретном оборудовании, часто не позволяющем выполнить необходимый

объем технологического передела. Поэтому применяется «каскадное» использование однотипного оборудования. Именно такие решения приняты в сушильной части бумагоделательных машин и в системах очистки дымовых газов от вредных примесей. При составлении математической модели допускается дифференциальное рассмотрение каждого каскада, если «нагрузка» каждого каскада различна, и интегральное рассмотрение всех каскадов вместе, если они «нагружены» равномерно.

Важным дополнением является учет возможного деления операции на этапы, проходящие в различных частях аппарата, т. е. в различных условиях по конструктивному решению. Например, во многих типах паровых и водогрейных котлов различают зону лучистого теплообмена между факелами горелок топочной камеры и водой, протекающей по экранным вертикально расположенным трубам, и зону конвективного теплообмена между топочными газами и водой, протекающей по трубам, расположенным горизонтально. Именно способ осуществления технологического передела позволяет составить перечень переменных величин (измеряемых и не измеряемых), которые могут войти элементами в математическую модель. А связи между ними либо устанавливаются известными из теории формулами, либо дополняются результатами эксперимента. На этом же этапе определяется состав входных и выходных величин, которые отображаются на расчетной схеме объекта управления. *Осознание того, что подвергается переделу, приводит к пониманию способов осуществления этого передела. А именно: какие физико-химические процессы (а они описываются известными соотношениями между участвующими в них переменными величинами) должны являться содержанием технологической операции, и за какое время они происходят.*

При составлении математической модели исследователь принимает решение о составе переменных для модели и степени важности тех или иных соотношений между ними. Это называется принятием допущений. Основные допущения касаются либо пренебрежения незначимыми с точки зрения исследователя переменными, либо степени несоответствия условий протекания процесса теоретическим построениям. К принятию допущений относится и упрощение вида зависимостей между переменными – элементами модели. При этом уменьшается и число звеньев структурной схемы системы управления.

Для составления математической модели применяется один из двух (или оба) самых общих и всегда справедливых физических законов. Речь идёт о законе сохранения вещества (материи) и законе сохранения энергии, которая не исчезает, а переходит из одного вида в другой.

Для моделирования обычно составляются уравнения массового и/или энергетического баланса. Причем уравнения динамики составляются для приращений функций или, что, то же самое, для отклонений от установившегося режима. Таким образом, *математическая модель представляет собою совокупность текстовых и математических записей относительно всех наших знаний о процессе и аппарате, в котором этот процесс протекает, о сделанных допущениях и характере изменения управляемой величины.* И не имеет никакого

значения, в какой форме выполнены эти математические записи: дифференциального или интегрального уравнения, алгебраического уравнения или неравенства; ограничение или постоянство какой-либо величины. Однако нас интересует и составление структурной схемы системы управления значениями регулируемых величин. Для этого уравнение динамики записывается в операторной форме (после применения преобразования Лапласа), что позволяет составить передаточные функции по каждому каналу. А определенные числовые значения коэффициентов передаточных функций с использованием значений параметров регламентного режима позволяют построить структурную схему математической модели.

Если решить полученные уравнения относительно главной переменной величины при описанных условиях (обычно её значение и подлжит регулированию), то получим функцию изменения этой величины во времени и пространстве при фиксированных начальных или граничных условиях. Такую функцию можно исследовать математическими методами при различных видах возмущающих и управляющих воздействий и различных значениях параметров этих функций. Результаты решений анализируются по некоторому критерию (обычно временнОму), а на основании анализа выдаются рекомендации по значениям параметров применяемых воздействий [1].

1.3. Оценка адекватности рассчитанной математической модели

Таким образом, модель предназначена для замены оригинала при исследованиях, которым подвергать оригинал нельзя или нецелесообразно. Но замена оригинала моделью возможна, если они в достаточной степени похожи или адекватны.

Адекватность (от лат. *adaequatus* – приравненный) – соответствие модели моделируемому объекту (оригиналу) или процессу.

Адекватность – в какой-то мере условное понятие, так как полного соответствия модели реальному объекту быть не может, иначе это была бы не модель, а сам объект. При моделировании имеется в виду адекватность не вообще, а по тем свойствам модели, которые для исследования считаются *существенными*.

Говорят, что модель адекватна оригиналу, если при ее интерпретации возникает «портрет», в высокой степени сходный с оригиналом.

До тех пор пока не решен вопрос, правильно ли отображает модель исследуемую систему (т.е. адекватна ли она), ценность модели нулевая.

Термин «адекватность», как видно, носит весьма расплывчатый смысл. Понятно, что результативность моделирования значительно возрастет, если при построении модели и переносе результатов с модели на систему оригинал может воспользоваться некоторой теорией, уточняющей идею подобия, связанную с используемой процедурой моделирования.

Проверку адекватности проводят на всех этапах построения модели, начиная с самого первого этапа – концептуального анализа. Если описание

системы будет составлено не адекватно реальной системе, то и модель, как бы точно она ни отображала описание системы, не будет адекватной оригиналу. Здесь сказано «как бы точно», так как имеется в виду, что вообще не существует математических моделей, абсолютно точно отображающих процессы, существующие в реальности.

Если изучение системы проведено качественно и концептуальная модель достаточно точно отражает реальное положение дел, то далее перед разработчиками стоит лишь проблема эквивалентного преобразования одного описания в другое.

Итак, можно говорить об адекватности модели в любой ее форме и оригинала, если:

- описание поведения, созданное на каком-либо этапе, достаточно точно совпадает с поведением моделируемой системы в одинаковых ситуациях;
- описание убедительно представительно относительно свойств системы, которые должны прогнозироваться с помощью модели.

Предварительно исходный вариант математической модели подвергается следующим проверкам:

- все ли существенные параметры включены в модель;
- нет ли в модели несущественных параметров;
- правильно ли отражены функциональные связи между параметрами;
- правильно ли определены ограничения на значения параметров;
- не дает ли модель абсурдные ответы, если ее параметры принимают предельные значения.

Такая предварительная оценка адекватности модели позволяет выявить в ней наиболее грубые ошибки.

Окончательное суждение об адекватности модели может дать лишь практика (хотя для оценки адекватности используются и экспертные методы), т.е. сравнение модели с оригиналом на основе экспериментов с объектом и моделью. Модель и объект подвергаются одинаковым воздействиям и сравниваются их реакции. Если реакции одинаковы (в пределах допустимой точности), то делается вывод о том, что модель адекватна оригиналу. Однако надо иметь в виду следующее:

- воздействия на объект носят ограниченный характер из-за возможного разрушения объекта, недоступности к элементам системы и т.д.;
- воздействия на объект имеют физическую природу (изменение питающих токов и напряжений, температуры, скорости вращения валов и т.д.), а воздействия на математическую модель – это числовые аналоги физических воздействий.

При моделировании сложных систем достигнуть полного соответствия трудно, да и нецелесообразно. При моделировании абсолютное подобие не имеет места. Стремятся лишь к тому, чтобы модель достаточно хорошо отражала исследуемую сторону функционирования объекта. Модель по сложности может стать аналогичной исследуемой системе, и никакого упрощения исследования не будет.

Общие требования к моделям следующие.

1. Модель должна быть *актуальной*. Это значит, что модель должна быть нацелена на важные для лиц, принимающих решения, проблемы.
2. Модель должна быть *результативной*. Это значит, что полученные результаты моделирования могут найти успешное применение. Данное требование может быть реализовано только в случае правильной формулировки требуемого результата.
3. Модель должна быть *достоверной*. Это значит, что результаты моделирования не вызовут сомнения. Данное требование тесно связано с понятием адекватности, т.е. если модель неадекватна, то она не может давать достоверных результатов.
4. Модель должна быть *экономичной*. Это значит, что эффект от использования результатов моделирования превышает расходы ресурсов на ее создание и исследование.

Эти требования (обычно их называют внешними) выполнимы при условии обладания моделью внутренними свойствами.

Модель должна быть:

- *существенной*, т.е. позволяющей вскрыть сущность поведения системы, вскрыть неочевидные, нетривиальные детали;
- *мощной*, т.е. позволяющей получить широкий набор существенных сведений;
- *простой* в изучении и использовании, легко рассчитываемой на компьютере;
- *открытой*, т.е. позволяющей ее модификацию.

Трудно ограничить область применения математического моделирования. При изучении и создании промышленных и военных систем практически всегда можно определить цели, ограничения и предусмотреть, чтобы конструкция или процесс подчинялись естественным, техническим и (или) экономическим законам.

Круг аналогий, которые можно использовать в качестве моделей, также практически неограничен. Следовательно, надо постоянно расширять свое образование в конкретной области, но в первую очередь – в математике.

В разделе ВКР «Математическое моделирование» в основном используется только один из видов компьютерного моделирования, а именно имитационное, которое обладает:

- способностью понимать, интерпретировать и использовать формализованную и неформализованную информацию (математические формулы, логические правила, вербальные описания и т.п.);
- различными формами представления данных и знаний, заполняя пространство между ММ с его аналитическими формами описания и искусственным интеллектом с его формами и правилами представления знаний;
- способностью участвовать в процессе не только автоматизации научных исследований за счет использования самой ЭВМ для модификации

различных режимов применения КМ, но и интеграции всех этапов жизненного цикла системы путем использования быстро развивающихся методов ИТ (широко распространенные во всем мире *CALS*- технологии, *CASE*-технологии, технологии *ICAM* и *IDEF*);

- возможностью расширения круга пользователей, от узкого круга специалистов – математиков и профессиональных программистов до большого класса исследователей, не обладающих профессиональными знаниями в областях математики и программирования, но хорошо знающих предметную область и умеющих обращаться с пакетами прикладных программ [5].

1.4. Выбор контура регулирования технологического параметра

Главной задачей при разработке автоматизированной системы управления (АСУ) является выбор параметров участвующих в управлении, то есть тех, которые контролируют, регулируют и сигнализируют.

Технологический процесс характеризуется входными, выходными и режимными параметрами (рис. 1.1).

Входные параметры дают представление о материальных и энергетических потоках на входе в технологический объект управления.

Значение режимных параметров непосредственно влияет на выходные параметры.

Таким образом, все эти параметры, а именно: входные, выходные и режимные, связаны между собой.

Особое внимание при выборе контура регулирования необходимо обратить на поддержание входных параметров близко к их нормальным значениям, так как с их изменением в объект поступают наиболее сильные возмущения.

Однако изменение технологического параметра, оказывающего наибольшее влияние на качество готового продукта, зависит главным образом от возмущающих воздействий, которые не поддаются ликвидации до поступления в объект управления. Следовательно, число воздействий, приводящих к возмущению, должно быть сведено к минимальному количеству. Для повышения эффективности работы объекта управления это является одним из главных условий.

Поддержание режимных и особенно выходных параметров является обязательным условием проведения технологического процесса.

Основная задача управления системой автоматизации заключается в разрешении проблемы наличия внешних и внутренних возмущающих воздействий. Внешние возмущения вносятся извне при изменении входных и некоторых выходных параметров. Внутренние возмущения, происходят в самом объекте управления при изменении характеристик технологического оборудования и параметров рабочих сред.

Важно для устранения возмущений контролировать и регулировать входные параметры, а также по возможности не допускать изменения режимов

и отклонений от технологического процесса, только в этом случае, качество получаемого продукта и производительность системы автоматизации останутся на прежнем уровне.

Непосредственно в выпускной квалификационной работе приводится расчет одного контура регулирования наиболее ответственного технологического параметра.

1.5. Расчет настроечных параметров выбранного закона регулирования

Все математические задачи, решаемые в выпускной квалификационной работе, можно объединить в два класса:

- задачи анализа;
- задачи синтеза.

В *задачах анализа* полностью известна структура системы, заданы все (как правило) параметры системы, и требуется оценить какое-либо ее статическое или динамическое свойство. К задачам анализа относятся определение устойчивости и оценка качества управления системы.

Задачи синтеза можно рассматривать как обратные задачам анализа: в них требуется определить структуру и параметры системы по заданным показателям качества управления. Простейшими задачами синтеза являются, например, задачи определения передаточного коэффициента разомкнутой АСУ по заданной ошибке или условию минимума интегральной оценки.

Синтез АСУ – процедура определения структуры и параметров системы по заданным показателям качества управления.

В общем случае при проектировании системы необходимо определить *алгоритмическую* и *функциональную* структуры системы, т. е. решить задачу полного синтеза.

Определение *алгоритмической* структуры (*теоретический синтез*) производится с помощью математических методов и на основании требований, записанных в четкой математической форме.

Определение *функциональной* структуры (*технический синтез*) заключается в выборе конкретных физических элементов и согласования их между собой по статическим и энергетическим характеристикам. Эта процедура не имеет пока строгой математической основы (т. е. не формализована) и поэтому относится к области инженерного творчества.

С учетом того, что *не любой элемент* алгоритмической структуры может иметь отображение в виде физического блока функциональной структуры, т. е. просто не может быть реализован, задачу синтеза в большинстве случаев невозможно решать, определяя сначала алгоритмическую структуру АСУ, а затем по ней – функциональную структуру.

Таким образом, процедуры определения алгоритмической и функциональной структур тесно переплетаются друг с другом. Окончательное решение о структуре АСУ принимается на основе компромисса между качеством управления, с одной стороны, и простотой и надежностью, с другой.

Заключительным этапом проектирования АСУ является *параметрическая оптимизация* – определение настроечных параметров выбранного регулятора.

На основании общих соотношений между параметрами объекта управления и регулятора можно сформулировать рекомендации по выбору типа регулятора и его настроечных параметров:

- для объектов с запаздыванием, инерционная часть которых действительно близка звену первого порядка (а не просто аппроксимирована таким звеном!), целесообразно применять ПИ-регулятор;
- для объектов с запаздыванием, инерционная часть которых имеет порядок $n \geq 2$, наилучшим регулятором является ПИД-регулятор.

Проведенные исследования позволили также сформулировать следующие общие выводы о влиянии настроечных параметров на показатели качества регулирования:

- увеличение коэффициента k_P пропорциональной части регулятора приводит к увеличению перерегулирования σ , времени t_n переходного процесса и уменьшению степени затухания Ψ .
- увеличение коэффициента k_I интегральной части регулятора приводит к уменьшению времени t_n переходного процесса и увеличению перерегулирования σ .
- увеличение коэффициента k_D дифференциальной части регулятора приводит к уменьшению времени t_n переходного процесса и увеличению перерегулирования σ [6].

1.6. Оценка показателей качества динамических характеристик системы регулирования с рассчитанными параметрами объекта управления и регулирующего устройства

Качество АСУ – совокупность свойств, обеспечивающих эффективное функционирование системы в целом.

Свойства из этой совокупности, выраженные в количественной форме, называют *показателями качества АСУ*.

В ТАУ же показатели качества рассматривают, как правило, в более узком смысле: рассматривают только *статические и динамические свойства системы*, характеризующие *точность* поддержания управляемой величины $x(t)$ на заданном уровне $x_s(t)$ соответственно в установившихся и переходных режимах, т. е. характеризующие *эффективность процесса управления*. Для такого более узкого понимания качества АСУ применяют термин «качество управления АСУ»:

Качество управления АСУ – совокупность свойств АСУ, характеризующих точность поддержания управляемой величины на заданном уровне в установившихся и переходных режимах.

Свойства из этой совокупности, выраженные в количественной форме, называют *показателями качества управления АСУ*.

Качество управления АСУ в переходном режиме оценивают при помощи *прямых и косвенных* показателей качества.

Прямые показатели качества определяют по графику переходного процесса, возникающего в системе при ступенчатом внешнем воздействии.

Косвенные показатели качества определяют по распределению корней характеристического уравнения или по частотным характеристикам системы.

В настоящее время разработаны и получили широкое распространение мощные средства компьютерного моделирования АСУ, позволяющие точно и быстро вычислять переходный процесс, т. е. оценивать точность системы через *прямые показатели качества*. Поэтому эти показатели качества и используются при написании раздела «Математическое моделирование» (рис. 1.2).

Перерегулирование σ – величина, равная отношению первого максимального отклонения x_m управляемой величины $x(t)$ от ее установившегося значения $x(\infty)$ к этому установившемуся значению:

$$\sigma = \frac{x_m - x(\infty)}{x(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100, \%$$

Качество управления считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает 30...40%.

Степень затухания:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1}.$$

Интенсивность затухания колебаний в системе считается удовлетворительной, если $\psi = 0,75...0,95$.

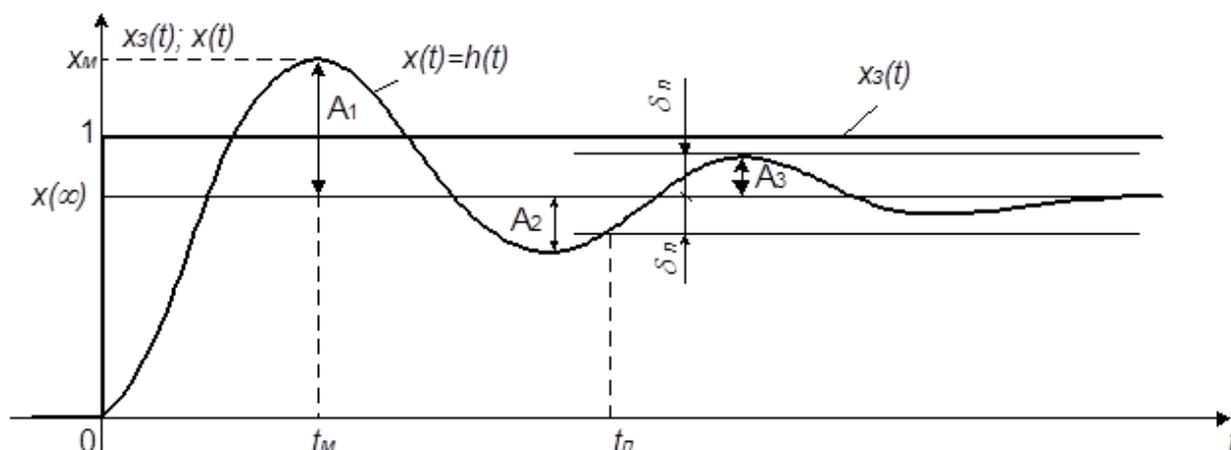


Рисунок 1.2 – Прямые показатели качества процесса регулирования

Длительность переходного процесса (время регулирования) t_n – интервал времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, после которого отклонения управляемой величины $x(t)$ от ее нового установившегося значения $x(\infty)$ становятся меньше некоторого заданного числа δ_n , т. е. до момента, после которого выполняется условие:

$$|x(t) - x(\infty)| \leq \delta_n.$$

В промышленной автоматике величину δ_n обычно принимают равной 5% от установившегося значения $x(\infty)$ [$\delta_n = 0,05 x(\infty)$].

Колебательность N – число переходов управляемой величины $x(t)$ через ее установившееся значение $x(\infty)$ за время переходного процесса t_n .

Три главных показателя качества – перерегулирование σ , первое максимальное отклонение x_m и длительность переходного процесса t_n – тесно связаны между собой. Они зависят от всех параметров системы, но наиболее сильно – от передаточного коэффициента k разомкнутой системы. Причем с увеличением этого коэффициента максимальное отклонение по каналу возмущения всегда уменьшается, максимальное отклонение по каналу задающего воздействия всегда увеличивается, а перерегулирование и длительность переходного процесса, как правило, увеличиваются. Отыскание оптимального компромисса между этими двумя противоречивыми тенденциями является одной из основных задач *синтеза АСУ*.

Каждый из рассмотренных выше прямых показателей качества характеризует лишь *одно* какое-либо свойство АСУ, лишь *один* признак переходного процесса. Причем все показатели связаны с настроечными параметрами регулятора сложными зависимостями, имеющими, как правило, противоречивый характер: изменение параметра приводит к *улучшению* одних показателей качества и *ухудшению* других. Это обстоятельство существенно затрудняет выбор параметров регулятора. Поэтому в инженерной практике широко используются *интегральные показатели (оценки) качества*.

Интегральная оценка качества – определенный интеграл по времени (в пределах от 0 до ∞) от некоторой функции управляемой величины $x(t)$, а чаще сигнала ошибки $\varepsilon(t)$:

$$Q = \int_0^{\infty} f_0[x(t), t] dt.$$

Подынтегральная функция f_0 выбирается таким образом, чтобы интеграл лучше характеризовал качество системы и проще выражался через коэффициенты передаточной функции замкнутой системы. Чтобы интеграл был сходящимся, в функцию f_0 вводят не абсолютные значения $x(t)$ или $\varepsilon(t)$, а их отклонения от конечных, установившихся значений.

Простейшей интегральной оценкой является *линейная интегральная оценка*:

$$Q_L = \int_0^{\infty} [x(\infty) - x(t)] dt,$$

которая равна площади, заключенной между прямой установившегося значения $x(\infty)$ и кривой переходного процесса $x(t)$. Интегральная оценка учитывает как величину динамических отклонений, так и длительность их существования. Поэтому *чем меньше оценка, тем лучше качество процесса управления*.

Недостатком линейной интегральной оценки Q_L является то, что ее можно применять лишь для заведомо неколебательных, аperiodических переходных процессов. В связи с этим для колебательных переходных процессов применяют такие интегральные оценки, знакопеременность подынтегральной функции

которых тем или иным способом устранена. Такой оценкой является, например, *модульная интегральная оценка*:

$$Q_M = \int_0^{\infty} |x(\infty) - x(t)| dt.$$

Или *среднеквадратичная интегральная оценка*:

$$Q_C = \int_0^{\infty} (x(\infty) - x(t))^2 dt$$

Все рассмотренные интегральные показатели используют не только для оценки качества, но и для *определения оптимальных значений настроечных параметров АСУ*. Оптимальными считают такие значения, которые соответствуют минимуму интегрального показателя $Q \rightarrow \min$ [6].

В данной главе приведены примеры, призванные проиллюстрировать для студента, выполняющего выпускную квалификационную работу, задачи, поставленные во введении и раскрытые в первой главе учебного пособия. Первая цифра в нумерации примера указывает на порядковый номер задачи, а вторая – номер примера в этой задаче.

Пример 1.1.

В процессе подогрева нефтепродукта до $t=500\pm 5$ °С объектом управления является трубчатая печь, которая с помощью перевальной стенки разделена на две части: радиантную и конвективную (рис. 2.1). В радиантную часть печи подается газ-топливо и воздух. Здесь происходит сгорание топлива и образование тепла. Нефтепродукт вводится в конвективную часть печи и предварительно обогревается за счёт тепла уходящих дымовых (топочных) газов. Движение нефтепродукта по трубопроводу противоточное движению дымовых газов. Окончательный подогрев нефтепродукта происходит в радиантной зоне.

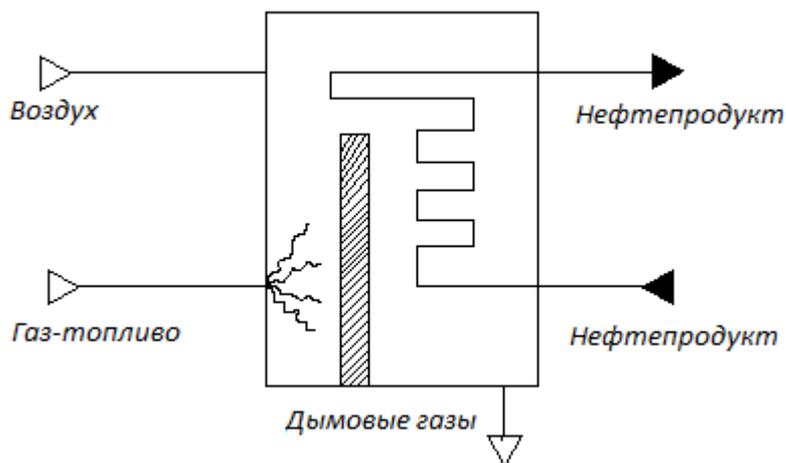


Рисунок 2.1 – Технологическая схема объекта управления

Показателями эффективности процесса являются:

- температура нефтепродукта на выходе из печи;
- производительность печи;
- энергетические затраты на процесс нагрева нефтепродукта.

Целью управления процессом является поддержание температуры нефтепродукта на выходе из печи на значении 500 ± 5 °С; при оптимальной производительности печи; при минимальных энергетических затратах на нагревание нефтепродукта; при условии, что процесс будет безаварийным, безопасным и непрерывным.

Пример 1.2.

Процесс дегидрирования изобутана (-2.9-) в изобутилен (-5.9-) технологически оформлен как непрерывно действующая система с «кипящим» слоем катализатора ИМ-2201 в смеси с катализатором КДМ, циркулирующими в системе реактор-регенератор.

Реактор (поз. 3) и регенератор (поз. 6) располагаются на одном уровне (рис. 2.2).

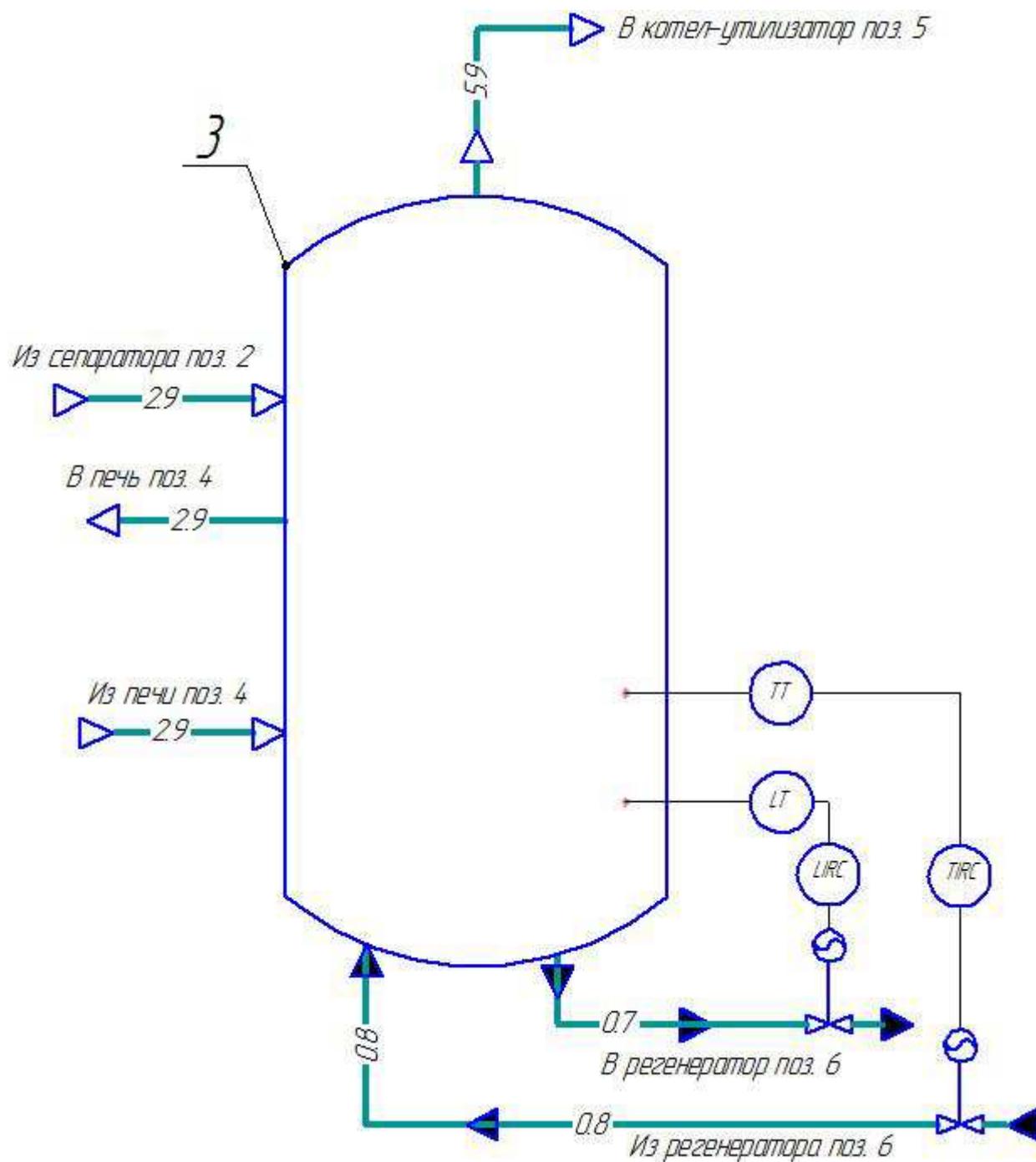


Рисунок 2.2 – Схема управления температуры катализатора

Транспортные линии из реактора (поз. 3) в регенератор (поз. 6) и из

регенератора (поз. 6) в реактор (поз. 3) условно разделены на участки по направлению движения катализатора – на нисходящую и восходящую ветви. Транспортные линии имеют продолжение в реакторе (поз. 3) и регенераторе (поз. 6) до верхних решеток с целью, чтобы катализатор, поступая в «кипящий» слой, двигался навстречу потоку сырья в реакторе (поз. 3) и навстречу потоку воздуха в регенераторе (поз. 6).

В реакторе (поз. 3), в «кипящем» слое катализатора при температуре от 530 до 600 °С происходит дегидрирование изобутана (-2.9-) с образованием изобутилена (-5.9-).

Основная реакция дегидрирования изобутана эндотермична. Тепло, необходимое для реакции и компенсации теплотерь, подводится с горячим регенерированным катализатором. Регенерированный катализатор (-0.8-) постоянно поступает из регенератора (поз. 6) через транспортную линию регенератор-реактор на верхнюю секционную решетку реактора (поз. 3). Транспортировка катализатора (-0.8-) из регенератора (поз. 6) в реактор (поз. 3) осуществляется подачей паров изобутана (азота) в транспортную линию через аэрационные врезки («течки»).

Объектом автоматического регулирования выбирается реактор (поз. 3), при помощи которого происходит дегидрирования изобутана (-2.9-) в изобутилен (-5.9-). Основным параметром является температура катализатора (-0.8-) в реакторе (поз. 3).

Температура в реакторе (поз. 3) выбрана в качестве основного параметра управления, так как от температуры катализатора (-0.8-) зависит качество получаемого продукта. Температура в реакторе (поз. 3) зависит от количества подаваемого катализатора (-0.8-) из регенератора (поз. 6).

При увеличении расхода катализатора (-0.8-) увеличивается температура катализатора (-0.8-). Если нагрев изобутана (-2.9-) не произойдет, то реакция дегидрирования изобутана (-2.9-) не произойдет, и процесс надо будет начинать заново, если изобутан (-2.9-) перегреть, то процесс станет взрывоопасным.

Уровень в реакторе (поз. 3) зависит от количества катализатора (-0.8-) в реакторе (поз. 3), и регулируется отводом катализатора (-0.7-) из реактора (поз. 3) в регенератор (поз. 6).

Пример 2.1.

Одним из основных этапов разработки системы автоматизированного управления технологическим процессом является математическое моделирование основного узла из числа, используемого в процессе оборудования. В процессе синтеза метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) таким оборудованием служит теплообменник для нагревания реакционной смеси до 55 °С перед подачей на реактор (рис. 2.3). На вход теплообменника поступает жидкость при температуре $T_{ж}$, на выходе – жидкость принимает температуру $T_{ж}$. Подогрев жидкости происходит за счет подачи греющего водяного пара, имеющего массовый расход G_p . Изменением подачи пара в теплообменник регулируют температуру выходящей жидкости.

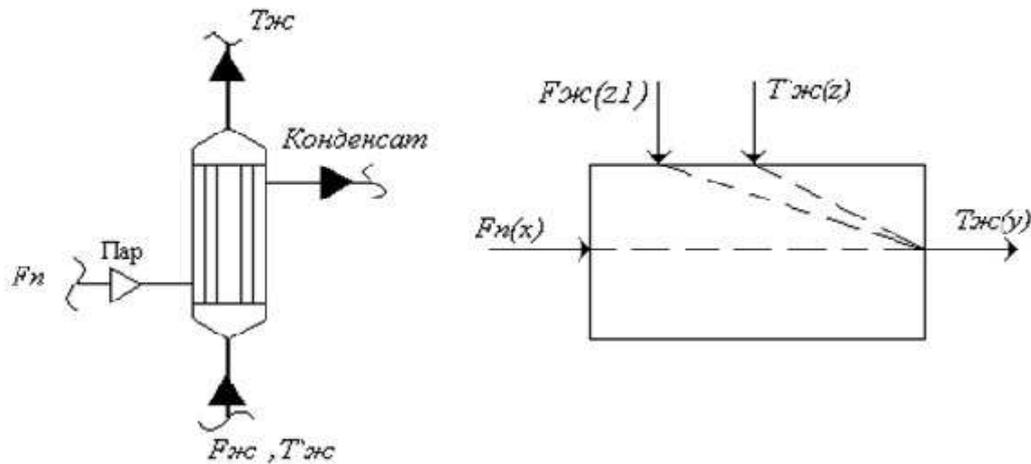


Рисунок 2.3 – Схема теплообменника

$(F_{п}(x) \rightarrow T_{ж}(y))$ - канал регулирования температуры выходящей жидкости расходом пара;

$T'_{ж}(z) \rightarrow T_{ж}(y)$ - канал возмущения по температуре входа жидкости; $F_{ж}(z_1) \rightarrow T_{ж}(y)$ - канал возмущения по расходу жидкости)

Принимаемые допущения:

- 1) температура жидкости в теплообменнике постоянна во всех точках объема;
- 2) температура теплопередающих стенок одинакова во всех точках;
- 3) термическое сопротивление теплопередающих стенок пренебрежимо мало;
- 4) удельные теплоемкости жидкости, материала стенок, коэффициент теплоотдачи постоянны во времени;
- 5) насыщенный водяной пар полностью конденсируется, отдает тепло фазового перехода и выводится при той же температуре;
- 6) тепло, выделяющееся при конденсации пара, расходуется на изменение температуры теплопередающих стенок и нагревание жидкости.

Уравнение теплового баланса для теплопередающих стенок имеет вид:

$$F_{п} \cdot r \cdot dt = M_{ст} \cdot c_{ст} \cdot dT_{ст} + \alpha \cdot A \cdot (T_{ст} - T_{ж}) \cdot dt. \quad (1)$$

где r – теплота фазового перехода Дж/кг;

A – суммарная поверхность стенок, m^2 ;

$M_{ст}$ – масса теплопередающих стенок.

Тепло, поступившее в теплообменник с жидкостью и полученное ею через металлические стенки от горячего теплоносителя за время dt , расходуется на увеличение температуры жидкости. Тогда уравнение теплового баланса для жидкости:

$$F_{ж} \cdot c_{ж} \cdot T_{ж} \cdot dt + \alpha \cdot A \cdot (T_{ст} - T_{ж}) \cdot dt = M_{ж} \cdot c_{ж} \cdot dT_{ж} + F_{ж} \cdot c_{ж} \cdot T_{ж} \cdot dt, \quad (2)$$

где $M_{ж}$ – масса жидкости в теплообменнике, кг.

Уравнения (1) и (2) переписываются в виде:

$$M_{ст} \cdot c_{ст} \cdot \frac{dT_{ст}}{dt} + \alpha \cdot A \cdot T_{ст} = F_{п} \cdot r + \alpha \cdot A \cdot T_{ж}, \quad (3)$$

$$M_{ж} \cdot c_{ж} \cdot \frac{dT_{ж}}{dt} + (F_{ж} \cdot c_{ж} + \alpha \cdot A) \cdot T_{ж} = F_{ж} \cdot c_{ж} \cdot T_{ж} + \alpha \cdot A \cdot T_{ст}, \quad (4)$$

и переменные в уравнениях (3) и (4) заменяются их конечными приращениями, отнесенным к базисным значениям переменных с учетом равенства:

$$\Delta f(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \Delta y.$$

Вводятся обозначения:

$$y = \frac{\Delta T_{ж}}{T_{ж0}}, \quad y_{ст} = \frac{\Delta T_{ст}}{T_{ст0}}, \quad x = \frac{\Delta F_{п}}{F_{п0}}, \quad z_1 = \frac{\Delta F_{ж}}{F_{ж0}}, \quad z = \frac{\Delta T_{ж}}{T_{ж0}},$$

$$M_{ст} \cdot c_{ст} \cdot T_{ст} \cdot \frac{dy_{ст}}{dt} + \alpha \cdot A \cdot T_{ст0} \cdot y_{ст} = F_{п0} \cdot r \cdot x + \alpha \cdot A \cdot T_{ж0} \cdot y, \quad (5)$$

$$M_{ст} \cdot c_{ст} \cdot T_{ст0} \cdot \frac{dy}{dt} + (F_{ж0} \cdot c_{ж} + \alpha \cdot A) \cdot T_{ж0} \cdot y = -F_{ж0} \cdot c_{ж} \cdot (T_{ж0} - T'_{ж0}) \cdot z_1 + F_{ж0} \cdot c_{ж} \cdot T'_{ж} \cdot z + \alpha \cdot A \cdot T_{ст0} \cdot y_{ст} \quad (6)$$

$$T^* = \frac{M_{ст} \cdot c_{ст}}{\alpha \cdot A}, \quad T^{**} = \frac{M_{ж} \cdot c_{ж}}{F_{ж0} \cdot c_{ж} + \alpha \cdot A}, \quad k_1 = \frac{F_{ж0} \cdot c_{ж} \cdot (T_{ж0} - T'_{ж0})}{(F_{ж0} \cdot c_{ж} + \alpha \cdot A) \cdot T_{ж0}},$$

$$k_2 = \frac{F_{ж0} \cdot c_{ж} \cdot T'_{ж0}}{(F_{ж0} \cdot c_{ж} + \alpha \cdot A) \cdot T_{ж0}}, \quad k_3 = \frac{F_{п0} \cdot r}{\alpha \cdot A \cdot T_{ст0}}, \quad k_4 = \frac{\alpha \cdot A \cdot T_{ст0}}{(F_{ж0} \cdot c_{ж} + \alpha \cdot A) \cdot T_{ж0}},$$

$$k_5 = \frac{T_{ст0}}{T_0}.$$

где T^* и T^{**} – постоянные времени.

С учетом введенных обозначений уравнения (5) и (6) записываются в виде:

$$T^* \frac{dy_{ст}}{dt} + y_{ст} = k_3 x + k_5 y, \quad (7)$$

$$T^{**} \frac{dy}{dt} + y = -k_1 \cdot z_1 + k_2 \cdot z + k_4 y_{ст}. \quad (8)$$

Из уравнения (8) выражается $y_{ст}$:

$$y_{ст} = \frac{T^{**}}{k_4} \frac{dy}{dt} + y + \frac{k_1}{k_4} \cdot z_1 - \frac{k_2}{k_4} \cdot z \quad (9)$$

и (9) дифференцируется по времени:

$$\frac{dy_{ст}}{dt} = \frac{T^{**}}{k_4} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} + \frac{k_1}{k_4} \cdot \frac{dz_1}{dt} - \frac{k_2}{k_4} \cdot \frac{dz}{dt}. \quad (10)$$

Подставив (10) и (9) в (5), разделив все слагаемые полученного уравнения на коэффициент при y , равный $\frac{F_{ж0} \cdot c_{ж} \cdot T_{ст0}}{\alpha \cdot A \cdot T_{ст0}}$, и имея ввиду равенство $F_{п0} \cdot r = \alpha \cdot A \cdot (T_{ст0} - T_{ж0}) = F_{ж0} \cdot c_{ж} \cdot (T_{ж0} - T'_{ж0})$, получим искомое уравнение динамики теплообменника:

$$\begin{aligned} & \frac{M_{ст} \cdot c_{ст} \cdot M_{ж}}{\alpha \cdot A \cdot F_{ж0}} \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + \left(\frac{M_{ст} \cdot c_{ст}}{\alpha \cdot A} + \frac{M \cdot c_{ст}}{F_{ж0} \cdot c_{ж}} + \frac{M_{ж}}{F_{ж0}} \right) \cdot \frac{dy}{dt} + y = \\ & = \frac{T_{ж0} - T'_{ж0}}{T_{ж0}} \cdot X - \frac{T_{ж0} - T'_{ж0}}{T_{ж0}} \cdot \left(\frac{M_{ст} \cdot c_{ст}}{\alpha \cdot A} \cdot \frac{dz_1}{dt} + z_1 \right) + \left(1 - \frac{T_{ж0} - T'_{ж0}}{T_{ж0}} \right) \times \\ & \quad \times \left(\frac{M_{ст} \cdot c_{ст}}{\alpha \cdot A} \cdot \frac{dz}{dt} + z \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Вводятся обозначения:

$$T_1^2 = \frac{M_{ст} \cdot c_{ст} \cdot M_{ж}}{\alpha \cdot A \cdot F_{ж0}}, \quad T_2 = \frac{M_{ст} \cdot c_{ст}}{\alpha \cdot A} + \frac{M \cdot c_{ст}}{F_{ж0} \cdot c_{ж}} + \frac{M_{ж}}{F_{ж0}}, \quad T_3 = \frac{M_{ст} \cdot c_{ст}}{\alpha \cdot A}, \quad k = \frac{T_{ж0} - T'_{ж0}}{T_{ж0}}.$$

Тогда (11) принимает вид:

$$T_1^2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + T_2 \cdot \frac{dy}{dt} + y = k \cdot x - k \cdot \left(T_3 \cdot \frac{dx_1}{dt} + z_1 \right) + (1 - k) \cdot \left(T_3 \cdot \frac{dz}{dt} + z \right), \quad (12)$$

где T_1, T_2, T_3 – расчетные коэффициенты.

Рассмотрим поведение объекта по каналу регулирования температуры жидкости $F_{п}(x) - T_{ж}(y)$, выходящей из теплообменника. Допустим, что температура и расход входящей жидкости постоянны, и их значения не меняются во времени $T_{ж} = \text{const}$ и $F_{ж} = \text{const}$. Тогда уравнение (12) примет вид:

$$T_1^2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + T_2 \cdot \frac{dy}{dt} + y = k \cdot x, \quad (13)$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени объекта.

Исходные данные для расчета математической модели теплообменника в рассматриваемом процессе приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики теплообменника	
Тип	горизонтальный, кожухотрубный, одноходовой
$A = 40 \text{ м}^2$	площадь теплообменника
$n = 84$	число труб
$d = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	диаметр труб
$\delta = 2 \cdot 10^{-3}$	толщина стенок труб

L = 6 м	длина труб
Физические характеристики нагреваемой жидкости, греющего пара, материала стенок теплообменных труб	
Нагреваемая жидкость	шихта
T _{ж0} ' = 30 °С	номинальная температура входящей жидкости
T _{ж0} = 55 °С	температура выходящей жидкости
F _{ж0} = 5,15 кг/с	номинальный массовый расход жидкости
F _{п0} = 0,65 кг/с	номинальное значение расхода греющего пара
ρ _ж = 655 кг/м ³	плотность жидкости
ρ _{ст} = 7800 кг/м ³	плотность материала труб (сталь)
C _ж = 2560 ж/(кг*К)	удельная теплоемкость жидкости
C _{ст} = 460 ж/(кг*К)	удельная теплоемкость стали

Используя данные из таблицы 1, рассчитываются масса стенок труб:

$$M_{ст} = n \cdot 3,14 \cdot L \cdot \rho_{ст} \cdot \left[\frac{d^2}{4} - \frac{(d-2\delta)^2}{4} \right], M_{ст} = 570 \text{ кг}$$

и масса жидкости в трубах:

$$M_{ж} = 3,14 \cdot (d-2\delta)^2 / 4 \cdot L \cdot \rho_{ж} \cdot n, M_{ж} = 114,28 \text{ кг.}$$

Из уравнения теплового баланса для жидкости (статика) следует:

$$\alpha \cdot A \cdot (T_{ст} - T_{ж0}) = F_{ж0} \cdot C_{ж} \cdot (T_{ж0} - T'_{ж0}).$$

Принимается температура стенки равная температуре конденсации насыщенного водяного пара при его рабочем давлении: T_{ст} = 170 °С. Тогда из выше приведенного уравнения выражается коэффициент теплоотдачи от стенок к нагреваемой жидкости:

$$\alpha = \frac{F_{ж0} \cdot C_{ж} \cdot (T_{ж0} - T'_{ж0})}{A \cdot (T_{ст} - T_{ж0})}, \alpha = 71,65 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К.}$$

Искомые постоянные времени объекта:

$$T1 = \sqrt{\frac{M_{ст} \cdot C_{ст} \cdot M_{ж}}{\alpha \cdot A \cdot F_{ж0}}}, T2 = \frac{M_{ст} \cdot C_{ст}}{\alpha \cdot A} + \frac{M_{ст} \cdot C_{ст}}{F_{ж0} \cdot C_{ж}} + \frac{M_{ж}}{F_{ж0}},$$

$$T1 = 45,04 \text{ с; } T2 = 135,985 \text{ с.}$$

Величиной входного воздействия ΔF_п = 0,065 является приращение расхода греющего пара, которое в относительных координатах имеет вид:

$$x = \frac{\Delta F_{п}}{F_{п0}}, x = 0,1 \text{ (10%).}$$

Коэффициент усиления объекта:

$$k = \frac{T_{ж0} - T'_{ж0}}{T_{ж0}}, k = 0,45.$$

Выходной величиной $y = k \cdot x$, $y=0,014$ является относительное приращение температуры.

Уравнение (13) имеет общее решение в виде:

$$y(t) = k \cdot x \cdot \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} \cdot e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} \cdot e^{-\frac{t}{T_4}} \right), \quad (14)$$

где $T_3 = \frac{1}{2} \cdot (T_2 + \sqrt{T_2^2 - 4 \cdot T_1^2})$; $T_4 = \frac{1}{2} \cdot (T_2 - \sqrt{T_2^2 - 4 \cdot T_1^2})$.

Задаваясь значениями времени $t = 0..400$ с рассчитывается $y(t)$ в абсолютных координатах температуры (рис. 2.4):

$$y(t) = T_{ж0} + T_{ж0} \cdot k \cdot x \cdot \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} \cdot e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} \cdot e^{-\frac{t}{T_4}} \right). \quad (15)$$

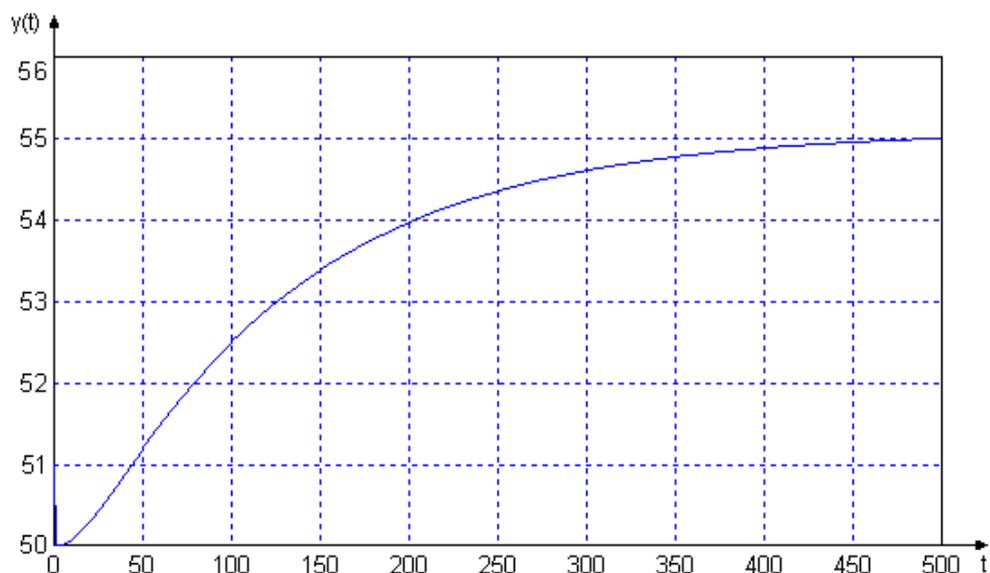


Рисунок 2.4 – Кривая разгона

Полученная математическая модель используется для анализа объекта управления, настроек параметров регулирования и моделирования переходного процесса в системе управления и анализа качества [7].

Пример 2.2.

В качестве объекта моделирования был выбран теплообменный аппарат, который служит для завершающей стадии подогрева капролактамовых вод перед их поступлением в выпарную установку.

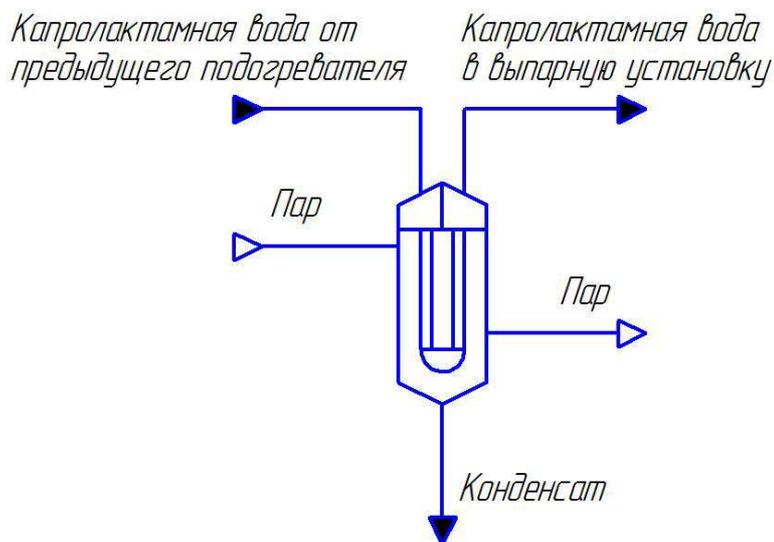


Рисунок 2.5 – Схема потоков в теплообменном аппарате

Качественное поддержание температуры капролактамовых вод на выходе из теплообменного аппарата позволит обеспечить оптимальный режим выпаривания, минимизируя затраты на энергоносители (пар).

Расчет настроечных коэффициентов регулятора, так же как и выбор структуры с законом регулирования невозможно выполнить без разработки адекватной математической модели подогревателя.

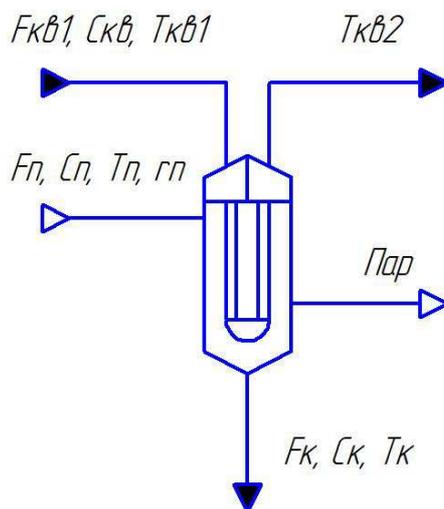


Рисунок 2.6 – Схема материальных и энергетических потоков в теплообменном аппарате

Разработать математическую модель на основе экспериментальных данных не представляется возможным из-за их отсутствия и возможности их получения. Поэтому математическая модель была разработана на основе уравнений материального и энергетического баланса.

При построении математической модели теплообменного аппарата был предварительно проведен анализ структуры движения потоков в аппарате. Структура представлена на рисунке 2.6.

Для каждого потока было записано математическое описание в виде выражения, характеризующего изменения температуры в потоке теплоносителя во времени, обусловленное движением потока и теплопередачей. Предварительно формулируются следующие допущения:

- коэффициент теплоотдачи, плотность, теплоемкость пара и капролактамовых вод постоянны в диапазоне исследуемой температуры;
- расход потоков постоянен;
- температура пара в подогревателе постоянна;
- тепло, выделяющееся при конденсации пара, расходуется на нагрев капролактамовых вод;
- влияние уровня конденсата на процесс теплопередачи не учитывается, так как из-за особенности конструкции теплообменного аппарата, конденсат не может перекрывать поверхность теплообмена.

После анализа было получено следующее уравнение динамики парожидкостного теплообменника:

где (1)

$F_{п}$

– расход пара, кг/с;

– расход капролактамовых вод, кг/с;

$V_{кв}$

– объем капролактамовых вод, ;

$\tau_{п}$

– теплота фазового перехода (конденсации), $\frac{Дж}{кг}$;

– плотность капролактамовых вод, $\frac{кг}{м^3}$;

– удельная теплоемкость капролактамовых вод, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$;

$T_{кв1}$ – конечная температура капролактамовых вод, $^\circ C$;

$T_{кв2}$ – конечная температура капролактамовых вод, $^\circ C$.

Выразив из уравнения (1) переменную получим систему уравнений, удобную для имитационного (визуального) моделирования.

(2)

В таблице 2 представлены исходные данные для моделирования работы теплообменного аппарата. Данные получены из технических характеристик теплообменного аппарата.

Таблица 2

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Расход пара	$F_{\text{п}}$	кг/с	0,25
Расход капролактамных вод		кг/с	3,37
Температура пара	$T_{\text{п}}$	$^{\circ}\text{C}$	132
Температура капролактамных вод	$T_{\text{св1}}$	$^{\circ}\text{C}$	91
Теплота фазового перехода	$r_{\text{п}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$2163 \cdot 10^3$
Удельная теплоемкость капролактамных вод		$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$	4155
Плотность капролактамных вод		$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	973
Объем капролактамных вод			0,08

В качестве среды для визуального моделирования была использована программа SimInTech. На рисунке 2.7 представлена блок-схема динамической модели теплообменного аппарата, реализованная в среде визуального моделирования (2).

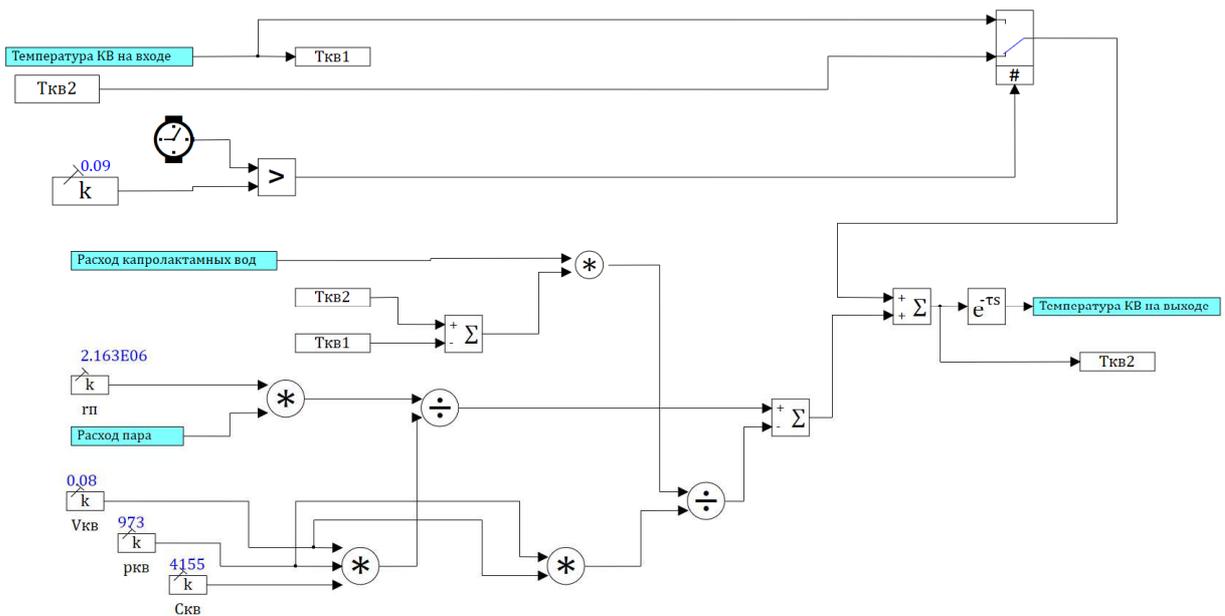


Рисунок 2.7 – Блок-схема динамической модели теплообменного аппарата

График изменения температуры капролактамных вод на выходе из теплообменного аппарата, полученный с использованием математической модели представлен на рисунке 2.8. Из графика видно, что при номинальных значениях входных переменных (расходы пара и капролактамных вод, начальной температуры) температура капролактамных вод на выходе соответствует техническому регламенту [8].

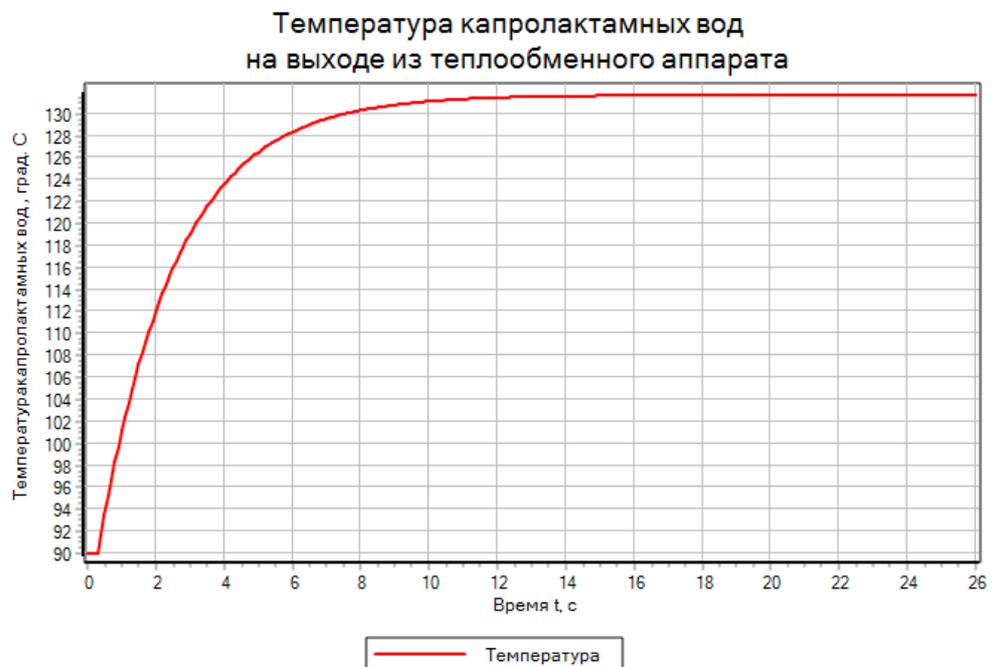


Рисунок 2.8 – Изменение температуры капролактамных вод на выходе из теплообменного аппарата

Как видим, в примерах 2.1. и 2.2. в качестве объекта управления рассматривается один технологический аппарат – теплообменник. Но

имитационное моделирование разработанных математических моделей проводится в разных программных средах.

Пример 2.3.

В роли объекта управления была исследована десорбционная колонна. Данная технологическая установка выделяет из насыщенного абсорбента вредные примеси и подает растворитель на рецикл в колонну абсорбции. Поскольку очистка растворителя становится качественнее при более высокой температуре, нежели при более низком давлении, то в нижнюю часть колонны десорбции противотоком абсорбенту подается острый пар. Из смеси пара и насыщенного абсорбента, выходящей с верхней части колонны, отделяется растворитель, вновь поступающий в колонну десорбции над слоем насадки для повторной очистки.

Для достижения требуемого результата необходимо регулировать расход пара поступающего в колонну, а также для повышения качества ведения процесса и сохранения пара, следует нагревать абсорбент до определенной температуры перед подачей в колонну путем изменения расхода пара в подогреватель.

Объект регулирования состоит из двух элементов: теплообменного аппарата, выполняющего функцию нагрева насыщенного абсорбента (см. пример 2.2.), и десорбционной колонны, которая удаляет из насыщенного абсорбента высшие углеводороды.

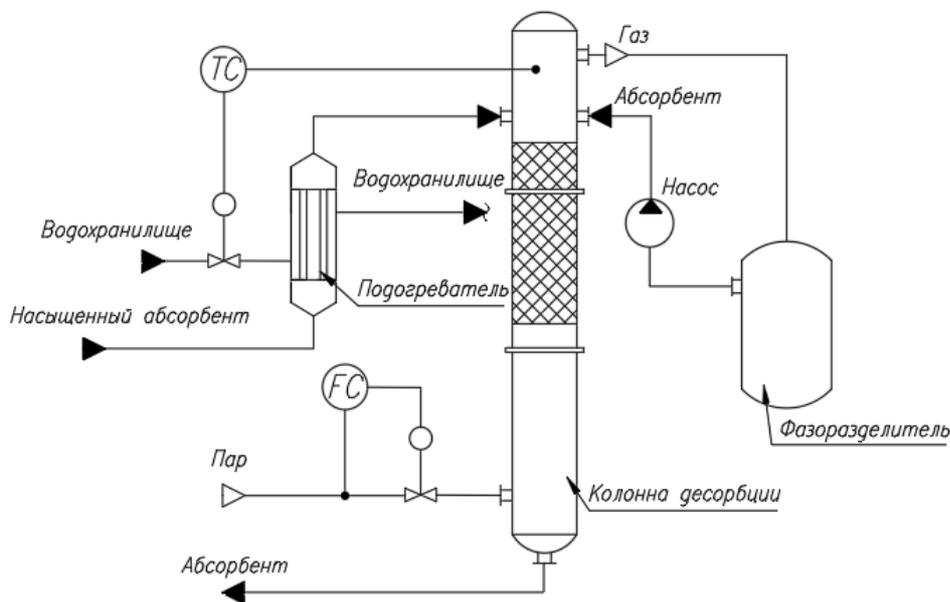


Рисунок 2.9 – Колонна десорбции

Математическая модель десорбционной колонны также разрабатывалась на основе уравнения теплового баланса. Схема тепловых потоков представлена на рисунке 2.10.

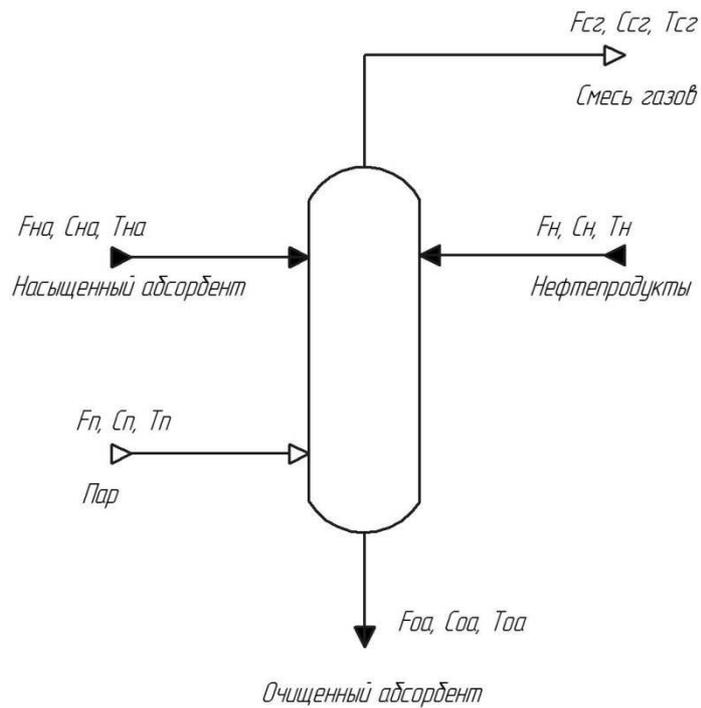


Рисунок 2.10 – Схема материальных и энергетических потоков в десорбере

Уравнение теплового баланса для десорбционной колонны будет иметь вид:

(1)

где $F_{п}$ – расход пара, кг/с;

– удельная теплоемкость пара, кг/с;

$F_{н}$ – расход нефтепродуктов, кг/с;

C

– удельная теплоемкость нефтепродуктов, кг/с;

$T_{н}$ – температура нефтепродуктов, °С;

– расход смеси газов, кг/с;

– температура смеси газов, °С;

$T_{н}$ – температура нефтепродуктов, °С;

– расход очищенного абсорбента, кг/с;

– удельная теплоемкость очищенного абсорбента, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$;

– температура очищенного абсорбента, °С;

– объем смеси газов, ;

– плотность смеси газов, $\frac{кг}{м^3}$;

– удельная теплоемкость смеси газов, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$;

$T_{на2}$ – температура насыщенного абсорбента, °С.

Выразив из уравнения (1) переменную получим систему уравнений, удобную для имитационного (визуального) моделирования.

(2)

В таблице 3 представлены исходные данные для моделирования работы теплообменного аппарата, полученные из его технических характеристик.

Таблица 3

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Расход пара	$F_{\text{п}}$	кг/с	0,16
Температура пара	$T_{\text{п}}$	$^{\circ}\text{C}$	230
Удельная теплоемкость пара		$\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C};$	3634
Расход насыщенного абсорбента		кг/с	3,05
Температура насыщенного абсорбента	$T_{\text{НА2}}$	$^{\circ}\text{C}$	135
Удельная теплоемкость насыщенного абсорбента		$\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C};$	2580
Расход нефтепродуктов	$F_{\text{н}}$	кг/с	0,27
Температура нефтепродуктов	$T_{\text{н}}$	$^{\circ}\text{C}$	27
Удельная теплоемкость нефтепродуктов	$C_{\text{н}}$	$\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C};$	2540
Расход смеси газов		кг/с	На 10-15% больше расхода пара
Удельная теплоемкость смеси газов		$\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C};$	2830
Плотность смеси газов		$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	1,96
Объем смеси газов			7
Расход очищенного абсорбента		кг/с	На 10-15% меньше расхода насыщенного абсорбента

Температура очищенного абсорбента		$^{\circ}\text{C}$	На 4-5 градусов меньше температуры насыщенного абсорбента
Удельная теплоемкость очищенного абсорбента		$\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$;	2470

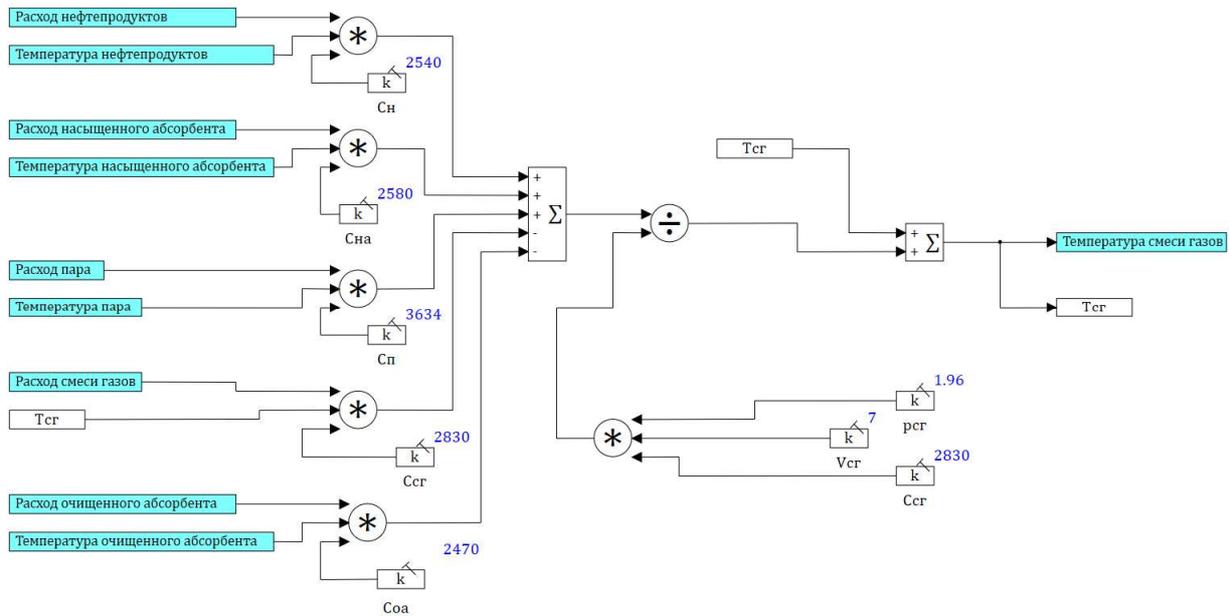


Рисунок 2.11 – Блок-схема динамической модели десорбера

График изменения температуры смеси газов на выходе из десорбера, полученный с использованием математической модели, представлен на рисунке 2.12 [8].

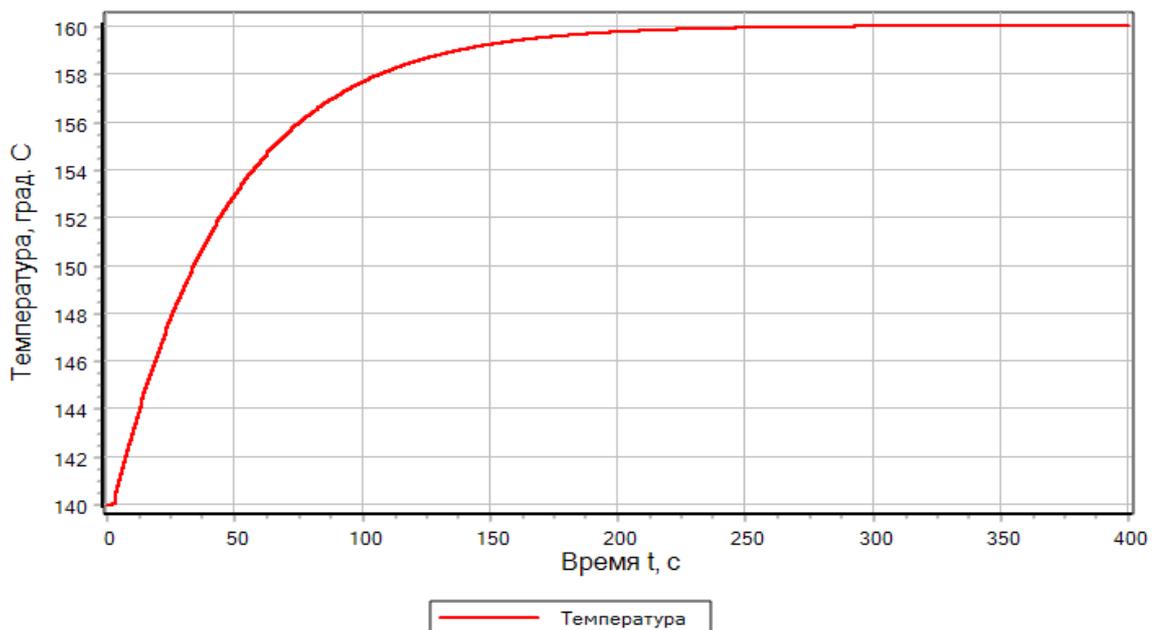


Рисунок 2.12 – Изменение температуры смеси газов на выходе из десорбера

Рассмотренные выше примеры иллюстрируют *аналитический* метод решения математической модели какого-либо технологического объекта. При *активных экспериментальных методах* в процессе эксперимента создаются специальные воздействия на объект, которые вызывают изменения выходных координат (полезная информация, подлежащая обработке).

При этом чаще всего приходится иметь дело с инерционными статическими объектами управления (например, с электрическими двигателями), переходные характеристики $h_0(t)$, которых имеют специфическую *s-образную* форму. Наклон, кривизна характеристики и ее расстояние от оси ординат зависят от динамических свойств конкретного объекта.

Пример 2.4.

Для практических расчетов каждую *s-образную* кривую, снятую при единичном ступенчатом воздействии, достаточно охарактеризовать следующими параметрами, определяемыми непосредственно по графику:

- *передаточным коэффициентом k_0* ;
- *постоянной времени T_0* ;
- *полным запаздыванием τ_0 , которое складывается из чистого запаздывания τ_c и переходного запаздывания τ_n , т. е. $\tau_0 = \tau_c + \tau_n$.*

Параметры T_0 и τ_0 определяют проведением касательной AB к наиболее крутому участку переходной характеристики $h_0(t)$. При расчете настроечных параметров АСУ с объектами, имеющими *s-образные* переходные характеристики (рис. 2.13), ориентируются либо непосредственно на параметры k_0 , T_0 , τ_0 , τ_c и τ_n , которые обобщенно характеризуют статику и динамику реального объекта, либо используют *упрощенные модели* объекта, коэффициенты которых однозначно выражаются через указанные экспериментальные параметры.

Следующая методика тоже применима к s-образным переходным характеристикам. Непосредственно по графику переходного процесса (рис. 2.14) определяется численное значение коэффициента усиления k по формуле:

$$k = \frac{\Delta y(\infty)}{\Delta x} = \frac{15.2}{9} = 1.69,$$

где Δx – величина входного возмущающего воздействия.

На графике переходного процесса находится точка перегиба E , которая отмечает место перехода вогнутой части графика в выгнутую. К точке перегиба строится касательная и отсекает на оси абсцисс отрезки времени T_{ab} и T_{bd} :
 $T_{ab} = 3.1$; $T_{bd} = 12.9$.

По отношению $\frac{T_{ab}}{T_{bd}} = 0.24$ из таблицы 4 определяется порядок объекта управления n и значения вспомогательных коэффициентов k_1 и k_2 (таблица 4).

Таблица 4

$\frac{T_{ab}}{T_{bd}}$	n	k_1	k_2
0	1	1	0
0,104	2	2,718	0,282
0,218	3	3,695	0,805
0,319	4	4,463	1,425
0,41	5	5,119	2,1

$$n = 3$$

$$k_1 = 3.695$$

$$k_2 = 0.805$$

Передаточная функция объекта определяется выражением:

$$W(p) = \frac{k}{(Tp + 1)^n} e^{-p\tau}$$

где $T = \frac{T_{bd}}{k_1} = \frac{12.9}{3.695} = 3.491$ – постоянная времени;

$$\tau_y = T \cdot k_2 = 3.491 \cdot 0.805 = 2.81$$
 – условное время запаздывания;

$$\tau = T_{ab} - \tau_y = 3.1 - 2.81 = 0.29$$
 – абсолютное время запаздывания.

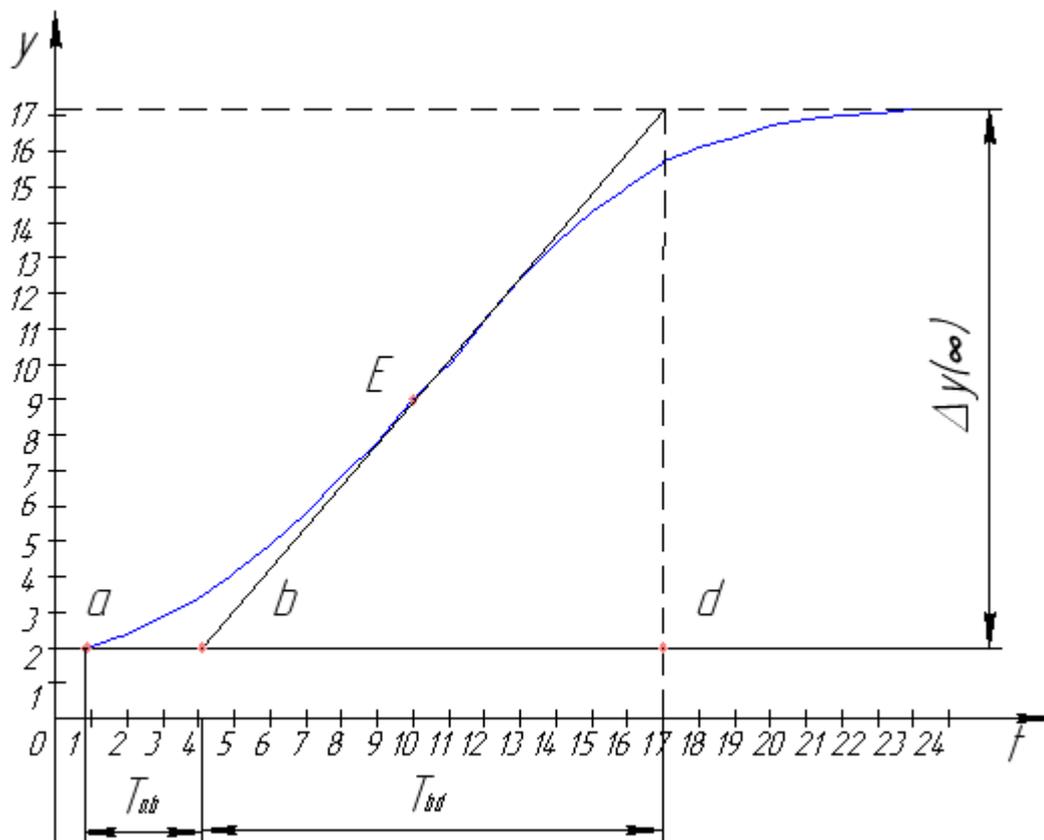


Рисунок 2.14 – Экспериментальный переходный процесс объекта управления

Таким образом, передаточная функция объекта управления согласно расчётам имеет вид:

$$W(p) = \frac{1.69}{(3.49 \cdot p + 1)^3} \cdot e^{-p \cdot 0.29} = \frac{1.69}{42.53p^3 + 36.56p^2 + 10.47p + 1} \cdot e^{-p \cdot 0.29}$$

Адекватность рассчитанной математической модели исследуемому объекту предлагается проверять либо путем сравнения площадей под смоделированным (по рассчитанной модели) переходным процессом и под исходным переходным процессом (пример 3.1.), либо путем визуального сравнения двух графиков переходного процесса (пример 3.2.).

Пример 3.1.

Переходный процесс, реализованный в программном средстве VisSim, по рассчитанной передаточной функции изображен на рисунке 2.15.

Используя возможности программного средства, снимаются координаты полученного переходного процесса. С их помощью рассчитывается численное значение величины σ , которая характеризует переходный процесс приведенный к единичному состоянию (рис. 2.16):

$$\sigma = \frac{y(t)}{y_{\max}}$$

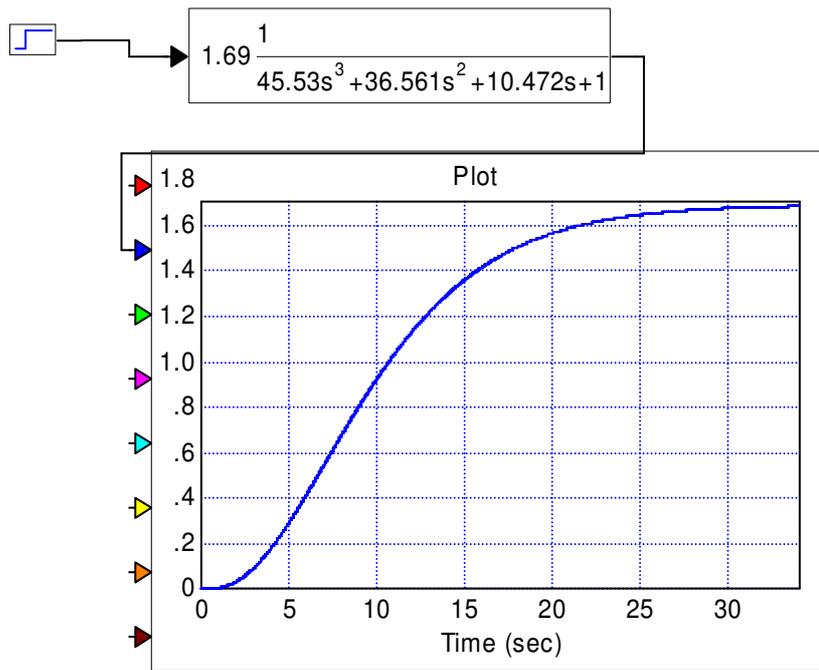


Рисунок 2.15 – Имитационный график переходного процесса

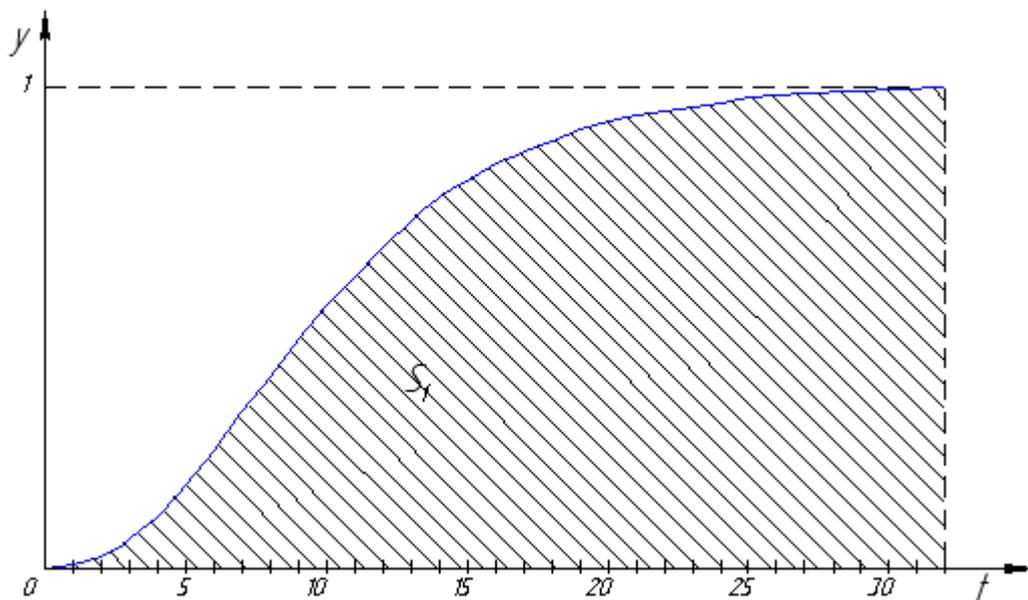


Рисунок 2.16 – Приведенный к единичному значению переходный процесс

Аналогичные действия производятся и для исходного переходного процесса (рис. 2.17).

Величина относительной погрешности рассчитывается по формуле:

$$\delta = \left| \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right| \cdot 100\%,$$

где: S_1 – площадь под исходным графиком переходного процесса ($S_1 = \sum \sigma_{ух}$),
 $S_1 = 23,851$;

S_2 – площадь под расчетным графиком переходного процесса ($S_2 = \Sigma \sigma_{рас}$),
 $S_2 = 21,613$.

Таким образом:

$$\delta = \left| \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{23,851 - 21,613}{23,851} \right| \cdot 100\% = 9,38\% .$$

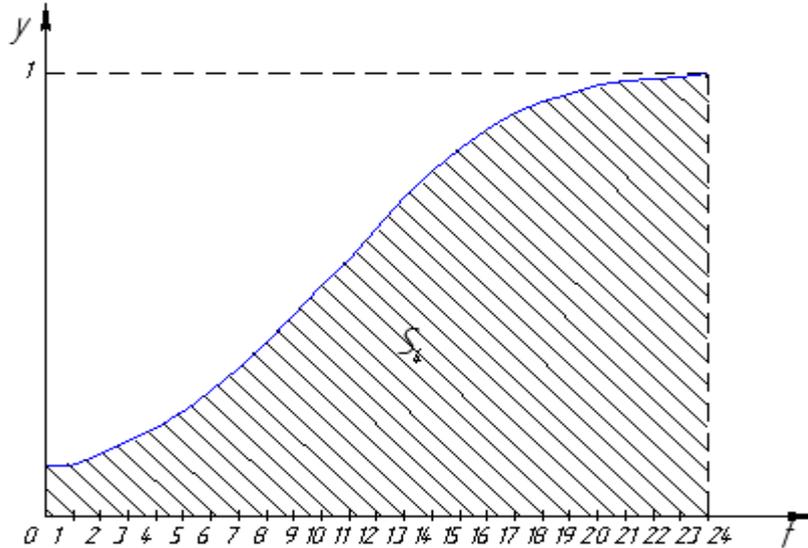


Рисунок 2.17 – Приведенный к единичному значению исходный переходный процесс

Выводы об адекватности модели делаются на основании предположений:

- если величина δ не превышает 10 %, то рассчитанная передаточная функция адекватна исходному объекту управления;
- если величина δ больше 10 %, то рассчитанная передаточная функция не адекватна исходному объекту управления.

Пример 3.2.

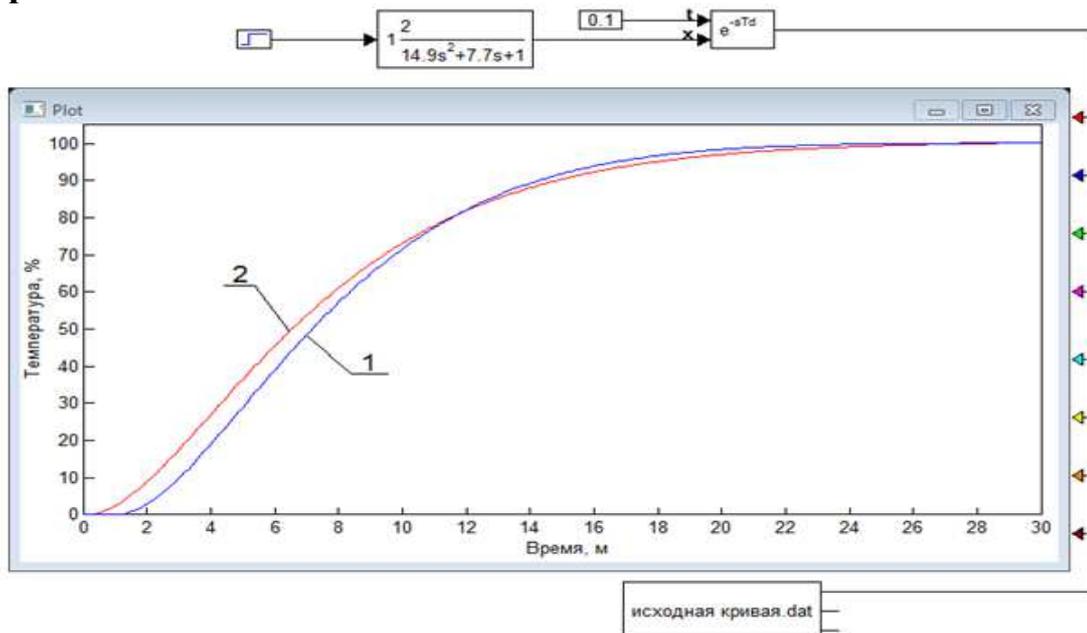


Рисунок 2.18 – Наложение графиков переходных процессов

При наложении исходного графика и графика, построенного в

программном средстве VisSim, можно сделать вывод о том, что рассчитанная передаточная функция соответствует исходной кривой разгона (рис. 2.18).

Пример 4.1.

В процессе нагрева нефтепродукта в первую очередь рассматривается возможность регулирования основного показателя эффективности (ОПЭ) – температуры нефтепродукта на выходе из печи.

ОПЭ можно регулировать, если есть соответствующие средства автоматизации и каналы внесения регулирующего воздействия.

Средства автоматизации для регулирования температуры есть, а в качестве канала внесения регулирующего воздействия можно выбрать:

- линию подачи газа в печь;
- линию подачи нефтепродукта.

Выбирается одноконтурная замкнутая система автоматического регулирования (САР) температуры нефтепродукта на выходе из печи путём изменения подачи газа (рис. 2.19).

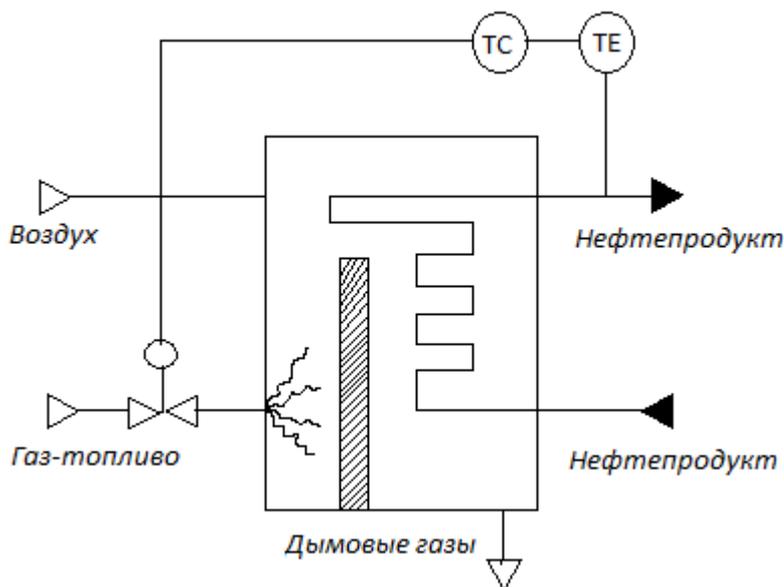


Рисунок 2.19 – Одноконтурная САР регулирования температуры нефтепродукта

Выбор канала внесения регулирующего воздействия сделан из следующих соображений:

- при установке регулирующего клапана на линии начального продукта производительность печи не будет величиной постоянной, что приводит к нарушению второго показателя эффективности;
- изменение расхода начального продукта недопустимо, если начальный продукт поступает в следующий процесс на переработку, так как изменение расхода начального продукта будет вызывать изменение нагрузки следующего аппарата.

Выбранная САР температуры нефтепродукта может не обеспечить требуемого качества регулирования, если объект обладает запаздыванием.

Печь является объектом статическим, причём самовыравнивание имеет место и на приходе, и на расходе. Наличие самовыравнивания на объекте упрощает регулирование параметров объекта. С другой стороны, печь является объектом двухёмкостным и имеет большое запаздывание по каналу «приток газа – температура нефтепродукта на выходе из печи». Наличие запаздывания на объекте сказывается отрицательно на качестве регулирования. Для повышения качества регулирования температуры нефтепродукта на выходе из печи необходимо провести анализ возмущающих воздействий и по возможности, устранить их до объекта.

При изменении расхода газа и его калорийности в печь поступают возмущения. Одно из этих возмущений, в частности, изменение расхода газа, можно устранить до объекта, используя одноконтурную разомкнутую САР расхода газа. Эта система сделает расход газа постоянным, но на все остальные возмущения реагировать не будет.

Поэтому выбирается двухконтурная САР расхода газа с коррекцией по температуре нефтепродукта на выходе из печи (рис. 2.20). Регулятор температуры нефтепродукта будет реагировать на все остальные возмущения как внутренние, так и внешние, в том числе и на изменение калорийности газа, и корректировать задание регулятору расхода газа. Но на изменение калорийности газа регулятор температуры нефтепродукта на выходе из печи будет реагировать с большим запаздыванием.

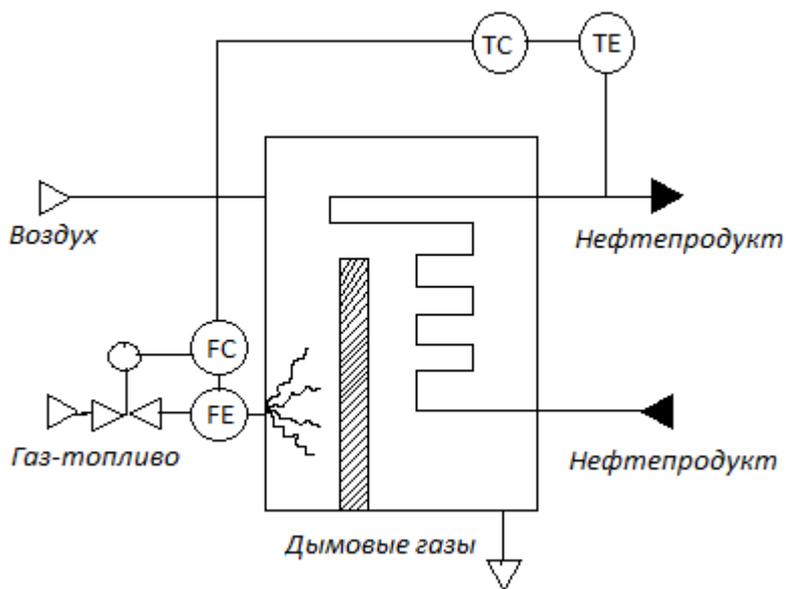


Рисунок 2.20 – Двухконтурная САР расхода газа с коррекцией по температуре нефтепродукта

Если при изменении калорийности газа в печь будут поступать большие возмущения, то выбранная двухконтурная САР может не обеспечить качество регулирования. Необходимо выбрать такую систему, которая бы на изменение калорийности реагировала с минимальным запаздыванием.

Такой системой является САР температуры над перевальной стенкой путём изменения притока газа с коррекцией по температуре нефтепродукта на выходе из печи.

Регулятор температуры над перевальной стенкой с запаздыванием будет реагировать на изменение расхода и калорийность газа и совсем не будет реагировать на возмущения, поступающие по линии подачи нефтепродукта и внутренние возмущения. На все эти возмущения будет реагировать регулятор температуры нефтепродукта на выходе из печи и корректировать задание регулятору температуры над перевальной стенкой.

Работать такая система будет следующим образом: предположим, увеличился приток газа, увеличится температура в топке, сработает регулятор температуры над перевальной стенкой и приведёт к уменьшению притока газа.

Уменьшение притока будет происходить до тех пор, пока температура над перевальной стенкой не станет, равна заданному значению. Если при этом повышается начальная температура нефтепродукта, то повышается и температура нефтепродукта на выходе из печи, и с некоторым запаздыванием сработает регулятор температуры нефтепродукта и подкорректирует задание регулятору температуры над перевальной стенкой, что приведёт к ещё большему уменьшению притока газа в топку. Уменьшение будет происходить до тех пор, пока температура над переливной стенкой не станет равна новому заданному значению.

Итак, выбирается САР температура над перевальной стенкой путём изменения притока газа с коррекцией по температуре нефтепродукта на выходе из печи (регулятор температуры над перевальной стенкой – вспомогательный, а регулятор температуры начального продукта на выходе из печи – главный) для обеспечения ОПЭ – температуры нефтепродукта на выходе из печи.

Пример 4.2.

Основными показателями эффективности процесса вулканизации уплотнителя проема передней двери автомобиля ВАЗ-2107 являются качество уплотнителя, производительность линии, материальные и энергетические затраты на процесс.

Целью управления процессом является обеспечение заданного качества продукции – уплотнителя проема передней двери автомобиля ВАЗ-2107 ТУ 3810 51884 – 89, которое определяется рядом физико-механических свойств изделия; при минимальных энергетических и материальных затратах на процесс и оптимальной производительности; при условии, что процесс будет безаварийным и безопасным.

Рассмотрим возможность регулирования основного показателя эффективности процесса – качества. Качество уплотнителя проема передней двери автомобиля характеризуется размерами, монолитностью, истираемостью, условной прочностью, сопротивлением раздиру, эластичностью, коэффициентом старения, коэффициентом морозостойкости и другими физико-механическими свойствами, т.е. нет параметра, который однозначно определял бы качество

уплотнителя, а также нет соответствующих приборов для непосредственного измерения качества и соответственно нет каналов для внесения регулирующих воздействий. Поэтому необходимо регулировать режимные параметры, т.е. воздействовать на качество косвенными параметрами.

Таковыми параметрами являются температура, при которой происходит процесс вулканизации, температура в экструдерах и время вулканизации.

Рассмотрим влияние температуры на качество изделия. При уменьшении температуры при постоянном времени происходит недовулканизация изделия, а при увеличении температуры – пережог, т.е. резина теряет свои свойства и идет в брак: становится слоистой, с неравномерным сечением или подвулканизованной.

При уменьшении температуры в шприцмашине вязкость резиновой смеси увеличивается, что может привести к увеличению давления в экструзионной головке, разрушению матрицы и перегрузке электродвигателей. Если же температура в шприцмашине увеличивается, то произойдет подвулканизация резины, что сделает невозможным получение профиля с заданными геометрическими размерами.

С другой стороны, на температуру вулканизации оказывают влияние возмущающие воздействия, такие как начальная температура заготовки, температура окружающей среды, напряжение в сети. Поэтому температуру необходимо регулировать, чтобы сделать величиной постоянной, а так как шприцмашины и вулканизаторы характеризуются запаздыванием вследствие инерционности нагревателей, то температуру необходимо регулировать по зонам. Время вулканизации стабилизируется при запуске линии за счет электродвигателей с заданным числом оборотов и остается неизменным все время.

Процесс вулканизации происходит при атмосферном давлении, поэтому регулирование давления не требуется.

Длина готового изделия, как одна из составляющих основного показателя эффективности процесса, также подлежит регулированию.

Пример 4.3.

Технологическим объектом управления в процессе регенерации капролактамовых вод выбран теплообменник, предназначенный для обогрева капролактамовой воды перед подачей на вакуум-выпарную установку. При разработке системы управления был учтён уровень автоматизации. Поэтому в проекте применена микропроцессорная техника.

Отклонение от заданных технологических параметров в результате некачественного регулирования, обусловленного величиной возможного перерегулирования или ошибки регулирования, а также невозможностью оперативного внесения в объект корректирующих воздействий на применяемых ранее средствах автоматизации, приводит к снижению качества, увеличению энергетических затрат на единицу продукции. Для предупреждения брака

необходимо соблюдать технологические режимы на всём технологическом оборудовании.

Основными показателями эффективности работы теплообменника, является давление подаваемого первичного пара и температура первичного пара на выходе из теплообменника.

Целью любой системы управления является, обеспечение оптимального режима функционирования объекта управления. Степень оптимальности функционирования объекта, оценивается одним или несколькими критериями управления. В данном проекте целью управления является обеспечение заданного давления и поддержания температуры на выходе из теплообменника при минимальных энергетических и материальных затратах, оптимальной производительности. Свойства объекта необходимо учитывать при составлении схемы автоматизации, выборе регулирования и определении оптимальных значений настроечных параметров регулятора. Правильный учёт свойств объекта позволяет создать систему управления, имеющую более высокие показатели качества переходного процесса. Основными свойствами объекта управления являются самовыравнивание, ёмкость и запаздывание.

Самовыравнивание объекта характеризует его устойчивость. Самовыравниванием называют, свойство устойчивого объекта самостоятельно устанавливаться в равновесное состояние, после изменения своей входной величины. В объектах с самовыравниванием ступенчатое изменение входной величины приводит к изменению выходной величины со скоростью, постепенно уменьшающейся до нуля, что связано с наличием внутренней, отрицательной обратной связи. Чем больше степень самовыравнивания, тем меньше отклонение выходной величины от первоначального положения.

Ёмкость объекта является свойством, присущим всем динамическим объектам. Она характеризует их инерционность. Чем больше ёмкость, тем меньше скорость изменения выходной величины объекта, и наоборот.

Запаздывание объекта выражается в том, что его выходная величина начинает изменяться не сразу после внесения возмущений, а только через некоторый промежуток времени, называемый временем запаздывания.

Все реальные объекты обладают запаздыванием, так как изменения потоков веществ или тепла распространяется в объектах с конечной скоростью и требуется время для прохождения сигнала от места нанесения возмущения до места, где фиксируется изменение выходной величины.

Главной задачей при разработке системы управления является выбор параметров, участвующих в управлении, то есть тех, которые контролируют, регулируют и анализируют.

Перед автоматизацией технологического объекта, должны быть выполнены следующие мероприятия:

- оборудование технологического объекта управления должно быть механизировано и работать в установленный межремонтный период;

- технологическая схема должна быть составлена таким образом, чтобы процесс был управляем, разделён на определённые зоны с возможностью воздействия на технологический режим в каждой из них;
- должен быть обеспечен доступ к местам установки датчиков, запорных и регулирующих органов;
- число возмущающих воздействий должно быть сведено к минимуму.

Только при выполнении этих условий можно повысить эффективность технологического объекта управления.

Сложность управления заключается в наличии внешних и внутренних возмущающих воздействий. Внешние возмущения протекают извне при изменении входных и некоторых выходных параметров. Внутренние возмущения возникают в самом объекте управления при изменении характеристик технологического оборудования.

Таким образом, для устранения возмущений необходимо контролировать и регулировать входные параметры, не допускать изменения режимов и отклонений от технологического процесса, только в этом случае качество продукции и производительность останутся на высоком уровне. Следовательно, регулированию подлежат параметры:

- температура в I ступени аппарата регулируется расходом греющего пара;
- стабилизацию температуры, поступающей на вход I ступени, производят изменением подачи количества пара в теплообменники – нагреватели;
- стабилизацию температуры поверхностных конденсаторов производят изменением подачи воды;
- уровень в промежуточном сосуде регулируют изменением подачи жидкости в емкостной аппарат, уровень в котором стабилизируют отбором жидкости на ТЭЦ;
- уровень в сборниках для конденсата регулируют отбором упаренного раствора, который поступает на следующий этап технологического процесса;
- уровень в приёмном баке регулируется отбором жидкости на теплообменники.

На основные показатели эффективности влияют возмущающие воздействия: качество исходной капролактамной воды, подаваемой на упаривание, температура греющего пара, температура и расход исходной капролактамной воды.

При выходе значения этих величин из заданных пределов будет происходить уменьшение концентрации капролактама, что отразится на качестве продукции и приведёт к увеличению энергетических и материальных затрат. Для расчета параметров настройки управляющего устройства выбирается система регулирования температуры в I ступени аппарата.

Ниже приведены расчетные методы определения оптимальных настроечных коэффициентов пропорционального, пропорционально-интегрального, пропорционально-интегрально-дифференциального регуляторов.

Пример 5.1.

1. Исходные данные

1.1. Передаточная функция объекта имеет вид

$$W(p) = \frac{1,06}{39,7p^4 + 63,25p^3 + 37,8p^2 + 10,04p + 1} \cdot e^{-0,22p};$$

1.2. Передаточная функция регулятора – $R(p) = k_1$

1.3. Критерий устойчивости Найквиста представлен в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} A_o \cdot A_p = 1 \\ F_o + F_p = \pi \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{1,06}{\sqrt{(10,04\omega - 63,25\omega^3)^2 + (1 - 37,8\omega^2 + 39,7\omega^4)^2}} * k_1 = 1 \\ -\arctg\left(\frac{10,04\omega - 63,25\omega^3}{1 - 37,8\omega^2 + 39,7\omega^4}\right) - 0,22 \cdot \omega = -\pi \end{cases} \quad (*)$$

где A_o, A_p – АЧХ объекта и регулятора соответственно;

F_o, F_p – ФЧХ объекта и регулятора.

2. Расчет

2.1. Из уравнения ФЧХ (2-е) системы (*) находим рабочую частоту $\omega_p = 0,3821$

2.2. Подставим рабочую частоту в уравнение АЧХ (1-е) системы (*):

$$A_o(\omega_p) = 0,288$$

$$k_1 = A_p(\omega) = \frac{1}{A_o(\omega_p)} = \frac{1}{0,288} = 3,477$$

3. Ответ:

Передаточная функция регулятора: $R(p) = 3,477$.

Пример 5.2.

1. Исходные данные

1.1. Передаточная функция объекта имеет вид:

$$W(p) = \frac{1,06}{39,7p^4 + 63,25p^3 + 37,8p^2 + 10,04p + 1} \cdot e^{-0,22p};$$

1.2. Передаточная функция регулятора – $R(p) = k_1$

2. Расчет

2.1. На основании исходных данных строим АФХ объекта (рис. 2.21).

$$\varphi = -\arctg\left(\frac{10,04\omega - 63,25\omega^3}{1 - 37,8\omega^2 + 39,7\omega^4}\right) - 0,22 \cdot \omega$$

$$A = \frac{1,06}{\sqrt{(10,04\omega - 63,25\omega^3)^2 + (1 - 37,8\omega^2 + 39,7\omega^4)^2}}$$

ω	0	0,05	0,15	0,2	0,25	0,28	0,3	0,32	0,35	0,3821
$A(\omega)$	1,06	1,027	0,813	0,676	0,546	0,475	0,432	0,392	0,338	0,288
$\varphi(\omega)$	0	-29,2	-84,4	-109	-131	-144	-151	-159	-169	-180

2.2. Из начала координат под углом 38° к отрицательной реальной оси проводим луч ОА.

2.3. Строим касательную окружность с центром на отрицательной реальной оси таким образом, чтобы она касалась и АФХ объекта, и луча ОА.

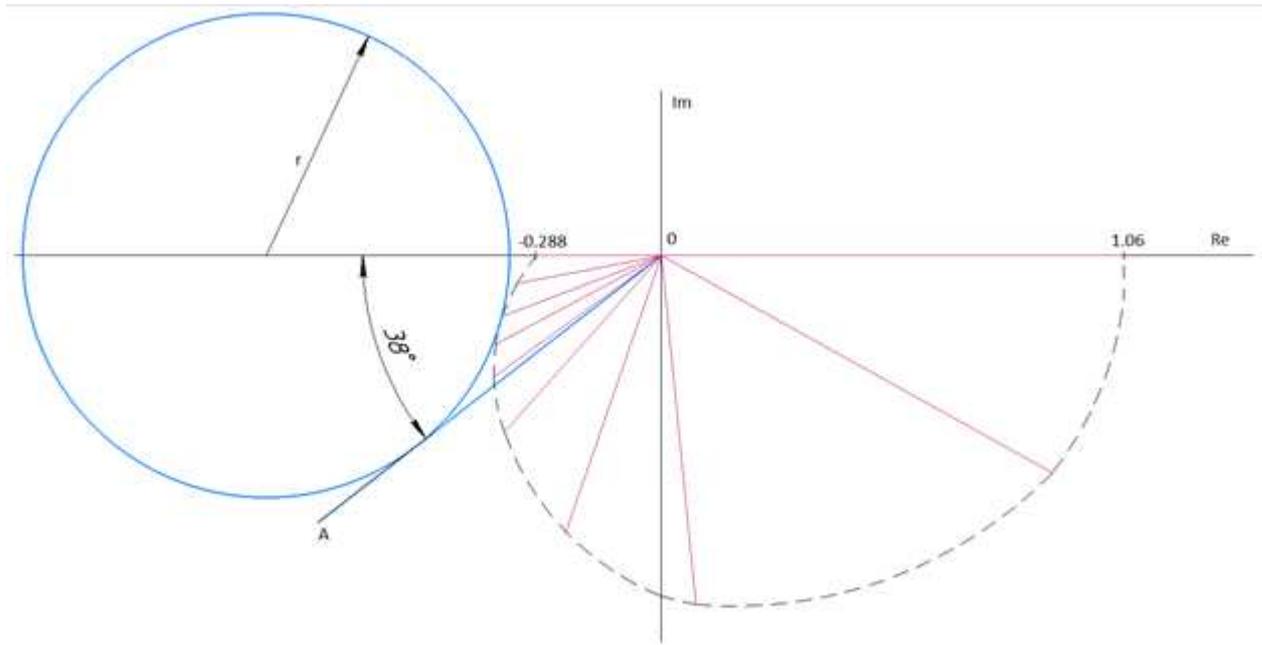


Рисунок 2.21 – АФХ объекта управления

2.4. Численное значение пропорциональной настройки находим по формуле:

$$k_1 = \frac{1}{r} = \frac{1}{0,5575} = 1,794$$

3. Ответ

Передаточная функция регулятора: $R(p) = 1,794$.

Пример 5.3.

1. Исходные данные

1.1. Передаточная функция объекта имеет вид:

$$W(p) = \frac{1,69}{45,53p^3 + 36,56p^2 + 10,47p + 1} \cdot e^{-0,29p};$$

1.2. Передаточная функция регулятора – $R(p) = k_1 + \frac{k_2}{p}$

1.3. Критерий устойчивости Найквиста представлен в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} A_0 \cdot A_p = 1 \\ F_0 + F_p = \pi \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{1,69}{\sqrt{2072,98\omega^6 + 383,23\omega^4 + 36,5\omega^2 + 1}} \cdot \frac{\sqrt{k_1^2\omega^2 + k_2^2}}{\omega} = 1 \\ -\arctg\left(\frac{10,47\omega - 45,53\omega^3}{1 - 36,56\omega^2}\right) + \arctg\left(\frac{k_1\omega}{k_2}\right) - \frac{\pi}{2} = \pi \end{cases} (**)$$

где A_0, A_p – АЧХ объекта и регулятора соответственно;

F_0, F_p – ФЧХ объекта и регулятора.

1.4. Среднеквадратический критерий качества стремится к минимуму.

2. Расчет

2.1. Задавая различные значения частоты, система уравнений (***) решается относительно k_1 и k_2 , численные значения которых заносятся в плоскость настроечных коэффициентов (рис. 2.22).

ω	0,1	0,2	0,3	0,4
k_1	-0,36	0,33	1,44	2,9
k_2	0,06	0,20	0,31	0,17

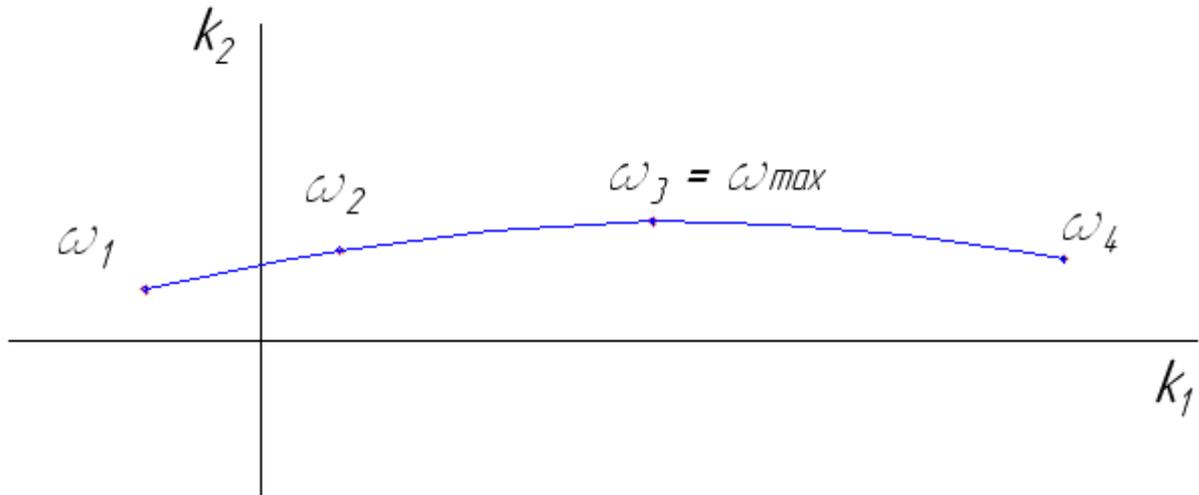


Рисунок 2.22 – Плоскость настроечных коэффициентов

2.2. Находим значение рабочей частоты:

$$\omega_p = 1,1\omega_{\max} = 1,1 \cdot 0,3 = 0,33$$

2.3. Рабочее значение частоты подставим в систему уравнений (*) и находим оптимальные значения k_1 и k_2 :

$$\begin{cases} \frac{1,69}{\sqrt{2072,98\omega^6 + 383,23\omega^4 + 36,5\omega^2 + 1}} \cdot \frac{\sqrt{k_1^2\omega^2 + k_2^2}}{\omega} = 1 \\ -\arctg\left(\frac{10,47\omega - 45,53\omega^3}{1 - 36,56\omega^2}\right) + \arctg\left(\frac{k_1\omega}{k_2}\right) - \frac{\pi}{2} = \pi \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} \frac{1,69}{\sqrt{2072,98 \cdot 0,33^6 + 383,23 \cdot 0,33^4 + 36,5 \cdot 0,33^2 + 1}} \cdot \frac{\sqrt{k_1^2 \cdot 0,33^2 + k_2^2}}{0,33} = 1 \\ -\arctg\left(\frac{10,47 \cdot 0,33 - 45,53 \cdot 0,33^3}{1 - 36,56 \cdot 0,33^2}\right) + \arctg\left(\frac{k_1 \cdot 0,33}{k_2}\right) - \frac{\pi}{2} = \pi \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_1 = 1,86 \\ k_2 = 0,3 \end{cases}$$

3. Ответ

Передаточная функция регулятора: $R(p) = 1,86 + \frac{0,3}{p}$.

Пример 5.4.

1. Исходные данные

1.1. Передаточная функция объекта имеет вид:

$$W(p) = \frac{1.69}{45.53p^3 + 36.56p^2 + 10.47p + 1} \cdot e^{-0.29p};$$

1.2. Передаточная функция регулятора – $R(p) = k_1 + \frac{k_2}{p}$

2. Расчет

2.1. В комплексной плоскости строим последовательность векторов, длина которых зависит от АЧХ объекта, а угол поворота от реальной оси – от ФЧХ объекта (рис. 2.23).

ω	0,15	0,20	0,25	0,3	0,35	0,437
$A(\omega)$	1,18	0,98	0,74	0,57	0,44	0,28
$F(\omega)$	-85^0	-108^0	-128^0	-145^0	-160^0	-180^0

2.2. К вершине каждого вектора восстанавливаем перпендикуляр.

2.3. На перпендикуляре откладываем отрезки, длины которых вычисляются по формуле:

$$AB = \frac{A(\omega)}{\omega \cdot T_u},$$

где $A(\omega)$ – АЧХ объекта,

ω – частота,

T_u – время интегрирования (выбирается произвольно).

$T_u \setminus \omega$	0,15	0,20	0,25	0,3	0,35	0,437
4	1,97	1,23	0,77	0,48	0,31	0,16
5	1,57	0,98	0,59	0,38	0,25	0,13
6	1,31	0,82	0,49	0,32	0,21	0,11
7	1,12	0,70	0,42	0,27	0,18	0,09
8	0,98	0,61	0,37	0,24	0,16	0,08

2.4. Отрезки с одинаковым временем интегрирования соединим плавными кривыми.

2.5. Из начала координат под углом 38^0 к отрицательной реальной оси проведем луч.

2.6. Строим касательные окружности таким образом, чтобы их центр лежал на отрицательной реальной оси, и они касались и луча, и каждая своей кривой.

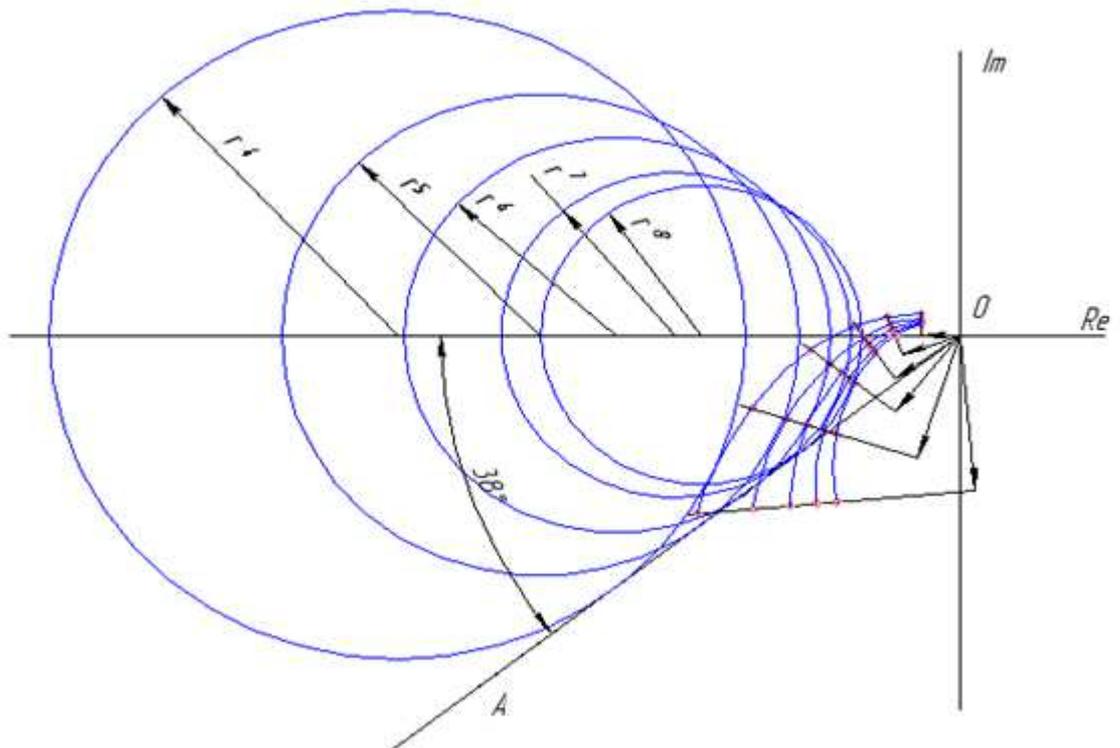


Рисунок 2.23 – Построение касательных окружностей в комплексной плоскости

2.7. Используя радиусы окружностей, находим пропорциональные коэффициенты:

$$k_1^8 = \frac{1}{r^8} = \frac{1}{1,13} = 0,88;$$

$$k_1^7 = \frac{1}{r^7} = \frac{1}{1,23} = 0,81;$$

$$k_1^6 = \frac{1}{r^6} = \frac{1}{1,5} = 0,67;$$

$$k_1^5 = \frac{1}{r^5} = \frac{1}{1,82} = 0,55;$$

$$k_1^4 = \frac{1}{r^4} = \frac{1}{2,45} = 0,41.$$

2.8. Строим область устойчивости в координатах k_1 от T_u (рис. 2.24). Все значения ниже этой плоскости отвечают значениям устойчивости, а для определения оптимальных коэффициентов проведем касательную, точка касания определяет оптимальные коэффициенты.

$$k_2^0 = \frac{1}{T_u^0} = \frac{1}{6,7} = 0,15.$$

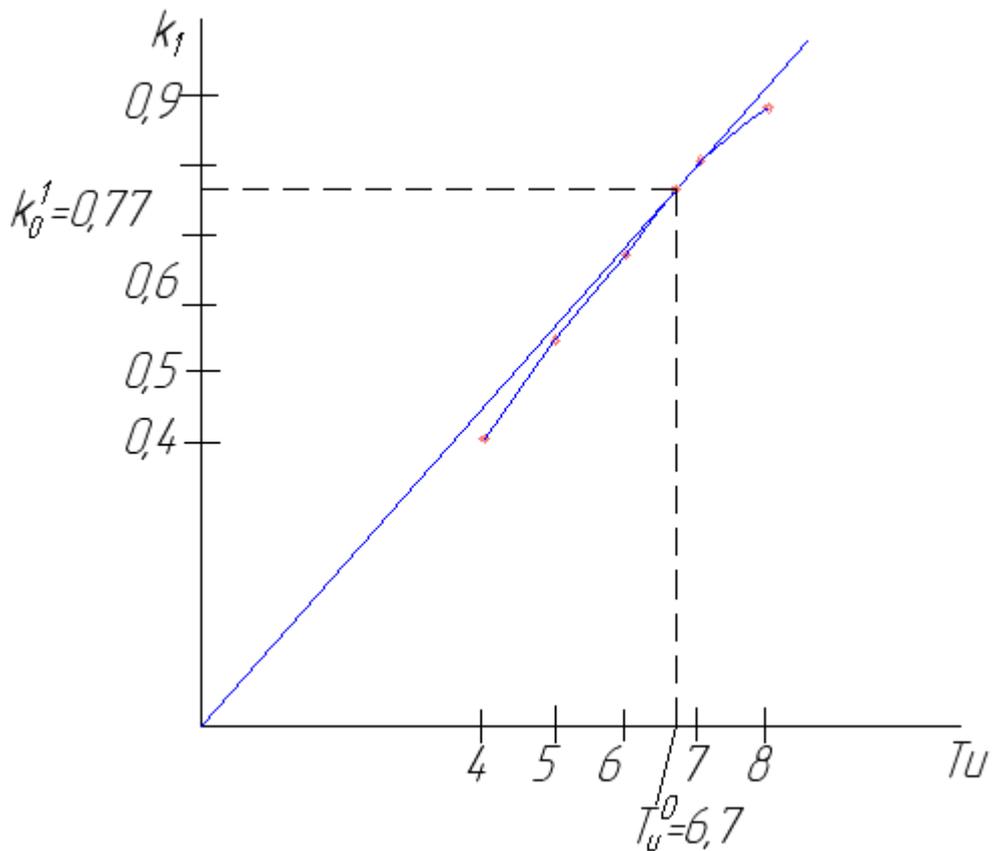


Рисунок 2.24 – Плоскость устойчивости

3. Ответ

Передаточная функция регулятора: $R(p) = 0,77 + \frac{0,15}{p}$.

Пример 5.5.

1. Исходные данные

1.1. Передаточная функция объекта имеет вид:

$$W(p) = \frac{1,69}{45,53p^3 + 36,56p^2 + 10,47p + 1} \cdot e^{-0,29p};$$

1.2. Передаточная функция регулятора – $R(p) = k_1 + \frac{k_2}{p} + k_3p$

1.3. Критерий устойчивости Найквиста представлен в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} A_o \cdot A_p = 1 \\ F_o + F_p = \pi \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{1,69}{\sqrt{2072,98\omega^6 + 383,23\omega^4 + 36,5\omega^2 + 1}} = 1 \\ -\arctg\left(\frac{10,47\omega - 45,53\omega^3}{1 - 36,56\omega^2}\right) = -\pi \end{cases} (***)$$

где A_o, A_p – АЧХ объекта и регулятора соответственно;

F_o, F_p – ФЧХ объекта и регулятора.

1.4. Среднеквадратичный критерий качества $I_4 \rightarrow \min$.

1.5. Динамический критерий качества: $m = 0,221$.

2. Расчет

2.1. Расширенная передаточная функция объекта имеет вид:

$$W(p) = W(i\omega - m\omega) = \frac{1,69 \cdot e^{-0,29(i\omega - 0,221\omega)}}{45,53(i\omega - 0,221\omega)^3 + 36,56(i\omega - 0,221\omega)^2 + 10,47(i\omega - 0,221) + 1}$$

2.2. АЧХ и ФЧХ расширенной передаточной функции:

$$A_0^p(\omega) = \frac{1,69 \cdot e^{0,064\omega}}{\sqrt{2390\omega^6 - 808,3\omega^4 - 118,5\omega^3 + 45,38\omega^2 - 4,62\omega + 1}}$$

$$F_o^p = -\arctg\left(\frac{-38,84\omega^3 - 16,16\omega^2 + 10,47\omega}{29,69\omega^3 - 34,77\omega^2 - 2,31\omega + 1}\right) - 0,29\omega$$

2.3. Используя систему уравнений Найквиста, найдем параметры регулятора:

$$\begin{cases} A_p = \frac{1}{A_0^{pac}} \\ F_p = \pi - F_o^{pac} \end{cases}$$

2.4. Проекцией вектора A_p на мнимую и реальную полуоси определим мнимую параметрическую функцию I и реальную параметрическую функцию R (рис. 2.25):

$$I = A_p \sin F_p$$

$$R = A_p \cos F_p$$

ω	0	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9
A_o^p	1,69	1,77	0,81	0,28	0,17	0,11	0,05
F_o^p	0^0	-62^0	-145^0	-224^0	-240^0	-253^0	-272^0
A_p	0,56	0,57	1,23	3,57	5,88	9,10	20
F_p	180^0	242^0	325^0	404^0	420^0	433^0	452^0
I	0	0,49	0,87	2,50	5,09	8,56	18,36
R	0,59	0,26	0,87	2,61	2,86	2,55	0,51

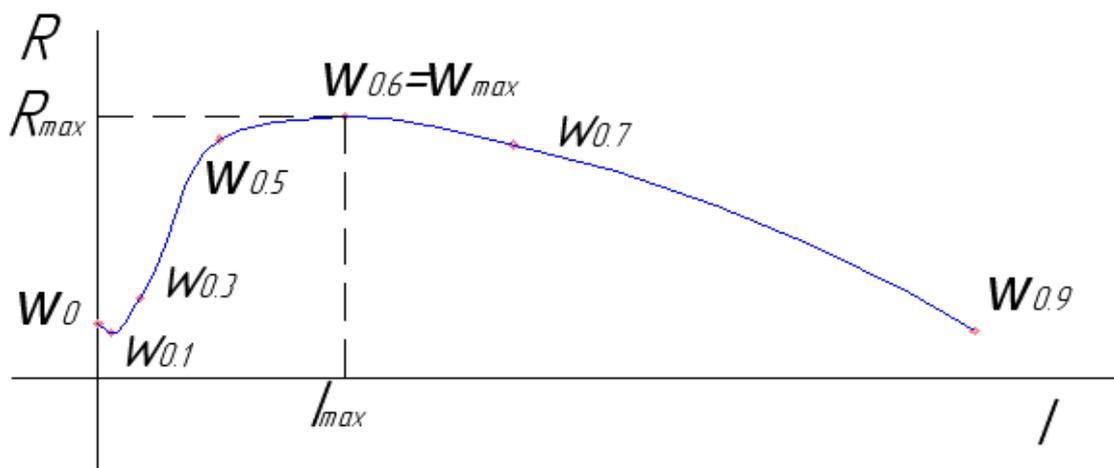


Рисунок 2.25 – Плоскость параметрических функций

2.5. Находим максимальные значения:

$$\omega_{\max} = 0,6; R_m = 2,86; I_m = 5,09.$$

Подставляем их в систему уравнений:

$$\begin{cases} k_1 - \frac{k_2 m}{\omega_m (1 + m^2)} - k_3 m \omega_m = R_m \\ k_3 \omega_m - \frac{k_2}{\omega_m (1 + m^2)} = I_m \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_1 - \frac{k_2 \cdot 0,221}{0,6(1 + 0,221^2)} - k_3 \cdot 0,221 \cdot 0,6 = 2,86 \\ k_3 \cdot 0,6 - \frac{k_2}{0,6(1 + 0,221^2)} = 5,09 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} k_1 - 0,35k_2 - 0,13k_3 = 2,86 \\ 0,6k_3 - 1,59k_2 = 5,09 \end{cases} \quad (***)$$

Из 2-го уравнения системы (***) выразим $k_3 = 8,48 + 2,65k_2$ и подставим в 1-е уравнение системы (***), найдем $k_2 = \frac{k_1 - 3,96}{0,695}$.

2.6. Так как система (***) имеет 2 уравнения, но 3 неизвестных, то решается она следующим образом: задаемся различными значениями k_1 , система решается относительно k_2 и k_3 . Результаты решения должны удовлетворять условию:

$$0,25 \leq \frac{k_2 k_3}{k_1^2} \leq 0,75.$$

Пусть $k_1 = 4,3$, тогда $k_2 = \frac{4,3 - 3,96}{0,695} = 0,49$, а $k_3 = 8,48 + 2,65 \cdot 0,49 = 9,76$

$$\frac{k_2 k_3}{k_1^2} = \frac{0,49 \cdot 9,76}{4,3^2} = 0,26.$$

Найденное значение удовлетворяет данному условию: $0,25 < 0,26 < 0,75$.

3. Ответ

Передаточная функция регулятора: $R(p) = 4,3 + \frac{0,49}{p} + 9,76p$.

Пример 5.6.

1. Исходные данные

1.1. Передаточная функция объекта имеет вид:

$$W(p) = \frac{1,69}{45,53p^3 + 36,56p^2 + 10,47p + 1} \cdot e^{-0,29p};$$

1.2. Передаточная функция регулятора – $R(p) = k_1 + \frac{k_2}{p} + k_3p$.

2. Расчет

2.1. В комплексной плоскости строим последовательность векторов, длина которых зависит от АЧХ объекта, а угол поворота от реальной оси – от ФЧХ объекта (рис.2.26).

ω	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
$A(\omega)$	1,43	1,18	0,98	0,74	0,57	0,44
$F(\omega)$	-58^0	-85^0	-108^0	-128^0	-145^0	-160^0

2.2. К вершине каждого вектора восстанавливаем перпендикуляр.

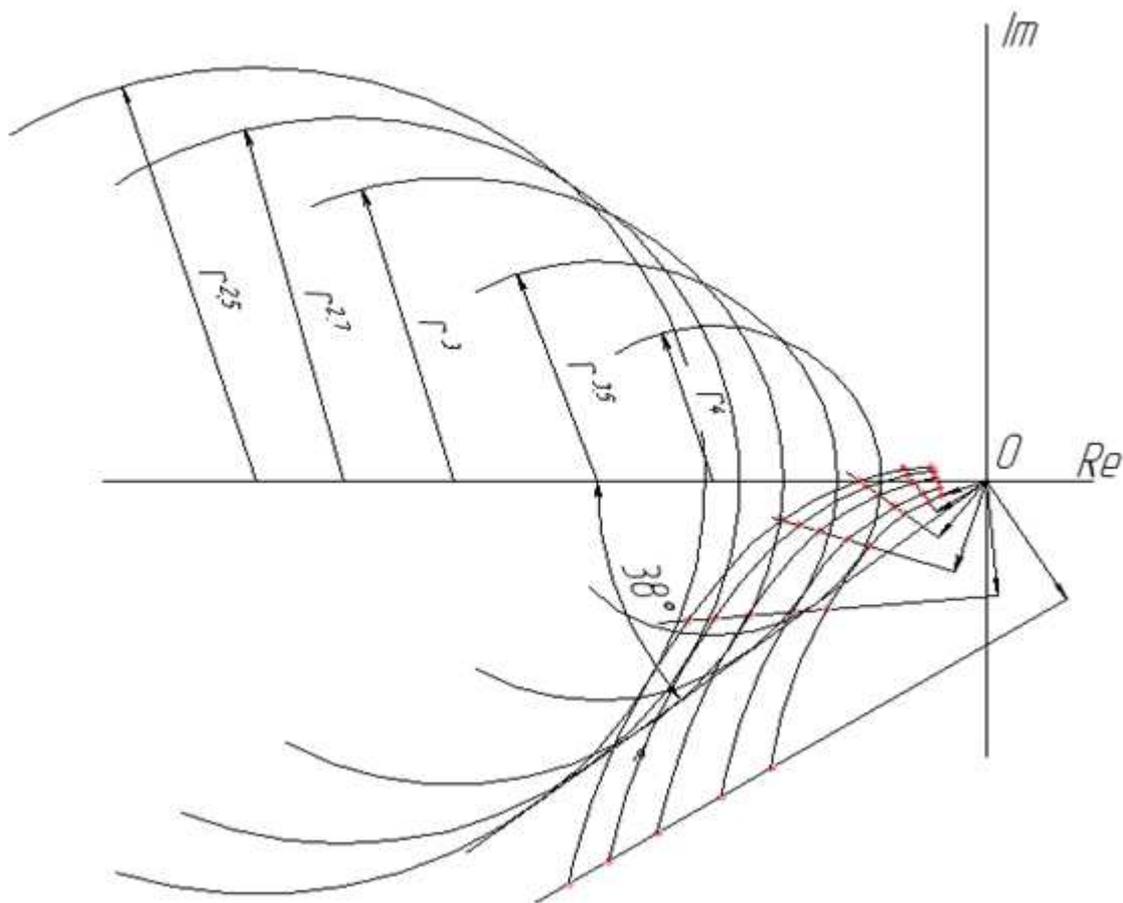


Рисунок 2.26 – Построение касательных окружностей в комплексной плоскости

2.3. На перпендикуляре откладываем отрезки, длины которых вычисляются по формуле:

$$AB = \frac{A_0}{\omega_0 T_u} - k_n \omega A_0 T_u,$$

где $A(\omega)$ – АЧХ объекта,

ω – частота,

T_u – время интегрирования (выбирается произвольно),

k_n – коэффициент приближения (равен 0,5).

$T_u \setminus \omega$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
2,5	5,54	2,93	1,72	0,95	0,55	0,31
2,7	5,1	2,67	1,55	0,85	0,47	0,26
3	4,55	2,35	1,34	0,71	0,37	0,19
3,5	3,84	1,94	1,06	0,52	0,24	0,09
4	3,29	1,62	0,84	0,40	0,14	0,002

2.4. Отрезки с одинаковым временем интегрирования соединим плавными кривыми.

2.5. Из начала координат под углом 38° к отрицательной реальной оси проведем луч.

2.6. Строим касательные окружности таким образом, чтобы их центр лежал на отрицательной реальной оси, и они касались и луча, и каждая своей кривой (рис. 2.26).

2.7. Используя радиусы окружностей, находим пропорциональные коэффициенты:

$$k_1^{2,5} = \frac{1}{r^{2,5}} = \frac{1}{4,24} = 0,24 ;$$

$$k_1^{2,7} = \frac{1}{r^{2,7}} = \frac{1}{3,73} = 0,28 ;$$

$$k_1^3 = \frac{1}{r^3} = \frac{1}{2,71} = 0,37 ;$$

$$k_1^{3,5} = \frac{1}{r^{3,5}} = \frac{1}{2} = 0,5 ;$$

$$k_1^4 = \frac{1}{r^4} = \frac{1}{1,59} = 0,63 .$$

2.8. Строим область устойчивости в координатах k_1 от T_u . Все значения ниже этой плоскости отвечают значениям устойчивости, а для определения оптимальных коэффициентов проведем касательную, точка касания определяет оптимальные коэффициенты (рис. 2.27):

$$k_2^0 = \frac{1}{T_u^0} = \frac{1}{3,8} = 0,263 ;$$

$$k_3^0 = T_u^0 k_n = 3,8 \cdot 0,5 = 1,9 .$$

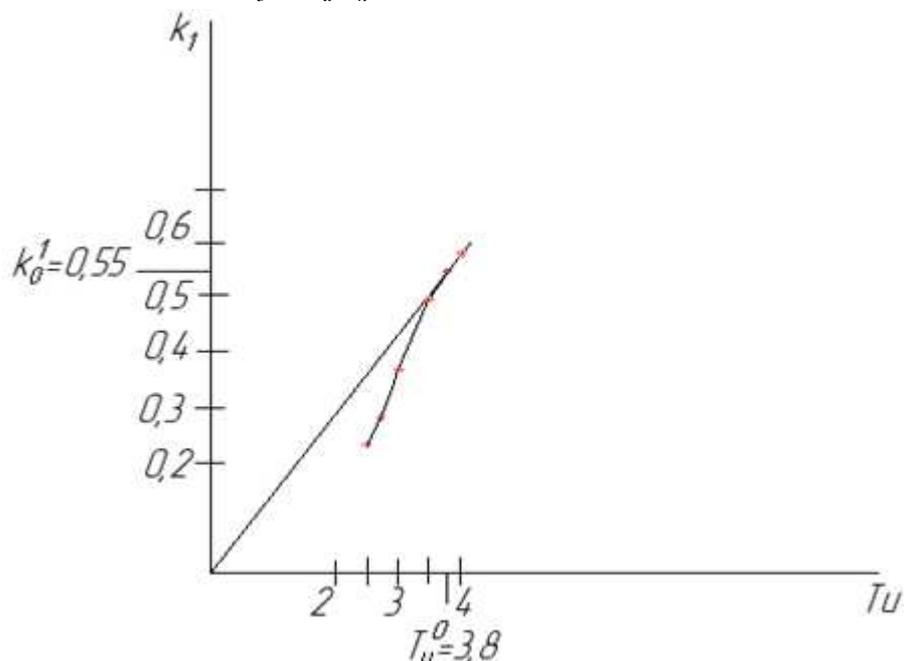


Рисунок 2.27 – Плоскость устойчивости

3. Ответ

Передаточная функция регулятора: $R(p) = 0,55 + \frac{0,26}{p} + 1,9p .$

Следующий пример можно отнести к числу экспериментальных, в которых численные значения параметров настройки управляющего устройства выводятся на основании эмпирических зависимостей.

Пример 5.7.

Следующим этапом исследования системы управления объектом является *параметрическая оптимизация* – определение настроечных параметров выбранного регулятора. Для этого должны быть известны:

- передаточная функция объекта управления $W_o(p)$;
- возмущение, действующее на выходе объекта, $X_B(p)$.

Результатом решения задачи синтеза алгоритмической структуры должна быть передаточная функция регулятора $W_p(p)$.

В простейшем случае, когда возмущающее воздействие на объект отсутствует ($X(p) = 0$), управление можно осуществлять по разомкнутой схеме (рис. 2.28, а) при передаточной функции регулятора:

$$W_p(p) = \frac{1}{W_o(p)}, \quad (1)$$

так как передаточная функция АСУ:

$$W(p) = W_p(p)W_o(p) = 1. \quad (2)$$

Это означает мгновенное воспроизведение выходной величиной задающего воздействия:

$$X(p) = X_3(p). \quad (3)$$

Такой переходный процесс называют идеальным, а алгоритмическую структуру его обеспечивающую – идеальной.

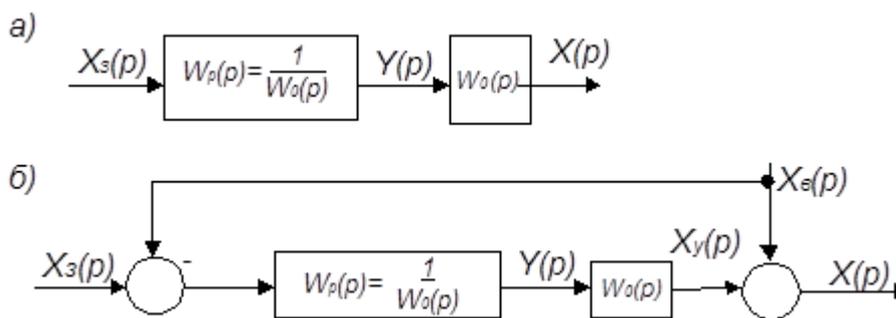


Рисунок 2.28 – Алгоритмические схемы идеальной АСУ

Если на объект действует возмущение $X_B(p)$, которое поддается измерению, то теоретически можно синтезировать идеальную разомкнутую АСУ (рис. 2.28, б) с полной компенсацией возмущения, подав его с обратным знаком на вход регулятора с передаточной функцией (1). Действительно, в этом случае при $X_3(p) = 0$ регулируемая величина:

$$X(p) = X_B(p) - W_p(p)W_o(p)X_B(p) = X_B(p) - \frac{1}{W_o(p)}W_o(p)X_B(p) = 0. \quad (4)$$

Поэтому полезная составляющая $X_Y(p)$ на выходе объекта будет полностью уравновешивать возмущение $X_B(p)$. Однако возмущение $X_B(p)$, как правило,

измерить не удастся, и АСУ приходится строить по замкнутой схеме (с обратной связью). Для отыскания структуры идеальной замкнутой системы можно использовать идею косвенного измерения возмущения $X_B(p)$ с помощью модели объекта $W_{OM}(p)$ (рис. 2.29, а). Очевидно, что при:

$$W_{OM}(p) = W_O(p) \quad (5)$$

вычисляемый на выходе модели объекта сигнал:

$$X_{BM}(p) = X(p) - X_{YM}(p) \quad (6)$$

является косвенно измеренным возмущением $X_B(p)$ и его можно, как и в предыдущей схеме (рис. 2.28, б), ввести в регулятор с передаточной функцией (1) и, таким образом, снова получить идеальную разомкнутую структуру (рис. 2.28, а). В ней в соответствии с правилами структурных преобразований сигнал $W_{YM}(p)$ можно перенести на вход регулятора и приложить к сумматору 2 (рис. 2.29, б). Тогда регулятор с передаточной функцией $1/W_O(p)$ окажется охваченным внутренней положительной обратной связью, а сигнал после сумматора 1 будет соответствовать сигналу ошибки:

$$\varepsilon(p) = X_3(p) - X(p). \quad (7)$$

Последнее означает, что АСУ стала замкнутой и работает по принципу отрицательной обратной связи с регулятором (см. рис. 2.28, б), имеющим передаточную функцию:

$$W_P(p) = \frac{1/W_O(p)}{1 - W_{OM}(p)/W_O(p)}. \quad (8)$$

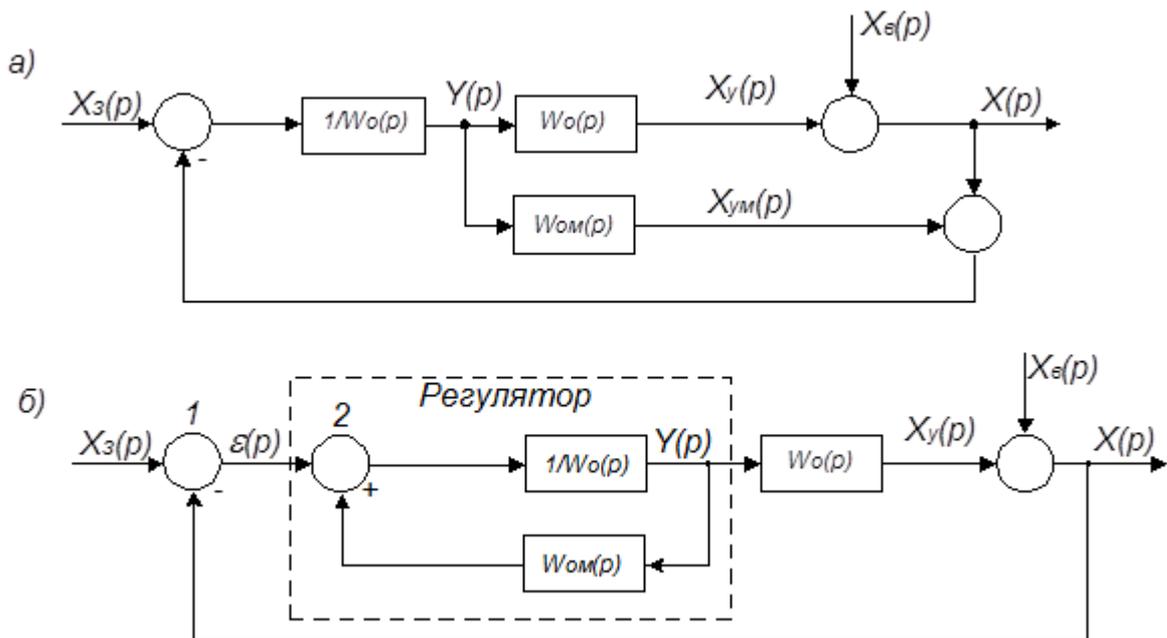


Рисунок 2.29 – Алгоритмические схемы идеальной замкнутой АСУ

При точном совпадении объекта управления и его модели ($W_O(p) = W_{OM}(p)$) регулятор будет работать как пропорциональный с коэффициентом $k_n = \infty$, что соответствует нулевым ошибкам по каналам задания и возмущения.

Техническая реализация безинерционного (идеального) регулятора невозможна. Однако такая структура является идеалом, к которому необходимо стремиться при синтезировании высококачественных систем управления. В соответствии с идеальной структурой (рис. 2.29, б) можно сформулировать фундаментальный принцип структурно-параметрической оптимизации АСУ с обратной связью: *регулятор должен содержать динамическое звено с передаточной функцией, равной или близкой обратной передаточной функции объекта управления.*

На практике наиболее часто приходится решать задачу синтеза АСУ с инерционными объектами управления с запаздыванием, которые можно описать следующей обобщенной передаточной функцией:

$$W_o(p) = W_o'(p) \exp(-p\tau_o), \quad (9)$$

где $W_o'(p)$ – дробно-рациональная функция, характеризующая инерционную часть объекта управления; τ_o – чистое запаздывание объекта управления.

Определим структуру и передаточную функцию *идеального регулятора* для инерционных объектов управления с запаздыванием.

Подставляя значение передаточной функции $W_o(p)$ из выражения (9) в формулу (8) получаем передаточную функцию идеального регулятора для инерционных объектов управления с запаздыванием:

$$W_p(p) = \exp(p\tau_o) \cdot \frac{1}{1 - \frac{\exp(p\tau_o)}{W_o'(p)} \cdot W_{OM}(p)} \cdot \frac{1}{W_o'(p)}. \quad (10)$$

Здесь присутствует сомножитель $\exp(p\tau_o)$, который соответствует *идеальному упредителю* и точная реализация которого технически невозможна. Поэтому с целью упрощения искомой структуры регулятора и облегчения его технической реализации полагают, что для объектов управления с чистым запаздыванием τ_o , идеальная АСУ воспроизводит задающее воздействие с запаздыванием τ_o , т. е.:

$$\frac{X(p)}{X_3(p)} = \exp(-p\tau_o). \quad (11)$$

С другой стороны, применяя правила структурного преобразования к алгоритмической схеме АСУ можно записать отношение:

$$\frac{X(p)}{X_3(p)} = \frac{W_p(p)W_o(p)}{1 + W_p(p)W_o(p)}. \quad (12)$$

Приравняв правые части выражений (11) и (12) и учитывая в них значение передаточной функции $W_o(p)$ из выражения (9), записываем уравнение:

$$\exp(-p\tau_o) = \frac{W_p(p)W_o'(p)\exp(-p\tau_o)}{1 + W_p(p)W_o'(p)\exp(-p\tau_o)}. \quad (13)$$

Решая это уравнение, получаем искомую передаточную функцию идеального регулятора (*регулятора Ресвика*):

$$W_P(p) = \frac{1}{1 - \frac{1}{W_o'(p)} \cdot W_o'(p) \exp(-p\tau_o)} \cdot \frac{1}{W_o'(p)}. \quad (14)$$

Этой передаточной функции соответствует алгоритмическая схема АСУ (рис. 2.30), которая уже не содержит упреждителя.

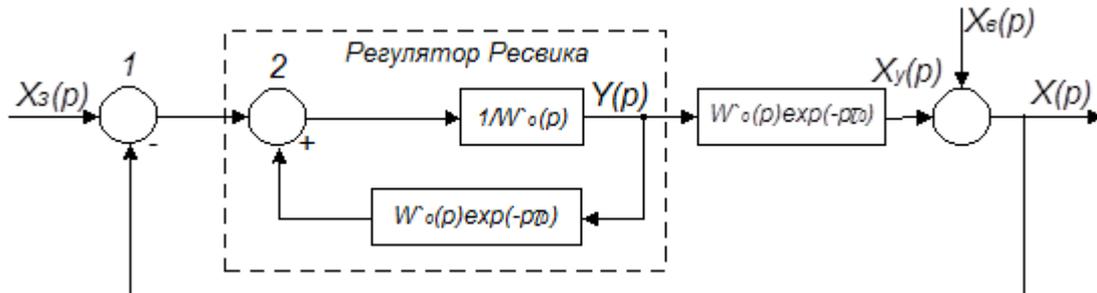


Рисунок 2.30 – Алгоритмическая схема идеальной АСУ с объектом с запаздыванием

Передаточная функция по каналу возмущения в такой АСУ согласно (11) имеет вид:

$$\frac{X(p)}{X_B(p)} = \frac{1}{1 + W_P(p)W_o'(p)\exp(-p\tau_o)} = \frac{1}{1 + \frac{W_o'(p)\exp(-p\tau_o)}{[1 - \exp(-p\tau_o)]W_o'(p)}} = 1 - \exp(-p\tau_o). \quad (15)$$

Это означает, что действие возмущения $X_B(p)$ мгновенно компенсируется системой через время τ_o .

Ранее было показано, что инерционные статические объекты управления с s -образной переходной характеристикой (рис. 2.13) можно представить в виде моделей первого или второго порядка с запаздыванием.

Представим, первоначально, объект управления моделью первого порядка. Тогда, полагая запаздывание τ'_o модели объекта равным чистому запаздыванию τ_o реального объекта и подставляя в выражение (14) значение передаточной функции модели объекта, определяем передаточную функцию регулятора:

$$W_P(p) = \frac{T'_o p + 1}{[1 - \exp(-p\tau'_o)]k_o}. \quad (16)$$

При относительно медленно изменяющихся воздействиях можно принять $\exp(-p\tau'_o) \approx 1 - p\tau'_o$.

Тогда, учитывая это равенство в выражении (16), получаем искомую передаточную функцию регулятора:

$$W_P(p) = \frac{T'_o p + 1}{p\tau'_o k_o} = \frac{T'_o}{k_o\tau'_o} + \frac{1}{k_o\tau'_o} \cdot \frac{1}{p} = k_{II} + k_{II} \frac{1}{p},$$

где $k_{II} = \frac{T'_o}{k_o\tau'_o}$, $k_{II} = \frac{1}{k_o\tau'_o}$.

Такую передаточную функцию имеет пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор с настроечными параметрами k_{II} и k_{II} .

Представив объект управления с более точной моделью второго порядка и проведя аналогичные рассуждения, получаем искомую передаточную функцию регулятора:

$$W_p(p) = \frac{2T'_o}{k_o \tau'_o} + \frac{1}{k_o \tau'_o} \cdot \frac{1}{p} + \frac{(T'_o)^2}{k_o \tau'_o} p = k_{II} + k_{II} \frac{1}{p} + k_D p,$$

где $k_{II} = \frac{2T'_o}{k_o \tau'_o}$, $k_{II} = \frac{1}{k_o \tau'_o}$, $k_D = \frac{(T'_o)^2}{k_o \tau'_o}$.

Такую передаточную функцию имеет пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор с настроечными параметрами k_{II} , k_{II} , k_D .

На основании полученных общих соотношений между параметрами объекта управления и регулятора можно сформулировать *рекомендации по выбору типа регулятора и его настроечных параметров*:

- для объектов с запаздыванием, инерционная часть которых действительно близка звену первого порядка (а не просто аппроксимирована таким звеном!), целесообразно применять ПИ-регулятор;
- для объектов с запаздыванием, инерционная часть которых имеет порядок $n \geq 2$, наилучшим регулятором является ПИД-регулятор.

Эмпирические формулы в табл. 5 обобщают результаты экспериментальных исследований по определению настроечных параметров типовых регуляторов для объектов с запаздыванием (при $\tau_o / T_o = 0 \dots 1$). Параметры определены путем моделирования систем при ступенчатом изменении задающего x_z воздействия. Обеспечиваемым показателем качества АСУ является перерегулирование σ (0 или 20 %) на выходе объекта регулирования.

Таблица 5

Тип регулятора	Настроечные параметры					
	k_{II}		k_{II}		k_D	
	$\sigma = 0$	$\sigma = 20 \%$	$\sigma = 0$	$\sigma = 20 \%$	$\sigma = 0$	$\sigma = 20 \%$
П	$\frac{0,3 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,7 T_o}{k_o \tau_o}$	0	0	0	0
ПИ	$\frac{0,35 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,6 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,29}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,6}{k_o \tau_o}$	0	0
ПИД	$\frac{0,6 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,95 T_o}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,6}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,7}{k_o \tau_o}$	$\frac{0,3 T_o}{k_o}$	$\frac{0,45 T_o}{k_o}$

Если необходимо обеспечить колебательный характер переходного процесса в АСУ, при котором амплитуда каждого последующего колебания должна быть в 4 раза меньше амплитуды предыдущего колебания, т. е. *степень затухания*:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = \frac{A_1 - A_1 / 4}{A_1} = 0,75,$$

что соответствует нижней границе, при которой качество управления еще признается удовлетворительным, то следует воспользоваться рекомендациями по выбору настроечных параметров регуляторов, приведенных в табл. 6 [6].

Таблица 6

Тип регулятора	Настроечные параметры		
	k_{PI}	k_{II}	k_D
П	$\frac{\tau_o + T_o}{k_o \tau_o}$	0	0
ПИ	$\frac{\tau_o + T_o}{1,1 k_o \tau_o}$	$\frac{\tau_o + T_o}{3,66 k_o \tau_o^2}$	0
ПИД	$\frac{\tau_o + T_o}{0,8 k_o \tau_o}$	$\frac{\tau_o + T_o}{1,6 k_o \tau_o^2}$	$\frac{\tau_o + T_o}{1,6 k_o}$

Пример 5.8.

Еще одним способом математического исследования свойств технологических процессов и их основных узлов является *имитационное моделирование* с помощью программных продуктов. Оно позволяет определить, с достаточной долей приближения, основные параметры регулятора без вмешательства в работу оборудования. К такому моделированию можно отнести метод Циглера-Николса, реализованный с помощью программного средства VisSim (программным продуктом может быть SimInTech, Matlab или другие, имитирующие структуру системы управления).

В программном средстве VisSim реализуем структурную схему замкнутой системы регулирования с обратной связью с заданными параметрами входящих в нее элементов (рис. 2.31):

- 1 – блок формирования входного воздействия (единичный скачек);
- 2 – сумматор (для формирования отрицательного сигнала необходимо навести курсор на изменяемый знак и одновременно нажать Ctrl и правую кнопку мышки);
- 3 – передаточная функция пропорционального управляющего устройства (k_1);
- 4, 5, 6 – передаточная функция объекта управления, численные значения коэффициентов которой определяются на первом этапе математического моделирования в рамках выпускной работы:

$$W_o = \frac{k}{2Ts^2 + Ts + 1} \cdot e^{-s\tau}$$

- 7 – блок реализации переходного процесса системы управления.

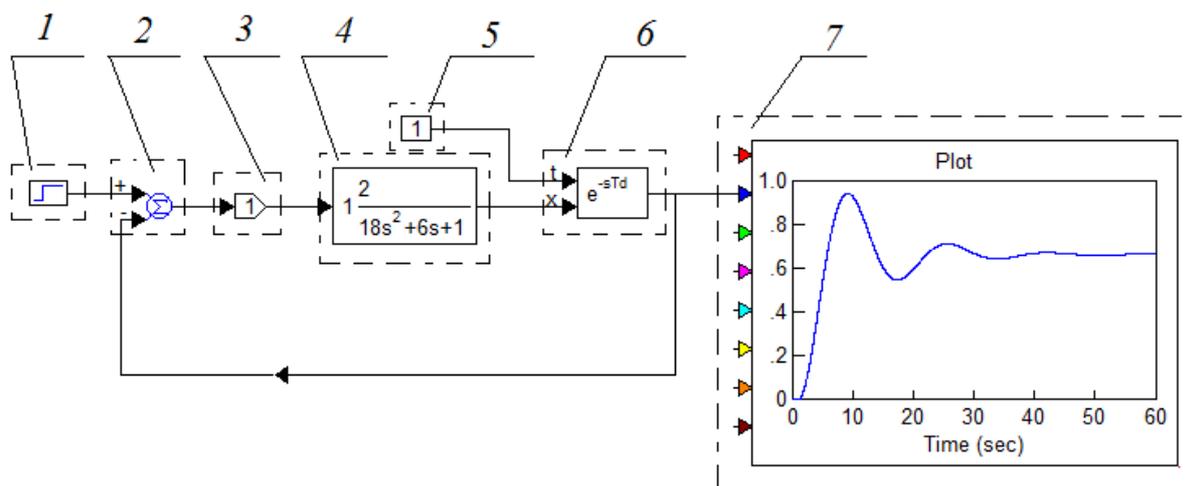


Рисунок 2.31 – Структурная схема замкнутой линейной системы, реализованная в программном средстве VisSim

Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок 3), определить при каком численном значении k_1 система находится на границе устойчивости. Признаком границы устойчивости является наличие колебаний переходного процесса с одинаковой амплитудой (рис. 2.32).

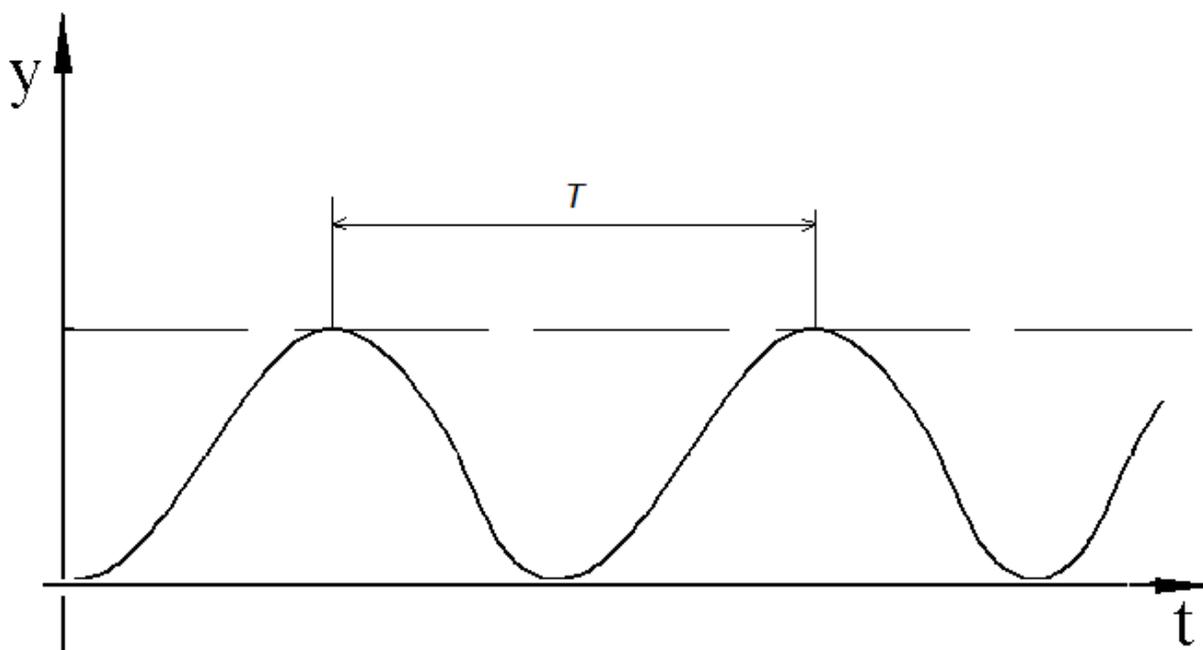


Рисунок 2.32 – Автоколебательный переходный процесс

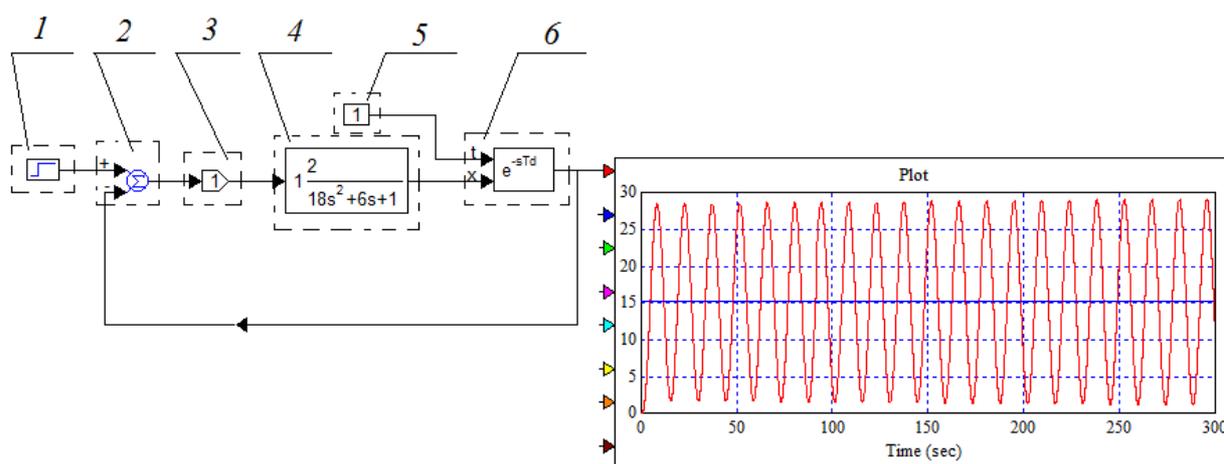


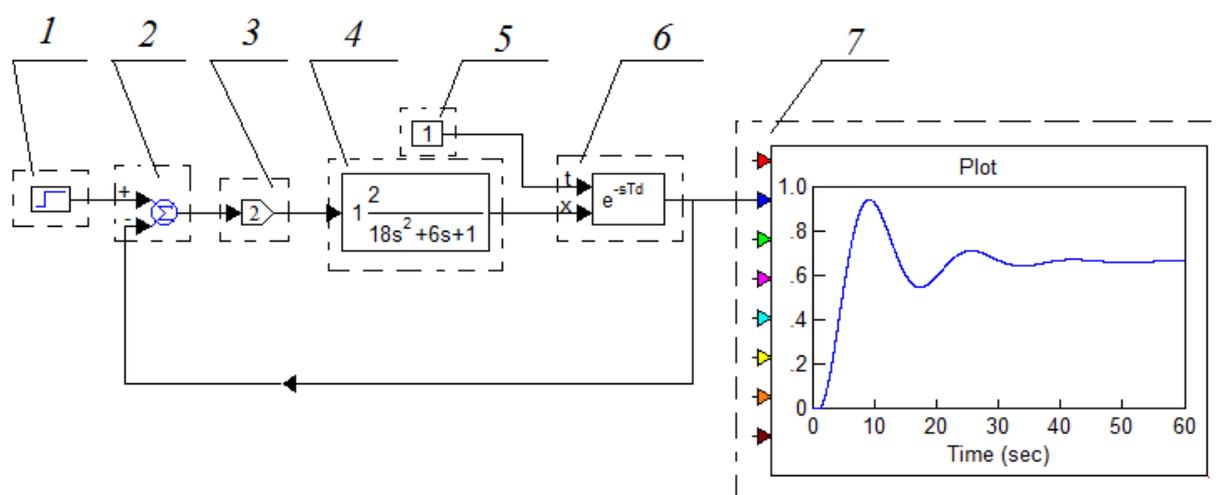
Рисунок 2.33 – Автоколебательный переходный процесс системы

При возникновении данного режима работы фиксируются значения критического коэффициента k_1 и периода критических колебаний T . По значениям k_1 и T рассчитываются параметры настройки пропорционально (П-регулятора), пропорционально-интегрального (ПИ-регулятора), пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД-регулятора) регулятора (табл. 7).

Таблица 7

П-регулятор	$k_1^o = 0,55 k_1$
ПИ-регулятор	$k_1^o = 0,45 k_1; k_2^o = 1,2/T$
ПИД-регулятор	$k_1^o = 0,6 k_1; k_2^o = 2/T; k_3^o = T/8$

Численные значения рассчитанных коэффициентов регуляторов подставляются в структурную схему системы регулирования с различными типами регуляторов: П, ПИ, ПИД (рис. 2.34).



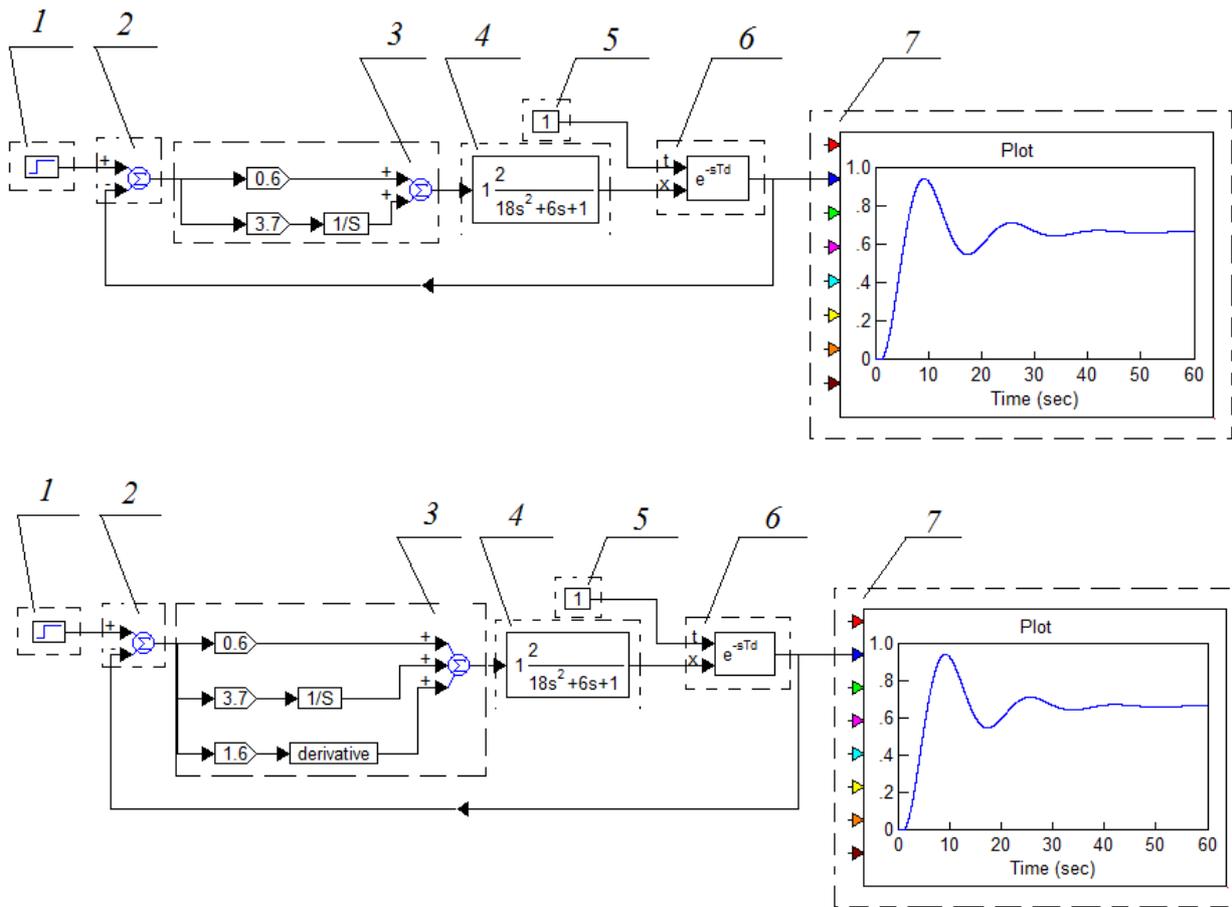


Рисунок 2.34 – Замкнутая система управления с П-, ПИ-, ПИД-регулятором

Каждый из полученных переходных процессов для регуляторов различных типов исследуется на качество с целью выбора наиболее оптимального из регуляторов для исследуемого объекта.

Пример 6.1.

Оценка качества переходного процесса линейной системы автоматического управления (рис. 2.35).

Статический критерий качества (большинство изображается на переходном процессе) должен удовлетворять условию:

$$\delta \approx 5\%y_{\infty}; y_{\infty} = 15; \delta \approx 0,75.$$

1. Перерегулирование $\sigma = \frac{y_{\max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} \cdot 100\%$

$$\sigma = \frac{23,4 - 15}{15} \cdot 100\% = 36\%$$

2. Время регулирования – время, за которое переходный процесс достигает заданной статической погрешности:

$$T_p = 51,4 \text{ с.}$$

3. Заданная степень затухания: $\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1}$

$$\psi = \frac{8,4 - 3}{8,4} = 0,64$$

4. Колебательность: $N = 7$.

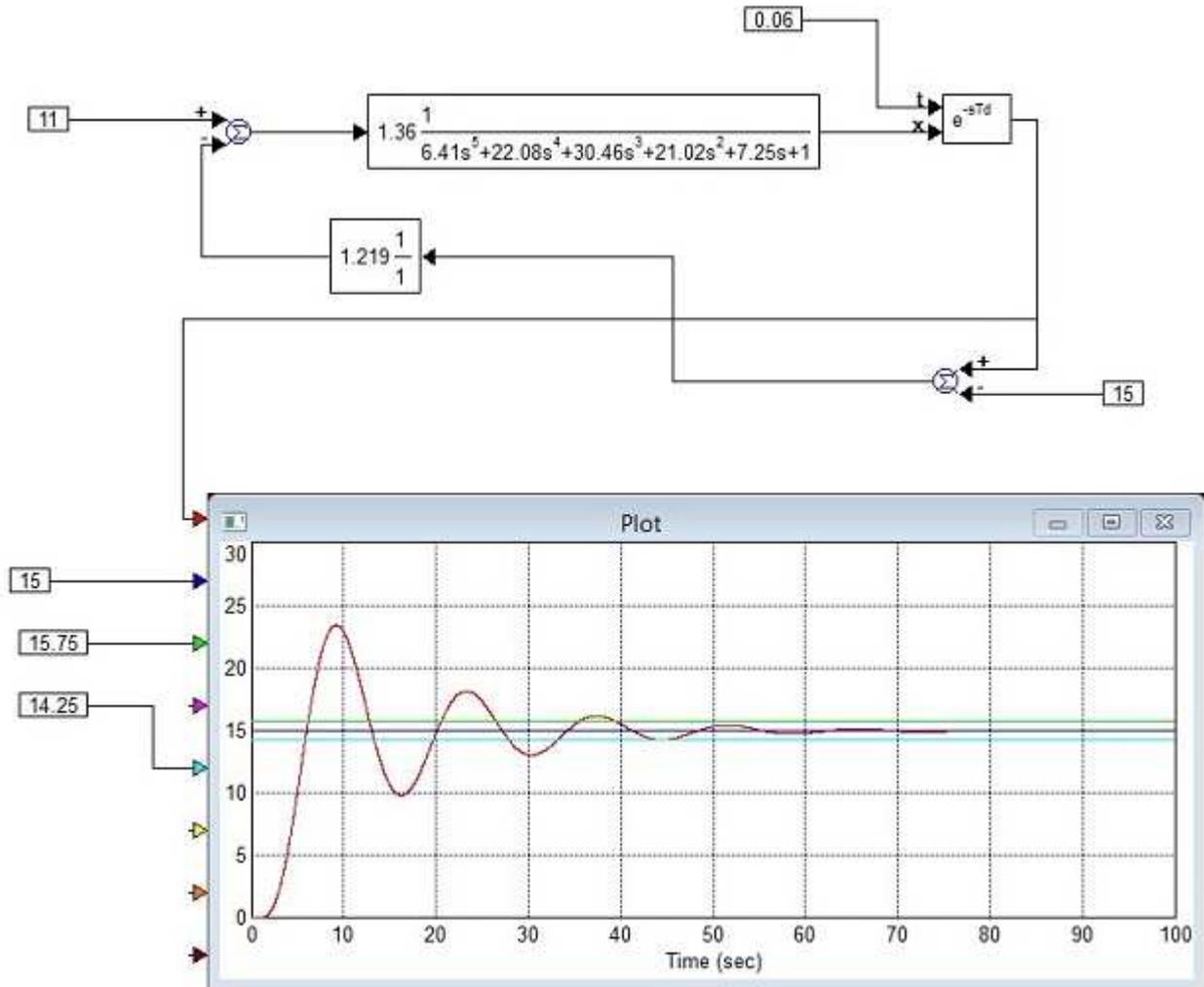


Рисунок 2.35 – Программная реализация системы регулирования для расчета показателей качества управления

Пример 6.2.

Статические критерии качества управления (большинство изображается на переходном процессе) (рис. 2.36).

Статическая погрешность $\delta = 5,3$ – величина минимального выброса, которой можно пренебречь при дальнейших расчетах;

Динамическая погрешность – величина максимального выброса в переходном процессе. Должна удовлетворять условию:

$$\delta \approx 1/3 y_{\max}; y_{\max} = 22;$$

Перерегулирование $\sigma = \frac{y_{\max} - y_z}{y_{\max}} \cdot 100\%$:

$$\sigma = \frac{22 - 15,2}{22} \cdot 100\% = 31\%$$

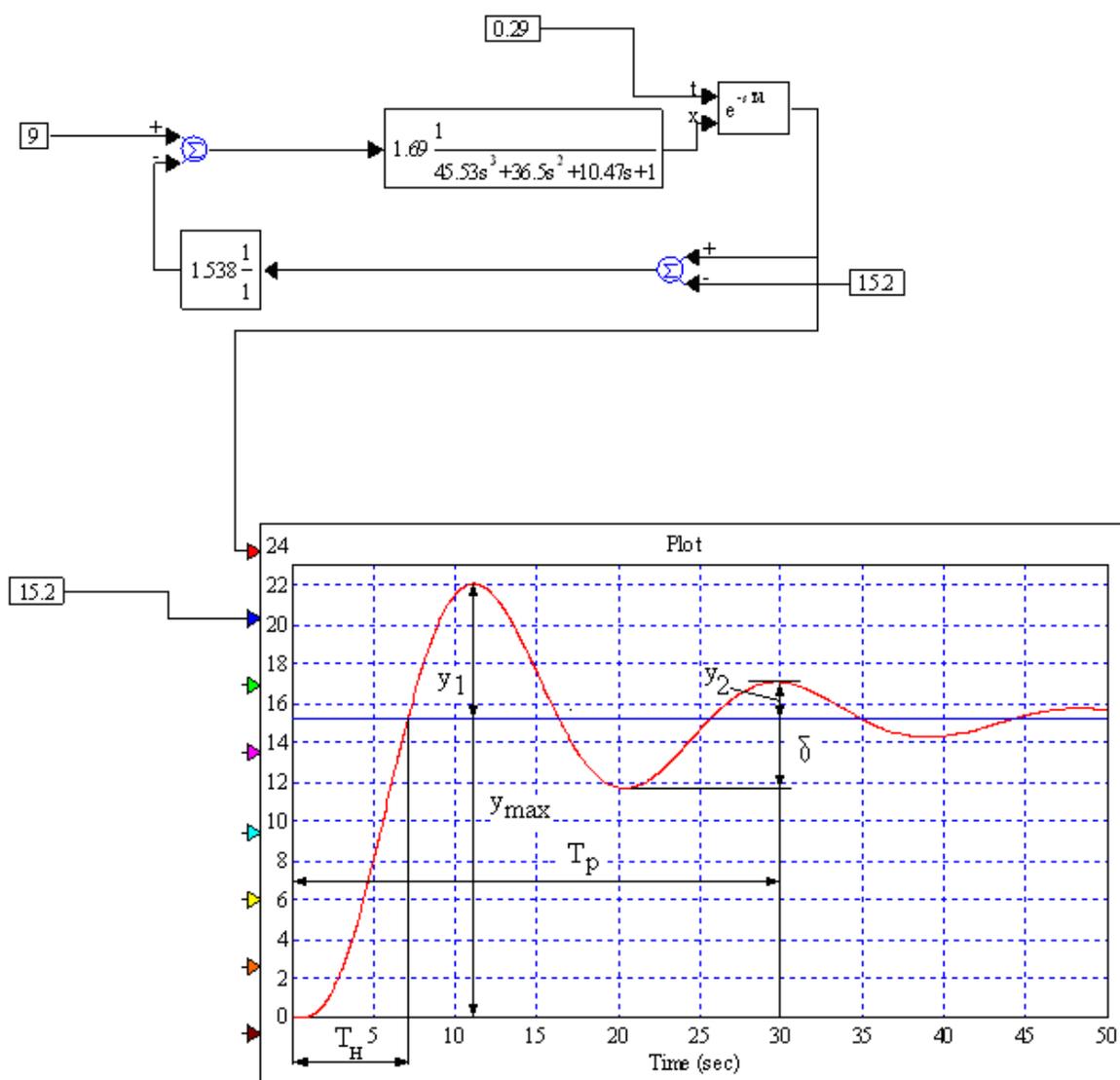


Рисунок 2.36 – Программная реализация системы регулирования для расчета показателей качества управления

Динамические критерии качества управления.

Время регулирования – время, за которое переходный процесс достигает заданной статической погрешности:

$$T_p = 30 \text{ с.}$$

Время нарастания – время, за которое переходный процесс впервые достигает заданного значения:

$$T_H = 2,1 \text{ с.}$$

Скорость переходного процесса – величина угла, который определяется выражением: $\alpha = \text{arctg}\left(\frac{y_3}{T_H}\right)$:

$$\alpha = \text{arctg}\left(\frac{15,2}{2,1}\right) = 82^\circ.$$

Заданная степень затухания: $\psi = \frac{y_1 - y_2}{y_1} \cdot 100\%$:

$$\psi = \frac{6,8 - 2}{6,8} \cdot 100\% = 71\% .$$

Интегральный критерий качества управления

При вычислении среднеквадратичного критерия качества возведение в квадрат делает первые большие полуволны еще больше, а последние маленькие еще меньше. Это позволяет существенно уменьшить время регулирования и исследовать только начальную область переходного процесса:

$$I = \int_0^{T_p} (y - y_3)^2 dt \rightarrow \min .$$

Интеграл равен площади $S = 1263$.

Глава 3. Раздел ВКР «Математическое моделирование»: оформление

3.1. Оформление пояснительной записки

Пояснительная записка (ПЗ) – это текстовое представление ВКР.

Текст пояснительной записки выполняется на листах формата А4. Без рамок.

3.1.1. Общие правила оформления текста

Текст должен располагаться на листе с полями следующих размеров: верхнее – 15 мм; правое – 10 мм; нижнее – 20 мм; левое – 30 мм.

Абзацный отступ: 1,25 см.

Текст ПЗ выполняется шрифтом с 14 кеглем с полуторным интервалом. За исключением названий рисунков и таблиц, а так же текста таблиц. Там используется шрифт с 12 кеглем.

Нумерация рисунков, таблиц и формул должна быть по разделам.

Нумерация по разделам имеет вид:

– для раздела 1 — Рисунок 1.1, Рисунок 1.2 ... и так далее.

– для раздела 2 — Рисунок 2.1, Рисунок 2.2... и так далее.

Нумерация с добавлением третьего номерного разряда недопустима (например, Рисунок 1.2.3).

3.1.2. Правила оформления заголовков

Заголовки разделов и подразделов выполняются полужирным обычным строчным 16-ым шрифтом.

Заголовки разделов «СОДЕРЖАНИЕ, АННОТАЦИЯ, ВВЕДЕНИЕ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ, СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ПРИЛОЖЕНИЯ» пишутся заглавными полужирными буквами шрифта с 16 кеглем. Выравниваются по центру листа.

Заголовки разделов выполняются с абзацным отступом ЗАГЛАВНЫМИ полужирными буквами шрифта с 16 кеглем. Выравниваются по ширине листа.

Заголовки подразделов пишут строчными буквами с заглавной буквы после номера подраздела, шрифта с 16 кеглем. Подзаголовки выполняются с абзацным отступом и выравниванием по ширине.

Нумерация заголовков разделов выполняется в следующем формате: «1 НАЗВАНИЕ РАЗДЕЛА». Кавычки не ставятся. Точка после номера раздела не ставится.

Нумерация заголовков подразделов выполняется в следующем формате: 1.2 Название подраздела. Кавычки не ставятся. Точка после номера раздела не ставится.

Один заголовок/подзаголовок оставлять в конце страницы недопустимо. Должно быть как минимум 2-3 строчки текста.

После заголовка/подзаголовка – недопустимо расположение рисунка. Сначала должен располагаться текст.

Расстояние между заголовками и подзаголовками:

От предшествующего текста до подзаголовка/заголовка – 12 пт;
Между заголовком и подзаголовком –12 пт;
Между подзаголовком/заголовком и последующим текстом – 12 пт;
Новый раздел начинается с новой страницы. Именно раздел, а не подраздел.

3.1.3. Правила оформления рисунков

Рисунки выравниваются по центру листа. Обязательна нумерация и названия.

Название должно быть в следующем виде:

Рисунок 1.1 – Название рисунка

«Рисунок» пишется с заглавной буквы, и название рисунка также пишется с заглавной буквы. В конце точка не ставится.

Название выполняется 12 шрифтом без полужирного выделения и курсива. Выравнивается по центру листа. До и после названия отступ в 6 пт.

Размер рисунка не должен превышать 25-35% листа формата А4. Если больше, то рисунок помещается в приложения. В тексте указывается на него ссылка в приложении. Например, «Рисунок А.1».

Если на рисунке есть позиционные обозначения, то обязательно наличие их расшифровки либо в подрисуночной подписи, либо в тексте ПЗ.

На графиках обязательно должны быть подписаны оси, с указанием единиц измерения. Название оси подписывается параллельно ей.

3.1.4. Правила оформления таблиц

Таблицы должны быть выполнены средствами текстового или табличного редактора. Вставка рисунков под видом таблиц недопустима.

Таблицы должны быть выровнены «Автоподбором по ширине листа».

Высота шрифта в таблицах не больше 12-го и не меньше 8-го.

Оформление таблицы стандартное, просто черные линии.

Каждая таблица должна иметь название и нумерацию. Название указывается в верхнем левом углу таблицы без абзацного отступа.

Название должно быть в следующем виде:

Таблица 1.1 – Название таблицы

«Таблица» пишется с заглавной буквы, и название таблицы также пишется с заглавной буквы. Точка в конце названия таблицы не ставится.

Название выполняется 12 шрифтом без полужирного выделения и курсива. До и после названия отступ в 6 пт.

Если таблица разрывается и переходит на другую страницу, то на другой странице, где продолжается таблица должно быть написано: Продолжение таблицы х.х, где х.х – ее порядковый номер.

Оставлять одну шапку таблицы в конце страницы недопустимо.

Текст таблицы должен быть выполнен с интервалом 1 пт.

3.1.5. Правила оформления формул

Формулы выполняются в специальных редакторах текстового редактора.

Размер символов в формулах должен быть 14 пт. или выполнен шрифтом с 14 кеглем.

Нумерация формул аналогична рисунками и таблицам. При этом формула располагается по центру листа, а ее номер проставляется 14-м шрифтом в скобках, в крайнем правом положении, как в примере ниже:

$$Q=[B[A \cdot B]], \quad (1.1)$$

Нумеруются только те формулы, на которых есть ссылка по тексту ПЗ.

Перед и после формулы должна быть пустая строка или интервал в 12 пт.

Если после формулы идет пояснение переменных, входящих в нее, то на следующей строке пишется слово «где» и поясняется, как в примере ниже:

$$F_K \cdot c_K \cdot T_K \cdot dt = W_{cm} \cdot c_{cm} \cdot dT_{cm} + \alpha \cdot A \cdot (T_{cm} - T_B) \cdot dt, \quad (2.1)$$

где: c_K – удельная теплоемкость конденсата, Дж/(кг·град);

A – суммарная поверхность стенок, м²;

W_{CT} – масса теплопередающих стенок.

«где» пишется со строчной буквы, без абзацного отступа. Все переменные располагаются строго друг под другом.

После единичной формулы ставится точка. Если идут друг за другом формулы, то после каждой ставиться точка с запятой. Если формула идет с пояснением переменных, то после нее ставиться запятая.

Расчетные формулы располагаются с выравниванием по левому краю с абзацным отступом, как в примере:

$$\Delta t_{CP} = \frac{70 - 52}{2,3 \cdot \lg\left(\frac{70}{52}\right)} = 60,6^\circ \text{C}.$$

3.1.6. Правила оформления списка литературы и ссылок

Список формируется по алфавиту источников.

Ссылку на источник указываются в квадратных скобках в виде номера абзаца в списке литературы, например [3]. Ссылка ставится после окончания заимствования, перед точкой или иным знаком препинания, а так же после названия рисунка или таблицы.

Ниже примеры оформления различных источников литературы:

Стандарт

1. ГОСТ, СНИП и т.д.
2. ГОСТ 21.208-2013. Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах – Введ.2014-12-01. –М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.

Статья

Шарапов В.И. Термическая деаэрация воды для ТЭЦ и систем теплоснабжения //СОК. – 2006.– №5. – С. 54-62

Интернет ссылки Патенты

Способ вакуумной деаэрации воды (RU 2147558): [Электронный ресурс]// Поиск патентов и изобретений, зарегистрированных в РФ и СССР. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/214/2147558.html> (дата обращения дд.мм.гггг)

Каталоги

Каталог продукции НПП «ЭЛЕМЕР» [Электронный ресурс]// Научно-производственное предприятие «ЭЛЕМЕР». URL: <http://www.elemer.ru> (дата обращения дд.мм.гггг)

Примечание: для интернет-ссылок действуют следующие правила:

Сначала вы указывается название той информации, которую использовали:

Каталог продукции НПП «ЭЛЕМЕР» [Электронный ресурс]//

Потом название сайта:

Научно-производственное предприятие «ЭЛЕМЕР»

Потом ссылка на страницу:

URL: <http://www.elemer.ru>

Потом дата, когда вы заходили на страницу:

(дата обращения дд.мм.гггг)

Книги

Один автор

Денисенко, В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием/ В.В. Денисенко. – М.:Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.

Несколько авторов

Лапшенков, Г.И. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности/ Г.И. Лапшенков, Л.М. Полоцкий. – М.: Химия, 1988. – 288 с.

Иностранный источник

Ding, S.X. Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools /S.X. Ding – Berlin: Springer, 2008 – p. 473

3.1.7. Правила оформления приложений

Располагаются после основного текста ПЗ. Название «ПРИЛОЖЕНИЕ» пишется по центру листа, заглавными буквами полужирным шрифтом с 16 кеглем. Приложения имеют буквенные обозначения: А, Б, В и так далее. За исключением букв З, Й, О.

Нумерация рисунков или таблиц в пределах приложений выполняется в следующем виде:

Рисунок А.1 – Название рисунка (Если у вас приложение А).

Таблица Б.1 – Название таблицы (Если у вас приложение Б).

Оформление содержимого приложений, в том числе рисунков, формул и таблиц подчиняется выше представленным правилам [9].

Список литературы.

1. Бельфор В.М., Попов.В.Б., Антонишин И.В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ: учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы / СПб ГТУРП.- СПб., 2013.- 34 с.
2. Выпускная квалификационная работа: методические указания по направлению 010800.62 (01.03.03) «Механика и математическое моделирование» / сост. В.Н. Калабухов – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2014. –16 с.
3. Студопедия – лекционный материал для студентов [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://studopedia.su>. свободный - (дата обращения 19.02.2020)
4. Иванова Г.В. Автоматизация технологических процессов основных химических производств: Методическое пособие. Часть 1 / СПбГТИ(ТУ).- СПб., 2003.- 70с.
5. Учебные материалы для студентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studme.org>. свободный – (дата обращения 12.01.2020)
6. Сенигов П.Н. Теория автоматического управления: Конспект лекций. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001 - 93с.
7. Медведева, Л.И. Разработка математической модели теплообменника в процессе синтеза МТБЭ / Л.И. Медведева, А.А. Белов // Взаимодействие предприятий и вузов – наука, кадры, новые технологии : сб. докл. XV межрегион. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию города Волжского (г. Волжский, 15-16 мая 2019 г.) / под ред. Е. В. Гончаровой ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. - Волжский, 2019. - С. 170-175. – URL : <http://lib.volpi.ru>.
8. Моделирование систем автоматического регулирования теплообменными аппаратами с использованием SimInTech / А.В. Савчиц, В.В. Корзин, Е.Я. Пономарев, М.В. Трухина, А.В. Поклонская, Н.В. Карнавская // Научно-технический вестник Поволжья. - 2019. - № 12. - С. 132-135.
9. Выпускная квалификационная работа бакалавра: учеб. пособие / А.А. Силаев, Л.И. Медведева, А.В. Савчиц, Е.Ю. Силаева; ВПИ (филиал) ВолгГТУ, Каф. «Автоматика, электроника и вычислительная техника». - Волжский, 2019 с.

Электронное учебное издание

Людмила Ивановна **Медведева**

РАЗДЕЛ ВКР
«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ»:
СТРУКТУРА, МЕТОДЫ, ОФОРМЛЕНИЕ

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2020 г. Поз. № 22.

Подписано к использованию 16.03.2020. Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 4,56.

Волгоградский государственный технический университет.

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.