

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

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ  
УПРАВЛЕНИЯ.  
ВЫПОЛНЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

*Электронное учебное пособие*



Волжский

2023

УДК 681.5(07)  
ББК 32.965я73  
М 42

Рецензенты:

канд. тех. наук, доцент, филиал ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском

*Болдырев И.А.,*

канд. тех. наук, начальник Волжского филиала ФБУ "Волгоградский ЦСМ"

*Бельчанская Е.Н.*

Издается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

Медведева, Л.И.

Математические основы теории управления. Выполнение  
курсовой работы [Электронный ресурс]: учебное пособие /  
Л.И. Медведева ; Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации, ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолгГТУ. –  
Электрон.текстовые дан. (1 файл: 1,69 МБ). – Волжский, 2023. –  
Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул.экрана.

ISBN 978-5-9948-4660-5

Учебное пособие содержит теоретический и практический материал,  
необходимый для выполнения и защиты курсовой работы по дисциплине  
«Математические основы теории управления».

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению  
магистратуры 15.04.04. «Автоматизация технологических процессов и  
производств» всех форм обучения.

Ил. 34, табл.1, библиограф.: 11 назв.

ISBN 978-5-9948-4660-5

© Волгоградский государственный  
технический университет, 2023  
© Волжский политехнический  
институт, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Теоретический материал	5
1.1. План разработки системы автоматического управления	5
1.2. Методы определения численных значений настроечных параметров управляющих устройств	12
1.3. Методика расчета значений параметров настройки регуляторов в каскадных системах	21
1.4. Методы расчета и количественная оценка работоспособности алгоритмов управления каскадными САУ	30
1.5. Принципы программного моделирования каскадной системы автоматического управления	37
Глава 2. Пример курсовой работы	49
Приложение А	68
Список литературы	70

## **Введение**

Курсовая работа по дисциплине «Математические основы теории управления» выполняется на первом курсе магистратуры по направлению 15.04.04. «Автоматизация технологических процессов и производств».

*Цель курсовой работы* – получение и закрепление навыков по разработке системы автоматизированного управления технологическим процессом, определению оптимальных параметров управляющих устройств, оценке эффективности принятых решений.

*Задачи курсовой работы:*

- анализ технических, конструктивных и технологических особенностей исходного процесса;
- выбор показателей эффективности технологического процесса;
- разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом, включающей в себя анализ параметров регулирования, контроля и сигнализации;
- определение численных значений настроечных коэффициентов каскадной системы автоматического управления;
- оценка эффективности разработанной и рассчитанной системы управления.

## Глава 1. Теоретический материал

### 1.1. План разработки системы автоматического управления

Курсовая работа выполняется с использованием описания технологического процесса, который в последствие ляжет в основу выпускной квалификационной работы магистра. При этом анализ технологических особенностей процесса проводится по плану:

- изучение технологического объекта управления, определение его свойств;
- постановки задачи управления, определение показателей эффективности процесса;
- выбор регулируемых параметров и каналов внесения регулирующих воздействий;
- выбор контролируемых параметров;
- выбор сигнализируемых параметров;
- определение мероприятий по защите и блокировке объекта управления;
- выбор средств автоматизации.

Технологический объект управления и система автоматического управления рассматриваются в совокупности. Это позволяет определить степень участия человека в процессе управления, полноту использования автоматических устройств, средств вычислительной техники и на основании тщательного изучения процессов решить поставленные задачи управления. Разработка системы автоматического управления облегчается при хорошем знании объекта и требований, предъявляемых к ходу технологического процесса.

В начале изучаются свойства исходных, промежуточных и готовых продуктов. Их взрывоопасность и пожароопасность, токсичность и другие физико-химические свойства. Исследуются или задаются статические и динамические характеристики технологических аппаратов, особенности их

конструкции, определяются классы и категории производственных помещений по взрывоопасности и пожароопасности. Обязательно устанавливаются значения режимных параметров и допустимые пределы их изменений.

Объект является заданной неизменной частью системы управления и для того, чтобы система достигла цели управления, прежде всего, определяются свойства объекта и его математическая модель, которая представляется в виде уравнений материального и теплового баланса. На основе этих уравнений, с учетом реальных условий объекта все влияющие на процесс факторы разбиваются на группы:

- *возмущения, допускающие стабилизацию* – это независимые технологические параметры, испытывающие существенные колебания, но их можно стабилизировать с помощью систем регулирования;
- *контролируемые возмущения*, которые можно измерить, но нельзя стабилизировать (концентрация, параметры состава);
- *неконтролируемые возмущения*, которые невозможно или нецелесообразно измерять непосредственно (характеристики окружающей среды);
- *возможные регулирующие воздействия* – это материальные или тепловые потоки, которые можно изменять автоматически с целью поддержания регулируемых параметров на заданных значениях;
- *выходные переменные* – это регулируемые параметры, изменение которых свидетельствует о нарушении материального или теплового баланса в объекте или о нарушении технологического регламента.

Уравнения динамики объекта могут быть получены с достаточной точностью только для ограниченного числа сравнительно простых объектов. С усложнением взаимосвязей между входным и выходными величинами объекта и при большом числе внешних и внутренних возмущений математическое описание объекта сильно затрудняется. Возникает необходимость в упрощении, а следовательно, адекватность модели и

реального объекта друг другу уменьшается. На практике свойства объекта выявляют экспериментальным путем [1].

Для реализации второго пункта плана сначала определяются основные показатели эффективности процесса, а затем задается цель управления.

Показателями эффективности являются:

- качество выпускаемой продукции или полуфабрикатов;
- производительность;
- материальные и энергетические затраты на производство продукции.

Целью управления является поддержание первого или основного показателя эффективности процесса на заданном или оптимальном уровне, при оптимальной производительности, минимальных материальных и энергетических затратах, при условии, что процесс будет безаварийным, безопасным и, по возможности, непрерывным.

Для регулирования любого параметра необходимо выполнение следующих условий:

- необходимо иметь средство автоматизации, которое отвечало бы требованиям процесса, имело заданную точность измерения, нужный диапазон измерения, соответствующее быстродействие и дальность передачи информации, могло работать в условиях данного производства;
- необходимо иметь канал внесения регулирующего воздействия. При этом, если каналов несколько, необходимо выбрать тот, по которому наблюдается наименьшее запаздывание, или тот, по которому поступает наибольшее число возмущений;
- необходимо, чтобы выбранная система регулирования обеспечивала требуемое качество.

Зачастую основной показатель эффективности (ОПЭ) не подлежит регулированию или возможные системы не обеспечивают качество его регулирования. Тогда устанавливается зависимость ОПЭ от других параметров, анализируются влияющие возмущающие воздействия, возможность их устранения до объекта. Для этого особое внимание

обращается на стабилизацию входных параметров, так как именно их изменения и являются особенно сильными возмущениями. Все возмущения устранить до объекта невозможно. Это может быть связано с тем, что они могут зависеть от технологического процесса на предыдущих стадиях. Тогда рассматривается возможность регулирования режимных параметров. При этом в первую очередь строятся одноконтурные системы регулирования.

Если одноконтурные системы регулирования не обеспечивают нужную точность ведения процесса, то тогда разрабатываются сложные, многоконтурные системы регулирования. Но при этом необходимо проводить проверку таких систем на взаимосвязанность параметров регулирования. Регулирующие воздействия должны вноситься таким образом, чтобы внутренние связи отдельных параметров ослаблялись, а качество регулирования становилось выше.

При выборе контролируемых параметров преследуются две цели:

- снижение себестоимости продукта за счет снижения числа контролируемых параметров;
- обеспечение нужного режима работы объекта, для чего нужно увеличение количества информации.

Следовательно, контролю подлежат следующие основные параметры:

- все регулируемые параметры;
- нерегулируемые режимные параметры;
- входные и выходные параметры, при изменении которых в объект могут поступать возмущения;
- параметры, характеризующие взрывоопасное состояние объекта;
- параметры, значения которых необходимо знать для подсчета технико-экономических показателей.

К выбору сигнализируемых параметров приступают после анализа объекта в отношении его взрывоопасности и пожароопасности, токсичности и агрессивности перерабатываемых веществ, возможности аварий и

несчастных случаев. Эту часть разрабатывают исходя из требований безопасного ведения технологического процесса с учетом многих факторов:

- признаки аварийной ситуации;
- регламент технологического процесса;
- инструкции по ведению, пуску, останову оборудования;
- действующие указания, нормы, правила, технические условия, которые распространяются на данную установку или процесс.

Сигнализации подлежат все параметры, изменение предельных значений которых может привести к следующему:

- взрыву или пожару;
- аварии;
- несчастному случаю;
- выводу из строя оборудования;
- существенному нарушению технологического режима;
- выпуску брака.

Сигнализации подлежат главные параметры процесса, такие как:

- изменение количественных и качественных характеристик выпускаемой продукции;
- регулируемые режимные параметры, если к ним предъявляются жесткие требования;
- непредусмотренные остановки оборудования.

Сигнализация ответственных параметров должна осуществляться от двух параллельно установленных измерителей, а срабатывание устройств сигнализации обязательно фиксируются.

При оповещении оперативного персонала устройствами сигнализации о нежелательных событиях в процессе необходимо принимать меры по их ликвидации. Если меры персонала неэффективны и параметр, характеризующий данное нежелательное состояние объекта, достигнет предельного предаварийного значения, должны сработать системы

противоаварийной защиты, которые по заданной программе перераспределяют материальные и энергетические потоки, включают и отключают аппараты объекта с целью предотвращения взрыва, аварии, несчастного случая, выпуска большого количества брака. Объект же должен быть приведен в безопасное состояние, включая его остановку при необходимости. Возврат в рабочее состояние осуществляется оперативным персоналом после соответствующей проверки ситуации.

Способы защиты разрабатываются с учетом анализа особенностей объекта, возможных аварийных ситуаций, категорий взрывоопасности объекта. Последний параметр сложно определить моделированием с помощью средств вычислительной техники. При этом, с одной стороны, способы автоматической защиты и применяемые способы должны полностью ликвидировать возникающую критическую ситуацию, а с другой стороны, последствия от вмешательства средств защиты должны быть минимальны.

Одной из основных задач систем автоматической защиты является максимальное уменьшение взрывоопасности объекта. Это достигается:

- предотвращением взрывов и пожаров внутри оборудования;
- защитой оборудования от разрушения;
- максимальным ограничением выбросов из объекта горючих веществ в атмосферу;
- в случаях аварийной разгерметизации, исключением возможных взрывов и пожаров по всему производственному зданию, по сооружениям, по наружным установкам.

Для этого устанавливаются значения уставок и времени срабатывания систем противоаварийной защиты с учетом категорий взрывоопасности и пожароопасности объекта, возможных скоростей изменения параметров, классов точности чувствительных элементов, расчетного быстродействия систем противопожарной защиты. В зависимости от категорий взрывоопасности объекта может быть предусмотрено ручное управление

системы противоаварийной защиты по месту, дистанционное и автоматическое управление. При переводе объекта в безопасное состояние должна быть исключена возможность производственных переключений при восстановлении питания в системе противоаварийной защиты. Число и продолжительность отключений параметров защиты регистрируется. При этом не должно допускаться срабатывание систем защиты при случайных и кратковременных сигналах возмущения, а также при переключении на резервные и аварийный источник питания.

Устройства автоматической блокировки должны предотвращать неверный пуск и останов оборудования и исключать возможность проведения следующих операций, если не выполнена предыдущая [2].

Средства автоматизации должны выбираться согласно принятым решениям по выбору регулируемых, контролируемых, сигнализируемых параметров, с учетом предполагаемых мероприятий защиты и блокировки, технически грамотно и экономически обоснованно. По возможности предпочтение отдается отечественным средствам автоматизации из числа серийно выпускаемых с учетом взрывоопасности и пожароопасности производства. При этом учитываются следующие требования:

- средства автоматизации должны удовлетворять требованиям их безопасной эксплуатации (наличие токсичных, агрессивных веществ окружающей среде быстро выводит средства автоматизации из строя, если они не имеют соответствующей защиты);
- необходимо знать вид измеряемого параметра и физико-химические свойства измеряемой среды;
- необходимо знать условия эксплуатации в месте установки (наличие вибрации, влажности и т.п.);
- учитывается дальность передачи информации;
- учитывается быстродействие передачи информации;
- выбираются средства автоматизации с такими метрологическими характеристиками, которые обеспечат заданную точность измерения. Для

комплекса средств автоматизации необходимо провести суммарных расчет погрешности;

– нельзя допускать разнообразие методов измерения одного и того же параметра, так как это расширяет номенклатуру средств автоматизации и затрудняет организацию их эксплуатации и ремонта, увеличивает резерв наличия средств автоматизации;

– при большом числе одинаковых параметров необходимо применять многоточечные средства автоматизации;

– при всех равных условиях предпочтение отдается более дешевым средствам автоматизации, удовлетворяющим требованиям процесса [3].

## 1.2. Методы определения численных значений настроечных параметров управляющих устройств

Обеспечение заданного качества переходного процесса осуществляется путем изменения настроечных коэффициентов регуляторов или алгоритмов регулирования, при постоянном наблюдении за изменениями переходного процесса и оценивании выбранного критерия качества регулирования, добиваясь его оптимального значения. Существуют различные методы обеспечения заданного качества.

Экспериментальные методы в большинстве своем основаны на прямом контроле переходных или частотных характеристик систем автоматического управления (САУ) в процессе подбора оптимальных параметров настройки регуляторов. Сначала регулятор включают в работу с произвольными параметрами настройки, обеспечивающими устойчивое движение САУ. После этого наносят возмущения и наблюдают реакцию системы на эти возмущения. Целенаправленно изменяя параметры настройки регулятора по заранее известному алгоритму, добиваются нужного вида переходного процесса или определенного положения некоторых точек амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) в комплексной плоскости.

Обычно это многошаговая итерационная процедура.

Экспериментальные методы применяются там, где усилия, затрачиваемые на получение динамических характеристик объекта неоправданно велики. Методы хорошо себя зарекомендовали для самовыравнивающихся объектов и объектов с малым временем запаздывания, но медленно изменяющимися переходными процессами.

По методу замкнутого контура подбор осуществляют по следующему алгоритму: настроечные коэффициенты блокируются или устанавливаются значения, равные нулю. Коэффициент пропорциональности  $k_1$  медленно увеличивают до тех пор, пока исполнительный механизм не начнет устойчиво колебаться. Величину  $k_1$ , при которой начинаются устойчивые колебания, называют предельным коэффициентом усиления  $k_{1П}$ , а период устойчивых колебаний обозначают  $T_{пр}$  и применяют для расчета оптимальных настроек регуляторов ( $k_1^0$ ,  $k_2^0$ ,  $k_3^0$ ):

$$\text{П-регулятор: } k_1^0 = 0,5 \cdot k_{1П};$$

$$\text{ПИ-регулятор: } k_1^0 = 0,45 \cdot k_{1П}; \quad k_2^0 = \frac{1,2 \cdot k_1^0}{T_{пр}};$$

$$\text{ПИД-регулятор: } k_1^0 = 0,6 \cdot k_{1П}; \quad k_2^0 = \frac{2 \cdot k_1^0}{T_{пр}}; \quad k_3^0 = \frac{k_1^0 \cdot T_{пр}}{8}.$$

Подобранные по методу замкнутого контура настройки регулятора обеспечивают качество регулирования со степенью затухания  $\Psi = 0,75$ . К недостаткам метода относится необходимость проведения пробных регулировок.

Метод заданного затухания требует меньшего количества пробных регулировок, так как при его реализации необходимо просматривать всего два цикла колебаний для обеспечения степени затухания  $\Psi = 0,75$ . Метод реализуется следующим образом: настроечные коэффициенты блокируются или устанавливаются равными нулю. Коэффициент при пропорциональной составляющей увеличивается до тех пор, пока не будет получен переходный процесс  $\Psi = 0,75$ . Полученный при этом коэффициент  $k_1$  и период колебаний

переходного процесса  $T_p$  используют для расчета оптимальных настроечных коэффициентов регуляторов по следующим соотношениям:

П-регулятор:  $k_1^0 = k_1$ ;

ПИ-регулятор:  $k_1^0 = 0,9 \cdot k_1$ ;  $k_2^0 = \frac{k_1^0}{T_p}$ ;

ПИД-регулятор:  $k_1^0 = 1,2 \cdot k_1$ ;  $k_2^0 = \frac{k_1^0}{T_p}$ ;  $k_3^0 = \frac{k_1^0 \cdot T_p}{4}$

Для объектов управления, характеризующихся чистым запаздыванием, можно использовать сочетание метода замкнутого контура с опытными данными, полученными в результате экспериментов. Для этого по методу замкнутого контура находят предельные значения коэффициента усиления  $k_1$  и периода колебаний  $T_{пр}$ , а затем рассчитывают оптимальные настройки по формулам из таблицы 1 для различных соотношений чистого запаздывания  $\tau$  и постоянной времени  $T$ .

Экспериментальные методы обеспечения качества регулирования предусматривают внесения в систему возмущения в виде ступенчатого скачка в значении задающего воздействия, что не всегда возможно. Задание используется для внесения в систему только потому, что ее легче изменять программным путем при непосредственном цифровом управлении [4].

Таблица 1

Формулы для расчета настроечных коэффициентов регуляторов

Величина отношения Тип $\tau/T$ регулятора	$0,01 < \frac{\tau}{T} \leq 0,7$	$0,7 < \frac{\tau}{T} \leq 1,2$	$\frac{\tau}{T} > 1,2$
П-регулятор	$k_1^0 = 0,83 \cdot k_1$	$k_1^0 = 0,85 \cdot k_1$	$k_1^0 = 0,87 \cdot k_1$
ПИ-регулятор	$k_1^0 = 0,65 \cdot k_1$ $k_2^0 = \frac{0,3 \cdot k_1}{T_{пр}}$	$k_1^0 = 0,645 \cdot k_1$ $k_2^0 = \frac{0,4 \cdot k_1}{T_{пр}}$	$k_1^0 = 0,64 \cdot k_1$ $k_2^0 = \frac{0,6 \cdot k_1}{T_{пр}}$

Сущность пошаговой оптимизации с оценкой переходной характеристики на каждом шаге заключается во взаимосвязи между формой

переходных процессов при различных настройках САУ и расположением соответствующих точек в плоскости параметров настройки САУ. В плоскости параметров настройки ПИ-регулятора существуют линии одинаковой степени затухания  $\psi$  и, следовательно, одну и ту же степень затухания можно получить при различном сочетании параметров настройки регулятора. Но другие показатели качества регулирования – максимальное динамическое отклонение, длительность переходного процесса и площадь под кривой переходного процесса – будут при этом различными. Таким образом, если путем изменения настройки регулятора двигаться слева направо вдоль любой линии равного затухания, то качество процесса регулирования будет повышаться до тех пор, пока не будет достигнут экстремум – минимум,  $I = I_{\min}$ . При этом улучшаются показатели качества переходного процесса. При дальнейшем движении вправо начинается постепенное ухудшение качества переходного процесса: кривая переходного процесса будет иметь растянутую во времени конечную часть, вследствие чего площадь под кривой и время переходного процесса увеличиваются.

Поиск оптимальных настроек САУ с ПИ-регулятором основан на следующих особенностях этих систем:

1) высокочастотные ветви линий равной степени затухания в плоскости параметров настройки САУ, имеющих самую разнообразную динамическую структуру объектов регулирования, расположены вертикально или под небольшим углом к вертикали. Следствием этой особенности САУ является то, что в области настроек, близких к оптимальным или отличающихся от них повышенным значением постоянной времени изодрома  $T_{из}$ , степень затухания переходных процессов в основном определяется значением коэффициента передачи  $k_1$  регулятора и слабо меняется при изменении  $T_{из}$ ;

2) появление апериодической составляющей переходных процессов является признаком того, что точка, соответствующая данной настройке, расположена на высокочастотной линии равного затухания;

3) переходные процессы, соответствующие настройкам, расположенным на высокочастотной линии равного затухания, несущественно отличаются друг от друга по значению максимального отклонения регулируемого параметра, т.е. изменение интегральной оценки качества зависит главным образом от размеров аperiodической составляющей переходных процессов. Следовательно, при движении снизу вверх вдоль оси высокочастотной ветви оптимум достигается, когда исчезнет аperiodическая составляющая в переходном процессе или ее значение будет небольшим;

4) оптимальное значение  $T_{из. опт}$  слабо зависит от значения  $\psi$ , т.е. найденное при данном  $\psi$  значение оптимального времени изодрома  $T_{из. опт}$  остается оптимальным и для других значений  $\psi$ ;

5) так как оптимум настройки, соответствующий  $I_{мин}$  при заданной степени затухания, имеет небольшую кривизну, то при решении практических задач под оптимальной настройкой следует понимать не точку, а определенную область в плоскости параметров настройки.

При выборе оптимальных настроек можно полагать, что оптимальным значением постоянной времени изодрома  $T_{из. опт}$  является граничное значение  $T_{из.}$ . При этом значении исчезает аperiodическая составляющая переходных процессов; оптимальным значением коэффициента передачи регулятора  $k_1$  можно считать то его значение, которое при  $T_{из. опт}$  обеспечивает заданную степень затухания  $\psi$ . Переход через вершину равного затухания недопустим, так как ведет к резкому ухудшению качества регулирования.

Экспериментальные методы позволяют определить оптимальные настройки управляющих устройств на уже действующих производствах, к качественным характеристикам которых предъявляются не очень жесткие требования, то есть требуют наличия как отлаженного объекта, так и готовой САУ. Такой вывод вытекает из предположения, что не всегда существует возможность активно вмешиваться в течение технологического процесса, так

как это может привести к нарушению технологического режима и, как следствие, к выпуску продукции низкого качества.

В то же время относительная простота реализации этих методов привела к их широкому распространению в настоящее время [5].

Аналитические методы обеспечения качества регулирования представляют широкую группу методов, которые основаны на применении для расчетов настроек регуляторов динамических характеристик как объекта, так и регулятора. Основным условием применения аналитических методов является знание математических моделей объекта и регулирующего устройства в весовой или переходной функции. Таким образом, применение аналитических методов обеспечения качества регулирования состоит из двух этапов: получение динамических характеристик объекта и применение этих динамических характеристик для выбора коэффициентов алгоритма регулирования, которые обеспечат заданное качество регулирования.

В аналитических методах первая часть решения поставленной задачи связана с построением в плоскости параметров настройки регулятора области заданного запаса устойчивости свободного движения замкнутой САУ. Точность решения данной задачи зависит от того, как заданы (определены) динамические свойства объекта управления.

Если динамические свойства объекта управления (передаточная функция, АФХ и т.д.) определены в аналитической форме, то предпочтение отдается методу расширенных АФХ. Если динамические свойства определены экспериментально, то предпочтение следует отдать методу максимума АЧХ.

Дальнейшее решение поставленной задачи связано с выбором оптимальных значений параметров настройки регулятора – точки на границе области заданного запаса устойчивости, обеспечивающей экстремум выбранному косвенному показателю, оценивающему качество регулирования. Выбор этой точки не зависит от того, как была построена

граница области заданной степени колебательности. Она определяется в основном статистическими характеристиками действующих возмущений.

В основе метода расширенных АФХ лежит понятие так называемых расширенных комплексных частотных характеристик  $W(m; i\omega)$ , получающихся из передаточных функций заменой  $P = \omega (i - m)$ , где  $m$  связана с  $\psi$  выражением:

$$\Psi = 1 - e^{-2\pi m}.$$

Передаточная функция, например ПИ-регулятора, в рассматриваемом методе расчета задается в виде:

$$R(p) = -\left(\frac{k_2}{p} + k_1\right),$$

где  $k_2 = \frac{k_1}{T_{из}}$  – интегральная настройка регулятора;

$T_{из}$  – время изодрома.

Расширенная характеристика регулятора:

$$R(m, i\omega) = \frac{\sqrt{(k_1 - m\omega \cdot k_2)^2}}{\omega\sqrt{m^2 + 1}} \cdot e^{i\left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega \cdot k_2}{k_1 - m\omega \cdot k_2} - \arctg \cdot m\right)}.$$

Передаточная функция объекта  $W_{об}(m, i\omega)$  выбирается из числа типовых элементарных звеньев.

Исходным для расчета границы области заданной степени затухания  $\psi$  является соотношение:  $W_{об} \cdot R = 1$ , которое преобразовывается в систему двух уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_p(m, \omega) = 1/A_{об}(m, \omega) \\ \varphi_p(m, \omega) = -\varphi_{об}(m, \omega) \end{array} \right.$$

Левая часть этих уравнений зависит от  $\omega$  и искомым параметров настройки регулятора  $k_1$  и  $k_2$ . Правая часть зависит от частоты  $\omega$  и известных параметров объекта. Разрешив систему уравнений относительно  $k_1$  и  $k_2$ , находится граница области заданной степени колебательности  $m$  в параметрической форме:

$$\begin{cases} k_1 = k_1(\omega), \\ k_2 = k_2(\omega). \end{cases}$$

Задавая различные значения  $\omega$  можно построить искомую границу заданной степени колебательности  $m$  и все значения  $k_1$  и  $k_2$ , лежащие на этой кривой, обеспечат определенную заданную степень затухания.

Значения  $k_1$  и  $k_2$ , лежащие внутри области, ограниченной кривой и осями координат, обеспечат процесс регулирования со степенью затухания больше заданной, а лежащие вне этой области – со степенью затухания меньше заданной. Далее необходимо выяснить, какую степень затухания следует рекомендовать и какие конкретно значения  $k_1$  и  $k_2$  надо выбрать на построенной линии заданного затухания, чтобы получить оптимальный процесс регулирования. Опыт эксплуатации показывает, что  $\psi = 0,75$  может удовлетворять во многих случаях практики. Многочисленные промышленные опыты настройки регуляторов технологических процессов показывают, что следует выбирать значения  $k_1$  и  $k_2$ , лежащие несколько правее максимума кривой заданного затухания [4].

В дисперсионном методе качество регулирования оценивают по значению дисперсии ошибки регулирования  $\sigma_\varepsilon^2$ . Если задающее воздействие  $u_{зад}(t) = \text{const}$ , а возмущающее воздействие  $\varphi(t)$  приложено к выходу объекта регулирования, то

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S_\varphi(\omega) \left| \frac{1}{1 + W_{об}(i\omega) \cdot R(i\omega)} \right|^2 d\omega,$$

где  $S_\varphi(\omega)$  – спектральная плотность возмущения  $\varphi(t)$ ;

$W_{об}(i\omega)$ ,  $R(i\omega)$  – АФХ объекта и регулятора соответственно.

Двигаясь вдоль границы области заданной степени колебательности, можно построить по формуле зависимость  $\sigma_\varepsilon^2 = f(k_1)$  и по критерию  $\sigma_\varepsilon^2 = \min$  выбрать оптимальные значения  $k_1$  и  $T_{из}$ .

Методы содержат множество формальных условий, которые аналитически не обоснованы и применимы в основном для задач с одной и двумя переменными.

Информационный метод. Одноконтурная САУ рассматривается как замкнутый канал передачи информации  $x \rightarrow y$ .

С информационных позиций точность работы такого канала тем выше, чем больше его пропускная способность

$$R_x = \int \lambda n \left[ 1 + \frac{S_x(f) |W_{об}(if) \cdot R(if)|^2}{S_\varphi(f)} \right] df,$$

где  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ;

$S_x(f)$  и  $S_\varphi(f)$  – спектральные плотности сигналов  $x(t)$  и  $\varphi(t)$ ;

$W_{об}(if)$ ,  $R(if)$  – АФХ объекта и регулятора;

$F = \frac{\omega_{срез}}{2\pi}$  – частота среза  $S_\varphi(f)$ .

В информационной теории управления для оптимизации рассматриваемой системы применяют критерий  $R_x = \max$ , который при нормальных видах одномерной плотности распределения вероятностей  $x(t)$  и  $\varphi(t)$  совпадает с критерием минимума дисперсии ошибки регулирования.

Следовательно, аналитические методы требуют для своей реализации обязательного знания математического описания объекта управления, что повышает их адекватность технологическому процессу. Реализация этих методов возможна без непосредственного вмешательства в работу оборудования, а рост современных компьютерных технологий значительно упрощает их формализацию.

Методы имитационного моделирования. В современных условиях часто приходится создавать системы регулирования, когда еще не

существует самого объекта, то есть на этапах, когда создается новый технологический процесс.

В этих условиях огромную роль приобретают методы имитационного моделирования, которые применяются следующим образом: выбирается модель объекта управления и алгоритм регулирования. Аналитическими методами рассчитывают параметры алгоритма регулирования и моделированием на ЭВМ имитируется функционирование входных параметров системы и оценивается качество регулирования.

Блоки моделирования случайных процессов позволяют сделать имитационное моделирование и исследовать режимы работы объекта в условиях более приближенных к реальным, т.е. в условиях действия случайных помех, дрейфа характеристик и изменения входных переменных. Однако введение этих блоков предъявляет особые требования к математическому обеспечению и, в частности, к выбору критерия эффективности. При имитационном статистическом моделировании он должен не только объективно отражать эффективность функционирования объекта, но и обладать способностью к оценке этой эффективности на продолжительном интервале времени [6].

### 1.3. Методика расчета значений параметров настройки регуляторов в каскадных системах

Повышение динамической точности систем автоматического регулирования может быть достигнуто либо за счет усложнения алгоритма функционирования регулятора, либо за счет получения регулятором более своевременной (ценной) информации о возмущающих воздействиях. Последний вариант реализуется путем создания дополнительных информационных каналов. Каналы передачи дополнительной информации о возмущающих воздействиях могут образовывать в системе регулирования разомкнутые или замкнутые контуры. На практике наибольшее распространение получили два вида систем автоматического регулирования с

дополнительными информационными каналами – каскадные системы и системы с компенсацией возмущений.

Каскадными называют системы автоматического регулирования, в которых с целью максимально эффективного подавления возмущений, идущих по каналу регулирующего воздействия, вспомогательную регулируемую величину выбирают в непосредственной близости от регулирующего органа.

Целесообразность ввода дополнительного информационного канала по вспомогательной регулируемой величине определяется тем, что вспомогательная регулируемая величина должна реагировать на поступающие возмущения, идущие по каналу регулирующего воздействия с меньшим запаздыванием, чем основная регулируемая величина. Различают два вида каскадных систем:

- системы с двумя регуляторами (корректирующим и стабилизирующим);
- системы с вводом производной от промежуточной регулируемой величины.

Структурная схема непрерывной каскадной системы с корректирующим и стабилизирующим регуляторами представлена на рисунке 1. Здесь вспомогательная регулируемая величина  $z$  поступает на вход стабилизирующего регулятора  $W_{p.c}$ , а основная регулируемая величина  $y$  поступает на вход второго (корректирующего) регулятора  $W_{p.k}$ ;  $\lambda$  – возмущение, действующее на объект и идущее по каналу регулирующего воздействия;  $s$  – сигнал задания;  $\varepsilon$  – ошибка регулирования;  $W_{об}(p)$  и  $W_{об1}(p)$  – соответственно передаточные функции объекта по каналам  $\lambda$ - $y$  и  $\lambda$ - $z$ ;  $v$  – прочие возмущения, действующие на объект регулирования;  $z$  – сигнал задания стабилизирующему регулятору.

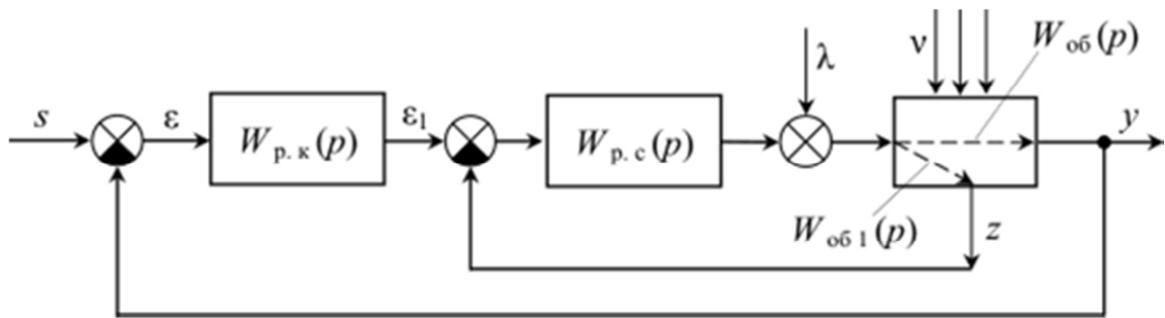


Рисунок 1. Структурная схема каскадной системы регулирования

Одним из эксплуатационных требований, предъявляемых к каскадной системе регулирования с корректирующим и стабилизирующим регуляторами, является требование сохранения ее работоспособности при отключении корректирующего регулятора. При отключении корректирующего регулятора система регулирования становится одноконтурной (рис. 2.) и синтез такой системы может быть осуществлен известными параметрическими методами.

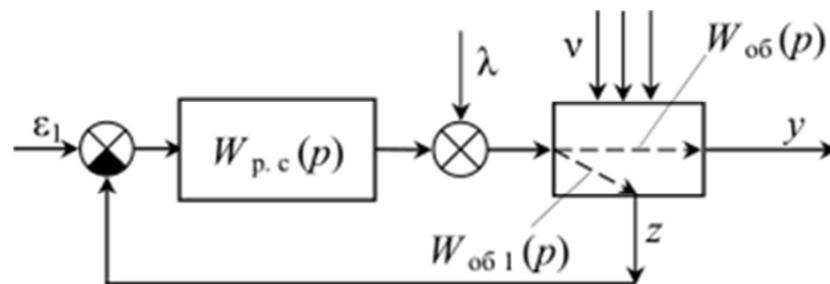


Рисунок 2. Структурная схема внутреннего контура каскадной системы

При найденном операторе  $W_{p.c}$  внутренний контур системы можно представить в виде эквивалентного объекта регулирования  $W_{об. экв}(p)$  для корректирующего регулятора в одноконтурной системе регулирования (рис. 3.), где:

$$W_{об. экв}(p) = \frac{W_{p.c}(p) \cdot W_{об}(p)}{1 + W_{p.c}(p) \cdot W_{об1}(p)}$$

Синтез оператора  $W_{p.k}$  в такой одноконтурной системе может быть осуществлен, как уже отмечалось выше, известными методами.

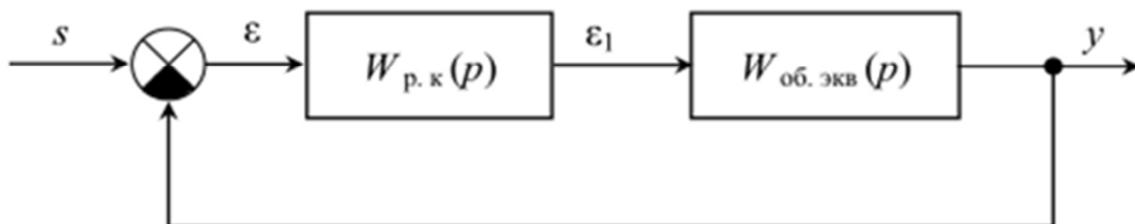


Рисунок 3. Структурная схема системы регулирования с эквивалентным объектом

Таким образом, синтез каскадной системы регулирования с корректирующим и стабилизирующим регуляторами состоит из двух этапов и каждый из этих этапов заключается в синтезе одноконтурной системы [7].

При наличии в каскадной системе  $n$ -го числа контуров (рис. 4.) метод эквивалентных функций используется следующим образом.

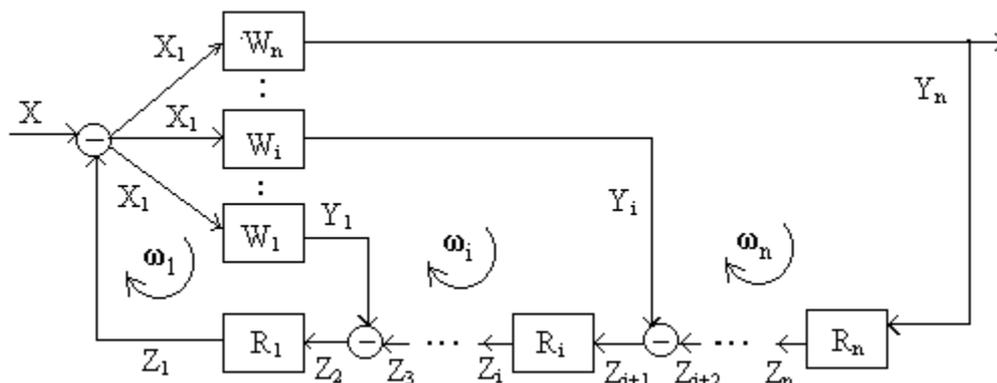


Рисунок 4. Структурная схема  $n$ -контурной САУ ( $W_1, W_i, W_n$  – передаточные функции объекта управления по каналам регулирования основной ( $Y_1$ ) и вспомогательных ( $Y_i, Y_n$ ) величин;  $R_1, R_i, R_n$  – передаточные функции управляющих устройств для поддержания основной и вспомогательных величин на заданном значении;  $\omega_1, \omega_i, \omega_n$  – рабочие частоты основного и вспомогательных контуров управления)

Входной сигнал  $x$ , поступает на вход передаточных функций многосвязного объекта управления, где преобразовывается в зависимости от порядка объекта. Выходные сигналы  $y$  поступают на вход соответствующих управляющих устройств  $R$  для выработки сигнала рассогласования с

заданием и формирования управляющих воздействий  $z$ . При этом управляющее воздействие последующего управляющего устройства является заданием для предыдущего.

В каскадных системах (рис. 4.) при регулировании основной технологической величины в объекте с большим запаздыванием используются также вспомогательные величины, реагирующие на изменения основных возмущений объекта и регулирующего воздействия с меньшим запаздыванием. В таких случаях стабилизация вспомогательных величин способствует качественному управлению основной величиной. Каскадная система состоит из нескольких контуров регулирования, каждый из которых регулирует свою технологическую (основную или вспомогательную) величину.

В системах подобного типа качество управления улучшается при уменьшении соотношения времени запаздывания в основном и вспомогательных контурах, т.е. при выполнении условия:  $\omega_1 > \omega_i > \omega_n$ . Поэтому в начале основной контур регулирования рассматривается как независимый, т.к. инерционность вспомогательных контуров существенно превосходит инерционность основного контура и сигнал  $z_3$  можно принимать постоянным и, следовательно, определять параметры  $R_1$ .

Значения же коэффициентов внешнего вспомогательного регулятора  $R_n$  зависят от переменных всех предшествующих контуров – как основного, так и вспомогательных. Поэтому исходную структурную схему (рис. 4.) сначала необходимо привести к классическому виду одноконтурной САУ (рис. 3.).

Для этого внешний вспомогательный контур необходимо зрительно отсечь от схемы (рис. 5.).

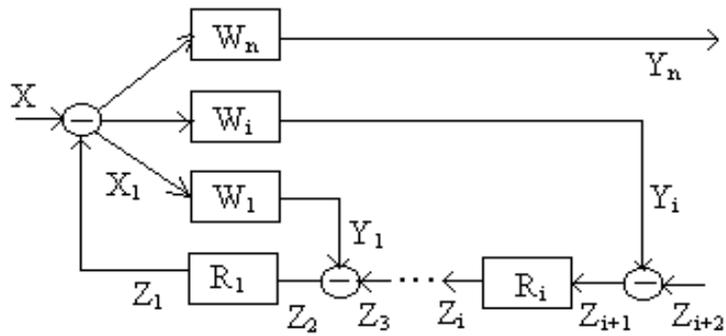


Рисунок 5. Структурная схема n-контурной САУ без внешнего контура управления

Принимая  $x = const$  и следуя от входного сигнала  $z_{i+2}$  к выходному –  $y_n$ , схема преобразуется к виду на рисунке 6.

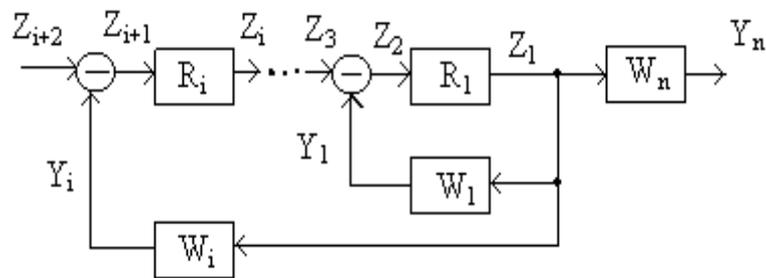


Рисунок 6. Преобразованная структурная схема n-контурной САУ

Использование методов структурных преобразований позволяет определить передаточную функцию эквивалентного объекта (1) для классической одноконтурной системы и рассчитать условия реализации внешнего управляющего устройства:

$$W_{R_n}^{экв} = \frac{W_n \cdot \prod_{i=1}^{n-1} R_i}{1 + W_{n-1} \cdot \prod_{i=1}^{n-1} R_i + W_{n-2} \cdot \prod_{i=1}^{n-2} R_i + K + W_k \cdot \prod_{i=1}^k R_i + K + W_1 \cdot R_1}. \quad (1)$$

При этом в выражении (1) используются настроечные коэффициенты промежуточных регуляторов  $R_i$ , которые предварительно находятся с использованием передаточных функций объектов управления, рассчитанных по формуле (2):

$$W_{R_i} = \frac{W_i}{W_{i-1}}. \quad (2)$$

Уравнение (2) отражает динамические особенности каскадных алгоритмов и соответствует условиям физической реализуемости динамических систем, т.е. предотвращает возникновение звеньев предварения сигналов.

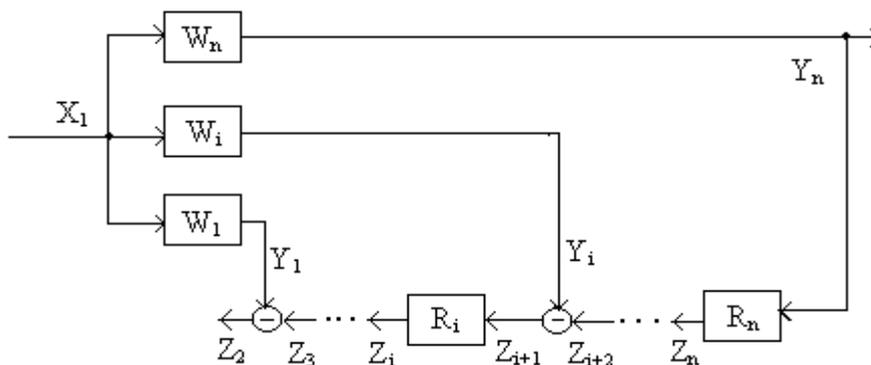


Рисунок 7. Структурная схема n-контурной САУ без внутреннего контура управления

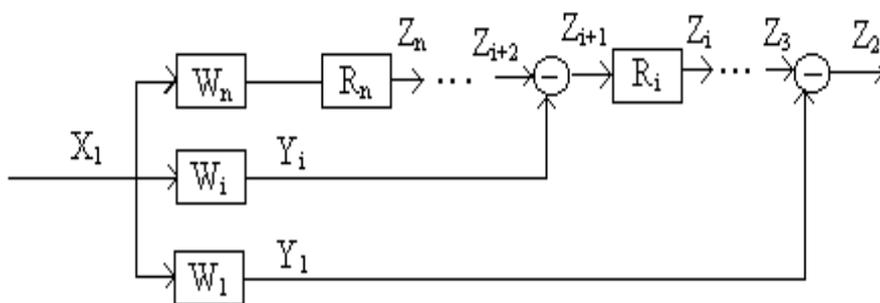


Рисунок 8. Преобразованная структурная схема n-контурной САУ

Для проверки принятых ранее допущений находятся начальные условия функционирования основного регулятора  $R_1$  с учетом влияния всех вспомогательных контуров. Для этого он зрительно отсекается от исходной схемы (рис. 7.) и представляется в эквивалентном виде (рис. 8.).

Методы структурных преобразований позволяют определить эквивалентную передаточную функцию основного контура (3) и использовать ее при расчете параметров основного управляющего устройства с учетом работы всей системы в комплексе:

$$W_{R_1}^{\text{экв}} = W_n \cdot \prod_{i=2}^n R_i - W_{n-1} \cdot \prod_{i=2}^{n-1} R_i - K - W_k \cdot \prod_{i=2}^k R_i - K - W_1. \quad (3)$$

Оптимальная работа каскадных алгоритмов управления в основном зависит от численных значений коэффициентов управляющих устройств ( $R_1, R_i, R_n$ ) в структурной схеме (рис. 4.) [8].

Возможны два варианта определения параметров функционирования управляющих устройств в n-контурных схемах:

- когда рабочая частота основного контура регулирования много больше частот вспомогательных контуров;
- когда рабочие частоты контуров соизмеримы.

При расчете по первому варианту основной контур регулирования рассматривается как независимый и любым известным методом определяются численные значения настроечных коэффициентов регулятора  $R_1$ .

Затем находят значения коэффициентов внешнего вспомогательного регулятора  $R_n$  по формуле (2) и с применением вышеописанных структурных и математических преобразований.

Теперь для проверки принятых ранее допущений вновь находятся коэффициенты основного регулятора  $R_1$  с использованием выражения (4).

Результаты проверки при этом должны удовлетворять условию:

$$\frac{k_i^1 - k_i^2}{k_i^1} \cdot 100 \% \geq 10 \% , \quad (5)$$

где  $k_i^1, k_i^2$  – настроечные коэффициенты внутреннего управляющего устройства, найденные до и во время проверки соответственно.

В противном случае коэффициенты внешнего регулятора  $R_n$  изменяются на 10 % и расчет повторяют вновь.

Согласно второму варианту порядок расчета несколько меняется.

Расчет системы управления начинают с внешнего контура и определяют настроечные параметры  $n$ -го управляющего устройства. При этом все остальные управляющие устройства принимаются равными единице, и формула эквивалентного объекта будет иметь вид (6):

$$W_{R_n}^{экс} = \frac{W_n}{W_{n-1}}, \quad (6)$$

где  $W_n$  – передаточная функция внешнего объекта управления.

Используя полученную передаточную функцию эквивалентного объекта, определяют параметры внешнего регулятора любым известным методом [9].

Для нахождения настроечных коэффициентов внутреннего основного контура от исходной схемы зрительно отсекают внутренний регулятор и в качестве объекта управления используют эквивалентную передаточную функцию, найденную по выражению (4). Используя полученную передаточную функцию эквивалентного объекта, определяют параметры внутреннего регулятора любым известным методом.

Для проверки результатов расчета вновь определяют параметры внешнего контура с использованием данных внутреннего управляющего устройства. Для этого регулятор  $R_n$  рассчитывают вновь, используя в качестве объекта эквивалентную функцию (2).

Результаты расчетов должны удовлетворять условию (5), в котором используются коэффициенты внешнего вспомогательного управляющего устройства  $R_n$ . Если условие (5) не выполняется, то изменяют настройки основного регулятора и расчет повторяют вновь [9].

#### 1.4. Методы расчета и количественная оценка работоспособности алгоритмов управления каскадными САУ

Параметрическая оптимизация САУ направлена на достижение определенной цели. Цель необходимо сформулировать и сформировать в виде математического описания.

Любая промышленная САУ кроме устойчивости должна обеспечить определенные качественные показатели процесса регулирования. Качество процесса регулирования обычно оценивают по переходной характеристике  $y(t)$  по отношению к ступенчатому единичному возмущающему воздействию. Основными показателями качества являются: время регулирования, перерегулирование, колебательность и установившаяся ошибка.

Время регулирования. Временем регулирования  $T_p$  называется время, в течение которого, начиная с момента приложения воздействия на систему, отклонения значений регулируемой величины  $\Delta y(t)$  от ее установившегося значения  $y_0 = y(\infty)$  будут меньше заранее заданного значения  $\zeta_0$ . Таким образом, время регулирования определяет длительность (быстродействие) переходного процесса.

Перерегулирование. Перерегулированием  $\sigma$  называется максимальное отклонение  $y_{\max}$  регулируемой величины от установившегося значения  $y(\infty)$ , выраженное в процентах по отношению к  $y(\infty)$ .

$$\sigma = \frac{y_m - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_1}{y(\infty)} \cdot 100, \% \quad (7)$$

Колебательность системы характеризуется числом колебаний регулируемой величины за время регулирования  $T_p$ . Если за это время переходный процесс в системе совершает число колебаний меньше заданного по условиям технологии, то считается, что система имеет требуемое качество регулирования в части ее колебательности.

Установившаяся ошибка. В общем случае установившаяся ошибка  $\zeta_0$  или точность регулирования определяется как разность двух значений –

установившегося регулируемой величины  $y_0$  после окончания переходного процесса и заданного  $g_0$ :

$$\zeta_0 = g_0 - y_0.$$

По отношению к возмущающему воздействию

$$\zeta_0 = -y_0.$$

Показатели качества регулирования определяются непосредственно по кривой переходного процесса, которую можно получить экспериментально или решением дифференциальных уравнений системы. Решение дифференциального уравнения является трудоемкой задачей, в связи с этим в инженерной практике находят широкое применение косвенные оценки качества регулирования. Косвенными оценками называются некоторые величины, в той или иной мере характеризующие отдельные особенности переходного процесса.

Косвенные оценки качества регулирования. Одной из косвенных оценок качества регулирования является степень удаления корней характеристического уравнения замкнутой системы от мнимой оси. Расстояние  $\eta$  ближайшего корня от мнимой оси характеризует запас устойчивости системы и называется *степенью устойчивости* этой системы и равно вещественной части корня, ближайшего к мнимой оси.

Наибольший из углов  $\gamma$ , образованных отрицательной вещественной полуосью и лучами, проведенными из начала координат через корни, характеризует колебательность системы. Котангенс этого угла  $m = \text{ctg } \gamma$  называется степенью колебательности.

Согласно:

$$y(t)_{св} = \sum_{i=1}^N C_i \cdot e^{p_i t},$$

где  $y(t)_{св}$  – свободная составляющая решения канонического уравнения во временной области, определяемая корнями  $p_i$  характеристического уравнения;

$C_i$  – постоянные, определяемые начальными условиями,

t – время.

Комплексно-сопряженные корни, имеющие максимальный угол  $\gamma$ , дадут составляющую колебательного переходного процесса, имеющую наименьшее затухание, и, следовательно, колебательность системы будет определяться этой составляющей, так как остальные составляющие имеют большее затухание. Для оценки колебательности в ряде случаев пользуются понятием «степень затухания».

*Степенью затухания*  $\Psi$  называется отношение разности двух соседних амплитуд одного знака кривой переходного процесса к большей из них:

$$\Psi = \frac{y_{\max} - y_1}{y_{\max}} \quad (8)$$

Степень колебательности и степень затухания связаны между собой выражением:  $\Psi = 1 - e^{-2\pi m}$ .

При оценке качества по расположению корней характеристического уравнения можно исходить из следующих соображений. Предполагая, что переходный процесс в основном определяется ближайшим к мнимой оси вещественным корнем (или ближайшей к мнимой оси парой сопряженных корней),  $y(t) = y_n \cdot e^{-\alpha t}$ , можно найти допустимое значение степени устойчивости с учетом желаемого времени регулирования  $T_p$ . По истечении этого времени отклонение регулируемой величины уменьшится в  $n$  раз

относительно начального отклонения  $y_n$ , т.е.  $\alpha = y_n \ln \frac{n}{T_p}$  [10].

Частотные методы оценки качества регулирования. Эти методы базируются на преобразовании Фурье и на том, что переходный процесс при заданных возмущениях однозначно связан с видом АФХ замкнутой САУ. Таким образом, по частотным характеристикам можно судить о качестве переходного процесса.

Разложение ступенчатой единичной функции в непрерывный гармонический ряд осуществляется с помощью интеграла Дирихле:

$$I(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega,$$

где  $\omega$  – частота.

Если АФХ замкнутой САУ имеет вид  $W(i\omega) = P(\omega) + iQ(\omega)$ , где  $P(\omega)$  – действительная часть АФХ,  $Q(\omega)$  – мнимая часть АФХ, то реакция системы на возмущение типа единичной ступенчатой функции может быть вычислена по формулам:

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega)}{\omega} \sin \omega t d\omega;$$

$$y(t) = P(0) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(\omega)}{\omega} \cos \omega t d\omega.$$

Эти выражения лежат в основе частотного метода исследования качества переходного процесса при единичном возмущении; пользуясь любым из них, можно составить предварительное приближенное суждение о качестве регулирования:

- 1) приблизительно одинаковым  $P(\omega)$  соответствуют приблизительно одинаковые  $y(t)$ ;
- 2) для двух сходных  $P_1(\omega)$  и  $P_2(\omega)$ , отличающихся только масштабом по оси  $\omega$ , т.е.  $P_1(\omega) = P_2(n\omega)$ , переходные процессы отличаются только по оси  $t$ , т.е.  $y_1(t/n) = y_2(t)$ ;
- 3) в установившемся состоянии  $y(\infty) = P(0)$ ;
- 4) чтобы  $y(t)$  стремилась к установившемуся значению, необходимо, но не достаточно соблюдения при всех  $\omega$  неравенства  $|P(\omega)| < P(0)$ ;
- 5) если  $P(\omega)$  изменяется по монотонно убывающей кривой, для которой  $P(\omega) > 0$ ,  $P'(\omega) < 0$ ,  $P''(\omega) \geq 0$ , то это означает, что параметр стремится к установившемуся значению без перерегулирования, а длительность

переходного процесса  $T_p \approx 4\pi/\omega_{01}$ , где  $\omega_{01}$  – верхняя граница области существенных частот для данной системы;

б) если  $P(\omega)$  обращается в бесконечность при некотором значении  $\omega$ , то САУ неустойчива;

в) продолжительность переходного процесса будет тем меньше, чем более пологий характер имеет  $P(\omega)$ .

Интегральные методы оценки качества. В основе этих методов лежит предположение, что качество регулирования тем выше, чем меньше площадь между кривой переходного процесса и заданным значением регулируемой величины, так как эта площадь косвенно характеризует потери на регулирование. Наибольшее применение находят интегральные оценки следующего вида:

$$I_1 = \int_0^{\infty} y(t) dt;$$

$$I_2 = \int_0^{\infty} y^2(t) dt;$$

$$I_3 = \int_0^{\infty} \left\{ y^2(t) + T^2 \left[ \frac{\partial y(t)}{\partial t} \right]^2 \right\} dt.$$

где  $T$  – постоянная времени некоторой экспоненты, по которой желательно изменение переходного процесса для данной системы.

На практике преобладает подход, связанный с минимизацией интегральных оценок качества регулирования вдоль границы области допустимых значений параметров настройки регулятора САУ.

Эти критерии являются простейшими с математической точки зрения и имеют экономическое и технологическое обоснование для многих промышленных объектов, связанных с регулированием температуры и давления, с поддержанием максимального значения КПД, минимальных материальных и энергетических потерь и т.д.

В качестве критерия эффективности основным является интегральный среднеквадратический критерий качества, величина которого вычисляется по выражению:

$$I_4 = \int_0^{T_p} [y(t) - y_3(t)]^2 dt ,$$

где  $T_p$  – время регулирования;

$y(t)$  – текущее значение управляемой величины;

$y_3(t)$  – текущее значение величины задания.

Среднеквадратический критерий чаще всего выбирается в качестве критерия эффективности, поскольку он обладает следующими преимуществами:

- 1) величина критерия практически не связана со временем регулирования;
- 2) среднеквадратический критерий качества отдает предпочтение начальным участкам переходного процесса, которые в основном и определяют динамику системы.

Расчет величины среднеквадратического критерия производится с использованием численного метода «правых» прямоугольников, который основан на том, что интеграл представляется в виде предела интегральной суммы (суммы площадей) и дальше на основе этой суммы определяется необходимая точность для нахождения решения функции:

$$I = \int_A^B f(x)dx,$$

где  $A$  и  $B$  – конечные величины;

$f(x)$  - непрерывная функция.

Вычисление проводится путем разбиения интервала от  $A$  до  $B$  на множество мелких интервалов и приближенным нахождением площади каждой полоски и в дальнейшем суммированием этих полосок (рис. 9.).

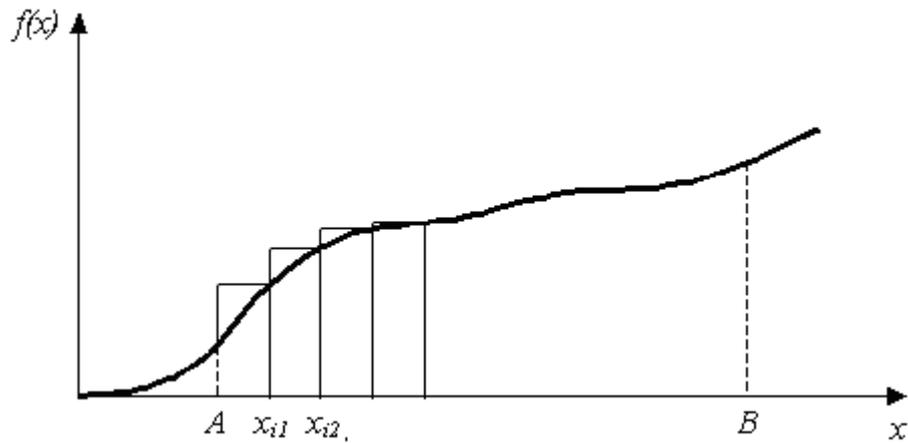


Рисунок 9. Графическая интерпретация метода «правых» прямоугольников

Вычисление интеграла осуществляется по выражению:

$$I = \int_A^B f(x)dx = \sum_{i=0}^N C_i \cdot f(x_i) + R,$$

где  $x_i$  – узлы интерполяции;

$i$  – номер узла;

$C_i$  – коэффициент;

$R$  – погрешность метода.

В методе «правых» прямоугольников для замены интеграла используется следующее выражение:

$$I = \int_A^B f(x)dx = \sum_{i=1}^n f(z_i) \cdot h_i,$$

где  $h_i = x_i - x_{i-1}$ ;

$x_{i-1} \leq z_i < x_i$ ;

$z_i = x_i$ .

Таким образом, параметры настройки регуляторов должны быть выбраны такими, чтобы в замкнутой системе был обеспечен заданный запас устойчивости. При этом выбранный показатель качества регулирования

должен быть не хуже требуемого (или должен иметь экстремальное значение) [9].

#### 1.5. Принципы программного моделирования каскадной системы автоматического управления

Моделирование технических объектов и систем проводится для того, чтобы определить свойства и характеристики проектируемых систем еще до их изготовления и при необходимости скорректировать, уточнить их структуру и параметры. Это позволяет получить проект работоспособной системы, которую не придется существенно дорабатывать тогда, когда она будет изготовлена. Таким образом, моделирование сокращает и удешевляет процесс проектирования и реализации систем и объектов.

Кроме того, на модели системы можно проверить ее поведение в таких условиях и режимах, для которых система не предназначена, с тем, чтобы знать, как она себя поведет и к каким последствиям это приведет. Очевидно, что такие эксперименты на реальной системе могут быть не только дороги, но и небезопасны, в то время как моделирование позволяет получить нужную информацию о процессе или системе без лишних затрат и, главное, без негативных последствий.

Программа VisSim предназначена для построения, исследования и оптимизации виртуальных моделей физических и технических объектов, в том числе и систем управления. VisSim – это аббревиатура выражения VisualSimulator – визуальная, воспринимаемая зрением, среда и средство моделирования.

Программа VisSim разработана и развивается компанией VisualSolutions. Эта программа – мощное, удобное в использовании, компактное и эффективное средство моделирования физических и технических объектов, систем и их элементов.

При описании и последующем построении модели в среде VisSim нет необходимости записывать и решать дифференциальные уравнения,

программа это сделает сама по предложенной ей исследователем структуре системы и параметрам ее элементов. Результаты решения выводятся в наглядной графической форме. Специалисты, владеющие программированием, могут создавать собственные блоки, дополняя ими библиотеку стандартных блоков VisSim.

Для использования в учебных целях компанией VisualSolutionInc бесплатно распространяется студенческая версия программы VisSim. Данная версия является полнофункциональной, но в ней отсутствуют файлы помощи и примеры.

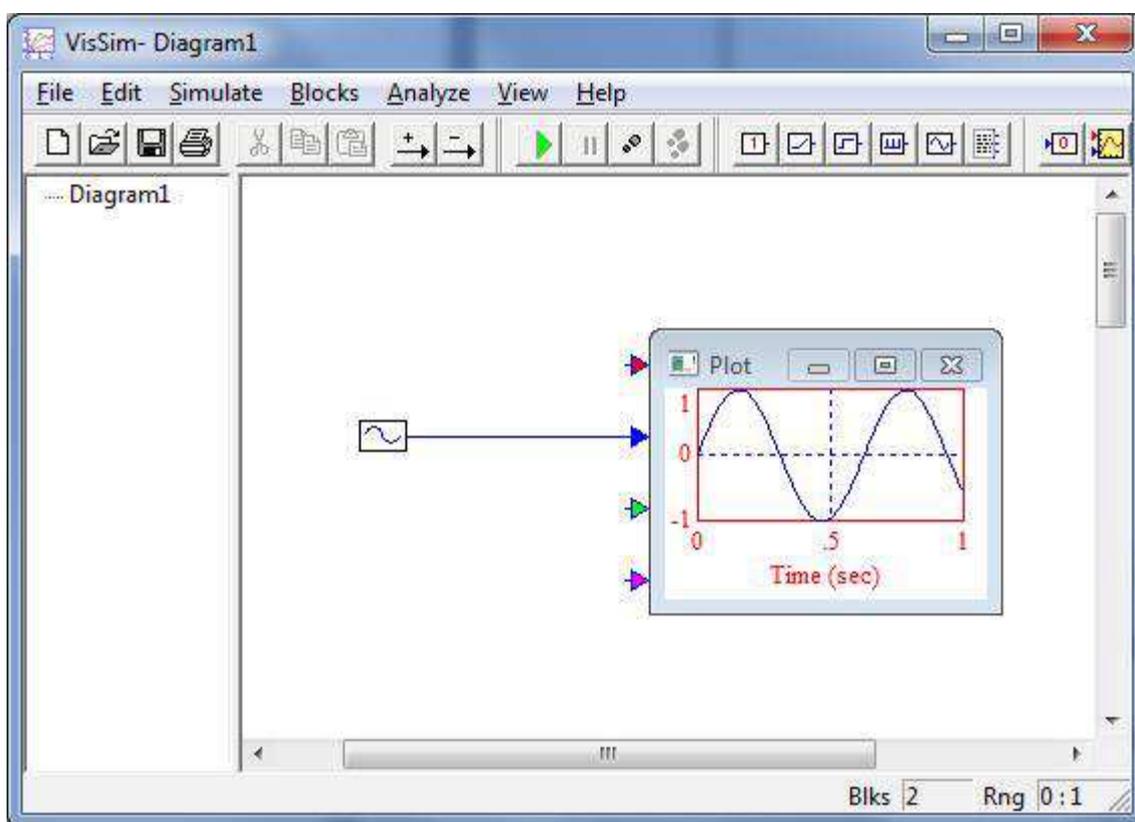


Рисунок 10. Главное окно VisSim

Программа VisSim предоставляет исследователю графический интерфейс, позволяющий основную часть работы по созданию модели выполнить с помощью мыши, а параметры элементов ввести с клавиатуры. Интерфейс VisSim состоит из главного окна, имеющего меню, и ряд кнопок управления, воспринимающих щелчки кнопок мыши, и т.н. рабочего

пространства, в котором строится и корректируется модель, наблюдаются результаты ее работы (рис. 10.).

С точки зрения исследователя интерфейс программы VisSim представляет собой интерактивный виртуальный лабораторный стенд, обеспечивающий построение моделей из отдельных блоков, запуск процесса моделирования, управление им и контроль результатов. Главное окно VisSim, с примером простой диаграммы представлено на рисунке 10.

При запуске процесса моделирования (щелчком по кнопке «Пуск» – «Go»), на осциллографе изображается сигнал, вырабатываемый генератором, в данном случае – синусоида. Амплитуду, частоту и начальную фазу сигнала генератора исследователь может менять, и при новом запуске моделирования эти изменения будут приводить к соответствующему изменению графика на экране осциллографа.

Диаграммой в VisSim называется совокупность связанных, а также автономных блоков и надписей, помещенных на рабочее пространство и способных функционировать при запуске процесса моделирования. Диаграмма может быть сохранена в виде отдельного файла и, при необходимости, открыта вновь.

Модель VisSim – это часть диаграммы, содержащая виртуальный аналог реальной или проектируемой системы. Диаграмма может содержать несколько моделей.

Исходными данными для построения модели в VisSim являются структурно-функциональная схема моделируемой системы, процесса или объекта и описывающие их дифференциально-алгебраические уравнения. Вместо таких уравнений могут быть заданы операторы или функции, характеризующие отдельные элементы моделируемой системы, например, передаточные функции для линейных элементов и статические характеристики для нелинейных элементов.

Реальные системы и объекты состоят из отдельных, связанных и взаимодействующих друг с другом элементов. И для всей системы в целом, и

для отдельных ее, должным образом выбранных элементов, можно указать место приложения воздействия, которое можно назвать входом, и место их реакции (отклика) на входное воздействие, называемое выходом. И воздействие, и реакция – это некоторые физические величины, являющиеся функциями времени.

Модели систем и объектов в программе VisSim строятся из отдельных элементов – блоков. Блок – это виртуальный аналог физического элемента реальной системы. Термин «аналог» предполагает, что блок функционирует, он подчиняется тем же самым уравнениям, что и реальный, моделируемый элемент системы.

Виртуальные блоки VisSim могут иметь или вход, на который может быть подан выходной сигнал другого блока, или выход, виртуальный сигнал с которого может быть подан на вход другого блока. Наконец, блоки могут иметь и вход, и выход одновременно. Взаимодействие между блоками отображается т.н. линиями связи, указывающими направление передачи воздействий (сигналов) от одного блока к другому.

Взаимодействие между блоками моделируется сигналами – функциями времени, передаваемыми между блоками по линиям связи. Сигналы в модели могут быть измерены с помощью виртуальных измерительных устройств или рассмотрены и изучены с помощью виртуального осциллографа.

Внешне виртуальные блоки VisSim с некоторой степенью условности воспринимаются исследователем так же, как реальные устройства. Например, генераторы вырабатывают сигналы, блоки-преобразователи реагируют на входные сигналы в определенном смысле точно так же, как реальные устройства на реальные воздействия, индикаторы показывают величины сигналов.

Таким образом, принцип построения модели в VisSim состоит в вынесении на рабочее пространство моделей реальных элементов (блоков) и соединении их в соответствии с заранее составленной структурно-алгоритмической схемой моделируемой системы. Такое построение модели

из виртуальных блоков очень похоже, с известной степенью условности, на построение реальной системы из настоящих блоков (генераторов, осциллографов и других устройств) в производственных условиях или на лабораторном стенде.

Блоки VisSim можно условно разделить на три основных категории и одну дополнительную:

- блоки, имеющие только выход: генераторы.
- блоки, имеющие вход и выход: преобразователи.
- блоки, имеющие только вход: индикаторы.
- блоки без входов и выходов: надписи, комментарии и др.

Важным компонентом модели является *соединительная линия* – виртуальный аналог физического соединения элементов, передающего сигналы от одного элемента к другому. Соединительные линии в VisSim однонаправленные, передают сигналы с выхода одного блока к входу другого.

Генераторы – это блоки, имеющие только выход.

Генераторы вырабатывают изменяющиеся во времени или постоянные сигналы.

Примерами таких блоков в VisSim являются блоки:

- *step* (ступенька) – генератор ступенчатой функции;
- *ramp* (спуск, подъем) – генератор линейно растущего сигнала;
- *sinusoid* – генератор синусоидального сигнала;
- *const* – генератор постоянного сигнала, величина которого не меняется в процессе работы модели;
- *slider* (скользящий контакт, ползунок) – генератор постоянного сигнала, величину которого можно менять в процессе работы модели.

Для помещения блока на рабочее пространство следует щелкнуть по пункту меню **Blocks**, перейти на пункт **SignalProducer**, затем щелкнуть по названию требуемого генератора, перевести курсор в нужное место рабочего пространства и щелкнуть левой кнопкой мыши.



Рисунок 11. Важные блоки-генераторы программы VisSim

Преобразователи – это блоки, имеющие входы и выходы.

Блоки-преобразователи способны воспринимать воздействия от других блоков, преобразовывать их в соответствии с определенными уравнениями или правилами и выдавать преобразованный сигнал (отклик, реакцию блока) на выход.

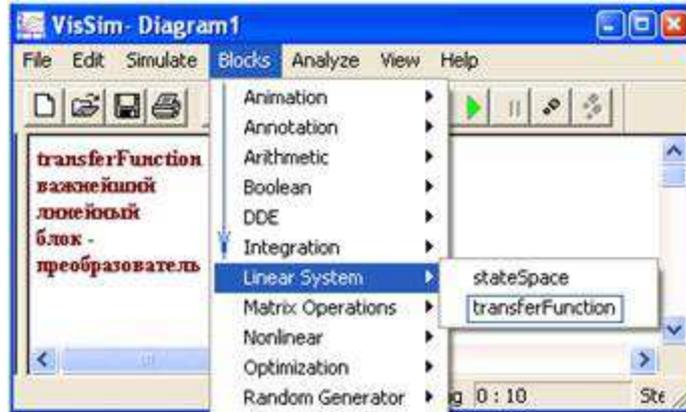


Рисунок 12. Меню для вызова блока передаточная функция (transferFunction)

Важнейшие блоки для моделирования линейных систем:

– блок *transferFunction* – передаточная функция. Этот блок позволяет создавать модели как простых, так и очень сложных элементов линейных систем и систем в целом;

- *integrator* – блок интегратора, осуществляющий интегрирование входного сигнала по времени;
- *summingJunction* – сумматор двух и более сигналов, его выходной сигнал равен алгебраической сумме входных;
- *gain* – усилитель.

Сумматор и усилитель вызываются путем выбора: *Blocks* → *Arithmetic* → *summingJunction* (сумматор) или *gain* (усилитель).

Блок *transferFunction* является важнейшим при моделировании САУ. Рассмотрим задание параметров данного блока. После размещения на диаграмме блок *transferFunction* выглядит следующим образом:

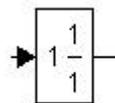


Рисунок 13. Вид блока *transferFunction* до задания параметров

Открытие окна свойств данного блока осуществляется двойным нажатием левой клавиши мыши (рис. 14.).

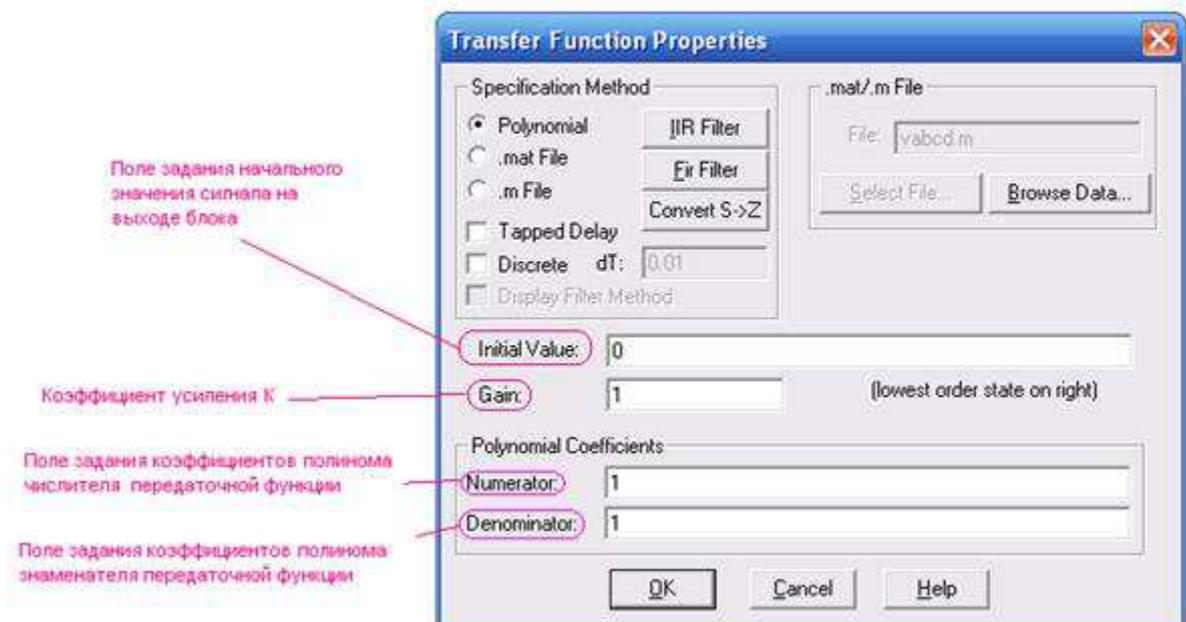


Рисунок 14. Свойства блока *transferFunction*

Задание свойств блока передаточной функции осуществляется следующим образом. Допустим, задана передаточная функция в виде:

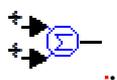
$$W(p) = K \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}.$$

Для задания ее в VisSim необходимо соблюдать следующие правила:

- 1) В поле Gain (коэффициент усиления системы) вводится значение коэффициента усиления  $K$ .
- 2) В поле Numerator вводятся *через пробел коэффициенты полинома числителя передаточной функции в направлении убывания степени  $p$* .
- 3) В поле Denominator вводятся *через пробел коэффициенты полинома знаменателя передаточной функции в направлении убывания степени  $p$* .
- 4) Поле InitialValue заполняется в случае, если заданы ненулевые начальные условия. В нашем случае начальные условия не заданы, поэтому оставляем значение по умолчанию равное 0.

**Примечание:** В VisSim с помощью блока *transferFunction* можно промоделировать только передаточные функции, представляющие правильную дробь, т.е. дробь, в которой степень полинома числителя меньше или равна степени полинома знаменателя (  $m \leq n$  ). При попытке задать передаточную функцию, где  $m > n$ , программа выдаст ошибку.

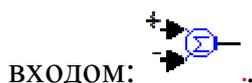
Блок *summingJunction* предназначен для задания в модели элемента «сумматор», выполняющего функции суммирования или вычитания сигналов на его входах. После размещения на диаграмме блок имеет вид:



При моделировании САУ зачастую необходимо изменить знак на одном или нескольких входах сумматора и добавить или удалить количество входов.

*Замена знака на сумматоре* производится следующим образом. Наводится курсор мыши на вход сумматора, знак которого нужно изменить, удерживается клавиша Ctrl и производится щелчок левой клавишей мыши по

соответствующему входу. Пример сумматора со вторым инвертирующим



Если необходимо добавить или удалить входы, следует нажать на соответствующие кнопки на панели инструментов (рис. 15.).

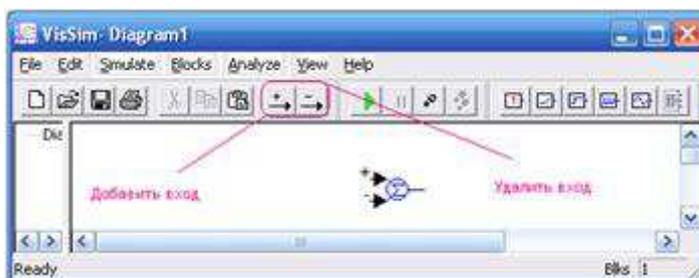


Рисунок 15. Добавление и удаление входов



Блок *Gain* имеет один параметр – коэффициент усиления  (рис. 16.).



Рисунок 16. Пример задания параметра блока Gain

Индикаторы – это блоки, имеющие только вход.

Индикаторы программы VisSim предназначены для отображения сигналов в форме удобной и привычной для исследователя.

Важнейшими индикаторами являются блоки:

- осциллограф – plot;
- цифровой индикатор – display.

Блоки индикации вызываются путем выбора пунктов меню *Blocks* → *Signal Consumer* → *plot* (display).

Виртуальный осциллограф (*plot*) VisSim представляет собой окно, похожее на экран осциллографа, в котором изображается зависимость наблюдаемых сигналов от времени (рис. 17). На боковой стороне осциллографа помещены условные изображения входов, к которым могут быть подключены выходы других блоков диаграммы для наблюдения поведения их сигналов в зависимости от времени. В VisSim 3.0 на одном блоке *plot* можно наблюдать от 1 до 4 сигналов, изменяющихся во времени.

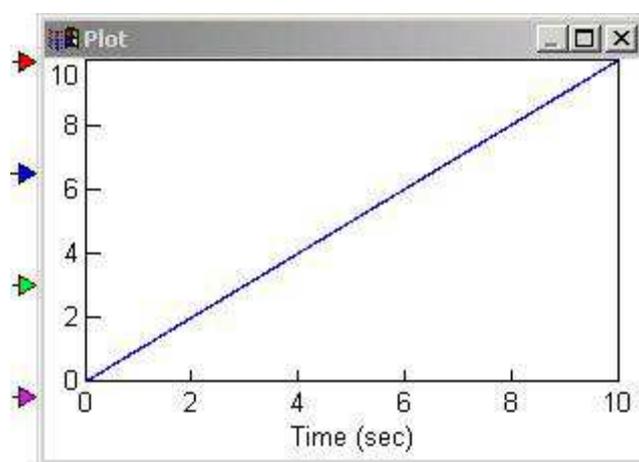


Рисунок 17. Виртуальный осциллограф (*plot*)

Цифровой индикатор *display* VisSim показывает в цифровом виде значение сигнала на выходе того блока, к которому он подключен. Этот прибор используется для измерения постоянных величин.

Построенную модель следует запустить в работу, щелкнув по кнопке «Пуск». В результате работы модели выходные сигналы блоков начнут изменяться, их величины просматривают на виртуальном осциллографе и других индикаторах. Параметры некоторых сигналов и блоков исследователь может изменять в процессе работы модели, другие параметры можно изменить, остановив процесс работы модели. Продолжительность работы модели можно задавать до ее запуска, можно и прерывать работу модели по желанию исследователя.

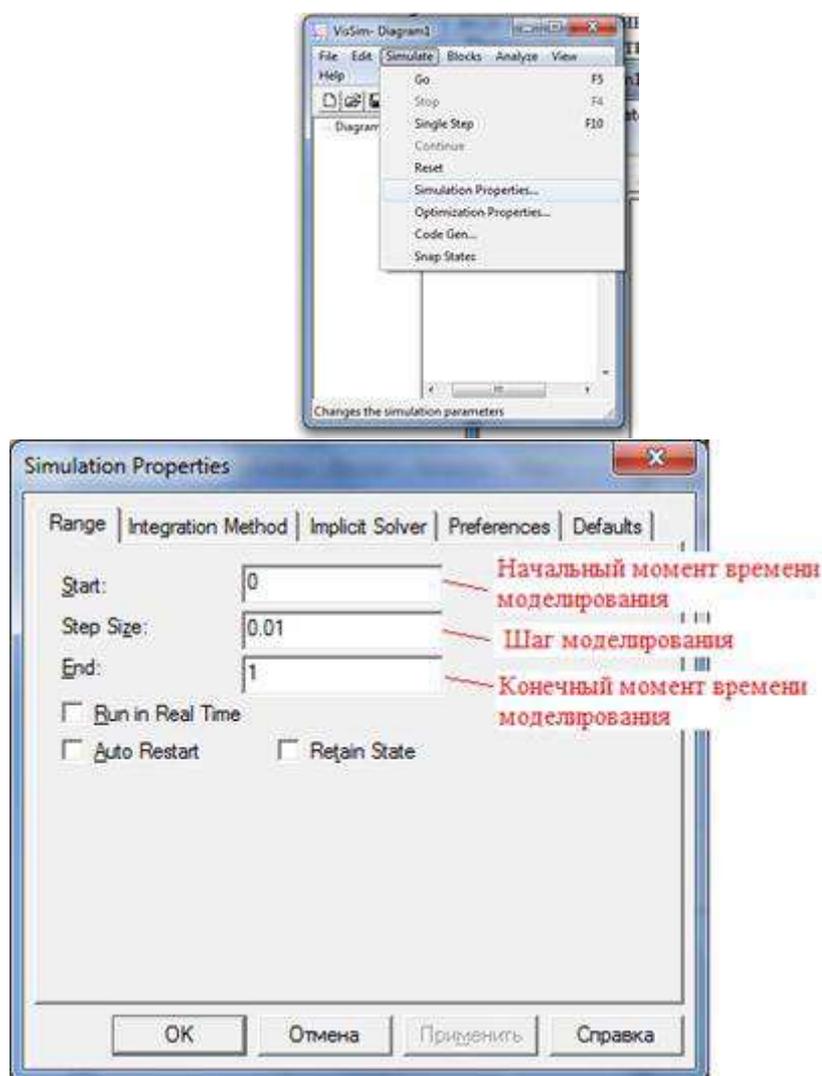


Рисунок 18. Настройка параметров работы модели

Параметры работы модели задаются в меню *Simulate* → *SimulationProperties*.

После того, как модель построена, когда на рабочее пространство вынесены и соединены в нужном порядке, блоки, составляющие систему, генераторы сигналов и индикаторы, а также введены параметры элементов модели, может быть запущен процесс ее функционирования (кнопка «Пуск»).

Получив эту команду, программа начинает анализировать то, как соединены блоки, на основе этого анализа составляет дифференциально-алгебраические уравнения, описывающие модель и решает их. Полученные результаты, как функции модельного времени, периодически и очень часто, придают значениям входных и выходных сигналов блоков.

Дифференциально-алгебраические уравнения математически описывают т.н. динамические объекты, объекты очень широкого класса, обладающие инерционностью и рядом других свойств. И поскольку программа VisSim способна решать такие уравнения, то в ней можно моделировать системы и объекты очень широкого диапазона сложности, в том числе и каскадные [11].

Структурная схема системы каскадного регулирования, реализованная по описанным выше принципам, изображена на рисунке 19.

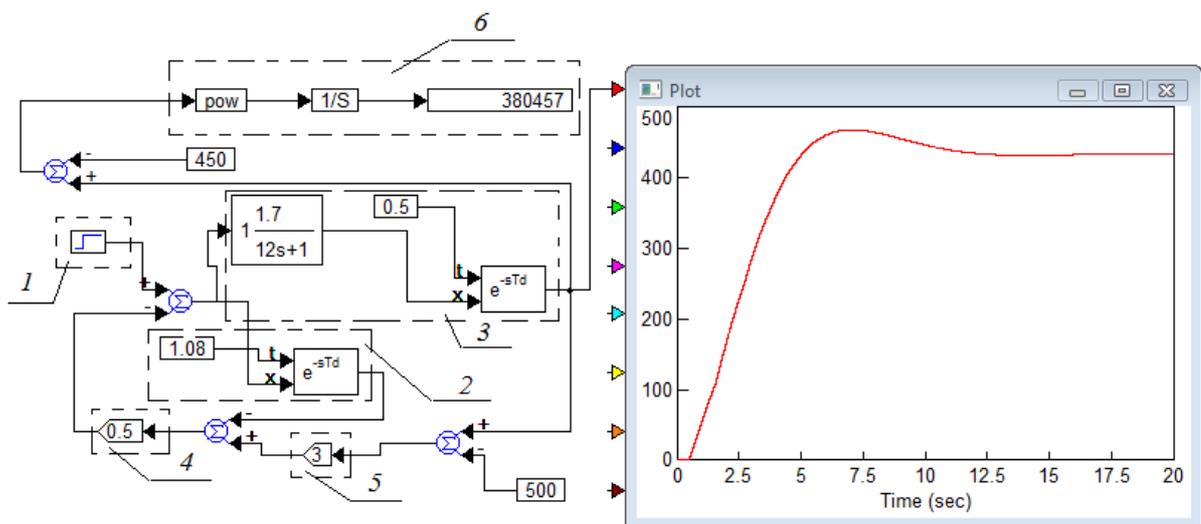


Рисунок 19. Структурная схема каскадной системы управления, построенная в VisSim

Где:

- 1 – блок формирования входного воздействия (единичный скачек);
- 2 – блок формирования передаточной функции внутреннего контура;
- 3 – блок формирования передаточной функции внешнего контура;
- 4 – блок формирования передаточной функции регулятора внутреннего контура;
- 5 – блок формирования передаточной функции регулятора внешнего контура;
- 6 – блок для вычисления значений среднеквадратичного показателя качества  $I_c$ .

## Глава 2. Пример курсовой работы

Процесс подготовки пара предназначен для создания требуемых технических характеристик пара, потребляемых потребителем. Суть процесса заключается в следующем.

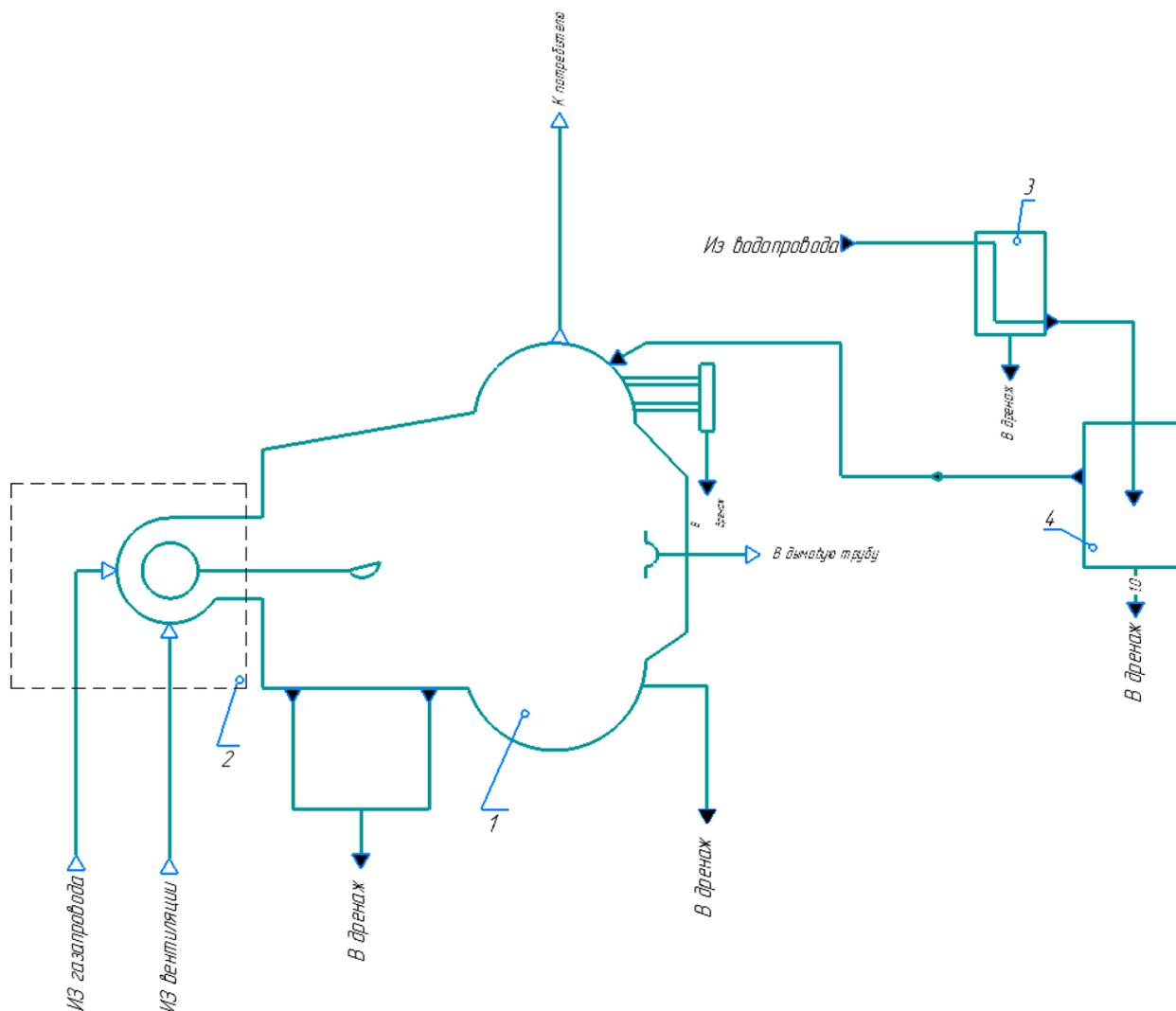


Рисунок 20. Технологическая схема процесса

(1-котел, 2-горелка, 3-блок водоподготовки, 4-бак умягченной воды)

Вода из водопровода поступает в блок водоподготовки 3, где она проходит процесс умягчения от солей и различных примесей. После чего уже умягченная вода путем нагнетания насосами поступает в бак умягченной воды 4. В баке умягченной воды расположены несколько аварийных уровней: нижний и верхний уровень. При заполнении бака выше нижнего

уровня на котел поступает сигнал, что вода в пределах рабочей нормы. При условиях наличия газа, горелка 2 открывает клапаны и начинает контролировать подачу газа и воздуха в котел 1 (рис. 20).

Первоначально производится наддув, который прочищает газовоздушный тракт котла и анализирует наличие вентиляции в течение 50 секунд. Затем запускается режим розжига горелки.

Как только горелка фиксирует контроль пламени, и все параметры в норме, подается большее количество газа. Горелка переходит на большое горение. Теперь станция производит пар заданного давления путем нагревания воды в котле (давление устанавливается в горелке, исходя из нужд производства) (рис. 20).

После нормализации режима розжига происходит увеличение подачи количества газа и воздуха до достижения значения, установленного технологической картой.

Параметр давление в данном процессе является взаимосвязанным с температурой, четко прослеживается их пропорциональная взаимозависимость (рис. 21). Поэтому контуры регулирования температуры обеспечивают и реализацию второго показателя эффективности (давления).

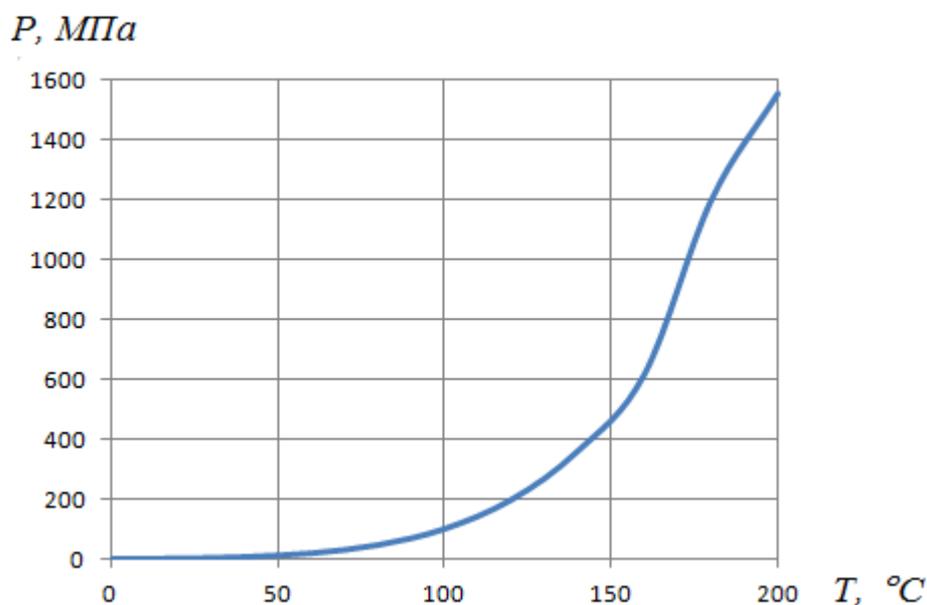


Рисунок 21. График зависимости температуры от давления

Показателями эффективности процесса являются:

- а) температура пара на выходе из котла;
- б) давление;
- в) производительность котла;
- г) энергетические затраты на процесс нагрева (преобразования) воды.

Целью управления процессом является поддержание температуры пара на выходе из котла на значении  $200 \pm 5^\circ\text{C}$ ; при оптимальной производительности котла; при минимальных энергетических затратах на преобразование воды; при условии, что процесс будет безаварийным, безопасным и непрерывным.

Рассматривается возможность регулирования ОПЭ – температуры пара на выходе из котельной.

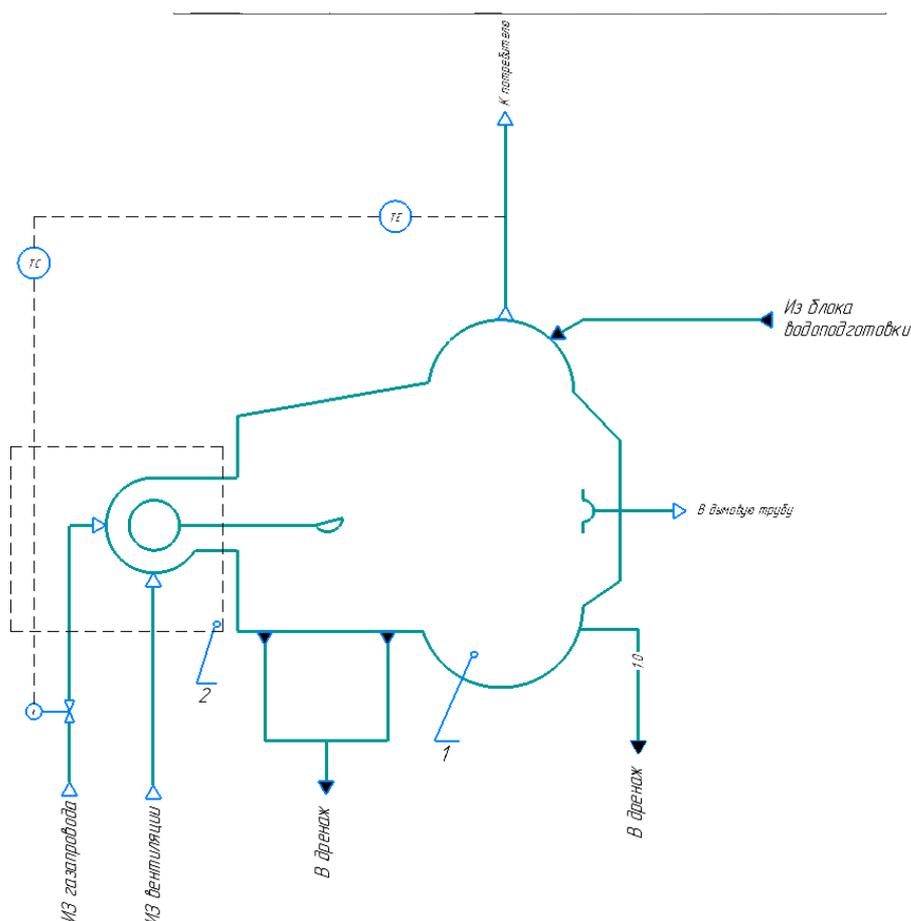


Рисунок 22. Одноконтурная САР регулирования температуры пара

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 горелку.

Выбирается одноконтурная замкнутая система автоматического регулирования (САР) температуры пара на выходе из котельной путём изменения подачи газа (рис. 22).

Выбор канала внесения регулирующего воздействия сделан из следующих соображений.

При установке регулирующего клапана на линии газопровода производительность котельной не будет величиной постоянной, что приводит к нарушению второго показателя эффективности.

Выбранная САР температура пара может не обеспечить требуемого качества регулирования, если объект обладает запаздыванием.

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

При изменении расхода газа и его калорийности в горелку поступают возмущения. Одно из этих возмущений, в частности, изменение давления газа, можно устранить до объекта, используя одноконтурную разомкнутую САР расхода газа (рис. 23).

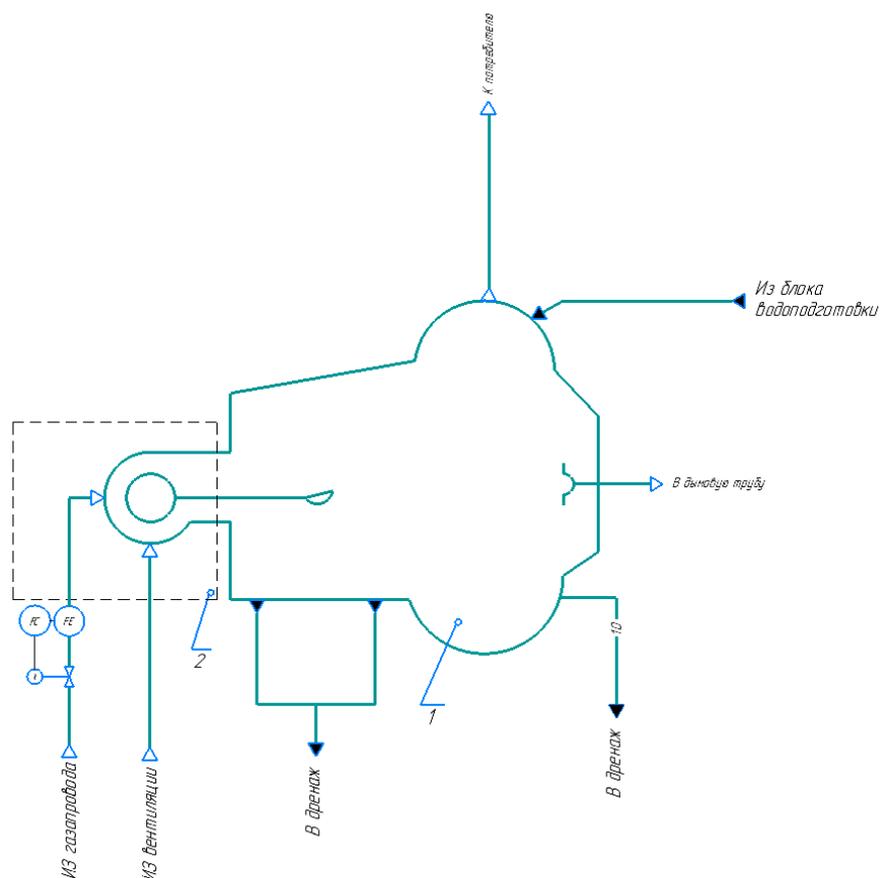


Рисунок 23. Система стабилизации расхода газа

Эта система сделает расход газа постоянным, но на все остальные возмущения реагировать не будет. Поэтому выбирается двухконтурная каскадная САР расхода газа с коррекцией по температуре пара на выходе из котла (рис. 24). Регулятор температуры пара 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 пара на выходе из котла будет реагировать с большим запаздыванием.

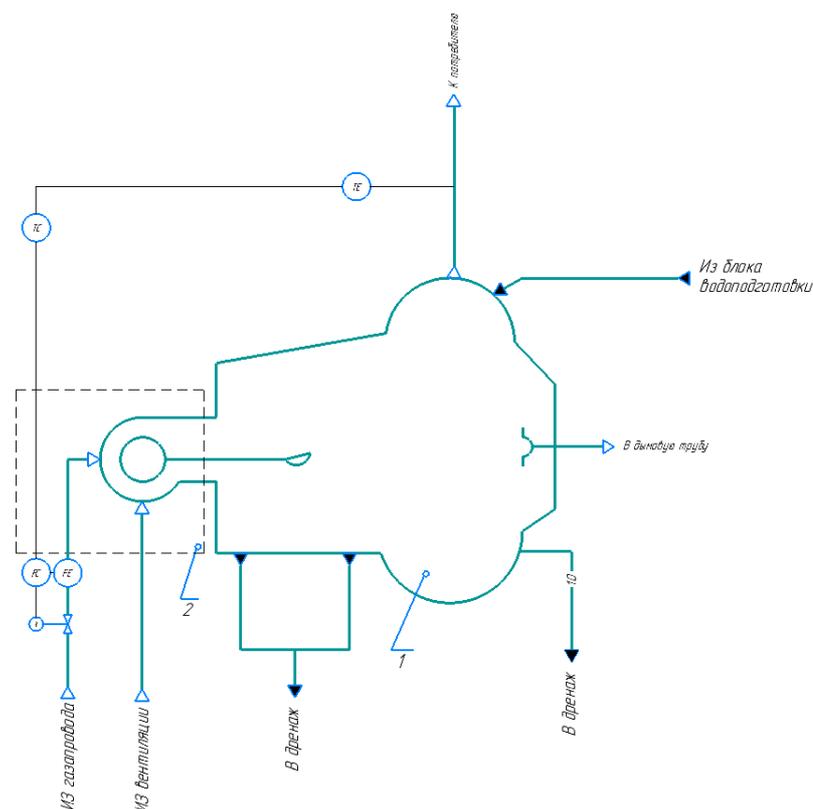


Рисунок 24. Двухконтурная САР расхода газа с коррекцией по температуре пара

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

Такой системой является САР температуры рабочей зоны котла путём изменения расхода газа с коррекцией по температуре пара на выходе из котла (рис. 25).

Регулятор температуры рабочей зоны котла с запаздыванием будет реагировать на изменение расхода и калорийность газа, и совсем не будет реагировать на возмущения, поступающие по линии подачи воды и внутренние возмущения. На все эти возмущения будет реагировать регулятор температуры пара на выходе из котла и корректировать задание регулятору температуры внутри котла.

Работать такая система будет следующим образом: предположим, увеличился расход или давление газа, увеличится температура в топке, сработает регулятор температуры рабочей зоны котла и приведёт к уменьшению расхода газа.

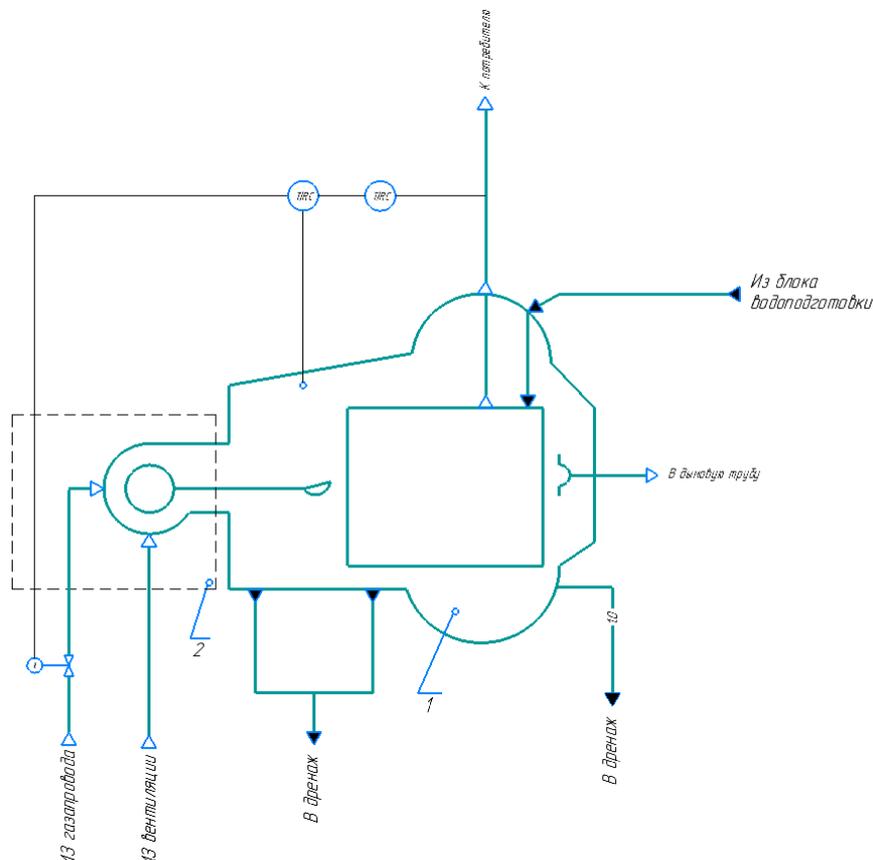


Рисунок 25. САР температуры рабочей зоны котла путём изменения расхода газа с коррекцией по температуре пара на выходе из котла

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

Итак, выбирается САР температуры рабочей зоны котла, путём изменения расхода газа с коррекцией по температуре пара на выходе из котла (регулятор температуры рабочей зоны котла – вспомогательный, а регулятор температуры пара на выходе из котельной – главный) для обеспечения ОПЭ – температуры пара на выходе из котла.

Третьим требованием к процессу является обеспечение оптимальной производительности котла. С этой целью необходимо сделать постоянным расход воды. Это делается с помощью одноконтурной разомкнутой САР расхода воды, но не всегда такое возможно.

Если вода поступает из предыдущего процесса, то производительность котла определяется производительностью предыдущих аппаратов, и, кроме того, в последующий процесс будут вноситься возмущения, что также нежелательно.

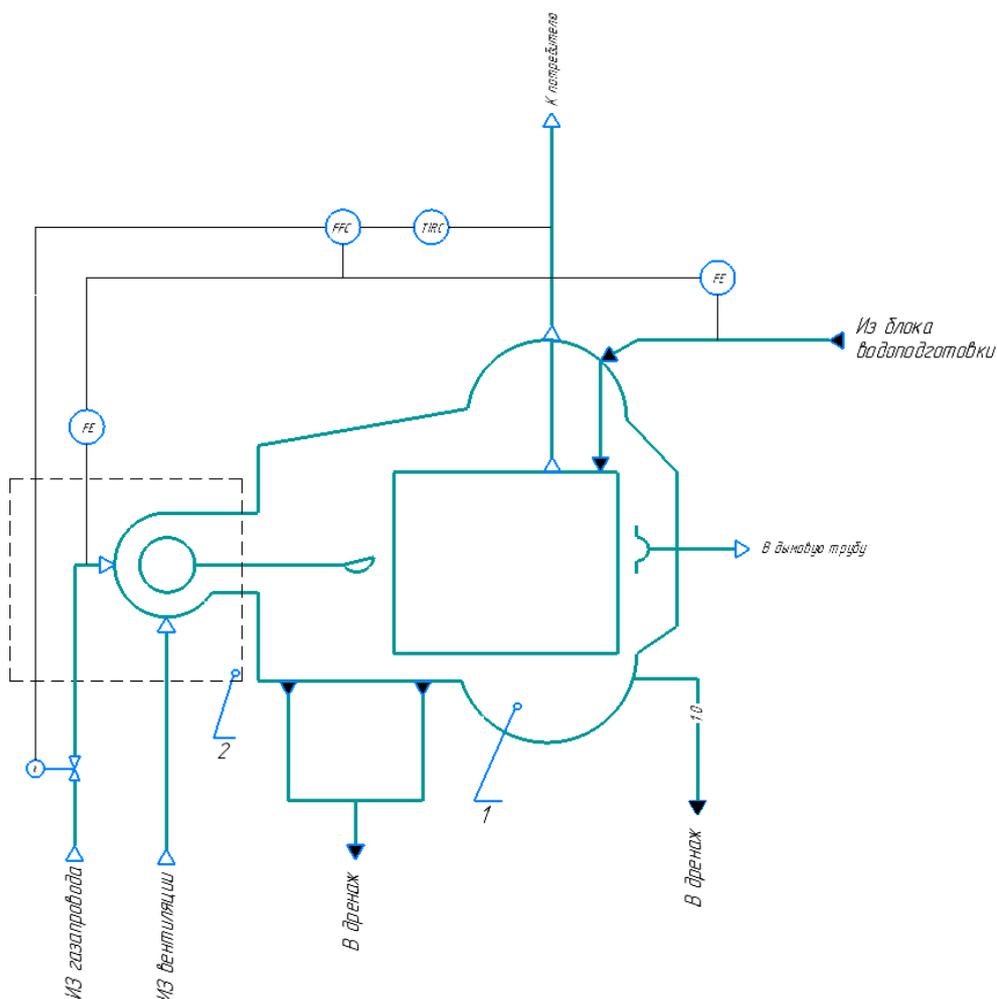


Рисунок 26. САР соотношения расходов воды и газа



Первый вариант можно считать оптимальным в том случае, когда основные возмущения поступают при изменении расходов газа и воды.

Работать такая система будет следующим образом: предположим, увеличивается расход газа, срабатывает регулятор соотношения и снижается приток газа до тех пор, пока не будет восстановлено заданное соотношение расходов.

Если возрастает приток воды, то срабатывает регулятор соотношения и возрастает приток газа до восстановления заданного соотношения расходов.

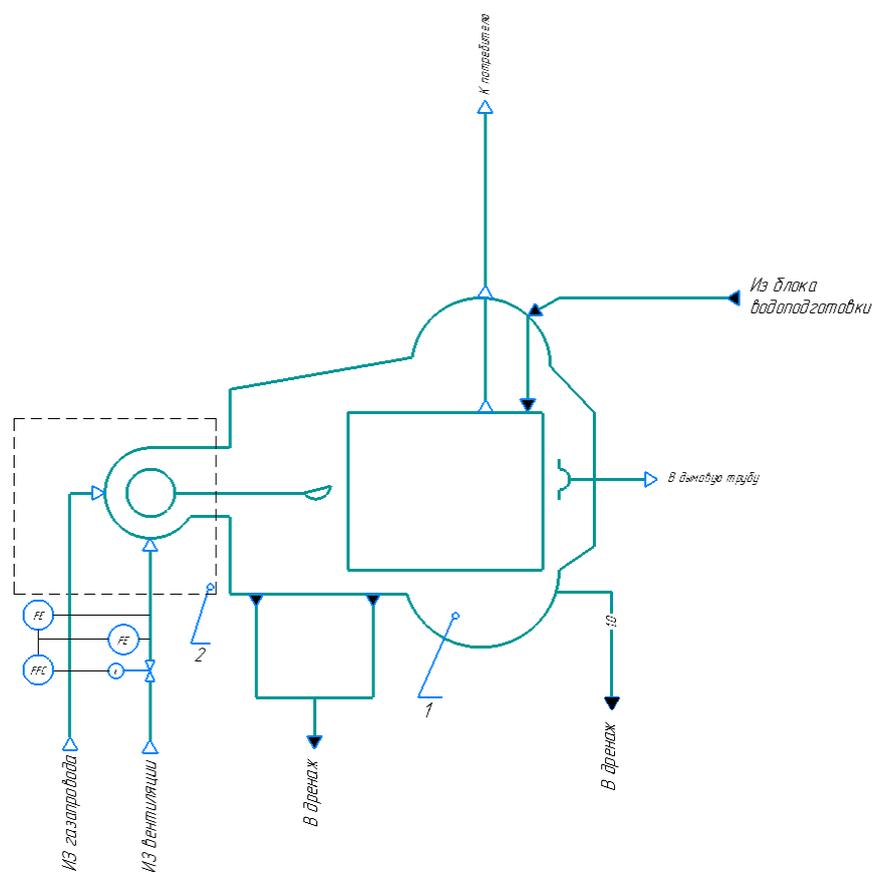


Рисунок 28. CAR соотношения расходов газа и воздуха  
путем изменения притока воздуха в котел

Если возрастает начальная температура воды, то это приведёт к возрастанию температуры пара на выходе из котла, сработает регулятор температуры и уменьшит задание регулятору соотношения расходов, а тот, в свою очередь, уменьшит приток газа до тех пор, пока соотношение расходов не станет равно заданному.

Там, где при изменении газа в печь поступают большие возмущения, лучше использовать второй вариант.

Такая система будет работать следующим образом: регулятор температуры внутри котла с минимальным запаздыванием будет реагировать на возмущения, поступающие в котел при изменении расхода и газа.

Если увеличить приток воды, то на вход регулятора температуры внутри котла (в камеру задания) поступит сигнал, пропорциональный расходу. Регулятор сработает, и увеличится приток газа ещё до того, как изменится температура пара на выходе из котла. На все остальные возмущения будет реагировать регулятор температуры на выходе из котла и в случае необходимости корректировать задание регулятору температуры над перевальной стенкой.

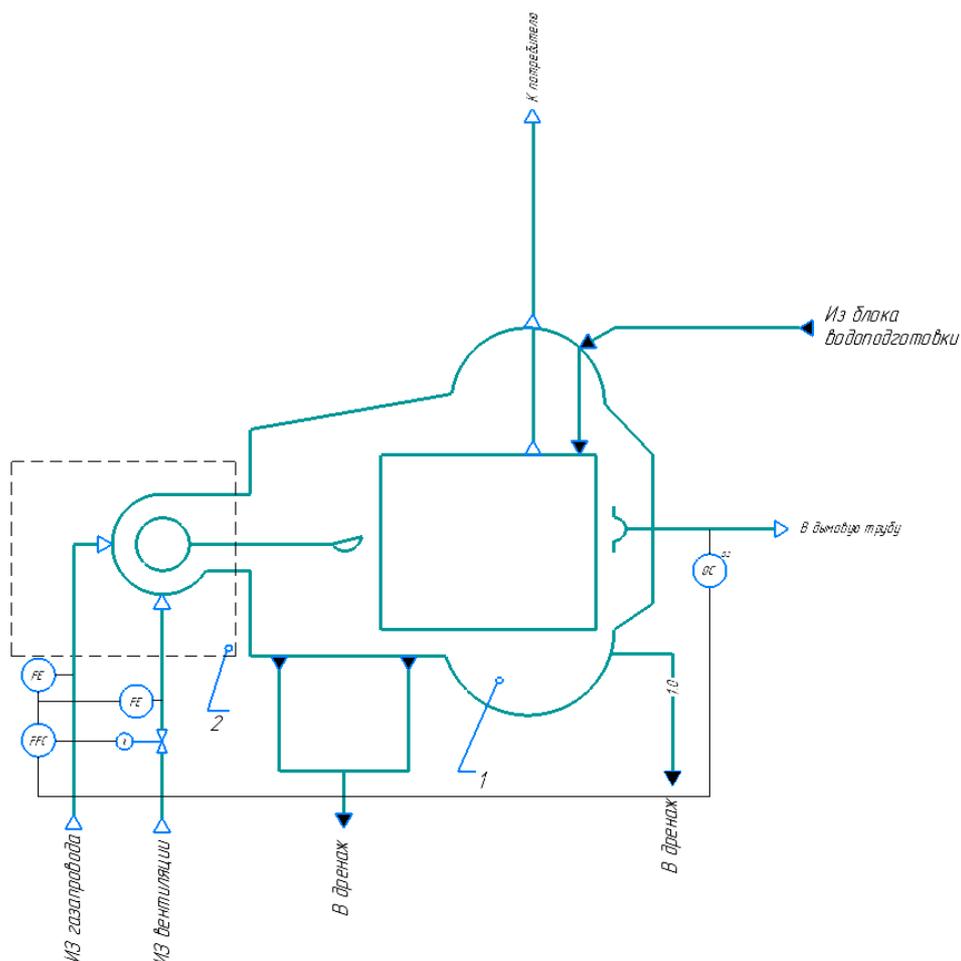


Рисунок 29. САР соотношения расходов газа и воздуха с коррекцией по содержанию кислорода в дымовых газах

Для обеспечения четвертого показателя эффективности процесса, с целью уменьшения энергетических затрат на процесс подготовки пара в котельной станции, необходимо регулировать соотношение расходов газа и воздуха путем изменения притока воздуха в котел (рис. 28). Уменьшение притока воздуха будет приводить к неполноте сгорания топлива, а увеличение притока воздуха – к увеличению потери тепла с дымовыми газами.

Если печь работает на различных видах топлива, то лучше выбрать САР соотношения расходов газа и воздуха путем изменения притока воздуха с коррекцией по содержанию кислорода в дымовых газах (рис. 29).

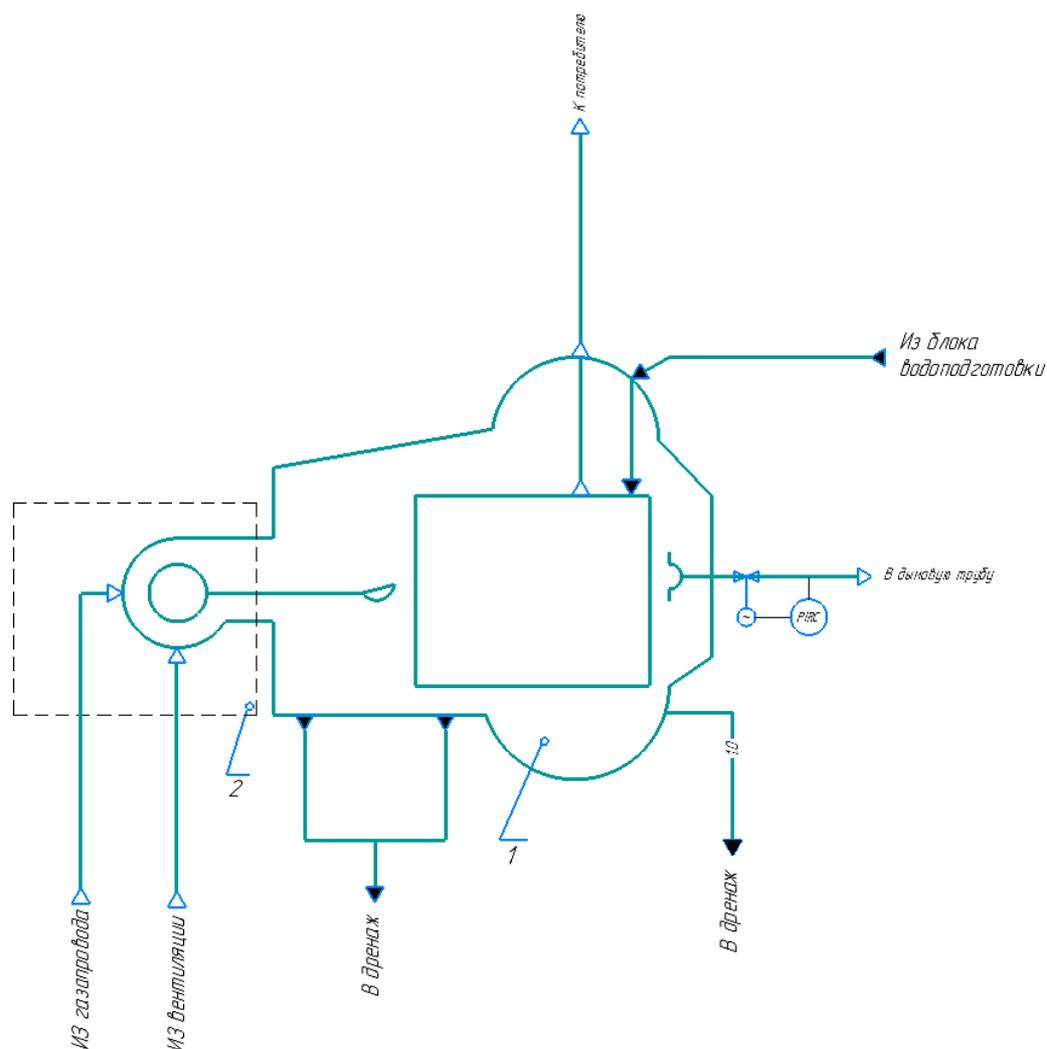


Рисунок 30. САР разрежения в топке

Для обеспечения эффективной и безопасной работы котла необходимо регулировать разрежение в котле путем изменения расхода дымовых газов (рис. 30). Если снижается разрежение, ухудшается вытяжка, и часть дымовых газов проникает в производственное помещение. Это, помимо того, что ухудшается процесс горения и содержание несгоревшего топлива в дымовых газах увеличивается. Возникает ситуация отравления обслуживающего персонала угарным газом.

Вывод: на основании проведенного анализа регулируемых параметров и каналов внесения регулирующих воздействий, был разработан типовой вариант системы автоматического управления процессом подготовки пара в котельной станции (рис. 31).

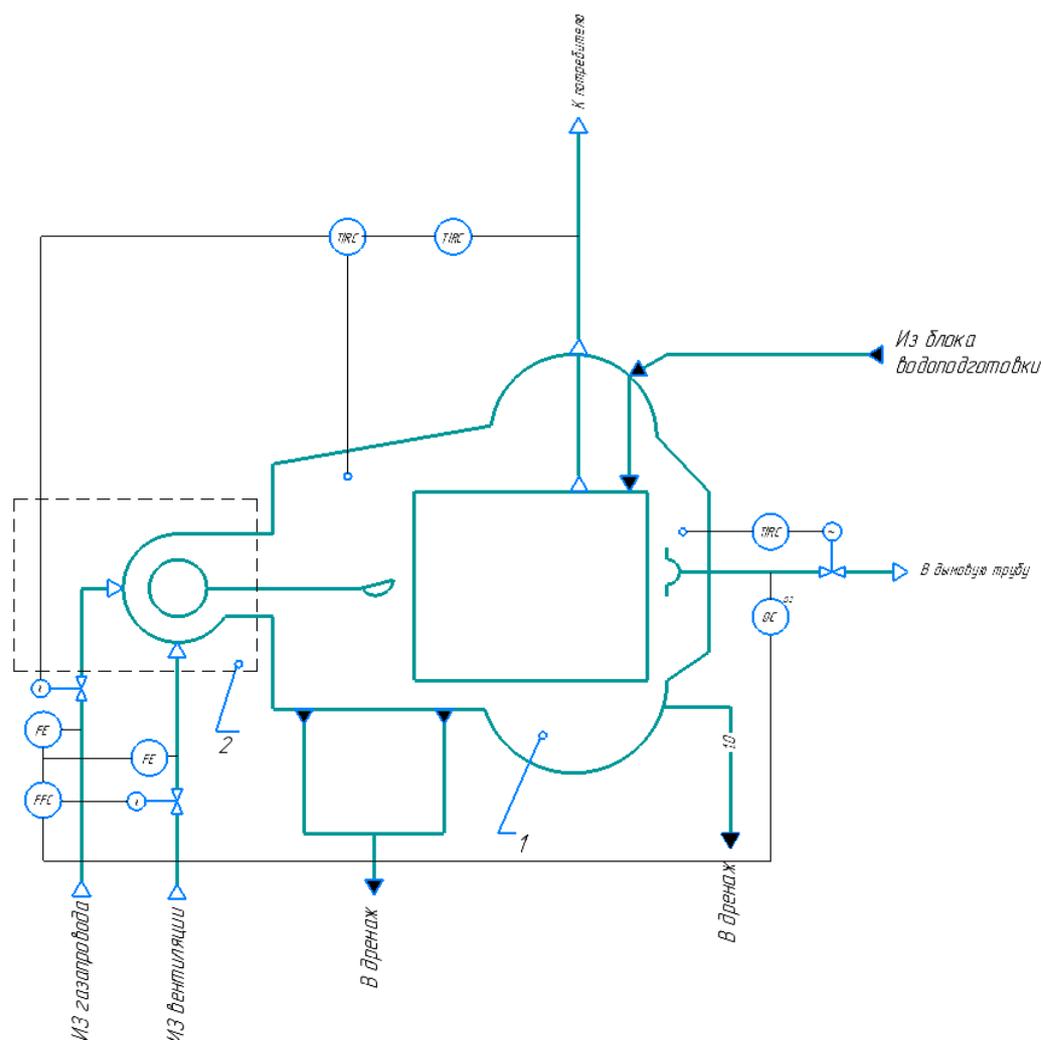


Рисунок 31. Типовая схема регулирования процессом

Для расчета численных значений коэффициентов регуляторов каскадной системы выбирается система регулирования расхода газа в котел с коррекцией по температуре пара на выходе из котла.

Расчет двухконтурной каскадной САУ с пропорциональными управляющими устройствами.

Структурная схема двухконтурной каскадной системы изображена на рисунке 32.

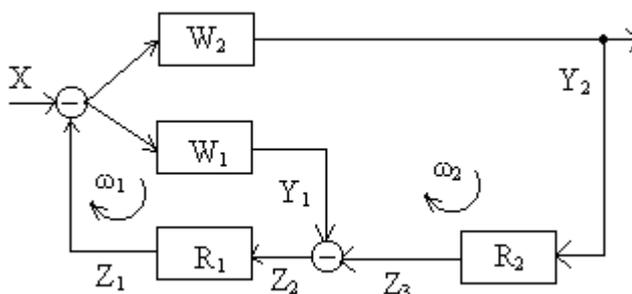


Рисунок 32. Структурная схема двухконтурной САУ

1) Исходные данные:

1.1. Передаточные функции объектов управления

- внутренний контур –  $W_1 = e^{-0,1P}$ ;

- внешний контур –  $W_2 = \frac{1}{(2P+1)(P+1)} e^{-10P}$

1.2. Передаточные функции управляющих устройств:

- внутренний контур –  $R_1 = k_{11}$ ;

- внешний контур –  $R_2 = k_{12}$ .

1.3. Надо определить числовые значения коэффициентов  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ .

2) Методика расчета

2.1. Для определения направления расчета находятся рабочие частоты всех контуров управления с помощью критерия устойчивости Найквиста:

$$M_o \cdot M_y = 1 \quad (9)$$

где  $M_o$  – модуль объекта;

$M_y$  – модуль управляющего устройства.

Или в частотной области:

$$\begin{cases} A_o \cdot A_y = 1 \\ F_o + F_y = \pi \end{cases} \quad (10)$$

где  $A_o, A_y$  – амплитудо-частотная характеристика объекта и управляющего устройства соответственно;

$F_o, F_y$  – фазо-частотная характеристика объекта и управляющего устройства соответственно.

Решение второго уравнения в системе (10) дает численное значение рабочей частоты. Геометрически – это точка пересечения ФЧХ объекта с прямой, проведенной на уровне  $\pi$ . Таким образом, рабочие частоты внутреннего и внешнего контуров имеют вид:  $\omega_1 = 3,14$ ;  $\omega_2 = 0,245$ .

2.2. Так как частота внешнего контура много больше частоты последующего контура, то расчет начинается с определения коэффициента  $k_{11}$  с использованием передаточной функции  $W_1$ . Для этого определяется амплитуда внутреннего объекта при рабочей частоте  $\omega_1 = 3,14$  по формуле:  $A_1(\omega_1) = k = 1$  (где  $k$  – коэффициент усиления объекта по основному каналу регулирования). Из первого уравнения системы (10) находится  $k_{11}$ :

$$A_y = \frac{1}{A_o} \Rightarrow k_1 = \frac{1}{A_1} = \frac{1}{1} = 1 \quad (11)$$

Определяется  $k_{12}$  внешнего контура с использованием передаточной функции:  $W_{R_2}^{экс} = \frac{R_1 \cdot W_2}{1 + R_1 \cdot W_1}$  или с подстановкой исходных данных:

$$W_{R_2}^{экс} = \frac{e^{-10P}}{2P^2 + 3P + 1 + 2P^2 e^{-P} + 3P e^{-P} + e^{-P}}. \quad \text{Далее находится эквивалентная}$$

рабочая частота (аналогично п. 2.1.):  $\omega_{экс} = 0,26$  и эквивалентная амплитуда:

$$A_{экс} = 0,4 \text{ (аналогично п. 2.2.)}. \text{ Тогда: } k_{12} = \frac{1}{0,4} = 2,5.$$

2.3. Поверочный расчет

Вновь рассчитывается внутренний контур и его коэффициент  $k_{11}$ , но для расчета используется передаточная функция вида:  $W_{R_1}^{\text{ЭКВ}} = W_2 R_2 - W_1$  или

$$W_{R_1}^{\text{ЭКВ}} = \frac{2e^{-10P} - 2P^2 e^{-10P} - 3Pe^{-10P} - e^{-10P}}{2P^2 + 3P + 1}. \text{ Таким образом: } \omega_1 = 0,24; A_1^{\text{ЭКВ}} = 2,7;$$

$$k_{11}^{\text{ЭКВ}} = 0,4.$$

Для определения окончания расчета, вычисляется относительная погрешность по формуле (5):

$$\delta = \frac{k_{11} - k_{11}^{\text{ЭКВ}}}{k_{11}} \cdot 100\%$$

В данном случае  $\delta = 60\%$ , что значительно превышает допустимые  $10\%$ . Следовательно, необходимо изменить численное значение внешней настройки  $k_1$ . Принимаем  $k_1 = 0,7$ . Тогда:

$$W_{R_1}^{\text{ЭКВ}} = \frac{0,7e^{-10P} - 2P^2 e^{-10P} - 3Pe^{-10P} - e^{-10P}}{2P^2 + 3P + 1}; \omega_1 = 0,13; A_1^{\text{ЭКВ}} = 0,86; k_{11}^{\text{ЭКВ}} = 1,1$$

и  $\delta = 9\% < 10\%$ . Следовательно, расчет можно закончить.

3) Ответ:  $k_{11} = 1,1$ ;

$$k_{12} = 0,7$$

Структурная схема с рассчитанными коэффициентами каскадной системы с П и И управляющими устройствами изображена на рисунке 33.

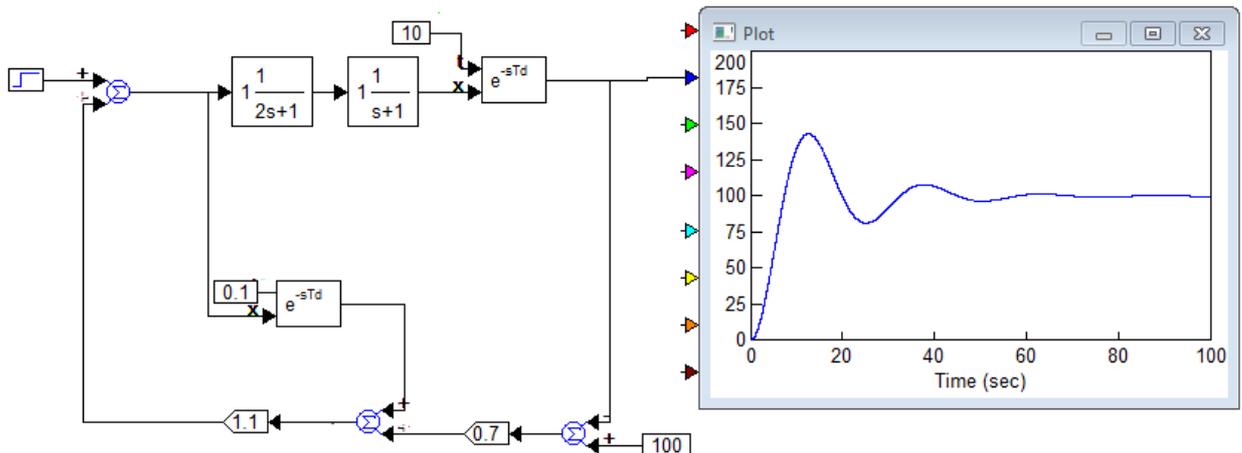


Рисунок 33. Структурная схема системы с рассчитанными коэффициентами П-регулятора

Качественный показатель переходного процесса (рис. 33), рассчитанный по формуле (7), составил 48 %. Что не соответствует эффективной работе системы.

Расчет двухконтурной каскадной САУ с пропорциональным и пропорционально-интегральным управляющими устройствами.

4) Исходные данные:

4.1. Передаточные функции объектов управления

- внутренний контур –  $W_1 = e^{-0,1P}$ ;

- внешний контур –  $W_2 = \frac{1}{(2P+1)(P+1)} e^{-10P}$

4.2. Передаточные функции управляющих устройств:

- внутренний контур –  $R_1 = k_{11}$ ;

- внешний контур –  $R_2 = k_{12} + \frac{k_{22}}{P}$ .

4.3. Надо определить числовые значения коэффициентов  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{22}$ .

5) Алгоритм расчета.

5.1. Расчет настроек функционирования внутреннего контура аналогичен примеру рассмотренному выше, т.е.  $k_{11} = 1$ .

5.2. Для определения параметров внешнего управляющего устройства по

передаточной функции  $W_{R_2}^{экс} = \frac{R_1 \cdot W_2}{1 + R_1 \cdot W_1}$  составляется система уравнений

Найквиста:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{R_2}^{экс} \cdot \frac{\sqrt{k_1^2 \omega^2 + k_2^2}}{\omega} = 1 \\ F_{R_2}^{экс} + \arctg \frac{k_1 \omega}{k_2} - \frac{\pi}{2} = \pi, \end{array} \right.$$

$$\text{где } A_{R_2}^{экс} = \frac{\sqrt{(-\sin 10\omega)^2 + (\cos 10\omega)^2}}{\sqrt{[3\omega(1 + \cos \omega) + \sin \omega(2\omega^2 - 1)]^2 + [(1 - 2\omega^2) \cdot (1 + \cos \omega) + 3\omega \sin \omega]^2}},$$

$$F_{R_2}^{экс} = -10\omega - \arctg \frac{[3\omega(1 + \cos \omega) + \sin \omega(2\omega^2 - 1)]}{(1 - 2\omega^2) \cdot (1 + \cos \omega) + 3\omega \sin \omega},$$

которая решается относительно коэффициентов  $k_{12}$  и  $k_{22}$  путем изменения численных значений  $\omega$ . Вычисления продолжаются до тех пор, пока не будет найден максимум в плоскости настроечных коэффициентов  $k_{12} = f(k_{22})$ . Частота, при которой это произошло, является максимальной  $\omega_M$  и используется для определения рабочей частоты по выражению  $\omega_2 = 1,1 \cdot \omega_M$ . При использовании исходных данных:  $\omega_M = 0,4$ ;  $\omega_2 = 0,44$  и  $k_{12} = 1,55$ ,  $k_{22} = 1$ .

### 5.3. Поверочный расчет

Вновь рассчитывается внутренний контур и его коэффициент  $k_{11}$ , но для расчета используется передаточная функция вида:  $W_{R_1}^{эКВ} = W_2 R_2 - W_1$  или

$$W_{R_1}^{эКВ} = \frac{e^{-10P} \cdot (1,55P + 1)}{2P^3 + 3P^2 + 1P} \cdot e^{-P}. \text{ Таким образом: } \omega_1 = 0,14; A_1^{эКВ} = 7,8; k_{11} = 0,13.$$

вычисленная по формуле (5) ошибка превышает установленные 10 %. Следовательно, необходимо изменить численное значение внешнего регулятора  $R_2$ . Принимаем  $k_{12} = 1$ ,  $k_{22} = 0,1$ . Тогда:  $\omega_1 = 6,3$ ;  $A_1^{эКВ} = 1,01$ ;  $k_{11} = 0,99$ ,  $\delta = 1 \%$ .

б) Ответ:  $k_{11} = 0,99$ ;

$$k_{12} = 1,$$

$$k_{22} = 0,1.$$

Структурная схема с рассчитанными коэффициентами каскадной системы с П и ПИ управляющими устройствами изображена на рисунке 34.

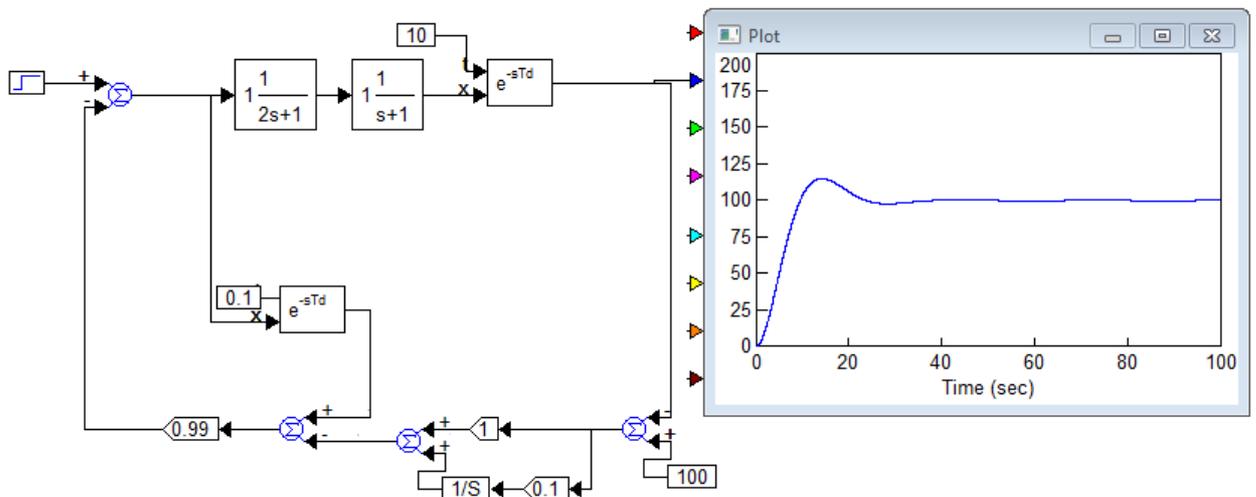


Рисунок 34. Структурная схема системы с рассчитанными коэффициентами П- и ПИ-регулятора

Качественный показатель переходного процесса (рис. 34), рассчитанный по формуле (7), составил 22 %. Это значение перерегулирования соответствует эффективной работе каскадной системы регулирования расхода газа в котел с коррекцией по температуре пара на выходе из котла. И при этом доказывает значительное улучшение качества переходного процесса при введении интегральной составляющей во внешний контур управления.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Волжский политехнический институт (филиал)  
федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет»  
(ВПИ (филиал) ВолгГТУ)**

Факультет \_\_\_\_\_ Автомеханический \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ Автоматика, электроника и вычислительная техника \_\_\_\_\_

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
к курсовой работе (проекту)**

по дисциплине «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ»

на тему: «Разработка и исследование оптимальной системы управления  
технологическим процессом», вариант № \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Руководитель работы (проекта) \_\_\_\_\_ Л.И. Медведева

Члены комиссии:

\_\_\_\_\_ А.А. Силаев \_\_\_\_\_  
(подпись и дата подписания) (инициалы и фамилия)

\_\_\_\_\_ А.В. Савчиц \_\_\_\_\_  
(подпись и дата подписания) (инициалы и фамилия)

\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись и дата подписания) (инициалы и фамилия)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Волжский политехнический институт (филиал)  
федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет»  
(ВПИ (филиал) ВолгГТУ)**

Факультет Автомеханический  
Кафедра Автоматика, электроника и вычислительная техника  
Специальность (направление) 15.04.04  
Дисциплина «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ»

Утверждаю  
зав. кафедрой  
А.А. Силаев  
(подпись) (инициалы, фамилия)  
«    » 20 23 г.

**ЗАДАНИЕ  
на курсовую работу**

Студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

1. Тема: «Разработка и исследование оптимальной системы управления технологическим процессом», вариант \_\_\_\_\_  
Утверждено приказом от \_\_\_\_\_
2. Срок предоставления проекта (работы) к защите \_\_\_\_\_
3. Содержание расчётно-пояснительной записки: задание; разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом с описанием основных показателей эффективности, целей управления, обоснованием выбора каналов внесения регулирующих воздействий, параметров регулирования, контроля, сигнализации; имитационное моделирование каскадной системы управления с целью определения оптимальных коэффициентов управляющего устройства; выводы.
4. Перечень графического материала \_\_\_\_\_
5. Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

Руководитель работы (проекта) \_\_\_\_\_ Л.И. Медведева  
(подпись и дата)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_  
(подпись и дата)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубятников В.А., Шувалов В.В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. – М.: Химия, 1972. – 248 с.
2. Полоцкий Л.М., Лапшенков Г.И. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации. – М.: Химия, 1982. – 296 с.
3. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев и др.: по ред. А.С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 347 с.
5. Автоматизация настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузищин, А.С. Ключев и др.; Под ред. В.Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 391 с.
6. Данилюк А.Г., Туманов М.П. Учет особенностей программной реализации алгоритмов управления и переменного запаздывания при разработке САУ на ЭВМ. // Приборы и системы управления, 1998, № 11. – С. 64-66.
7. Учебные материалы для студентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studme.org>. свободный – (дата обращения 15.04.2023)
8. Медведева Л.И. Шевчук В.П., Количественная оценка качества многоконтурных систем автоматического регулирования. / Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2003. №12. – С. 1-3.
9. Медведева, Л.И. Программно-аппаратный измерительный комплекс для исследования алгоритмов управления многосвязными объектами [Текст]: диссертация кандидата технических наук: 05.11.16: защищена 27.05.2004: утв. 12.11.2004/ Медведева Людмила Ивановна. – Волгоград, 2004. – 130 с.
10. Сенигов П.Н. Теория автоматического управления: Конспект лекций. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001 - 93с.

11. Теория автоматического управления, раздел «Линейные системы». Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств (легкая промышленность)»/ Министерство образования РБ, УО «ВГТУ». Сост.: к.т.н., доцент Иванова Л.В., ассистент Надёжная Н.Л., 2011.

Электронное учебное издание

Людмила Ивановна **Медведева**

**Математические основы теории управления.  
Выполнение курсовой работы**

*Учебное пособие*

*Электронное издание сетевого распространения*

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2023 г. Поз. № 26.

Подписано к использованию 13.06.2023. Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 4,5.

Волгоградский государственный технический университет.

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

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

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