

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н. М. Матвейчук, А. Г. Сеньков

**ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.
КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области автоматизации технологических процессов,
производств и управления в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования по специальности
1-53 01 01 Автоматизация технологических процессов и производств
направление специальности 1-53 01 01-09 Автоматизация
технологических процессов и производств (сельское хозяйство)*

Минск
БГАТУ
2018

УДК 681.5(07)

ББК 32.965я7

М33

Рецензенты:

кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники
УО «Белорусский государственный технологический университет»
(заведующий кафедрой кандидат технических наук, доцент *Д. С. Карпович*);
заведующий лабораторией РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации
сельского хозяйства», кандидат технических наук, доцент *В. В. Чумаков*

Матвейчук, Н. М.

М33

Теория автоматического управления. Курсовое проектирование : учебно-методическое пособие / Н. М. Матвейчук, А. Г. Сеньков. – Минск : БГАТУ, 2018. – 100 с.
ISBN 978-985-519-937-4.

Представлены методические рекомендации по выполнению курсовой работы: разработка математической модели объекта управления и ее линеаризация, определение передаточных функций объекта управления, моделирование переходных характеристик объекта управления с использованием пакета Matlab, составление функциональной и структурной схем синтезируемой системы, определение параметров регулятора с применением последовательного симплексного метода; приведен пример выполнения работы.

Для студентов специальности 1–53 01 01 Автоматизация технологических процессов и производств направления специальности 1–53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство).

УДК 681.5(07)

ББК 32.965я7

ISBN 978-985-519-937-4

© БГАТУ, 2018

Содержание

Введение	4
Цель, задачи и тематика курсовой работы.....	5
Структура и содержание курсовой работы	7
Методические рекомендации по выполнению курсовой работы.....	11
Требования к оформлению курсовой работы.....	59
Список рекомендованных источников	65
Приложение А.....	67
Приложение Б.....	97

Репозиторий БГАТУ

Введение

Теория автоматического управления является отраслью науки, в которой рассматриваются проблемы построения систем автоматического управления техническими объектами вне зависимости от их физической природы (механическими, электромеханическими, тепловыми, химико-технологическими и т. п.). Системы автоматического управления обеспечивают оптимизацию хода технологических процессов. За счет этого наиболее эффективно используются все виды ресурсов, повышается качество и увеличивается количество продукции, обеспечивается безопасность производства, повышается производительность труда. Управление техническим объектом состоит в выработке команд, реализация которых обеспечивает целенаправленное изменение состояния этого объекта при соблюдении заранее обусловленных требований и ограничений. Системы автоматического управления являются системами взаимодействующих между собой объекта управления и автоматического управляющего устройства (регулятора). В процессе работы регулятор получает текущую информацию о цели управления, а также информацию о текущем состоянии объекта и среды его функционирования и в соответствии с этой информацией формирует управляющие воздействия на объект так, чтобы была достигнута цель управления. При этом важным является характер преобразования сигналов объектами управления.

Теория автоматического управления при изучении процессов управления абстрагируется от физических и конструктивных особенностей систем и вместо реальных систем рассматривает их адекватные математические модели. Основными методами исследования в теории автоматического управления являются математическое и компьютерное моделирование, теория дифференциальных и логических уравнений.

Выполнение курсовой работы по дисциплине «Теория автоматического управления» направлено на формирование умения самостоятельно получать, перерабатывать и использовать теоретические знания для решения задачи синтеза систем автоматического управления технологическими процессами сельскохозяйственного производства.

Цель, задачи и тематика курсовой работы

Целью выполнения курсовой работы является развитие у студентов навыков самостоятельной творческой работы, овладение методами современных научных исследований, углубленное изучение математического описания звеньев и систем автоматического управления, постановки и решения задачи синтеза системы автоматического управления.

Задачами курсовой работы как этапа подготовки к дипломному проектированию являются:

– освоение, углубление, обобщение и проверка теоретических знаний и практических навыков разработки и анализа систем автоматического регулирования;

– формирование умений использовать справочную литературу, нормативную, правовую, нормативно-техническую документацию, осуществлять патентный поиск.

Тематика курсовой работы

Курсовая работа посвящена *разработке системы автоматического регулирования*.

Регулирование является частным случаем управления. Система автоматического регулирования (САР) – замкнутые системы (работающие по отклонению или по принципу комбинированного управления), в которых управляемая величина стабилизируется, изменяется по заданной программе или в соответствии с произвольным, заранее неизвестным задающим воздействием.

Выбор темы курсовой работы производится в соответствии с таблицей 1.

В таблице 1 приведены: объект управления; управляемая величина, значение которой необходимо стабилизировать; вид типового звена, которым описывается объект управления; закон регулирования, в соответствии с которым должна быть синтезирована система автоматического регулирования.

Номинальное значение управляемой величины равно 1 (для всех вариантов), возмущающего воздействия – 0,5 единиц.

Таблица 1 – Выбор темы курсовой работы

№	Объект управления	Управляемая величина/ возмущающее воздействие	Управляющее воздействие	Вид звена	Закон регулирования
1	Верхний резервуар	Уровень воды в резервуаре/ степень открытия запорного клапана на стоке	Напор, создаваемый насосом	Интегрирующее звено	Пропорциональный
2					Пропорционально-интегрально-дифференциальный
3					Двухпозиционный
4					Пропорциональный
5					
6					Двухпозиционный
7	Нижний резервуар	Уровень воды в резервуаре/ степень открытия запорного клапана на притоке	Напор, создаваемый насосом	Интегрирующее звено	Пропорциональный
8					Пропорционально-интегрально-дифференциальный
9					Двухпозиционный
10					Пропорциональный
11					
12					Двухпозиционный
13	Шкаф сушильный	Температура воздуха в сушильном шкафу/ температура наружного воздуха	Электрическая мощность электронагревателя	Апериодическое звено 1-го порядка	Пропорциональный
14					Пропорционально-интегрально-дифференциальный
15					Двухпозиционный
16	Шкаф сушильный с емкостью с водой	Температура воды в сушильном шкафу/ температура наружного воздуха		Апериодическое звено 2-го порядка	Пропорциональный
17					Пропорционально-интегрально-дифференциальный
18					Двухпозиционный
19	Шкаф сушильный с двумя емкостями с водой			Апериодическое звено 1-го порядка	Пропорциональный
20					Пропорционально-интегрально-дифференциальный
21					Двухпозиционный

Полностью исходные данные для курсовой работы приводятся в индивидуальном задании, которое выдается преподавателем (пример задания на курсовую работу приведен в приложении А).

Структура и содержание курсовой работы

Структура курсовой работы определяется учебной программой дисциплины и должна включать следующие элементы (материалы приведены в порядке их расположения):

- титульный лист;
- задание;
- реферат;
- содержание;
- введение;
- текст расчетно-пояснительной записки с иллюстративным материалом, таблицами, графиками и т. п.;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

Общий объем курсовой работы составляет 25–30 машинописных страниц.

Способ выполнения текстовых материалов – машинописный (основной) с применением выходных печатающих устройств ЭВМ. При этом рекомендуется, набирая текст в текстовом редакторе Word, использовать шрифты Times New Roman размером 14 pt (пунктов) с полуторным интервалом, выравнивание – по ширине, абзацный отступ – 1,25 см;

1. **Титульный лист** является первой страницей расчетно-пояснительной записки. Выполняется на бланке установленной формы. На титульном листе рамки не выполняются, штамп основной надписи не приводят.

2. **Задание на выполнение курсовой работы** оформляется на бланке установленного образца, который выдается руководителем курсовой работы. Задание на утверждается заведующим кафедрой. При получении задания свою подпись на нем ставит студент. Форма задания на курсовую работу приведена в [21].

3. **Реферат** – это краткая характеристика выполненного проекта, предназначенная для предварительного ознакомления с проектом и отражающая основное содержание работы с точки зрения ее достоинств и достижения цели, поставленной в теме проекта.

Текст реферата пишется на стандартном листе, оформленном рамкой. Основную надпись на данном листе не помещают. Номер страницы не проставляют.

Заголовок «Реферат» пишется с прописной буквы и располагается на отдельной строке симметрично тексту. Объем реферата – не более одной страницы. Вначале указывают объем проектной документации: перечисляют общий объем текстовых материалов с выделением в том числе иллюстраций (эскизов, рисунков, таблиц и т. п.); указывают объем графической части работы. Указывают количество использованных источников. Далее приводят ключевые слова. Перечень ключевых слов должен включать от 5 до 15 слов или словосочетаний из текста расчетно-пояснительной записки, которые в наибольшей степени характеризуют содержание. Ключевые слова приводятся в именительном падеже и записываются строчными буквами в строку через запятые после слов «Ключевые слова». Затем дают краткое содержание, отражающее цель работы, методы разработки, принятые решения, приводят итоговые результаты и основные показатели, указывают возможности внедрения основных результатов.

Образец реферата приведен в [21].

4. **Содержание** предназначено для облегчения поиска необходимых материалов при чтении записки, а также для общего ознакомления с работой и представления об объемах всех разделов. Содержание начинает текстовую часть расчетно-пояснительной записки. Его размещают сразу после листа реферата с новой страницы и при необходимости продолжают на последующих листах. Слово «Содержание» пишут с прописной буквы посередине страницы. В содержании приводят порядковые номера и наименования разделов, подразделов и пунктов, имеющих наименование, а также приложения с их обозначениями и наименованиями. Указывается номер листа (страницы), на котором размещено начало материала (раздела, подраздела и т. п.). На первой странице содержания приводят основную надпись по форме, соответствующей основной надписи первого листа текстового материала. Пример оформления оглавления приведен в [21].

5. **Введение** характеризует современное содержание тех вопросов и проблем, которым посвящена курсовая работа. Во введении нужно обосновать необходимость проведения именно этой работы, показать ее место в кругу аналогичных, актуальность и новизну разрабатываемой темы, цель работы и что ожидается получить в результате ее выполнения.

6. **Текст расчетно-пояснительной записки.** Содержание разделов расчетно-пояснительной записки определяется заданием. Оформление расчетно-пояснительной записки осуществляется в соответствии с [21].

7. **Заключение** должно отражать основные результаты работы, выводы и предложения.

8. Список использованных источников. Завершением курсовой работы является составление списка использованных источников, основой для которого служат записи всех просмотренных и изученных книг, статей из сборников и журналов и других материалов.

Как правило, используется алфавитный способ группировки материала в списках, когда источники группируют в алфавитном порядке записей. В начале списка размещаются по алфавиту книги, а затем – статьи из журналов и сборников. При этом иностранные источники размещают по алфавиту после перечня всех источников на языке выполняемой работы.

Библиографический указатель использованной при выполнении литературы дается на отдельной странице (страницах) под заголовком «Список использованных источников». Заголовок порядкового номера не имеет.

В список включают только те источники, на которые в тексте расчетно-пояснительной записки имеется ссылка. Каждый источник, включенный в список, нумеруют арабскими цифрами с точкой и записывают с новой строки.

Примеры записи литературных источников приведены в [21].

9. Приложения. Материал, дополняющий текст документа, допускается помещать в приложениях. Приложениями могут быть, например, графический материал, таблицы большого формата, расчеты, описания аппаратуры и приборов, описания алгоритмов и программ задач, решаемых на ЭВМ, и т. д.

Приложения оформляют как продолжение записки на последующих ее листах.

В тексте записки на все приложения должны быть даны ссылки. Приложения располагают в порядке ссылок на них в тексте записки.

Расчетно-пояснительная записка должна быть сброшюрованной, выполненной в папке со скоросшивателем и прозрачной первой страницей.

Содержание расчетно-пояснительной записки к курсовой работе должно включать следующие разделы:

1. Исходные данные.
2. Разработка математической модели объекта управления и ее линеаризация.
3. Решение дифференциального уравнения, описывающего объект управления, и определение передаточных функций объекта управления.
4. Экспериментальное определение численных значений параметров передаточных функций объекта управления.
5. Моделирование переходных характеристик объекта управления.
6. Разработка функциональной и структурной схем системы автоматического регулирования и постановка задачи синтеза.

7. Определение параметров регулятора с применением последовательного симплекс-метода.

8. Моделирование переходных характеристик системы автоматического регулирования и определение показателей качества регулирования.

Графическая часть курсовой работы должна включать три листа формата А4:

- функциональную схему системы автоматического регулирования;
- структурную схему системы автоматического регулирования;
- компьютерную динамическую модель системы автоматического регулирования в среде Simulink.

Методические рекомендации по выполнению курсовой работы

Приведем краткое описание каждого раздела *расчетно-пояснительной записки* к курсовой работе.

1 Исходные данные

В этом разделе должны быть приведены: краткое описание объекта управления в соответствии с темой и заданием на курсовую работу (пример задания приведен в приложении А), рисунок объекта управления, указаны управляемая (z) и управляющая (x_1) величины, возмущающее воздействие (x_2), устройство управления (регулятор).

Пусть рассматриваемым объектом управления является *сушильный шкаф с электронагревателем внутри* (рисунок 1).

В этом случае управляемая величина z – это температура воздуха θ в сушильном шкафу, °С. Для ее измерения в шкафу имеется датчик – термосопротивление, которое преобразует значение температуры θ в электрический сигнал – сопротивление R_d , Ом.

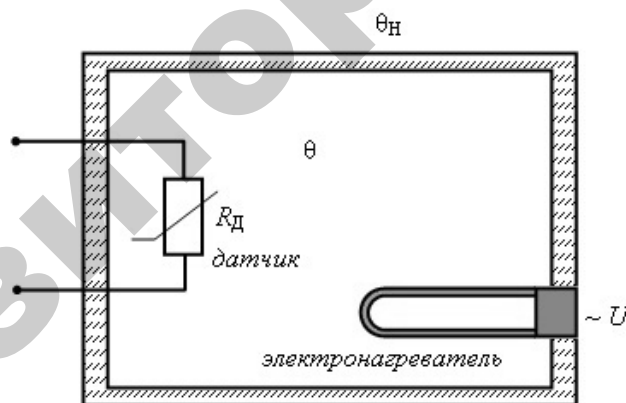


Рисунок 1 – Схематическое изображение сушильного шкафа с датчиком и нагревателем внутри как объекта управления

Для обогрева воздуха в сушильном шкафу установлен электронагреватель, и, соответственно, управляющим воздействием x_1 является электрическая мощность электронагревателя P , Вт. Возмущающим воздействием x_2 на объект управления является изменение наружной температуры воздуха θ_n , °С. Устройством управления является электронный микропроцессорный блок управления, реализованный на основе персональной ЭВМ.

Для случая, когда *объектом управления является резервуар с водой*, пример описания исходных данных приведен в приложении А (другие объекты рассматриваются аналогично).

2 Разработка математической модели объекта управления и ее линеаризация

В этом разделе составляется уравнение материального (теплового) баланса, на его основе разрабатывается нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее рассматриваемый процесс в объекте управления, вида

$$\frac{dz}{dt} = f(z, x_1, x_2). \quad (1)$$

Определяется рабочая точка для статического режима (исходя из условия):

$$z = z^0 = \text{const}, \quad x_1 = x_1^0 = \text{const}, \quad x_2 = x_2^0 = \text{const},$$

и рассматривается статический режим вблизи рабочей точки, при этом $\frac{dz}{dt} = 0$, то есть

$$f(z_0, x_1^0, x_2^0) = 0.$$

Если полученное дифференциальное уравнение (1) является нелинейным, проводится его линеаризация путем разложения в ряд Тейлора и отбрасывания нелинейных членов:

$$\frac{dz}{dt} = f(z, x_1, x_2) \approx f(z_0, x_1^0, x_2^0) + \left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_0 \cdot \frac{z - z_0}{1!} + \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_0 \cdot \frac{x_1 - x_1^0}{1!} + \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_0 \cdot \frac{x_2 - x_2^0}{1!}. \quad (2)$$

Далее рассматривается полученное уравнение в отклонениях от рабочей точки:

$$\begin{aligned} z^* &= z - z_0, \\ x_1^* &= x_1 - x_1^0, \\ x_2^* &= x_2 - x_2^0. \end{aligned}$$

Тогда линеаризованное дифференциальное уравнение имеет вид

$$\frac{dz^*}{dt} = a z^* + b_1 x_1^* + b_2 x_2^*, \quad (3)$$

где $a = \left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_0$, $b_1 = \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_0$, $b_2 = \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_0$.

Окончательно выражение (3) может быть преобразовано к следующему виду:

$$T \frac{dz^*}{dt} + z^* = K_1 x_1^* + K_2 x_2^*, \quad (4)$$

где $T = -\frac{1}{a}$ – постоянная времени объекта, с;

$K_1 = -\frac{b_1}{a}$, $K_2 = -\frac{b_2}{a}$ – коэффициенты преобразования (усиления) объекта,

размерности которых равны отношению размерностей выходной и входной величин объекта.

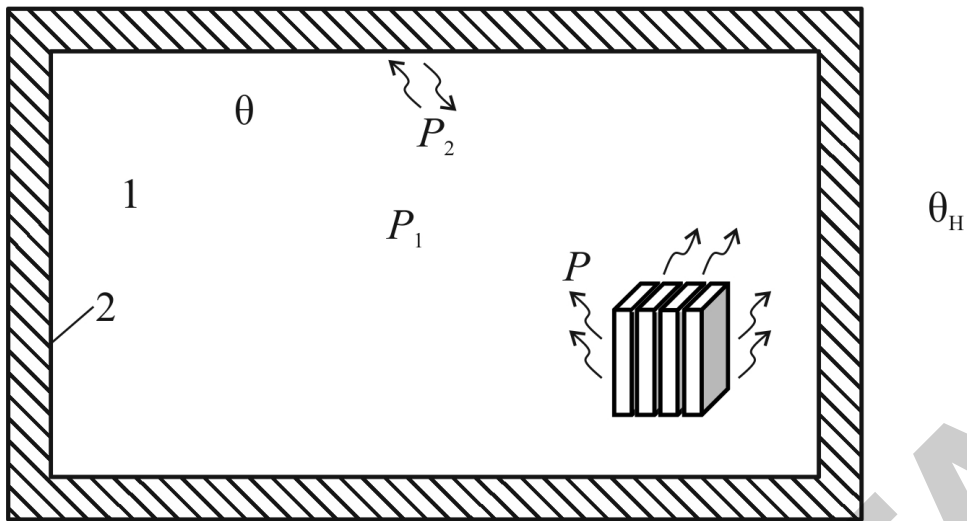
Рассмотрим *получение математической модели в случае, когда объектом управления является сушильный шкаф с электронагревателем внутри* (рисунок 2).

Значение температуры воздуха в сушильном шкафу θ , °С, (выходная величина) зависит от двух величин (входные величины): мощности работающего электронагревателя P , Вт, и температуры наружного воздуха θ_n , °С:

$$\theta = f(P, \theta_n).$$

В общем случае эта зависимость определяется уравнением теплопроводности и является весьма сложной. Распределение температуры внутри сушильного шкафа неоднородно и зависит от места расположения нагревателя, от геометрических размеров шкафа, от материала и толщины стен, наличия дверцы и т. д.

Поэтому в нашем случае получим упрощенное математическое описание сушильного шкафа как объекта регулирования температуры. Для этого будем руководствоваться простейшими сведениями из области теплофизики и теплообмена.



1 – воздушный объем внутри шкафа; 2 – стенки шкафа;

θ – температура воздуха в сушильном шкафу, °С; θ_n – температура наружного воздуха, °С;

P – тепловая мощность электронагревателя, Вт;

P_1 – тепловая мощность, поглощаемая воздухом внутри шкафа, Вт;

P_2 – тепловая мощность, рассеиваемая наружу, Вт

Рисунок 2 – Сушильный шкаф как объект управления

В процессе нагрева сушильного шкафа одна часть тепловой мощности электронагревателя, обозначим ее P_1 , Вт, расходуется на увеличение температуры в шкафу:

$$P_1 = c \frac{d\theta}{dt}, \quad (5)$$

где c – теплоемкость шкафа, Дж/°С.

Другая часть тепловой мощности электронагревателя, P_2 , Вт, – рассеивается наружу путем передачи тепла через стены. В соответствии с известным законом Ньютона-Рихмана, количество теплоты, передаваемое конвективным теплообменом, прямо пропорционально разности температур поверхности тела и окружающей среды. Таким образом, часть мощности, рассеиваемая наружу, определяется выражением¹

$$P_2 = \frac{1}{\rho} S (\theta - \theta_n), \quad (6)$$

¹ В целях упрощения расчетов предполагаем, что распределение температуры внутри сушильного шкафа однородно, а температура стен равна температуре воздуха внутри шкафа.

где ρ – коэффициент сопротивления стен шкафа теплотерям (зависит от материала и толщины стен), $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

S – площадь стен шкафа, м^2 .

Учитывая, что сумма обеих мощностей, определяемых по формулам (5) и (6), равна мощности электронагревателя, получим

$$c \frac{d\theta}{dt} + \frac{S}{\rho} (\theta - \theta_n) = P. \quad (7)$$

Преобразовав выражение (7) таким образом, чтобы все члены, содержащие выходную величину (температура θ), располагались в левой части уравнения, а входные величины (P и θ_n) – в правой части, получим в итоге математическое описание рассматриваемого объекта управления:

$$c \frac{d\theta}{dt} + \frac{S}{\rho} \theta = P + \frac{S}{\rho} \theta_n. \quad (8)$$

Уравнение (8) является дифференциальным уравнением первого порядка, так как содержит оператор дифференцирования первого порядка – производную $\frac{d\theta}{dt}$. При этом оно является линейным, так как и входные, и выходные величины состоят в нем в виде линейных слагаемых.

Далее необходимо учесть начальные условия. Для этого будем полагать, что в начальный момент времени ($t = 0$) объект управления (сушильный шкаф) находится в статическом режиме, соответствующем рабочей точке:

– температура воздуха в шкафу постоянна и равна заданному значению:

$$\theta(t=0) = \theta_s = \theta_0; \quad (9)$$

– наружная температура воздуха постоянна:

$$\theta_n(t=0) = \theta_{n0}; \quad (10)$$

– электронагреватель работает, его мощность постоянна:

$$P(t=0) = P_0. \quad (11)$$

Из постоянства температуры в сушильном шкафу следует, что $\frac{d\theta_0}{dt} = 0$, и для статического режима уравнение (8) принимает вид

$$\frac{S}{\rho}\theta_0 = P_0 + \frac{S}{\rho}\theta_{н0}. \quad (12)$$

При этом вся тепловая мощность P электронагревателя рассеивается наружу через стены.

Далее, в качестве управляемой величины, управляющего и возмущающего воздействий будем рассматривать не абсолютные значения θ , P и θ_n , а их отклонения от начальных значений (9)–(11):

$$\begin{aligned} \theta^* &= \theta - \theta_0, \\ P^* &= P - P_0, \\ \theta_n^* &= \theta_n - \theta_{н0}. \end{aligned}$$

Выразив отсюда θ , P и θ_n , получим

$$\begin{aligned} \theta &= \theta^* + \theta_0, \\ P &= P^* + P_0, \\ \theta_n &= \theta_n^* + \theta_{н0}. \end{aligned} \quad (13)$$

Подставив выражения (13) в выражение (8), получим

$$c \frac{d(\theta^* + \theta_0)}{dt} + \frac{S}{\rho}(\theta^* + \theta_0) = P^* + P_0 + \frac{S}{\rho}(\theta_n^* + \theta_{н0}).$$

Так как выполняется соотношение $\frac{d(\theta^* + \theta_0)}{dt} = \frac{d\theta^*}{dt}$, можно преобразовать полученное выражение следующим образом:

$$c \frac{d\theta^*}{dt} + \frac{S}{\rho}\theta^* = P^* + \frac{S}{\rho}\theta_n^* + \left(P_0 + \frac{S}{\rho}\theta_{н0} - \frac{S}{\rho}\theta_0 \right).$$

Тогда, с учетом (12), получаем, что выражение в скобках равно нулю, откуда

$$c \frac{d\theta^*}{dt} + \frac{S}{\rho} \theta^* = P^* + \frac{S}{\rho} \theta_n^*. \quad (14)$$

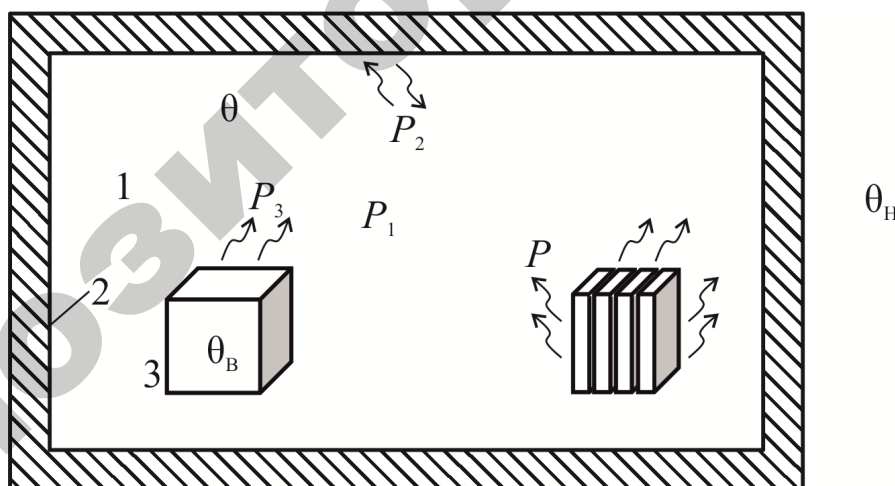
Преобразовав выражение (14) таким образом, чтобы коэффициент при θ^* был равен 1, окончательно получаем следующее математическое описание объекта управления (сушильного шкафа) в форме (4):

$$T \frac{d\theta^*}{dt} + \theta^* = K P^* + \theta_n^*, \quad (15)$$

где $T = \frac{c\rho}{S}$ – постоянная времени, с;

$K = \frac{\rho}{S}$ – коэффициент преобразования (усиления), °С/Вт.

Пусть теперь объектом управления является *сушильный шкаф с помещенной в него емкостью с водой* (рисунок 3).



1 – воздушный объем внутри шкафа; 2 – стенки шкафа; 3 – емкость с водой внутри шкафа;

θ_n – температура наружного воздуха, °С; θ – температура воздуха в сушильном шкафу, °С;

θ_B – температура воды, °С; P – тепловая мощность электронагревателя, Вт;

P_1 – тепловая мощность, поглощаемая воздухом внутри шкафа, Вт;

P_2 – тепловая мощность, рассеиваемая наружу, Вт;

P_3 – тепловая мощность, поглощаемая емкостью с водой, Вт

Рисунок 3 – Сушильный шкаф с помещенной в него емкостью с водой как объект управления

В этом случае выходной величиной является значение температуры воды в сушильном шкафу $\theta_{\text{в}}$, °С, которая также зависит от двух величин (входные величины): мощности работающего электронагревателя P , Вт, и температуры наружного воздуха $\theta_{\text{н}}$, °С:

$$\theta_{\text{в}} = f(P, \theta_{\text{н}}).$$

При этом, аналогично предыдущему примеру, часть тепловой мощности электронагревателя P_1 , Вт, расходуемая на увеличение температуры в шкафу, выражается в виде формулы (5), а часть тепловой мощности электронагревателя P_2 , Вт, рассеиваемая наружу путем передачи тепла через стены – в виде формулы (6).

Еще одна часть мощности нагревателя (обозначим ее P_3 , Вт) будет направлена на увеличение температуры воды:

$$P_3 = c_{\text{в}} \frac{d\theta_{\text{в}}}{dt}, \quad (16)$$

где $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воды, Дж/°С.

Учитывая, что сумма всех трех мощностей равна мощности электронагревателя ($P = P_1 + P_2 + P_3$), получим

$$c \frac{d\theta}{dt} + \frac{S}{\rho} (\theta - \theta_{\text{н}}) + c_{\text{в}} \frac{d\theta_{\text{в}}}{dt} = P. \quad (17)$$

Однако уравнение (17) кроме необходимых входных (управляющей P и возмущающей $\theta_{\text{н}}$) и выходной ($\theta_{\text{в}}$) величин содержит также неизвестную величину температуры воздуха в сушильном шкафу θ . Выразим ее.

Поскольку увеличение температуры воды происходит вследствие конвективного теплообмена с воздухом, можем снова воспользоваться законом Ньютона-Рихмана. Тогда количество теплоты P_3 , полученное емкостью с водой, может быть также выражено в виде

$$P_3 = \frac{1}{\rho_{\text{в}}} S_{\text{в}} (\theta - \theta_{\text{в}}), \quad (18)$$

где ρ_B – коэффициент сопротивления воды теплопотерям, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

S_B – площадь поверхности емкости с водой, м^2 .

Заметим, что при расчетах мы пренебрегаем теплообменом со стенками емкости, в которой находится вода.

Приравняв правые части выражений (16) и (18), получим

$$c_B \frac{d\theta_B}{dt} = \frac{1}{\rho_B} S_B (\theta - \theta_B),$$

или

$$c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{d\theta_B}{dt} = \theta - \theta_B,$$

откуда

$$\theta = c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{d\theta_B}{dt} + \theta_B. \quad (19)$$

Для производной соответственно получаем

$$\frac{d\theta}{dt} = c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{d^2\theta_B}{dt^2} + \frac{d\theta_B}{dt}. \quad (20)$$

Подставив выражения (19) и (20) в уравнение (17), получим

$$c \left(c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{d^2\theta_B}{dt^2} + \frac{d\theta_B}{dt} \right) + \frac{S}{\rho} \left(c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{d\theta_B}{dt} + \theta_B - \theta_H \right) + c_B \frac{d\theta_B}{dt} = P,$$

или, раскрыв скобки

$$c \cdot c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{d^2\theta_B}{dt^2} + c \frac{d\theta_B}{dt} + \frac{S}{\rho} c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{d\theta_B}{dt} + \frac{S}{\rho} \theta_B - \frac{S}{\rho} \theta_H + c_B \frac{d\theta_B}{dt} = P. \quad (21)$$

Преобразовав уравнение (21) таким образом, чтобы все члены, содержащие выходную величину (температура воды θ_B), располагались в левой части уравнения,

а входные величины (P и $\theta_{\text{н}}$) – в правой части, получим следующее математическое описание рассматриваемого объекта управления:

$$c \cdot c_{\text{в}} \frac{\rho_{\text{в}}}{S_{\text{в}}} \frac{d^2\theta_{\text{в}}}{dt^2} + \left(c + \frac{S}{\rho} c_{\text{в}} \frac{\rho_{\text{в}}}{S_{\text{в}}} + c_{\text{в}} \right) \frac{d\theta_{\text{в}}}{dt} + \frac{S}{\rho} \theta_{\text{в}} = P + \frac{S}{\rho} \theta_{\text{н}}. \quad (22)$$

Полученное уравнение (22) является линейным дифференциальным уравнением второго порядка.

Далее необходимо учесть начальные условия. Для этого будем полагать, что в начальный момент времени ($t=0$) объект управления (сушильный шкаф) находится в статическом режиме, соответствующем рабочей точке:

температура воды в шкафу постоянна и равна заданному значению:

$$\theta_{\text{в}}(t=0) = \theta_{\text{в}0}; \quad (23)$$

наружная температура воздуха постоянна:

$$\theta_{\text{н}}(t=0) = \theta_{\text{н}0}; \quad (24)$$

электронагреватель работает, его мощность постоянна:

$$P(t=0) = P_0. \quad (25)$$

Из постоянства температуры воды в сушильном шкафу следует $\frac{d^2\theta_{\text{в}0}}{dt^2} = \frac{d\theta_{\text{в}0}}{dt} = 0$, и для статического режима уравнение (22) принимает вид

$$\frac{S}{\rho} \theta_{\text{в}0} = P_0 + \frac{S}{\rho} \theta_{\text{н}0}. \quad (26)$$

При этом вся тепловая мощность P электронагревателя рассеивается наружу через стены.

Далее, в качестве управляемой величины, управляющего и возмущающего воздействий будем рассматривать не абсолютные значения $\theta_{\text{в}}$, P и $\theta_{\text{н}}$, соответственно, а их отклонения от начальных значений (23)–(25), соответствующих статическому режиму:

$$\begin{aligned}
\theta_B^* &= \theta_B - \theta_0, \\
P^* &= P - P_0, \\
\theta_H^* &= \theta_H - \theta_{H0}.
\end{aligned}
\tag{27}$$

Выразим из выражений (27) θ_B , P и θ_H :

$$\begin{aligned}
\theta_B &= \theta_B^* + \theta_0, \\
P &= P^* + P_0, \\
\theta_H &= \theta_H^* + \theta_{H0},
\end{aligned}
\tag{28}$$

и подставив выражения (28) в выражение (22), получим

$$\begin{aligned}
c \cdot c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{d^2(\theta_B^* + \theta_{B0})}{dt^2} + \left(c + \frac{S}{\rho} c_B \frac{\rho_B}{S_B} + c_B \right) \frac{d(\theta_B^* + \theta_{B0})}{dt} + \frac{S}{\rho} (\theta_B^* + \theta_{B0}) = \\
= P^* + P_0 + \frac{S}{\rho} (\theta_H^* + \theta_{H0}).
\end{aligned}
\tag{29}$$

Преобразуем выражение (29) следующим образом, учитывая, что

$$\frac{d(\theta_B^* + \theta_0)}{dt} = \frac{d\theta_B^*}{dt} \text{ и } \frac{d^2(\theta_B^* + \theta_0)}{dt^2} = \frac{d^2\theta_B^*}{dt^2}:$$

$$c \cdot c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{d^2\theta_B^*}{dt^2} + \left(c + \frac{S}{\rho} \cdot c_B \frac{\rho_B}{S_B} + c_B \right) \frac{d\theta_B^*}{dt} + \frac{S}{\rho} \theta_B^* = P^* + \frac{S}{\rho} \theta_H^* + \left(P_0 + \frac{S}{\rho} \theta_{H0} - \frac{S}{\rho} \theta_0 \right).$$

Тогда, с учетом (26), получаем, что $P_0 + \frac{S}{\rho} \cdot \theta_{H0} - \frac{S}{\rho} \cdot \theta_0 = 0$, откуда

$$c \cdot c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{d^2\theta_B^*}{dt^2} + \left(c + \frac{S}{\rho} \cdot c_B \frac{\rho_B}{S_B} + c_B \right) \frac{d\theta_B^*}{dt} + \frac{S}{\rho} \theta_B^* = P^* + \frac{S}{\rho} \theta_H^*.
\tag{30}$$

Преобразовав выражение (30) таким образом, чтобы коэффициент при θ_B^* был равен 1, окончательно получаем следующее математическое

описание объекта управления (сушильного шкафа с помещенной в него емкостью с водой):

$$c \cdot c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{\rho}{S} \frac{d^2 \theta_B^*}{dt^2} + \left(\frac{\rho}{S} (c + c_B) + c_B \frac{\rho_B}{S_B} \right) \frac{d\theta_B^*}{dt} + \theta_B^* = \frac{\rho}{S} P^* + \theta_H^*,$$

или

$$T_2^2 \frac{d^2 \theta_B^*}{dt^2} + T_1 \frac{d\theta_B^*}{dt} + \theta_B^* = KP^* + \theta_H^*,$$

где $T_2^2 = c \cdot c_B \frac{\rho_B}{S_B} \frac{\rho}{S}$ и $T_1 = \frac{\rho}{S} (c + c_B) + c_B \frac{\rho_B}{S_B}$ – постоянные времени, с.

Наконец, рассмотрим случай, когда объектом управления является сушильный шкаф с помещенными в него двумя емкостями с водой.

Как и в предыдущем случае, выходной величиной является значение температуры воды в сушильном шкафу θ_B , °С.

Однако при построении математической модели в этом случае (объем воды в сушильном шкафу сопоставим с объемом шкафа) можно пренебречь изменением температуры воздуха в сушильном шкафу и считать, что мощность нагревателя расходуется только на нагрев воды и теплообмен с окружающей средой через стенки сушильного шкафа.

Тогда, аналогично первому случаю, получим следующее математическое описание объекта управления (сушильного шкафа с помещенными в него двумя емкостями с водой) в виде линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$T \frac{d\theta_B}{dt} + \theta_B = KP + \theta_H,$$

где $T = \frac{c_B \rho_B}{S_B}$ – постоянная времени объекта, с;

$K = \frac{\rho_B}{S_B}$ – коэффициент преобразования (усиления), °С/Вт.

Дальнейшее исследование проводится аналогично предыдущему примеру.

Рассмотрим теперь случай, когда объектом управления является **резервуар с водой** с заполнением сверху (рисунок 4).

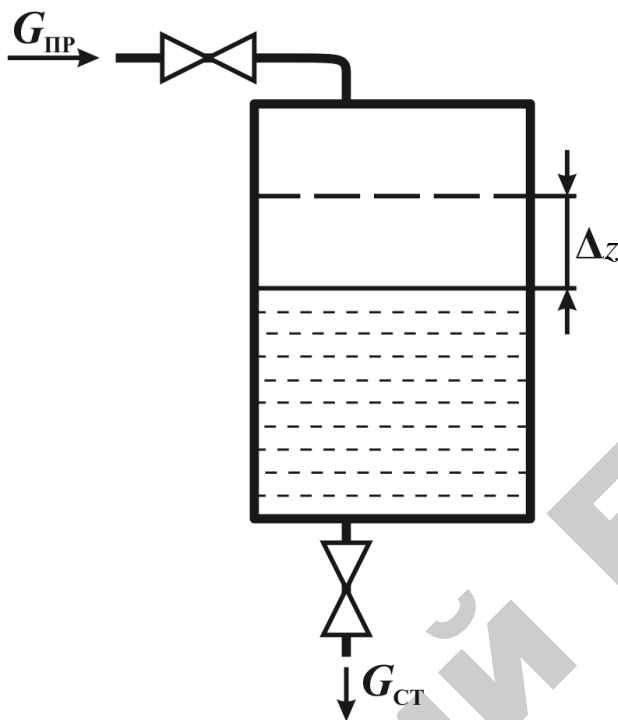


Рисунок 4 – Резервуар с водой с заполнением сверху как объект управления

Управляемой величиной является уровень жидкости в резервуаре z , м. Управляющей величиной является напор H , м, создаваемый насосом; возмущающим воздействием является степень открытия запорного клапана на стоке x_2 (принимает значения 0 до 1, где 0 соответствует полностью закрытому клапану, а 1 – полностью открытому).

Для составления математической модели объекта управления $z = f(H, x_2)$ рассмотрим уравнение материального баланса.

Пусть в течение некоторого небольшого отрезка времени Δt приток жидкости $G_{пр}$ и сток $G_{ст}$ (размерность обеих величин – м³/с) сохраняются постоянными. Тогда уравнение материального баланса для указанного отрезка времени будет иметь следующий вид:

$$S\Delta z = (G_{пр} - G_{ст})\Delta t, \quad (31)$$

где S – площадь резервуара, м²;

Δz – изменение уровня резервуара в баке, м.

Так как в общем случае приток воды в резервуар и сток из резервуара изменяются во времени, то есть $G_{\text{пр}} = G_{\text{пр}}(t)$ и $G_{\text{ст}} = G_{\text{ст}}(t)$, то уравнение (31) будет справедливо только при очень коротком промежутке времени Δt , за который значения притока и стока не могут заметно измениться, то есть при $\Delta t \rightarrow 0$. Таким образом, при $\Delta t \rightarrow 0$ получаем уравнение материального баланса при изменяющихся со временем притоке и стоке:

$$S dz = (G_{\text{пр}} - G_{\text{ст}}) dt,$$

или

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{S} G_{\text{пр}} - \frac{1}{S} G_{\text{ст}}. \quad (32)$$

Значения притока и стока зависят от напора, создаваемого насосом, и от степени открытия клапана и определяются по формулам

$$\begin{aligned} G_{\text{пр}} &= \alpha_{\text{пр}} \sqrt{H}; \\ G_{\text{ст}} &= \alpha_{\text{ст}} x_2 \sqrt{z - p_{\text{ст}}^0}, \end{aligned} \quad (33)$$

где $p_{\text{ст}}^0$ – давление на стоке после клапана – его значение в соответствии с исходными данными считаем постоянным, м;

$\alpha_{\text{пр}}$, $\alpha_{\text{ст}}$ – постоянные коэффициенты, значения которых, с учетом закона Бернулли, зависят от площади и формы сечения клапанов притока и стока, м^{2.5}/с:

$$\alpha_{\text{пр}} = s_{\text{пр}} \sqrt{2g}, \quad \alpha_{\text{ст}} = s_{\text{ст}} \sqrt{2g}.$$

Подставив выражения (33) в (32), получим нелинейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\alpha_{\text{пр}}}{S} \sqrt{H} - \frac{\alpha_{\text{ст}}}{S} x_2 \sqrt{z - p_{\text{ст}}^0}. \quad (34)$$

Это уравнение динамическое, оно описывает динамический режим работы рассматриваемого объекта, то есть связывает изменяющиеся во времени

выходную величину рассматриваемого объекта $z(t)$ и входные величины $H(t)$ и $x_2(t)$.

Уровень воды в резервуаре должен поддерживаться на каком-то заданном значении ($z = z_0$), соответствующем *статическому режиму (рабочей точке)*: напор стабилен ($H = H_0 = \text{const}$), расход воды стабилен ($x_2 = x_2^0 = \text{const}$), при этом $\frac{dz}{dt} = 0$.

Таким образом, для статического режима работы рассматриваемой системы (равенство притока и расхода воды, стабильность уровня воды в резервуаре) уравнение (34) преобразуется к следующему виду:

$$\frac{\alpha_{\text{пр}}}{S} \sqrt{H_0} = \frac{\alpha_{\text{ст}}}{S} x_2^0 \sqrt{z_0 - p_{\text{ст}}} \quad (35)$$

Производная $\frac{dz}{dt}$ в выражении (34) нелинейно зависит от трех переменных: z , H и x_2 .

Рассмотрим реакцию исследуемого звена на изменение только *управляющего воздействия* – уравнение (34) в этом случае примет вид

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\alpha_{\text{пр}}}{S} \sqrt{H} \quad (36)$$

Это *нелинейное* дифференциальное уравнение, проведем его *линеаризацию*. Используем для этого формулу (2) – разложение функции в ряд Тейлора. Поскольку в этом случае имеем $\frac{dz}{dt} = f(z, H, x_2) = f(H)$, то $\frac{\partial f}{\partial z} = 0$, $\frac{\partial f}{\partial x_2} = 0$, и для уравнения (36) получаем

$$\frac{dz}{dt} \approx f(z_0, H_0, x_2^0) + \left. \frac{\partial f}{\partial H} \right|_0 \cdot \frac{H - H_0}{1!}, \quad (37)$$

$$\text{Найдем } \left. \frac{\partial f}{\partial H} \right|_0 = \left. \frac{\partial \left(\frac{\alpha_{\text{пр}}}{S} \cdot \sqrt{H} \right)}{\partial H} \right|_0 = \left. \frac{\alpha_{\text{пр}}}{2S\sqrt{H}} \right|_0 = \frac{\alpha_{\text{пр}}}{2S\sqrt{H_0}}.$$

Перенесем начало координат в точку статического режима (z_0, H_0, x_2^0) , координаты которой удовлетворяют уравнению (35), тогда $f(z_0, H_0, x_2^0) = 0$ и линеаризованное уравнение (37) будет иметь следующий вид:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\alpha_{\text{пр}}}{2S\sqrt{H_0}}(H - H_0). \quad (38)$$

Рассмотрим теперь реакцию исследуемого звена на изменение только **возмущающего воздействия**. Уравнение (34) в этом случае примет вид

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{\alpha_{\text{ст}}}{S}x_2\sqrt{z - p_{\text{ст}}^0}. \quad (39)$$

Снова получили *нелинейное* дифференциальное уравнение, проведем его *линеаризацию*. Используем для этого формулу (2) – разложение функции в ряд Тейлора. В этом случае имеем $\frac{dz}{dt} = f(z, H, x_2) = f(z, x_2)$, а $\frac{\partial f}{\partial H} = 0$. Для уравнения (39) получаем

$$\frac{dz}{dt} \approx f(z_0, H_0, x_2^0) + \left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_0 \cdot \frac{z - z_0}{1!} + \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_0 \cdot \frac{x_2 - x_2^0}{1!}. \quad (40)$$

Найдем частные производные:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_0 = \left. \frac{\partial \left(-\frac{\alpha_{\text{ст}}}{S} x_2 \sqrt{z - p_{\text{ст}}^0} \right)}{\partial H} \right|_0 = -\frac{\alpha_{\text{ст}} x_2}{2S\sqrt{z - p_{\text{ст}}^0}} \Bigg|_0 = -\frac{\alpha_{\text{ст}} x_2^0}{2S\sqrt{z_0 - p_{\text{ст}}^0}},$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_0 = \left. \frac{\partial \left(-\frac{\alpha_{\text{ст}}}{S} x_2 \sqrt{z - p_{\text{ст}}^0} \right)}{\partial x_2} \right|_0 = -\frac{\alpha_{\text{ст}}}{S} \sqrt{z - p_{\text{ст}}^0} \Bigg|_0 = -\frac{\alpha_{\text{ст}}}{S} \sqrt{z_0 - p_{\text{ст}}^0}.$$

Перенесем начало координат в точку статического режима (z_0, H_0, x_2^0) , координаты которой удовлетворяют уравнению (35), тогда $f(z_0, H_0, x_2^0) = 0$ и линеаризованное уравнение (40) принимает следующий вид:

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{\alpha_{\text{ст}} x_2^0}{2S\sqrt{z_0 - p_{\text{ст}}^0}} \frac{z - z_0}{1!} - \frac{\alpha_{\text{ст}}}{S} \sqrt{z_0 - p_{\text{ст}}^0} \frac{x_2 - x_2^0}{1!},$$

или

$$\frac{dz}{dt} + \frac{\alpha_{\text{ст}} x_2^0}{2S\sqrt{z_0 - p_{\text{ст}}^0}} (z - z_0) = -\frac{\alpha_{\text{ст}}}{S} \sqrt{z_0 - p_{\text{ст}}^0} (x_2 - x_2^0), \quad (41)$$

Далее, и для уравнения (38), и для уравнения (41) в качестве управляемой величины, управляющего и возмущающего воздействий будем рассматривать не абсолютные значения z , H и x_2 , соответственно, а их отклонения от начальных значений (z_0, H^0, x_2^0) , соответствующих статическому режиму (35):

$$z^* = z - z_0,$$

$$H^* = H - H_0^*,$$

$$x_2^* = x_2 - x_2^0.$$

При этом выполняется $\frac{dz^*}{dt} = \frac{dz}{dt}$.

Окончательно получаем:

– линейное дифференциальное уравнение, описывающее реакцию исследуемого звена на изменение только управляющего воздействия:

$$\frac{dz^*}{dt} = K_1 H^*,$$

где $K_1 = \frac{\alpha_{\text{пр}}}{2S\sqrt{H_0}}$ – коэффициент пропорциональности, с^{-1} ;

– линейное дифференциальное уравнение, описывающее реакцию исследуемого звена на изменение только возмущающего воздействия:

$$T \frac{dz^*}{dt} + z^* = K_2 x_2^*,$$

где $T = \frac{2S\sqrt{z_0 - p_{\text{ст}}^0}}{\alpha_{\text{ст}} x_2^0}$ – постоянная времени, с ;

$K_2 = -\frac{z^0 - p_{ст}^0}{x_2^0}$ – коэффициент преобразования (усиления), м.

В случае, когда объектом управления является резервуар с водой, с заполнением снизу (он будет представлен апериодическим звеном 1-го порядка), пример *получения математической модели и ее линеаризации* приведен в приложении А.

3 Решение дифференциального уравнения, описывающего объект управления, и определение передаточных функций объекта управления

В этом разделе следует решить полученное линейное дифференциальное уравнение в предположениях относительно входных воздействий для того, чтобы получить переходные характеристики объекта по управляющему и возмущающему воздействиям и определить передаточные функции объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям.

Решение полученного дифференциального уравнения – изменение со временем управляемой величины $z^* = z^*(t)$ – зависит от того, какой вид имеют входные сигналы: изменение во времени управляющего воздействия $x_1^* = x_1^*(t)$ и возмущающего воздействия $x_2^* = x_2^*(t)$.

В качестве типового входного воздействия рассматривается ступенчатое воздействие, которое математически описывается следующим образом:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0, \\ u_0, & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (42)$$

Переходная функция (переходная характеристика) объекта управления – это график изменения управляемой величины объекта управления при ступенчатом изменении задающего либо возмущающего воздействий. Соответственно, рассматривают обычно две переходных функции: переходную функцию объекта управления по управляющему воздействию и переходную функцию по возмущающему воздействию.

При получении переходной функции объекта управления по управляющему воздействию принимается, что изменение управляющего воздействия на объект

равно $x_1^* = u(t)$ из выражения (42), а изменение возмущающего воздействия на объект равно нулю: $x_2^* = 0$. При этих условиях производится решение линеаризованного дифференциального уравнения, и полученное решение представляет собой переходную характеристику объекта по управляющему воздействию.

При получении переходной характеристики объекта управления по возмущающему воздействию принимается, что изменение управляющего воздействия на объект равно нулю $x_1^* = 0$, а изменение возмущающего воздействия на объект равно $x_2^* = u(t)$. При этих условиях также производится решение линеаризованного дифференциального уравнения, и полученное решение представляет собой переходную характеристику объекта по возмущающему воздействию.

Далее, с использованием преобразования Лапласа находятся передаточные функции объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям:

$$W_u^{\text{OY}} = \frac{z^*(s)}{x_1^*(s)},$$

$$W_F^{\text{OY}} = \frac{z^*(s)}{x_2^*(s)}.$$

В завершении раздела делается вывод о типе линейного звена, которому соответствует рассматриваемый объект управления по управляющему и по возмущающему воздействиям.

Получим *переходную характеристику объекта управления по управляющему воздействию для случая, когда объектом управления является сушильный шкаф, описываемый дифференциальным уравнением (15)*. В этом случае изменение управляющего воздействия на объект равно $P^* = 1(t)$, а изменение возмущающего воздействия на объект равно нулю: $\theta_n^* = 0$. Тогда уравнение (15) преобразуется к следующему виду:

$$T \frac{d\theta^*}{dt} + \theta^* = K. \quad (43)$$

Решим это дифференциальное уравнение:

$$-T \frac{d(-\theta^*)}{dt} = K - \theta^* ;$$

$$-T \frac{d(K - \theta^*)}{dt} = K - \theta^* ;$$

$$\frac{d(K - \theta^*)}{K - \theta^*} = -\frac{1}{T} dt ;$$

$$\int_0^{\theta^*} \frac{d(K - \theta^*)}{K - \theta^*} = \int_0^t -\frac{1}{T} \cdot dt ;$$

$$\ln|K - \theta^*| \Big|_0^{\theta^*} = -\frac{1}{T} \cdot t \Big|_0^t ;$$

$$\ln\left(\frac{K - \theta^*}{K}\right) = -\frac{t}{T} ;$$

$$\frac{K - \theta^*}{K} = e^{-\frac{t}{T}} ;$$

$$\theta^* = K \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (44)$$

Выражение (44) представляет собой *переходную характеристику сушильного шкафа по управляющему воздействию*.

Получим теперь переходную характеристику сушильного шкафа по возмущающему воздействию. В этом случае изменение управляющего воздействия на объект равно $P^* = 0$, а изменение возмущающего воздействия на объект равно $\theta_n^* = 1(t)$. Тогда уравнение (15) преобразуется к следующему виду:

$$T \frac{d\theta^*}{dt} + \theta^* = 1.$$

Метод решения этого уравнения аналогичен решению уравнения (43). В итоге получаем следующую *переходную характеристику объекта управления по возмущающему воздействию*:

$$\theta^* = 1 - e^{-\frac{t}{T}}. \quad (45)$$

Передаточные функции объекта управления по управляющему и возмущающему воздействию имеют вид

$$W_u^{OY} = \frac{\theta^*(s)}{P^*(s)} = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (46)$$

$$W_F^{OY} = \frac{\theta^*(s)}{\theta_H^*(s)} = \frac{1}{Ts + 1}. \quad (47)$$

Получили, что объект управления является апериодическим звеном 1-го порядка как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям.

Аналогичным образом находятся передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям остальных объектов управления. Для случая, когда *объектом управления является резервуар с водой с заполнением снизу*, пример решения дифференциального уравнения и получения передаточных функций приведен в приложении А.

4 Экспериментальное определение численных значений параметров передаточных функций объекта управления

В этом разделе следует указать, значения каких физических величин требуется определить для получения численных значений параметров передаточных функций объекта управления, и экспериментально определить значения этих величин путем измерения параметров учебной лабораторной установки.

Путем подстановки определенных экспериментально численных значений всех параметров объекта управления определяются численные значения коэффициентов линеаризованного дифференциального уравнения объекта управления,

после чего следует записать итоговые выражения для переходных и передаточных функций объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям.

Покажем, как это происходит, на примере *определения передаточной функции сушильного шкафа* как объекта управления (аналогичным образом рассматриваются сушильный шкаф с помещенными в него одной или двумя емкостями с водой).

Для определения параметров передаточных функций объекта управления нужно знать значения всех величин, входящих в формулы (46)–(47), а именно – постоянной времени T и коэффициента преобразования K .

Экспериментальным образом определим значения параметров помещения, в качестве которого выступает учебный сушильный шкаф *типа ШСУ* (рисунок 5), имеющий объем сушильной камеры 10 л и максимальную температуру нагрева 150 °С.



Рисунок 5 – Шкаф сушильный учебный ШСУ

В качестве метода определения искомых значений параметров используем идентификацию.

Идентификацией называют получение математических моделей на основании совместного анализа входных и выходных сигналов объекта.

Выполним приближенную идентификацию сушильного шкафа по виду его переходной функции (то есть реакции объекта на ступенчатое входное воздействие). Данный подход включает в себя следующие шаги.

1. На вход объекта подается **ступенчатое воздействие** и регистрируется изменение во времени выходного сигнала $y(t)$. В нашем случае изучаемым объектом является сушильный шкаф с электронагревателем внутри. В некоторый начальный момент времени $t = 0$ электронагреватель включается, при этом выделяемая им тепловая мощность скачкообразно изменяется от 0 Вт до приблизительно

100 Вт. Температура θ внутри сушильного шкафа начинает повышаться, ее значение измеряется через равные промежутки времени (например, каждые 3 с), результаты измерений заносятся в таблицу. После окончания измерений по полученным данным строится график переходной функции объекта, то есть график изменения во времени температуры внутри сушильного шкафа относительно ее начального значения: $y(t) = \theta(t) - \theta_{t=0}$.

2. По виду полученной экспериментально переходной функции $y(t)$ определяется **вид линейного звена**, теоретическая переходная функция которого по форме наиболее близко соответствует экспериментальной переходной функции $y(t)$.

3. Для выбранного вида звена по графику экспериментальной переходной функции, как показано в таблице 2, определяются **оценки численных значений параметров** передаточной функции выбранного звена.

Значения постоянной времени находятся путем построения касательных к графику: в начале координат – для апериодического звена первого порядка, в точке начала изменения выходной величины – для апериодического звена первого порядка с запаздыванием, в точке перегиба – для апериодического звена второго порядка.

Пусть получен следующий график переходной функции *сушильного шкафа* (рисунок 6).

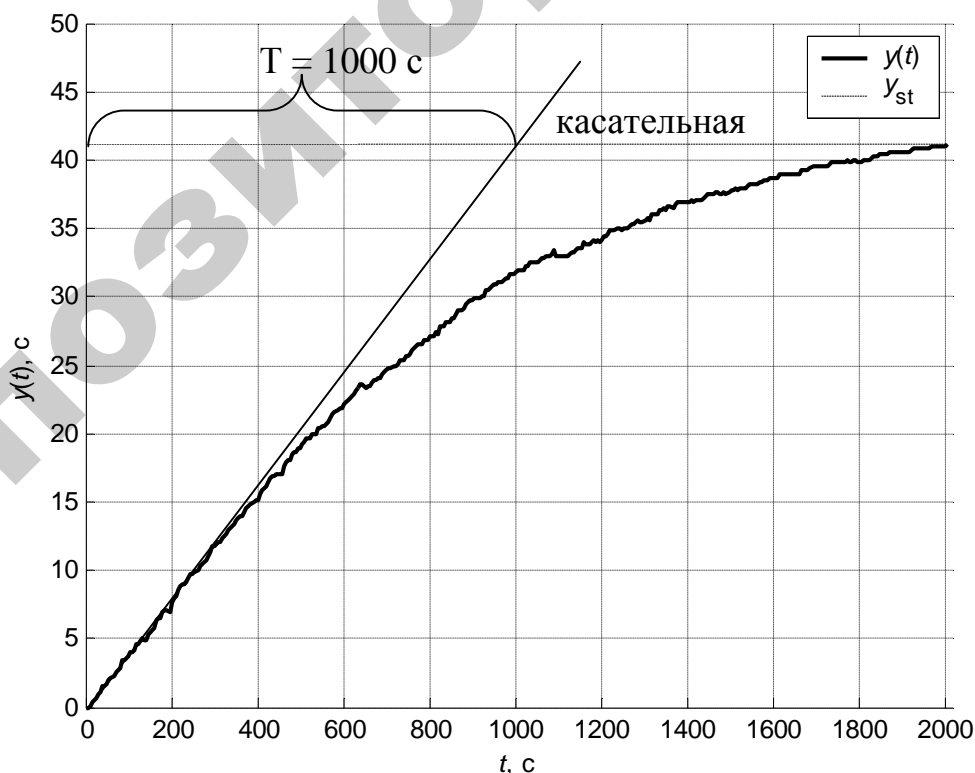
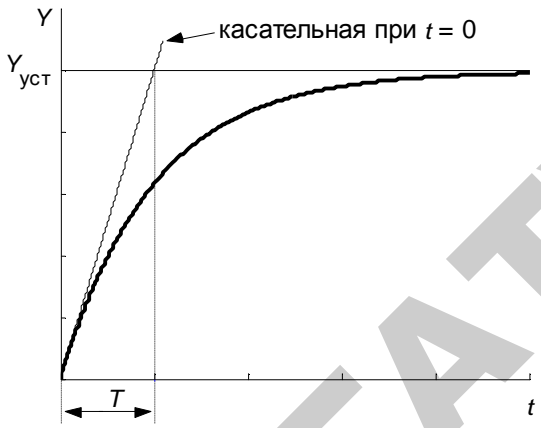
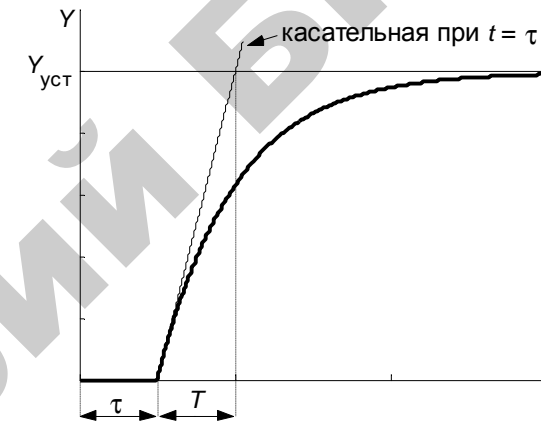
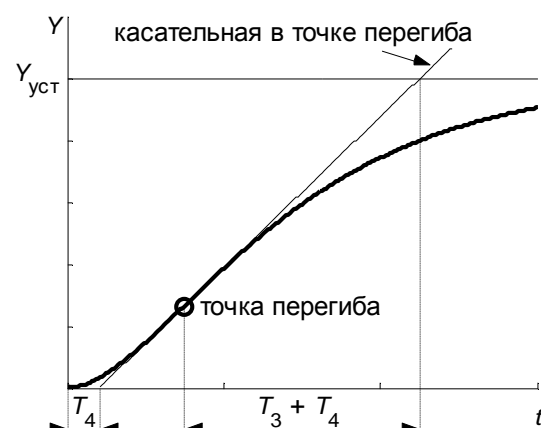


Рисунок 6 – Графоаналитическое определение параметров звена

Таблица 2 – Математические выражения и графики переходных функций наиболее распространенных на практике линейных динамических звеньев

<p>Апериодическое звено 1-го порядка:</p> $W(s) = \frac{K}{Ts+1} \text{ – передаточная функция;}$ $h(t) = K \left(1 - e^{-t/T} \right) \text{ – переходная функция.}$	
<p>Апериодическое звено 1-го порядка с чистым запаздыванием:</p> $W(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1} \text{ – передаточная функция;}$ $h(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < \tau, \\ K \left(1 - e^{-(t-\tau)/T} \right), & \text{при } t \geq \tau \end{cases} \text{ – переходная}$ <p>функция.</p>	
<p>Апериодическое звено 2-го порядка:</p> $W(s) = \frac{K}{(T_3 s+1)(T_4 s+1)}$ <p>– передаточная функция;</p> $h(t) = K \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_4}} \right), \text{ при } T_3 > T_4,$ <p>– переходная функция.</p>	

В нашем случае при выполнении раздела 3 теоретически уже получено, что сушильный шкаф соответствует апериодическому звену первого порядка, его переходная и передаточная функции по управляющему воздействию имеют вид (44) и (46), соответственно.

После дополнительных построений (см. рисунок б) получено, что значение постоянной времени звена $T = 1000$ с.

Коэффициент передачи K рассчитывается по формуле

$$K = \frac{Y_{уст}}{P_{вх}},$$

где $Y_{уст}$ – изменение температуры в сушильном шкафу в процессе нагрева, °С;
 $P_{вх} = 100$ Вт – изменение входного воздействия, то есть мощность, подаваемая на нагревательный элемент при включении сушильного шкафа.

Для расчета коэффициента передачи найдем по графику установившееся значение выходной величины – 41 °С. Получим

$$K = \frac{41}{100} \approx 0,41 \text{ °С/Вт},$$

то есть с ростом величины входной мощности на 1 Вт значение установившейся температуры увеличится на 0,41 °С.

Таким образом, линеаризованное дифференциальное уравнение сушильного шкафа как объекта управления в форме (15) имеет вид

$$1000 \frac{d\theta}{dt} + \theta = 0,41P + \theta_n.$$

Переходные характеристики объекта по управляющему и возмущающему воздействиям, согласно формулам (44) и (45), соответственно, имеют вид

$$\begin{aligned} \theta_u^* &= 0,41(1 - e^{-t/1000}); \\ \theta_F^* &= 1 - e^{-t/1000}. \end{aligned}$$

Передаточные функции сушильного шкафа по управляющему и возмущающему воздействиям, согласно формулам (46) и (47) соответственно, имеют вид

$$W_u^{oy} = \frac{0,41}{1000s + 1}; \quad (48)$$

$$W_F^{Oy} = \frac{1}{1000 s + 1}. \quad (49)$$

Аналогичным образом рассматриваются *объекты, представляющие собой сушильный шкаф с одной или двумя емкостями с водой.*

Экспериментальное определение численных значений передаточных функций резервуара с водой с заполнением снизу как объекта управления приведено в приложении А. Аналогично проводится *экспериментальное определение численных значений передаточных функций резервуара с водой с заполнением сверху.*

5 Моделирование переходных характеристик объекта управления

В этом разделе следует провести компьютерное моделирование объекта управления в системе компьютерного моделирования Simulink с подачей на вход управляющего и возмущающего воздействий и получить графики переходных функций объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям.

Simulink представляет собой интерактивную программу для математического моделирования и анализа динамических систем и устройств. Simulink основывается на принципе визуального программирования, в соответствии с которым пользователь создает модель системы в виде структурной схемы из библиотеки стандартных блоков. Таким образом, пользователю нет необходимости изучать язык программирования и численные методы. При моделировании система выполняет необходимые вычисления в соответствии с заданными настройками и представляет результаты в виде графиков и таблиц.

При запуске пакета Simulink из системы MATLAB открывается Simulink Library Browser – окно интегрированного обозревателя (браузера) библиотеки стандартных блоков Simulink (показано на рисунке 7). В этом окне содержится дерево компонентов библиотеки блоков Simulink. Библиотека блоков включает следующие основные разделы:

- Continuous – линейные непрерывные блоки;
- Discontinuities – нелинейные блоки;
- Discrete – дискретные блоки;
- Math operations – блоки математических операций;
- Signal routing – блоки преобразования сигналов;

- Sinks – регистрирующие блоки (приемники сигналов);
- Sources – источники сигналов.

Для просмотра того или иного раздела библиотеки достаточно выделить его мышью – в правой части окна Simulink Library Browser появится набор пиктограмм блоков активного раздела библиотеки.

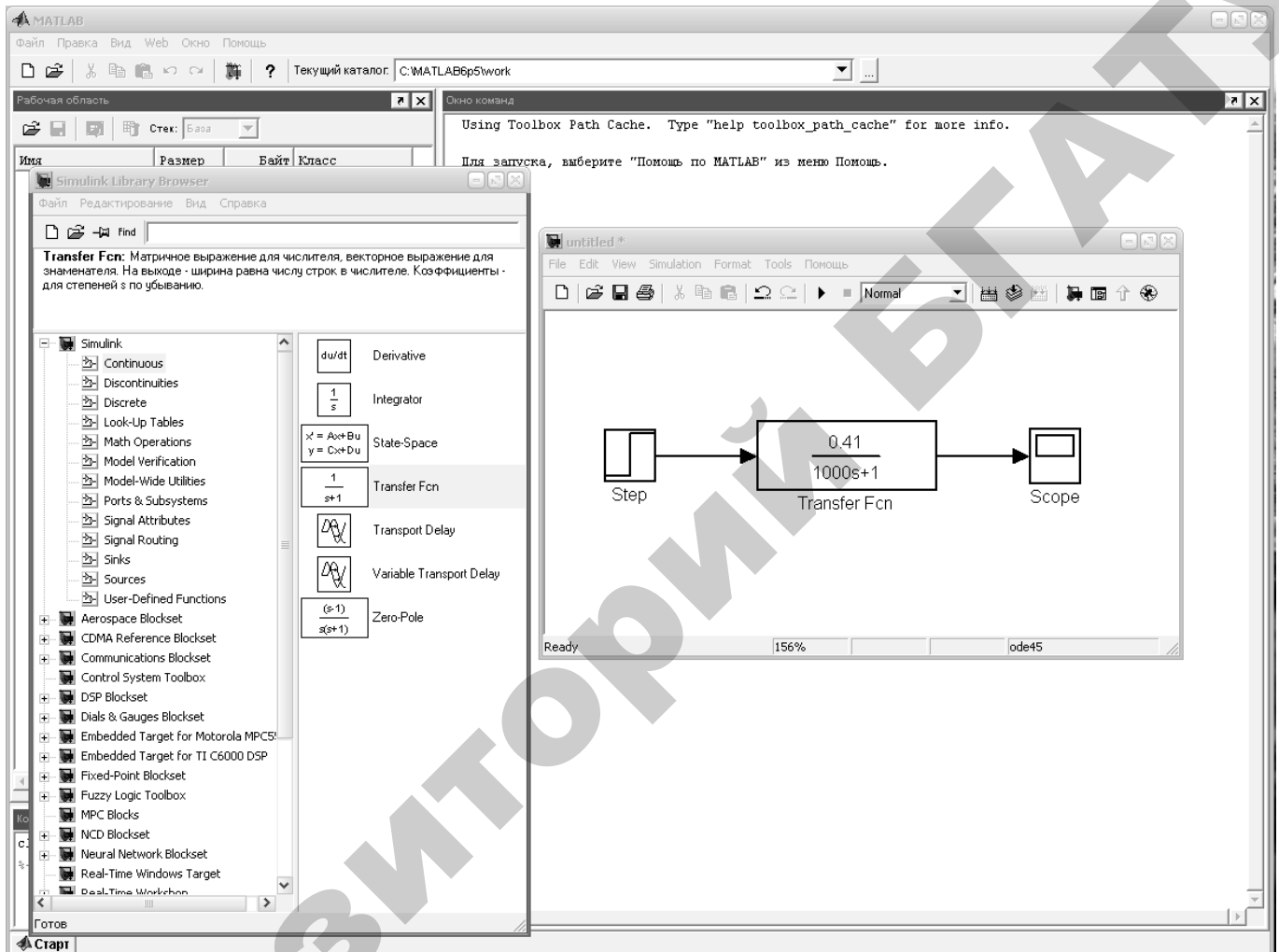


Рисунок 7 – Модель объекта управления с управляющим воздействием в среде Simulink

В окне редактирования графической модели моделируемой системы или устройства следует создать модель исследуемого объекта управления в виде звена с полученной передаточной функцией (отдельно по управляющему и возмущающему воздействиям), источника входного сигнала и осциллографа. Это делается следующим образом.

В окне Simulink Library Browser в библиотеке SimPowerSystems на вкладке Continuous отыщем блок Transfer Fcn (звено, заданное передаточной функцией) и, выделив его левой клавишей мыши, перетащим в окно модели.

Для моделирования подачи на вход системы ступенчатого задающего воздействия используем находящийся в библиотеке Simulink на вкладке Sources (вкладка содержит компоненты, моделирующие различные источники сигналов) компонент Step. Выделим его левой клавишей мыши и перетащим в окно модели. Расположим слева от блока Transfer Fcn. Для отображения в виде графика изменений сигналов задающего воздействия и управляемой величины используем находящийся на вкладке Sinks (компоненты отображения и регистрации сигналов) компонент Scope. Выделив его левой клавишей мыши и перетащив в окно модели, расположим справа от блока Transfer Fcn.

Соединим блоки. Подведем курсор мыши к выходу блока Step (значку $>$) и, нажав левую клавишу мыши, соединим выход блока Step с входом блока Transfer Fcn. Аналогично соединим выход блока Transfer Fcn с входом блока Scope.

При создании модели **сушильного шкафа** как объекта управления для получения переходной функции по управляющему воздействию в среде Simulink (рисунок 7) следует указать коэффициенты исследуемой передаточной функции. Двойным щелчком на пиктограмме откроем окно параметров блока Transfer Fcn, где следует ввести коэффициенты заданной передаточной функции в соответствии с формулой (57): для передаточной функции по управляющему воздействию в поле Числитель введем [0.41], в поле Знаменатель введем [1000 1], нажмем ОК.

Перед началом процесса моделирования следует задать параметры моделирования. Для этого в меню окна редактирования модели выполним команду Simulation→Simulation parameters и в появившемся диалоговом окне задания параметров на вкладке Solver установим значение Stop time (конечный момент времени) таким, чтобы время моделирования было большим времени окончания переходного процесса.

Запуск **процесса моделирования** выполняется командой Simulation→Start. По окончании процесса моделирования в окне Scope отобразится график изменения управляемой величины.

Для анализа динамических характеристик линейных систем автоматического управления (САУ) в Simulink имеется специальный компонент – LTI Viewer. С его помощью можно быстро и легко рассчитывать временные (переходная функция, импульсная переходная функция, перерегулирование, время регулирования, статическую ошибку регулирования) и частотные (АЧХ, ФЧХ, годограф Найквиста) характеристики моделируемой САУ.

Получим с помощью компонента LTI Viewer переходную функцию исследуемого объекта управления по задающему воздействию. Для этого сначала в окне редактирования модели отключим компонент Step от входа звена и выполним

команду меню Tools→Linear analysis. В результате этого на экране появятся два новых окна: LTI Viewer – окно, в котором будет отображаться график переходной функции, и Model Inputs and Outputs – окно, содержащее входную (Input point) и выходную (Output point) метки для указания входной и выходной точек системы. Обе эти метки необходимо с помощью мыши перетащить на свободное пространство в окно редактирования модели. После этого выход Input point следует соединить с входом объекта управления, а вход Output point – с выходом объекта управления. Далее следует перейти в окно LTI Viewer, щелкнуть правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выбрать пункт Plot types→Step. Для получения графика переходной функции САУ осталось выполнить в этом же окне команду меню Simulink→Get Linearizes Model. В результате в окне LTI Viewer появится график переходной функции.

По полученному графику легко можно найти показатели качества переходных функций объекта управления. Для этого на свободном пространстве окна LTI Viewer с полученным графиком нужно нажать правую клавишу мыши и во всплывающем меню выбрать пункты Characteristics→Peak Response (для определения перерегулирования), Characteristics→Settling Time (для определения времени регулирования) и Characteristics→Steady State (для определения установившегося значения). В результате на графике будут отмечены соответствующие точки. При наведении указателя мыши на точку появится всплывающее окно с данными.

График переходной характеристики **сушильного шкафа** по управляющему воздействию показан на рисунке 8.

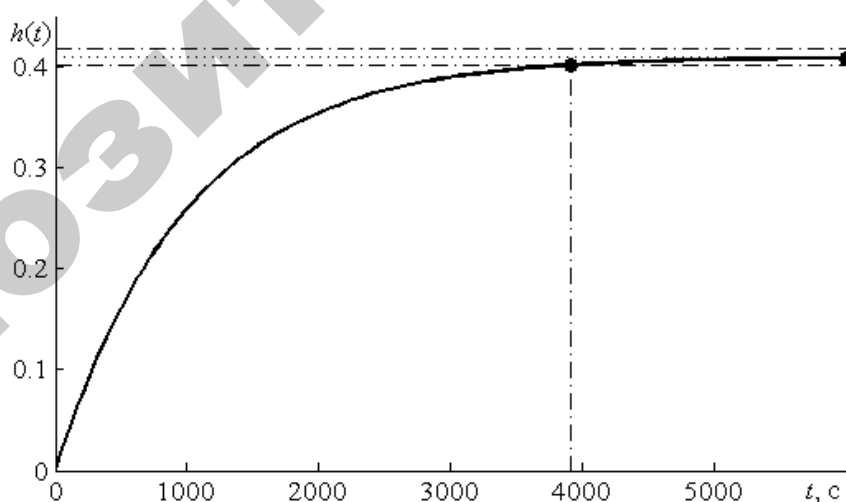


Рисунок 8 – Переходная характеристика объекта управления по управляющему воздействию

Вид модели объекта управления для получения переходной функции по возмущающему воздействию в среде Simulink показан на рисунке 9.

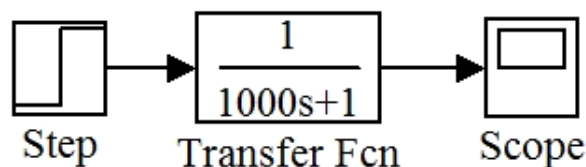


Рисунок 9 – Модель объекта управления с возмущающим воздействием в среде Simulink

График переходной характеристики сушильного шкафа по возмущающему воздействию показан на рисунке 10.

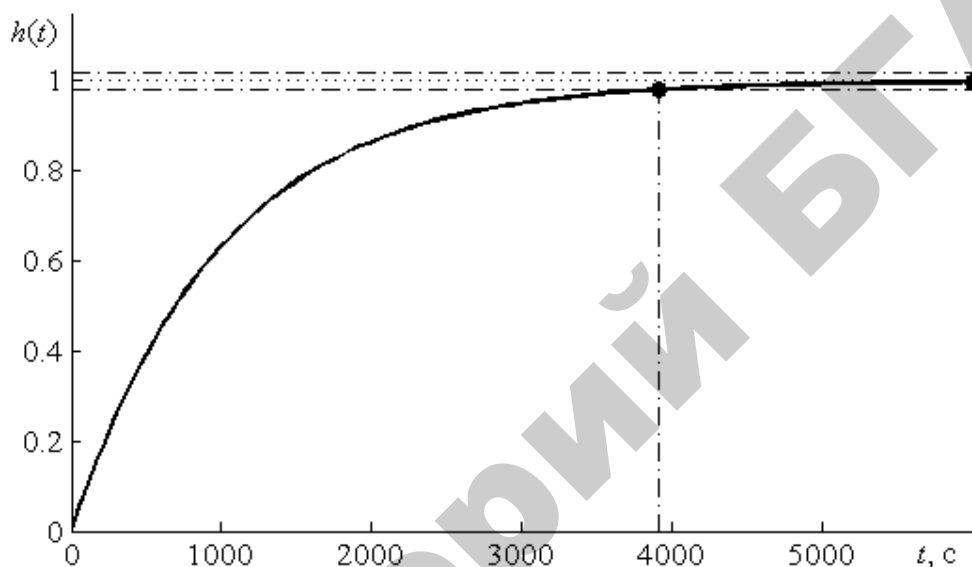


Рисунок 10 – Переходная характеристика объекта управления по возмущающему воздействию

По виду переходной функции можно сделать вывод, что сушильный шкаф как объект управления является устойчивым.

Аналогично производится получение переходных характеристик по управляющему и возмущающему воздействиям для остальных объектов управления (*резервуар с водой с заполнением снизу* рассмотрен также в приложении А).

6 Разработка функциональной и структурной схем системы автоматического регулирования и постановка задачи синтеза

а) В этом разделе разрабатывается функциональная схема САУ. **Функциональная схема** системы – это наглядное графическое изображение системы в виде

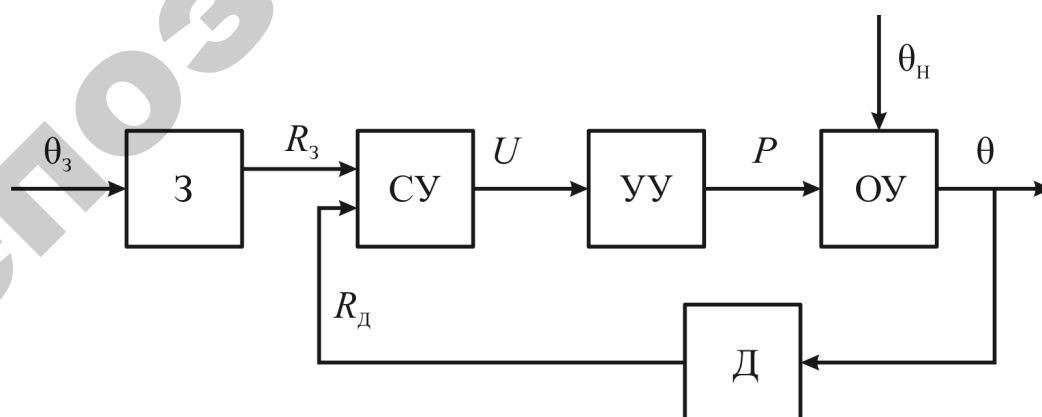
взаимосвязанных элементов, выполняющих определенную функцию. Элементы функциональной схемы изображаются прямоугольниками, а связи между ними – линиями со стрелками, соответствующими направлению прохождения сигнала. Над линиями связи указывают обозначение сигнала. Наименование элемента в сокращенной форме указывается внутри соответствующего прямоугольника.

Для разработки функциональной схемы нужно перечислить все функциональные блоки, входящие в разрабатываемую систему, определить связи между ними и линии передачи сигналов. В каждой конкретной системе функциональные элементы представлены конкретными устройствами. Функциональная схема САР, как правило, включает в себя задатчик, устройство управления (регулятор), исполнительный механизм, датчик. Некоторые типовые функциональные элементы могут отсутствовать, а некоторые дополнительные устройства, такие как механизмы передачи движения, промежуточные преобразователи, устройства местной обратной связи и т. д. могут быть добавлены.

Сигналами являются задающее, возмущающее, управляющее воздействия, управляемая величина и т. д. В синтезируемой САР используется принцип управления по отклонению. Полученная функциональная схема приводится на листе 1 графической части курсовой работы.

Рассмотрим вид функциональной схемы для САР температуры в сушильном шкафу (рисунок 11). В систему включены следующие функциональные блоки: объект управления, регулятор, сравнивающее устройство, датчик, задатчик.

Объектом управления, по условию, является сушильный шкаф, выходной величиной объекта управления является температура θ , °С, входными величинами – мощность нагревателя (управляющее воздействие) P , Вт, и температура наружного воздуха (возмущающее воздействие) θ_n , °С.



З – задатчик, Д – датчик (терморезистор), УУ – устройство управления (регулятор),
СУ – сравнивающее устройство, ОУ – объект управления (сушильный шкаф)

Рисунок 11 – Функциональная схема системы автоматического регулирования

Датчиком по условию является датчик температуры – терморезистор, который преобразует значение температуры θ , °С (входной сигнал датчика), в электрический сигнал – сопротивление R_d , Ом (выходной сигнал датчика).

Поскольку **задатчик** задает требуемое значение температуры θ_3 , °С (является входным сигналом задатчика), которое будет сравниваться с выходным сигналом датчика в сравнивающем устройстве, – его выходная величина должна быть выражена в тех же единицах, что и выходная величина датчика. Следовательно, обозначим выходную величину задатчика R_3 , Ом.

Сравнивающее устройство сравнивает выходные сигналы датчика и задатчика R_d и R_3 (размерность обеих величин – Ом) и преобразует полученную разность в напряжение U , В (является выходным сигналом сравнивающего устройства), подаваемое на микропроцессорный блок управления.

Устройством управления (регулятором) является электронный микропроцессорный блок управления, реализованный на основе персональной ЭВМ, преобразующий напряжение U , В, поступающее со сравнивающего устройства, в выходной сигнал (мощность P , Вт, подаваемую на нагревательный элемент) в соответствии с заложенным законом регулирования.

В системе реализован принцип управления по отклонению. Система является стабилизирующей.

Аналогично могут быть получены *функциональные схемы для САР температуры воды в сушильном шкафу.*

Функциональная схема для САР уровня воды в случае, когда объектом управления является резервуар с водой с заполнением снизу, приведена в приложении А. Аналогично разрабатывается функциональная схема САР уровня воды для случая, когда объектом управления является резервуар с водой с заполнением сверху.

б) Структурной схемой называется наглядное графическое изображение математической модели (математического описания) системы.

При математическом описании систему разбивают на отдельные звенья направленного действия, передающие воздействия только в одном направлении с входа на выход.

На структурной схеме каждое звено изображается прямоугольником, внутри которого записывается математическое описание звена (для линейных звеньев – передаточная функция). Связи между звеньями структурной схемы изображаются линиями со стрелками, соответствующими направлению прохождения сигналов. Над линиями ставятся обозначения сигналов.

Элементы, осуществляющие сложение и вычитание сигналов на структурной схеме, изображают в виде окружностей. Над стрелкой проставляется знак

сигнала. Иногда окружность разбивают на секторы. Тогда сектор, к которому подходит вычитаемый сигнал, затушевывается. Примеры оформления приведены на рисунке 12. Кроме того, устройства сравнения (блоки сравнения) обозначают в виде сумматора, как на рисунке 12, д. Знак «+» иногда не ставится.

Полученная структурная схема приводится на листе 2 графической части курсовой работы.

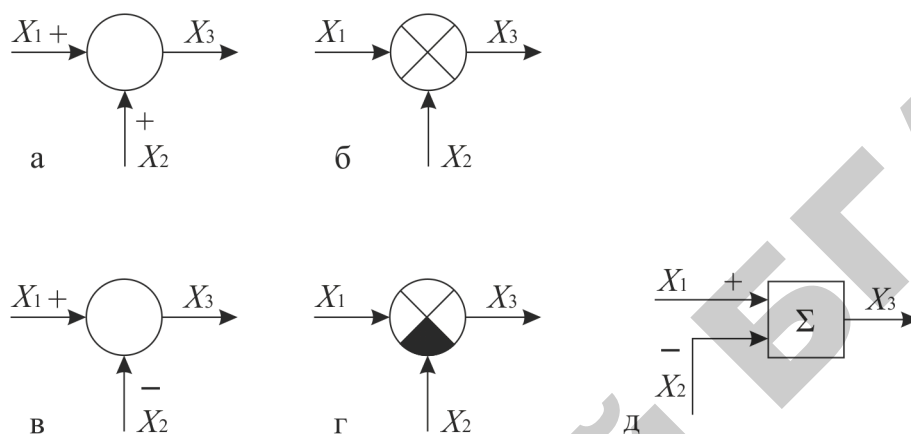


Рисунок 12 – Примеры оформления элементов сложения (а, б) и вычитания (в, г, д) сигналов на структурной схеме

Для составления структурной схемы (по известной функциональной схеме) нужно знать передаточные функции всех элементов, входящих в рассматриваемую систему. В нашем случае известными являются передаточные функции **объекта управления** как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям (найденны при выполнении раздела 4), и, поскольку закон регулирования задан по условию, известен также общий вид передаточной функции **управляющего устройства**.

Рассмотрим передаточные функции наиболее часто используемых законов регулирования.

Закон регулирования – это математическая зависимость между сигналом рассогласования (ошибкой) $e(t)$ – входным сигналом регулятора – и управляющим воздействием на объект $U(t)$ – выходным сигналом регулятора – без учета инерционности регулятора и элементов исполнительного устройства:

$$U(t) = f(e(t)).$$

При **пропорциональном законе регулирования** математическая зависимость между сигналом ошибки $e(t)$ и управляющим воздействием на объект $U(t)$ имеет следующий вид:

$$U(t) = K_p e(t),$$

то есть вырабатываемый регулятором управляющий сигнал пропорционален сигналу ошибки. Соответственно, **передаточная функция регулятора** равна

$$W_{\text{РЕГ}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_p. \quad (50)$$

При **интегральном законе регулирования** сигнал ошибки $e(t)$ и управляющее воздействие на объект $U(t)$ связаны следующим соотношением:

$$U(t) = K_I \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau.$$

где K_I – некоторый постоянный коэффициент интегрирования. **Передаточная функция регулятора** равна

$$W_{\text{РЕГ}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_I \frac{1}{s}. \quad (51)$$

Пропорционально-интегральный закон регулирования формирует управляющий сигнал с учетом значения сигнала ошибки и интеграла от сигнала ошибки. Формула управляющего воздействия на объект имеет следующий вид:

$$U(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau,$$

то есть вырабатываемый регулятором управляющий сигнал пропорционален сигналу ошибки и интегралу от ошибки. Тогда **передаточная функция регулятора** равна

$$W_{\text{РЕГ}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_p + K_I \frac{1}{s}. \quad (52)$$

При формировании управляющего сигнала в соответствии с **пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования** (ПИД-законом) учитываются:

- значение сигнала ошибки;
- интеграл от сигнала ошибки;
- скорость изменения (производная) сигнала ошибки:

$$U(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + K_d \frac{de}{dt}.$$

Передаточная функция регулятора равна

$$W_{\text{РЕГ}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_d s. \quad (53)$$

Позиционными называются регуляторы, выходной сигнал u которых (сигнал управления) имеет несколько фиксированных значения, и переход с одного на другое происходит скачком.

Позиционные регуляторы обязательно включают в себя так называемые элементы прерывного действия, а именно релейные элементы. Статические характеристики, связывающие входной и выходной сигналы наиболее распространенных релейных элементов, приведены на рисунке 13. Реле с характеристикой на рисунке 13, *а* называют **идеальным**, с характеристикой на рисунке 13, *б* – реле **с зоной неоднозначности** ($\pm a$).

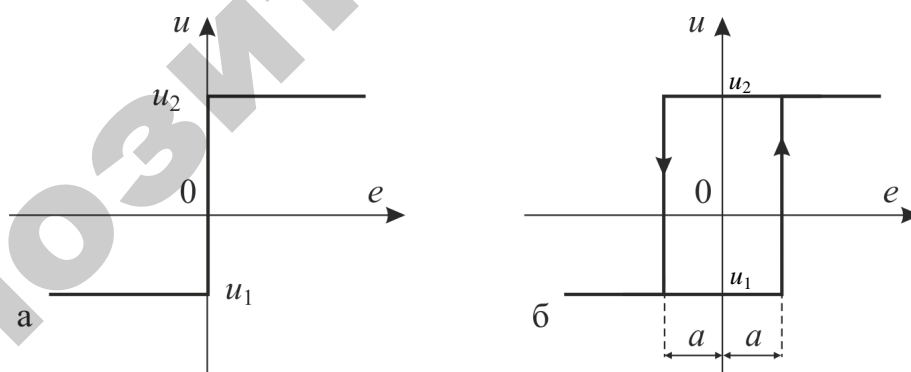


Рисунок 13 – Статические характеристики релейных элементов

На структурных схемах внутри прямоугольника, соответствующего позиционному элементу, изображается его статическая характеристика.

Приведем здесь пример построения *структурной схемы САУ температуры воздуха в сушильном шкафу*. Передаточные функции **объекта управления**

по управляющему и возмущающему воздействиям имеют вид (48) и (49), соответственно.

Пусть для определенности рассматривается **двухпозиционный закон регулирования**. Тогда в качестве регулятора используем двухпозиционное реле с зоной неоднозначности, математическое описание работы которого (для рассматриваемой входной величины U – напряжения, и выходной величины P – мощности нагревательного элемента) имеет следующий вид:

$$P(t) = \begin{cases} P^*, & \text{при } U \geq a; \\ 0, & \text{при } U \leq -a; \\ P^*, & \text{при } -a < U < a \text{ и } \frac{dU}{dt} < 0; \\ 0, & \text{при } -a < U < a \text{ и } \frac{dU}{dt} > 0. \end{cases} \quad (54)$$

Тогда изображение регулятора на структурной схеме будет иметь следующий вид (рисунок 14).

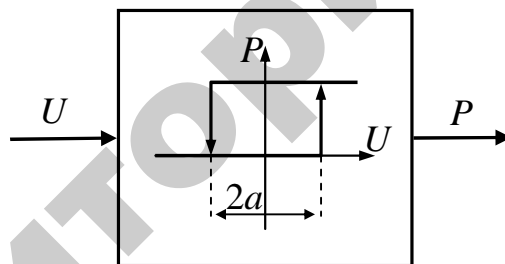


Рисунок 14 – Изображение двухпозиционного регулятора на структурной схеме системы автоматического регулирования температуры воздуха в сушильном шкафу

Далее, найдем передаточную функцию **датчика**. Функцию датчика температуры выполняет термометр сопротивления РТ1000. Он представляет собой металлический элемент (медный, платиновый, никелевый), имеющий при температуре 0°C сопротивление $R_0 = 1000$ Ом. Электрическое сопротивление металла линейно возрастает с увеличением температуры:

$$R = R_0 (1 + A \theta_d), \quad (55)$$

где R_0 – значение сопротивления датчика при температуре 0°C , Ом;

θ_d – температура чувствительного элемента датчика, °С;

A – постоянный коэффициент, значение которого зависит от металла, из которого изготовлен датчик (например, для датчика Pt1000 $A = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), $^\circ\text{C}^{-1}$.

Если такой датчик поместить в среду с некоторой температурой θ , °С, отличной θ_d , °С, то будет происходить теплообмен между чувствительным элементом датчика и окружающей средой, в результате чего температура датчика будет стремиться к температуре среды, при этом, соответственно, будет меняться и его сопротивление. Математически этот процесс будет описываться следующими формулами:

$$dQ = \alpha_d (\theta - \theta_d) \cdot dt, \quad (56)$$

$$dQ = c_d \cdot d\theta_d, \quad (57)$$

где dQ – количество теплоты, переданное от окружающей среды датчику за малый промежуток времени dt , Дж;

α_d – коэффициент теплопроводности чувствительного элемента датчика, Дж/(°С·с);

c_d – теплоемкость чувствительного элемента датчика (зависит от его массы и удельной теплоемкости металла), Дж/°С.

Приравняв выражения (56) и (57), а также выразив из формулы (55) температуру θ_d :

$$\theta_d = \frac{1}{R_0 A} (R - R_0),$$

получим

$$T_d \frac{dR_d}{dt} + R_d = K_d \theta, \quad (58)$$

где $R_d = R - R_0$ – выходной сигнал датчика, Ом;

$T_d = \frac{c_d}{K_d}$ – постоянная времени датчика, с;

$K_d = R_0 A$ – коэффициент преобразования (усиления) датчика, Ом/°С.

Учитывая для исследуемой САР начальные условия (9)–(13), будем рассматривать в качестве выходного сигнала датчика $R_{\text{д}}$ отклонение значения его сопротивления от значения сопротивления $R_{\text{д}0}$, соответствующего статическому номинальному режиму САР:

$$R_{\text{д}}^* = R_{\text{д}} - R_{\text{д}0}.$$

Тогда математическое описание датчика (58) принимает вид

$$T_{\text{д}} \frac{dR_{\text{д}}^*}{dt} + R_{\text{д}}^* = K_{\text{д}} \theta^*. \quad (59)$$

Соответственно, передаточная функция имеет вид

$$W^{\text{д}}(s) = \frac{R_{\text{д}}^*(s)}{\theta^*(s)} = \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{д}} s + 1}. \quad (60)$$

Подставим числовые значения $A = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и $R_0 = 1000 \text{ Ом}$, найдем значение коэффициента преобразования датчика:

$$K_{\text{д}} = 1000 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3} = 3,9 \text{ Ом}/^\circ\text{C}.$$

Значение постоянной времени для термосопротивления Pt1000 находим из справочной литературы [22]: $T_{\text{д}} \approx 20 \text{ с}$.

В итоге формула (59) принимает вид

$$20 \frac{dR_{\text{д}}^*}{dt} + R_{\text{д}}^* = 3,9 \theta^*.$$

Передаточная функция термосопротивления Pt1000 в виде выражения (60):

$$W^{\text{д}}(s) = \frac{3,9}{20 s + 1}. \quad (61)$$

Передаточная функция *здатчика* представляет собой коэффициент преобразования заданного значения регулируемой величины θ_3 в значение выходной величины R_3 задатчика:

$$W^3(s) = \frac{R_3(s)}{\theta_3(s)} = K_D. \quad (62)$$

Для корректного выполнения сравнения данных задатчика и датчика коэффициент преобразования задатчика в уравнении (62) должен совпадать с коэффициентом преобразования датчика в уравнении (61), тогда получаем

$$W^3(s) = 3,9. \quad (63)$$

Сравнивающее устройство выполняет вычитание сигналов задатчика и датчика и вычисляет ошибку регулирования e , В (в структурной схеме будет представлено сумматором).

Таким образом, на структурной схеме представлены передаточные функции следующих элементов: объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям, датчика, задатчика и управляющего устройства (регулятора); два сумматора (первый осуществляет вычитание сигналов датчика и задатчика, второй – суммирование выходных сигналов передаточных функций объекта по управляющему и возмущающему воздействиям).

Передаточные функции датчика, задатчика и объекта управления записываем на структурной схеме в соответствии с формулами (61), (63), (48) и (49). Поскольку в рассматриваемом случае по условию задан двухпозиционный закон регулирования, управляющее устройство представлено релейным элементом в соответствии с рисунком 14.

Окончательно получаем **структурную схему САР температуры воздуха в сушильном шкафу** (рисунок 15).

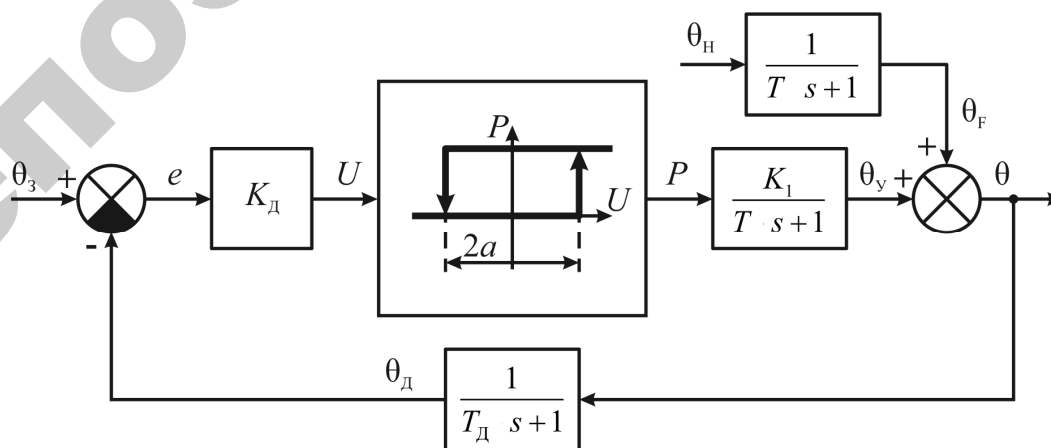


Рисунок 15 – Структурная схема САР температуры воздуха в сушильном шкафу

Аналогично рассчитываются передаточные функции элементов САР и строятся структурные схемы для остальных объектов управления (описание *структурной схемы САР уровня воды для случая, когда объектом управления является резервуар с водой с заполнением снизу*, приведено в приложении А, а полученная схема – в приложении Б).

в) После разработки структурной схемы для дальнейшего исследования нужно построить *компьютерную динамическую модель САР в среде Simulink*. Полученная модель приводится на листе 3 графической части курсовой работы.

Модель САР температуры воздуха в сушильном шкафу в среде Simulink будет содержать следующие элементы: передаточные функции объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям и передаточную функцию датчика, представленные блоками Transfer Fcn, передаточную функцию задатчика (блок Gain), управляющее устройство (двухпозиционный регулятор, представленный на схеме блоком Relay), источник ступенчатого сигнала (представленный блоком Step), осциллограф (представленный блоком Scope) и два сумматора. Работа с блоками Transfer Fcn, Step и Scope описана в разделе 5. Передаточные функции датчика и объекта управления вводятся в соответствии с формулами (48)–(49) и (61). Рассмотрим оставшиеся элементы.

В качестве двухпозиционного **регулятора** с зоной неоднозначности используем компонент Relay, находящийся в окне Simulink Library Browser в библиотеке компонентов Simulink на вкладке Discontinuities (компоненты с прерывными статическими характеристиками). Перетащим значок Relay в окно редактирования модели. Двойным щелчком левой клавишей мыши на значке Relay откроем окно задания параметров данного блока Block Parameters: Relay. В нем в поле Switch on point (точка включения) следует ввести полуширину зоны неоднозначности a (начальное значение выберем равным 0.1), в поле Switch off point (точка отключения) следует ввести $-a$. В полях Output when on (значение на выходе во включенном состоянии) и Output when off (значение на выходе в отключенном состоянии) оставим заданные по умолчанию значения: 1 и 0. Нажмем ОК.

Для представления передаточной функции **здатчика**, который является безынерционным звеном (его передаточная функция (63) равна константе), используем компонент Gain (линейное усиление), находящийся в библиотеке Simulink на вкладке Math Operations. Выделим его и перетащим в окно редактирования модели. Щелкнув два раза левой кнопкой мыши на самом компоненте, откроем окно редактирования его параметров Block parameters и в строке Gain введем коэффициент усиления – 3.9.

Компонент Sum, расположенный в окне Simulink Library Browser в библиотеке Simulink на вкладке Math Operations, служит для сложения/вычитания двух или трех сигналов. Перетащим два таких блока в окно редактирования модели – первый будет выполнять функцию **сложения** двух сигналов (управляющего и возмущающего воздействий), а второй будет находить **разность** сигналов задатчика и датчика и, таким образом, вырабатывать сигнал ошибки e .

Для задания требуемого расположения входов в первом блоке (сверху и слева) выполним двухкратный щелчок левой клавишей мыши по самому компоненту, в появившемся диалоговом окне Block parameters в строке List of signs вместо последовательности |++ введем последовательность ++|, после чего нажмем ОК.

Для задания требуемого расположения входов во втором блоке в диалоговом окне задания его параметров Block parameters в строке List of signs введем последовательность |+–, после чего нажмем ОК. При этом сигнал, подаваемый на нижний вход элемента, будет вычитаться из сигнала, подаваемого на вход слева.

Заметим, что для упрощения схемы можно выполнить перенос звена через сумматор. Перенесем передаточную функцию задатчика, расположив ее между сумматором и управляющим устройством. При этом коэффициент преобразования датчика станет равным единице.

Соединив блоки так, как показано на рисунке 16, окончательно получим компьютерную динамическую модель разрабатываемой САР температуры в помещении в среде Simulink.

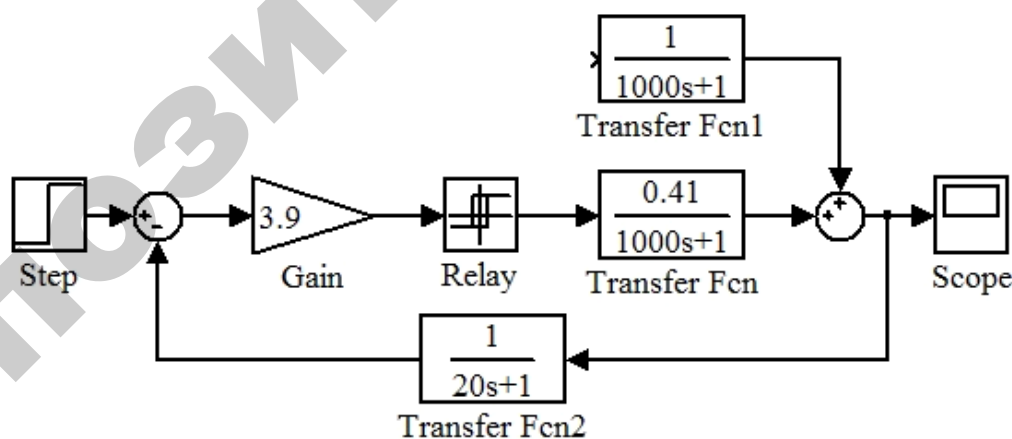


Рисунок 16 – Пример структурной схемы САР температуры в помещении в среде Simulink

Аналогично происходит построение компьютерных динамических моделей в среде Simulink для остальных объектов управления (для случая, когда объектом управления является **резервуар с водой с заполнением снизу**, описание построения

математической модели приведено в приложении А, а полученная модель – в приложении Б).

2) После этого формулируется **задача синтеза системы автоматического регулирования**, которая имеет следующий общий вид: «синтезировать САР заданной величины с заданным законом регулирования, минимизирующую (максимизирующую) некоторый критерий при выполнении некоторых ограничений». Управляемая величина и закон регулирования заданы по условию, ограничения, как правило, накладываются на перерегулирование, время регулирования либо ошибку регулирования. В качестве критерия можно выбрать оптимизацию одной из этих величин либо интегральный квадратичный критерий качества регулирования.

Для решения задачи синтеза требуется определить оптимальные параметры устройства управления (регулятора), осуществляющего регулирование в соответствии с заданным законом регулирования. Различные законы регулирования имеют различное количество параметров, которые необходимо оптимизировать.

При **пропорциональном законе регулирования** регулятор представлен передаточной функцией (50) и имеет один параметр – коэффициент пропорциональности K_p .

При **интегральном законе регулирования** регулятор представлен передаточной функцией (51) и также имеет один параметр – коэффициент интегрирования K_I .

При **пропорционально-интегральном законе регулирования** регулятор представлен передаточной функцией (52) и имеет уже два параметра – коэффициент пропорциональности K_p и коэффициент интегрирования K_I .

При формировании управляющего сигнала в соответствии с **пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования** (ПИД-законом) регулятор представлен передаточной функцией (53) и имеет три параметра – коэффициент пропорциональности K_p , коэффициент интегрирования K_I и коэффициент дифференцирования K_d .

Параметрами настройки **двухпозиционного** регулятора (пример математического описания – (54)) являются заданное значение регулируемой величины Y_3 и полуширина зоны неоднозначности a . Следовательно, при двухпозиционном законе регулирования регулятор также имеет два параметра.

Приведем пример формулировки **задачи синтеза САР температуры воздуха в сушильном шкафу**:

синтезировать САР температуры воздуха в сушильном шкафу с двухпозиционным законом регулирования, удовлетворяющую **критерию**:

– максимальное отклонение от заданного значения в автоколебаниях должно быть минимальным,

и *ограничению*:

– период автоколебаний не должен быть меньше 1000 с.

В этом случае регулятор имеет один параметр – ширину зоны неоднозначности $2a$ (поскольку заданное значение регулируемой величины известно из условия).

В зависимости от задания на курсовую работу, подобным образом формулируется задача синтеза САР и в остальных случаях. Пример формулировки *задачи синтеза САР уровня воды в резервуаре с заполнением снизу* приведен в приложении А.

7 Определение параметров регулятора с применением последовательного симплекс-метода

В этом разделе требуется определить оптимальное значение параметров регулятора (от одного до трех, в соответствии с заданным законом регулирования) с выбранным шагом изменения параметров в соответствии с поставленной задачей синтеза САР.

Для нахождения искомого оптимального значения параметра используется **последовательный симплекс-метод**.

Эксперимент, проводимый с помощью последовательного симплекс-метода, заключается в построении начального симплекса и проведении опытов с вычислением значений критерия во всех вершинах построенного симплекса. Затем производится выбор отбрасываемой вершины симплекса (в которой значение критерия приняло наихудшее значение) и достроение второго симплекса путем выбора новой точки взамен отброшенной. В новой точке проводится опыт, вычисляется значение критерия, и оценка точек повторяется для второго симплекса. Таким образом, проводится последовательное перемещение в точку, в которой критерий принимает оптимальное значение.

Для построения начального симплекса нужно задать начало координат и шаг варьирования по каждой переменной. Если выбрать систему координат, то точки, задающие вершины симплекса, можно записать в таблицу (матрицу).

Построение начального симплекса проводится в кодированных координатах. В кодированных координатах одна из вершин совпадает с началом координат, а шаг варьирования равен единице.

Если производится поиск оптимального значения **одного фактора** (обозначим его x), то симплекс-план содержит **две** вершины (нужно провести два опыта). В таблице 3 представлен начальный симплекс-план для $K=1$ в кодированных координатах.

Таблица 3 – Начальный симплекс-план для одного фактора

№ точек	x
1	0
2	1

Если производится поиск оптимального значения **двух факторов** (x_1, x_2), то симплекс-план содержит **три** вершины (нужно провести три опыта). Координаты начального симплекс-плана в кодированных координатах представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Начальный симплекс-план для двух факторов

№ точек	x_1	x_2
1	0	0
2	1	0
3	0.5	0.86

Если производится поиск оптимального значения **трех факторов** (x_1, x_2, x_3), то симплекс-план содержит **четыре** вершины (нужно провести четыре опыта). Координаты начального симплекс-плана в кодированных координатах представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Начальный симплекс-план для трех факторов

№ опыта	x_1	x_2	x_3
1	0	0	0
2	1	0	-1
3	0	1	-1
4	1	0	0

После того, как выбран план первого цикла, следует провести опыты в соответствии с планом. Для перехода от кодированных координат к натуральным следует воспользоваться соотношениями:

$$\%_j = \%_j^0 + \Delta\%_j \cdot x_j, \quad (64)$$

где $\%_j^0$ – значение j -го фактора на нулевом уровне в натуральной системе координат;

x_j – значение j -го фактора в кодированной системе координат;

$\Delta\%_j$ – шаг варьирования j -го фактора.

Для определения предпочтительного направления движения к оптимуму следует сравнить между собой результаты опытов и указать наихудший из них.

Правило отражения: наихудшая вершина отражается относительно противоположной грани (для правильного симплекса).

Формула для отражения вершины:

$$\%_{j,N+1} = \frac{2}{k} \sum_{u=1}^k \%_{j,u} - \%_j^*, \quad (65)$$

где $N = k + 1$ – число точек в исходном симплексе;

$\%_{j,N+1}$ – координата новой точки в натуральных координатах для фактора с номером j (суммирование ведется по всем опытам, кроме отвергнутого);

$\%_j^*$ – координата данного фактора в отвергнутом опыте.

Одной новой точки достаточно, чтобы получить снова симплекс (это справедливо для любого числа факторов). Следовательно, произведя только один новый опыт, мы получим новый симплекс, к которому опять можно применить правило отражения.

Последовательный симплекс-метод находит оптимум (с точностью до своих размеров) и зацикливается вокруг наилучшей точки.

Формальный **признак зацикливания** – сохранение одной точки на протяжении $(k + 1)$ -го шага.

Таким образом, при выполнении работы по этому разделу:

1) следует определить количество оптимизируемых параметров и величину шага варьирования по каждому параметру;

2) в зависимости от параметров передаточной функции регулятора за основу берется одна из таблиц 3–5 и составляется таблица начального симплекс-плана в натуральных координатах с использованием формул перехода (64);

3) полученная таблица дополняется столбцами критерия и условий;

4) проводится моделирование синтезируемой САР на учебной экспериментальной установке с определением значений критерия и условий и заполнением таблицы по результатам эксперимента во всех точках начального симплекса;

5) производится выбор отбрасываемой вершины симплекса (в которой значение критерия приняло наихудшее значение) и достроение второго симплекса путем выбора новой точки взамен отброшенной с использованием формул отражения (65);

6) в новой точке проводится опыт, вычисляется значение критерия, и оценка точек повторяется для второго симплекса. Таким образом, проводится последовательное перемещение в точку, в которой критерий принимает оптимальное значение;

7) проведение эксперимента завершается при зацикливании симплекса вокруг наилучшей точки.

После нахождения наилучшей точки определяются соответствующие ей оптимальные значения параметров регулятора.

Покажем, как с использованием последовательного симплекс-метода найти оптимальное значение параметра X (ширины зоны неоднозначности двухпозиционного регулятора $2a$) для сформулированной задачи синтеза САР температуры в сушильном шкафу. Шаг изменения параметров примем $X = 0.05$, начальное значение параметра $X = 0.5$. С использованием таблицы 3 и формулы (64) для построения начального симплекс-плана в натуральных координатах получаем таблицу 6.

Таблица 6 – Начальный симплекс-план в натуральных координатах

№ точек	K_p
1	0.5
2	0.55

Исходя из условий задачи синтеза, дополним таблицу эксперимента столбцами ограничений (значения периода автоколебаний T) и критерия (значения максимального отклонения от заданного значения при автоколебаниях $Y = A_{\max} - \theta z$).

При проведении опытов изменяем значения оптимизируемого параметра в соответствии с расчетами по формуле (65), и для каждого нового значения параметра проводим компьютерное моделирование в среде Simulink. По мере проведения моделирования заполняем таблицу 7.

Таблица 7 – Результаты проведения эксперимента

№	X	T	Y
1	0.5	1630	1.97
2	0.55	1755	2.08
3	0.45	1505	1.87
4	0.4	1390	1.75
5	0.35	1280	1.6
6	0.3	1170	1.5
7*	0.25	1060	1.4
8	0.2	945	1.2

Из данных таблицы 7 следует, что опыт № 7 является оптимальным: значение критерия в этом опыте минимальное, при этом период автоколебаний не выходит за заданные пределы.

Таким образом, оптимальное значение параметра X регулятора: $X = 0.25$.

Пример того, как найти *оптимальные параметры регулятора при использовании П-закона для САР уровня воды в резервуаре с заполнением снизу* приведен в приложении А. Для остальных случаев оптимальные параметры регулятора с использованием последовательного симплекс-метода находятся аналогично.

8 Моделирование переходных характеристик системы автоматического регулирования и определение показателей качества регулирования

При выполнении этого раздела курсовой работы производится получение графиков переходных характеристик синтезированной САР с найденными оптимальными значениями параметров регулятора с использованием учебных экспериментальных установок по изучению систем замкнутого регулирования.

По полученному графику переходной функции САР определяются значения показателей качества регулирования: перерегулирование, время регулирования и статическая ошибка регулирования по следующим формулам:

– перерегулирование: $\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} 100\%$;

– статическая ошибка регулирования: $e_{\text{ст}} = 1 - h_{\text{уст}}$;

– время регулирования: $t_{\text{рег}}$ – время от начала регулирования до момента, когда отклонение выходной величины от установившегося значения не превысит 5%.

Делается вывод о качестве синтезированной системы.

В случае, когда рассматривается двухпозиционный закон регулирования, показателями качества регулирования являются период автоколебаний и значение максимального отклонения от заданного значения при автоколебаниях.

Так, для САР температуры воздуха в сушильном шкафу с двухпозиционным законом регулирования для найденного оптимального значения параметра $X = 0.25$ **переходная функция**, построенная с помощью среды Simulink, имеет вид, приведенный на рисунке 17.

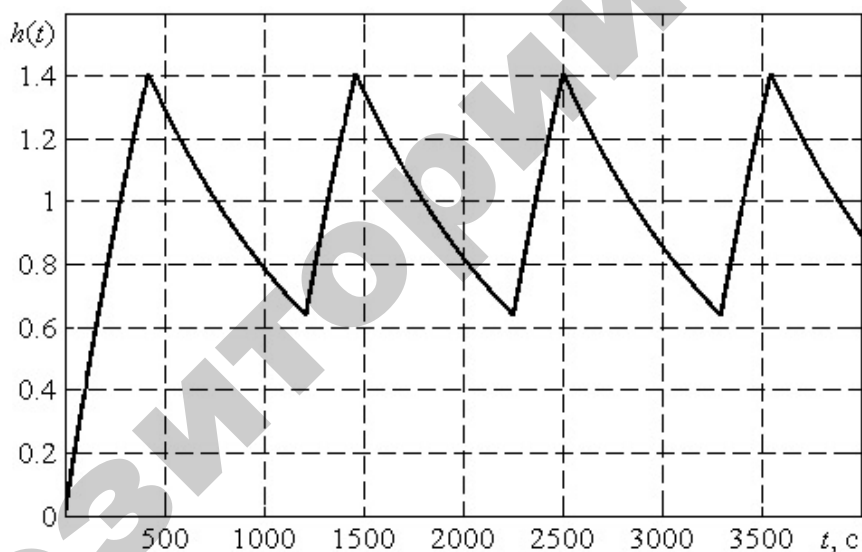


Рисунок 17 – Экспериментальная переходная функция САР температуры воздуха в сушильном шкафу с двухпозиционным законом регулирования

При этом получены следующие значения показателей качества регулирования:

– период автоколебаний $T = 1060$ с;

– значение максимального отклонения от заданного значения при автоколебаниях $Y = A_{\max} - \theta_3 = 1.4$.

Экспериментальная **переходная функция** САР уровня воды в резервуаре с заполнением снизу приведена в приложении А.

Требования к оформлению курсовой работы

Оформление листов пояснительной записки

1. Текстовые материалы пояснительной записки (ПЗ) выполняются на листах белой машинописной бумаги, оформленных рамками в соответствии с рисунком 18.

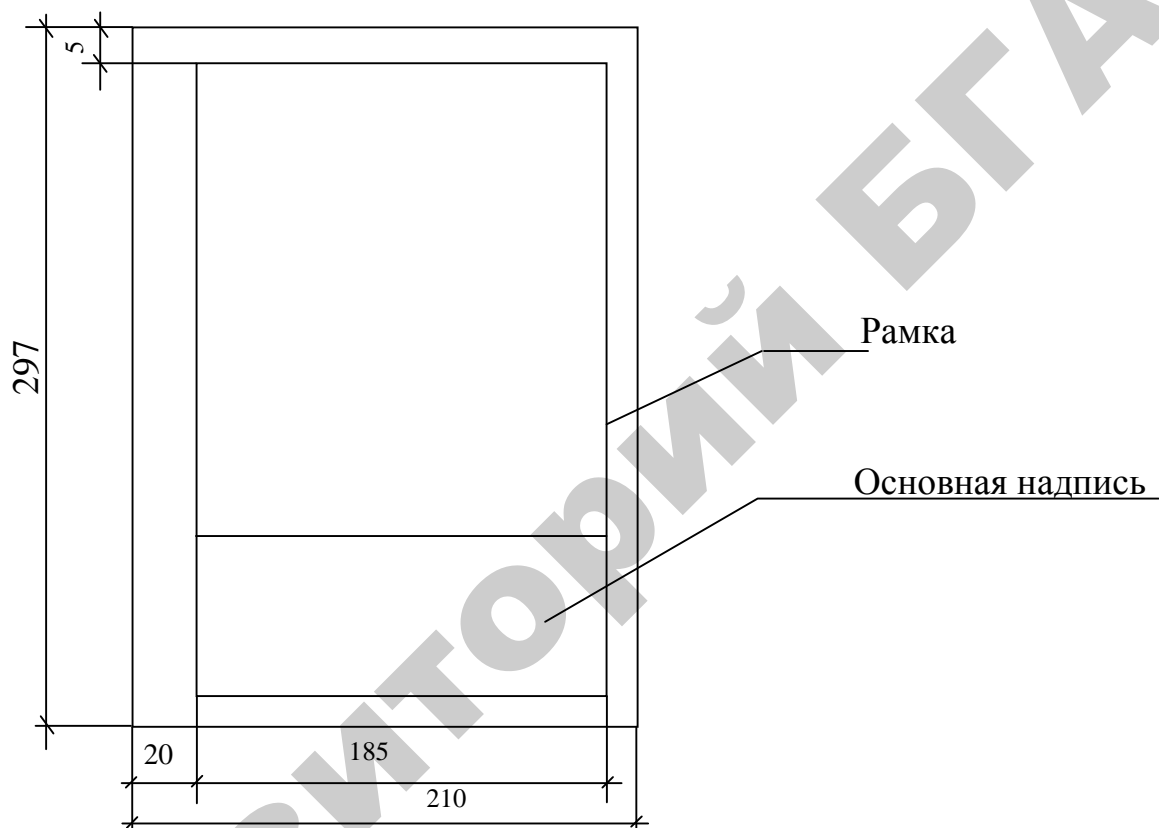


Рисунок 18 – Компоновка и размеры листа текстовой части пояснительной записки

2. Основная надпись на листах ПЗ выполняется в соответствии с рисунком 19.

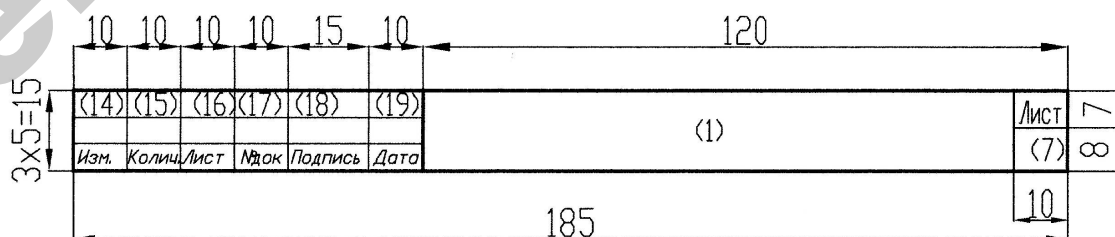


Рисунок 19 – Форма основной надписи для листов пояснительной записки

3. Листы записки и приложений имеют сквозную нумерацию арабскими цифрами. Титульному листу, заданию, реферату номера присваивают, но не проставляют. Номера страниц начинают проставлять с листа «Содержание».

4. Иллюстрации (таблицы, чертежи, схемы и т. п.), расположенные на отдельных листах записки, включают в общую нумерацию страниц. При этом лист, формат которого больше формата А4, учитывают как одну страницу.

Правила построения текстового материала

1. Текстовый материал пояснительной записки подразделяют на разделы, подразделы, пункты.

Разделам присваивают порядковые номера, которые обозначают арабскими цифрами без точки и записывают с абзацного отступа.

Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номера раздела и номера подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится.

Если раздел или подраздел состоит из одного пункта, то пункт не нумеруется.

2. Разделы, подразделы и, при необходимости, пункты должны иметь заголовки. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов, пунктов. Переносы слов в заголовках не допускаются.

Заголовки подразделов (пунктов) не должны повторять содержание заголовков разделов (подразделов).

Заголовок записывается с прописной буквы. Точка в конце не ставится. Заголовки не подчеркиваются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

3. Каждый раздел пояснительной записки следует начинать с новой страницы.

Формулы

1. В пояснительной записке математические формулы могут быть расположены внутри текста или отдельными строками. Внутри текста помещают несложные и не дробные формулы. Такие формулы, как правило, не нумеруют.

На отдельных строках приводят более сложные формулы, которые обычно сопровождаются пояснениями примененных символов. При этом выше и ниже формулы необходимо оставлять по одной свободной от записи строке.

2. Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, разделяют запятой.

3. Если формула не умещается в одну строку, то делается перенос. Переносить формулу на следующую строку допускается только на знаках выполнения операций: плюс (+), минус (–), умножение (×) или на знаках равенства (=), неравенства (≠), знаках соотношений и т. п.

4. Все формулы, помещенные в тексте пояснительной записки, нумеруют арабскими цифрами, которые записывают на уровне формулы справа от нее в круглых скобках.

5. Допускается нумерация формул в пределах раздела. В этом случае номер формулы состоит из номера раздела и номера формулы, разделенных точкой, например: (3.1).

Пример. Номинальный ток асинхронного электродвигателя I_n , А, определяется по формуле

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \cos \varphi_n \eta_n}, \quad (66)$$

где P_n – номинальная мощность, кВт;
 U_n – номинальное напряжение, кВ;
 $\cos \varphi_n$ – коэффициент мощности, о.е.;
 η_n – КПД электродвигателя, о.е.

Таблицы

1. Название таблицы должно отражать содержание таблицы, быть точным, кратким. Название следует размещать над таблицей после слова «Таблица».

При переносе части таблицы на другие страницы название помещают только над первой частью таблицы.

2. Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах

раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

3. На все таблицы должны быть приведены ссылки в тексте. При ссылке необходимо писать слово «таблица» с указанием ее номера.

4. Заголовки граф и строк в таблице следует писать с прописной буквы, а подзаголовки граф – со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставят.

Оформление проектной документации

1. *Проектной документации* присваивают обозначение, состоящее из базового цифрового обозначения и через дефис – буквенного обозначения (см. структуру обозначения).

Структура базового обозначения при курсовом проектировании:

$$X_1X_2.X_3X_4.X_5X_6X_7.X_8X_9 - X_{10}X_{11}X_{12}$$

где X_1X_2 – индекс работы: 03 – курсовая работа;

X_3X_4 – индекс кафедры;

$X_5X_6X_7$ – номер варианта по заданию;

X_8X_9 – год разработки (две последние цифры года);

$X_{10}X_{11}X_{12}$ – для текстовых материалов – ПЗ, для графических материалов – марка разрабатываемого чертежа.

Индекс кафедры:

АСУП – 49.

2. Основные надписи

Применение тех или иных форм основных надписей определяется назначением чертежа и материалом, помещенным на разрабатываемом чертеже:

1) форма рисунка 20 – для чертежей генпланов с инженерными сетями, планов зданий и сооружений с размещением оборудования, чертежей схем электрических, технологических и т. п.;

2) форма рисунка 21 – для первого листа пояснительной записки, с которого начинается изложение текстовой части;

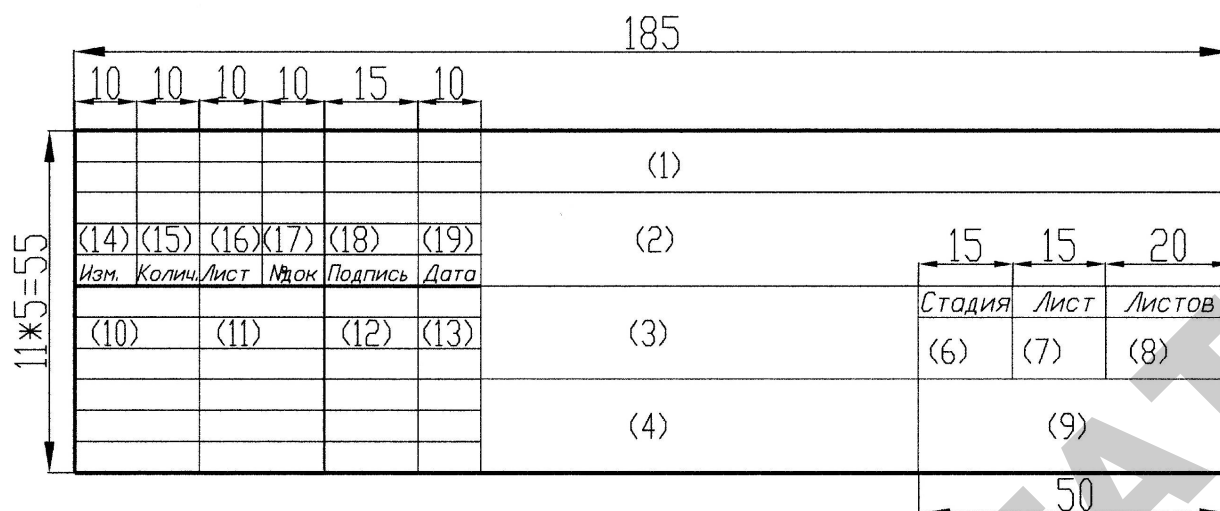


Рисунок 20 – Форма основной надписи, которая применяется для листов графической части и листа ведомости комплекта проектной документации

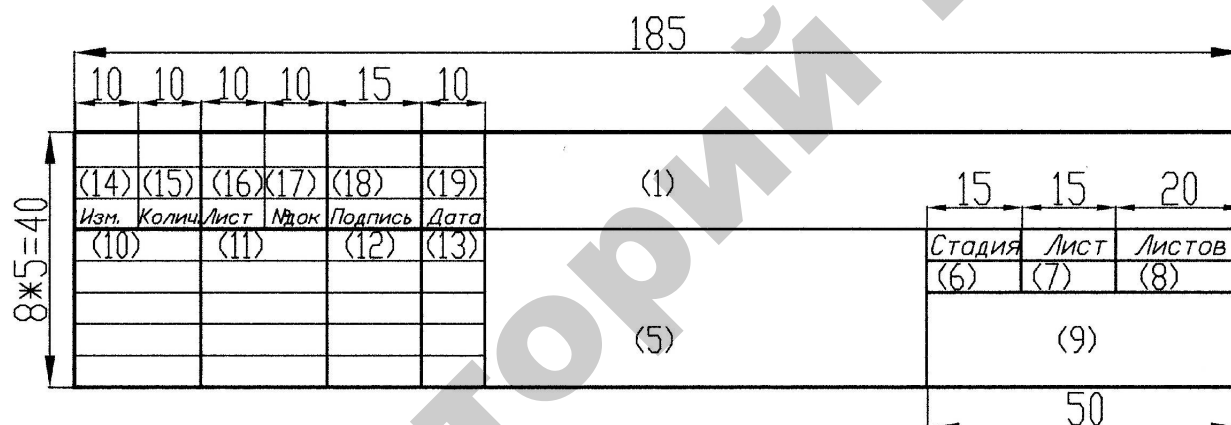


Рисунок 21 – Форма основной надписи, которая применяется для листа ПЗ, с которой начинается изложение текстовой части записки (обычно лист «Содержание»)

Указания о заполнении основной надписи

В графах основной надписи (на рисунках 19, 20, 21 номера граф показаны в скобках) указывают:

в графе 1 – обозначение проектной документации – маркировка документа:

базовое обозначение;

добавляемая через дефис марка разрабатываемых чертежей;

в графе 2 – тему курсовой работы;

в графе 3 – наименование здания (сооружения). Для чертежа генерального плана в графе 3 записывают наименование соответствующего раздела, например «электроснабжение», «теплоснабжение» или «диспетчеризация», «диспетчерское управление»;

в графе 4 – наименование изображения или материала, помещенного на данном листе, то есть название чертежа, листа. Если на листе приведены несколько материалов (например, план здания, разрез II–II, экспликация, перечень элементов, сечение «А–А» и т. п.), то в название чертежа включают основные материалы, второстепенные – опускают;

в графе 5 – наименование документа аналогично графе 4 (обычно – «Пояснительная записка»);

в графе 6 – условное обозначение стадии проектирования: «С» (строительный проект);

в графе 7 – порядковый номер листа. На документе, состоящем из одного листа, графу не заполняют;

в графе 8 – общее число листов документа;

в графе 9 на первой строке записывают наименование организации, разработавшей документ (БГАТУ), на второй строке – шифр зачетной книжки студента;

в графе 10 – характер работы: «разработал» (студент); в следующей строке – «руководитель», далее – «консультант», «нормоконтролер», «зав. кафедрой»;

в графе 11 – фамилии студента, руководителя, консультанта(ов), нормоконтролера, зав. кафедрой в соответствующих строках;

в графе 12 – подписи;

в графе 13 – даты;

графы 14–19 не заполняются.

Список рекомендованных источников

1. Анхимюк, В. Л. Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Олейко, Н. Н. Михеев. – Минск : Дизайн ПРО, 2000 – 352 с., ил.
2. Баландин, Д. В. Классические и современные методы построения регуляторов в примерах [Электронный ресурс] / Д. В. Баландин, С. Ю. Городецкий. – Электронное учебно-методическое пособие (3.74 Мб). – Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. – 122 с.
3. Власов, К. П. Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета : учебное пособие для студентов вузов / К. П. Власов. – [2-е изд., испр. и доп.]. – Харьков : Гуманитарный центр, 2013. – 540 с.
4. Власов, К. П. Теория автоматического управления : учебное пособие / К. П. Власов. – Харьков : Гуманитарный центр, 2007. – 528 с. : ил.
5. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие для студентов вузов / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. – 464 с.
6. Горский, В. Г. Последовательный симплекс-метод / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер // Планирование промышленных экспериментов. – М. : Металлургия, 1974. – Гл. 5. – 264 с.
7. Дилигенская, А. Н. Идентификация объектов управления : учебное пособие / А. Н. Дилигенская. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2009. – 136 с.
8. Дьяконов, В. MATLAB Анализ, идентификация и моделирование систем / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб : Питер, 2001. – 448 с.
9. Ерофеев, А. А. Теория автоматического управления : учебник для вузов. / А. А. Ерофеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб : Политехника, 2003. – 302 с. : ил.
10. Коновалов, Б. М. Теория автоматического управления : учебное пособие для студентов вузов / Б. М. Коновалов, Ю. М. Лебедев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2015. – 220 с.
11. Кочетков, В. П. Основы теории управления : учебное пособие для студентов вузов / В. П. Кочетков. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2012. – 412 с.
12. Ощепков, А. Ю. Системы автоматического управления: теория, управление, моделирование в MATLAB : учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. / А. Ю. Ощепков. – СПб : Издательство «Лань», 2013. – 208 с. : ил.
13. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления : учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Я. Ротач. – М. : Издательство МЭИ, 2004. – 400 с.

14. Сидоренко, Ю. А. Теория автоматического управления / Ю. А. Сидоренко. – Минск : БГАТУ, 2007. – 124 с.

15. Тарасов, А. В. Экспериментальное определение передаточной функции объекта регулирования / А. В. Тарасов, А. А. Чепуштанов, Н. С. Горяев. – Ползуновский альманах, 2011. – № 1. – с. 116–118.

16. Теория автоматического управления : учебник / В. Н. Брюханов [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – 4-е изд., стереотип. – М. : Высшая школа, 2003. – 272 с. : ил.

17. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб : Невский диалект, 2001. – 557 с.

18. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

19. Шидловский, С. В. Динамика систем автоматического управления / С. В. Шидловский // Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. – Томск : Томский государственный университет, 2006. – Гл. 4. – 288 с.

Технические нормативные правовые акты

20. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения : ГОСТ 19.701–90. – Взамен ГОСТ 19.002–80, ГОСТ 19.003.80 ; введ. 1992.01.01. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 24 с.

21. Общие требования к организации проектирования и правила оформления дипломных и курсовых проектов (работ) : учебно-методическое пособие / В. В. Гурин, Е. С. Якубовская, И. П. Матвеев [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2014. – 144 с.

Интернет ресурсы

22. Датчики температуры [Электронный ресурс] // Альянс ТЕРМО. – URL : <http://www.altermo.ru/katalog/datchiki-temperature-danfoss>. – Дата обращения 6.03.2018.

23. Официальный сайт компании MathWorks [Электронный ресурс] // The MathWorks. – URL : <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. – Дата обращения : 6.03.2018.

24. MatLab [Электронный ресурс] // Центр компетенций MathWorks. – URL : <https://matlab.ru/products/matlab>. – Дата обращения : 6.03.2018.

25. Simulink [Электронный ресурс] // Центр компетенций MathWorks. – URL : <https://matlab.ru/products/simulink>. – Дата обращения : 6.03.2018.

Пример выполнения расчетно-пояснительной записки к курсовой работе

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Агроэнергетический факультет

Кафедра «Автоматизированные системы
управления производством»

Курсовая работа

по дисциплине «Теория автоматического управления»

Вариант №4

Тема: «Разработка системы автоматического регулирования уровня воды
в верхнем резервуаре (апериодическое звено первого порядка)
с пропорциональным законом регулирования»

Студент 3 курса 13а группы

_____ /Иванов И.И./

(личная подпись) (Ф.И.О.)

Шифр зачетной книжки

_____ 7112017

Руководитель

_____ /Матвейчук Н.М./

(личная подпись) (Ф.И.О.)

Минск 2018

Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет»
Агроэнергетический факультет

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АСУП

_____/А.Г.Сеньков/

«16» марта 2018 г.

ЗАДАНИЕ
на курсовую работу

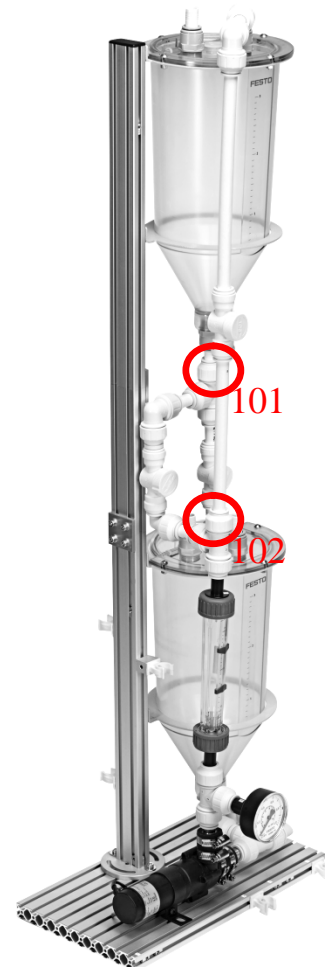
Студенту Иванову И.И.

1. Тема курсовой работы «Разработка системы автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением снизу (апериодическое звено 1-го порядка) с пропорциональным законом регулирования»
2. Срок сдачи студентом законченной работы до «15» мая 2018 г.
3. Исходные данные к работе

Объектом управления системы автоматического регулирования (САР) является лабораторная установка, изображенная на рисунке. Установка включает в себя два заполняемые водой резервуара. Вода закачивается в верхний резервуар посредством центробежного насоса через **нижний клапан В101**.

Управляемая величина – уровень воды в **верхнем** резервуаре z , л. Номинальное значение управляемой величины 1 л. Для ее измерения в установке имеется ультразвуковой датчик уровня.

Управляющее воздействие на объект – изменение степени открытия запорного клапана В101 на притоке – x_1 , выраженное в относительных единицах (значение степени открытия, равное 0, соответствует закрытому запорному крану, значение, равное 1 – полностью открытому).



Возмущающее воздействие на объект – изменение степени открытия запорного крана V102 на стоке – x_2 , выраженное в относительных единицах (значение степени открытия, равное 0, соответствует закрытому запорному крану, значение, равное 1 – полностью открытому).

Устройством управления является электронный микропроцессорный блок управления, реализованный на основе персональной ЭВМ.

Требуется синтезировать САР уровня воды в резервуаре с **П-законом** управления.

4. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов).

1) Разработка математической модели объекта управления и ее линеаризация. 2) Решение дифференциального уравнения, описывающего объект управления, и определение передаточных функций объекта управления. 3) Экспериментальное определение численных значений параметров передаточных функций объекта управления. 4) Моделирование переходных характеристик объекта управления. 5) Разработка функциональной и структурной схем САР и постановка задачи синтеза. 6) Определение параметров регулятора с применением последовательного симплекс-метода. 7) Моделирование переходных характеристик САР и определение показателей качества регулирования.

5. Перечень графического материала.

Функциональная схема САР; структурная схема САР; компьютерная динамическая модель САР в среде Simulink.

6. Дата выдачи задания «16» марта 2018 г.

7. Календарный график работы:

25 % проекта (вопросы 1, 2) – «1» апреля 2018 г.

50 % проекта (вопросы 3, 4) – «14» апреля 2018 г.

75 % проекта (вопросы 5, 6) – «29» апреля 2018 г.

100 % проекта (вопрос 7, оформление записки) «11» мая 2018 г.

Подготовка презентации и защита КР – «20» мая 2018 г.

Руководитель _____ Матвейчук Н.М.
(подпись) (инициалы, фамилия)

Задание принял к исполнению «16» марта 2018 г.

(подпись)

Реферат

Курсовая работа выполнена в объеме: пояснительная записка на 30 страницах машинописного текста, таблиц – 3, рисунков – 9; графическая часть – 3 листа формата А4; список использованных источников – 10.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, объект управления, математическая модель, передаточная функция, переходная функция, функциональная схема, структурная схема, регулятор, симплекс-метод.

Рассмотрена система автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением снизу и пропорциональным законом управления. Разработана математическая модель объекта управления и определены передаточные функции, получены теоретические и экспериментальные переходные характеристики объекта управления. Установлено, что объект управления представляет собой апериодическое звено первого порядка как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям, является устойчивым. Разработана функциональная и структурная схемы САУ с П-законом регулирования и определены оптимальные параметры регулятора. Для системы с оптимальными параметрами регулятора получены переходные характеристики и произведена оценка показателей качества регулирования.

Полученная система автоматического регулирования удовлетворяет всем требованиям к качеству регулирования.

Содержание

Введение	6
1. Исходные данные	7
2. Разработка математической модели объекта управления и ее линеаризация	8
3. Решение дифференциального уравнения, описывающего объект управления и определение передаточных функций объекта управления	12
4. Экспериментальное определение численных значений параметров передаточных функций объекта управления	15
5. Моделирование переходных характеристик объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям в среде Simulink	17
6. Разработка функциональной и структурной схем системы автоматического регулирования и постановка задачи синтеза	19
8. Определение параметров регулятора с применением последовательного симплекс-метода	24
8. Моделирование переходных характеристик системы автоматического регулирования и определение показателей качества регулирования	27
Заключение	29
Список использованных источников	30

						<i>03.49.011.18 – ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Колич.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Пояснительная записка</i>	<i>Стадия</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Иванов</i>					<i>УП</i>		
<i>Руковод.</i>		<i>Матвейчук</i>							
<i>Консульт.</i>									
<i>Зав. каф.</i>		<i>Сеньков</i>					<i>БГАТУ N7112017</i>		

Введение

Система автоматического регулирования состоит из регулируемого объекта и элементов управления, которые воздействуют на объект при изменении одной или нескольких регулируемых переменных. Под влиянием входных сигналов (управления или возмущения), изменяются регулируемые переменные. Цель регулирования заключается в формировании таких законов регулирования, при которых выходные регулируемые переменные мало отличались бы от требуемых значений. Решение данной задачи во многих случаях осложняется наличием случайных возмущений (помех). Необходимо, чтобы сигналы управления проходили через систему с малыми искажениями, а сигналы шума практически не пропускались.

В данной курсовой работе рассматривается система автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением снизу (объект управления представляет собой апериодическое звено первого порядка). Заданным законом регулирования является пропорциональный закон.

Задачи данной курсовой работы:

- разработка математической модели объекта управления и ее линеаризация;
- решение дифференциального уравнения, описывающего объект управления и определение передаточных функций объекта управления;
- экспериментальное определение численных значений параметров передаточных функций объекта управления;
- моделирование переходных характеристик объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям в среде Simulink;
- разработка функциональной и структурной схем системы автоматического регулирования с заданным законом регулирования и постановка задачи синтеза;
- определение параметров регулятора с применением последовательного симплекс-метода;
- моделирование переходных характеристик системы автоматического регулирования и определение показателей качества регулирования.

1 Исходные данные

Объектом управления системы автоматического регулирования является верхний резервуар с водой с заполнением снизу (рисунок 1.1).

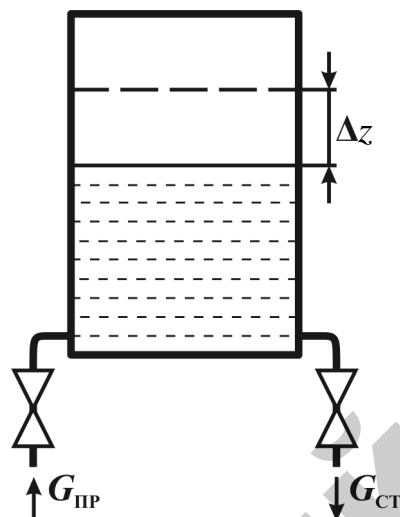


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение объекта управления

Управляемая величина – уровень воды z в верхнем резервуаре (в данной работе измеряется в литрах). Номинальное значение управляемой величины $z_0 = 1$ л. Для ее измерения имеется ультразвуковой датчик уровня, который преобразует значение уровня воды в электрический сигнал – напряжение U_d , В.

Вода закачивается в резервуар посредством центробежного насоса. Управляющее и возмущающее воздействия на объект – изменение степени открытия запорного клапана на притоке – x_1 и стоке – x_2 , соответственно, выраженные в относительных единицах (значение степени открытия, равное 0, соответствует закрытому клапану, значение, равное 1 – полностью открытому). Номинальные значения $x_1^0 = 1$, $x_2^0 = 0,5$.

Устройством управления является электронный микропроцессорный блок управления, реализованный на основе персональной ЭВМ.

Требуется синтезировать систему автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением снизу с П-законом регулирования. Числовые значения данных определить экспериментально.

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

2 Разработка математической модели объекта управления и ее линеаризация

Пусть в течение некоторого небольшого отрезка времени Δt приток жидкости $G_{\text{ПР}}$ и сток $G_{\text{СТ}}$ (размерность обеих величин – м³/с) сохраняются постоянными. Тогда уравнение материального баланса для указанного отрезка времени будет иметь следующий вид:

$$S\Delta z = (G_{\text{ПР}} - G_{\text{СТ}})\Delta t, \quad (2.1)$$

где S – площадь бака, м²;

Δz – изменение уровня воды в баке, м.

Так как в общем случае приток воды в бак и сток из бака изменяются во времени, то есть $G_{\text{ПР}} = G_{\text{ПР}}(t)$ и $G_{\text{СТ}} = G_{\text{СТ}}(t)$, то уравнение (2.1) будет справедливо только при очень коротком промежутке времени Δt , за который значения притока и стока не могут заметно измениться, то есть при $\Delta t \rightarrow 0$. Таким образом, при $\Delta t \rightarrow 0$ получим уравнение материального баланса при изменяющихся со временем притоке и стоке:

$$Sdz = (G_{\text{ПР}} - G_{\text{СТ}})dt,$$

или

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{S}G_{\text{ПР}} - \frac{1}{S}G_{\text{СТ}}. \quad (2.2)$$

Расход жидкости на притоке и стоке зависит от перепада давления на клапанах и от степени открытия клапанов и определяется по формулам

$$\begin{aligned} G_{\text{ПР}} &= \alpha_{\text{ПР}} x_1 \sqrt{p_{\text{ПР}}^0 - z}, \\ G_{\text{СТ}} &= \alpha_{\text{СТ}} x_2 \sqrt{z - p_{\text{СТ}}^0}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

Используем для этого разложение функции в ряд Тейлора.

$$\frac{dz}{dt} = f(z, x_1, x_2) \approx f(z_0, x_1^0, x_2^0) + \left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_0 \cdot \frac{z - z_0}{1!} + \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_0 \cdot \frac{x_1 - x_1^0}{1!} + \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_0 \cdot \frac{x_2 - x_2^0}{1!}, \quad (2.6)$$

где

$$f(z, x_1, x_2) = \frac{\alpha_{\text{ПР}}}{S} x_1 \sqrt{p_{\text{ПР}}^0 - z} - \frac{\alpha_{\text{СТ}}}{S} x_2 \sqrt{z - p_{\text{СТ}}^0}. \quad (2.7)$$

Тогда с учетом (2.5) имеем $f(z_0, x_1^0, x_2^0) = 0$.

Введем обозначения:

$$a = \left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_0, \quad b_1 = \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_0, \quad b_2 = \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_0. \quad (2.8)$$

Рассмотрим отклонения управляемой величины z , управляющего x_1 и возмущающего x_2 воздействий от начальных значений z_0, x_1^0, x_2^0 :

$$\begin{aligned} z^* &= z - z_0, \\ x_1^* &= x_1 - x_1^0, \\ x_2^* &= x_2 - x_2^0. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Так как выполняется $\frac{dz}{dt} = \frac{dz^*}{dt}$, выражение (2.6) можно переписать в виде

$$\frac{dz^*}{dt} = az^* + b_1 x_1^* + b_2 x_2^*. \quad (2.10)$$

Необходимо найти числовые значения коэффициентов a, b_1, b_2 .

Найдем частные производные выражения (2.7), получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{dz} &= -\frac{\alpha_{\text{ИП}}}{2S\sqrt{p_{\text{ИП}}^0 - z}}x_1 - \frac{\alpha_{\text{СТ}}}{2S\sqrt{z - p_{\text{СТ}}^0}}x_2; \\ \frac{\partial f}{dx_1} &= \frac{\alpha_{\text{ИП}}}{S}x_1\sqrt{p_{\text{ИП}}^0 - z}; \\ \frac{\partial f}{dx_2} &= -\frac{\alpha_{\text{СТ}}}{S}x_2\sqrt{z - p_{\text{СТ}}^0}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Тогда значения коэффициентов a , b_1 , b_2 равны (подставим в качестве начальных значения, соответствующие номинальному уровню $z = z_0$, $x_1 = x_1^0$, $x_2 = x_2^0$):

$$\begin{cases} a = -\frac{\alpha_{\text{ИП}}}{S}x_1^0 \frac{1}{2\sqrt{p_{\text{ИП}}^0 - z_0}} - \frac{\alpha_{\text{СТ}}}{S}x_2^0 \frac{1}{2\sqrt{z_0 - p_{\text{СТ}}^0}}, \\ b_1 = \frac{\alpha_{\text{ИП}}}{S}\sqrt{p_{\text{ИП}}^0 - z_0}, \\ b_2 = -\frac{\alpha_{\text{СТ}}}{S}\sqrt{z_0 - p_{\text{СТ}}^0}. \end{cases} \quad (2.12)$$

Окончательно выражение (2.10) может быть преобразовано к следующему виду:

$$T \frac{dz^*}{dt} + z^* = K_1 x_1^* + K_2 x_2^*, \quad (2.13)$$

где $T = -\frac{1}{a}$ – постоянная времени объекта, с;

$K_1 = -\frac{b_1}{a}$, $K_2 = -\frac{b_2}{a}$ – коэффициенты преобразования (усиления) объекта, л/м;

значения коэффициентов a , b_1 , b_2 находятся по формуле (2.12).

3 Решение дифференциального уравнения, описывающего объект управления и определение передаточных функций объекта управления

Выражение (2.13) является линейным неоднородным дифференциальным уравнением 1-го порядка. Решение данного уравнения – изменение со временем уровня воды в баке $z^* = z^*(t)$ – зависит от того, какой вид имеют входные сигналы: изменение во времени управляющего воздействия $x_1^* = x_1^*(t)$ и возмущающего воздействия $x_2^* = x_2^*(t)$.

В качестве типового входного воздействия рассмотрим ступенчатое воздействие, которое математически описывается следующим образом:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0, \\ u_0, & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (3.1)$$

где $u_0 = 0,01$.

В данном случае ступенчатое воздействие (3.1) не является единичным, а значение $u_0 = 0,01$ выбрано потому, что степень открытия клапана может изменяться от 0 до 1, как было отмечено выше.

Реакция объекта на ступенчатое воздействие называется **переходной функцией (переходной характеристикой)** объекта.

Получим переходную характеристику объекта по управляющему воздействию. В этом случае изменение управляющего воздействия на объект равно $x_1^* = u(t)$, а изменение возмущающего воздействия на объект равно нулю: $x_2^* = 0$. Тогда уравнение (2.13) преобразуется к следующему виду:

$$T \frac{dz^*}{dt} + z^* = K_1 u_0. \quad (3.2)$$

Решим данное уравнение:

$$T \frac{dz^*}{dt} = K_1 u_0 - z^* ;$$

$$-T \frac{d(K_1 u_0 - z^*)}{dt} = K_1 u_0 - z^* ;$$

$$\frac{d(K_1 u_0 - z^*)}{K_1 u_0 - z^*} = -\frac{1}{T} dt ;$$

$$\int_0^{z^*} \frac{d(K_1 u_0 - z^*)}{K_1 u_0 - z^*} = -\frac{1}{T} \int_0^t dt ;$$

$$\ln |K_1 u_0 - z^*| \Big|_0^{z^*} = -\frac{1}{T} t \Big|_0^t ;$$

$$\ln \left(\frac{K_1 u_0 - z^*}{K_1 u_0} \right) = -\frac{t}{T} ;$$

$$\frac{K_1 u_0 - z^*}{K_1 u_0} = e^{-\frac{t}{T}} ;$$

$$z^* = K_1 u_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) представляет переходную характеристику объекта по управляющему воздействию.

Получим переходную характеристику объекта по возмущающему воздействию. В этом случае изменение управляющего воздействия на объект

равно нулю $x_1^* = 0$, а изменение возмущающего воздействия на объект равно $x_2^* = u(t)$. Тогда уравнение (2.13) преобразуется к следующему виду:

$$T \frac{dz^*}{dt} + z^* = K_2 u_0. \quad (3.4)$$

Метод решения данного уравнения аналогичен решению уравнения (3.2). Получаем следующую формулу для переходной характеристики объекта по возмущающему воздействию:

$$z^* = K_2 u_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (3.5)$$

Передаточные функции объекта управления по управляющему и возмущающему воздействию имеют вид

$$W_u^{\text{oy}} = \frac{z^*(s)}{x_1^*(s)} = \frac{K_1}{Ts + 1}; \quad (3.6)$$

$$W_F^{\text{oy}} = \frac{z^*(s)}{x_2^*(s)} = \frac{K_2}{Ts + 1}.$$

Объект управления является апериодическим звеном 1-го порядка как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям.

4 Экспериментальное определение численных значений параметров передаточных функций объекта управления

Для определения параметров передаточных функций объекта управления нужно знать значения всех величин, входящих в систему (2.12). Экспериментальным образом определим значения параметров установки.

По условию номинальное значение уровня воды в баке – 1 л, что соответствует значению $z_0 = 0,085$ м (высота над дном бака), клапан на притоке открыт полностью, клапан на стоке – на 50 %, то есть $x_1^0 = 1$, $x_2^0 = 0,5$.

Напор на притоке равен $p_{\text{пр}} = 0,77$ м; напор на стоке $p_{\text{ст}} = 0$; площади сечения труб притока и стока равны между собой и равны $s_{\text{пр}} = s_{\text{ст}} = S_{\text{тр}} = 0,000079$ м²; площадь бака $S = 0,0147$ м².

Тогда

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_{\text{ст}} = S_{\text{тр}} \sqrt{2g} = 0,000079 \sqrt{2 \cdot 10} = 3,6 \cdot 10^{-4}.$$

Получаем следующие значения коэффициентов линейного выражения (2.10):

$$a = \frac{3,6 \cdot 10^{-4}}{0,0147} \cdot \frac{1}{2\sqrt{0,77 - 0,085}} - \frac{3,6 \cdot 10^{-4}}{0,0147} \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{2\sqrt{0,085}} = 0,009;$$

$$b_1 = \frac{3,6 \cdot 10^{-4}}{0,0147} \sqrt{0,77 - 0,085} = 0,0062;$$

$$b_2 = \frac{3,6 \cdot 10^{-4}}{0,0147} \sqrt{0,085} = 0,00306.$$

Тогда линеаризованное дифференциальное уравнение объекта управления в форме (2.13) имеет вид

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата	03.49.011.18 – ПЗ				Лист
										15

$$111 \frac{dz}{dt} + z = 0,69x_1 - 0,34x_2. \quad (4.1)$$

Переходные характеристики объекта по управляющему и возмущающему воздействиям, соответственно, имеют вид

$$z^* = 0,69 \left(1 - e^{-\frac{t}{111}} \right); \quad (4.2)$$

$$z^* = -0,34 \left(1 - e^{-\frac{t}{111}} \right).$$

Передаточные функции объекта по управляющему и возмущающему воздействиям, соответственно, имеют следующий вид:

$$W_u^{oy} = \frac{z^*(s)}{x_1^*(s)} = \frac{K_1}{Ts+1} = \frac{0,69}{111s+1}; \quad (4.3)$$

$$W_F^{oy} = \frac{z^*(s)}{x_2^*(s)} = \frac{K_2}{Ts+1} = -\frac{0,34}{111s+1}.$$

5 Моделирование переходных характеристик объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям

Для получения графиков переходных характеристик объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям используем построение компьютерной модели в системе компьютерного моделирования Simulink. Вид модели объекта управления для получения переходной функции по управляющему воздействию в среде Simulink показан на рисунке 5.1.

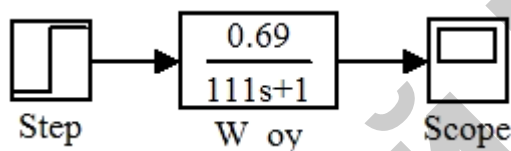


Рисунок 5.1 – Модель объекта управления с управляющим воздействием в среде Simulink

График переходной характеристики объекта по управляющему воздействию показан на рисунке 5.2.

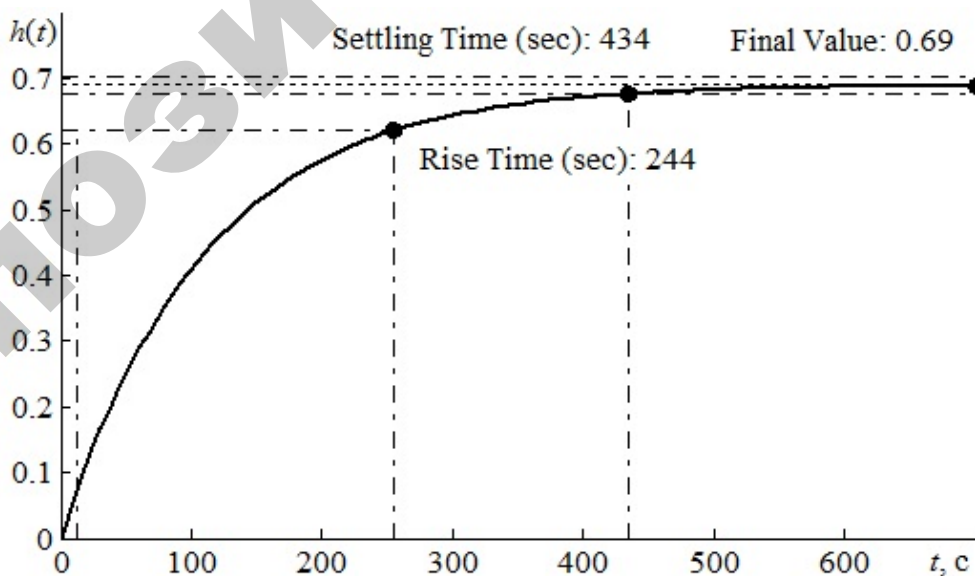


Рисунок 5.2 – Переходная характеристика объекта управления по управляющему воздействию

Вид модели объекта управления для получения переходной функции по возмущающему воздействию в среде Simulink показан на рисунке 5.3.

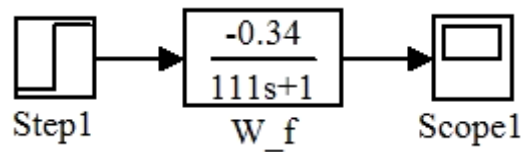


Рисунок 5.3 – Модель объекта управления с возмущающим воздействием в среде Simulink

График переходной характеристики объекта по возмущающему воздействию показан на рисунке 5.4.

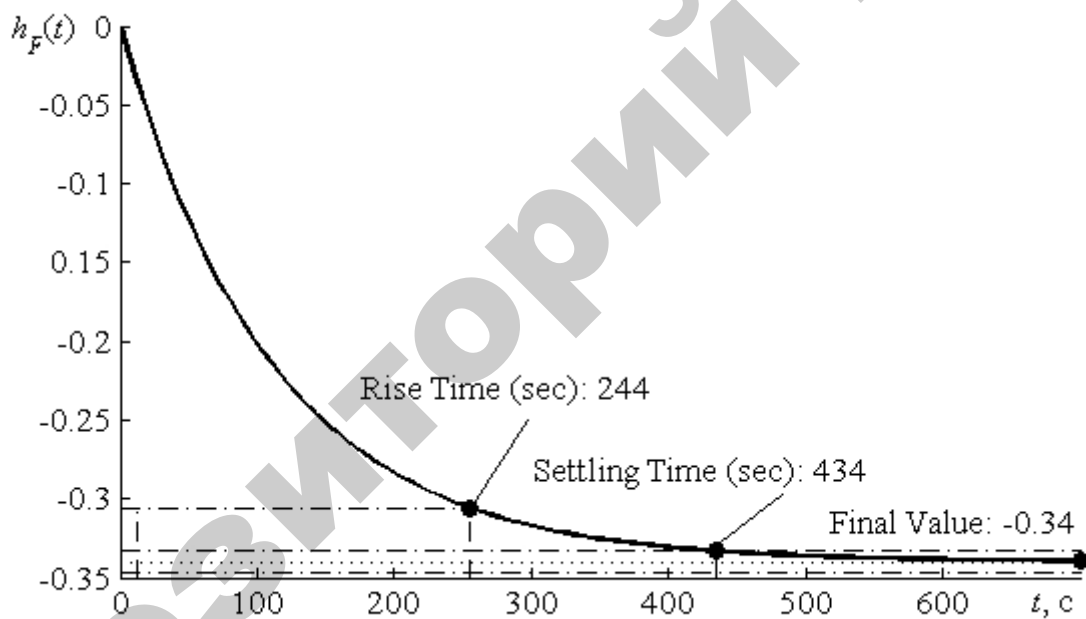


Рисунок 5.4 – Переходная характеристика объекта управления по возмущающему воздействию

По виду переходной функции можно сделать вывод, что объект управления является устойчивым.

6 Разработка функциональной и структурной схем системы автоматического регулирования и постановка задачи синтеза

В разрабатываемой САР будем использовать принцип управления по отклонению. Включим в систему следующие функциональные блоки: объект управления, регулятор, исполнительный механизм, регулирующий орган, датчик, задатчик и клапан на стоке в качестве возмущающего воздействия.

Объектом управления является резервуар с водой (по условию), выходная величина – уровень воды z , м, входными величинами являются степени открытия клапанов на притоке x_1 и стоке x_2 (управляющее и возмущающее воздействия, соответственно). *Датчиком* по условию является ультразвуковой датчик уровня, его входная величина – уровень воды z , м, выходная величина – соответствующее напряжение U , В.

Регулятором является электронный микропроцессорный блок управления, реализованный на основе персональной ЭВМ, выполняющий также функцию устройства сравнения и усилителя. Его входными величинами являются напряжение датчика U_d , В, и задатчика U_z , В, выходная величина – напряжение U , В. Электропривод является исполнительным механизмом, его входная величина – напряжение, вырабатываемое регулятором U , В, выходная величина – угол поворота штока клапана на стоке φ , °. Регулирующим органом является клапан на притоке, его входная величина – угол поворота штока клапана φ , °, выходная величина – степень открытия x_1 .

Задатчик задает требуемое значение управляемой величины (входная величина) z_3 , м, выходная величина – соответствующее значение напряжения U_z , В. Изменение возмущающего воздействия определяет степень открытия клапана на стоке x_2 .

В системе реализован принцип управления по отклонению. Система является стабилизирующей. Функциональная схема САР представлена на листе 1 графической части работы.

На основе созданной функциональной схемы составим структурную схему разрабатываемой системы автоматического регулирования.

Передаточные функции *объекта управления* по управляющему, и возмущающему воздействиям найдены при выполнении раздела 3, и выражаются формулами (3.6).

Найдем передаточную функцию *датчика*. Функцию датчика выполняет ультразвуковой датчик уровня, передаточная функция которого соответствует аperiodическому звену 1-го порядка

$$W^D(s) = \frac{U_D^*(s)}{z^*(s)} = \frac{K_D}{T_D s + 1}, \quad (6.1)$$

где T_D – постоянная времени датчика, с;

K_D – коэффициент преобразования (усиления) датчика, В/м.

Передаточная функция *задатчика* представляет собой коэффициент преобразования заданного значения регулируемой величины z_3 в значение выходной величины задатчика U_3 :

$$W^3(s) = \frac{U_3(s)}{z_3(s)} = K_3 = K_D. \quad (6.2)$$

Для корректного выполнения сравнения данных задатчика и датчика коэффициент преобразования задатчика в (6.2) должен совпадать с коэффициентом преобразования датчика в (6.1).

Найдем передаточную функцию *исполнительного механизма*. Передаточная функция электропривода имеет следующий вид:

$$W_{ДВ}(s) = \frac{\varphi(s)}{U(s)} = \frac{K_{ДВ}}{s(T_{ДВ}s + 1)}. \quad (6.3)$$

где $T_{\text{дв}}$ – постоянная времени электродвигателя, с;

$K_{\text{дв}}$ – коэффициент преобразования (усиления) электродвигателя, °/В.

Передаточная функция *регулирующего органа* представляет собой коэффициент преобразования угла поворота штока клапана φ в изменение степени открытия клапана на стоке x_2 :

$$W_{\text{по}}(s) = \frac{x_2(s)}{\varphi(s)} = K_{\text{по}}. \quad (6.4)$$

Сравнивающее устройство выполняет вычитание сигналов задатчика и датчика и вычисляет ошибку регулирования e , В, в структурной схеме будет представлено сумматором.

На структурной схеме будет также изображено второе сравнивающее устройство, выполняющее суммирование выходных сигналов передаточных функций объекта по управляющему и возмущающему воздействиям.

Определим передаточную функцию регулятора. По условию, регулирование должно осуществляться с использованием пропорционального закона (П-закона) регулирования.

В случае **пропорционального закона** (П-закона) регулирования математическая зависимость между сигналом ошибки $e(t)$ и управляющим воздействием на объект $U(t)$ имеет следующий вид:

$$U(t) = K_p e(t) \quad (6.5)$$

где K_p – коэффициент преобразования (усиления) регулятора, то есть вырабатываемый регулятором управляющий сигнал пропорционален сигналу ошибки.

Принцип действия заключается в том, что регулятор вырабатывает управляющий сигнал, пропорциональный величине ошибки (чем больше

ошибка e , тем больше управляющий сигнал U). Если входной сигнал равен заданному значению, то выходной равен нулю. Однако при использовании только пропорционального регулятора регулируемая величина никогда не стабилизируется на заданном значении: существует статическая ошибка.

Передаточная функция пропорционального регулятора равна:

$$W_{\text{рег}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_p. \quad (6.6)$$

Окончательно получаем **структурную схему САР уровня воды в верхнем резервуаре**), представленную на листе 2 графической части работы.

После разработки структурной схемы для дальнейшего исследования нужно построить **компьютерную динамическую модель САР в среде Simulink**.

При проведении компьютерного моделирования следует ввести численные значения коэффициентов. Передаточные функции объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям вводятся в соответствии с формулами (4.3).

Пренебрегая постоянными времени звеньев, которые малы по сравнению с постоянной времени объекта управления, можно приближенно считать электропривод, клапан и датчик уровня усилительными звеньями с коэффициентами пропорциональности, равными 0.75 (с учетом КПД) для электропривода, 1.1 для регулирующего органа (поскольку полное открытие в 100 % соответствует повороту штока клапана на 90°) и 1 для датчика уровня. Коэффициент пропорциональности П-регулятора – оптимизируемая величина, она будет изменяться в процессе проведения эксперимента, поэтому в компьютерной динамической модели оставим его в общем виде: K_p .

Таким образом, модель САР **уровня воды в верхнем резервуаре** в среде Simulink будет содержать следующие элементы: передаточные функции объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

и передаточную функцию датчика, представленные блоками Transfer Fcn, передаточную функцию задатчика, регулятора, исполнительного механизма и регулирующего органа (блоки Gain), источник ступенчатого сигнала (представленный блоком Step), осциллограф (представленный блоком Scope) и два сумматора (блоки Sum).

Схема динамической модели в среде Simulink представлена на листе 3 графической части.

Сформулируем задачу синтеза САУ:

требуется синтезировать САУ уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением снизу с **пропорциональным** законом управления,

при этом должны выполняться следующие условия:

- время регулирования должно быть минимальным (критерий),
- ошибка регулирования не должна превышать 15 % (ограничение).

Для решения поставленной задачи требуется определить оптимальные параметры регулятора, осуществляющего регулирование в соответствии с **пропорциональным** законом управления (передаточная функция регулятора определяется в соответствии с формулой (6.6)). В этом случае регулятор имеет один параметр – коэффициент пропорциональности K_p .

7 Определение параметров регулятора с использованием последовательного симплекс-метода

Требуется определить оптимальное значение одного параметра – коэффициента пропорциональности регулятора K_p . Для нахождения искомого оптимального значения параметра будем использовать **последовательный симплекс-метод**.

Координаты начального симплекс-плана в кодированных координатах имеют вид, приведенный в таблице 7.1.

Таблица 7.1– Начальный симплекс-план для одного фактора

№ точек	x
1	0
2	1

Для перехода от кодированных координат к натуральным следует воспользоваться соотношением:

$$x_j = x_j^0 + \Delta x_j x_j. \quad (7.1)$$

Шаг изменения параметра примем равным $\Delta K_p = 0,1$, начальное значение параметра – $K_p = 1$.

Получаем таблицу 7.2.

Таблица 7.2– Начальный симплекс-план в натуральных координатах

№ точек	K_p
1	1
2	1.1

Исходя из условий, которым должна удовлетворять САР, дополним таблицу эксперимента столбцами ограничений (значения статической ошибки регулирования $e_{ст}$) и критерия (значения времени регулирования $t_{рег}$).

При проведении эксперимента использовалась учебная экспериментальная установка по изучению систем замкнутого регулирования FestoDidactic.

Для каждого значения регулируемого параметра (для каждой строки таблицы) проводилось моделирование работы установки с определением значений времени регулирования и статической ошибки. После выполнения экспериментов для начального симплекса по результатам двух первых строк было определено, что наихудшим опытом является второй (значение ограничения вышло за допустимые пределы), он был отброшен, координаты новой точки были определены по формулам отражения:

$$\%_{j,N+1} = \frac{2}{k} \sum_{u=1}^k \%_{j,u} - \%_j^* \quad (7.2)$$

где $N = k + 1$ – число точек в исходном симплексе;

$\%_{j,N+1}$ – координата новой точки в натуральных координатах для фактора с номером j (суммирование ведется по всем опытам, кроме отвергнутого);

$\%_j^*$ – координата данного фактора в отвергнутом опыте.

Получили:

$$\%_3 = \frac{2}{1} \cdot 1 - 1,1 = 0,9 \quad (7.2)$$

Для вычисленного значения параметра ($K_p = 0,9$) в третьем опыте снова было проведено моделирование работы САР на учебной лабораторной установке. Из двух экспериментов (№ 2 и № 3) снова был выбран и отброшен наихудший и произведено построение новой точки, и т. д.

Результаты проведения эксперимента представлены в таблице 7.3.

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата	03.49.011.18 – ПЗ				Лист
										25

Таблица 7.3 – Результаты проведения эксперимента

№	K_p	$e_{ст}$	$t_{рег}$
1	1	0.15	485
2	1.1	0.17	500
3	0.9	0.14	462
4	0.8	0.10	454
5*	0.7	0.08	448
6	0.6	0.11	462
7	0.8	0.10	454

Эксперимент продолжался до наступления заикливания – опыт № 7 совпадает с опытом № 4.

Из данных таблицы следует, что опыт № 5 является оптимальным: время регулирования в этом опыте минимальное, при этом ошибка регулирования не выходит за заданные пределы.

Таким образом, оптимальное значение параметра K_p регулятора: $K_p = 0,7$.

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

8 Моделирование переходных характеристик САР и определение показателей качества регулирования

Для синтезированной системы автоматического регулирования с найденным оптимальным значением параметра регулятора ($K_p = 0,7$) было проведено моделирование переходной характеристики экспериментальным путем с использованием лабораторной установки.

Полученный график экспериментальной переходной функции САР уровня воды с П-законом регулирования приведен на рисунке 8.1.

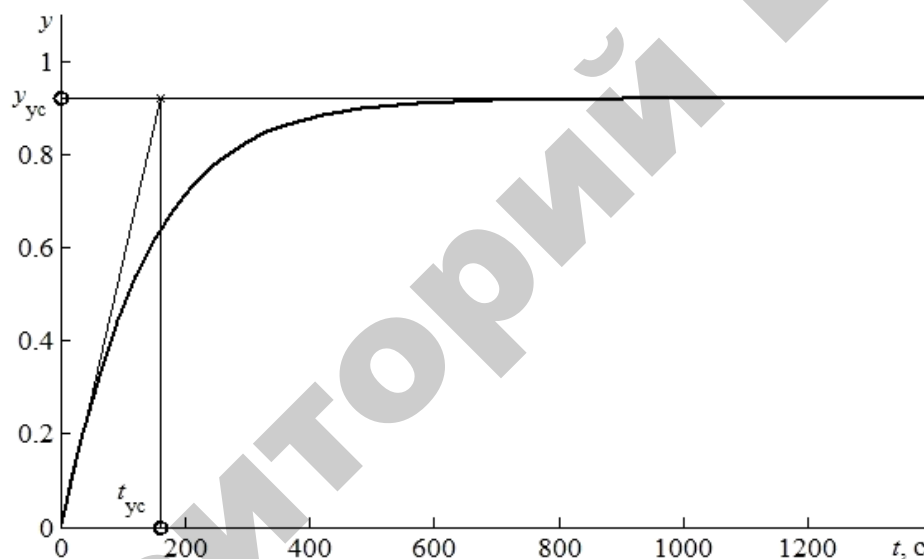


Рисунок 8.1 – Экспериментальная переходная функция САР с П-законом регулирования

По графику определены следующие значения показателей качества регулирования:

- установившееся значение

$$h_{уст} = 0,92;$$

- перерегулирование

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} 100 \% = 0 \% ;$$

- ошибка регулирования

$$e_{\text{ст}} = 1 - h_{\text{уст}} = 1 - 0,92 = 0,08 ;$$

- время регулирования

$$t_{\text{рег}} = 448 \text{ с.}$$

Как видим, при найденном оптимальном значении параметра регулятора $K_p = 0,7$ время регулирования минимально и равно 448 с, при этом статическая ошибка регулирования составляет 8 %, что меньше значения ограничения 15 %. Следовательно, САР уровня воды с передаточной функцией регулятора, равной $W_{\text{рег}}(s) = 0,7$, соответствует всем сформулированным требованиям к качеству регулирования.

Таким образом, задание на курсовую работу выполнено полностью.

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

Заключение

В данной курсовой работе

- разработана математическая модель объекта управления:

$$111 \frac{dz}{dt} + z = 0,69x_1 - 0,34x_2;$$

- определены передаточные функции объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям, соответствующие апериодическому звену первого порядка:

$$W_u^{oy} = \frac{0,69}{111s + 1},$$

$$W_F^{oy} = \frac{0,34}{111s + 1};$$

- получены теоретические и экспериментальные переходные характеристики объекта управления;
- разработана функциональная и структурная схемы САР уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением снизу с пропорциональным законом (П-законом) регулирования, а также компьютерная динамическая модель в среде Simulink;
- сформулирована задача синтеза САР и определены оптимальные параметры регулятора, отвечающие заданным требованиям к качеству управления САР: $K_p = 0,7$;
- определены показатели качества регулирования САР при оптимальных параметрах регулятора: $\sigma = 0\%$, $t_{пер} = 448$ с, $e_{ст} = 0,08$.

Таким образом, все задачи выполнены, цель выполнения курсовой работы достигнута.

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

Список использованных источников

1. Баландин, Д. В. Классические и современные методы построения регуляторов в примерах [Электронный ресурс] / Д. В. Баландин, С. Ю. Городецкий. – Электронное учебно-методическое пособие (3.74 Мб). – Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. – 122 с.

2. Горский, В. Г. Последовательный симплекс-метод / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер // Планирование промышленных экспериментов. – М. : Металлургия, 1974. – Гл. 5. – 264 с.

3. Дилигенская, А. Н. Идентификация объектов управления : учебное пособие / А. Н. Дилигенская. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2009. – 136 с.

4. Клавдиев, А. А. Теория автоматического управления в примерах и задачах : учебное пособие : в 2 ч./ А. А. Клавдиев. — СПб : СЗТУ, 2005. – Ч. 1 : Анализ линейных непрерывных систем автоматики. – 74 с.

5. Клавдиев, А. А. Теория автоматического управления в примерах и задачах : учебное пособие : в 2 ч. / А. А. Клавдиев. – СПб : СЗТУ, 2005. – Ч. 2 : Моделирование линейных непрерывных систем автоматики. – 75 с.

6. Тарасов, А. В. Экспериментальное определение передаточной функции объекта регулирования / А. В. Тарасов, А. А. Чепуштанов, Н. С. Горяев // Ползуновский альманах, 2011. – № 1. – с. 116–118.

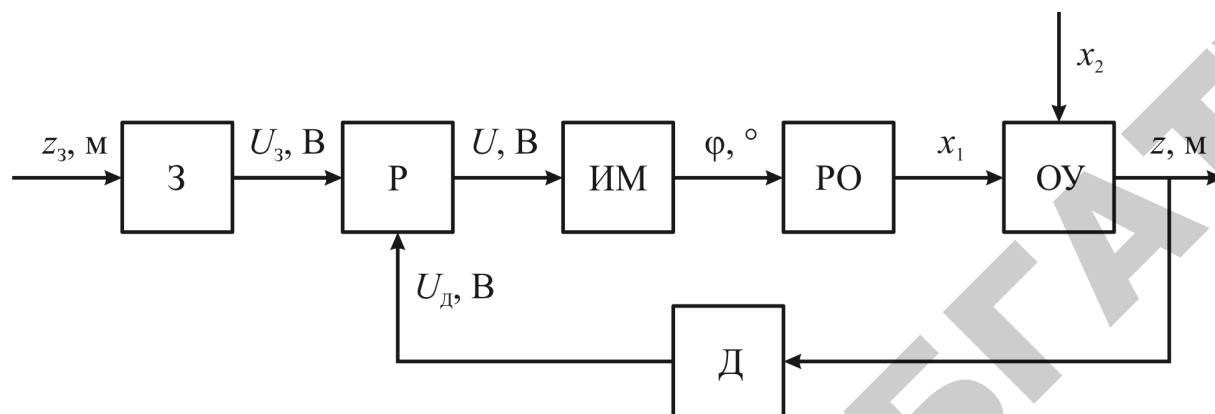
7. Шидловский, С. В. Динамика систем автоматического управления / С. В. Шидловский // Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. – Томск : Томский государственный университет, 2006. – Гл. 4. – 288 с.

8. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

9. Дьяконов, В. MATLAB Анализ, идентификация и моделирование систем / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб : Питер, 2001. – 448 с.

10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

Пример выполнения графической части курсовой работы



03.49.011.18 - АТХ

Разработка системы автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре (апериодическое звено 1-го порядка) с пропорциональным законом регулирования

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

Разраб. Иванов

Руковод. Матвейчук

Консульт.

Зав. каф. Сеньков

Верхний резервуар

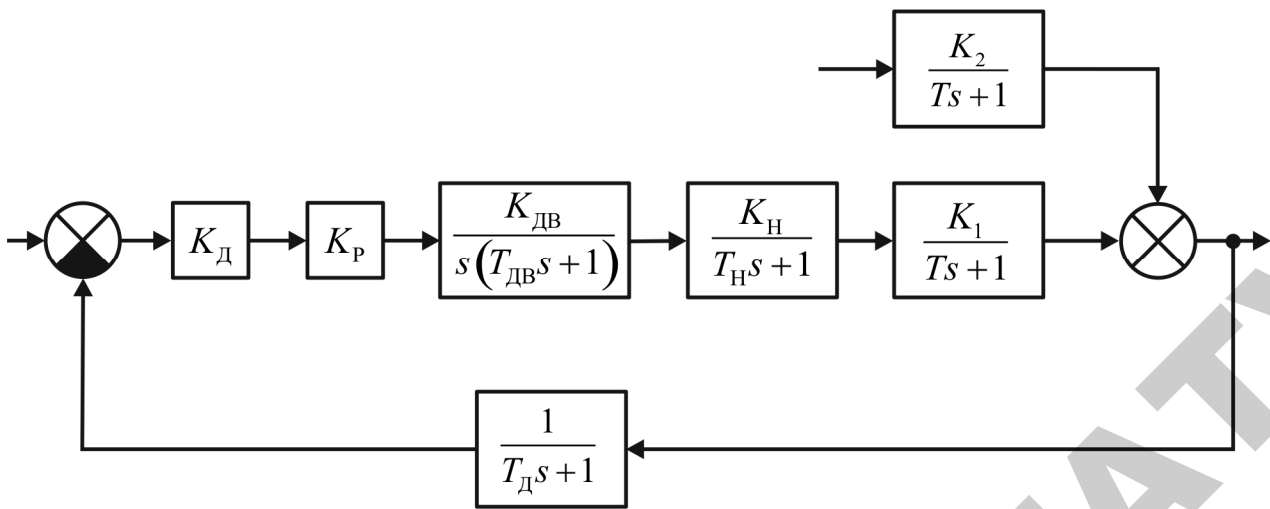
Стадия Лист Листов

УП

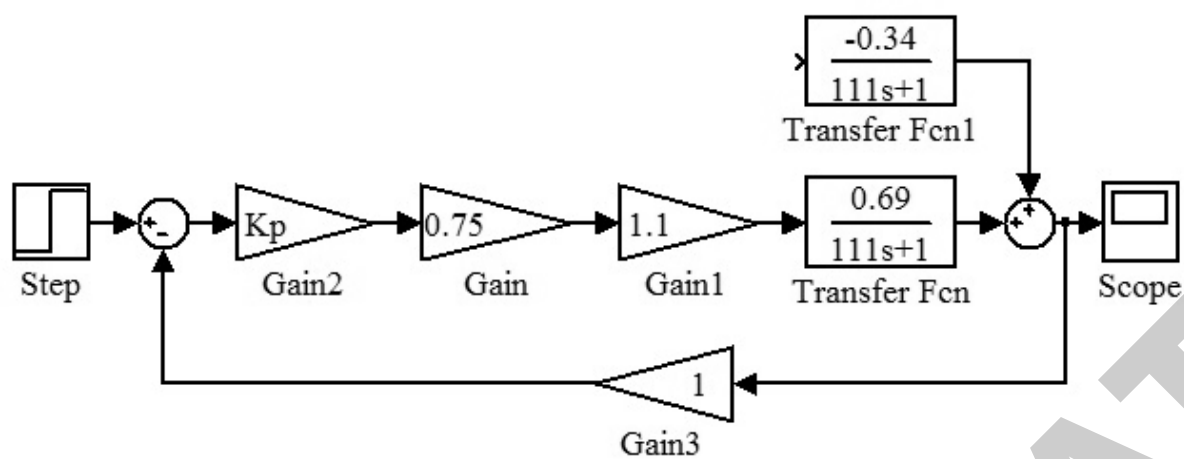
1

3

Функциональная
схема САРБГАТУ
7112017



						03.49.011.18 - АТХ			
						<i>Разработка системы автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре (апериодическое звено 1-го порядка) с пропорциональным законом регулирования</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Колич.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>Иванов</i>					Верхний резервуар	<i>Стадия</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>	<i>Матвейчук</i>				УП		2	3	
<i>Консульт.</i>									
<i>Зав. каф.</i>	<i>Сеньков</i>								
						Структурная схема САР		БГАТУ 7112017	



03.49.011.18 - АТХ

Разработка системы автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре (апериодическое звено 1-го порядка) с пропорциональным законом регулирования

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

Разраб. Иванов

Руковод. Матвейчук

Консульт.

Зав. каф. Сеньков

Верхний резервуар

Стадия Лист Листов

УП

3

3

Компьютерная динамическая модель САУ в Simulink

БГАТУ
7112017

Учебное издание

Матвейчук Наталья Михайловна,
Сеньков Андрей Григорьевич

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.
КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *А. Г. Сеньков*
Корректор *Д. О. Бабакова*
Компьютерная верстка *Д. О. Бабаковой*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 20.09.2018 г. Формат 60×84¹/₈.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 4,54. Тираж 50 экз. Заказ 50.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.