

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Политехнический институт
Факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Летательные аппараты»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЛА,
д.т.н., профессор
_____/В.Г. Дегтярь/
« ____ » _____ 2018 г.

Разработка микроконтроллерной системы автоматического регулирования давления
для стенда аттестации датчиков

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ–13.03.02.2018.171. ВКР

Руководитель,
к.т.н., доцент каф. ЛА
_____/Н.В. Клиначев/
« ____ » _____ 2018 г.

Автор,
студент группы П-428
_____/Г.О. Китов/
« ____ » _____ 2018 г.

Нормоконтролер,
к.т.н., доцент каф. ЛА
_____/П.О. Шабуров/
« ____ » _____ 2018 г.

Челябинск 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Политехнический институт
Факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Летательные аппараты»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ЛА
_____ В.Г. Дегтярь
_____ 20__ г.

З А Д А Н И Е

на выпускную квалификационную работу студента
Китова Глеба Олеговича
Группа П-428

1 Тема работы:

Разработка микроконтроллерной системы автоматического регулирования давления для стенда аттестации датчиков

утверждена приказом по университету от _____ 20__ г. № _____

2 Срок сдачи студентом законченной работы _____ 20__ г.

3 Исходные данные к работе:

Стенд для исследования динамических характеристик датчиков давления, включающий в себя элементы со следующими параметрами: воздушный компрессор высокого давления, 0.8 МПа; рабочая камера $V = 7.7e-6 \text{ м}^3$; эталонный датчик давления Метран-55, обеспечивающий непрерывное преобразование измеряемых величин избыточного (ДИ), абсолютного (ДА) давления, разрежения

(ДВ), давления-разрежения (ДИВ) нейтральных и агрессивных сред в унифицированный токовый выходной сигнал (0-5/4-20мА).

4 Перечень вопросов, подлежащих рассмотрению / разработке:

Общие сведения о датчиках давления и принципах их работы;

Аттестация средств измерений;

Виды динамических характеристик и способы их получения;

Подбор пневматического оборудования для контроля избыточного давления, работающий в диапазоне от 0 до 0.8 МПа;

Разработка функциональной и структурной схем системы автоматического регулирования давления;

Разработка математической модели системы;

Обработка результатов работы математической модели;

Разработка принципиальной электрической схемы блока управления и питания системы.

5 Иллюстративный материал:

Презентация PowerPoint

6 Дата выдачи задания _____

Руководитель _____ Н.В. Клиначев
(подпись)

Задание принял к исполнению _____ Г.О. Китов
(подпись студента)

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

| Наименование этапов выпускной квалификационной работы | Срок выполнения этапов работы | Отметка руководителя о выполнении |
|---|-------------------------------|-----------------------------------|
| Обзор литературы по теме исследования | 05.02.18 – 04.03.18 | |
| Выбор пневматического оборудования | 05.03.18 – 19.03.18 | |
| Изучение структурной схемы системы | 21.03.18 – 28.03.18 | |
| Разработка математической модели | 30.03.18 – 15.04.18 | |
| Выбор элементной базы и разработка схемы электрической принципиальной | 17.04.18 – 10.05.18 | |
| Оформление пояснительной записки | 11.05.18 – 13.06.18 | |

Заведующий кафедрой _____ / В.Г. Дегтярь _____ /
(подпись)

Руководитель работы _____ / Н.В. Клиначев _____ /
(подпись)

Студент _____ / Г.О. Китов _____ /
(подпись)

АННОТАЦИЯ

Китов Г.О. Разработка микроконтроллерной системы автоматического регулирования давления для стенда аттестации датчиков. – Челябинск: ЮУрГУ, П, ЛА, 2018. – 87 с., 43 ил., 2 табл., библиогр. список – 21 наим., 2 прил.

В выпускной квалификационной работе (ВКР) разработана система автоматического регулирования давления для стенда аттестации датчиков.

Структура работы представлена введением, тремя частями, заключением, библиографическим списком и приложением. Во введении приведены: актуальность темы, цель, задачи, поставленные в ВКР, практическая и научная значимость работы.

В первой части ВКР описаны принципы работы датчиков давления и их аттестации; произведен подбор пневматического оборудования для разрабатываемой системы.

Во второй части разработаны функциональная, структурная и математическая модели системы автоматического регулирования давления; получены реакции системы на ступенчатый и гармонический сигналы; произведен анализ переходных процессов.

В третьей части разработана принципиальная электрическая схема блока управления системой.

| | | | | | | | | |
|------------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---|-------------|-------------|---------------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | | | |
| | | | | | | | | |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | Разработка микроконтроллерной системы автоматического регулирования давления для стенда аттестации датчиков | <i>Лит.</i> | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Разраб.</i> | | <i>Китов</i> | | | | | | |
| <i>Провер.</i> | | <i>Клиначев</i> | | | | | 5 | 87 |
| <i>Н. Контр.</i> | | <i>Шабуров</i> | | | | Кафедра ЛА | | |
| <i>Утверд.</i> | | <i>Дегтярь</i> | | | | | | |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 8 |
| 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИНЦИПЕ ДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ИХ АТТЕСТАЦИИ..... | 11 |
| 1.1 Общие сведения о давлении | 11 |
| 1.2 Датчики давления как устройства контроля системы..... | 14 |
| 1.2.1 Общая информация о датчиках давления | 14 |
| 1.2.2 Классификация и принцип работы | 15 |
| 1.3 Метрологическая аттестация датчиков давления..... | 24 |
| 1.3.1 Понятие метрологической аттестации | 24 |
| 1.3.2 Динамические характеристики датчиков давления | 27 |
| 1.3.3 Методы получения динамических характеристик..... | 28 |
| 1.4 Оборудование для получения динамических характеристик | 36 |
| 1.4.1 Особенности проектирования систем контроля динамических характеристик датчиков давления..... | 36 |
| 1.4.2 Сервораспределитель для регулирования расхода воздуха | 37 |
| 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ | 41 |
| 2.1 Описание лабораторного стенда для аттестации датчиков давления | 41 |
| 2.2 Расчет параметров схемы замещения системы | 44 |
| 2.2.1 Переход от пневматических величин измерения к электрическим величинам | 44 |
| 2.2.2 Функциональная схема управления системой регулирования давления | 45 |
| 2.2.3 Структурная схема управления системой..... | 47 |
| 2.2.4 Разработка математической модели | 51 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.2.5 | Выбор оптимальных настроек регулятора для заданного объекта управления | 56 |
| 2.2.6 | Результаты моделирования и их интерпретация..... | 65 |
| 3 | РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ | 70 |
| 3.1 | Принципиальная электрическая схема управления системой регулирования давления..... | 70 |
| 3.1.1 | Разработка импульсного и линейного стабилизаторов | 70 |
| 3.1.2 | Асинхронный интерфейс последовательной передачи данных RS-485 | 73 |
| 3.1.3 | Подключение микроконтроллера STM32F303 к схеме | 74 |
| 3.1.4 | Разработка усилителей для входных и выходных сигналов | 77 |
| | ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 79 |
| | БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 81 |
| | ПРИЛОЖЕНИЕ А..... | 83 |
| | ПРИЛОЖЕНИЕ Б..... | 85 |

ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности и продление сроков службы конструкций, взаимодействующих с потоком жидкости или газа, является важной народно-хозяйственной проблемой во многих отраслях техники. Такая проблема, в частности, возникает в приборостроении, авиаракетостроении, при проектировании антенных установок, датчиков давления, камер сгорания, трубопроводных систем, гидротехнических и высоких наземных сооружений, и т. д.

Существенное значение имеет исследование динамики и устойчивости колебаний деформируемых элементов конструкций, так как воздействие потока может приводить к значениям амплитуды и (или) скорости колебаний, не позволяющим осуществлять их надежную эксплуатацию и обеспечивать необходимую функциональную точность.

Давление, как и температура, скорость или расход, входит в качестве одной из переменных величин в описание явлений, связанных с поведением жидких или газообразных сред. В гидравлических, тепловых, ядерных и других установках, поставляющих механическую, тепловую или электрическую энергию, необходимо наблюдение за давлением, чтобы оно находилось в заданных пределах, ибо превышение давления может повлечь за собой повреждение конструкций, не говоря уже о риске, связанном с их разрушением, и авариях. Давление является важным параметром систем контроля и управления производственных процессов. Все эти устройства требуют создания приборного оборудования, в котором первичным звеном являются датчики давления.

В настоящее время датчики давления являются одними из наиболее распространенных датчиков физических величин. В процессе их производства наиболее сложной является задача аттестации датчика, т. е. признание его узаконенным для применения (с указанием его метрологического назначения и

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 8 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

метрологических характеристик) на основании тщательных исследований метрологических свойств этого датчика.

Существуют различные способы метрологического обеспечения датчиков давления. Для выполнения и подтверждения технических требований в процессе разработки и изготовления датчиков необходимо испытательное и метрологическое оборудование, которое позволяет создать и симитировать воздействия, как измеряемых параметров, так и дестабилизирующих факторов во всех диапазонах. В общем случае для корректной имитации среды и условий функционирования датчиков, следует подвергать их одновременному воздействию нескольких факторов, например вибрациям и температуре, пульсациям давления и виброускорениям. Но такое комплексное воздействие требует сложной аппаратуры и испытательных стендов, которые дорогие и имеют значительные габариты, при этом они иностранного производства. Типичными представителями комплексной испытательной аппаратуры являются установки комбинированных испытаний фирмы IMV CORP, Япония, которые позволяют задавать одновременно несколько воздействий, например вибрацию, удары, температуру и влажность. Такое мультипликативное воздействие позволяет с одной стороны, значительно сократить время испытаний, а, с другой стороны, получить более объективную информацию по функционированию испытуемого изделия в реальных условиях. Но такой подход проведения совмещенных испытаний требует значительных затрат и может быть оправдан или при значительных объемах изготавливаемой продукции. Экономически целесообразным является аддитивный подход, когда изделие подвергается последовательным испытаниям.

Популярны системы, построенные на базе импульсного калибратора модели 913B02 фирмы РСВ. Ограниченность данных систем состоит в том, что они способны работать только с пьезоэлектрическими датчиками давления. Данные системы также ограничены в способе задания возмущающих воздействий.

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 9 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

Таким образом, в настоящее время не существует автоматизированных систем, предназначенных для подбора параметров процесса аттестации датчиков динамического давления и цифрового осциллографа, осуществляющего наблюдение, запись и дальнейшую обработку сигналов, поступающих с датчиков. В связи с этим, можно сформулировать цель и соответствующие задачи.

Целью работы является разработка системы автоматического регулирования давления для стенда аттестации датчиков, благодаря которой станет возможным изменение давления по заданному закону с минимальной погрешностью.

Задачи:

1. Обзор принципов работы датчиков давления и их аттестации;
2. Подбор необходимого пневматического оборудования, удовлетворяющего заданным требованиям;
3. Разработка в программе Jigrein математической модели системы автоматического регулирования давления для стенда аттестации датчиков;
4. Разработка принципиальной электрической схемы управления системой автоматического регулирования давления.

Объектом исследования является стенд для формирования и подтверждения динамических характеристик датчиков давления.

Предметом исследования является система автоматического регулирования давления.

Методы, используемые в работе: анализ, синтез, численное моделирование, методы теории автоматического управления, методы теоретических основ электротехники.

Научная значимость работы заключается в создании автоматической системы регулирования давления, позволяющей формировать давление по заданному закону с минимальной погрешностью. Практическая значимость работы заключается в подборе необходимого пневматического оборудования для стенда аттестации датчиков давления, необходимого для выполнения его функциональных задач.

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 10 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИНЦИПЕ ДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ИХ АТТЕСТАЦИИ

1.1 Общие сведения о давлении

Давление – физическая величина, численно равная силе, действующей на единицу площади поверхности перпендикулярно этой поверхности. В данной точке давление определяется как отношение нормальной составляющей силы, действующей на малый элемент поверхности, к его площади [6].

Давление рассчитывается по формуле (1):

$$p = \frac{dF_n}{dS}, \quad (1)$$

где p – давление;

dF_n – нормальная составляющая силы;

dS – площадь.

Введем понятие механического давления. Это давление, характеризующееся интенсивностью нормальных сил, с которой одно тело или среда действует на поверхность другого тела или среды. Механическое давление может быть следующих видов: гидравлическое, пневматическое, давление света, давление газовой среды.

В Международной системе единиц (СИ) давление измеряется в паскалях (Па). Паскаль равен давлению, вызываемому силой, равной одному ньютону, равномерно распределённой по нормальной к ней поверхности площадью один квадратный метр:

$$p = \frac{F_n}{S} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1\text{Па}. \quad (2)$$

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 11 |

Помимо этого наиболее распространенными единицами являются: бар, килограмм-сила на квадратный сантиметр и фунт-сила на квадратный дюйм (PSI). Соотношение между этими четырьмя единицами давления показано в таблице 1.

Таблица 1 – Соотношение между единицами давления

| Давление | 1 кПа | 1 бар | 1 кгс/см ² | 1 psi |
|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|
| 1 кПа | 1 | 0,01 | 0,0102 | 0,145 |
| 1 бар | 100 | 1 | 1,02 | 14,5 |
| 1 кгс/см ² | 98 | 0,981 | 1 | 14,2 |
| 1 psi | 6,9 | 0,069 | 0,07 | 1 |

В соответствии со спецификой нашей работы, следует сказать о двух основных законах, выражающих связь между давлением, объемом и температурой.

Закон Гей-Люссака. При постоянном давлении, объем определенного количества газа прямо пропорционален температуре, выраженной в градусах Кельвина (К), откуда:

$$V_1 : V_2 = T_1 : T_2, \quad (3)$$

где V – объем газа;

T – температура газа.

При постоянном объеме, изменение давления прямо пропорционально изменению температуры:

$$P_1 : P_2 = T_1 : T_2. \quad (4)$$

где P – давление газа.

Закон Бойля-Мариотта. Чтобы понять смысловую суть этого закона следует представить термодинамическую систему, состоящую из цилиндра с подвижным поршнем, заполненного в надпоршневом пространстве газом (рисунок 1). Система термоизолирована – тепло к ней не подводится и не отводится. Тогда при

очень медленном перемещении поршня влево или вправо будет уменьшаться или увеличиваться объем газа в цилиндре, при этом изменение объема приведет к обратно пропорциональному изменению давления.

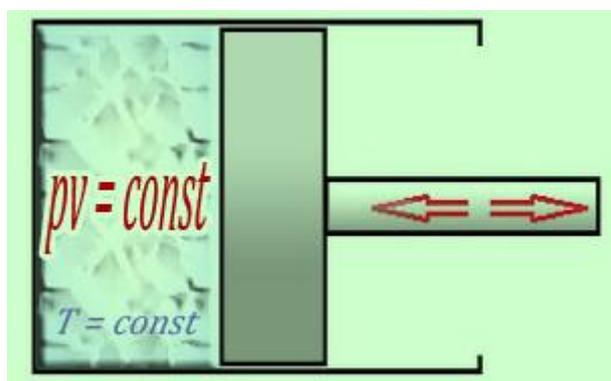


Рисунок 1 – Принцип выполнения закона Бойля-Мариотта

Очень медленное перемещение поршня в этом случае необходимо для того, чтобы не вызывать изменение температуры газа в процессе сжатия или расширения. Таким образом, при постоянной температуре, объем газа пропорционален абсолютному давлению. Отсюда следует, что для определенного количества газа произведение объема и абсолютного давления есть величина постоянная. Принцип действия данного закона объясняется формулой (5):

$$P_1V_1 = P_2V_2 = P_3V_3. \quad (5)$$

Следует отметить, что данные законы применимы к идеальным газам. Идеальный газ – это воображаемый газ, в котором молекулы рассматриваются, как материальные точки, обладающие некоторой массой, но силы взаимодействия между этими точками при анализе состояния рабочего тела и происходящих в нем процессов не учитываются.

1.2 Датчики давления как устройства контроля системы

1.2.1 Общая информация о датчиках давления

Датчик – это устройство, воспринимающее внешние воздействия и реагирующее на них изменением электрических сигналов. Под внешним воздействием понимается количественная характеристика объекта, его свойство или качество, которые необходимо воспринять и преобразовать в электрический сигнал.

Назначение датчиков – реакция на определенное внешнее физическое воздействие и преобразование его в электрический сигнал, совместимый с измерительными схемами. Другими словами, можно сказать, что датчик – это преобразователь физической величины в электрический сигнал. Под термином электрический сигнал понимается сигнал, который может быть преобразован при помощи электронных устройств, например, усилен или передан по линии передач. Выходными сигналами датчиков могут быть напряжение, ток или заряд, которые описываются следующими характеристиками: амплитудой, частотой, фазой или цифровым кодом. Этот набор характеристик называется форматом выходного сигнала, таким образом, каждый датчик характеризуется набором входных параметров (любой физической природы) и набором выходных электрических параметров [7].

На практике датчики не работают сами по себе. Как правило, они входят в состав измерительных систем, часто довольно больших, объединяющих много разных детекторов, преобразователей сигналов, сигнальных процессоров, запоминающих устройств и приводов. Датчики в таких системах могут быть как наружными, так и встроенными. Часто их располагают на входах измерительных приборов для того, чтобы они реагировали на внешние воздействия и сообщали системе об изменениях в окружающих условиях. Также они размещаются внутри измерительных систем для мониторинга их функционирования, что необходимо

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 14 |

для поддержания корректной работы всех внутренних устройств. Датчики являются неотъемлемой частью систем сбора данных, которые, в свою очередь, могут входить в состав больших измерительных комплексов с множеством обратных связей.

1.2.2 Классификация и принцип работы

Датчик давления – устройство, физические параметры которого изменяются в зависимости от давления измеряемой среды (жидкости, газа, пара). В датчиках давление измеряемой среды преобразуется в унифицированный пневматический, электрический сигналы или цифровой код.

Для того чтобы контролируемая давлением система работала правильно и эффективно, важно, чтобы используемый датчик давления мог давать точные показания по мере необходимости и в течение длительного периода времени без необходимости ремонта или замены в условиях работы системы. Существует несколько факторов, влияющих на пригодность конкретного датчика давления для конкретного процесса. Основные это:

- характеристики используемых веществ, в среде которых будет использоваться устройство;
- условия окружающей среды;
- диапазон давлений;
- уровень точности и чувствительности, требуемые в процессе измерения.

Чувствительный элемент (упругий элемент) будет подвергаться воздействию веществ, используемых в процессе, поэтому материалы датчика, которые могут реагировать с данными веществами или подвергаться воздействию агрессивных сред – непригодны для использования. Мембраны (диафрагмы) являются оптимальными даже для очень суровых условий использования.

Большинство процессов работают в определенном диапазоне давлений. Поскольку определенные датчики давления работают оптимально в определенных

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 15 |

диапазонах давления, существует необходимость выбрать устройства, способные функционировать в диапазоне, установленном процессом.

Различные процессы требуют различных уровней точности. В общем, чем точнее датчик, тем он дороже, таким образом, будет экономически выгодно выбирать датчики, которые способны максимально удовлетворить требуемую точность. Существует также компромисс между точностью и способностью быстро обнаруживать изменения давления. Следовательно, в процессах, в которых давление сильно варьируется в течение коротких периодов времени - нецелесообразно использовать датчики, которым требуется больше времени, чтобы дать точные показания давления, хотя они и могли бы дать более точные значения.

Датчик давления состоит из первичного преобразователя давления, в составе которого чувствительный элемент – приемник давления, схемы вторичной обработки сигнала, различных по конструкции корпусных деталей, в том числе для герметичного соединения датчика с объектом и защиты от внешних воздействий и устройства вывода информационного сигнала. Основными отличиями одних приборов от других являются пределы измерений, динамические и частотные диапазоны, точность регистрации давления, допустимые условия эксплуатации, массогабаритные характеристики, которые зависят от принципа преобразования давления в электрический сигнал [8].

Сегодня датчики не только обязательно подключаются к стрелочным указателям, для отображения давления, но также могут служить для преобразования давления в электрический или пневматический сигнал, который может быть передан в диспетчерскую, в которой производится считывание и определение давления. Электрические датчики принимают данные полученные механическое воздействие от упругого датчика и включают в себя электрический компонент, таким образом, усиливая чувствительность и увеличивая сферы применения датчиков. Существуют такие типы датчиков давления: емкостной,

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 16 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

индуктивный, датчик магнетосопротивления (датчик Холла), пьезоэлектрический, тензодатчик, виброэлемент, и потенциометрический тип датчика.

Емкостной датчик состоит из параллельных пластин – конденсаторов, соединенных с диафрагмой, которая обычно металлическая и подвергается давлению сил участвующих в процессе с одной стороны и опорным давлением на другой стороне. Электроды прикреплены к мембране и получают питание от генератора высокой частоты. Электроды ощущают любое перемещение диафрагмы, и это влияет на изменение емкости пластин-конденсаторов. Изменение емкости обнаруживается подсоединенной электрической цепью, которая выводит напряжение в соответствии с изменением давления. Данный тип датчика может работать в диапазоне от 2,5 Па – 70 МПа с чувствительностью 0,07 МПа.

Для определения очень небольших изменений давления приборы наиболее применимы и эффективны. Они дают возможность произвести замеры избыточного давления в различной среде. Датчик емкостного вида имеет конструкцию, которая имеет стойкость к вибрациям, скачкам температуры, защищена от химической и электромагнитной среды. Пример емкостного датчика давления представлен на рисунке 2.

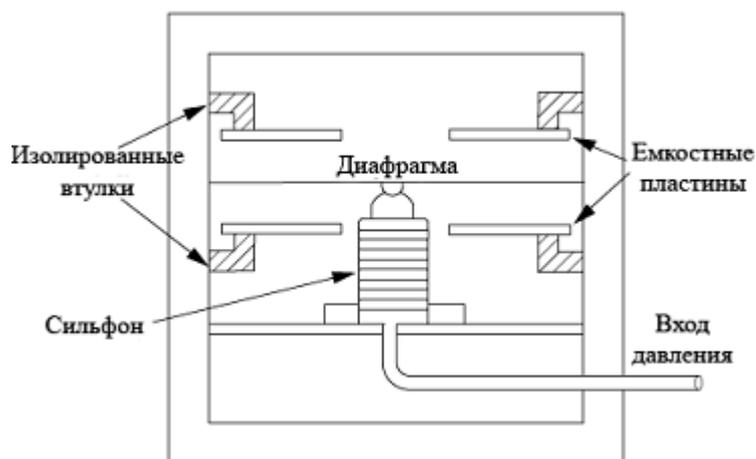


Рисунок 2 – Емкостный датчик давления

Индуктивные датчики давления в сочетании с диафрагмой или трубкой Бурдона. Ферромагнитный сердечник прикреплен к упругому элементу и имеет первичную и две вторичные обмотки. Ток подается на первичную обмотку. Когда сердечник по центру то то же напряжение будет индуцироваться к двум вторичными обмотками. Когда сердечник перемещается под влиянием давления, отношение напряжения между двумя вторичными обмотками изменяется. Разность напряжений пропорциональна изменению давления.

Ниже (рисунок 3) показан пример индуктивного датчика давления с использованием диафрагмы. Для этого вида датчика давления, принимая камеру 1 в качестве эталонной камеры с опорным давлением P_1 подающегося и катушку заряжаемую эталонным током. Когда давление в других камерах изменяется, диафрагма движется и индуцирует ток в другой катушке, который измеряется и выражает измеренное значение тока в единицах давления.

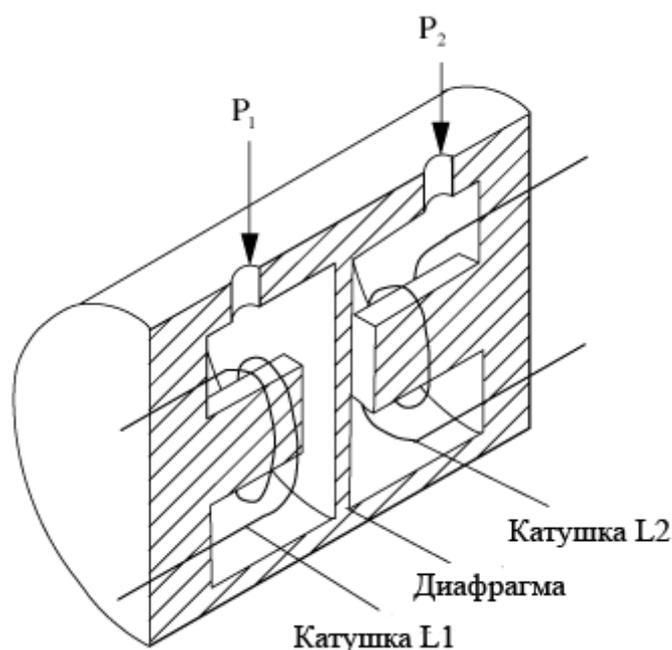


Рисунок 3 – Индуктивный датчик давления

Такие датчики могут быть использованы с любым упругим элементом (хотя, как правило, используются в сочетании с диафрагмой или трубкой Бурдона). Чтение значения создаваемого давления, будет определяться калибровкой

напряжения. Таким образом, диапазон давления, в котором может быть использован этот датчик, определяется относительно упругого элемента, но лежит в диапазоне от 250 Па - 70 МПа.

Датчики давления, основанные на принципе магнетосопротивления, также имеют ферромагнитный сердечник. При изменении давления, гибкий элемент перемещает ферромагнитную пластину, что приводит к изменению магнитного потока цепи, которое может быть измерено. Ситуации, в которых можно было бы использовать электрический элемент это ситуация, в которой индуктивный датчик не генерирует достаточно точное измерение. Диапазон давления для данного метода составляет от 250 Па до 70 МПа с чувствительностью 0,35 МПа.

Пример датчика давления на основе измерения магнетосопротивления представлен на рисунке 4.

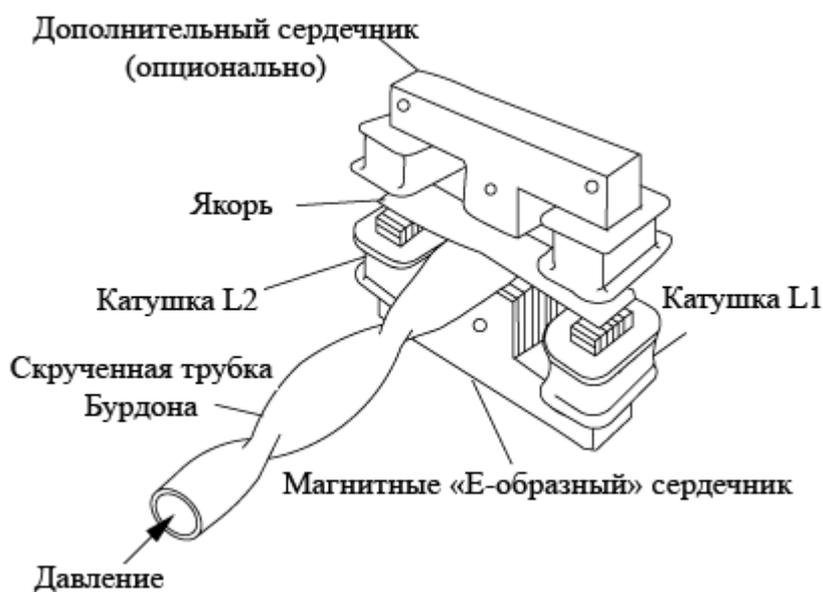


Рисунок 4 – Датчик давления на принципе магнетосопротивления

Пьезоэлектрические датчики используют датчик – кристалл. Когда давление прикладывается к кристаллу, он деформируется и создается небольшой электрический заряд. Измерение электрического заряда пропорционально изменению давления. Этот тип датчика имеет очень быстрое время отклика на

МПа с чувствительностью 0,07–0,35 МПа. Структура датчика представлена на рисунке 6.

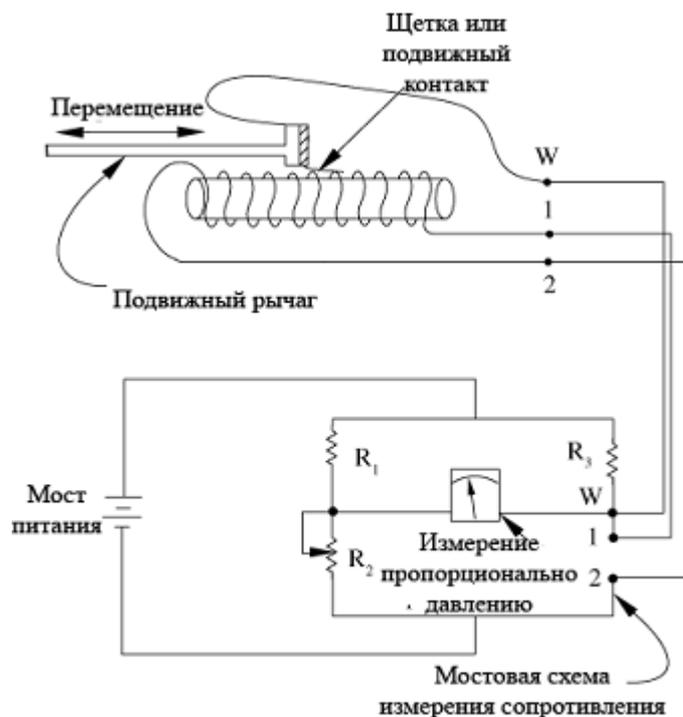


Рисунок 6 – Потенциометрический датчик давления

Тензометрический датчик обнаруживает изменения давления путем измерения изменения сопротивления мостовой схемы Уитстона. В общем, эта схема используется для определения неизвестного электрического сопротивления, уравнивая две секции мостовой схемы, так что бы отношение сопротивлений в одной секции (R_3/R_2) было таким же, как и в другой секции (R_4/R_1), возвращая ноль, в гальванометре в центральной ветви. Одна из секций содержит неизвестный компонент, сопротивление которого должно быть определено тогда, как другая секция содержит резистор с известным сопротивлением, которое можно регулировать [16]. Схема моста Уитстона показана на рисунке 7.

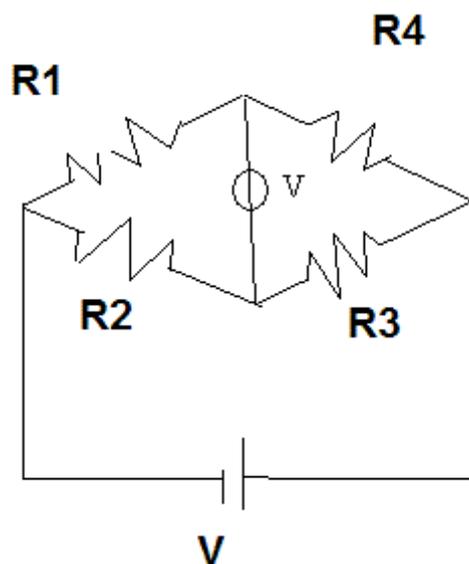


Рисунок 7 – Схема моста Уитстона

Тензодатчик помещает чувствительные элементы на каждом из резисторов и измеряет изменение сопротивления каждого резистора под действием изменения давления. Сопротивление определяется уравнением (6):

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad (6)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника;

L – длина проводника;

A – площадь поперечного сечения проводника.

Изменение давления будет либо удлинять, либо сжимать проводник, следовательно, датчик сжатия необходимо разместить на одном резисторе, а датчик удлинения на другом. Чтобы контролировать воздействие температуры (проволока будет также либо удлиняться, либо сжиматься из-за изменения температуры), свободный датчик нужно разместить на остальных двух резисторах. Эти датчики часто являются одним из типов полупроводника (n-тип или p-тип). Таким образом, чувствительность таких датчиков значительно больше, чем чувствительность их металлических аналогов, однако с большей

влиянию температуры. Им не хватает чувствительности в процессе измерения, тем не менее, таким образом, они не очень подходят для процесса, в котором необходимо отслеживать кратковременные изменения давления. Диапазон давления: 0,0035–0,3 МПа с чувствительностью $1\text{E}-5$ МПа. Вибрационный датчик давления в цилиндре (для абсолютного давления) показан на рисунке 9.

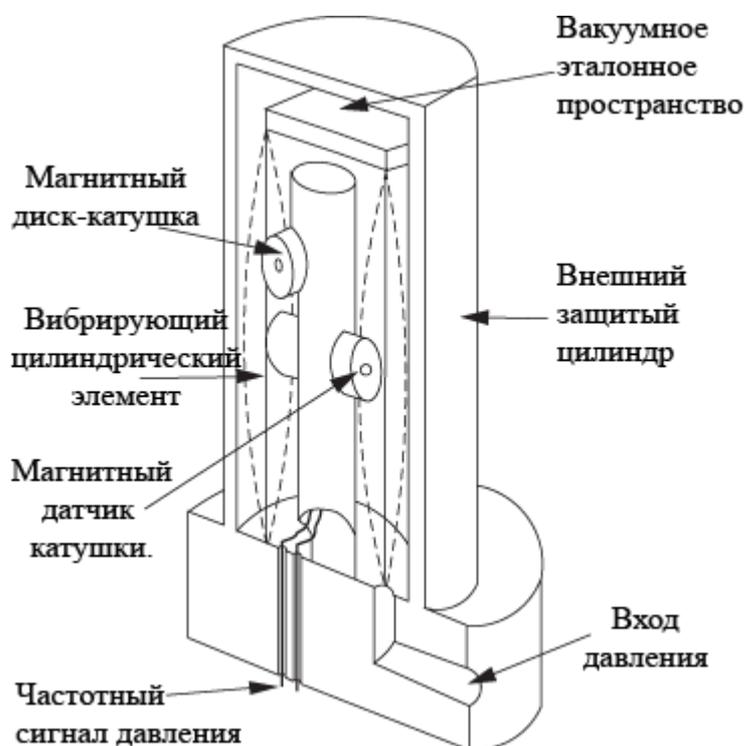


Рисунок 9 – Вибрационный датчик давления

1.3 Метрологическая аттестация датчиков давления

1.3.1 Понятие метрологической аттестации

Любые измерения производят с помощью средств измерений. Средствами измерений называют применяемые при измерениях технические средства, имеющие нормированные метрологические свойства [1]. В этом определении основную смысловую нагрузку, вскрывающую метрологическую суть средств измерений (СИ), несут слова «нормированные метрологические свойства».

Наличие нормированных метрологических свойств означает, во-первых, что средство измерений способно хранить или воспроизводить единицу (или шкалу) измеряемой величины, и, во-вторых, размер этой единицы остается неизменным в течение определенного времени. Если бы размер единицы был нестабильным, нельзя было бы гарантировать требуемую точность результата измерений.

По техническому назначению выделяют несколько видов средств измерения. А именно: мера физической величины, измерительный прибор, измерительный преобразователь, измерительная установка, измерительная система, измерительно-вычислительный комплекс. Так как датчики давления относятся к измерительным преобразователям, дадим более подробное описание этому термину.

Измерительный преобразователь – техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи [2].

Так как датчик давления является средством измерения, то, прежде чем он поступит на предприятие, где будет выполнять определенные функции, он должен пройти все необходимые аттестационные мероприятия.

Метрологической аттестацией является признание средства измерений узаконенным для применения (с указанием его метрологического назначения и метрологических характеристик) на основании тщательных исследований метрологических свойств этого средства. Аттестация проводится в соответствии с ГОСТ 8.326–89. Метрологической аттестации могут подвергаться СИ, не подлежащие государственным испытаниям или утверждению типа органами Государственной метеорологической службы (ГМС), опытные образцы СИ, измерительные приборы, выпускаемые или ввозимые из-за границы в единичных экземплярах или мелкими партиями, измерительные системы и их каналы.

Основными задачами аттестации СИ являются:

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 25 |

- определение метрологических характеристик (МХ) и установление их соответствия требованиям нормативной документации;
- установление перечня МХ, подлежащих контролю при поверке;
- опробование методики поверки.

Аттестация, как и поверка, бывает первичной, периодической и повторной. В процессе первичной аттестации устанавливаются:

- возможность воспроизведения внешних воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта испытания, установленных в документах на методики испытаний конкретных видов продукции;
- отклонения параметров условий испытаний от нормированных значений;
- обеспечение безопасности персонала и отсутствие вредного воздействия на окружающую среду;
- перечень характеристик оборудования, которые должны проверяться при периодической аттестации, а также методы, средства и периодичность ее применения.

Периодическую аттестацию проводят в процессе эксплуатации испытательного оборудования в объеме, необходимом для подтверждения соответствия его характеристик требованиям нормативных документов на методики испытаний и эксплуатационных документов. Результаты аттестации оформляются протоколом. При положительных результатах на оборудование выдается аттестат определенной формы и делается запись в эксплуатационные документы.

Средства измерений, прошедшие метрологическую аттестацию, подлежат поверке в процессе эксплуатации, хранения и после ремонта в соответствии с методикой, указанной в свидетельстве о метрологической аттестации. Повторной метрологической аттестации подлежат средства измерений, в конструкцию или в условия, применения которых внесены изменения, образцовые средства измерений и поверочные установки при необходимости изменения разряда, а

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 26 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

также средства измерений, для которых требуется изменить нормируемые метрологические характеристики [3].

1.3.2 Динамические характеристики датчиков давления

Все средства измерений, независимо от их конкретного исполнения, обладают рядом общих свойств, необходимых для выполнения ими их функционального назначения.

Метрологическими характеристиками называются технические характеристики, описывающие эти свойства и оказывающие влияние на результаты и на погрешности измерений, предназначенные для оценки технического уровня и качества средства измерений, для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений. Характеристики, устанавливаемые нормативно-техническими документами, называются нормируемыми, а определяемые экспериментально – действительными [4].

Ниже приведена номенклатура метрологических характеристик:

- характеристики, предназначенные для определения результатов измерений;
- характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам;
- динамические характеристики средств измерений.

Так как модернизируемое нами испытательное оборудование будет использоваться, в частности, для получения динамических характеристик аттестуемого средства измерений, определим понятие и смысл динамических характеристик.

В стационарных условиях датчик полностью описывается своей передаточной функцией, диапазоном измеряемых значений, калибровочными коэффициентами и т. д. Однако на практике выходной сигнал датчика не всегда точно отслеживает изменение внешнего сигнала. Причины этого заключаются как в самом датчике, так и в его соединении с источником внешних воздействий, не позволяющем

сигналам распространяться с бесконечно большой скоростью. Другими словами, можно сказать, что любой датчик обладает параметрами, зависящими от времени, называемыми динамическими характеристиками.

Динамические характеристики определяют зависимость выходного сигнала датчика от меняющихся во времени величин: параметров входного сигнала, внешних факторов, нагрузки. В зависимости от полноты описания динамических свойств СИ различают полные и частные динамические характеристики.

Полная динамическая характеристика определяет изменение выходного сигнала средств измерений при любом изменении во времени информативного или неинформативного параметра входного сигнала или влияющей величины. К полным динамическим характеристикам относят переходную характеристику, импульсную переходную характеристику, амплитудно-фазовую характеристику, совокупность амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик, передаточную функцию.

Частная динамическая характеристика средства измерений представляет собой параметр или функционал полной динамической характеристики. Тем самым, не отражая полностью динамических свойств датчика. Примерами таких характеристик являются время реакции датчика, коэффициент демпфирования, значение резонансной собственной угловой частоты, значение амплитудно-частотной характеристики на резонансной частоте, запаздывание, время нарастания, время установления, время первого максимума, статическая ошибка, полоса пропускания, постоянная времени [4].

1.3.3 Методы получения динамических характеристик

Методы определения динамических характеристик объектов управления делятся на два класса:

- методы определения временных характеристик объекта управления;
- методы определения частотных характеристик объекта управления.

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 28 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

Временной характеристикой объекта по какому-либо внешнему воздействию называется закон изменения выходной величины объекта в функции времени при изменении внешнего воздействия по определенному закону и при условии, что до приложения внешнего воздействия объект находился в покое [10].

Временные характеристики, прежде всего, зависят от внешнего воздействия, для которого они определяются. Можно рассматривать эти характеристики по входной величине, по возмущению и т. д.

Исследование временных характеристик объектов проводится с целью определения их инерционных свойств (времени переходных процессов, постоянных времени и чистого временного запаздывания). Инерционное запаздывание во многих объектах обусловлено наличием в них накопителей энергии (тепловой, механической, электромагнитной).

Во время переходных процессов происходит энергетический, информационный или нематериальный обмен между отдельными элементами (емкостями) объекта и между внешней средой и объектом. В процессе этого обмена, потоки энергии, сигналы, несущие информацию или вещество, встречают сопротивления различной физической природы, что приводит к появлению инерционного запаздывания.

Необходимо отметить, что инерционные свойства объектов существенно влияют на качественные показатели процесса управления. Поэтому изучение временных характеристик объектов управления является одной из главных задач их идентификации.

Временные характеристики объектов могут определяться аналитическими и экспериментальными методами. Аналитические методы используются в тех случаях, когда известен оператор объекта (дифференциальное уравнение, передаточная функция и т. д.).

Наиболее распространен экспериментальный метод получения временных характеристик объектов. На вход объекта подаются ступенчатые или импульсные

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 29 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

управляющие или возмущающие воздействия, и фиксируется реакция на эти воздействия, т. е. записываются переходные или весовые характеристики.

Переходной функцией (переходной характеристикой) объекта называют функцию, описывающую изменение выходной величины объекта, когда на ее вход подается единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях. Переходную функцию обычно обозначают $h(t)$ [11].

Аналитически единичное ступенчатое воздействие можно записать единичной функцией (7):

$$1(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \geq 0 \\ 0 & \text{при } t < 0 \end{cases} \quad (7)$$

График переходной функции (кривая зависимости функции $h(t)$ от времени t) называют переходной или разгонной характеристикой. Пример такой характеристики показан на рисунке 10.

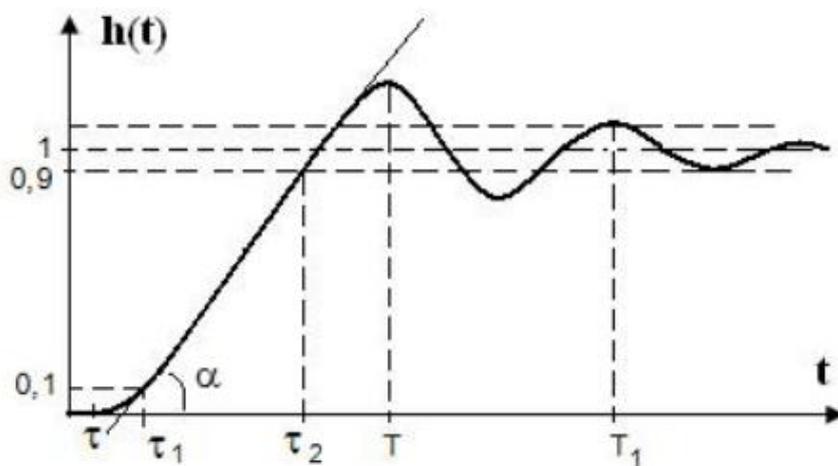


Рисунок 10 – Переходная характеристика

На рисунке 10 обозначены: τ – запаздывание; $\tau_2 - \tau_1$ – время нарастания; T – время первого максимума; T_1 – время переходного процесса

Импульсной переходной или весовой функцией (функцией веса) объекта называют функцию, описывающую реакцию объекта на единичное импульсное

воздействие при нулевых начальных условиях; обозначают эту функцию $\omega(t)$. График импульсной переходной функции называют импульсной переходной характеристикой.

При этом контрольно-измерительная аппаратура должна быть, возможно, более высокого класса точности, а ее инерционность значительно меньше инерционности самого объекта. Момент приложения ступенчатого воздействия и момент начала записи должны быть синхронизированы во времени. Для достижения результатов эксперимента необходимо стабилизировать условия работы объекта и повторять эксперимент несколько раз.

Объекты, не допускающие ступенчатое воздействие, часто исследуются путем подачи на вход короткого импульса с допустимыми параметрами.

Для более полного математического описания объектов управления используются частотные методы, обладающие рядом преимуществ по сравнению с другими методами.

Реакцию системы автоматического управления (САУ) или отдельных её элементов на гармоническое входное воздействие выражают с помощью частотных характеристик. В отличие от временных характеристик, получаемых в переходных режимах, частотные характеристики определяют в установившихся колебательных режимах. Однако частотные характеристики имеют гораздо больший смысл, нежели просто описание реакции системы на гармонический входной сигнал. Они связаны со структурой и свойствами системы управления и широко используются в инженерной практике, как при анализе, так и при синтезе САУ [12].

Частотные методы очень хороши в практическом применении, и большинство систем управления проектируется именно на основе различных модификаций этих методов. Отличительной особенностью частотных методов является так называемая робастность (или грубость). Это означает, что синтезированная с их помощью система управления сохраняет требуемые характеристики, несмотря на небольшие различия между моделью, на основе которой выполнялось

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 31 |

проектирование, и реальной системой управления. Такая особенность имеет существенное значение из-за сложности построения точной модели реальной системы, из-за изменения параметров системы при её функционировании, а также в связи с тем, что многим системам присущи различного рода нелинейности, осложняющие их анализ и синтез.

Частотные характеристики можно получить как на основе математической модели САУ, так и экспериментально. Экспериментальный метод получения частотных характеристик системы, не связанный с определением её математической модели, обладает рядом преимуществ. Фактически это означает, что мы можем решать задачу синтеза системы управления, располагая только частотными характеристиками в случае, когда получение математического описания невозможно из-за сложности или малой изученности системы. Кроме того, одним из распространённых методов проверки адекватности математической модели системы является построение на её основе частотных характеристик и сравнение их с частотными характеристиками, полученными в результате экспериментального исследования реальной системы. К достоинствам частотных методов анализа и синтеза систем управления можно также отнести и то, что они позволяют получить характеристику системы в целом по характеристикам отдельных элементов системы независимо от их числа, в то время как анализ во временной области практически нецелесообразен для случая четырёх и более элементов [13]. Частотные характеристики позволяют определить тип регулятора, приемлемого в конкретной системе управления, и сравнительно просто решить задачу об устойчивости САУ. Они дают нам информацию о критической частоте и предельно допустимом усилении регулятора, о запасах устойчивости и полосе пропускания системы управления. По частотным характеристикам можно также судить о временных характеристиках, что особенно важно при синтезе систем управления.

Если на вход устойчивого линейного стационарного динамического звена подать гармонический сигнал с частотой ω и амплитудой A_x

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 32 |

$$x(\tau) = A_x \sin(\omega\tau) \cdot 1(\tau), \quad (8)$$

то после завершения переходного процесса в установившемся режиме выходная величина динамического звена будет совершать вынужденные гармонические колебания с той же частотой ω , но с иной амплитудой A_y , и сдвинутые по фазе относительно входных колебаний на угол φ :

$$y_{уст}(\tau) = A_y \sin(\omega\tau + \varphi). \quad (9)$$

Положительное значение φ в выражении (9) означает опережение по фазе, а отрицательное – отставание. На рисунке 11 представлен вид гармонических сигналов на входе и выходе.

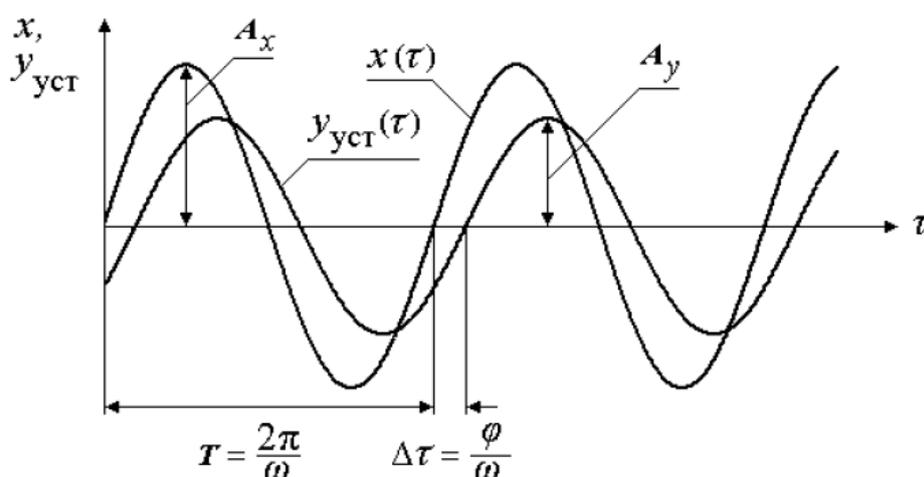


Рисунок 11 – Гармонические сигналы на входе и выходе

На рисунке 11 обозначены: T – период колебаний входного сигнала; $\Delta\tau$ – временной сдвиг (разница между входным и выходным сигналом).

Для данного динамического звена отношение амплитуды колебаний выходной величины к амплитуде колебаний входного сигнала A_y/A_x и фазовый сдвиг между колебаниями выходной величины и входного сигнала φ зависят только от частоты колебаний ω . Определяя в установившемся режиме отношение амплитуд A_y/A_x и

фазовый сдвиг φ при разных частотах колебания входного сигнала ($0 < \omega < \infty$), можно экспериментально получить частотные характеристики динамического звена. Зависимость отношения амплитуды выходных колебаний к амплитуде входных колебаний A_y/A_x от частоты колебаний ω называется амплитудной частотной (или амплитудно-частотной) характеристикой (АЧХ) и обозначается $A(\omega)$ [14].

Зависимость фазового сдвига φ между выходными и входными колебаниями от частоты ω называется фазовой частотной (или фазово-частотной) характеристикой (ФЧХ) и обозначается $\varphi(\omega)$.

Амплитудно-частотная характеристика автоматического объекта управления при проведении частотного анализа позволяет определить его параметры. На рисунке 12 показан возможный вид частотных характеристик автоматической системы управления.

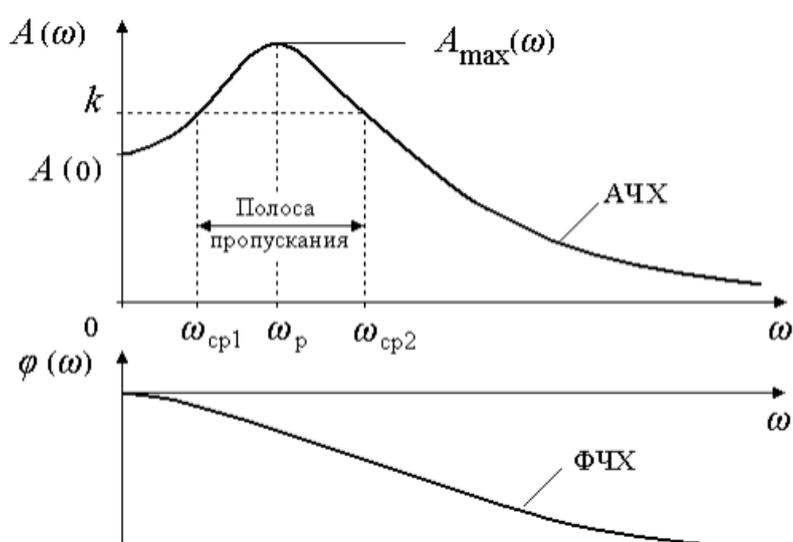


Рисунок 12 – Частотные характеристики системы автоматического регулирования

Существует множество показателей, характеризующих частотные характеристики. Перечислим наиболее значимые. Показатель колебательности

$$M = \frac{A_{\max}(\omega)}{A(0)} \quad (10)$$

характеризует склонность системы к колебаниям. Система, показатель колебательности которой меньше единицы, обладает апериодической переходной характеристикой. Чем больше M , тем слабее затухают возникающие в системе колебания, и тем ближе система к границе устойчивости. Таким образом, величина M может служить мерой запаса устойчивости системы.

Резонансной частотой ω_p называют частоту, при которой АЧХ имеет максимум:

$$A(\omega_p) = A_{\max}(\omega). \quad (11)$$

Гармонические колебания именно этой частоты претерпевают в системе наибольшее усиление. Так как резонансная частота близка к частоте колебаний системы в переходном процессе, она может служить мерой быстродействия системы (или длительности переходных процессов).

Полосой пропускания системы называют интервал частот, в котором выполняется условие:

$$k < A(\omega) < A_{\max}(\omega), \quad (12)$$

где k – положительное действительное число такое, что $0 \leq k < A_{\max}(\omega)$.

Частоты, соответствующие границам полосы пропускания, называют частотами среза $\omega_{ср}$.

Для проектировщиков наиболее важным является знание возможностей частотного метода анализа и областей его применения. На основании анализа статических и переходных характеристик объекта необходимо установить и количественно оценить его нелинейности. Если нелинейности несущественны и в

рабочем диапазоне статическая характеристика аппроксимируется отрезком прямой линии, то применимость частотного метода не вызывает сомнений. Наличие существенной нелинейности в объекте, а особенно комбинации нескольких нелинейностей, указывают на ограничение в применении данного метода. Например, если колебания на выходе объекта значительно отличаются от синусоиды, или частотные характеристики зависят от амплитуды входных колебаний, то это указывает на нелинейный характер объекта и низкую достоверность результатов эксперимента.

1.4 Оборудование для получения динамических характеристик

1.4.1 Особенности проектирования систем контроля динамических характеристик датчиков давления

Опыт разработки и эксплуатации датчиков переменных давлений показывает, что частичное, а подчас полное отсутствие информации о динамике датчика в условиях эксплуатации объясняется недостаточностью знаний о его поведении в условиях аттестационных испытаний.

Оценка динамических характеристик датчиков является важной проблемой при регистрации быстропротекающих процессов. Инструментальная оценка динамических погрешностей датчиков и систем измерения давления представляет собой сложную техническую проблему, поскольку для ее решения необходимы специализированные стенды, оснащенные измерительным оборудованием, современными программно-аппаратными вычислительными средствами с соответствующим программным обеспечением.

Серьезной проблемой является тот факт, что в настоящее время исполнение стендового оборудования в ряде случаев не отвечает требованиям, предъявляемым регламентом аттестационных испытаний. По большому счету это выражается в невозможности воспроизведения идеальных испытательных

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 36 |

воздействий, какими являются, например, δ -импульс, ступень, гармонический сигнал. Проблемы также возникают в связи с необходимостью задания гармонических давлений с изменяющейся в рабочем диапазоне датчика частотой.

Поэтому в большинстве случаев оборудование, предназначенное для аттестационных мероприятий датчиков давления, проектируется таким образом, чтобы определение динамических характеристик производилось по откликам на известные воздействия.

Для формирования давления по заданному испытательному воздействию, в проектируемом оборудовании должно подразумеваться наличие рабочего объема. Для того чтобы сформировать необходимое давление в этом объеме, существует различное пневматическое оборудование.

1.4.2 Сервораспределитель для регулирования расхода воздуха

При разработке микроконтроллерной системы автоматического регулирования давления был использован сервораспределитель для регулирования расхода воздуха фирмы Camozzi модели LRWA0 (рисунок 13).



Рисунок 13 – Сервораспределитель серии LRWA0

Сервораспределитель состоит из картриджа с золотником и кабеля с разъемом. В разьеме смонтирована электронная плата, которая выдает сигнал на серводвигатель для обеспечения желаемого угла поворота золотника и, соответственно, расхода воздуха в каналах.

Опишем принцип работы сервопривода как системы регулирования. Сервоприводом называется такой привод, точное управление которым осуществляется через отрицательную обратную связь, и позволяет таким образом добиться требуемых параметров движения рабочего органа.

Механизмы этого типа имеют датчик, отслеживающий конкретный параметр, например скорость, положение или усилие, а также блок управления, задача которого — поддерживать в автоматическом режиме необходимый параметр в процессе работы устройства, в зависимости от сигнала с датчика в каждый момент времени.

Исходное значение рабочего параметра задается посредством управления, например ручкой потенциометра или при помощи другой внешней системы, куда вводится численное значение. Так сервопривод автоматически исполняет поставленную задачу — опираясь на сигнал с датчика, он точно подстраивает заданный параметр, и поддерживает его устойчиво на исполнительном органе.

Датчиком обратной связи в такой системе может быть энкодер (датчик угла поворота) или, например, датчик Холла.

В самом простом виде блок управления для электрического сервопривода строится на базе схемы сравнения значений сигналов задаваемого и сигнала, идущего с датчика обратной связи, по результатам которого на электродвигатель подается соответствующее напряжение.

Если требуется плавный разгон или плавное торможение, с целью избежать динамических перегрузок электродвигателя, то реализуют более сложные схемы управления на микропроцессорах.

Энкодер — это так называемый датчик угла поворота, то есть, устройство, которое предназначено чтобы преобразовать угол поворота вала в электрические

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 38 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

импульсы, по которым можно определить: угол поворота, скорость вращения, направление вращения, и текущее положение относительно начальной точки работы.

Характеристики сервораспределителя LRWA0 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики сервораспределителя модели LRWA0

| Наименование характеристики | Значения |
|--|--|
| Входное напряжение | 24V DC \pm 10%, стабилизированный источник питания, максимальное потребление 0,8 А |
| Сигнал управления | \pm 10В (100 кОм); 0–10В (100 кОм); 0–20 мА (500 Ом) |
| Гистерезис | не более 1% от диапазона регулирования |
| Линейность | не более 1% от диапазона регулирования |
| Диапазон частот (-3дБ, -90) | при диапазоне \pm 100%: не более 70 Гц; при диапазоне \pm 50%: не более 110 Гц |
| Время переключения | от 0 до 100%: приблизительно 5 мс; \pm 100%: приблизительно 7 мс |
| Рабочее давление | от минус 0,9 до 10 Бар |
| Рабочая температура | 0°C–50°C |
| Максимальный расход (полностью открыт) | от 6 Бар до 0 Бар: LRWA0-34 – 700 Нл/мин; от 6 Бар до 5 Бар: LRWA0-34 – 450 Нл/мин; |
| Вес | 0.140 гр (без кабеля) |
| Среда | чистый воздух, с маслом или без, с фильтром 5 мкм |
| Допустимые утечки | <1% от максимальной величины расхода |
| Материалы | AISI 440B/1; NBR |
| Относительная влажность воздуха | не более 90% |
| Гарантия | 1 год |

Данные взяты с каталога продукции на сайте www.camozzi.com

Сервораспределитель работает следующим образом: если сигнал задания равен 50% или менее от диапазона, распределитель соединяет между собой порт 1 и 2, воздух проходит между входом и выходом. Если управляющий сигнал выше

50%, порт 2 соединяется с выхлопным портом 3. Т. е. когда мы задаем низкий уровень сигнала (0–5V) – коммутируют пневматические порты 1–2. Высокий уровень сигнала (5–10V) – порты 2–3. Принцип работы распределителя показан на рисунке 14, где по вертикальной оси представлен расход воздуха (л/мин), а по горизонтальной – уровень управляющего сигнала в процентах.

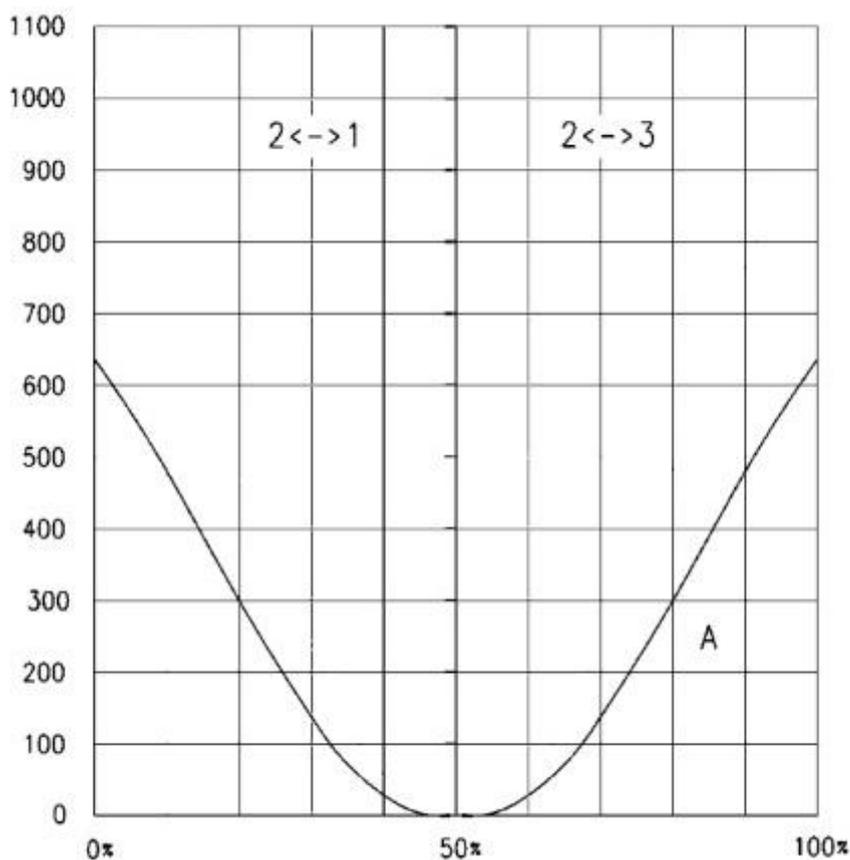


Рисунок 14 – Расходные характеристики сервораспределителя

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

2.1 Описание лабораторного стенда для аттестации датчиков давления

Лабораторный стенд предназначен для исследования динамических характеристик датчиков давления. Структурная схема стенда представлена на рисунке 15.

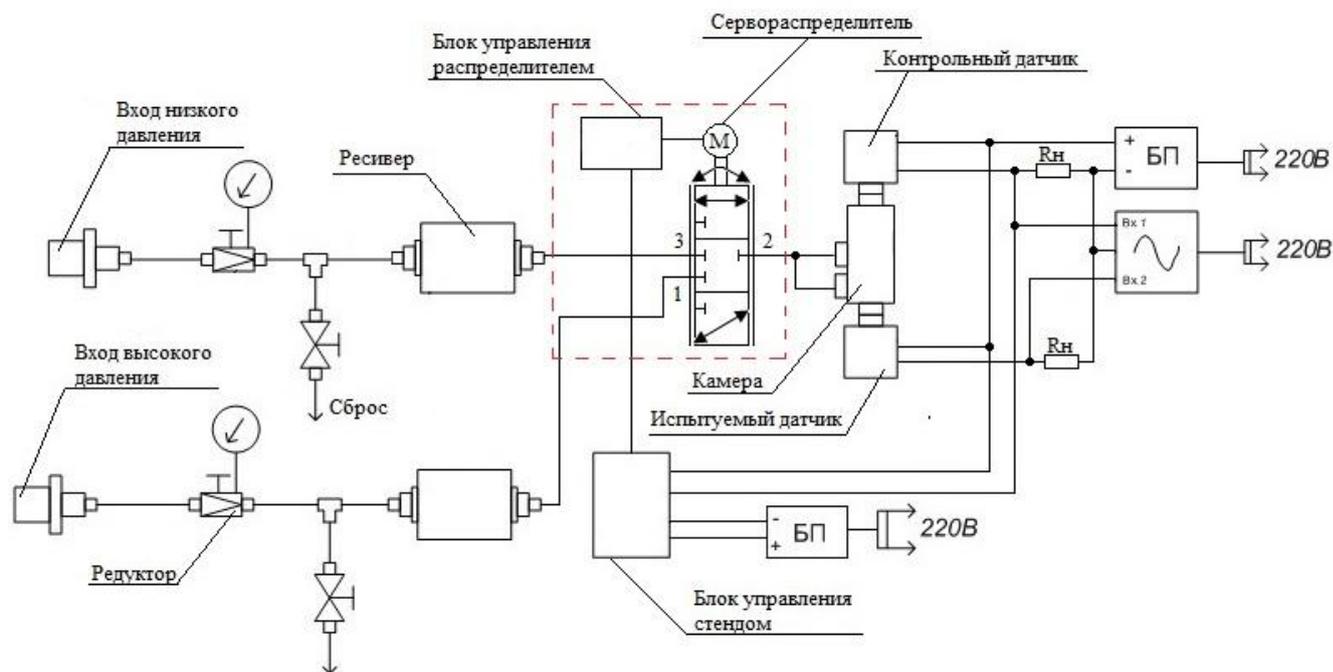


Рисунок 15 – Структурная схема стенда

На стенде имеются входы для высокого и низкого давления. Подача газа на вход высокого давления осуществляется с помощью компрессора. Далее газ поступает на газовый редуктор. Газовый редуктор предназначен для понижения давления газа или газовой смеси на выходе из какой-либо ёмкости до рабочего и для автоматического поддержания этого давления постоянным независимо от изменения давления газа в баллоне или газопроводе. Вентиль для сброса давления предназначен для разгрузки стенда после работы. Газовый ресивер, расположенный после вентиля, используется в качестве накопителя для хранения

| | | | | |
|------|------|---------|---------|------|
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата |
| | | | | |

сжатого газа или под давлением и для сглаживания перепадов давления газа. Элементы, расположенные после входа низкого давления, работают также, как и на входе высокого давления. Разность давлений позволяет стенду работать в сторону формирования более низких давлений.

Как было сказано ранее, для формирования давления по заданному закону в рабочей камере, мы используем сервораспределитель для регулирования расхода воздуха фирмы Camozzi. Сервораспределитель устанавливается в картриджный блок (рисунок 16) и далее присоединяется к рабочей камере.

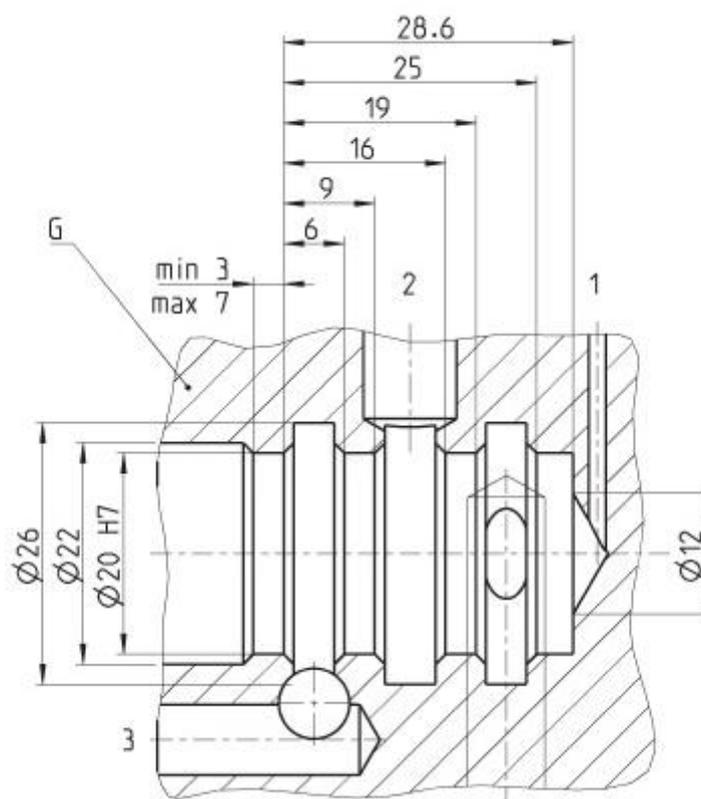


Рисунок 16 – Установка сервораспределителя

На рисунке 16 обозначено: 1 – порт входа; 2 – порт, соединяющий вход с рабочей камерой; 3 – выхлопной порт; G – картриджный блок.

Блок управления сервораспределителем является электронной замкнутой системой управления положением золотника. На данный блок управления приходит управляющий сигнал, формируемый в блоке управления стендом.

К рабочей камере, внутри которой происходит формирование давления с помощью сервораспределителя, подключены два датчика давления: контрольный и аттестуемый. Предполагается, что результаты работы обоих датчиков будут выводиться на осциллограф, а также поступать в аналого-цифровой преобразователь микроконтроллера, находящего в блоке управления стендом. Так как в данной работе рассматривается вопрос формирования эталонного воздействия давления на аттестуемый датчик, то сигналы, приходящие в микроконтроллер, берутся только с эталонного датчика. Эти сигналы являются показателями работы нашей автоматической системы регулирования давления.

В качестве контрольного датчика выступает датчик давления Метран-55. Он предназначен для преобразования давления рабочих сред: жидкости, пара, газа (в т. ч. газообразного кислорода и кислородосодержащих газовых смесей при давлении не выше 16 МПа) в унифицированный токовый выходной сигнал. В качестве чувствительного элемента в датчике установлена сапфировая пластина с пленочными тензорезисторами из кремния. Пластина соединяется с мембраной тензопреобразователя, на которой сказывается воздействие входного сигнала, тем самым вызывая прогиб мембраны.

В микросхеме блока управления стендом используется микроконтроллер STM32F303CBT6. В нем предполагается реализация генератора стандартных сигналов для работы с датчиком давления. Параметры генерируемого сигнала задаются пользователем на компьютере, далее происходит их отправка в микроконтроллер. В нем происходит формирование управляющего сигнала, поступающего в блок управления сервораспределителем. STM32F303CBT6 необходим для преобразования сигнала с датчика из аналогового вида в цифровой и отправку полученного результата в программу-обработчик полученных данных или на выводы осциллографа.

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 43 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

2.2 Расчет параметров схемы замещения системы

2.2.1 Переход от пневматических величин измерения к электрическим величинам

Пневматическая цепь, расчетом которой мы будем заниматься, состоит из следующих элементов: источник газа, сервораспределитель, рабочая камера и эталонный датчик давления. Для этого необходимо перейти от пневматических величин измерения к электрическим величинам.

Из электротехники известно, что сила постоянного тока, протекающего по проводнику, прямо пропорциональна разности потенциалов между конечными точками проводника и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению. Эта зависимость выражается законом Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (13)$$

где I – сила тока в проводнике;

U – электрическое напряжение;

R – электрическое сопротивление проводника.

Если в пневматическую линию включить ламинарное пневматическое сопротивление, что через него в единицу времени проходит определенное количество воздуха. Если увеличить сопротивление, например, посредством увеличения длины канала в два раза, то количество воздуха, проходящее в единицу времени, сократится наполовину [15].

Следовательно, можно сказать, что закон Ома справедлив и для пневматических цепей, работающих в области ламинарных течений. В этом случае закон Ома для пневматических цепей можно представить в виде:

$$G = \frac{\Delta P}{R} = \alpha \Delta P, \quad (14)$$

где G – массовый расход газа;

ΔP – перепад давлений на пневматическом сопротивлении;

R – пневматическое сопротивление;

α – проводимость.

2.2.2 Функциональная схема управления системой регулирования давления

Недостаточная информация об объектах при разработке их систем управления восполняется использованием методов идентификации. Основные трудности при решении задачи идентификации объектов обусловлены сложностью структуры объекта и неполнотой математического описания и информации об объекте. Объект управления приходится аппроксимировать цепочкой элементарных звеньев известной структуры, а построение модели сводится к оценке характеристик этих звеньев по данным нормальной работы объекта. После определения структуры модели, задача идентификации сводится к задаче параметрической идентификации.

Разрабатываемая нами система регулирования давления является подчиненной. Сущность подчиненного регулирования заключается в том, что объект управления представляется в виде последовательно соединенных звеньев, выходными параметрами которых являются положение золотника сервораспределителя и давление, формируемое в рабочей камере.

Для управления каждой из этих координат имеется отдельный регулятор и соответствующая обратная связь. Регуляторы соединяются последовательно, т. е. выход предыдущего регулятора является входом последующего. Образуется система концентрических контуров, число которых соответствует числу

(золотник), и замыкается обратной связью по положению, реализованной датчиком положения ДП (энкодером).

Данный контур представляет собой составную часть объекта управления в контуре регулирования давления, от его быстродействия в значительной степени зависят динамические качества системы управления.

Внешний контур образован регулятором давления (PID), контуром положения, сервораспределителем и обратной связью по давлению ДД.

2.2.3 Структурная схема управления системой

Преобразование дифференциальных уравнений по Лапласу дает возможность ввести удобное понятие передаточной функции, характеризующей динамические свойства системы. Передаточной функцией называется отношение изображения выходного воздействия к изображению входного при нулевых начальных условиях

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}, \quad (15)$$

где $Y(p)$ – изображение выходного воздействия на систему;

$X(p)$ – изображение входного воздействия.

Так как передаточная функция системы полностью определяет ее динамические свойства, то первоначальная задача расчета системы автоматического регулирования (САР) сводится к определению ее передаточной функции. При расчете настроек регуляторов широко используются достаточно простые динамические модели промышленных объектов управления. В частности, использование моделей инерционных звеньев первого или второго порядка с запаздыванием для расчета настроек регуляторов обеспечивает в большинстве случаев качественную работу реальной системы управления.

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 47 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

Замкнутая система не может функционировать без ошибки. Она не может описываться безынерционным звеном, поскольку к замкнутой системе автоматической системы управления предъявляются требования по быстродействию и качеству переходного процесса. Замкнутая система не может описываться колебательным и изодромным звеном, таким образом, выбираем апериодическое звено первого порядка. Тогда передаточная функция контура регулирования положения золотника имеет вид

$$W_{\text{пр}}(p) = \frac{k_{\text{пр}}}{T_{\text{пр}}p + 1} = \frac{1}{0.001p + 1}, \quad (17)$$

где $T_{\text{пр}}$ – постоянная времени привода положения золотника;

$k_{\text{пр}}$ – коэффициент передачи;

p – оператор дифференцирования.

Постоянная времени характеризует «инерционность» или «инерционное запаздывание» апериодического звена. Выходное значение в апериодическом звене устанавливается только спустя некоторое время после подачи входного воздействия. В прилагаемой к сервораспределителю документации, постоянная времени варьируется в диапазоне 5–7 мс, в зависимости от уровня управляющего сигнала. Поэтому при построении математической модели принимаем $T_{\text{пр}} = 10$ мс.

Для упрощения расчетов, при построении модели системы регулирования давления, был произведен переход к относительным величинам. По этой причине коэффициент передачи звена $k_{\text{пр}} = 1$.

Рабочую камеру, в которой формируется давление, представляем в форме интегратора. Прежде всего, интегратор – это накопитель. При переходе от пневматической цепи к электрической, рабочую камеру мы представили в виде емкости. Емкость с газом накапливает газ. При подаче на вход сигнала

(включении сервораспределителя) давление газа постепенно повышается. Это и есть характерная реакция интегратора. При выключении сигнала, выход интегратора остается неизменным. Камера, наполненная газом, сохраняет его, она не может опустеть сиюминутно.

Таким образом, рабочая камера описывается интегрирующим звеном с передаточной функцией

$$W_k(p) = \frac{k_k}{p}, \quad (18)$$

где k_k – коэффициент передачи камеры.

Датчик давления Метран-55, выступающий в роли отрицательной обратной связи контура регулирования давления, описывается апериодическим звеном первого порядка. Его передаточная функция

$$W_d(p) = \frac{k_d}{T_d p + 1} = \frac{1}{0.0002p + 1}, \quad (19)$$

где T_d – постоянная времени датчика давления;

k_d – коэффициент передачи датчика;

В качестве эталонного датчика может функционировать любой другой датчик с подходящими нам характеристиками. При использовании Метран-55 принимаем $T_d = 2$ мс, $k_d = 1$.

Зависимость входной величины (положения золотника) от выходной величины (расхода газа в камеру) снимается экспериментальным путем. Графическая кривая, представленная безынерциальным нелинейным звеном, описывает эту зависимость.

2.2.4 Разработка математической модели

Построим математическую модель двухконтурной системы управления давлением с помощью программы Jigrein, позволяющей создавать модели сложных технических систем. Модель САУ представлена на рисунке 20.

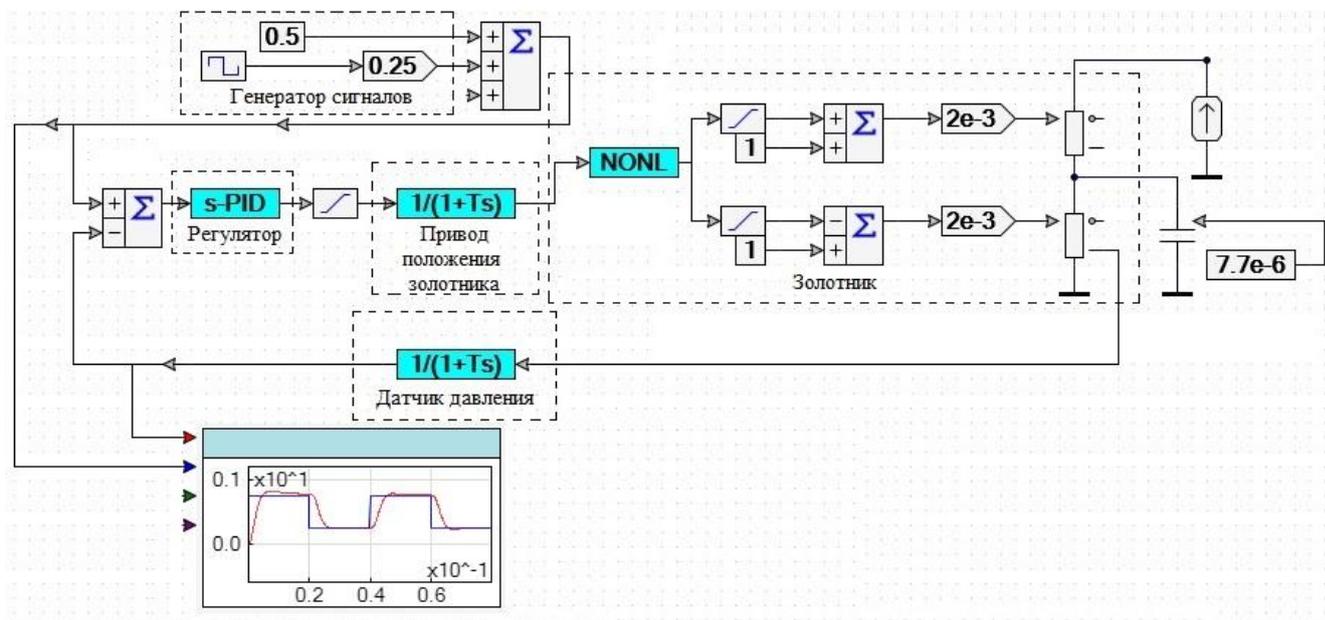


Рисунок 19 – Математическая модель системы управления давлением

В состав модели входят:

- генератор стандартных сигналов;
- сумматор сигналов задания по давлению и отрицательной обратной связи по давлению;
- ПИД регулятор (s-PID);
- Привод положения золотника (апериодическое звено первого порядка);
- Модель золотника сервопривода;
- Рабочая камера (емкость);
- Источник газа, поступающий на сервораспределитель (источник ЭДС);
- Датчик давления (апериодическое звено первого порядка).

| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата |
|------|------|---------|---------|------|
| | | | | |

В данной модели, помимо динамических звеньев, описание которых было представлено ранее, присутствуют электрические элементы, являющиеся схемой замещения для пневматической цепи.

Рабочая камера представлена электрической емкостью. Ток, протекающий через обкладки, эквивалентен расходу газа через камеру. Источник газа (на стенде для аттестации датчиков это компрессор) представлен источником ЭДС. Посредством резисторов имитируем сопротивление портов сервораспределителя. Конструкция из двух сумматоров и ограничителей предназначена для ограничения полувольт безынерционного нелинейного блока, показывающего зависимость расхода газа от уровня управляющего сигнала (рисунок 20).

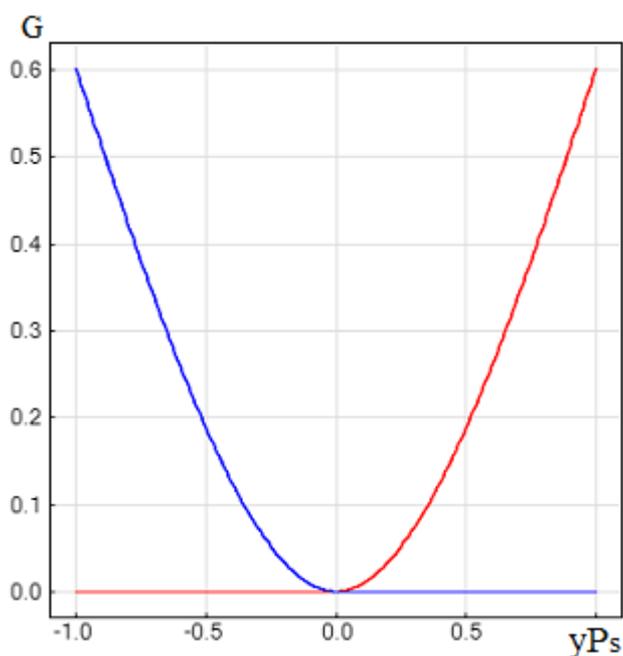


Рисунок 20 – Безынерционный нелинейный блок

Если ограничивается левая полувольт, сервораспределитель работает на вход (происходит заполнение камеры газом). При этом на вход резистора поступает определенное значение электрической (пневматической) проводимости, далее происходит ее умножение на разность потенциалов (разность давлений) и таким образом получаем определенное значение тока (расхода газа), поступающего в конденсатор (камеру).

В предыдущем параграфе мы не представили аналитического описания части модели, описывающей работу золотника. Для этого, опираясь на частотные характеристики модели золотника (рисунок 21), произведем замену.

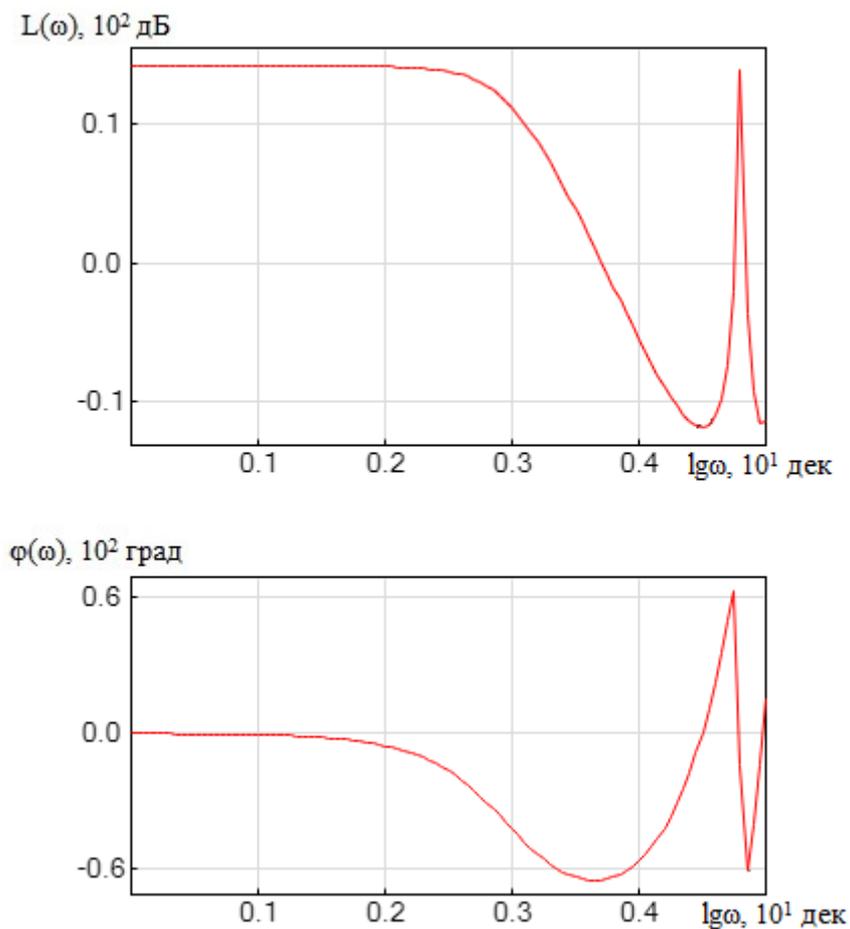


Рисунок 21 – Частотные характеристики золотника

На рисунке 21 показаны логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ) и логарифмическая фазовая частотная характеристика (ЛФЧХ) золотника сервораспределителя. По рисунку определяем, что это частотная характеристика аperiodического звена первого порядка. Исходя из этого, запишем передаточную функцию данного звена:

$$W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, \quad (20)$$

где T_3 – постоянная времени звена;

k_3 – коэффициент передачи.

В классической теории управления хорошо разработаны методы анализа и синтеза систем на основе асимптотических ЛАЧХ, которые представляют собой ломаные линии и легко строятся вручную. Для расчета параметров передаточной функции переведем нашу ЛАЧХ в асимптотическую (рисунок 22).

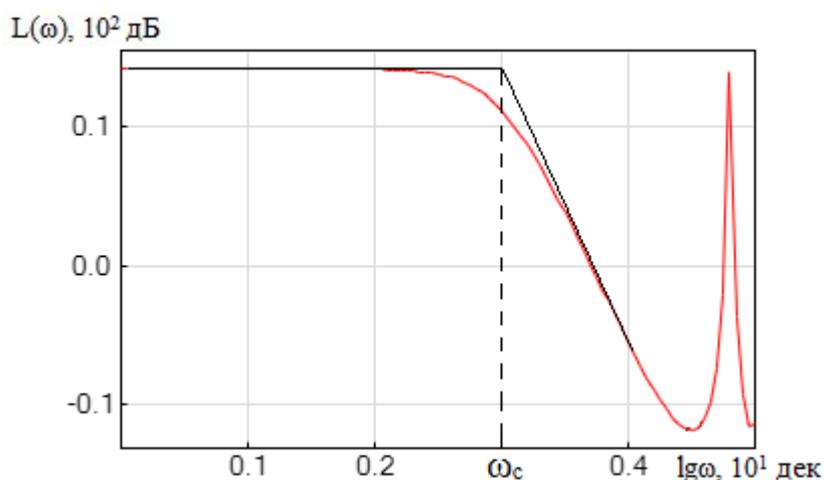


Рисунок 22 – Асимптотическая ЛАЧХ золотника

Асимптотическая ЛАЧХ этого звена образована двумя прямыми, которые пересекаются на сопрягающей частоте

$$\omega_c = \frac{1}{T}, \quad (21)$$

где T – постоянная времени звена.

На низких частотах она имеет нулевой наклон (так как звено позиционное), причем в этой области $L_m \approx 20 \lg k$. На высоких частотах наклон ЛАЧХ равен -20 дБ/дек, так как степень знаменателя передаточной функции на единицу больше степени ее числителя.

Тогда наша передаточная функция имеет вид

$$W_3(p) = \frac{k_3}{T_3p + 1} = \frac{4}{0.001p + 1}. \quad (22)$$

После произведенной замены, структурная схема системы упрощается (рисунок 23).

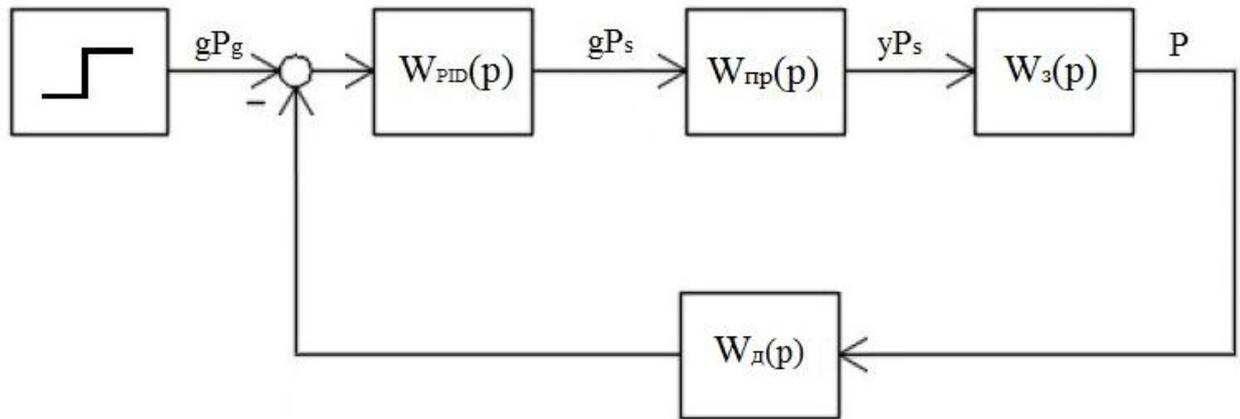


Рисунок 23 – Упрощенная структурная схема системы

Математическая модель упрощенной системы представлена на рисунке 24.

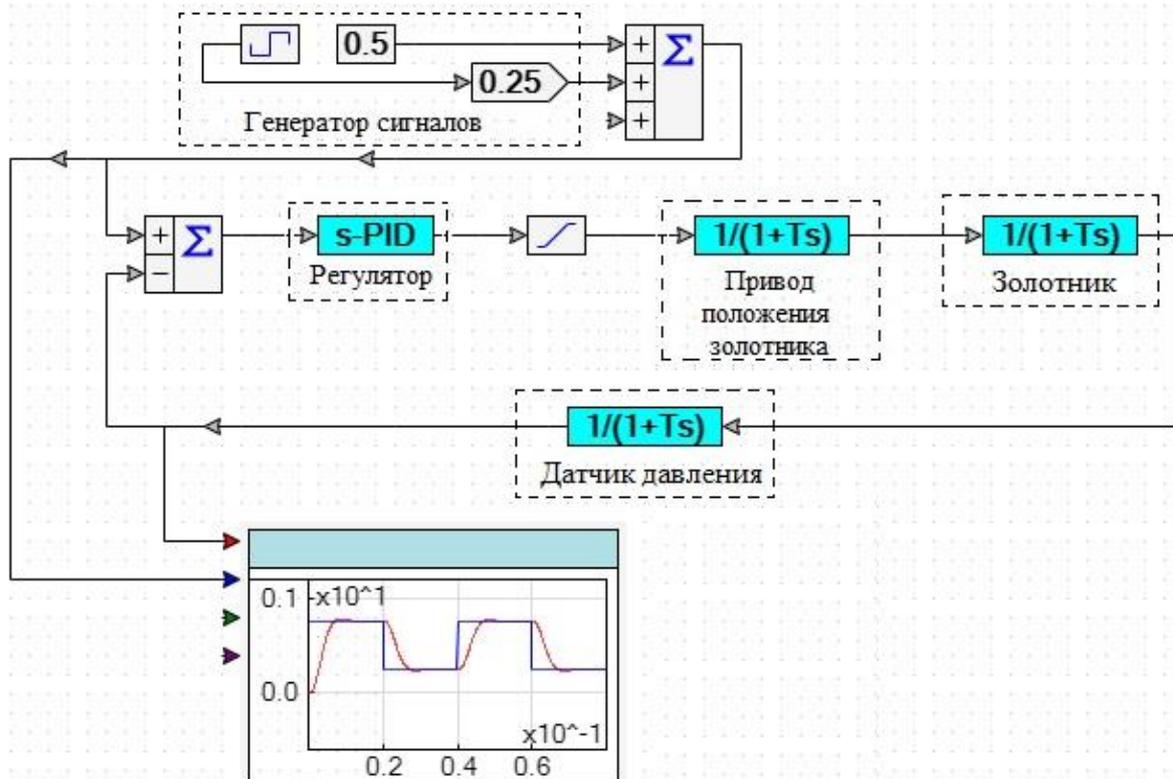


Рисунок 24 – Упрощенная математическая модель системы регулирования

2.2.5 Выбор оптимальных настроек регулятора для заданного объекта управления

В нашей системе используется ПИД-регулятор. ПИД-регулятор – устройство в цепи обратной связи, используемое в системах автоматического управления для поддержания заданного значения измеряемого параметра. ПИД-регулятор измеряет отклонение стабилизируемой величины от заданного значения и выдаёт управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально этому отклонению, второе пропорционально интегралу отклонения и третье пропорционально производной отклонения.

Если какие-либо составляющие ПИД-регулятора не используются, то регулятор называют пропорционально-интегральным (ПИ-регулятор), пропорционально-дифференциальным (ПД-регулятор), пропорциональным (П-регулятор) и т. п.

Существуют два способа оптимальной настройки регулятора контура: настройка на технический и симметричный оптимумы. Выбор способа настройки регуляторов зависит от структуры объекта и требуемого качества переходных процессов в системе.

Настройка контура регулирования на технический оптимум обеспечивает переходный процесс, близкий к оптимальному, при котором будет небольшое перерегулирование и относительно высокое быстродействие.

Для коррекции системы воспользуемся методом логарифмических амплитудных характеристик. Суть метода состоит в том, чтобы определить ЛАЧХ нескорректированной системы, построить ЛАЧХ желаемой системы. Исходя из параметров желаемой ЛАЧХ, выбирают коррекцию. Логарифмическая амплитудная частотная характеристика необходимого регулятора определяется выражением 23:

$$L_k(\omega) = L_{\text{ж}}(\omega) - L_o(\omega), \quad (23)$$

где $L_{\text{ж}}(\omega)$ – желаемая ЛАЧХ объекта управления;

$L_o(\omega)$ – ЛАЧХ объекта управления.

На рисунке 25 отображена АЧХ и ФЧХ нескорректированной системы автоматического регулирования давления.

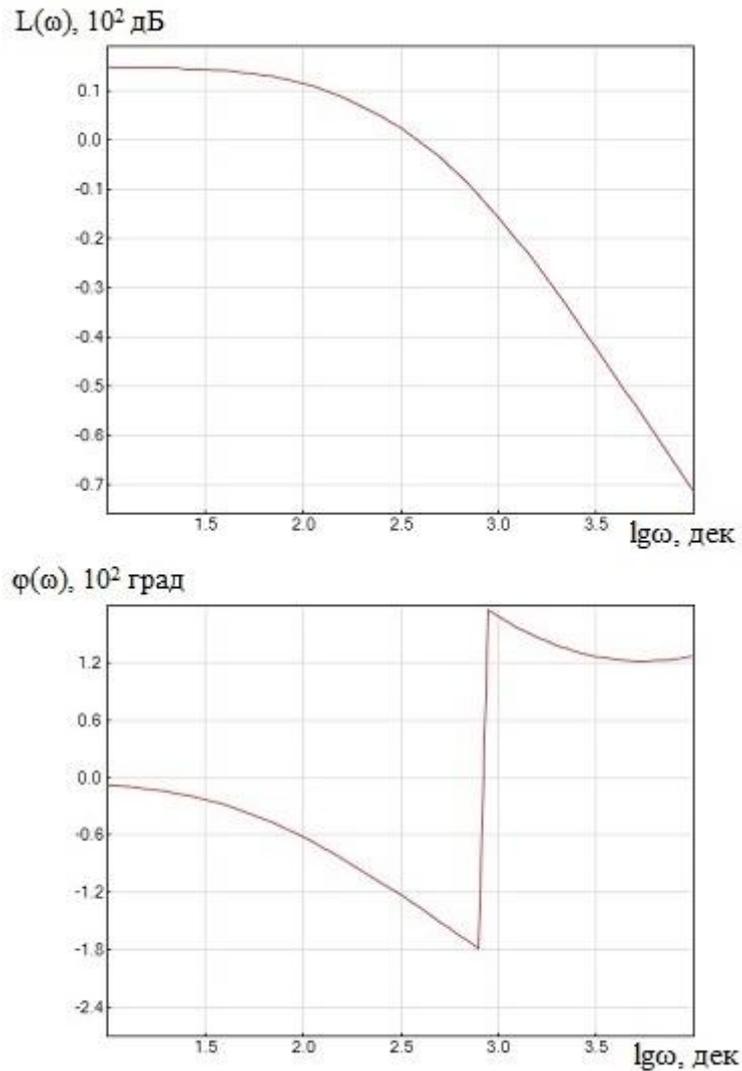


Рисунок 25 – АЧХ и ФЧХ нескорректированной системы

Переведем ЛАЧХ нашей системы в асимптотический вид (рисунок 26).

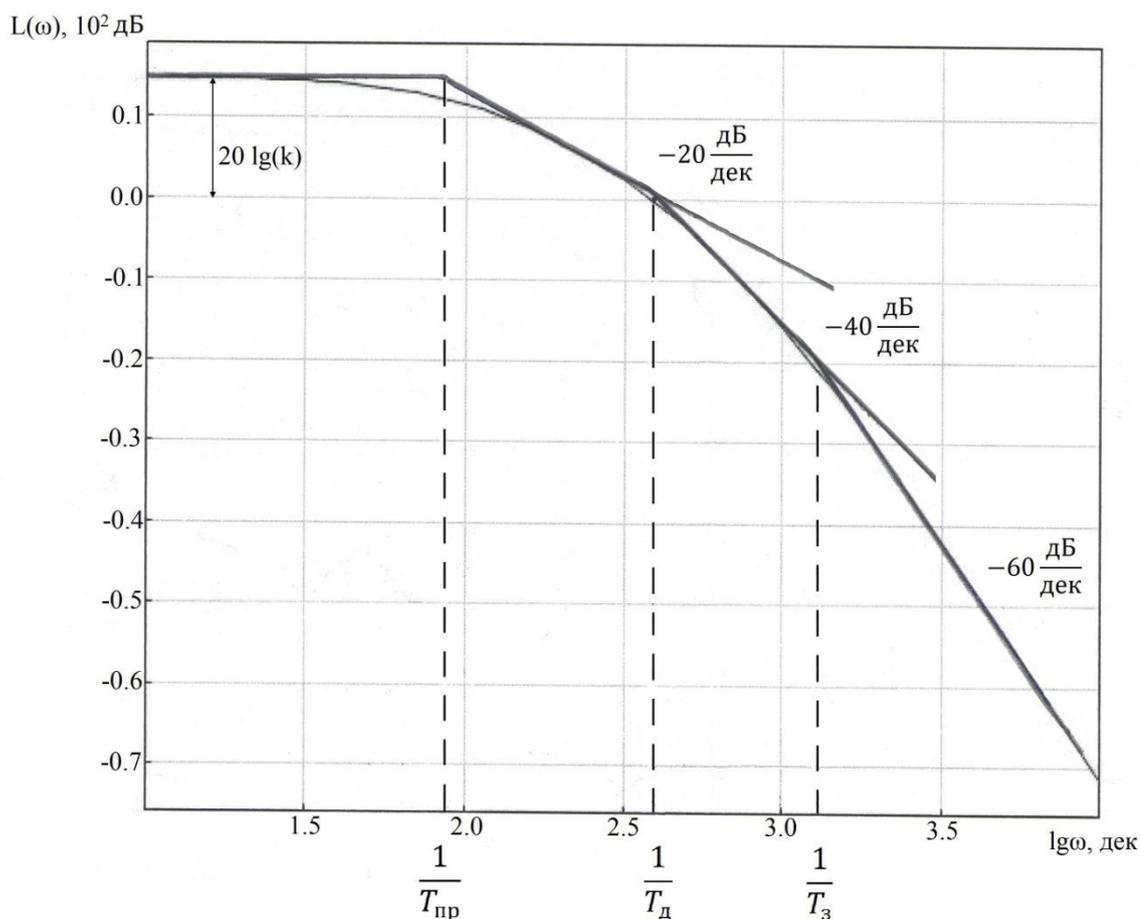


Рисунок 26 – Асимптотическая ЛАЧХ системы

На рисунке 26 пунктирами показаны частоты сопряжения асимптотических составляющих ЛАЧХ. Индексы постоянных времени T соответствуют тем, что были указаны на упрощенной структурной схеме системы (рисунок 23).

Желаемую ЛАЧХ выбирают таким образом, чтобы обеспечить устойчивость и требуемое качество замкнутой системы. Вспомним типичные требования к системе управления:

- устойчивость;
- нулевая ошибка в установившемся режиме;
- быстрый и плавный переходный процесс;
- подавление шумов;
- робастность (нечувствительность к ошибкам модели).

Этим условиям соответствует ЛАЧХ, изображенная на рисунке 27.

| | | | | |
|------|------|----------|---------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
| | | | | |

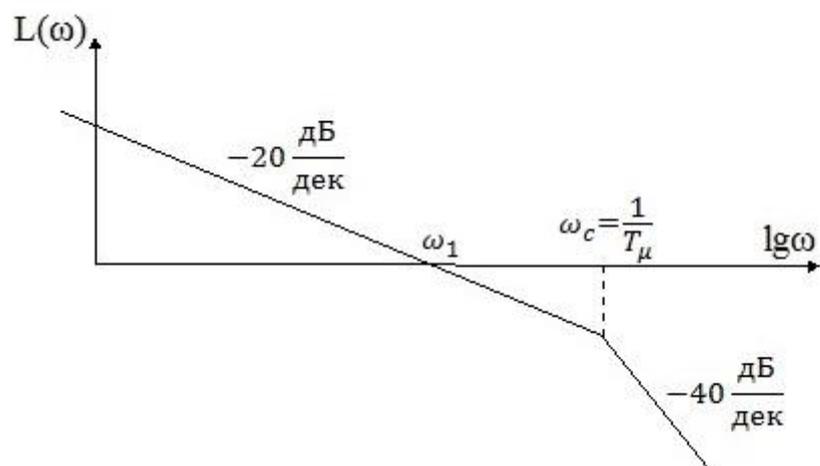


Рисунок 27 – Желаемая ЛАЧХ системы

На рисунке 27, T_μ – малая постоянная времени, связанная со временем регулирования, которая должна учитывать все малые постоянные времени настраиваемого контура.

При ступенчатом управляющем воздействии выходная величина в первый раз достигает установившегося значения через время $4.7T_\mu$, перерегулирование составляет 4.3%, а запас по фазе 63° .

Желаемая ЛАЧХ состоит из нескольких основных участков.

Низкочастотный участок, прилегающий к нулевой частоте и находящийся в бесконечности слева, определяет установившийся режим систем управления после внешних воздействий в виде скачка ступенчатой функции, поэтому в данной части желаемую ЛАЧХ выбирают, руководствуясь требованием к точности системы в установившихся режимах. Таким образом, в области низких частот, ЛАЧХ имеет наклон минус 20 дБ/дек, тем самым обеспечивая нулевую статическую ошибку.

Устойчивость и качество переходного процесса определяются формой ЛАЧХ в районе частоты единичного усиления

$$\omega_1 = \frac{1}{2T_\mu}, \quad (24)$$

где она пересекает ось $L(\omega)=0$; эта область называется областью средних частот. Для получения качественного переходного процесса желательно, чтобы наклон ЛАЧХ около частоты среза был равен минус 20 дБ/дек.

На высоких частотах осуществляется переход ЛАЧХ от минус 20 до минус 40 дБ/дек на частоте сопряжения

$$\omega_c = \frac{1}{T_\mu}. \quad (25)$$

Передаточная функция классического ПИД-регулятора имеет вид

$$W_{PID}(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p \right), \quad (26)$$

где K_p – передаточный коэффициент;

T_i – постоянная времени интегрирования;

T_d – постоянная времени дифференцирования.

В нашей работе мы говорили о том, что ПИД-регулятор имеет три составляющие. Пропорциональная составляющая вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения, наблюдаемому в данный момент времени. Для устранения статической ошибки используют интегральную составляющую. Дифференциальная составляющая противодействует предполагаемым отклонениям регулируемой величины, которые могут произойти в будущем. Для корректировки системы мы будем использовать все три составляющие.

При выборе коэффициентов регулятора, вычислений не требуется, так как по желаемой ЛАЧХ и ЛАЧХ нескорректированной системы можно графически найти необходимые величины (рисунок 28).

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 60 |

$$\omega_c = \frac{1}{T_3}, \quad (27)$$

и делим ее пополам. Тем самым, определяем частоту единичного усиления ω_1 . Необходимо отметить значение данной частоты на ЛАЧХ нескорректированной системы (рисунок 29).

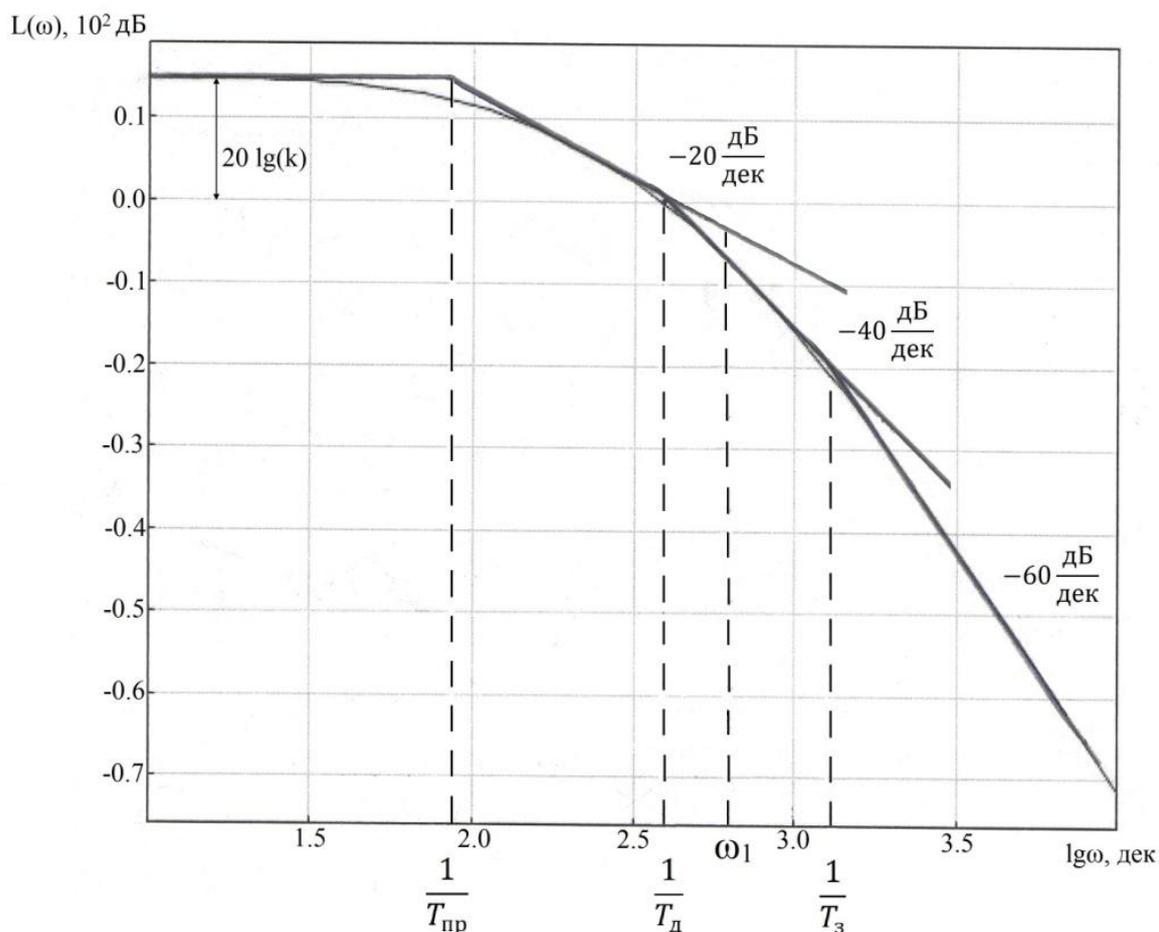


Рисунок 29 – ЛАЧХ нескорректированной системы

По рисунку 29 определяем, что $\omega_1 \approx 630.957$ рад/с. Для того чтобы асимптота ЛАЧХ нескорректированной системы минус 20 дБ/дек на частоте единичного усиления находилась на оси $L(\omega)=0$, необходимо поднять ее на 3.3 дБ.

Параметры регулятора получились следующими:

- $T_i \approx 0.01$ с;

- $T_d \approx 0.002$ с;
- $K_p \approx 1.46$.

В нашей модели присутствует нелинейный блок, располагающийся перед блоком, описывающим привод положения золотника. По этой причине алгоритм коррекции ЛАЧХ усложняется. Значения параметров ПИД-регулятора, полученные нами в ходе коррекции, не являются оптимальными, так как переходная характеристика не соответствует заданным требованиям.

Таким образом, производим ручную настройку ПИД-регулятора. Настройку выполняем на основе правил, которые используются для ручной настройки. Эти правила получены из опыта, теоретического анализа и численных экспериментов. Они сводятся к следующему:

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

Получаем следующие параметры регулятора:

- $T_i \approx 0.018$ с;
- $T_d \approx 0.0015$ с;
- $K_p \approx 1.4$ с.

ЛАЧХ и ФЧХ скорректированной системы автоматического регулирования давления представлены на рисунке 30.

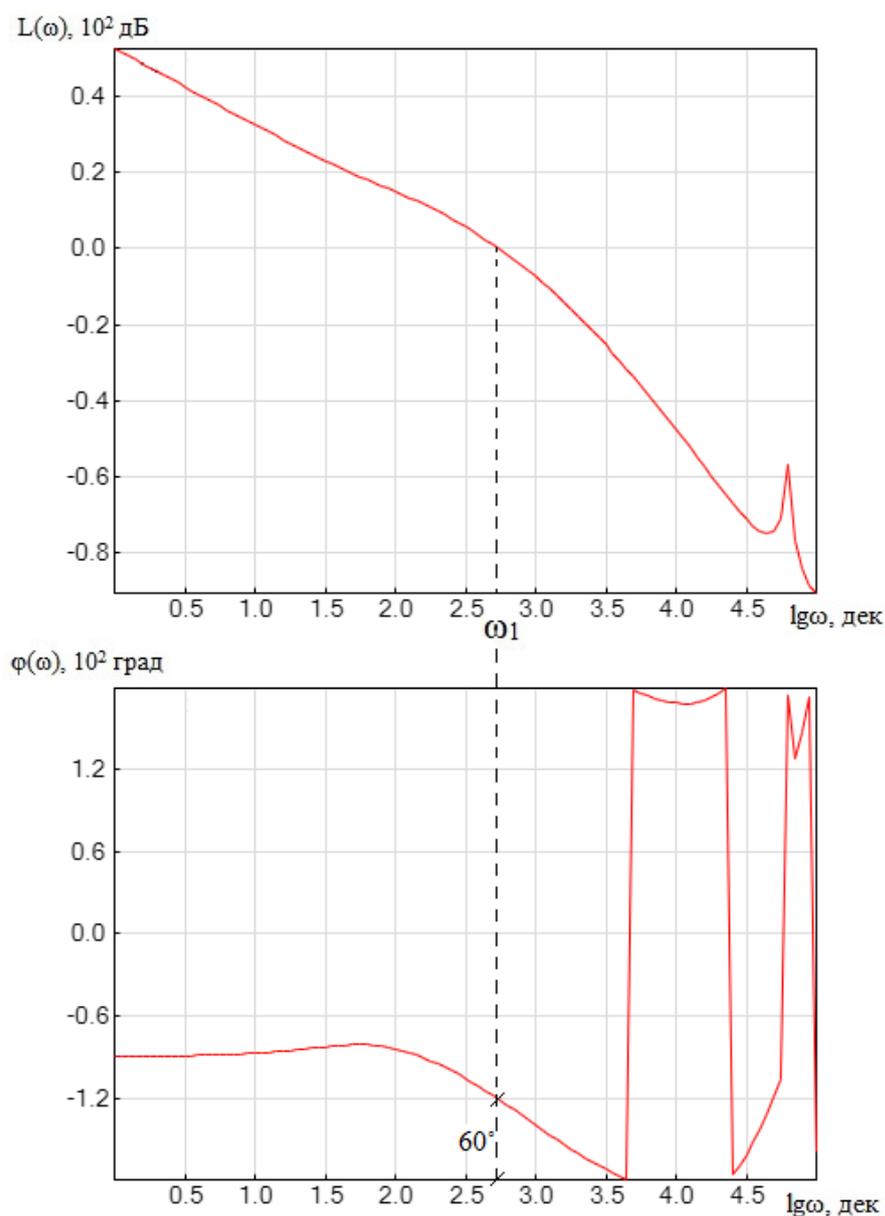


Рисунок 30 – АЧХ и ФЧХ скорректированной системы

По рисунку определяем, что частота $\omega_1 \approx 562.341 \text{ рад/с}$, запас по фазе 60° . Данные показатели удовлетворяют требованиям, которые были выдвинуты перед корректировкой системы регулирования.

2.2.6 Результаты моделирования и их интерпретация

При подаче на вход модели прямоугольного тестового сигнала, на выходе получаем реакцию эталонного датчика давления (рисунок 31).

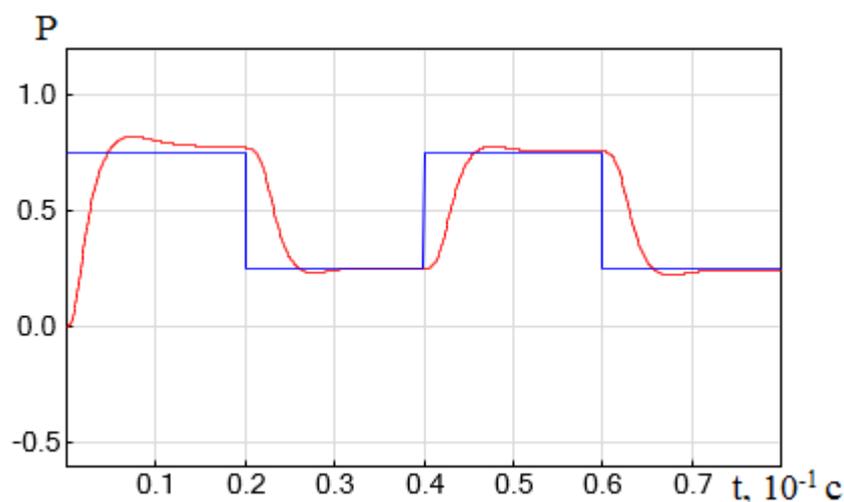


Рисунок 31 – Реакция системы на входной ступенчатый сигнал

По рисунку 31 определим качество переходного процесса. Критериев качества регулирования множество. Мы будем определять следующие:

- перерегулирование σ – это превышение первого выброса над установившимся значением переменной, обычно выражается в процентах от установившегося значения.
- время нарастания t_n – это интервал времени, в течение которого выходная переменная нарастает от 10 до 90% от своего установившегося значения;
- время регулирования (или установления) t_p с заданной погрешностью Δ – это время, по истечении которого погрешность регулирования не превышает заданного значения Δ , обычно 5%;

Для определения данных критериев, увеличим изображение реакции датчика на сигнал (рисунок 32).

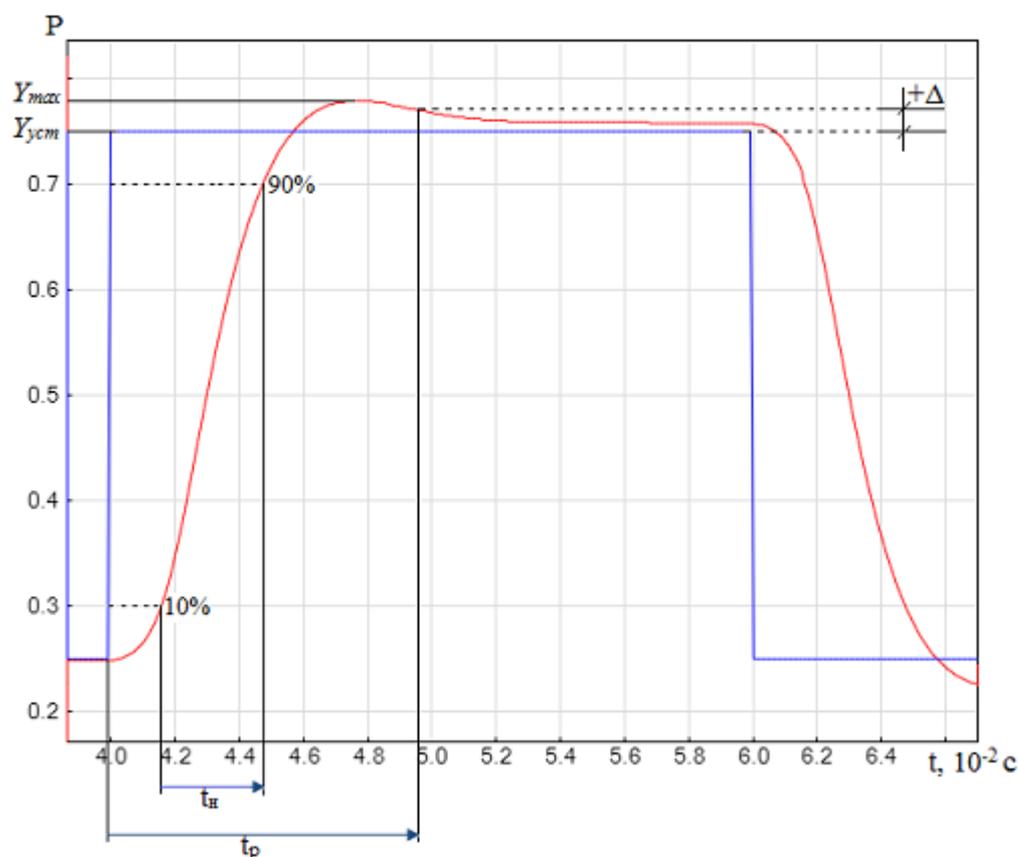


Рисунок 32 – Расчет параметров переходного процесса

По рисунку 32 определим показатели переходного процесса.

Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{Y_{\max} - Y_{уст}}{Y_{уст}} 100\% = \frac{0.78 - 0.75}{0.75} 100\% = 4\%. \quad (28)$$

где Y_{\max} – максимальное значение выходного сигнала;

$Y_{уст}$ – установившееся значение входного сигнала;

Время нарастания $t_{\text{н}} = 0.0026$ с.

Для нахождения времени регулирования (времени переходного процесса) по управляющему воздействию необходимо построить 5% трубку относительно установившегося значения после управляющего воздействия. Взять промежуток

времени от начала воздействия до начала вхождения переходного процесса в эту трубку. Таким образом, $t_p = 0.00953$ с.

Реакция системы на входной гармонический сигнал представлена на рисунке 33.

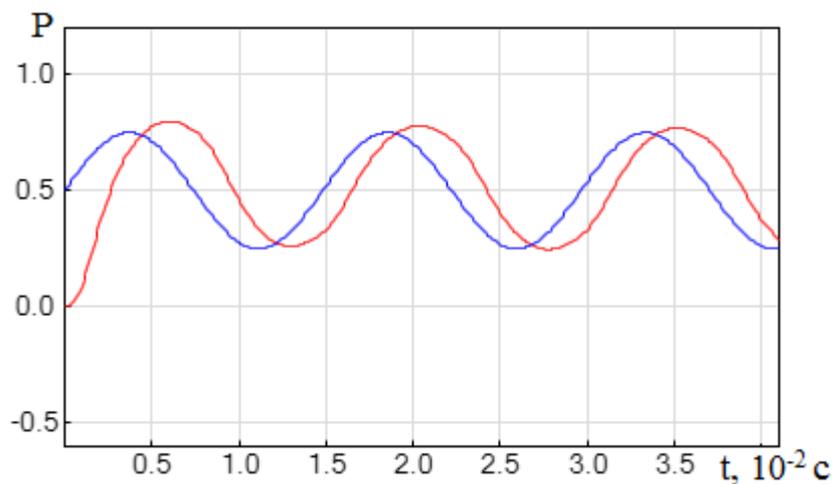


Рисунок 33 – Реакция системы на гармонический сигнал

Увеличим рисунок 33 для того, чтобы оценить выходной сигнал системы (рисунок 34).

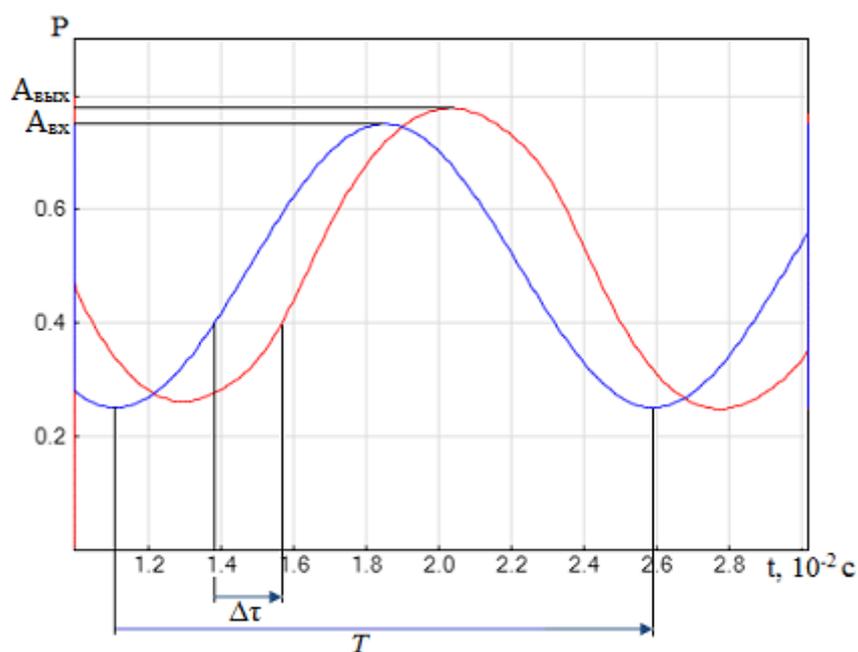


Рисунок 34 – Реакция системы на гармонический сигнал

Определим амплитудно-фазовые искажения обработки входного сигнала. Амплитудные искажения определяются по формуле

$$A_{\text{иск}} = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{A_{\text{ВХ}}} = \frac{0.78}{0.75} = 1.04, \quad (29)$$

где $A_{\text{ВЫХ}}$ – амплитуда выходного сигнала;

$A_{\text{ВХ}}$ – амплитуда входного сигнала.

Фазовые искажения определяются по формуле 30:

$$\varphi_{\text{иск}} = \frac{\Delta\tau}{T} 360^\circ = \frac{0.002}{0.0149} 360^\circ = 48^\circ, \quad (30)$$

где $\Delta\tau$ – временной сдвиг (разница между входным и выходным сигналом);

T – период входного сигнала.

После упрощения структурной схемы, подаем входной прямоугольный сигнал на вход математической модели и фиксируем результаты. Реакция эталонного датчика давления на входной ступенчатый сигнал после изменения математической модели представлена на рисунке 35.

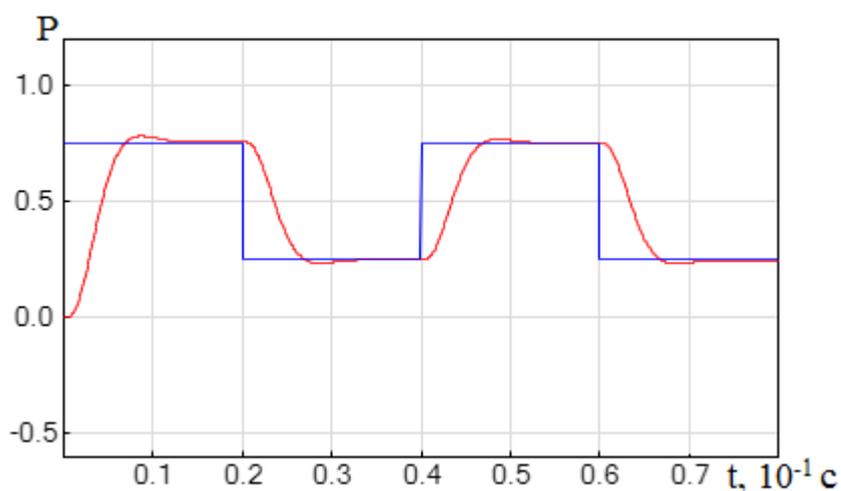


Рисунок 35 – Реакция системы на прямоугольный сигнал

Оценим качество переходного процесса по тем же правилам, по которым производилась оценка до упрощения модели:

- перерегулирование $\sigma = 2.67\%$;
- время нарастания $t_n = 0.0032$ с;
- время регулирования $t_p = 0.0087$ с.

Реакция системы на входной гармонический сигнал после упрощения модели представлена на рисунке 36.

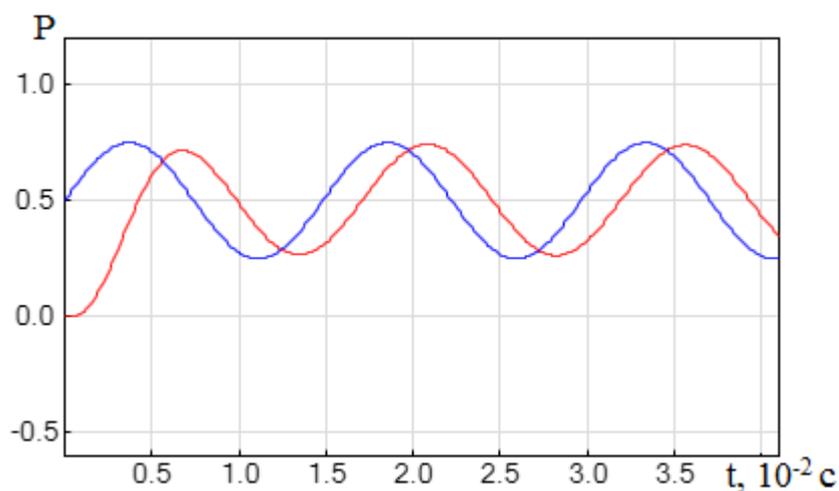


Рисунок 36 – Реакция системы на гармонический сигнал

Параметры переходного процесса:

- амплитудные искажения $A_{иск} = 0.99$;
- фазовые искажения $\varphi_{иск} = 53.3^\circ$.

3 РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ

3.1 Принципиальная электрическая схема управления системой регулирования давления

3.1.1 Разработка импульсного и линейного стабилизаторов

После разработки математической модели производится выбор принципиальной электрической схемы управления системой. Далее приведено более подробное описание принципиальной схемы.

Функционально электрическая схема включает в себя следующие элементы:

- импульсный стабилизатор;
- линейный стабилизатор;
- асинхронный интерфейс последовательной передачи данных RS-485;
- микропроцессор;
- интерфейс прошивки микропроцессора и отладки кода;
- усилители входного и выходного сигналов.

Для преобразования напряжения одного уровня в напряжение другого уровня часто применяют импульсные преобразователи напряжения с использованием индуктивных накопителей энергии. Такие преобразователи отличаются высоким КПД, иногда достигающим 95%, и обладают возможностью получения повышенного, пониженного или инвертированного выходного напряжения.

Импульсный стабилизатор напряжения представляет собой систему автоматического регулирования. Возможно два варианта регулирования выходного напряжения:

- Путем управления продолжительностью импульсов и пауз между ними (принцип широтно-импульсной модуляции);
- Путем сравнения выходящего напряжения с минимально и максимально допустимыми значениями. Если оно выше максимального, то накопитель

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 70 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

перестает накапливать энергию и разряжается. Тогда на выводе напряжение становится меньше минимального. При этом накопитель снова начинает работать (принцип двухпозиционного управления).

В импульсных стабилизаторах силовой элемент работает в дискретном (ключевом) режиме. Таким образом, передача энергии от первичного источника в нагрузку происходит в виде пакетов импульсов. Свойство дросселей накапливать энергию в виде магнитных полей, а конденсаторов – в виде электрического заряда используется для сглаживания пульсаций выходного напряжения, обычно имеющего исходно форму прямоугольных импульсов [17].

Часто силовой элемент представляется импульсным DC/DC преобразователем, с помощью которого можно регулировать напряжение на нагрузке и даже получать отрицательное выходное напряжение, что невозможно при использовании обычных (линейных) регуляторов напряжения. Одна из наиболее перспективных областей применения таких преобразователей – создание распределённых систем электропитания, для чего он и реализуется в нашей электрической схеме.

Используемый в нашей схеме понижающий преобразователь содержит коммутирующий элемент MC33063ADE4, индуктивный накопитель энергии L1, необходимый для обеспечения постоянства тока в нагрузке при её импульсной коммутации, выходной конденсатор C23. Диод D1 является блокировочным. Он обеспечивает протекание тока через индуктивность при запертом выходном ключе. Для снижения потерь на диоде и устранения эффекта обратного восстановления используем диод Шоттки.

При закрытом силовом ключе ток индуктора линейно нарастает. Он течёт через нагрузку и выходной конденсатор C23. Когда напряжение на нём достигает порога регулирования блока широтно-импульсной модуляции (ШИМ), реализованного внутри коммутирующего элемента, ключ разрывает цепь. При открытом ключе ток в цепи нагрузки не прекращается, поскольку в работу вступает диод D1, предотвращающий разрыв цепи. Энергия, запасённая в

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 71 |

индуктивности, «перекачивается» в нагрузку. Ток индуктора начинает линейно падать. Когда напряжение на конденсаторе С23 становится равным нижнему порогу регулирования блока ШИМ, ключ закрывается и цикл повторяется.

Импульсный стабилизатор напряжения является источником высокочастотных помех в связи с тем, что содержит ключи, коммутирующие ток. Поэтому в моменты коммутации возникают довольно значительные броски напряжения и тока, порождающие помехи, как на входе, так и на выходе стабилизатора, причём помехи и противофазные, и синфазные. Поэтому фильтры для подавления помех устанавливаются как на входе, так и на выходе стабилизатора (элементы С24, С25, L2, R24). Конденсаторы С24 и С25 являются электролитическими, используются для обеспечения устойчивости и стабильности схемы.

На выходе импульсного стабилизатора имеем выводы питания цифровой и аналоговой части элементов электрической схемы. Питание составляет 5 В. Но так как большинство элементов требуют меньшего напряжения питания, реализуем в схеме линейный стабилизатор напряжения.

Линейный стабилизатор представляет делитель, в который подается неустойчивое напряжение. Выходит оно уже выравненное, со стабильными характеристиками. Принцип работы заключается в постоянном изменении сопротивления для поддержания на выводе постоянного вольтажа [19]. Для этого были применены два регулятора напряжения МСР1700Т-3302ЕТТ. На выходе стабилизатора также имеем возможность цифрового и аналогового питания элементов. Микросхема МС78М12СDТRК является линейным стабилизатором и используется нами для преобразования входного напряжения 24 В в выходное напряжение 12 В. Схема исполнения стабилизаторов представлена на рисунке 37.

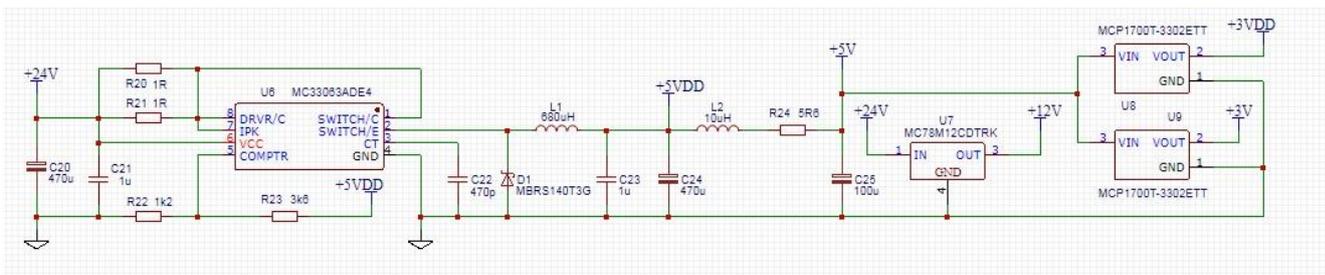


Рисунок 37 – Импульсный и линейный стабилизаторы

3.1.2 Асинхронный интерфейс последовательной передачи данных RS-485

Для подключения схемы к компьютеру предусмотрен асинхронный интерфейс последовательной передачи данных RS-485. Интерфейс RS-485 – один из наиболее распространенных стандартов физического уровня связи. Физический уровень — это канал связи и способ передачи сигнала. Сеть, построенная на интерфейсе RS-485, представляет собой приемопередатчики, соединенные при помощи витой пары — двух скрученных проводов. В основе интерфейса RS-485 лежит принцип дифференциальной (балансной) передачи данных. Суть его заключается в передаче одного сигнала по двум проводам. Причем по одному проводу идет оригинальный сигнал, а по-другому — его инверсная копия [18].

Аппаратная реализация интерфейса — микросхемы приемопередатчиков с дифференциальными входами/выходами (к линии) и цифровыми портами (к портам UART контроллера). В комплекте применена микросхема приемопередатчика ADM2582E в полудуплексном включении, имеющая гальваническую развязку и встроенный, включая трансформатор, DC/DC конвертер. Перед питанием микросхемы реализован линейный стабилизатор MCP1700T-3302ETT. Конденсаторы C12 — C19 являются составной частью внутреннего преобразователя напряжения микросхемы, обеспечивающей гальваническую развязку. Асинхронный интерфейс показан на рисунке 38.

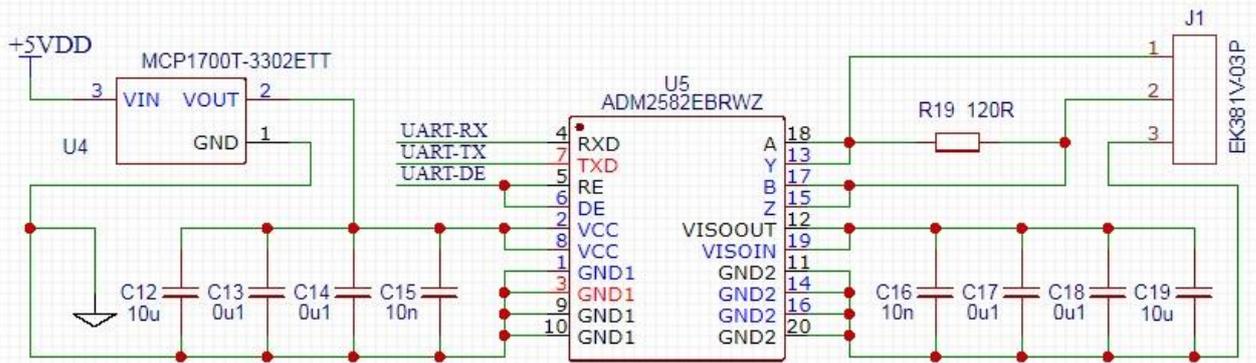


Рисунок 38 – Асинхронный интерфейс последовательной передачи данных

Предполагается, что со стороны компьютера будет использован преобразователь интерфейсов USB/ RS-485 без гальванической развязки. Данный конвертер позволяет подключать оборудование с интерфейсом RS-485 к USB порту компьютера или ноутбука. Для подключения конвертера к схеме используем клеммник ЕК381V-03P.

3.1.3 Подключение микроконтроллера STM32F303 к схеме

В схеме используется микроконтроллер STM32F303CBT6. Как было сказано ранее, мы используем раздельное питание аналоговой и цифровой части микроконтроллера. Схема питания представлена на рисунке 39.

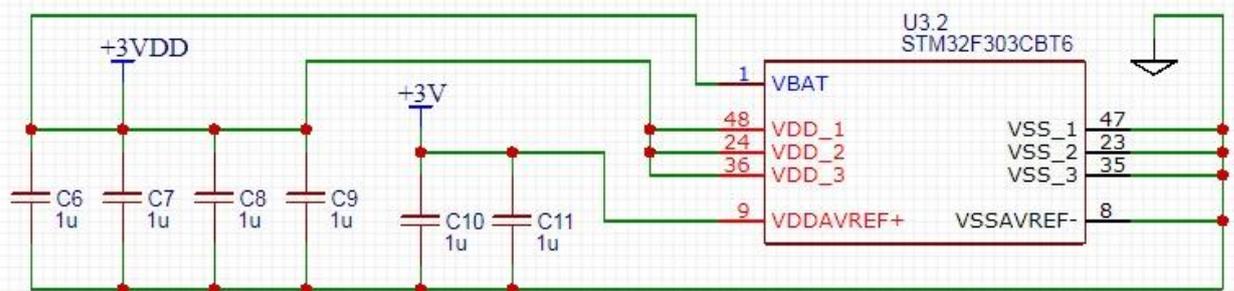


Рисунок 39 – Схема питания микроконтроллера

Конденсаторы С6 – С11 подключены к выводам питания микроконтроллера для выравнивания скачков напряжения. Сам микроконтроллер показан на рисунке 40.

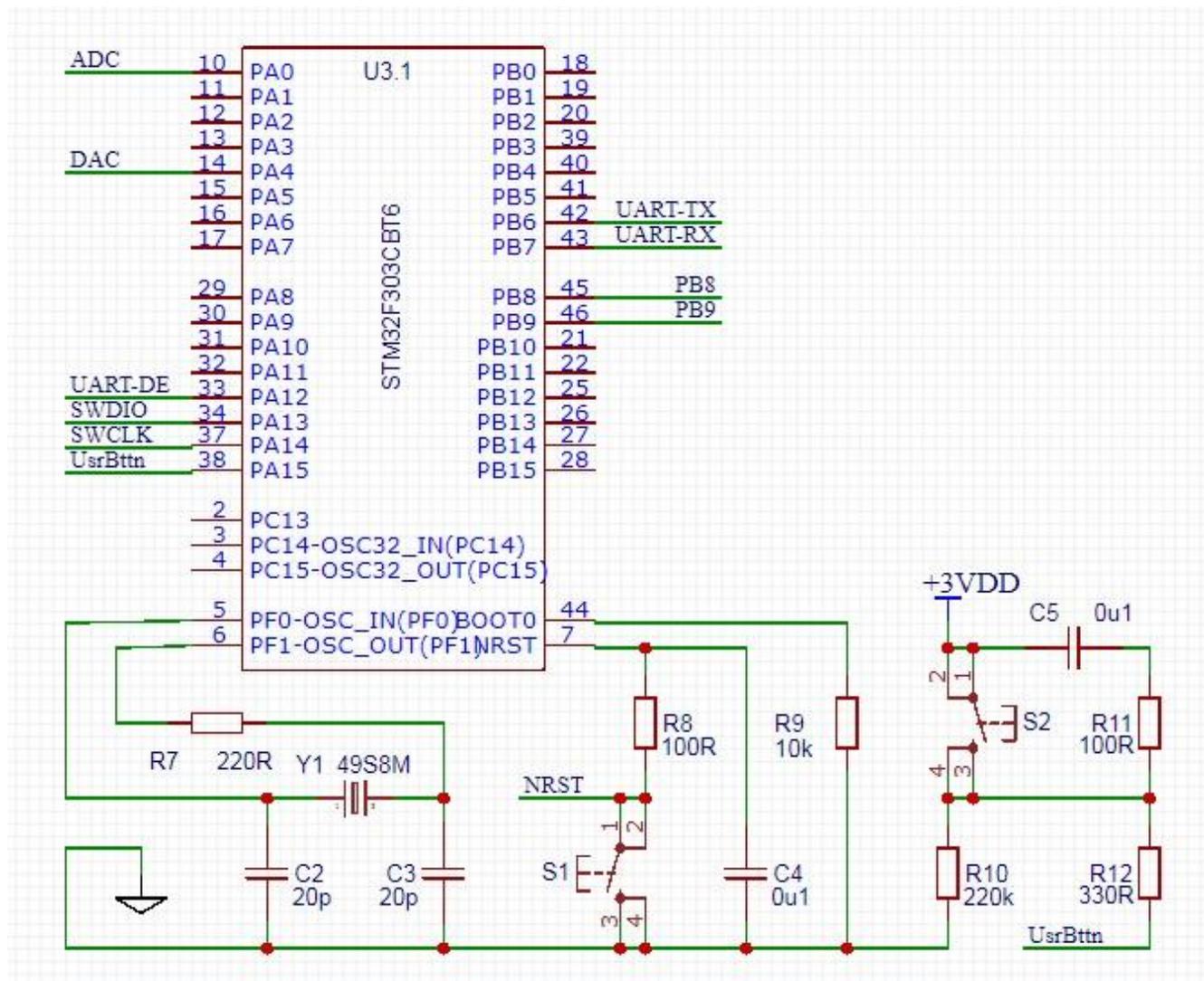


Рисунок 40 – Микроконтроллер STM32F303CBT6

Здесь Y1 – кварцевый резонатор, используемый для задания тактовой частоты. Элементы C2, C3 и R7 являются составными элементами тактового генератора. Тактовый генератор это своего рода сердце микроконтроллера. По каждому "тику" или импульсу тактового генератора происходит какая-нибудь операция – передаются какие-либо данные по шинам и регистрам, работают таймеры,

переключаются порты ввода/вывода. Чем больше тактовая частота, тем больше энергии нужно микроконтроллеру [21].

Для процесса прошивки микроконтроллера в схеме реализованы тактовые кнопки пользователя S2 и сброса микропроцессора S1 (RESET).

Кнопка RESET используется в процессе разработки устройства для сброса микроконтроллера в начальное состояние. При отладке устройства очень полезно иметь возможность выполнения сброса, чтобы обеспечить повторный запуск микроконтроллера. При включении схемы конденсатор C4 разряжен и напряжение на NRST близко к нулю – микроконтроллер не стартует. Но со временем конденсатор заряжается и напряжение на NRST достигнет логической единицы – микроконтроллер запускается. Кнопка S1 разряжает конденсатор и происходит перезапуск микроконтроллера.

Кнопка S2 является кнопкой пользователя, предназначенной для чередования режимов прописываемых в микроконтроллер программ. Работает она по такому же принципу, как и кнопка сброса. В тот момент, когда S2 отжата, через резисторы R11 и R10 происходит заряд конденсатора. При этом на входе, к которому подключена кнопка, высокий уровень напряжения. При нажатии кнопки, происходит разряд конденсатора C5 через резистор R11. Напряжение на выводе становится равным нулю. Резистор R12 является внешним подтягивающим резистором. Он удерживает вход в состоянии логической единицы, пока внешняя цепь разомкнута.

Вывод BOOT0 микроконтроллера предназначен для управления загрузкой. Так как в нашем устройстве он не используется, деактивируем его через резистор R9 на землю.

Рядом с микропроцессором показан SWD-разъем P1 интерфейса прошивки микропроцессора и отладки кода с последовательным доступом. Для облегчения процесса отладки предусмотрены два светодиода LED1 и LED2 (рисунок 41).

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 76 |

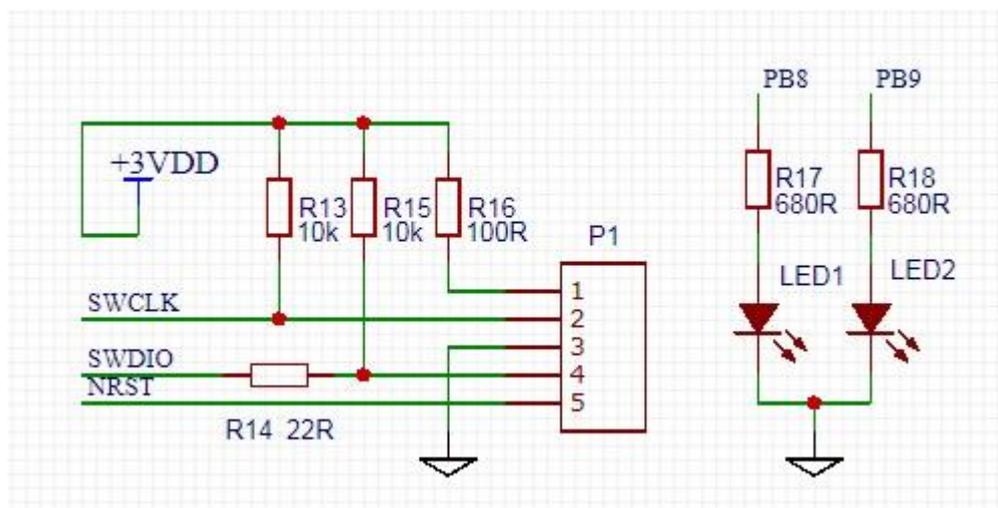


Рисунок 41 – Интерфейс прошивки микроконтроллера

Для светодиодов выбираем схему подключения порт – земля. Для того чтобы зажечь светодиод, нужно на вывод, к которому подключили светодиод, подать высокий уровень напряжения (логическую единицу). Для того чтобы ограничить ток через светодиод, подключаем последовательно сопротивление [20].

Для прошивки флеш-памяти процессора и отладки программного кода, инженеру необходимо иметь любую из оценочных плат с ARM-процессором и SWD-разъемом от фирмы ST Microelectronics, например, STM32F3DISCOVERY или фирменный программатор с гальванической развязкой.

3.1.4 Разработка усилителей для входных и выходных сигналов

Выходной электрический сигнал с эталонного датчика давления находится в диапазоне от 0.5 до 2.5 В. Так как АЦП микроконтроллера воспринимает сигнал от 0 до 3В, то, при поступлении сигнала с датчика давления на АЦП, происходит потеря части диапазона напряжения. Для этого используем усилитель. Усилитель представляет дифференциальное включение операционного усилителя (рисунок 42).

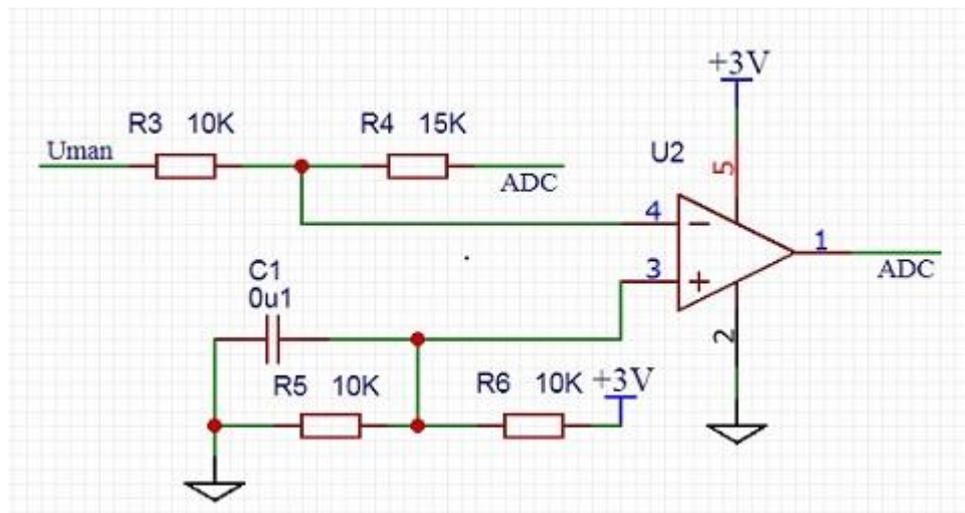


Рисунок 42 – Усилитель входного сигнала

Выходной сигнал с цифро-аналогового преобразователя микроконтроллера (ЦАП) находится в диапазоне 0–3 В, когда управляющий сигнал для сервораспределителя должен находиться в диапазоне 0–10 В. Для масштабирования выходного сигнала применен усилитель на основе неинвертирующего включения операционного усилителя (рисунок 43).

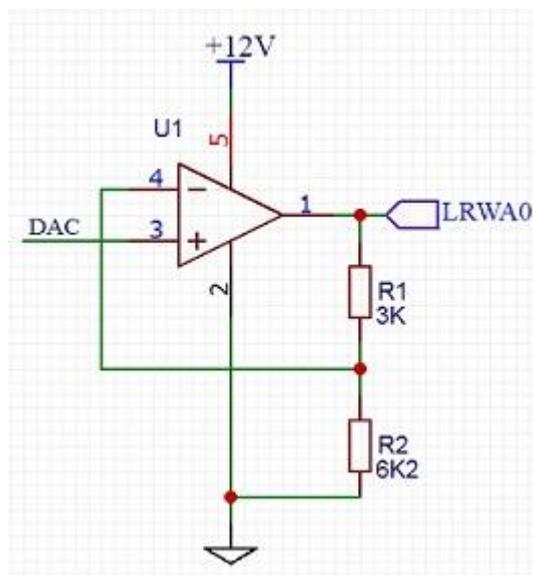


Рисунок 43 – Усилитель выходного сигнала

Схема управления системой приведена в приложении А. Перечень элементов к разрабатываемой схеме представлен в приложении Б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения ВКР был произведен анализ литературы, обзор рынка и методик, в результате которых была выявлена необходимость разработки системы автоматического регулирования давления, предназначенной для формирования давления по заданному закону с минимальной погрешностью.

Разрабатываемая система является составной частью лабораторного стенда, предназначенного для исследования динамических характеристик датчиков давления.

Для реализации поставленной цели был выбран сервораспределитель для регулирования расхода воздуха фирмы Samozzi модели LRWA0.

Была разработана функциональная и структурная схема разрабатываемой системы автоматического регулирования давления. Произведено аналитическое описание структурной схемы. С помощью методов теории автоматического управления, была произведена настройка ПИД-регулятора системы.

В моделирующей программе Jigrein была создана математическая модель системы регулирования давления; получены реакции системы на известные входные возмущающие воздействия (ступенька, гармонический сигнал); произведен анализ переходных процессов.

Параметры переходного процесса при подаче на вход ступенчатого сигнала получились следующие:

- перерегулирование $\sigma = 4\%$;
- время нарастания $t_n = 0.0026$ с;
- время регулирования $t_p = 0.00953$ с.

При подаче на вход гармонического сигнала:

- амплитудные искажения $A_{иск} = 1.04$;
- фазовые искажения $\varphi_{иск} = 48^\circ$.

В ходе аналитического описания системы, математическая модель была частично упрощена (часть модели была заменена динамическим звеном). Поэтому

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| | | | | | | 79 |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | |

был произведен анализ переходных процессов после упрощения модели. При ступенчатом сигнале: $\sigma = 2.6\%$; $t_n = 0.0032$ с; $t_p = 0.0087$ с. При гармоническом сигнале: $A_{иск} = 1.04$; $\varphi_{иск} = 53.3^\circ$.

Была разработана принципиальная электрическая схема блока управления системой автоматического регулирования давления в программе EasyEDA.

Задачи выпускной квалификационной работы решены. Поставленные цели достигнуты.

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 80 |

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – Введ. 2001-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 56 с.

2 ГОСТ 22520-85. Датчики давления, разряжения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия. – Введ. 1986-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 42 с.

3 ГОСТ 8.568-97. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. – Введ. 1997-10-10. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 23 с.

4 ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – Введ. 1986-01-01. – М.: Стандартинформ, 2000. – 31 с.

5 ГОСТ 8.256-77. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения. – Введ. 1978-30-06. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 9 с.

6 Фрайден Дж. Современные датчики: пер. с англ. / под ред. Е.Л. Свинцова. М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

7 Осадчий, Е.П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е.П. Осадчий. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.

8 Новицкий, П.В. Электрические измерения неэлектрических величин / П.В. Новицкий. – М.: Энергия, 1979. – 576 с.

9 Мокров, Е.А. Полупроводниковые пьезочувствительные элементы микроэлектронных датчиков давлений. Основы проектирования и разработки / Е.А. Мокров, И.Н. Баринов, П.Н. Цибизов. – М.: Энергия, 2009. – 304 с.

10 Бесекерский, В.А. Теория автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1966. – 125 с.

11 Иващенко, Н.И. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Н.И. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1973. – 606 с.

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 81 |

12 Алексеев, А.А. Теория управления / А.А. Алексеев, Д.Х. Имаев, Н.Н. Кузьмин. – СПб.: ЛЭТИ, 1999. – 435 с.

13 Софиева, Ю.Н. Теория автоматического управления / Ю.Н. Софиева, А.Э. Софиев. – М.: МИХМ, 1975. – 165 с.

14 Лазарева, Т.Я. Линейные системы автоматического регулирования / Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. – Тамбов: изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – 264 с.

15 Мордасов, М.М. Технические средства автоматизации. Пневматическая ветвь / М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов, А.А. Чуриков. – Тамбов: изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 111 с.

16 Шарапова, В.М. Датчики: справочное пособие / В.М. Шарапова, Е.С. Полищук. – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.

17 Хоровиц, П. Искусство схемотехники: в 2-х т. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Мир, 2008. – 592 с. – 1 т.

18 Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: в 2-х т. / У. Титце, К. Шенк. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 830 с. – 1 т.

19 Волович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств / Г.И. Волович. – М.: Додэка-XXI, 2011. – 527 с.

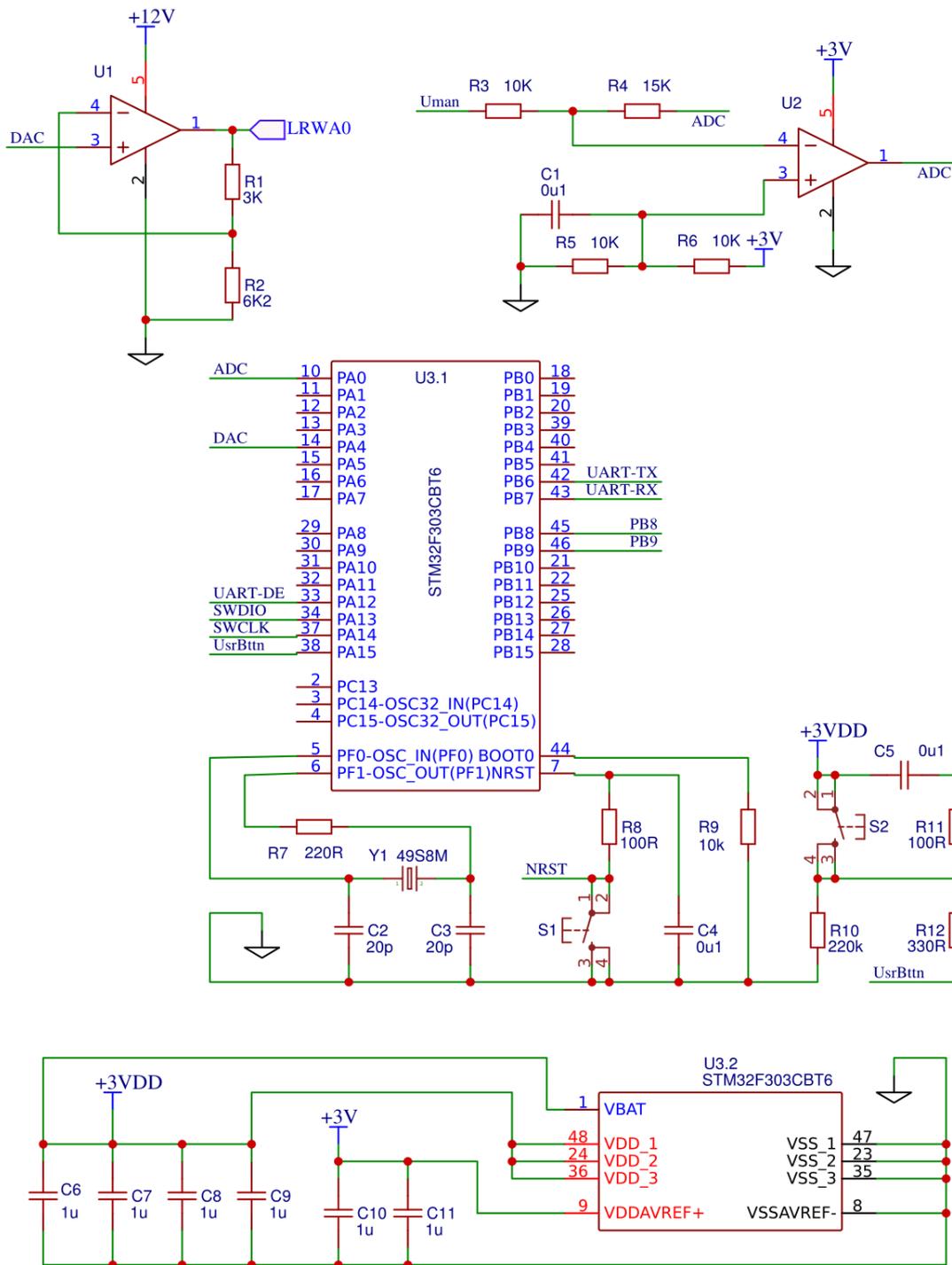
20 Водовозов, А.М. Основы электроники / А.М. Водовозов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 141 с.

21 Симаков, Г.М. Цифровые устройства и микропроцессоры в автоматизированном электроприводе / Г.М. Симаков, Ю.В. Панкрац. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2013. – 211 с.

| | | | | | | |
|------|------|---------|---------|------|----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171 ПЗ ВКР | Лист |
| Изм. | Лист | №докум. | Подпись | Дата | | 82 |

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Электрическая принципиальная схема управления системой



ЮУрГУ - 13.03.02.2018.171.ЭЗ

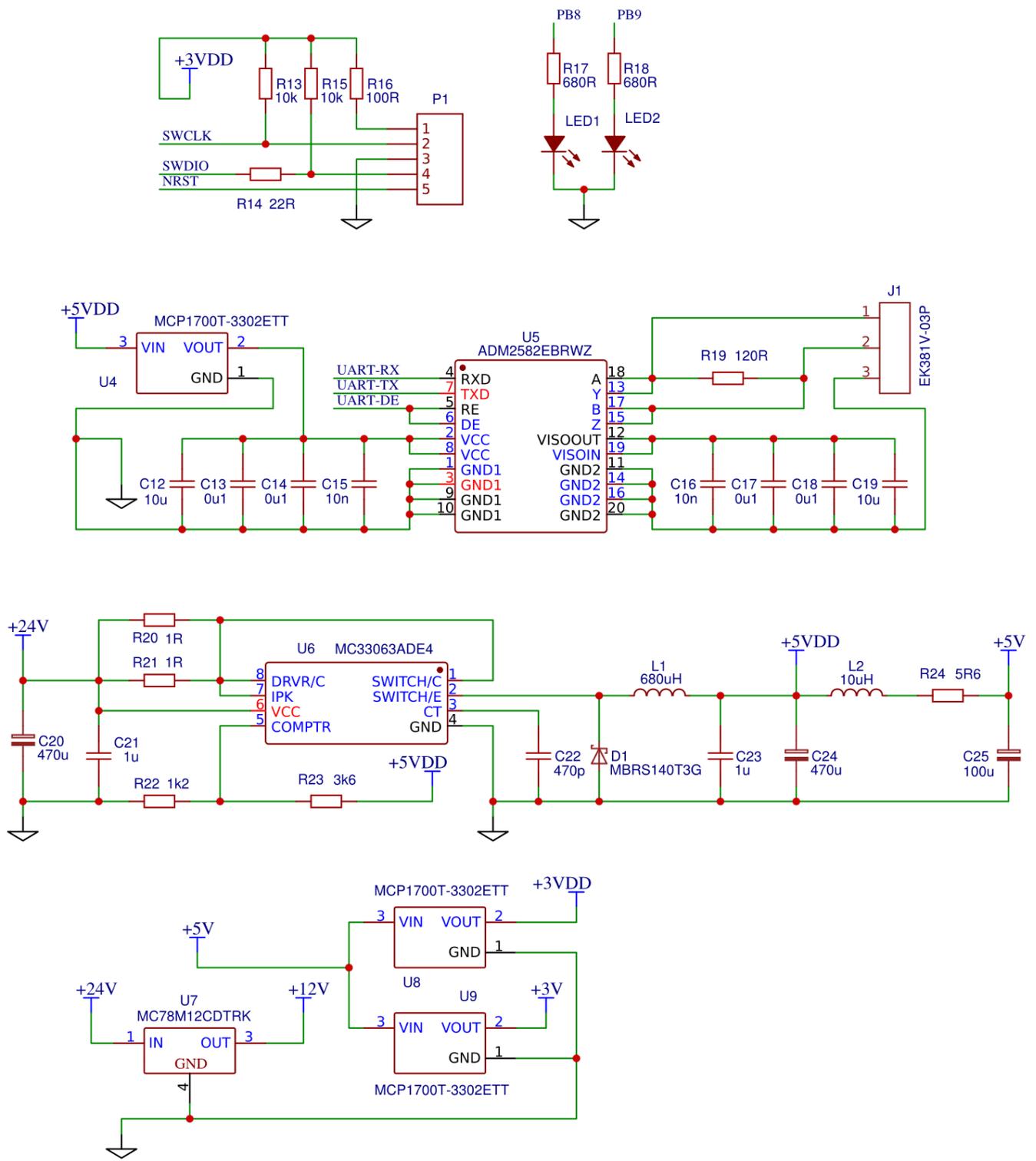
| | | | | |
|----------|------|----------|-------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | Китов | | |
| | | Клиначев | | |
| | | | | |
| Н.контр. | | Шабуров | | |
| Утв. | | Дегтярь | | |

Блок управления системой
автоматического регулирования
давления
Схема электрическая
принципиальная

| | | |
|--------|-------|----------|
| Литера | Масса | Масштаб |
| | | |
| Лист 1 | | Листов 2 |

ЮУрГУ
Кафедра ЛА

Продолжение приложения А



| | | | | | | |
|-------------|--------------|----------|--------------|----------------------------|--------------|------|
| | | | | ЮУрГУ-13.03.02.2018.171.ЭЗ | | Лист |
| | | | | | | 2 |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | |
| Инв.№ подп. | Подп. и дата | | Взам. Инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Перечень элементов

| | | | | |
|----------|--|---------------|--|--|
| Справ. № | | Перв. примен. | | |
| | | | | |

| Зона | Поз. | Наименование | Кол. | Примеч. |
|------|---------|--------------------------|------|---------|
| | | КОНДЕНСАТОРЫ | | |
| | C1 | GRM319F51H104ZA01D | 1 | 0u1 |
| | C2-C3 | MLCC20pFNPO50V5%0805 | 2 | 20p |
| | C4-C5 | GRM319F51H104ZA01D | 2 | 0u1 |
| | C6-C11 | MLCC1uFY5V50V+80-20%1206 | 6 | 1u |
| | C12 | GRM31MR61A106KE19L | 1 | 10u |
| | C13-C14 | GRM319F51H104ZA01D | 2 | 0u1 |
| | C15-C16 | GRM31MR61A106KE19L | 2 | 10u |
| | C17-C18 | GRM319F51H104ZA01D | 2 | 0u1 |
| | C19 | GRM31MR61A106KE19L | 1 | 10u |
| | C20 | ECAP470uF/35V | 1 | 470u |
| | C21 | MLCC1uFY5V50V+80-20%1206 | 1 | 1u |
| | C22 | MLCC470pFNPO50V5%1206 | 1 | 470p |
| | C23 | MLCC1uFY5V50V+80-20%1206 | 1 | 1u |
| | C24 | ECAP470uF/35V | 1 | 470u |
| | C25 | B41121A2107M000 | 1 | 100u |
| | | МИКРОСХЕМЫ | | |
| | U1 | AD822ARMZ | 1 | msop-8 |
| | U2 | ADA4841-2YRMZ | 1 | msop-8 |
| | U3 | STM32F303CBT6 | 1 | |
| | U4 | MCP1700T-3302E/TT | 1 | sot23 |
| | U5 | ADM2582EBRWZ | 1 | soic-20 |
| | U6 | MC33063ADR | 1 | so8 |

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------|--------------|------|--------------|------|---------------------------|--|--------------|--|--------|--|--|
| ЮУрГУ – 13.03.02.2018.171.ПЭЗ | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | Перечень элементов | | | | | | |
| Изм/Лист | № докум. | Подп. | Дата | Лит. | Лист | | | | | Листов | | |
| Разраб. | Китов | | | | 1 | | | | | 3 | | |
| Пров. | Клиначев | | | | | | | | | | | |
| Н.контр. | Шабуров | | | | | | | | | | | |
| Утв. | Дегтярь | | | | | | | | | | | |
| Инв.№ подп. | | Подп. и дата | | Взам. Инв. № | | Инв. № дубл. | | Подп. и дата | | | | |

Продолжение приложения Б

| Зона | Поз. | Наименование | Кол. | Примеч. |
|------|------|--------------|------|---------|
|------|------|--------------|------|---------|

| | | | | |
|--|---------|-------------------|---|---------|
| | U7 | MC78M12CDTG | 1 | драк |
| | U8-U9 | MCP1700T-3302E/TT | 2 | сот23 |
| | | ДРОССЕЛИ | | |
| | L1 | B82464G4684M | 1 | 680uH |
| | L2 | 522934659 | 1 | 10uH |
| | | РЕЗИСТОРЫ | | |
| | R1 | PCF0402-R-3K-B-T1 | 1 | 3k |
| | R2 | RC1206FR-076K2L | 1 | 6k2 |
| | R3 | RC1206FR-0710KL | 1 | 10k |
| | R4 | RC1206FR-0715KL | 1 | 15k |
| | R5-R6 | RC1206FR-0710KL | 2 | 10k |
| | R7 | RC1206FR-07220RL | 1 | 220R |
| | R8 | RC1206FR-07100RL | 1 | 100R |
| | R9 | RC1206FR-0710KL | 1 | 10k |
| | R10 | RC1206FR-07220KL | 1 | 220k |
| | R11 | RC1206FR-07100RL | 1 | 100R |
| | R12 | RC1206FR-07330RL | 1 | 330R |
| | R13 | RC1206FR-0710KL | 1 | 10k |
| | R14 | RC1206FR-0722RL | 1 | 22R |
| | R15 | RC1206FR-0710KL | 1 | 10k |
| | R16 | RC1206FR-07100RL | 1 | 100R |
| | R17-R18 | RC1206FR-07680RL | 2 | 680R |
| | R19 | RC1206FR-07120RL | 1 | 120R |
| | R20-R21 | RC1206FR-071RL | 2 | 1R |
| | R22 | RC1206FR-071K2L | 1 | 1k2 |
| | R23 | RC1206FR-073K6L | 1 | 3k6 |
| | R24 | RC0805FR-075R6L | 1 | 5R6 |
| | | ДИОДЫ | | |
| | D1 | MBRS140T3G | 1 | 403-a03 |

| | | | | | | |
|-------------|-------|--------------|--------------|--------------|------------------------------------|--------------|
| | | | | | ЮУрГУ–13.03.02.2018.171.ПЭЗ | Лист |
| | | | | | | 2 |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | |
| | | | | | | |
| Инв.№ подп. | | Подп. и дата | Взам. Инв. № | Инв. № дубл. | | Подп. и дата |

