

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

_____ А.Л. Шестаков

_____ 2019 г.

Исследование и анализ метода формирования испытательных сигналов для измерения
динамических характеристик датчиков давления

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР

Руководитель, инженер

_____ Г.М. Грудцинов

_____ 2019 г.

Автор

студент группы КЭ–225

_____ В. А. Трусов

_____ 2019 г.

Нормоконтролер, доцент

_____ А. С. Волосников

_____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

Трусов В.А. Исследование и анализ метода формирования испытательных сигналов для измерения динамических характеристик датчиков давления. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ–225, 2019, 103 с., 48 илл., 7 табл., библиогр. список – 51 наим.

В данной выпускной квалификационной работе проведен анализ устройств формирования пульсирующего давления. Был выделен метод на основе электропневмоклапанов. Впоследствии разработан алгоритм формирования пульсирующего давления с использованием клапанов Matrix 860 series. После моделирования данного алгоритма выяснили, что он позволяет формировать выходной сигнал с частотой до 70 Гц, средним давлением до 400 кПа, амплитудой пульсаций до 30 % и максимальной погрешностью до 10 %.

Затем была проведена проверка корректности работы модели алгоритма, путем сравнения результатов полученных экспериментальным путем на стенде с клапанами SMC SX10 которые установлены в нем на данный момент и моделью алгоритма с параметрами этого же стенда. После сравнения выяснили, что модель работает корректно.

| | | | | | | | | |
|-----------|-----------------|----------|-------|------|---|-----------------------|------|--------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | | | |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | | | |
| Разраб. | В.А. Трусов | | | | Исследование и анализ метода формирования испытательных сигналов для измерения динамических характеристик датчиков давления | Лит. | Лист | Листов |
| Пров. | Г.М. Грудцинов | | | | | | 4 | 103 |
| Н. Контр. | А.С. Волосников | | | | | ЮУрГУ Кафедра ИнИТ | | |
| Утв. | А.Л. Шестаков | | | | | | | |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 6 |
| 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР | 9 |
| 1.1 Требования, предъявляемые к методу | 9 |
| 1.2 Методы формирования испытательных сигналов..... | 10 |
| 1.3 Достоинства и недостатки методов | 41 |
| 1.3.1 Форма выходного сигнала | 42 |
| 1.3.2 Энергопотребление | 43 |
| 2 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРО- ПНЕВМО-КЛАПАНОВ | 45 |
| 2.1 Описание и анализ алгоритма управления клапанами в ДИС | 46 |
| 2.2 Выбор элементной базы для стенда..... | 51 |
| 2.3 Корректировка алгоритма управления стендом | 58 |
| 3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДА..... | 68 |
| 3.1 Настройка регулятора на основе метода Циглера-Никольса | 69 |
| 3.2 Настройка регулятора на основе метода Кохен-Куна | 70 |
| 3.3 Настройка регулятора на основе метода Чиена-Хронеса-Ресвика | 71 |
| 3.4 Настройки регулятора на основе метода Такахаша..... | 71 |
| 3.5 Схема регулирования | 73 |
| 4 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДА | 89 |
| 4.1 Состав стенда | 89 |
| 4.2 Экспериментальные исследования | 90 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 97 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 99 |

ВВЕДЕНИЕ

Большинство задач, решаемых при измерении давления жидкости и газа, можно разделить на две основные группы: коммерческий учет расхода продукта и обеспечение контроля и управления технологическими процессами. Каждая из этих задач накладывает определенные специфические требования к характеристикам средств измерений. Так, в первом случае требуется минимизация полной погрешности измерения в квазистатическом режиме (приведенная погрешность измерения 0,1 % и меньше при времени усреднения результатов измерения от 10 до 100 сек.). Во втором случае, как правило, не требуется такая высокая точность измерения, но предъявляются более высокие требования к динамическим характеристикам средств измерения. Например, в некоторых применениях требуется обеспечить измерение мгновенного значения давления с погрешностью порядка 1 % при амплитуде пульсаций давления до 30 % на частоте десятки герц. Очевидно, в этом случае необходимо учитывать реальные динамические характеристики средства измерения.

Динамические характеристики средств измерений нормируются полными динамическими характеристиками аналоговых средств измерений и частными динамическими характеристиками [1].

Полными динамическими характеристиками в соответствии с [1] являются переходная характеристика, импульсная переходная характеристика, амплитудно-фазовая характеристика, амплитудно-частотная характеристика, совокупность амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик, передаточная функция.

К частным динамическим характеристикам аналоговых средств измерений относят любые функционалы или параметры полных динамических характеристик. Примерами таких характеристик являются время реакции t_r , коэффициент демпфирования γ_{dam} , постоянная времени T , значение амплитудно-частотной характеристики на резонансной частоте $A(\omega_0)$ [9].

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 6 |

В соответствии с ГОСТ 22520-85 [2] динамические характеристики датчиков давления должны нормироваться переходной характеристикой при скачкообразном изменении измеряемой величины, временем установления выходного сигнала при скачкообразном изменении измеряемой величины, максимальным отклонением выходного сигнала при скачкообразном изменении измеряемой величины.

Таким образом, выбор нормируемых динамических характеристик, позволяющих однозначно определить динамическую погрешность средства измерения в условиях применения, – вопрос далеко не однозначный, и, очевидно, должен решаться в соответствии или хотя бы с учетом решаемых задач и условий применения средства измерения.

Разработчики и изготовители приборов измерения давления, как правило, нормируют время установления выходного сигнала при скачкообразном изменении измеряемого параметра [3], что не всегда позволяет однозначно определить динамическую погрешность измерения и, соответственно, возможность применения датчика в заданных условиях.

С учетом вышесказанного, исследование динамических характеристик приборов измерения давления и их прогнозирование (расчет, моделирование) в процессе разработки является весьма актуальной задачей.

Целью работы является разработка метода формирования испытательных сигналов с помощью высокочастотных пневмоклапанов.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

Провести анализ существующих методов формирования пульсирующего давления.

Разработать и обосновать алгоритм формирования пульсирующего давления с помощью электро пневмоклапанов.

Провести теоретическую оценку характеристик метода.

Провести экспериментальные исследования разработанного метода.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 7 |

Научная новизна работы заключается в следующем: – Разработан метод формирования испытательных сигналов с использованием высокочастотных пневмоклапанов, с помощью которого можно будет разработать стенд, у которого в закрытом объеме формируется давление произвольной формы с частотой десятки герц.

Проведены экспериментальные исследования на оборудовании кафедры, с помощью которых были определены характеристики данного метода.

Практическая ценность работы состоит в возможности использования разработанного метода для создания стенда с помощью которого будут проводиться исследования динамических характеристик датчиков давления.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 8 |

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Целью данной главы является:

1. Сформировать требования, предъявляемые к разрабатываемому методу.
2. Рассмотреть варианты, с помощью которых возможно реализовать поставленные требования.
3. Обосновать выбранный вариант реализации метода и поставить задачи на исследования.

1.1 Требования, предъявляемые к методу

В современной промышленности, для управления технологическими процессами, необходимо постоянно контролировать величины и изменение многих физических величин. Важной отраслью измерений в промышленности является измерение давления. Высокая необходимость измерения давления в различных отраслях промышленности и в научных исследованиях вызывает необходимость применений огромного числа средств, предназначенных для измерения величины давления и/или разности давлений, различающихся по устройству, назначению и точности. Все эти приборы при производстве и эксплуатации нуждаются в регулярных поверках, калибровках и настройках. Образцовым средством измерения для датчиков давления является прибор, который называется датчиком (контроллером) давления. Устройство успешно применяется для настройки и поверки приборов измерения давления в газовой, энергетической, нефтяной, металлургической промышленности, в пищевом производстве, авиа и судостроении, автомобилестроении, жилищно-коммунальном хозяйстве [8].

Метрологическая база для обеспечения контроля и калибровки измерителей давления широко представлена датчиками (контроллерами) и калибраторами давления компаний Additel, Fluke, Wika, Метран, ЭЛИМЕТРО, Druck и других.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 9 |

Однако все эти приборы предназначены для работы в статическом режиме (время достижения заданного значения давления порядка 10 с и более). Задатчиков давления для контроля динамических характеристик средств измерения давления серийно не производится.

Целью предлагаемого проекта является разработка метода формирования входных испытательных сигналов для исследования динамических характеристик приборов измерения давления.

В соответствии с [1] для контроля полных динамических характеристик средств измерения давления требуются следующие виды испытательных входных сигналов:

- ступенчатый сигнал;
- синусоидальный сигнал;
- импульсный сигнал достаточно малой длительности;
- псевдослучайный двух- или трехуровневый сигнал.

С помощью разработанного метода, стенд должен обеспечивать формирование испытательных входных сигналов на частоте от 1 до 50 Гц.

Диапазон давления от 0 до 400 кПа с пульсациями до 30 %.

Далее рассмотрим различные варианты устройств, с помощью которых возможно сформировать данные испытательные входные сигналы.

1.2 Методы формирования испытательных сигналов

Известен способ (патент РФ №2405978, 2009) генерации пульсаций давления текучей среды, характеризующийся тем, что поток текучей среды подают под постоянным давлением на вход насоса, рабочий элемент которого, например мембрану, колеблют с заданной частотой и амплитудой нагнетания, модулированной пульсацией заданных частоты, амплитуды и формы, а на выход насоса поступает пульсирующий поток текучей среды, имеющий высокочастотную составляющую частоты нагнетания и низкочастотную

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 10 |

составляющую пульсаций, подают текучую среду в акустический фильтр, при этом фильтруют частоту нагнетания текучей среды акустическим фильтром, получая на выходе фильтра низкочастотную составляющую пульсаций текучей среды [25, 47].

Схема устройства генерации пульсаций, реализующего предлагаемый способ, показана на рисунке 1.1.

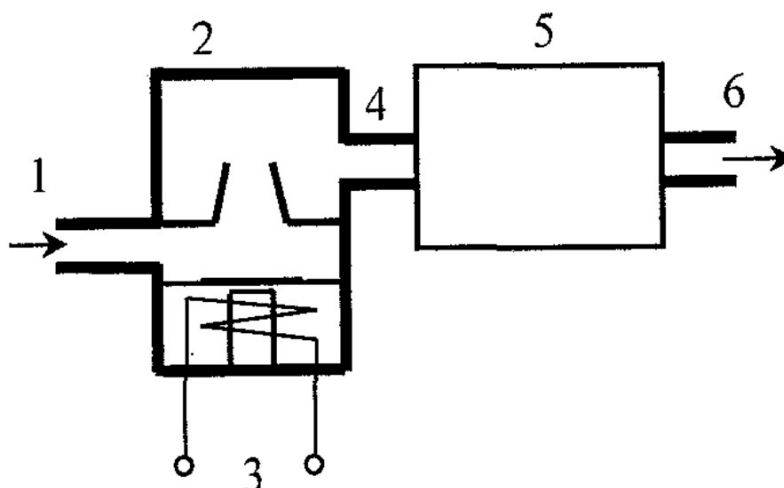


Рисунок 1.1 – Генератор пульсаций давления

Устройство содержит питающий канал 1 насоса, насос 2, на который подают управляющий сигнал 3, выходной канал 4 насоса, акустический фильтр 5 частоты нагнетания, выходной канал 6 устройства [5].

Рабочая текучая среда непрерывно самотеком подается на вход 1 насоса 2, управляемого сигналом 3 заданной частоты и амплитуды нагнетания, модулированной пульсацией заданных частоты, амплитуды и формы, и на выход 4 насоса поступает пульсирующий поток текучей среды под необходимым давлением, создаваемым насосом, имеющий высокочастотную составляющую частоты нагнетания и низкочастотную составляющую пульсаций, при переходе которого через акустический фильтр 5 на выход канала 6 поступает

пульсирующий поток текучей среды, имеющий только необходимую низкочастотную составляющую.

Проанализировав данное устройство можно сказать, что стенд на основе мембраны может сформировать сигнал с достаточным быстродействием, но для этого потребуется обеспечить частоту нагнетания на уровне 300-400 Гц [40, 43].

Далее рассмотрим установку (US 5142483 А), которая содержит последовательно соединенные газовый источник давления, регулятор, входной и выходной сервоклапаны и включенный параллельно им сервоконтроллер, выход которого соединен с контролируемым объемом и с магистралью между сервоклапанами [6].

Данный способ заключается в том, что от газового источника давления его подают через регулятор и входной сервоклапан, а также сервоконтроллер в контролируемый объем. Это приводит к тому, что в контролируемом объеме давление изменяется или «осциллирует» около среднего значения и невозможно получить точно стабильное давление, поскольку контролируемый объем всегда находится под влиянием сервоконтроллера, который постоянно подстраивается под установленную величину. Известно, что использование цифровых сигналов позволяет с большей скоростью, чем аналоговыми сигналами, управлять открыванием и закрыванием клапанов, однако этот подход требует высокоскоростных и высокомоощных входного и выходного клапанов, что приводит к высокой стоимости и большому потреблению мощности устройства.

Схема устройства представлена на рисунке 1.2.

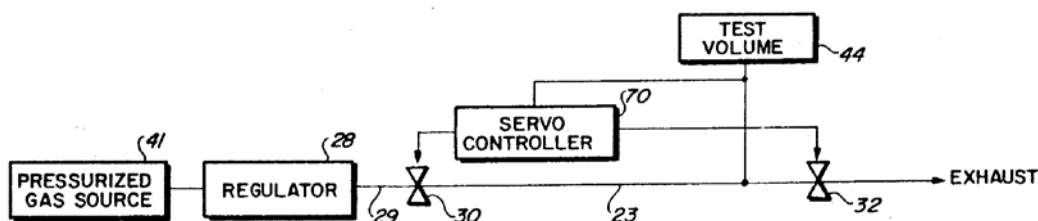


Рисунок 1.2 – Схема

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

На рисунке 1.2 показан источник сжатого газа 41 (который может представлять собой баллон с газом под давлением), входной регулятор 28 подающий газ на вход 29 регулятора давления, который включает в себя впускной сервоклапан 30, который подает газ в коллектор 23. Коллектор 23 связан с «тестовым объемом» 44. Коллектор 23 также связан с выпускным сервоклапаном 32, который выпускает сжатый газ из коллектора 23. Давление в коллекторе 23 может быть установлено путем правильного управления открытием и закрытием впускного клапана 30 и выпускного клапана 32. Как правило, минимальный поток газа непрерывно сбрасывается через регулятор 28 и сервоклапаны 30 и 32. Давление контролируется посредством работы сервоклапанов для регулировки расхода через объем, в котором контролируется давление [44].

Как правило, сервомеханизм 70 воспринимает давление в коллекторе 23 и контролирует действие сервоклапанов 30 и 32. Этот метод приводит к «динамическому» регулированию давления, при котором давление постоянно изменяется и корректируется с помощью сервоклапана. Кроме того, точность и скорость работы сильно зависят от величины тестового объема. Также, контроллеры предыдущего поколения имеют тенденцию потреблять большое количество газа из-за потока через испытательный объем.

Предварительные регуляторы давления типа, показанного на рисунке 1.2, имеют недостаток в том, что они «маскируют» наличие утечек в коллекторе 23, тестовом объеме 44 или любом соединительном оборудовании между ними и устройствами, которые тестируются или калибруются.

Следует понимать, что фундаментальное предположение для любого регулятора давления, используемого при испытании или калибровке устройств измерения давления, состоит в том, что давление абсолютно постоянное и стабильное по всему объему, к которому подключено контрольно измерительное и калибровочное устройства. Давление, указанное контрольно измерительным устройством, и давление, измеренное калибруемым устройством, идентично. Наличие утечки между эталонным устройством и калибруемым устройством

вызывает стабильное, но неравномерное падение давления в объеме. Для регулятора давления типа, который поддерживает постоянный поток газа через коллектор, который будет компенсировать утечку, нет способа определить наличие утечки во время работы системы. Единственный способ, с помощью которого могут быть обнаружены утечки в таких системах предварительного контроля давления, – использование внешних промышленных веществ, обнаруживающих утечку, или путем отключения контроллера и контроля давления в общем объеме для обнаружения падения или увеличения давления, что указывает на наличие утечки [45].

Известны системы регулирования давления (US 5142483 А), в которых сервоконтроллер производит аналоговые сигналы, которые управляют размером отверстия как впускных, так и выпускных отверстий клапанов с переменным диафрагменным клапаном, называемым сервоклапанами. Такие системы требуют непрерывного потока газа, что нежелательно, поскольку давление поддерживается под контролем системы сервоуправления, которая постоянно регулирует размеры отверстий впускных и выпускных сервоклапанов. Это приводит к тому, что измеренное испытательное давление изменяется или «колеблется» относительно среднего давления. Это, очевидно, не позволяет пользователю достичь абсолютно стабильного испытательного давления, потому что испытательное давление всегда находится под воздействием сервоконтроллера, который постоянно регулирует заданное значение. Однако для этого подхода требуются высокоскоростные, высокопроизводительные цифровые впускные и выпускные клапаны и очень высокая скорость работы таких клапанов. Это приводит к высокой стоимости, высокой потребляемой мощности и, возможно, к проблемам надежности клапанов [48, 49].

Далее рассмотрим устройство на основе быстродействующих электромагнитных клапанов. На рисунке 1.3 показана схема пневматического модуля данного устройства.

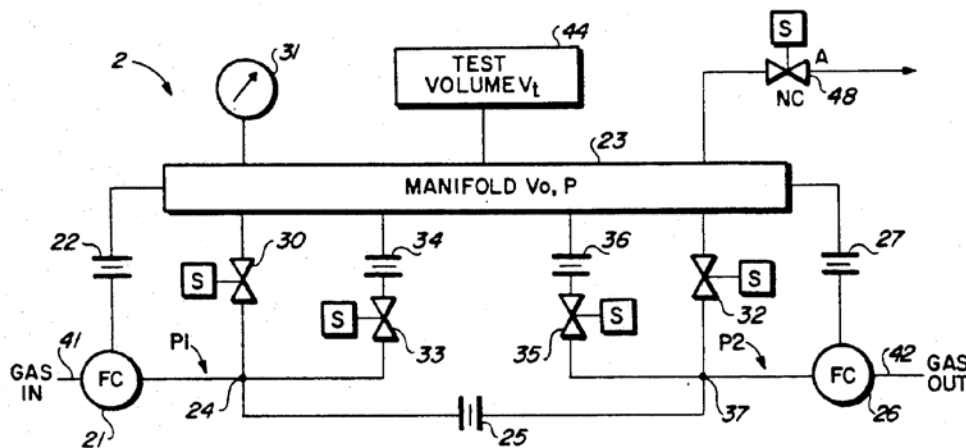


Рисунок 1.3 – Схема

Пневматический модуль встроен в контроллер 1 давления, показанный на рисунке 1.4.

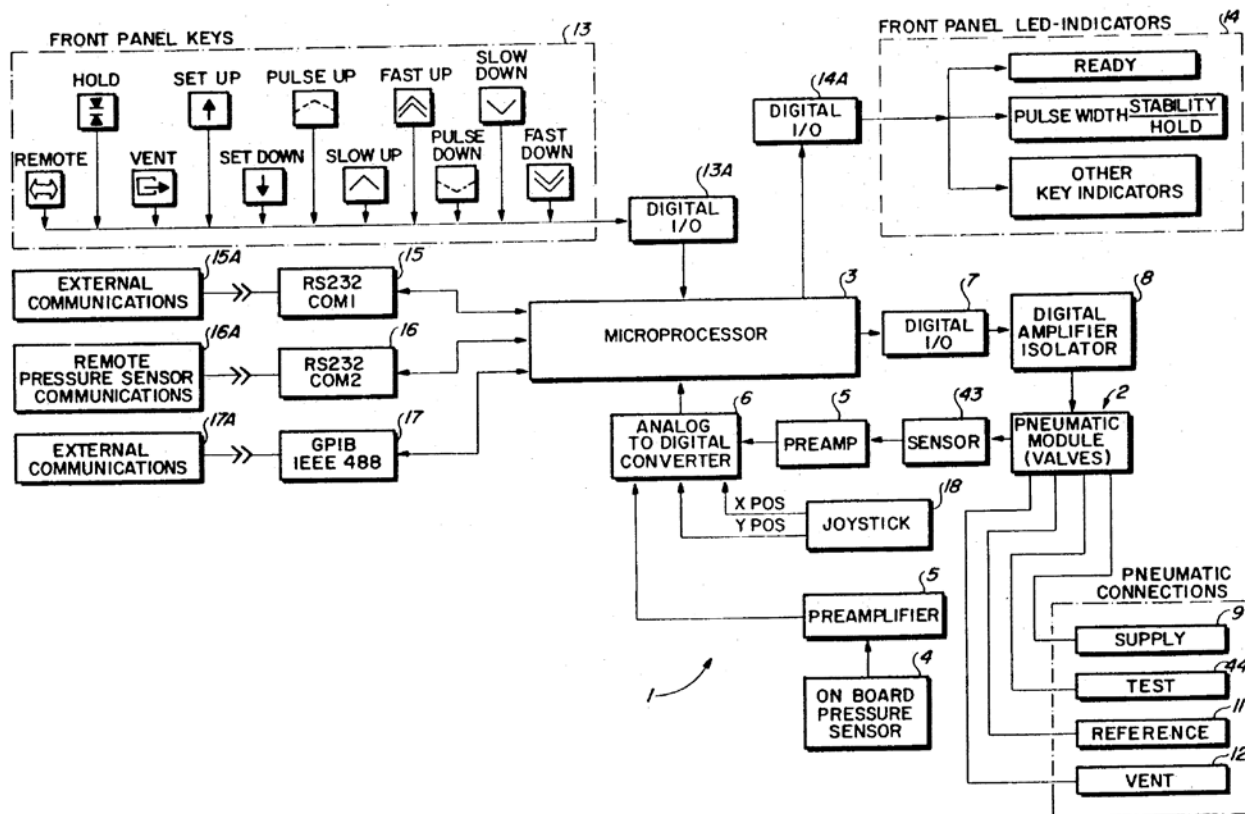


Рисунок 1.4 – Схема

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

Микропроцессор 3 принимает информацию от клавиатуры 13 через цифровой модуль 13А ввода/вывода и генерирует управляющие сигналы на электромагнитные клапаны 30, 32, 33 и 35 пневматического модуля 2 на рисунке 1.3. 30 и 32 это «быстрые» клапаны, 33 и 35 – «медленные» клапаны.

Обращаясь к рисунку 1.3, источник 41 под давлением соединен с входом впускного регулятора или регулятора потока 21, как показано цифрой 41А. Выходное отверстие впускного регулятора 21 соединено посредством «крестообразного» соединителя 24 (все 4 порта которого находятся в открытом сообщении друг с другом) к входу «электромагнитного клапана 30» с быстрым или грубым регулированием. Впускной клапан 30, который соединен с входом коллектора 23, который имеет объем V_0 . Выходное устройство 21 впускного регулятора также соединено с помощью поперечного ответвителя 24 с входом ограничителя потока 25, выход которого соединен другим крестом 37 с входом регулятора расхода на выходе или регулятора 26. Выход 42 регулятора 26 соединен с «опорным» давлением. Впускные и выпускные регуляторы 21 и 26 являются коммерчески доступными регуляторами постоянного дифференциального расхода [50].

Выходное отверстие регулятора 21 впуска также соединено посредством «крестообразного» соединителя 24 с входом электромагнитного клапана 33 с медленной или точной регулировкой, выход которого соединен с входом ограничителя потока 34. Выходное отверстие ограничителя потока 34 соединено с объемом V_0 коллектора 23.

Коллектор 23 соединен с датчиком 43 давления, который генерирует сигнал, представляющий текущее давление P коллектора, а также соединен с жидкостью с испытательным объемом V_t . Обычно объем V_t может быть в десять раз больше объема V_0 коллектора 23 и датчика давления 43. Калибр 31 обеспечивает визуальную индикацию текущего давления P коллектора и скорости изменения давления в этом коллекторе.

Коллектор 23 соединяется с входом электромагнитного клапана 32 «быстрой» или грубой регулировки, выход которого соединен с крестовиной 37. Коллектор 23 также соединяется с входом ограничителя потока 36, выход которого соединен с выпуском «медленного» соленоидного клапана точной регулировки 35. Выпуск медленного соленоидного клапана 35 соединен с крестовиной 37. Коллектор 23 также соединяется с входом ограничителей потока 27 и 22, выпуск которых соединен с входом управления регуляторы расхода 26 и 21. Наконец, коллектор 23 соединен с входом выпускного электромагнитного клапана 48, выход которого выпускает коллектор [51].

Все пять вышеупомянутых электромагнитных клапанов электрически подключены к разъему цифрового усилителя на и управляются микропроцессором 3. Микропроцессор 3 также считывает давление P в коллекторе 23 путем считывания сигналов, генерируемых датчиком 43 давления. Давление на выходе регулятора 21 впуска обозначается P_1 , а давление на выпуске регулятора 26 выпуска – обозначен P_2 [40].

Назначение ограничителя 25 состоит в том, чтобы минимизировать постоянный поток через контроллеры 21 и 26 входного и выходного потоков. Регуляторы потока требуют постоянного расхода для выполнения своей функции, которая заключается в поддержании постоянного перепада давления на клапанах 30, 33. 35 и 32, независимо от значений P , P_1 и P_2 . Обратите внимание, что поток через регуляторы полностью не зависит от объемов V_0 и V_t . Постоянный перепад давления на управляющих электромагнитных клапанах помогает устранить одну из переменных регулирования давления, которая изменяет перепад давления на клапане в виде давлений P , P_1 и P_2 изменить.

Ограничители потока 22 и 27 используются для замедления создания противодавлений на диафрагмах регулятора 21 впуска и регулятора 26 выпуска, соответственно, так что скорость увеличения или уменьшения давления P в коллекторе в результате работы клапана остается более или менее постоянным независимо от изменений испытательного объема V_t . Это связано с тем, что

поддержание ΔP на клапанах зависит только от «сопротивления» этих ограничителей потока и объема, связанного с контрольными диафрагмами.

«Медленные» электромагнитные клапаны 33 и 35 отличаются от «быстрых» электромагнитных клапанов 30 и 32 тем, что объем потока газа через электромагнитные клапаны 33 и 35 «медленного» давления не ограничен размером отверстия седла клапана, как в случае для быстрых клапанов 30 и 32, но с помощью ограничителей потока 34 и 36. Это позволяет ограничить поток газа через клапаны 33 и 35, чтобы обеспечить точное регулирование давления P в результате потока через медленные впускные и выпускные клапаны 33 и 35 почти не зависит от разницы между давлением P в коллекторе и давлением P_1 и P_2 на входе и выходе. Объем соединения между клапаном 33 и ограничителем 34 должен быть минимизирован, как и объем соединения между клапаном 35 и ограничителем 36.

Отверстия седла клапанов электромагнитных клапанов 30 и 32 быстрого регулирования давления и значения ограничителей обратной связи 22 и 27 разработаны таким образом, чтобы максимальный ожидаемый общий объем, включая объем коллектора V_0 и испытательный объем V_t , был заполнен газом до выбранного максимального давления P за достаточно короткое время, например, 30 секунд [26, 27, 28].

В соответствии с настоящим изобретением точная установка P без превышения P быстро достигается в коллекторе V_0 и в тестовом объеме V_t устройства 43, калибруемого или тестируемого в течение достаточно короткого времени, например, десяти секунд. «Быстрый» электромагнитный клапан 30, а также «медленный» электромагнитный клапан 33 для повышения давления (или клапаны 32 и 35 для снижения давления) изначально все открываются для быстрого увеличения (или уменьшения) давления в объеме V_0 до уровня, который, если только медленные клапаны 33 и 35 открываются микропроцессором 3, теоретически потребуются еще восемь секунд, чтобы

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 18 |

привести текущее давление P в объеме V_0 коллектора к выбранному «целевому давлению».

Режим работы с открытыми клапанами 30 и 33 соответствует сегменту А графика зависимости давления от времени, на которых сегменты А, В и С кривой показывают три режима работы в ходе повышения давления P в коллекторе 23 до целевого давления D . Точка $X1$ – это точка, в которой микропроцессор 3 определяет, что если клапан 30 быстрой или грубой регулировки закрыт, а клапан 33 медленной или «менее грубой» регулировки остается открытым, то для достижения P требуемого давления, указанного посредством горизонтальной пунктирной линии D . Точка $X2$ – это точка, в которой микропроцессор 3 определяет, что, если только медленный клапан 33 остается открытым, потребовалось бы ровно Δt_2 больше секунды, чтобы P достиг целевого давления D . В описанном здесь варианте осуществления изобретения Δt_1 составляет восемь секунд, а Δt_2 составляет четыре секунды [12].

Во время сегмента В кривой, открывается только медленный клапан 33. Когда вычисляется разница в давлении между целевым давлением D и давлением в коллекторе P , равная значению, указанному точкой $X2$, в которой P достигнет целевого давления D еще через 4 секунды при открытом только медленном клапане 33, клапан 33 закрывается, а третий режим работы используется.

Третий режим работы, называемый «точным пошаговым регулированием давления», выполняется под управлением микропроцессора 3. Во время сегмента С кривой, выполняется режим работы «точного ступенчатого управления давлением», в котором вычисляются длительности последовательности управляющих импульсов, и управляющие импульсы применяются к медленным клапанам 33 и 35, чтобы по-разному открывать их во время управляющих импульсов. Длительности рассчитываются как функция от разности между фактическим давлением в коллекторе P в конце последнего такого импульса и целевым давлением D . При расчете таких импульсов также учитывается влияние смещения клапана, скорости изменения медленной скорости, сжимаемость газа,

абсолютное значение целевого давления и абсолютное значение давления в испытательном объеме V_t от скорости изменения давления в коллекторе P .

Вышеупомянутая процедура пульсирующего дифференциального ступенчатого давления обычно повторяется три или четыре раза, в результате чего очень точно контролируемые чистые количества газа нагнетаются в объем V_0 и удерживаются в нем с помощью точно рассчитанного управления медленными впускными и выпускными клапанами 33 и 35. Эта техника создания давления позволяет избежать «превышение» целевого давления D из-за несовершенства системы, так как длительности импульсов, посылаемых на электромагнитные клапаны 33 и 35, рассчитываются так, что величина чистого импульса составляет примерно 50 % – 100 % от количества, необходимого для достижения целевое значение D .

Следует понимать, что недорогие электромагнитные клапаны обычно не надежно реагируют на команды длительностью менее 20 миллисекунд. Теперь будет описана технология «дифференциального открытия» медленных впускных и выпускных клапанов 33 и 35. Техника «дифференциального открытия» двух клапанов включает в себя одновременное открытие как впускного, так и выпускного клапанов, и удержание их открытыми в течение разных промежутков времени, так что общий результат эквивалентен открытию впускного или выпускного соленоида менее чем за двадцать миллисекунд. Таким образом, точные изменения давления P в коллекторе могут быть достигнуты без использования чрезвычайно сложных и дорогих электромагнитных клапанов [29].

Дифференциальное открытие пары впускных и выпускных клапанов требует определения «смещения» или разницы между временем включения и выключения двух клапанов. Вычисленные смещения затем используются при работе впускного клапана и выпускного клапана для достижения очень точного «дифференциального» открытия обоих клапанов. Чтобы вычислить смещение между медленным впускным клапаном 33 и медленным выпускным клапаном 35, газ вводится в коллекторный объем V_0 и испытательный объем V_t . Затем

Затем программа переходит к блоку 80 и вычисляет коэффициент давления, который используется для компенсации сжимаемости газа в системе.

Коэффициент давления используется для корректировки измерений давления и градиентов давления до значений полной шкалы. Это делается простым умножением значений давления P и некоторых его вычисленных производных на PRESSURE COEF. получить соответствующее давление или производную при полномасштабном давлении. Как указано в блоке 81, PRESSURE COEF. сохраняется, и программа позволяет второй задержки 2 для P стабилизации, а затем управляет микропроцессор 3 для чтения настоящего первого текущего давления P1 датчика давления внутреннего 43 (или ссылки внешнего давления, если присутствует).

В блоке 82 программа открывает медленный впускной клапан 33 и включает соответствующий светодиодный индикатор «увеличение импульса», а затем позволяет 2-секундной задержке изменения давления пройти перед переходом к блоку 83 и закрытием всех клапанов, отключая «импульс» светодиодный индикатор «вверх» и позволяет 2-секундную задержку стабилизации давления. Затем программа конфигурации системы переходит к блоку 84 и снова считывает второе показание CURRENT PRESSURE P2, полученное с помощью датчика 43 внутреннего давления (или внешнего эталона давления, если таковой имеется), а затем вычисляет наклон (т.е. производную) P от двух Показания CURRENT PRESSURE непосредственно перед и сразу после открытия и закрытия медленного впускного клапана 33. Наклон рассчитывается путем деления разницы между двумя показаниями CURRENT PRESSURE на продолжительность, в течение которой клапан 33 открыт.

Как указано в блоке 84А, вся процедура повторяется для выпускного клапана 35, чтобы получить наклон или производную от P, связанную с выпускным клапаном 35 [35, 36].

Затем программа конфигурации системы переходит к блоку 85 принятия решения и определяет, является ли датчик, используемый для измерения давления

в коллекторе Р, датчиком 43 давления (или внешним датчиком давления, который может быть подключен к коллектору 23 через доступный порт), считываемым микропроцессором 3 через COM2 порт 16. (Эта опция предусмотрена для того, чтобы пользователь мог предоставить более точный датчик давления, чем датчик 43 давления, поставляемый с блоком. Датчик 43 давления имеет точность только до 10-битного разрешения, что недостаточно для выполнения значимых вычислений смещения для компенсации Различия во времени срабатывания клапанов 33 и 35.)

Положительное решение из блока 85 обходит ту часть процедуры конфигурации системы, которая вычисляет такие смещения. Тем не менее, если подключен внешний датчик давления, предполагается, что он будет иметь достаточно высокое разрешение, чтобы рассчитывать смещения. Затем программа конфигурации системы переходит к блоку 86 и после 2-секундной задержки для стабилизации давления вычисляет коэффициент давления в соответствии с уравнением (1.1) выше. Затем программа переходит к блоку 87 и устанавливает начальное значение для T1, вычисленное время открытия для клапана 33.

Программа также устанавливает текущее значение T2, время открытия выпускного клапана 35.

OFFSET1 и OFFSET2 в данный момент равны нулю. Затем программа переходит к блоку 88, считывает значение Р через COM2 PORT 16 и считывает значение Р, считываемое с внешнего датчика давления.

Затем программа конфигурации системы переходит к блоку 91 принятия решения, и если текущий проход является первым проходом в выполняемом цикле, программа переходит к блоку 93 и определяет, меньше ли Р, чем 0, чтобы определить, должно ли направление DIR быть UP, или ВНИЗ, как указано в блоках 94 и 95. Это определяет, какой клапан должен иметь смещение, добавленное к его времени открытия. Затем программа переходит к блоку 92 и вычисляет начальное значение смещения ΔT в миллисекундах, затем переходит к блоку 96 принятия решения и определяет, равна ли переменная DIR UP, и, если

это так, переходит к блоку 98 принятия решения и определяет, текущее измеренное значение ΔP меньше 0. Если DIR не UP, программа переходит к блоку 98А принятия решения и определяет, является ли ΔP меньше 0. Как только направление установлено, оно не изменится, и любое сложение или вычитание из смещение всегда будет от того же смещения клапана.

Затем, как указано в блоке 89, оба клапана 33 и 35 открываются по 100 импульсов на длительность T1 и T2 соответственно. После разрешения 2-секундной задержки стабилизации давления CURRENT PRESSURE P2 считывается, как указано в блоке 90, и значение ΔP , изменение давления на импульс, вычисляется как

Смещение ΔT в миллисекундах затем рассчитывается по формуле. ЕСЛИ DIR равняется вверх, то смещение ΔT будет добавлено к электромагнитному клапану 35 с медленным выходом. Если DIR равно сглаживанию, смещение ΔT будет добавлено к продолжительности открытия для электромагнитного клапана с медленным входом 33.

Если определение блока 98 принятия решений является отрицательным, программа переходит к блоку 100.

и затем переходит к блоку 101 принятия решения. Если определение блока 98 является положительным, программа переходит к блоку 99.

В каждом случае программа переходит к блоку 101 принятия решения и определяет, составляет ли T менее 0,2 миллисекунды. Если это не так, программа возвращается к началу цикла в точке входа блока 86. Если новое смещение составляет менее 0,2 миллисекунды, программа переходит к блоку 102 и сохраняет новые значения OFFSET1 и OFFSET2. Если давление увеличивается, как определено в блоке 96 принятия решения, то желательно добавить смещение ΔT к времени T2 для клапана 35, потому что желательно, чтобы ни один клапан не подвергался импульсному открытию в течение менее 20 миллисекунд, поэтому смещение должно быть поэтому никогда не вычитайте из T1 или T2, но всегда добавляйте. (Следует понимать, что время отклика для недорогих

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 25 |

электромагнитных клапанов обычно составляет от 15 до 20 миллисекунд, и что в течение нескольких проходов через петлю может быть добавлено слишком большое смещение.) Петля продолжается до ΔT , вычисленное в блоке 92, составляет менее 0,2 миллисекунды, как определено в блоке 101 принятия решения.

Если используется датчик 43 внутреннего давления, так что часть вычисления смещения процедуры конфигурации системы обойдена, программа конфигурации системы входит в блок 103 из блока 85 принятия решения. В любом случае, в блоке 103 микропроцессор 3 вызывает быстрый выпускной клапан 32 открывать с целью определения, открывается ли выход регулятора 26 в окружающую атмосферу или в вакуумный насос для установления абсолютного давления. Как указано в блоке 104, программа определяет, меньше ли P , чем 12 фунтов на квадратный дюйм, и если это не так, переходит к блоку 107 принятия решения и определяет, равно ли ΔP 0, и если это определение является отрицательным, программа ожидает 0,2 секунды, как указано в блоке 109 стабилизации давления и повторно входит в контур до тех пор, пока из блока 104 или 107 принятия решения не будет получено положительное решение. Предполагается, что если давление когда-либо упадет ниже 12 фунтов на квадратный дюйм, пользователь подключит вакуумный насос к выход регулятора 26 выхлопа для измерения давления ниже атмосферного.

Если ΔP равно 0 в блоке 107, очевидно, что давление стабилизировалось при давлении, превышающем 12 фунтов на квадратный дюйм, поэтому предполагается, что вакуумный насос не подключен, как указано в блоке 108. Эта информация сохраняется в блоке 106, и программа переходит к блоку 110, чтобы установить флаг сброса и открыть выпускной клапан для выпуска коллектора 23 в атмосферу.

Затем программа переходит к блоку 111 и повторно включает прерывание клавиатуры, как указано в блоке 111. Как указано в блоке принятия решений 112

измерений абсолютного давления, то же самое уравнение может использоваться, если ATMOS. устанавливается равным нулю. Затем программа переходит к блоку 143 принятия решения и определяет, превышает ли PRESSURE CORRECTION больше 15, и если да, то устанавливает PRESSURE CORRECTION на 15. В любом случае, программа переходит к блоку 141.

Импульсная подпрограмма затем переходит к блоку 149 принятия решения.

Программа генерирования давления, которая вызывает процедуру пульсации, начинается в блоке 160 путем вычисления коэффициента давления по формуле (1.1). В блоке 161 программа создания давления вычисляет четыре предела давления, соответствующих точкам, таким как X1 и X2. Для увеличения давления P L1 – это предел давления в точке X2, а L2 – это предел давления в точке X1. Для уменьшения давления L3 соответствует точке X2, и L4 соответствует точке X1. Значения L1-L4 – это давления, которые будут использоваться в процессе создания давления. В каждом случае давления соответствуют тому, сколько времени потребуется, чтобы достичь целевого давления с использованием «медленных клапанов» наклонов клапанов 33 и 35.

В блоке 162 программа считывает CURRENT PRESSURE (текущее значение P) с датчика 43 давления (или более точное задание внешнего давления, если оно есть), а затем переходит к блоку 163 и рассчитывает целевое давление с использованием датчика 43 внутреннего давления. Показание от внутреннего датчика 43 давления используется потому, что к нему можно получить доступ всего за 100 миллисекунд, по сравнению с более длительным неизвестным временем для внешнего устройства.

В блоке 164 принятия решения программа генерирования давления определяет, должен ли использоваться внутренний датчик 43, а не внешний датчик давления, для измерений в программе генерирования давления.

Процедура переходит к блоку 167 принятия решения и определяет, есть ли данные в последовательном буфере, и если это так, принимает их и выполняет любую подходящую команду, и в любом случае переходит к блоку 169 и

определяет, находится ли ΔP в пределах «целевого диапазона настройки». «целевого давления.

Если определение блока 169 является положительным, программа возвращается к основному циклу простоя микропроцессора 3, но в противном случае переходит к блоку 170.

Диапазон настройки цели может составлять 0,001 фунт / кв. Это означает, что всякий раз, когда производится коррекция давления, давление возвращается в пределах 0,001 фунт / кв.дюйм от целевого давления. Программа остается в этом диапазоне и не выполняет другую коррекцию давления, пока P не выйдет за пределы «настройки удержания», которая всегда больше или равна целевому диапазону настройки.

Если значение ΔP , вычисленное в блоке 165 или 166, составляет не менее 0, программа переходит к блоку 171 принятия решения, и определяет, меньше ли ΔP , чем заданное значение. Если это так, программа переходит к этапу 172 и испытывает «подпрограмму удержания стабильности» и устанавливает флаг генерирования давления, а в блоке 173 устанавливает «TARGET DIFFERENCE» равной «настройке удержания». Затем программа возвращается в основной цикл простоя основного микропроцессора.

Если в блоке 171 принятия решения выполнено отрицательное определение, программа переходит к блоку 174 и устанавливает TARGET DIFFERENCE равным целевому значению, а затем переходит к блоку 175 принятия решения. Если текущее значение ΔP меньше, чем L1, программа вызывает импульсная подпрограмма, как указано в блоке 176, и затем возвращается к точке входа в блоке 162. В противном случае программа переходит к блоку 177 принятия решения и определяет, больше ли разность CURRENT PRESSURE, чем L3, и если это так, программа переходит к блоку 178, открывает «быстрый» впускной клапан 30 и затем возвращается к точке входа блока 177 принятия решения. Если определение в блоке 177 принятия решения является отрицательным, программа переходит к блоку 179 принятия решения и определяет, является ли ТЕКУЩЕЕ

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 30 |

ДАВЛЕНИЕ больше, чем L1. Если это определение положительно, программа открывает медленный впускной клапан 33 и возвращается к точке входа блока 179 принятия решения. В противном случае программа возвращается к блоку 162 принятия решения.

Если определение блока 170 принятия решений является положительным, программа переходит к процедуре, по существу аналогичной процедуре, за исключением того, что быстрый выпускной клапан 32 и медленный выпускной клапан 35 открыты вместо соответствующих впускных клапанов.

Он раскрывает блок-схему подпрограммы, выполняемой микропроцессором 3 в ответ на нажатие клавиши «FAST UP» на клавиатуре 13, чтобы вручную вызвать повышение давления P в коллекторе 23. Первым шагом в подпрограмме является инициализация переднего дисплея путем включения светодиода «ускорение», как указано в блоке 190. Последующая описанная процедура определения стабильности «отключена», а светодиод ускорения включен в блоке 190. Затем программа переходит к блоку 191 и открывает быстродействующий впускной электромагнитный клапан 30, переходит к блоку 192 принятия решения и определяет, нажата ли клавиша FAST UP, и снова возвращается в исходное состояние и удерживает клапан 30 открытым, пока клавиша FAST UP больше не будет больше нажиматься. депрессии. Затем программа переходит к блоку 193, закрывает клапан 30 и выключает светодиод «ускорения». Блок-схема аналогична, по существу, идентичной подпрограмме (не показана), которая выполняется, когда нажата клавиша SLOW DOWN на клавиатуре 13.

Рисунок показывает блок-схему подпрограммы, выполняемой микропроцессором 3, когда нажата кнопка PULSE UP на клавиатуре 13. Эта процедура сначала переходит к блоку 200 и определяет, установлен ли флаг «избыточного давления», и, если он есть, возвращается в основной контур холостого хода, чтобы не вызывать дальнейшего избыточного давления в системе. В противном случае программа переходит к блоку 201 и повторно инициализирует переднюю панель дисплея, а затем переходит к блоку 201 и

вычисляет PRESSURE COEF, используя формулу (1.1). Затем программа переходит к блоку 203 и вычисляет ΔP . (Целевым значением является текущее давление, потому что программа пульсирует от текущего давления.)

Затем программа переходит к блоку 204 и отключает индикатор «готовности», а затем переходит к блоку 205 и вызывает подпрограмму пульсации. Затем программа переходит к блоку 206 принятия решения и определяет, нажата ли еще одна кнопка PULSE UP, и, если это так, ждет 0,3 секунды, как указано в блоке 207, а затем возвращается к точке входа блока 203 и делает еще один проход по циклу. Когда клавиша PULSE UP больше не нажата, программа возвращается в основной цикл простоя. Абсолютно аналогичная подпрограмма (не показана) вызывается и выполняется микропроцессором 3, когда нажата кнопка «PULSE DOWN» на клавиатуре 13.

Рисунок является блок-схемой подпрограммы стабильности, выполняемой микропроцессором 3, чтобы указать, стабилизировалось ли давление P , так что система готова откалибровать следующую точку датчика давления. Всякий раз, когда программа выполняет программу создания давления, или работает в главном контуре холостого хода, он непрерывно считывает давление P либо с датчика 43 давления, либо с внешнего датчика давления, подключенного к объему P_0 . Следовательно, последовательные показания давления доступны постоянно, и промежуток времени, прошедший между последовательными показаниями, доступен, так что наклон давления P всегда доступен. Блоки 220-223 указывают эти этапы. В блоке 224 вычисляется скорость изменения P , а в блоке 225 принятия решения скорость изменения сравнивается с выбранной настройкой стабильности SS. Настройка SS может быть установлена пользователем с передней панели или с удаленного компьютера. Если оно меньше или равно текущей настройке стабильности, это указывает на то, что давление P является стабильным, а переменная STABILITY установлена на «1», как указано в блоке 227. В противном случае STABILITY устанавливается на «0», и Подпрограмма стабильности возвращается в основной цикл простоя. Если переменная

стабильность не установлена на 1, это может автоматически указывать на наличие утечки, в зависимости от значения настройки стабильности SS.

Следует понимать, что микропроцессор 3 всегда устанавливает переменную READY в ноль, если какой-либо из клапанов открыт или если последнее измеренное давление P не находится в пределах диапазона «HOLD», если включено HOLD. Если эти два теста выполнены, то процедура устанавливает READY в «0» или «1» в соответствии с тем, является ли скорость, вычисленная в блоке 224, меньше или превышает установленную пользователем настройку STABILITY.

Далее будет объяснено описание типичной ручной работы контроллера 1 PPC. Как правило, контроллер 1 PPC используется для установки и стабилизации последовательности значений давления, требуемых для калибровки чувствительного к давлению устройства относительно эталона. Этот пример иллюстрирует калибровку аналогового манометра с диапазоном 0-100 фунтов на кв. Дюйм и точностью $\pm 0,5$ % от полной шкалы. Предполагается, что эталонное устройство представляет собой цифровой манометр с диапазоном 0-100 фунтов на кв. Дюйм и точностью $\pm 0,05$ % от значения полной шкалы. Требуемая последовательность калибровки предполагает возрастание и понижение приращения давления, равного 20 % от значения полной шкалы, начиная и заканчивая при 0 фунт / кв.дюйм, при атмосферном давлении. Шаги следующие:

1. Испытуемое устройство и контрольный датчик давления (RPM) подключаются к контрольному порту контроллера PPC 1, используя герметичное пневматическое оборудование. Число оборотов в минуту включает в себя точный датчик давления, который может быть считан микропроцессором 3. Пневматическая подача давления 41 на 100-150 фунтов на квадратный дюйм соединена с контроллером 21 входного потока.

2. Процедура CONFIGURATION выполнена. Давление устанавливается нажатием клавиши FAST UP на панели 13, визуальное считывание показаний датчика 21 до тех пор, пока не будет достигнуто показание приблизительно 50 фунтов на

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 33 |

пользователь установил Критерии устойчивости были соблюдены. Оператор записывает показания тестируемого аналогового датчика.

7. Клавиши FAST UP и SLOW UP и клавиша STEP UP используются для установки давления, считываемого эталонным цифровым манометром, на 20 фунтов на кв. Дюйм с точностью до 0,1 фунта на кв. Как только это значение достигнуто, кнопка HOLD удерживается, чтобы сохранить это значение. Оператор ожидает включения индикатора готовности и записывает текущие показания на тестируемом аналоговом индикаторе.

Затем оператор повторяет этапы (1) – (7) для каждого из приращений 40, 60, 80, 100, 80, 60, 40 и 20 фунтов на кв. Дюйм в этом порядке, а также для последней точки, а именно 0 фунтов на кв. Дюйм, нажимает клавиша VENT ожидает включения индикатора готовности и записывает показания тестируемого аналогового датчика.

Далее будет описана автоматическая компьютерная операция. Когда необходимо выполнить большой объем калибровок давления и / или работа по калибровке давления очень интенсивна, например, когда необходимо установить много приращений давления или выполнить калибровку при нескольких различных температурах, полезно автоматизировать весь процесс калибровки, управляя им с помощью микропроцессора 3. В этом случае система 1 контроллера действует как периферия установки давления компьютера. Компьютер будет иметь другие периферийные устройства, такие как система сбора данных и камера окружающей среды, как правило. В настоящем примере предполагается, что целью является калибровка датчика давления с диапазоном 0-100 фунтов на кв. Дюйм и точностью $\pm 0,1$ % от значения полной шкалы. Контрольное устройство представляет собой высокоточный цифровой манометр с диапазоном 0-100 фунтов на кв. Дюйм и точностью $\pm 0,01$ % от значения полной шкалы. Последовательность калибровки должна быть с шагом 20 % от значения полной шкалы, начиная от 0 фунтов / кв. Дюйм до значения полной шкалы и снижаясь до 0 фунтов / кв. Шаги включают в себя следующее:

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 35 |

1. Испытуемые устройства и эталонное устройство подключаются к тестовому порту контроллера 1 с помощью пневматической аппаратуры, не требующей утечки. Предполагается, что подходящая пневматическая подача давления уже подключена.

2. Схема интерфейса цифрового датчика давления RS232 подключена к порту 16 COM2 системы контроллера.

3. Порт 15 COM1 подключен к внешнему компьютеру для связи по RS232.

Следующие команды выполняются автоматически в ответ на команды с внешнего компьютера.

4. Система контроллера 1 инициализируется путем автоматической настройки контроллера 1 для работы с внешним цифровым манометром, используя команду UDD =, а затем команду device = UDD, которая описывает цифровой манометр, подключенный к COM2, и дает указание положительного давления. Отключите контроллер 1, чтобы использовать цифровой манометр для измерения давления. (Команда UDD (пользовательское устройство) используется для определения параметров «пользовательского устройства».) Затем контроллер 1 устанавливается для работы в соответствующих единицах давления путем отправки команды UNIT = PSI на контроллер 1. «Предел удержания» устанавливается на значение $\pm 0,01$ фунт / кв. дюйм с помощью команды HS = 0,01. (Команда HS (настройка удержания) позволяет пользователю установить вышеописанный диапазон удержания.) Эта команда устанавливает предел удержания таким же образом, как и предел удержания, установленный с передней панели. Затем «целевой предел» устанавливается равным $\pm 0,005$ фунт / кв.дюйм с помощью команды TS = 0,005. (Команда TS (Target Setting) позволяет пользователю установить целевой предел давления, т. Е. Насколько близко давление должно быть к целевому значению, прежде чем считается, что оно установлено на целевое значение.) Предел стабильности установлен на 0,005 фунтов на квадратный дюйм в секунду.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 36 |

5. Процедура КОНФИГУРАЦИИ, как описано выше, выполняется, устанавливая давление в 50 фунтов на квадратный дюйм, инициируя выполнение процедуры конфигурации и ожидая, пока она не будет выполнена.

6. 0 фунтов / кв. Дюйм устанавливаются в качестве первого приращения требуемой последовательности автоматической калибровки с помощью команды «VENT = 1», чтобы открыть клапан 48 и сбросить давление в системе до атмосферного давления. Процедура стабилизации выполняется, и когда получено указание готовности, указывающее, что система удалена, и давление стабилизируется на 0 фунтов / кв. Дюйм, читается значение текущего показания тестируемого преобразователя.

7. Следующее приращение, 20 фунтов на кв. Дюйм, устанавливается с помощью команды PSH = 20. Компьютер ожидает индикации готовности, что никакие клапаны не открыты, давление находится в существующих пределах удержания, и установленный пользователем критерий устойчивости был соблюден. Как только индикация готовности получена, тестируемый преобразователь считывается.

8. Шаг 7 повторяется для дальнейших давлений 40, 60, 80, 100, 80, 60, 40 и 20 фунтов на кв. Дюйм в этом порядке.

9. Шаг 6 повторяется для 0 фунтов / кв.

Вышеописанный вариант осуществления изобретения отличается от предыдущих систем регулирования давления тем, что обеспечивает комбинацию грубо контролируемой генерации повышения давления в испытательном объеме с последующей медленной, точно контролируемой ступенчатой работой медленных электромагнитных клапанов 33 и 35 с использованием вычисленных длительностей времени открытия клапана, чтобы испытательное давление достигло целевого давления без превышения давления. Вышеупомянутый вариант осуществления отличается от предшествующего уровня техники еще и использованием ограничителей потока, таких как 22 и 27, в сочетании с контроллером 21 входного потока и контроллером 26 выходного потока, чтобы

поддерживать довольно постоянные перепады давления на входных электромагнитных клапанах 30 и 33 и выпускном отверстии электромагнитные клапаны 32 и 35.

В данной установке для контроля давления в рабочем объеме используется метод, при котором у впускных и выпускных клапанов разная пропускная способность, и за счет этой разницы поддерживается нужное давление. Также можно регулировать состояние клапанов. Замечены случаи, когда необходимо открывать одновременно клапаны, чтобы увеличить разрешение [30, 37].

К недостаткам данной установки можно отнести конструктивные особенности. С использованием механических регуляторов получается достаточно сложная конструкция, которая к тому же неэкономичная, в связи с тем, что необходимо непрерывно нагнетать газ в резервуар, чтобы поддерживать номинальный режим работы пневматического регулятора. Также в момент, когда происходит регулирование давления с помощью входных и выходных клапанов происходит дополнительный расход воздуха, за счет перекрытия клапанов.

Далее рассмотрим установку (патент РФ №2319126, 2006), которая является модернизированной версией установки из [6].

Далее будет описан алгоритм формирования давления.

В данной установке установлены датчики, которые с определенным интервалом времени измеряют давление в системе и в рабочем объеме и соотносят их друг с другом, а также с величиной давления которая была изначально установлена, затем в рабочем объеме устанавливается необходимый уровень давления. Затем вычисляется разница между величиной давления в рабочем объеме и необходимой, чтобы накачать и откачать из объема, там самым устанавливая давление, которое были изначально необходимо. В систему нагнетается давление выше чем в рабочем объеме, для того чтобы была возможность закачать давление. Если необходимо выкачать давление в системе поддерживается уровень давления ниже, чем в рабочем объеме.

Далее рассмотрим схему данной системы.

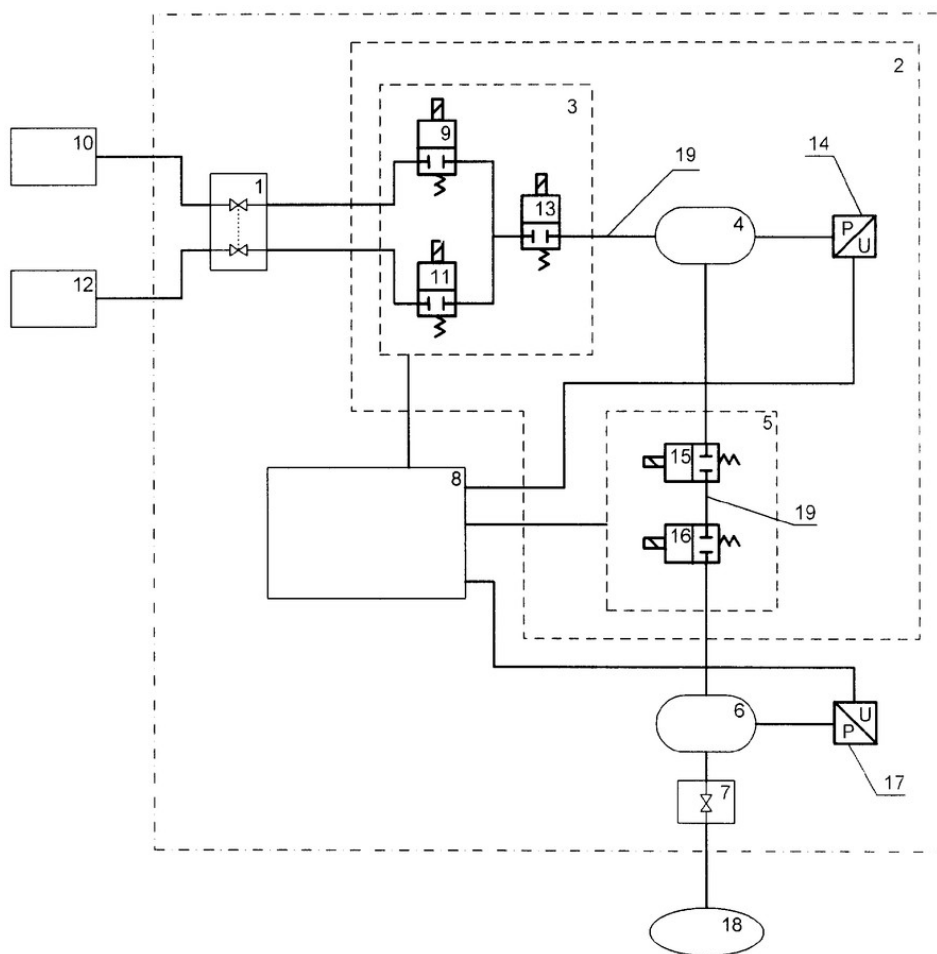


Рисунок 1.5 – Схема системы

Установление необходимого уровня давления происходит с помощью прямой и обратной накачки воздуха, но, чтобы уменьшить минимальную порцию воздуха, установлены последовательно два клапана, которые открываются друг относительно друга с определенной временной задержкой. Для того чтобы в рабочем объеме регулирование давления происходило корректно, нужна разность давлений на входе системы и в рабочем объеме. Исходя из этого видим, что клапаны находятся в открытом состоянии, на порядок меньше, чем минимальное время срабатывания клапанов [38, 46].

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

На входе установки стоят источник высокого давления 10 и источник низкого давления 12, затем идет входной вентиль 1, после которого установлены клапаны и дополнительный рабочий объем которые вместе формируют предварительный контур формирования давления 2. Клапаны 9, 11 и 13 формируют входной канал. Затем воздух поступает в дополнительный рабочий объем, в котором устанавливается предварительная величина давления. После этого с помощью клапанов 15 и 16 воздуха попадает в рабочий объем 6. С помощью датчика 17 происходит измерение давления. Через выходной вентиль 7 воздух попадает в контролируемый объем 18. Также установка включает в себя систему регулирования давлением 8 [7].

Алгоритм формирования давления в рабочем объеме выглядит следующим образом.

В данной установке одновременно происходит регулировка давления как в дополнительном резервуаре, так и в рабочем. Из соотношения минимального времени открытого состояния тракта на подачу воздуха и необходимой порции давления определяются верхний и нижний пределы давления. Между резервуарами 4 и 6 поддерживается небольшая разница в давлении. Следовательно, разница давления в момент выхода на режим поддержания давления зависит от разницы между давлением которое установлено в рабочем объеме и необходимым давлением [42].

Клапаны установлены последовательно, чтобы они открывались с определенной задержкой друг относительно друга. Таким образом увеличиваются возможности регулирования, не увеличивая расход воздуха [39].

Давление в резервуаре 6 регулируется клапанами 15 и 16. Причем регулирование происходит следующим образом, если необходимо накачать или выкачать маленькую порцию давления, то клапаны открываются с задержкой друг относительно друга. Если необходимо накачать или выкачать большую порцию давления, то клапаны открываются одновременно.

Давление в резервуаре 4 регулируется клапанами 9, 11 и 13. Причем регулирование происходит следующим образом, если необходимо накачать или выкачать маленькую порцию давления, то клапаны открываются с задержкой друг относительно друга. Если необходимо накачать или выкачать большую порцию давления, то клапаны открываются одновременно [32, 33].

Систему регулирования 8 выполняет следующие функции:

- с определенной периодичностью измеряет давление в емкостях;
- осуществляет управление клапанами;
- производит вычисление необходимого времени, на которое открывать клапаны.

Конструктивно данная система проще, более проста в реализации и экономически более выгодна, чем установка [6].

Обобщая, приведенные способы и устройства можно свести к двум методам:

- изменение количества рабочего тела (жидкости или газа) в заданном рабочем объеме [4, 6];
- изменение рабочего объема при заданном (фиксированном) количестве рабочего тела [5].

Примеры возможной реализации методов приведены на рисунке 1.6.

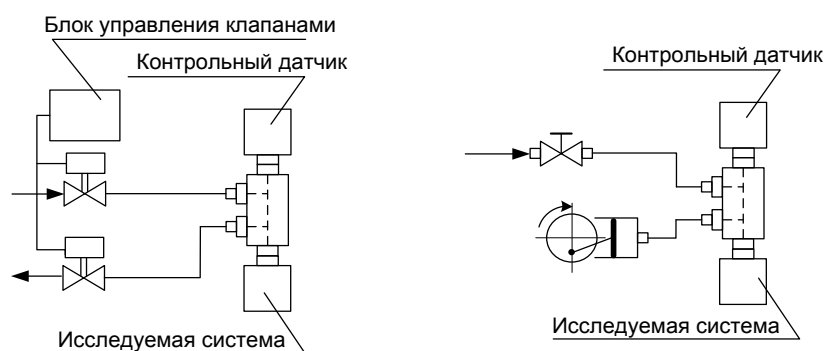


Рисунок 1.6 – Примеры возможной реализации методов формирования пульсирующего давления

1.3 Достоинства и недостатки методов

Рассмотрев данные методы, можем сказать, что оба подходят для формирования пульсирующего давления.

Для того чтобы выбрать один из этих методов для дальнейшей работы проанализируем некоторые достоинства и недостатки этих методов.

Обратим внимание на следующие моменты:

1. форма выходного сигнала;
2. энергопотребление.

1.3.1 Форма выходного сигнала

Проанализируем формы выходных сигналов, которые данные методы могут сформировать.

Метод на основе изменения рабочего объема при заданном количестве рабочего тела, может быть выполнен с использованием поршня в качестве формирователя импульсов. Наиболее очевидным вариантом реализации является стенд, в котором поршень движется с помощью кривошипно-шатунного механизма. В этом случае скорость формирования импульсов будет достаточна для нашей задачи, но на выходе мы сможем получить сигнал только синусоидальной формы.

Метод на основе изменения количества рабочего тела при неизменном рабочем объеме возможно реализовать с помощью клапанов, как это показано в [6, 7].

Рассмотрев предыдущие варианты реализации стендов на основе клапанов, можем сказать, что они предназначены для формирования постоянного давления. С помощью разрабатываемого метода, в нашем случае, стенд должен формировать переменное давление.

Для решения этой задачи необходимо использовать электро-пневмо-клапаны с высоким быстродействием и пропускной способностью.

Применение клапанов с высоким быстродействием в сочетании с последовательным включением клапанов в соответствии с [7] может обеспечить достаточно быстрое изменение давления в рабочем объеме.



Рисунок 1.7 – Последовательное расположение клапанов

Из этого сделаем вывод, что с помощью данного метода, возможно, сформировать испытательные выходные сигналы произвольной формы.

1.3.2 Энергопотребление

Рассмотрим энергопотребление обоих методов.

Оба метода требуют внешний источник давления. В методе на основе поршня необходимо накачать определенный уровень давления в рабочий объем. Расхода воздуха в данном случае не будет, но в данном методе предположительно будет затрачиваться большое количество энергии на перемещение поршнем.

В методе на основе клапанов необходимо использовать ресиверы, в которых будет устанавливаться определенное давление. Затем определенными порциями воздух поступает в рабочий объем. В данном методе расход воздуха будет большой, но также определенное количество энергии потребуется на управление клапанами. Поэтому можем сделать вывод, что энергопотребление обоих метод сопоставимо друг с другом. Исходя из параметра «форма выходного сигнала», метод на основе электропневмоклапанов лучше подходит для реализации в данной работе.

Основной задачей исследования является разработка метода формирования испытательных сигналов на основе электропневмоклапанов и оценка его потенциальных возможностей/параметров. Для этого необходимо:

- разработать алгоритм формирования пульсирующего давления;
- смоделировать данный алгоритм в среде Excel;
- теоретически оценить характеристики разработанного метода, а также провести экспериментальные работы по определению характеристик метода.

Выводы по главе:

1. Сформированы требования необходимые для разработки метода.
2. Рассмотрены 4 варианта устройства, проанализированы методы формирования сигналов и всё сведено к двум методам – на основе электропневмоклапанов и на основе поршня.
3. Проанализировав достоинства и недостатки данных методов, сделан вывод о том, что метод формирования испытательных сигналов на основе электропневмоклапанов является перспективным и предпочтительным.
4. Также были поставлены задачи на дальнейшее исследование.

2 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРО-ПНЕВМО-КЛАПАНОВ

В данной главе необходимо разработать алгоритм формирования пульсирующего давления. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать метод на основе динамического измерительного стенда (ДИС), выявить проблемы.
2. Выбор элементной базы для стенда.
3. Скорректировать алгоритм работы стенда.

Для исследования метода формирования пульсирующего давления с использованием электро-пневно-клапанов был использован ДИС.

Схема ДИС выглядит следующим образом:

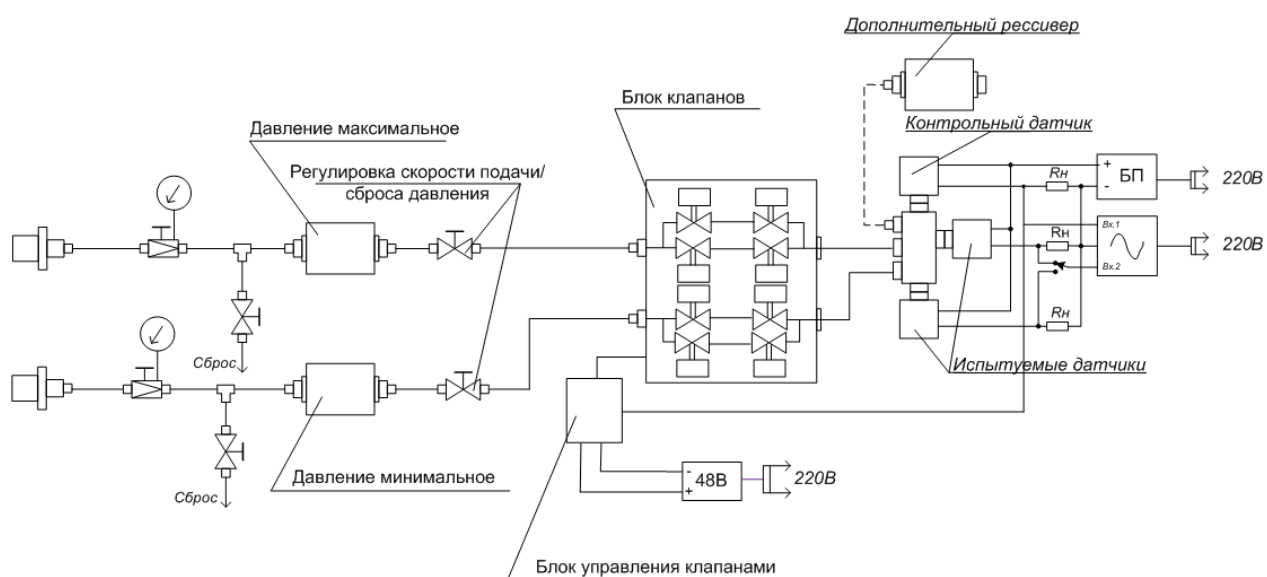


Рисунок 2.1 – Схема ДИС

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

Стенд состоит из устройства формирования испытательных входных сигналов, измерительного комплекса для контроля параметров испытательных сигналов и выходных сигналов испытуемых измерителей давления и блока управления для управления устройством формирования и расчета характеристик испытуемых изделий.

Блок подготовки давления включает в себя источники максимального и минимального давления. Источник максимального давления через редуктор, работающий от сети, заполняет ресивер воздухом и устанавливает в нем определенное давление. Второй ресивер устанавливает минимальное давление. В частности, может быть просто атмосфера или разряжение, в зависимости от того какую форму выходного сигнала нам необходимо получить.

Далее стоят два регулируемых вентиля, у которых расход очень плавно, за счет игольчатого клапана, можно менять вручную.

Затем идет блок клапанов и блок управления клапанами.

Далее стоит ресивер, в котором и формируется пульсирующее давление, к нему подключены испытуемые и контрольные датчики, дополнительный ресивер, а также осциллограф для контроля выходного сигнала.

2.1 Описание и анализ алгоритма управления клапанами в ДИС

Клапаны расположены таким образом, чтобы можно было расширить возможности их регулирования (рисунок 2.2).

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 46 |

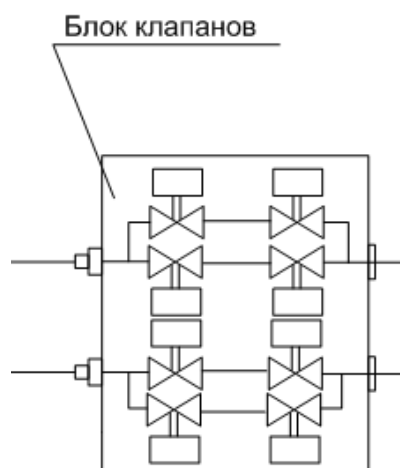


Рисунок 2.2 – Блок клапанов

Клапаны, которые в настоящее время можно найти на рынке, могут открываться на время не менее порядка 1 мс и частотой до 1 кГц т.е. быстрее они работать не умеют.

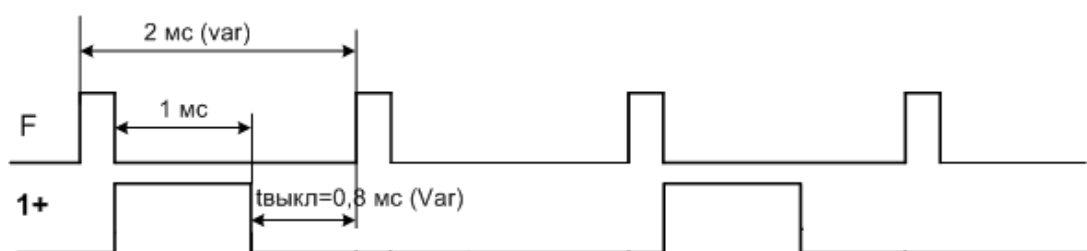


Рисунок 2.3 – Время открытия клапана

Из рисунка 2.3 видно что, клапан 1 мс открыт и ~ 1 мс закрыт. Т.е сделать время подачи или сброса меньше этих значений теоретически мы не можем. На практике получается что, за счет задержки в клапане, время открытия получается больше чем 1 мс. Небольшие порции воздуха необходимо подавать маленькими частями, иначе получается большое перерегулирование. Поэтому два клапана поставлены последовательно и открываются они с задержкой друг относительно друга (рисунок 2.4).

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

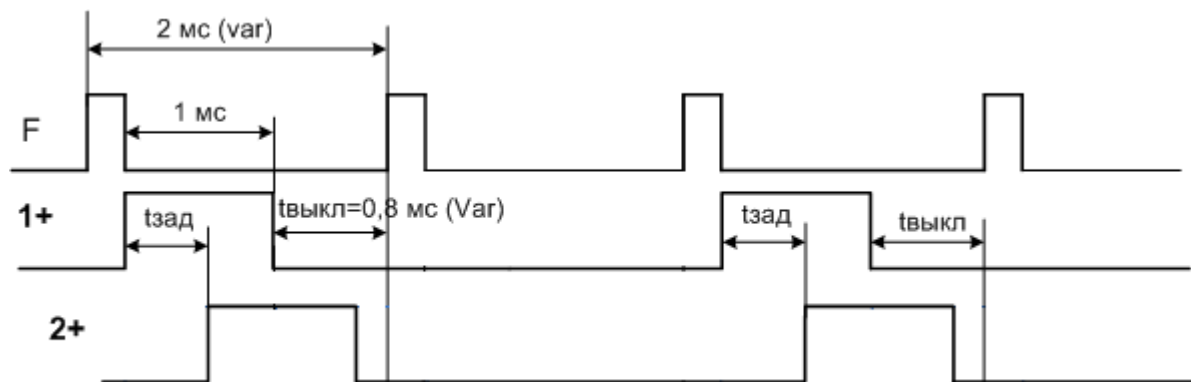


Рисунок 2.4 – Задержка между открытием клапанов

Понятие перерегулирования относится к прямым показателям качества регулирования переходного процесса и означает отклонение регулируемой величины в процессе регулирования от установившегося значения.

Поэтому поставлено два клапана и открываются они с задержкой друг относительно друга. Величина задержки задается в блоке управления клапанами в зависимости от того какую имеем производную функции. Если производная функции меняется быстро, необходимо открыть клапан на большую величину, в связи с этим получается минимальная задержка и клапаны открываются одновременно. Если скорость изменения производной маленькая, клапаны открываются на меньшую величину, время задержки увеличивается и увеличивается реальное время открытия клапанов. Таким образом, можно регулировать время открытия клапанов от максимального значения пропускной способности клапанов до, практически, нуля.

Для удаления паузы между открытием клапанов поставлена вторая цепочка клапанов (рисунок 2.5).

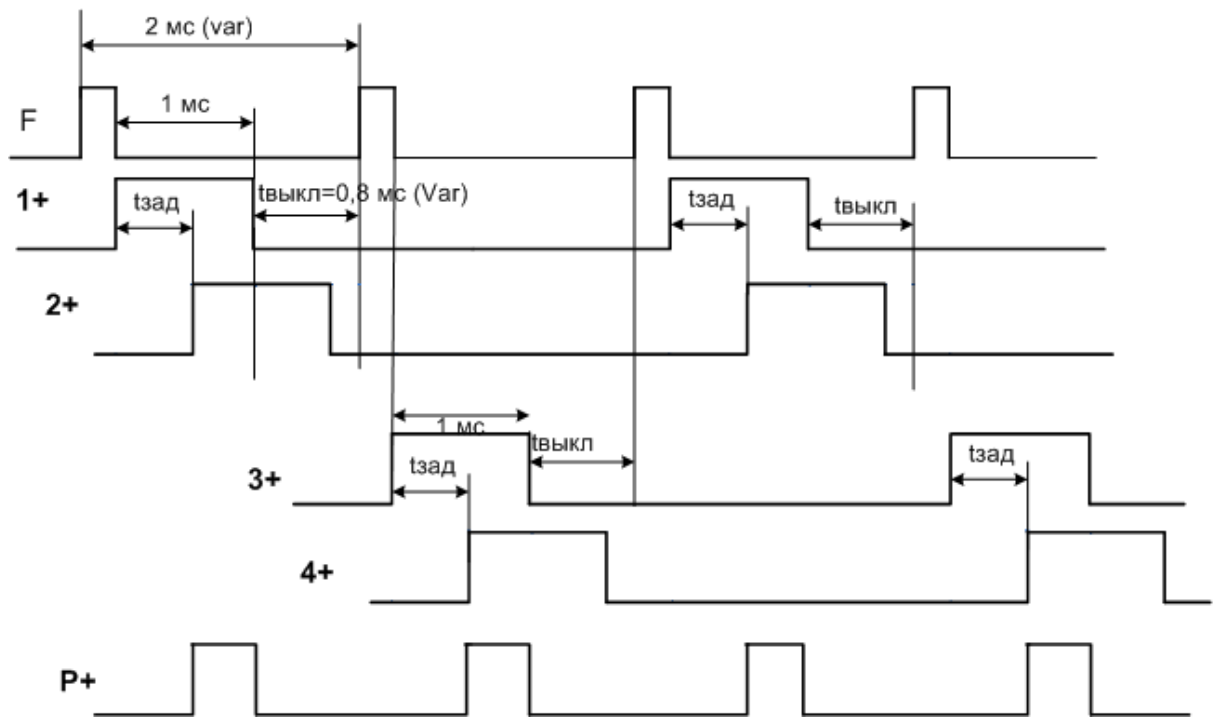


Рисунок 2.5 – Время открытия клапанов

В данном случае за счет такой конструкции блока клапанов, тракт подачи давления практически все время, с небольшими за счет задержек промежутками, открыт.

Аналогичным образом работает тракт на сброс давления.

Для управления клапанами стоит блок (рисунок 2.6).

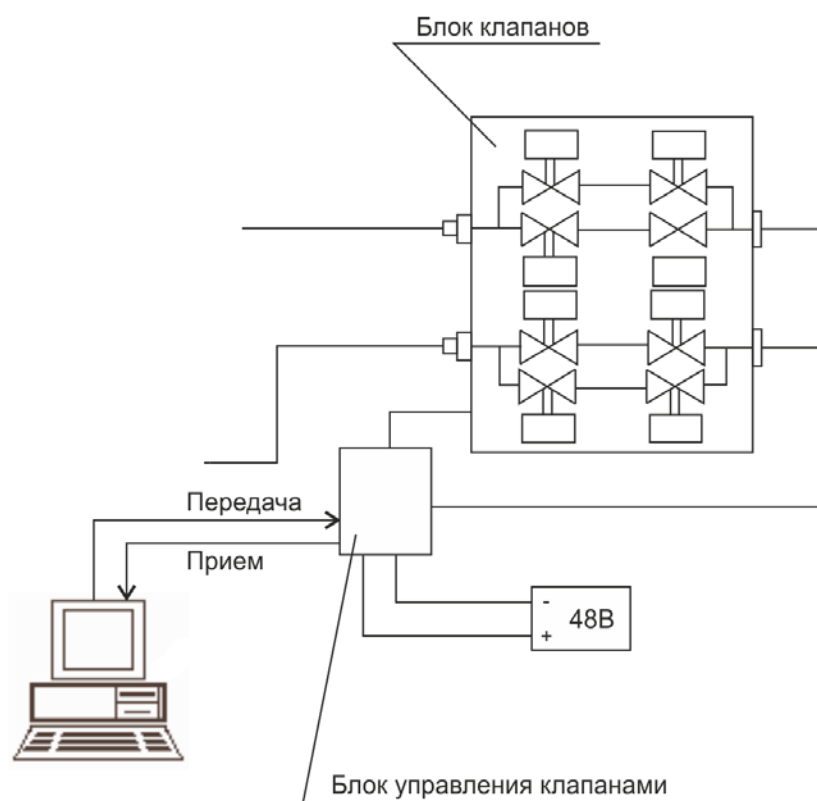


Рисунок 2.6 – Блок управления клапанами

В данный момент в качестве блока управления клапанами используется отладочная плата Arduino Mega 2560.

Блок управления считывает данные с измерительных датчиков и отправляет их на персональный компьютер через последовательный порт, затем сравнивает полученные данные с входным сигналом и подает команду на открытие или закрытие клапанов. Так же рассчитывается время, на которое открываются клапаны, и задержка между открытием клапанов. Тем самым производится регулировка уровня давления в ресивере.

Так же функцией блока управления клапанами является расчет погрешности сформированного давления и отправка этих данных на персональный компьютер через последовательный компьютер.

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

2.2 Выбор элементной базы для стенда

Разработку метода будем вести на основе динамического измерительного стенда. В ходе отладки стенда было выяснено, что слабыми местами являются клапаны и микроконтроллер с программным обеспечением (ПО) нижнего уровня.

Рассмотрим более подробно клапаны, используемые в ДИС.

В данном стенде используются высокочастотные клапаны SX10 производства SMC Corporations. Они имеют высокую скорость срабатывания, около 0.45 мс на включение и около 0.4 мс на выключение, и пропускную способность 150 л/мин.

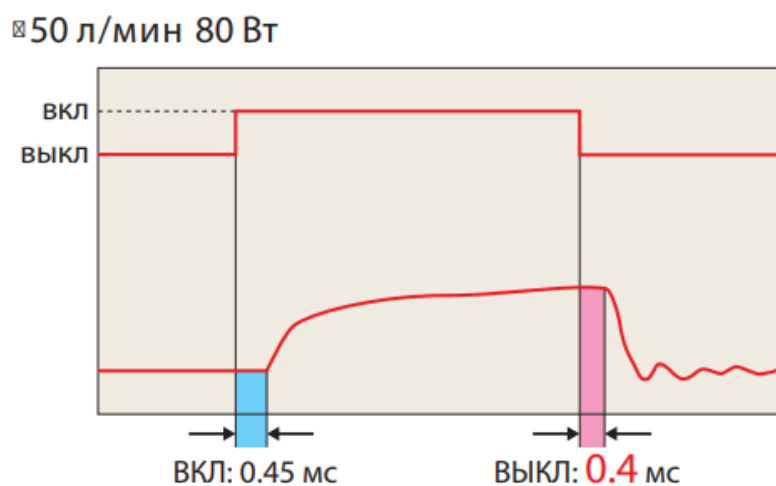


Рисунок 2.7 – Время срабатывания клапана

Особенностью данных клапанов является то, что они имеют минимальное рабочее давление равное 150 кПа, а максимальное рабочее давление – 700 кПа. Из этого можем сделать вывод, что для корректной работы нужна разность давления на входе и выходе клапана. Это и является тем фактором, из-за которого последовательное включение клапанов в одной цепи будет работать не достаточно корректно.

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

Поэтому необходимо найти замену данным клапанам с аналогичными характеристиками:

- быстродействие;
- диапазон рабочих давлений;
- пропускная способность.

Исходя из требований к алгоритму, указанных в пункте 1.1, можем сделать вывод, стенд на основе данного алгоритма должен формировать следующее давление:

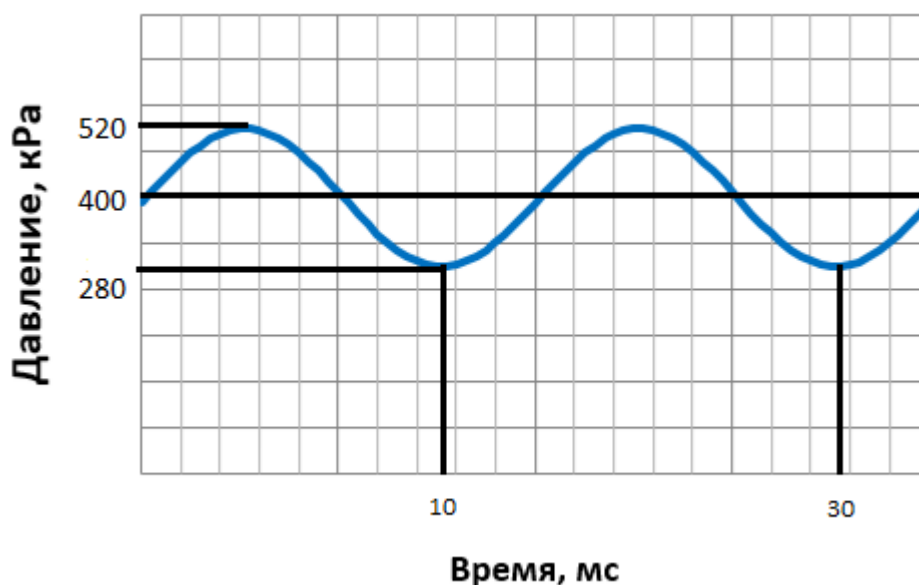


Рисунок 2.8 – График давления

Из графика видим, что сигнал должен формироваться с частотой 50 Гц. Пересчитав, получаем период сигнала 20 мс.

Перепад давления 240 кПа за половину периода.

Следовательно, получаем скорость нарастания функции $24 \frac{\text{кПа}}{\text{мс}}$.

Затем необходимо с помощью скорости нарастания функции получить пропускную способность клапанов.

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

Расход воздуха клапанов указывают в $\frac{\text{л}}{\text{мин}}$. С помощью уравнения состояния идеального газа:

$$P \cdot V_p = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T, \quad (2.1)$$

где P – давление;

V_p – объем камеры;

m – масса вещества;

M – молярная масса вещества;

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

Выразим массу:

$$m = \frac{P \cdot V_p \cdot M}{R \cdot T}. \quad (2.2)$$

Т.к. масса и давление постоянно изменяются:

$$\frac{\Delta m}{t} = \frac{\Delta P \cdot V_p \cdot M}{t \cdot R \cdot T}. \quad (2.3)$$

Для перехода от килограммов к литрам, необходимо, массу разделить на удельный вес воздуха γ , который равен $1,293 \frac{\text{г}}{\text{л}}$.

Получим:

$$\frac{\Delta V}{t} = \frac{\Delta P \cdot V_p \cdot M}{t \cdot R \cdot T \cdot \gamma}. \quad (2.4)$$

Подставим значения и получим необходимый расход воздуха для обеспечения требований предъявляемых к разрабатываемому стенду.

$$\frac{\Delta V}{t} = \frac{24 \cdot 0,02 \cdot 29}{0,001 \cdot 8,314 \cdot 293 \cdot 1,293} = 4,41 \frac{\text{нл}}{\text{с}}. \quad (2.5)$$

Умножив на 60 получим расход воздуха равный $265 \frac{\text{нл}}{\text{мин}}$.

Был найден клапан Solenoid Valves 820 Series производства Matrix. Данный клапан с контролем ускорения имеет время отклика менее 1 мс, как при открытии, так и при закрытии, с максимальной рабочей частотой 500 Гц. Помимо высокоскоростных характеристик, электромагнитные клапаны серии 820 обеспечивают скорость потока до 180 л/мин, с давлением подачи от 0 до 800 кПа. При давлении 400 кПа скорость потока будет 90 л/мин.

Управляя клапаном с помощью технологии PWM (широтно-импульсная модуляция) или PFM (импульсно-частотная модуляция), можно изменять скорость прохождения потока и таким образом получать электромагнитный клапан с пропорциональным расходом [11].

Конструкция данного клапана представлена на рисунке 2.9.

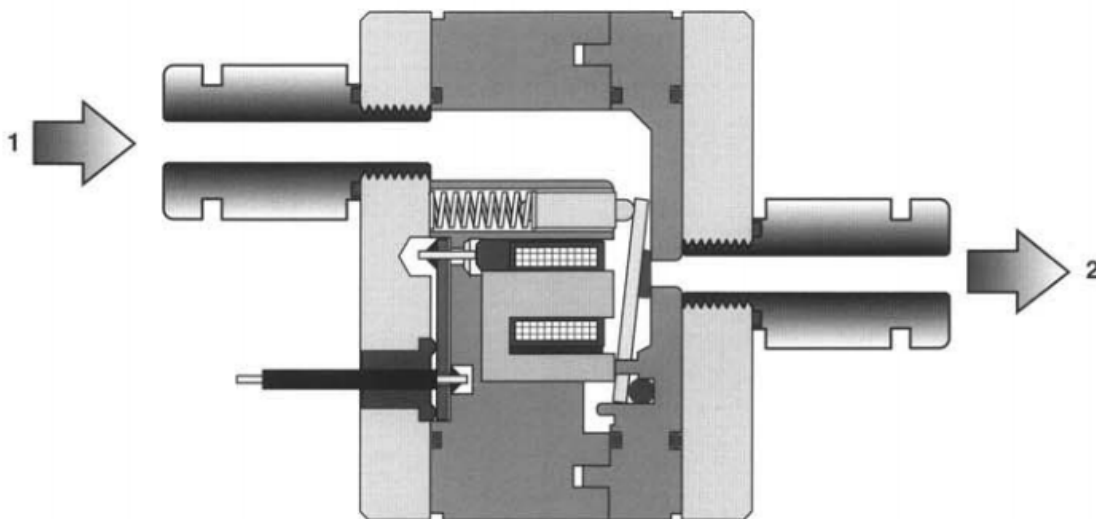


Рисунок 2.9 – Конструкция клапана Matrix 820 Series

Данный клапан имеет конструкцию затворного типа. Для его работы не требуется разность давления на входе и выходе клапана.

Можем сделать вывод, что данный клапан не имеет достаточной пропускной способности для наших требований.

Был найден пневматический электромагнитный клапан серии 851, который имеет тип 2/2.

Его модульность представляет собой нововведение в этой серии. Девять независимых жалюзи с общей пневматической подачей и с отдельными или сборными выходами для увеличения расхода. Время отклика в миллисекундах не зависит от значения скорости потока, а его оперативный ресурс составляет более 500 миллионов циклов.

Серия подходит для ступенчатого изменения расхода (до девяти ступеней в варианте с одним выходом), превращая простой 2/2 в электромагнитный клапан, имеющий пропорциональный расход и абсолютную повторяемость. Кроме того, комбинируя различные методы управления (например, PWN и PNM), скорость потока может изменяться по линейной зависимости. Благодаря наличию элементов управления типа ускорения, динамические функции еще более улучшены. Следовательно, время отклика для стандартных соленоидных клапанов с 24-вольтовым управлением составляет менее 5 мс при открытии и ниже 2 мс при закрытии, а максимальная рабочая частота составляет 200 Гц. Время срабатывания электромагнитного клапана с регулированием скорости, как при открытии, так и при закрытии, составляет менее 1 мс с максимальной рабочей частотой 500 Гц.

Помимо высокоскоростных функций, соленоидные клапаны с текущими значениями расхода 851 Series соответствуют 1620 л/мин с давлением подачи от 2 до 8 бар.

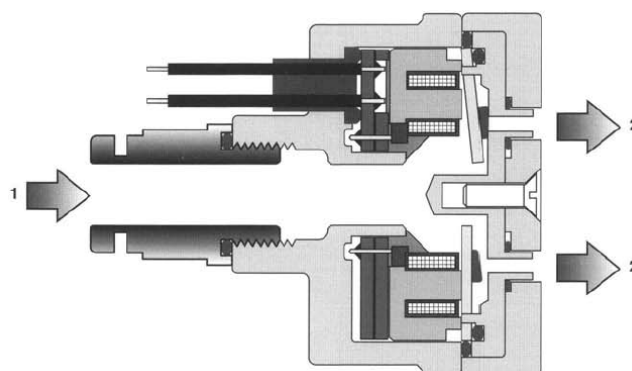


Рисунок 2.10 – Конструкция клапана 851 Series

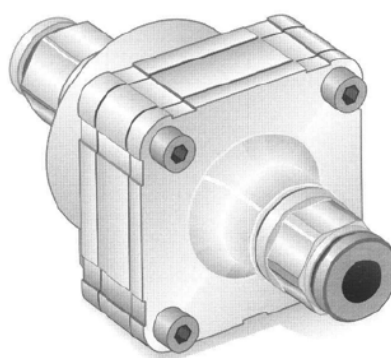


Рисунок 2.11 – Внешний вид клапана 851 Series

Проанализировав его быстродействие и пропускную способность можем сделать вывод, что для наших требований данный клапан подходит.

Далее был найден пневматический электромагнитный клапан, относящийся к серии 860 РСМ, размещен в одном корпусе с девятью затворами отдельно.

Время отклика как при открытии, так и при закрытии составляет менее миллисекунды и не зависит от значения расхода.

Следовательно, изменение величины потока происходит с незначительным фазовым запаздыванием (более 1 мс) в отношении электрического управления даже в случае мгновенного изменения от минимального до максимального значения, допускаемого соленоидным клапаном.

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

Срок службы составляет более 500 миллионов циклов для каждого затвора.

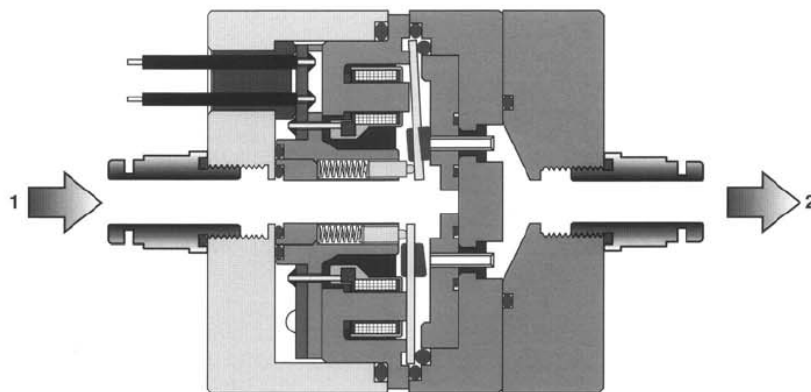


Рисунок 2.12 – Конструкция клапана 860 Series

Модели клапанов серии 860 РСМ с переменным расходом доступны с двумя различными точными уровнями управления расходом: 64 уровня потока с 6-битной конфигурацией и 256 уровнями расхода с 8-битной конфигурацией.

При 6-битной конфигурации данный клапан имеет пропускную способность 752,84 л/мин при 600 кПа, а версия с 8-битной конфигурацией – 506,13 л/мин.

Данные клапаны нам также подходят.

Далее был найден клапан Festo МНJ-НF имеющий индивидуальное электрическое соединение через соединительный кабель и квадратные штекерные разъемы со встроенной электроникой управления для МНJ9 или с помощью литого кабеля для МНJ10.

Время переключения данного клапана менее одной миллисекунды.

Диапазон регулирования сигнала от 3 до 30 В постоянного тока.

Срок службы составляет до 5 миллиардов переключений.

Данный клапан имеет пропускную способность 160 л/мин при давлении 600 кПа.

Далее был найден пневматический клапан 750 серии включающий 2/2, 3/2, 3/3 или 5/2-ходовые клапаны в одном корпусе в конфигурации NC или NO.

Серия включает в себя версии Vacuum, предназначенные для использования с вакуумной техникой. Благодаря возможности управления ускорением динамические характеристики еще более улучшаются: стандартные электромагнитные клапаны, оснащенные 24-вольтовым управлением, имеют время срабатывания менее 5 мс при открытии и 2 мс при закрытии с максимальной рабочей частотой 200 Гц. Напротив, электромагнитные клапаны, оснащенные ускорением, обеспечивают время отклика как при открытии, так и при закрытии менее 2 мс при максимальной рабочей частоте 300 Гц.

Помимо высокоскоростных характеристик, электромагнитные клапаны серии 751 обеспечивают скорость потока до 700 л/мин, при давлении подачи 6 бар.

Сведем все данные в одну таблицу.

Таблица 2.1 – Характеристики клапанов

| | SMC SX10 | Matrix 751 Series 3/2 | Matrix 821 Series 2/2 | Matrix 851 Series 2/2 | Matrix 860 Series 2/2 | Festo MHJ-HF |
|---|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| Время срабатывания (ВКЛ/ВЫКЛ), мс | 0.45 / 0.40 | ~2 / ~2 | ~1 / ~1 | ~1 / ~1 | ~1 / ~1 | ~1.0 / ~0.8 |
| Минимальное рабочее давление, кПа | 150 | 0 | 0 | 200 | 0 | 50 |
| Максимальное рабочее давление, кПа | 700 | 800 | 800 | 800 | 600 | 600 |
| Пропускная способность, л/мин при P=400 кПа | 210 | 500 | 90 | 650 | 375 | 107 |

2.3 Корректировка алгоритма управления стендом

Для дальнейшей работы два варианта реализации алгоритма: на 3-х ходовых клапанах 751 серии и 2-х ходовых клапанах 860 серии.

Расположение клапанов для варианта на клапанах 751 серии будет следующим:

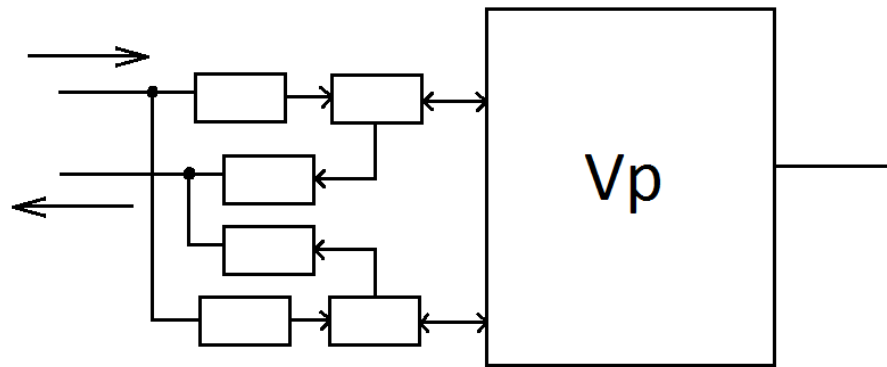


Рисунок 2.13 – Расположение клапанов

Временная диаграмма включения клапанов:

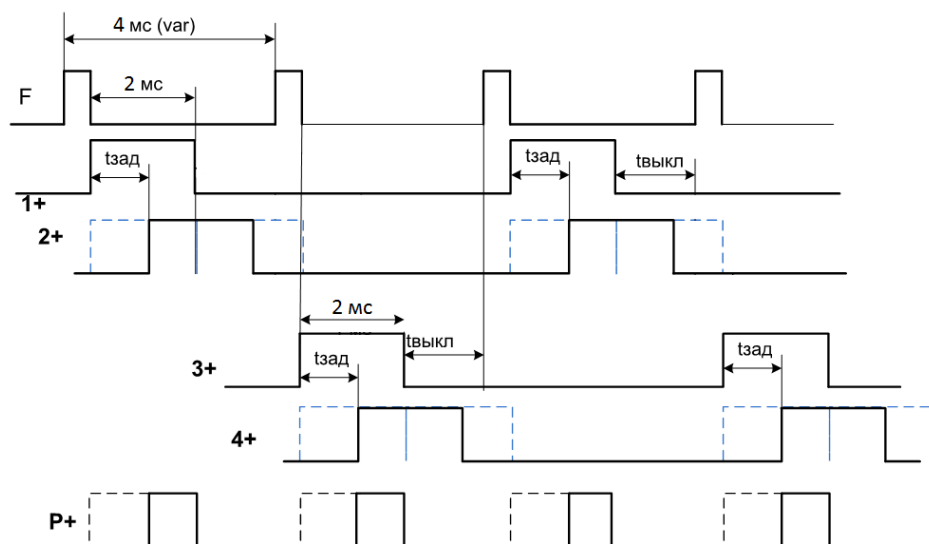


Рисунок 2.14 – Временная диаграмма

Вариант расположения клапанов 860 серии выглядит следующим образом:

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

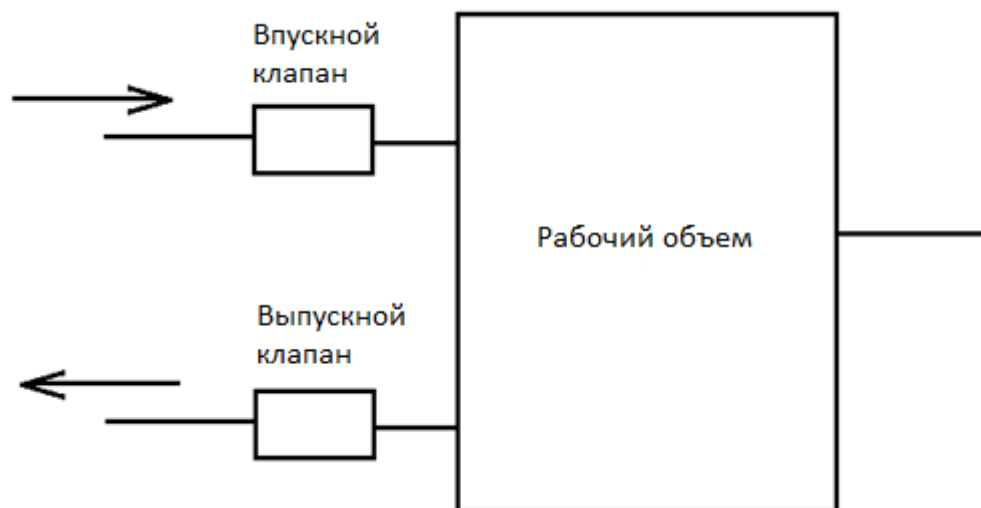


Рисунок 2.15 – Расположение клапанов

Клапана в данном случае будут включаться по очереди. Внутри клапана находятся шесть или восемь каналов с разной пропускной способностью. В зависимости от того сколько нужно подать или сбросить воздуха, будут использоваться определенные каналы.

В основе блока управления клапанами был микроконтроллер Atmega 2560, характеристики которого приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики Atmega 2560

| | |
|-------------------------|--------|
| Тактовая частота | 16 МГц |
| Флэш-память | 256 кБ |
| ОЗУ | 8 кБ |
| Разрядность шины данных | 10 бит |

В процессе отладки стенда было выявлено, что скорости выполнения операций в ПО недостаточно для наших задач. Поэтому было принято решение перейти с платформы AVR на ARM.

Первые микроконтроллеры AVR были разработаны в 1996 году компанией Atmel (теперь часть Microchip). Проект AVR был разработан Альф-Эгилем Богеном и Вегаром Волланом, поэтому AVR аббревиатура получила две первые буквы от имен разработчиков: Alf-Egil Bogen Vegard Wollan RISC, после эта аббревиатура стала расшифровываться более официально как Advanced Virtual RISC.

Микроконтроллеры AVR доступны в трех основных подсемействах:

TinyAVR: меньше памяти, небольшой размер, подходит только для более простых приложений.

MegaAVR: это популярные микроконтроллеры, в основном имеющие относительно большое количество памяти (до 256 КБ), большее количество встроенных периферийных устройств и подходят для довольно сложных приложений.

XmegaAVR: используются в коммерческих приложениях для решения сложных задач, которым требуется большая память программ и высокая скорость.

В последние несколько лет произошло возрождение любителей и изобретателей, создающих нестандартные электронные устройства. В этих системах используются готовые компоненты и модули, разработка которых была вызвана технологическим взрывом встроенных датчиков и исполнительных механизмов, включающих большую часть аналоговой электроники, которая ранее представляла барьер для разработки системы не-инженерами. Микроконтроллеры с нестандартной микропрограммой обеспечивают связь между сложными готовыми модулями в сложных пользовательских системах.

Семейство микроконтроллеров STM32, основанное на ядре ARM CortexM3, обеспечивает основу для построения широкого спектра встроенных систем от простых батарейных ключей до сложных систем реального времени, таких как автопилоты вертолетов. Это семейство компонентов включает в себя десятки различных конфигураций, обеспечивающих широкий выбор размеров памяти, доступных периферийных устройств, производительности и мощности.

Компоненты являются достаточно недорогими в небольших количествах – несколько долларов для наименее сложных устройств – чтобы оправдать их использование для большинства приложений с небольшим объемом. Действительно, бюджетные компоненты «Value Line» сопоставимы по стоимости с частями ATmega, которые используются для популярных плат разработки Arduino, но предлагают значительно более высокую производительность и более мощные периферийные устройства. Кроме того, используемые периферийные устройства совместно используются многими членами семейства (например, модули USART являются общими для всех компонентов STM32 F1) и поддерживаются единой библиотекой встроенного программного обеспечения. Таким образом, изучение программирования одного члена семейства STM32 F1 позволяет программировать их все.

К сожалению, мощность и гибкость достигаются за счет затрат – разработка программного обеспечения для семейства STM32 может быть чрезвычайно сложной задачей для непосвященных с широким спектром документации и программных библиотек, чтобы пройти через них. Например, RM0041, справочное руководство для устройств STM32 F1 составляет 675 страниц и даже не охватывает ядро процессора Cortex-M3! К счастью, нет необходимости читать эту книгу, чтобы начать разработку программного обеспечения для STM32, хотя это важный справочник. Кроме того, новичок сталкивается со многими вариантами цепочки инструментов.

В отличие от этого, платформа Arduino предлагает простую библиотеку приложений и единую цепочку инструментов, доступную для относительно неопытных программистов. Для многих простых систем это предлагает быстрый путь к прототипу. Однако простота имеет свои издержки – программная платформа Arduino не очень подходит для управления одновременными действиями в сложной системе реального времени и для взаимодействия программного обеспечения с внешними устройствами зависит от библиотек, разработанных вне модели программирования Arduino с использованием

инструментов и методы, аналогичные тем, которые требуются для STM32. Кроме того, платформа Arduino не предоставляет возможности отладки, которая серьезно ограничивает разработку более сложных систем. Опять же, отладка требует выхода за пределы платформы Arduino. Наконец, среда Arduino не поддерживает операционную систему реального времени (ОСРВ), что важно при создании более сложных встроенных систем.

Микроконтроллеры с ядром ARM также являются одним из семейств процессоров на базе архитектуры RISC, разработанным компанией Advanced RISC Machines (ARM).

Микроконтроллеры STM32 F1xx основаны на ядре ARM CortexM3. Cortex-M3 также является основой для микроконтроллеров ряда других производителей, включая TI, NXP, Toshiba и Atmel. Совместное использование общего ядра означает, что инструменты разработки программного обеспечения, включая компилятор и отладчик, являются общими для широкого спектра микроконтроллеров. Cortex-M3 отличается от предыдущих поколений процессоров ARM определением ряда ключевых периферийных устройств как части базовой архитектуры, включая контроллер прерываний, системный таймер, а также оборудование для отладки и трассировки (включая внешние интерфейсы). Этот дополнительный уровень интеграции означает, что системное программное обеспечение, такое как операционные системы реального времени, и инструменты разработки оборудования, такие как интерфейсы отладчика, могут быть общими для всего семейства процессоров. Различные семейства микроконтроллеров на базе Cortex-M3 существенно различаются с точки зрения аппаратных периферийных устройств и памяти – периферийные устройства семейства STM32 архитектурно полностью отличаются от периферийных устройств семейства NXP даже в тех случаях, когда они имеют схожую функциональность. Далее мы познакомимся с ключевыми аспектами ядра Cortex-M3 и микроконтроллеров STM32 F1xx.

Процессор Cortex-M3 показан в верхнем левом углу. Компоненты линии значений имеют максимальную частоту 24 МГц – другие процессоры STM32 могут поддерживать тактовую частоту 72 МГц. Основная часть рисунка иллюстрирует периферийные устройства и их взаимосвязь. Процессор обнаружения имеет 8 Кбайт SRAM и 128 Кбайт флэш-памяти. Существуют две периферийные коммуникационные шины – APB2 и APB1, поддерживающие широкий спектр периферийных устройств.

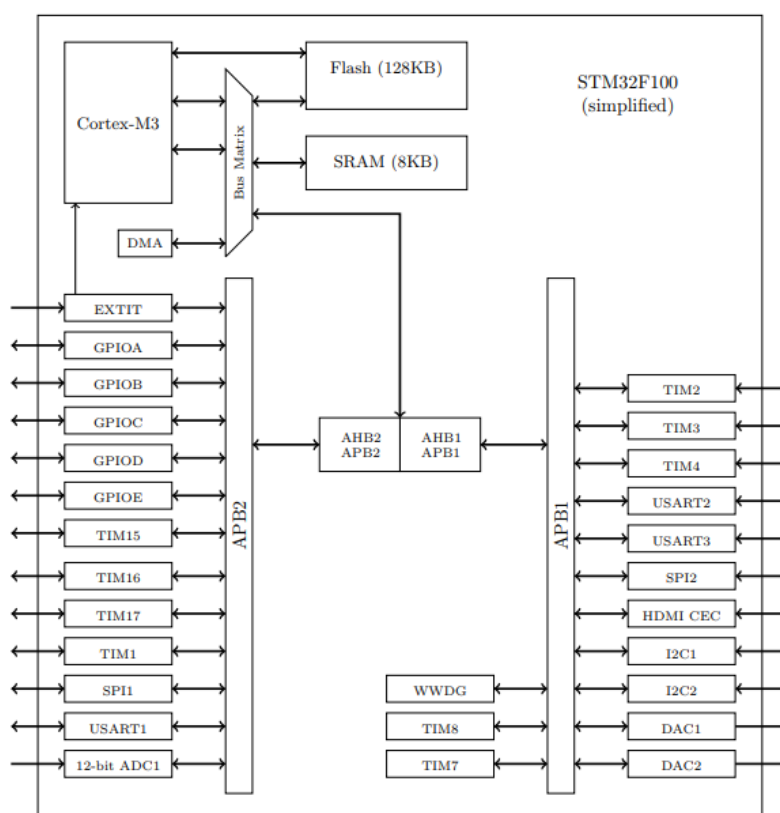


Рисунок 2.16 – Архитектура

Архитектура ядра Cortex-M3 состоит из 32-разрядного процессора (CM3) с небольшим набором ключевых периферийных устройств. Ядро CM3 имеет гарвардскую архитектуру, что означает, что оно использует отдельные интерфейсы для извлечения инструкций (Inst) и (Data). Это помогает

гарантировать, что процессор не испытывает недостатка памяти, поскольку позволяет одновременно получать доступ к данным и памяти команд. С точки зрения CM3 все выглядит как память – оно различает только выборки команд и доступ к данным. Интерфейс между Cortex-M3 и оборудованием конкретного производителя осуществляется через три шины памяти – ICode, DCode и System – которые определены для доступа к различным областям памяти.

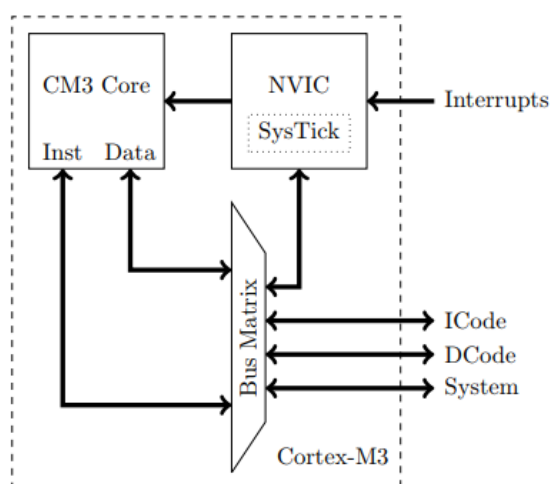


Рисунок 2.17 – Архитектура

STM32 соединяет три шины, определенные Cortex-M3, через матрицу шин уровня микроконтроллера. В STM32 шина ICode соединяет интерфейс команд CM3 с флэш-памятью, шина DCode соединяется с флэш-памятью для извлечения данных, а системная шина обеспечивает доступ для чтения / записи к SRAM и периферийным устройствам STM32. Периферийная подсистема поддерживается шиной АНВ, которая дополнительно разделена на две области вспомогательной шины АНВ1 и АНВ2. STM32 предоставляет сложный контроллер прямого доступа к памяти (DMA), который поддерживает прямую передачу данных между периферийными устройствами и памятью.

Микроконтроллеры ARM основаны на 32-битных и 64-битных многоядерных процессорах RISC. Процессоры RISC предназначены для выполнения меньшего

количества инструкций, чтобы они могли работать с большей скоростью, выполняя дополнительные миллионы инструкций в секунду (MIPS). Устраняя ненужные инструкции и оптимизируя обработку информации, RISC-процессоры обеспечивают большую производительность по сравнению с AVR микроконтроллерами [10].

Таблица 2.3 – Сравнение AVR и ARM

| | AVR | ARM |
|-----------------------------|--|---|
| Разрядность | 8/32 бит | 32 бит, иногда 64 бит |
| Интерфейсы | UART, USART, SPI, I2C, иногда CAN, USB, Ethernet | UART, USART, LIN, I2C, SPI, CAN, USB, Ethernet, I2S, DSP, SAI, IrDA |
| Скорость | 1 такт на инструкцию | 1 такт на инструкцию |
| Память | Flash, SRAM, EEPROM | Flash, SDRAM, EEPROM |
| Шинная архитектура | RISC | RISC |
| Архитектура памяти | Модифицированная | Модифицированная гарвардская |
| Энергопотребление | Низкое | Низкое |
| Семейства | Tiny, Atmega, Xmega, спец. AVR | ARM v4,5,6,7... |
| Производители | Atmel (Microchip) | Apple, Nvidia, Qualcomm, Samsung Electronics, TI |
| Стоимость | Средняя | Низкая |
| Популярные микроконтроллеры | Atmega8, 16, 32; вариации для Arduino | LPC2148, ARM Cortex-M0, ARM Cortex-M3, ARM Cortex-M7 |

Выбор пал на отладочную плату Nucleo-f303RE на основе микроконтроллера STM32f303RET6 (ARM-cortex M4).

Выводы по главе:

1. Был проанализирован метод формирования сигналов на ДИС. В ходе отладки стенда было выяснено, что необходимо найти замену клапанам и микроконтроллеру.
2. Была подобрана элементная база для стенда.
3. Для дальнейшего исследования был выбран вариант алгоритма формирования сигналов на основе электропневмоклапанов Matrix 860 Series.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 67 |

3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДА

В данной главе необходимо смоделировать алгоритмы, выбранные в предыдущей главе и оценить полученные данные.

Одним из факторов, определяющих уровень развития современного общества и его интеллектуальные возможности, является оснащённость его средствами вычислительной техники. Сфера использования ЭВМ в настоящее время настолько широка, что нет такой области, где ее применение было бы нецелесообразным [16].

Совершенствование методики изучения основ компьютерного моделирования предполагает разработку компьютерных моделей физических, технических, биологических и социальных систем. Excel это многофункциональный табличный процессор, включающий в себя электронные таблицы, средства визуального программирования и графический модуль. Можно предположить, что применение табличного процессора Excel при изучении физики и компьютерного моделирования будет способствовать более глубокому пониманию рассматриваемых вопросов [13].

Схема ПИД-регулятора выглядит следующим образом:

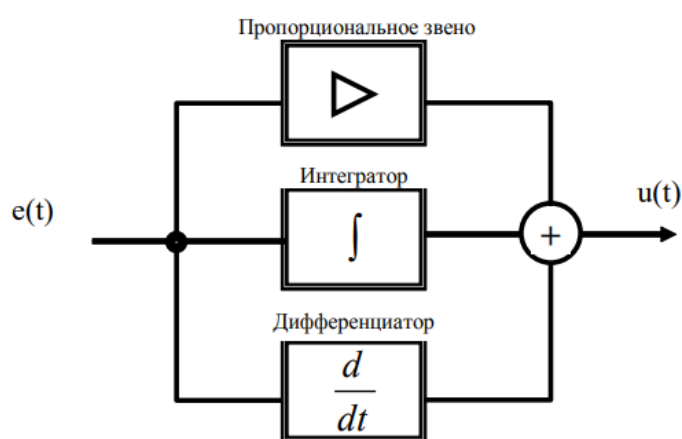


Рисунок 3.1 – Схема ПИД-регулятора

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

Закон ПИД-управления выглядит как сумма входящих в состав ПИД-регулятора управляющих компонент:

$$u_{pid}(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int e(t)dt + k_d \cdot (y(t) - y(t - 1)). \quad (3.1)$$

Основная проблема в процессе использования этих регуляторов является необходимость настройки его параметров: коэффициента усиления, постоянной времени интегрирования и постоянной времени дифференцирования, причем системы автоматического регулирования должны удовлетворять заданным критериям качества переходных процессов (по быстрдействию, перерегулированию, степени затухания и т.д.) [15, 17, 18].

В настоящее время наиболее известными методами расчета параметров настройки автоматических регуляторов являются следующие:

1. метод Циглера-Никольса (Ziegler-Nichols);
2. метод Кохен-Куна; (Cohen-Coon);
3. метод Чиен (Chien)-Хронеса (Hrones)-Ресвика (Reswick);
4. метод Такахаша (Takahashi).

Считается, что достаточно лишь обеспечить приближённое соответствие характеристик модели реальному процессу, а уточнение параметров регулятора и характера динамических процессов в системе регулирования достигается путем коррекции настроечных коэффициентов на технологическом объекте в процессе внедрения. Большое значение при выборе метода настройки регуляторов придается их простоте и низкой трудоемкости [19, 20].

3.1 Настройка регулятора на основе метода Циглера-Никольса.

Для определения настроечных параметров регулятора по методу Циглера-Никольса используются зависимости, приведенные в таблице 3.1 [23, 14].

Таблица 3.1 – Зависимости для определения параметров регулятора по методу Циглера-Никольса

| Закон регулирования | K_p | T_i | T_d |
|---------------------|-------------------------------|------------------|--------------------|
| ПИД | $83,3 \cdot \tau_d \cdot R_R$ | $2 \cdot \tau_d$ | $0,5 \cdot \tau_d$ |

где R_R – максимальная скорость реакции объекта ($R_R = \frac{\Delta PV/\tau_c}{\Delta MV}$);

ΔMV – изменение управляющего воздействия;

ΔPV – изменение регулируемого параметра, вызванное изменением управляющего воздействия ΔMV ;

τ_c – постоянная времени объекта;

τ_d – время запаздывания;

K_p – коэффициент усиления;

T_i – постоянная времени интегрирования;

T_d – постоянная времени дифференцирования.

3.2 Настройка регулятора на основе метода Кохен-Куна

Для настройки регулятора методом Кохен-Куна используются зависимости, приведенные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Зависимости для определения параметров регулятора методом Кохен-Куна

| Закон регулирования | K_p | T_i | T_d |
|---------------------|---|---|---|
| ПИД | $\frac{100}{1,35 \cdot (1 + \frac{\mu}{5})} \cdot \tau_d \cdot R_R$ | $2,5 \cdot \tau_d \cdot \left[\frac{1 + \frac{\mu}{5}}{1 + \frac{3 \cdot \mu}{5}} \right]$ | $\frac{0,37 \cdot \tau_d}{1 + \frac{\mu}{5}}$ |

где $\mu = \frac{\tau_d}{\tau_c}$

3.3 Настройка регулятора на основе метода Чиена-Хронеса-Ресвика

Для настройки параметров регулятора по методу Чиена-Хронеса-Ресвика используются зависимости, приведенные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Зависимости для настройки регулятора по методу Чиена-Хронеса-Ресвика

| Закон регулирования | K_p | T_i | T_d |
|---------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| ПИД | $105 \cdot \tau_d \cdot R_R$ | $2.4 \cdot \tau_d$ | $0,4 \cdot \tau_d$ |

3.4 Настройки регулятора на основе метода Такахаша

Для настройки параметров регулятора по методу Такахаша используются зависимости, приведенные в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Зависимости для настройки регулятора по методу Такахаша

| Закон регулирования | K_p | T_i | T_d |
|---------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| ПИД | $77 \cdot \tau_d \cdot R_R$ | $2.2 \cdot \tau_d$ | $0,45 \cdot \tau_d$ |

На практике из-за отсутствия специальных знаний и теоретического материала данные регуляторы настраиваются обслуживающим персоналом путем эмпирического подбора коэффициентов, что не всегда обеспечивает хорошее качество стабилизации регулируемых параметров. В лучшем случае используются

инженерные методы настройки регуляторов, при которых обработка данных производится вручную (графоаналитическими способами). Данная процедура требует от исполнителя особого опыта, а также отнимает много времени на построение графиков переходных процессов, их обработку и вычисление коэффициентов [21, 22].

Для решения указанной проблемы требуется разработка аналитических процедур идентификации динамических свойств объекта и определения на их основе наилучших (в соответствии с выбранным критерием качества) настроечных коэффициентов регулятора.

Реализация функции авто настройки стала возможной благодаря появлению и использованию на технологических объектах современных программно-технических комплексов, обладающих высокими вычислительными возможностями и быстродействием.

Оценка динамических свойств объекта заключается в определении по кривой разгона коэффициентов математической модели объекта управления, которую, в общем случае, можно представить передаточной функцией вида (3.2):

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1)^n}, \quad (3.2)$$

где $K_{об}$ – коэффициент усиления объекта;

$T_1 > T_2$ – постоянные времени апериодических звеньев, характеризующих инерционность объекта;

n – количество одинаковых звеньев.

С точки зрения применимости ПИД-регулятор универсален, но его коэффициенты зависят от формы входного сигнала, будь то синусоидальный, прямоугольный или какой-либо другой сигнал. Т.е. ПИД-регулятор нужно подстраивать под каждый вид входного сигнала [31].

Для того чтобы сделать систему универсальной, чтобы каждый раз не

перестраивать регулятор под нужный вид сигнала, заменим его расчетными формулами. В данном случае это будет расчет необходимого расхода для получения ошибки рассогласования равной нулю.

3.5 Схема регулирования

При проведении идентификации характеристик объекта управления, одним из важных показателей, характеризующих динамические свойства объекта, является скорость изменения регулируемого параметра [24].

Схема регулирования представлена на рисунке 3.2.

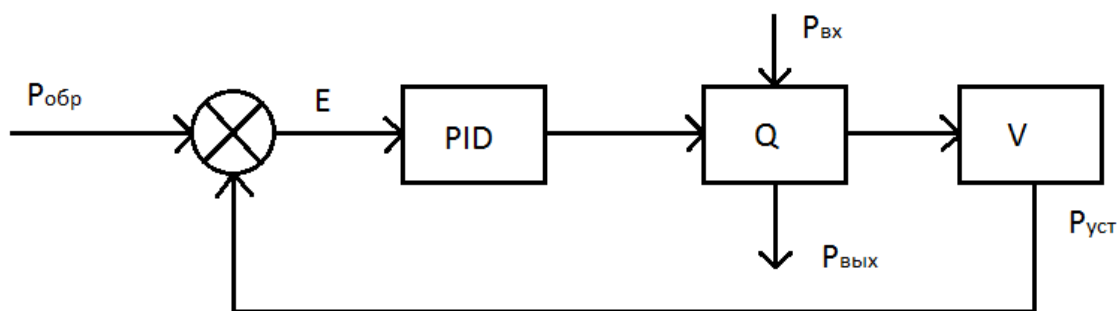


Рисунок 3.2 – Схема регулирования

где $P_{обр}$ – образцовое давление;

E – ошибка рассогласования;

PID – ПИД-регулятор;

С ПИД-регулятора поступает управляющий сигнал;

$P_{вх}$ – входное давление;

$P_{вых}$ – выходное давление;

Q – расход воздуха;

V – рабочий объем;

$P_{уст}$ – установившееся давление в рабочем объеме.

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

Далее необходимо описать звенья схемы регулирования функциями.

Функция ПИД-регулятора представлена формулой 3.1.

ПИД-регулятор формирует управляющее воздействие на блок клапанов.

Расход воздуха будет описываться следующей функцией:

$$Q = f(P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}, P_V, u_{\text{возд}}, k), \quad (3.3)$$

где $u_{\text{возд}}$ – управляющее воздействие на клапаны;

k – коэффициенты клапанной системы (пропускная способность, ...).

Функция давления в рабочем объеме выглядит следующим образом:

$$P = f(Q, V). \quad (3.4)$$

Для нахождения расхода воздуха через клапаны воспользуемся следующим уравнением, представляющим собой эллиптическое приближение связи между давлением и расходом, полученным во второй главе.

$$Q_N = C \cdot P_1 \cdot K_t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r-b}{1-b}\right)^2}, \quad (3.5)$$

где Q_N – расход в нл/с при нормальных условиях;

C – пропускная способность клапана в л/(с·бар);

P_1 – абсолютное давление на входе в барах;

r – отношение между давлениями P_2/P_1 ;

$b = \frac{P_2^*}{P_1}$ – критический коэффициент давления есть отношение абсолютного давления на выходе P_2 к абсолютному давлению на входе P_1 , при котором поток становится звуковым;

$K_t = \sqrt{\frac{293}{T_1}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий абсолютную

температуру на входе T_1 ;

$T_1 = 273 + t_1$ – абсолютная температура в К, в то время как t_1 – температура в °С.

Применять данную формулу можем только в том случае, если изменение давления за единицу времени незначительно.

В данном случае будем решать задачу с конца. Главной целью является описание давления в объеме с помощью формул.

Схема регулирования с контрольным датчиком давления представлена на рисунке 3.3.

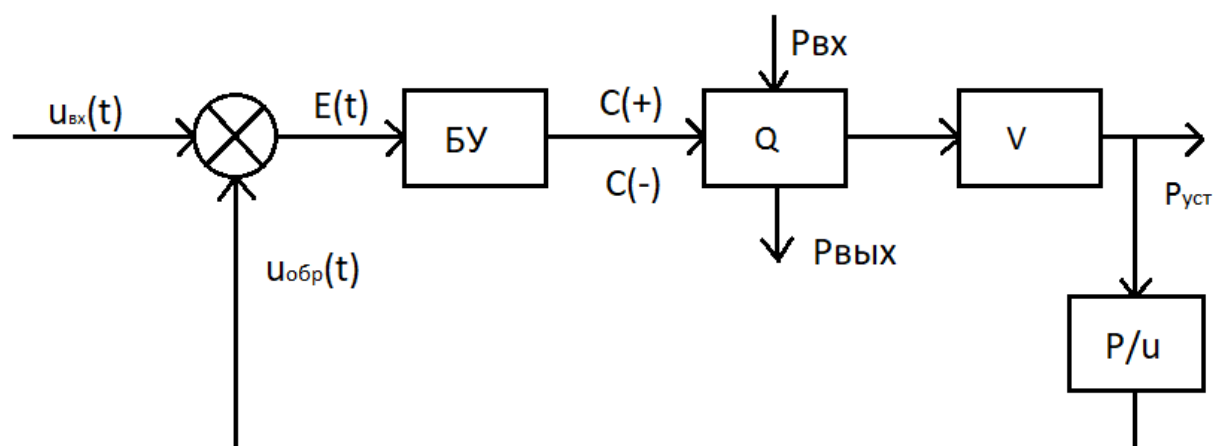


Рисунок 3.3 – Схема регулирования

Ошибка рассогласования находится по следующей формуле:

$$E(t) = u_{\text{вх}}(t) - u_{\text{обр}}(t). \quad (3.6)$$

Если входной сигнал больше выходного, то необходимо закачать порцию воздуха. Если входной сигнал меньше выходного, то необходимо выкачать

порцию воздуха. Величина порции воздуха определяется коэффициентом C из 3.5 умноженным на время t .

Для измерения давления в объеме и преобразования его в напряжение необходимо установить контрольный датчик давления с полосой пропускания заведомо шире выходного сигнала. Поэтому в частотном диапазоне работы системы данный датчик можем считать линейным звеном. В этом случае формула выходного напряжения примет вид:

$$u_{\text{обр}}(t) = k_{\text{д}} \cdot P_{\text{уст}}(t), \quad (3.7)$$

где $k_{\text{д}}$ – коэффициент передачи датчика.

Формула, описывающая давление, будет содержать в себе значение давления в объеме $P_{\text{уст}}(t)$, количество воздуха $V(t)$, которое представляет собой сумму количества воздуха $V(t)_{+}$, закаченного в объем V_p и количества воздуха $V(t)_{-}$, выкачанного из объема V_p .

Запишем формулу зависимости давления от количества воздуха.

$$P_{\text{уст}}(t) = V(t) \frac{R \cdot T \cdot \gamma}{V_p \cdot M}. \quad (3.8)$$

$$V(t) = Q(t) \cdot t + V_{i-1}(t). \quad (3.9)$$

Для проверки запишем все размерности:

$$\text{бар} = \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot \text{с} \cdot \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{\frac{\text{м}^3 \cdot \text{кг}}{\text{моль}}}. \quad (3.10)$$

$$\text{бар} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}. \quad (3.11)$$

$$\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3}. \quad (3.12)$$

$$\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}. \quad (3.13)$$

Обе стороны равны, делаем вывод, что формула верна.

Формула для нахождения расхода воздуха в общем виде будет выглядеть одинаково для клапанов на подачу и на сброс, за исключением того момента, что в первом случае давление P_1 остается постоянным, а давление P_2 – постоянно изменяется, а во втором случае наоборот.

Для клапана на подачу давления P_1 это давление на входе системы $P_{\text{вх}}$, а P_2 – установившееся давление в объеме $P_{\text{уст}}$.

Для клапана на сброс давления P_1 это $P_{\text{уст}}$, а P_2 – давление на выходе системы $P_{\text{вых}}$.

Вследствие того, что проектируемая система будет дискретной в формулу добавляется время открытого состояния клапанов Δt :

$$V(t) = C_+ \cdot \Delta t \cdot P_{\text{вх}} \cdot K_t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_{\text{уст}} - b}{P_{\text{вх}} - b}\right)^2} - C_- \cdot \Delta t \cdot P_{\text{уст}} \cdot K_t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_{\text{вых}} - b}{P_{\text{уст}} - b}\right)^2}. \quad (3.14)$$

где Δt – время открытого состояния клапанов.

Для проверки запишем все размерности:

$$M^3 = \frac{M^3}{c \cdot \text{бар}} \cdot c \cdot \text{бар} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{\text{бар}}{\text{бар}} - \frac{\text{бар}}{\text{бар}}}{1 - \frac{\text{бар}}{\text{бар}}} \right)^2} - \frac{M^3}{c} \cdot c \cdot \text{бар} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{\text{бар}}{\text{бар}} - \frac{\text{бар}}{\text{бар}}}{1 - \frac{\text{бар}}{\text{бар}}} \right)^2}. \quad (3.15)$$

$$M^3 = M^3. \quad (3.16)$$

В нашем случае задача решается следующим образом, ошибку рассогласования приравниваем к 0, т.е. входной давление становится равно выходному. Затем рассчитывается пропускная способность C .

$$E(t)_{>0} = u_{\text{ВХ}}(t) - k_D \cdot \frac{R \cdot T \cdot \gamma}{V_p \cdot M} \cdot C_+ \cdot \Delta t \cdot P_{\text{ВХ}} \cdot K_t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{P_{\text{УСТ}}}{P_{\text{ВХ}}} - b}{1 - b} \right)^2}. \quad (3.17)$$

$$E(t)_{\leq 0} = u_{\text{ВХ}}(t) - k_D \cdot \frac{R \cdot T \cdot \gamma}{V_p \cdot M} \cdot C_- \cdot \Delta t \cdot P_{\text{УСТ}} \cdot K_t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{УСТ}}} - b}{1 - b} \right)^2}. \quad (3.18)$$

Для проверки запишем все размерности:

$$B = B - k_D \cdot \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \frac{\text{К} \cdot \text{кг}}{\text{м}^3}}{\frac{\text{м}^3 \cdot \text{кг}}{\text{моль}}} \cdot \frac{\text{м}^3}{c \cdot \text{бар}} \cdot c \cdot \text{бар} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{\text{бар}}{\text{бар}} - \frac{\text{бар}}{\text{бар}}}{1 - \frac{\text{бар}}{\text{бар}}} \right)^2}. \quad (3.19)$$

$$B = B - k_D \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}. \quad (3.20)$$

$$B = B. \quad (3.21)$$

$$C_+ = \frac{\frac{u_{\text{ВХ}}(t)}{R \cdot T \cdot \gamma} - V(t)_{i-1}}{\frac{V \cdot p \cdot M}{k_{\text{Д}} \cdot P_{\text{ВХ}} \cdot \Delta t \cdot K_t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_{\text{УСТ}} - b}{P_{\text{ВХ}}}\right)^2}}}. \quad (3.22)$$

$$C_- = \frac{\frac{u_{\text{ВХ}}(t)}{R \cdot T \cdot \gamma} - V(t)_{i-1}}{\frac{V \cdot p \cdot M}{k_{\text{Д}} \cdot P_{\text{УСТ}} \cdot \Delta t \cdot K_t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_{\text{ВЫХ}} - b}{P_{\text{УСТ}}}\right)^2}}}. \quad (3.23)$$

Далее необходимо с помощью выведенных выше формул смоделировать в системе Excel данный алгоритм.

В процессе моделирования выполняется:

1. Расчет входной синусоиды по формуле:

$$\text{Sin}(in) = P_{\text{ср}} + P_{\text{ср}} \cdot U_m \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{F}{1000} \cdot t\right). \quad (3.24)$$

2. Определение знака ошибки рассогласования по формуле 3.6.
3. Расчет необходимого объема воздуха по формуле 3.9.
4. Расчет пропускной способности по формулам 3.22 и 3.23. Если рассчитанная пропускная способность больше чем максимальная пропускная способность клапана, то дальше используем максимальную.
5. Расчет расхода клапана по формуле 3.5.
6. Расчет давления воздуха в объеме по формуле 3.8.
7. Расчет погрешности формирования давления по формуле 3.25.

Исходя из требований к работе, с помощью данного алгоритма должны формироваться сигналы частотой от 1 до 50 Гц, давление от 0 до 400 кПа с пульсациями до 30 %.

Смоделируем сигнал частотой 25 Гц и средним давлением 250 кПа.

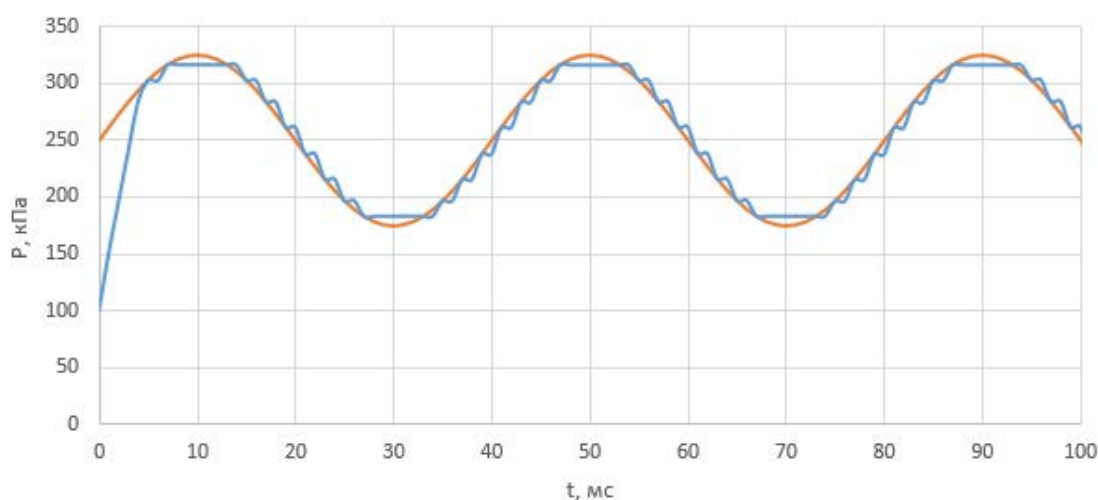


Рисунок 3.4 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

Погрешность формирования давления будет рассчитываться по следующей формуле:

$$\delta = \frac{u_{\text{ВЫХ}} - u_{\text{ВХ}}}{P_{\text{CP}} + 0.01} \cdot 100 \% \quad (3.25)$$

В данном случае погрешность будет доходить до 15 %.

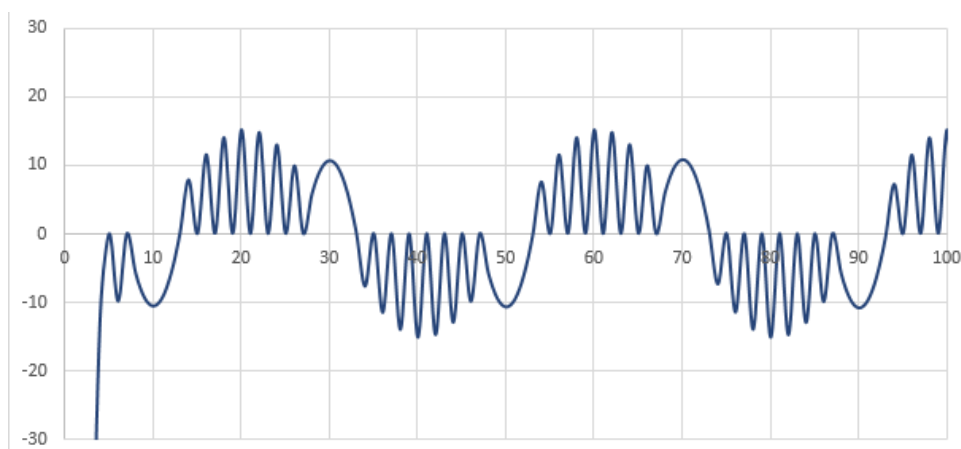


Рисунок 3.5 – График погрешности

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

Изменим амплитуду модуляции на 20 % и частоту на 50 Гц.

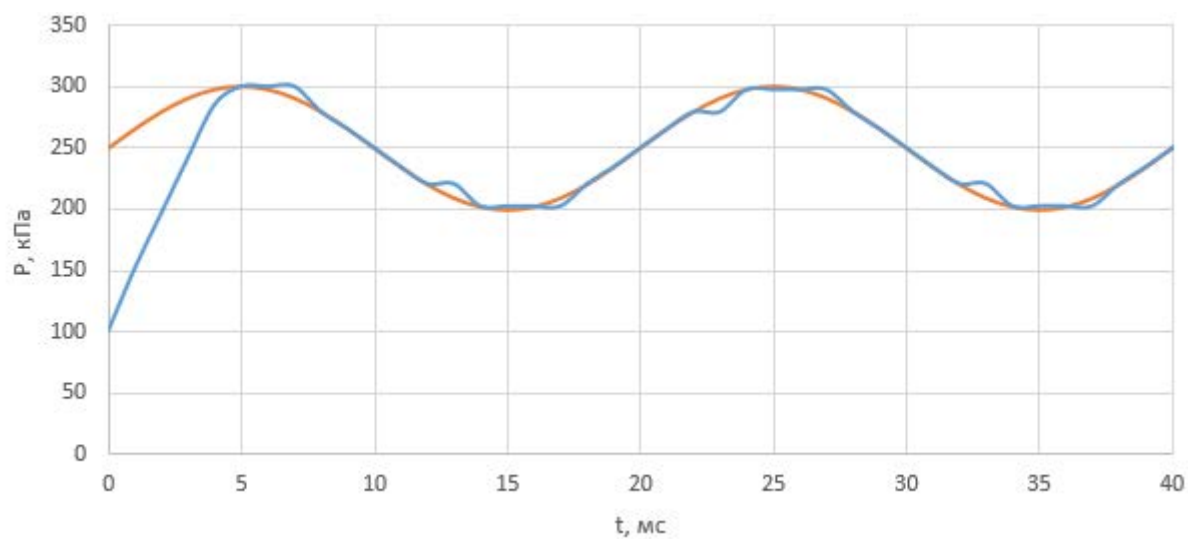


Рисунок 3.6 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

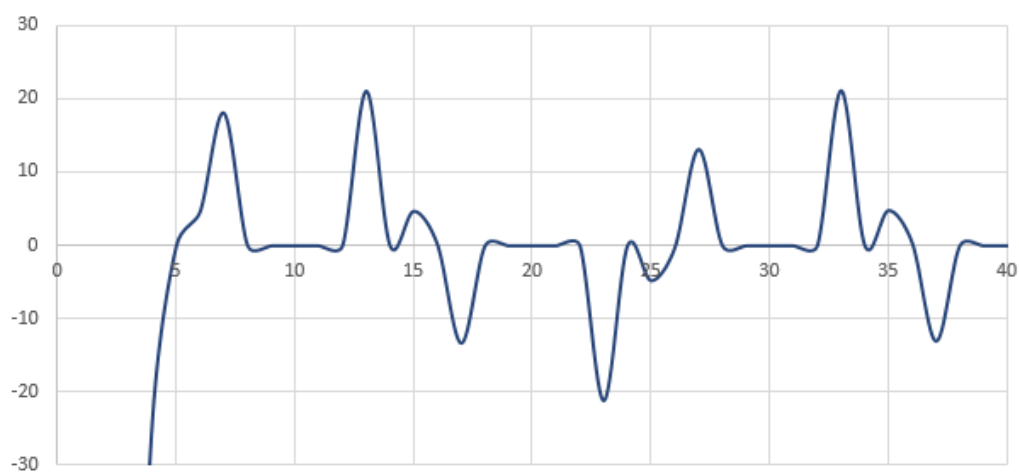


Рисунок 3.7 – График погрешности

Из графика видим, что погрешность доходит до 20 %.

Изменим амплитуду модуляции на 30 %.

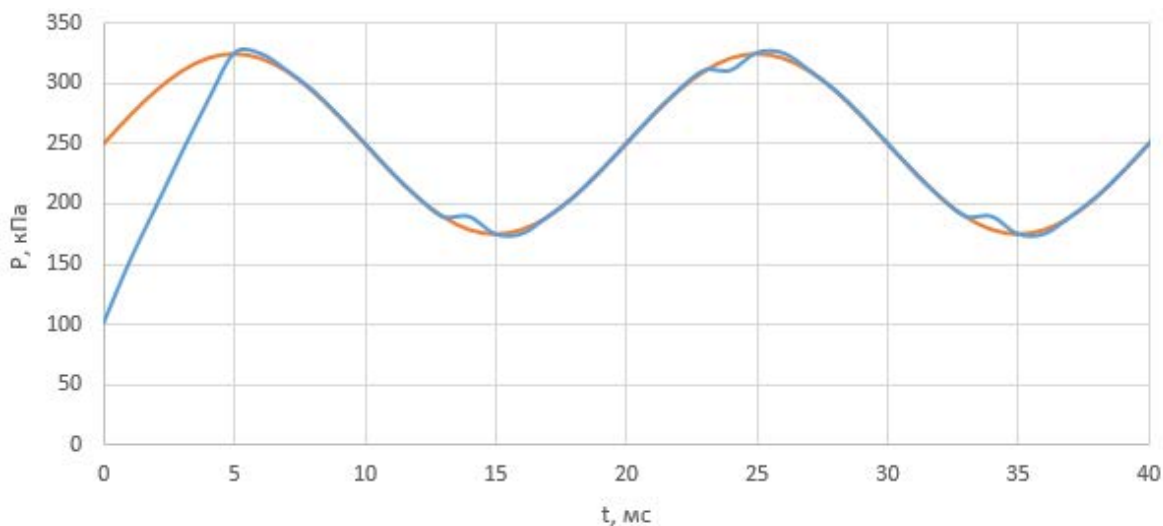


Рисунок 3.8 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

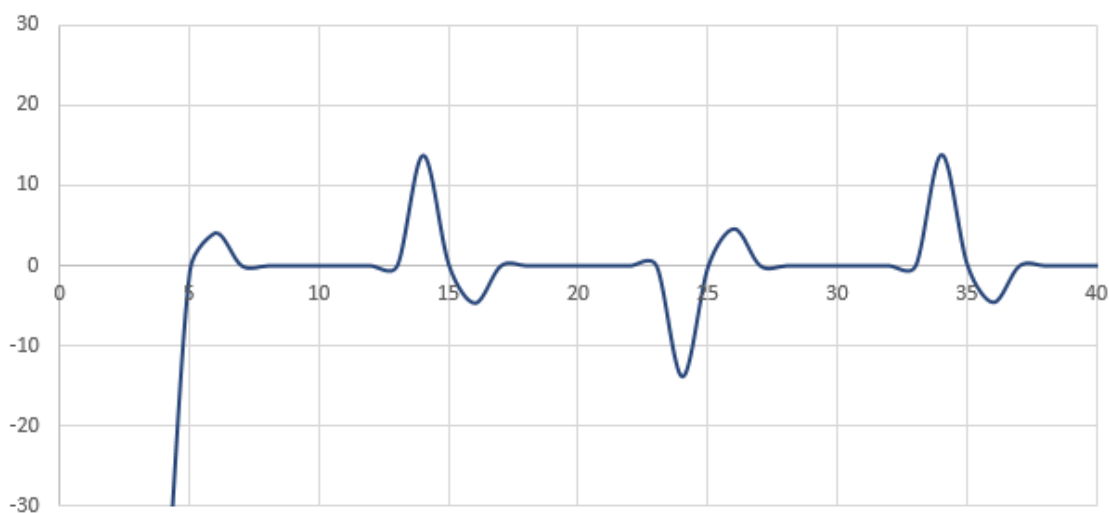


Рисунок 3.9 – График погрешности

При амплитуде модуляции 30 % видим, что сигнал формируется с погрешностью, достигающей до 15 %.

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

Изменим частоту на 1 Гц.

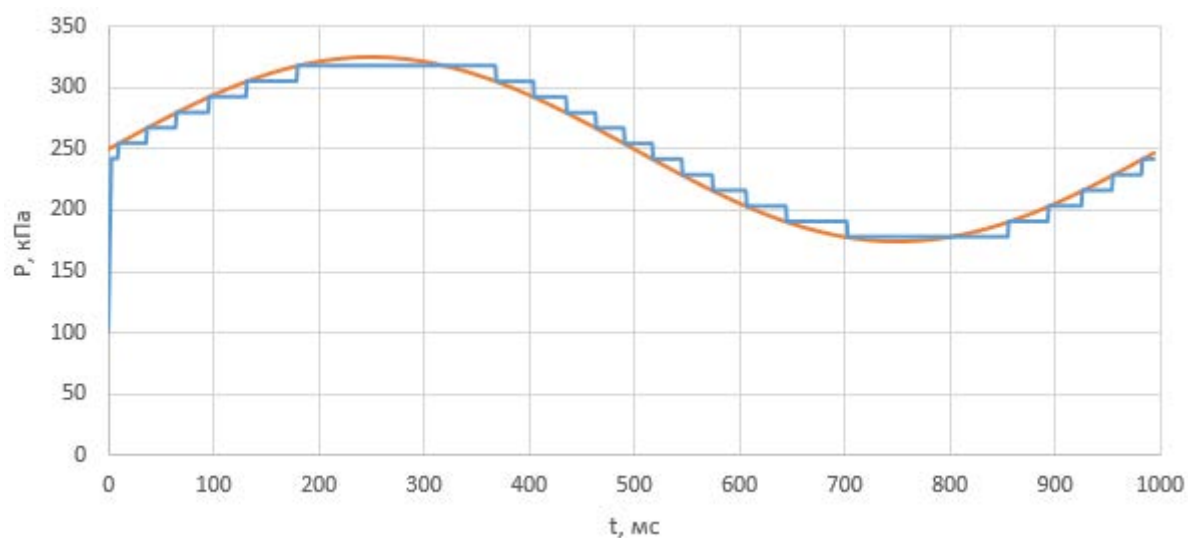


Рисунок 3.9 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

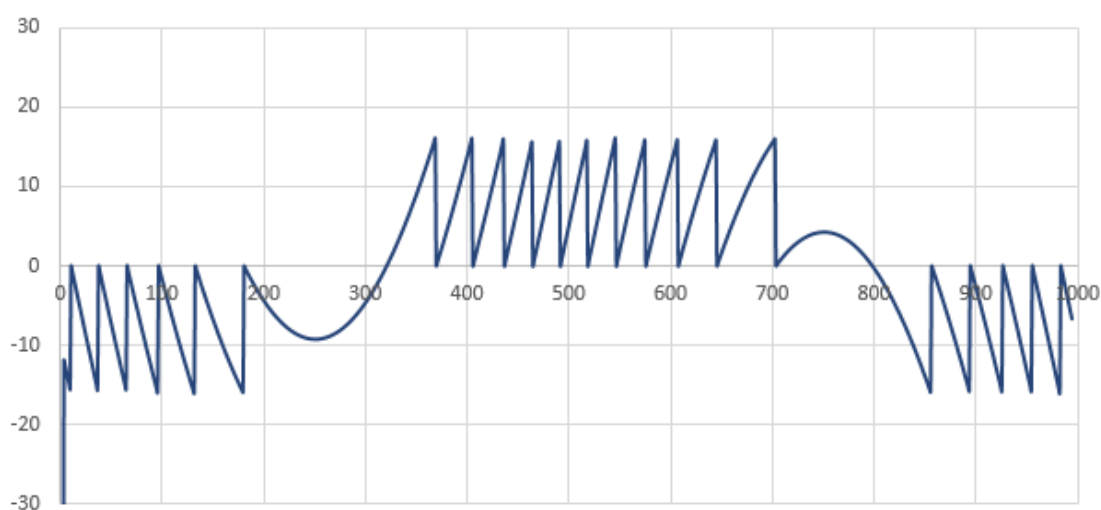


Рисунок 3.10 – График погрешности

Сигнал, в данном случае, также формируется с погрешностью, достигающей до 15 %.

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

Изменим среднее давление на 400 кПа, частота 1 Гц.

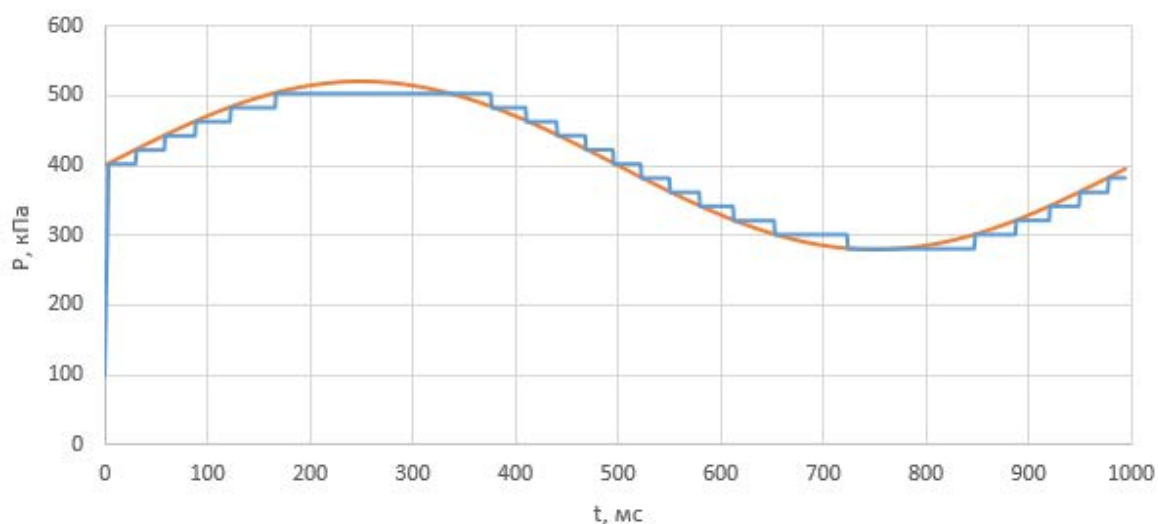


Рисунок 3.11 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

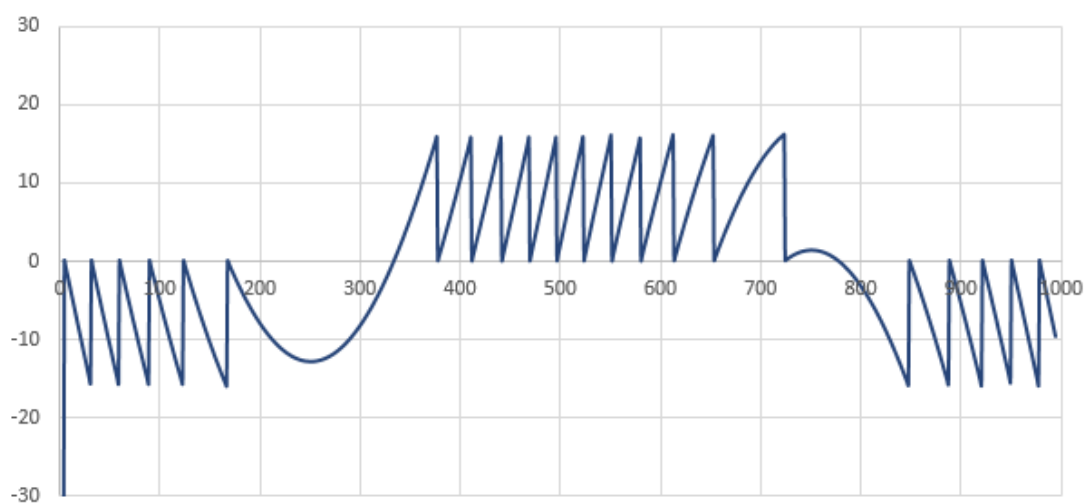


Рисунок 3.12 – График погрешности

Можем сделать вывод, что при увеличении среднего давления, погрешность формирования сигнала не увеличилась, следовательно, пропускной способности клапанов хватает.

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

Изменим частоту на 25 Гц.

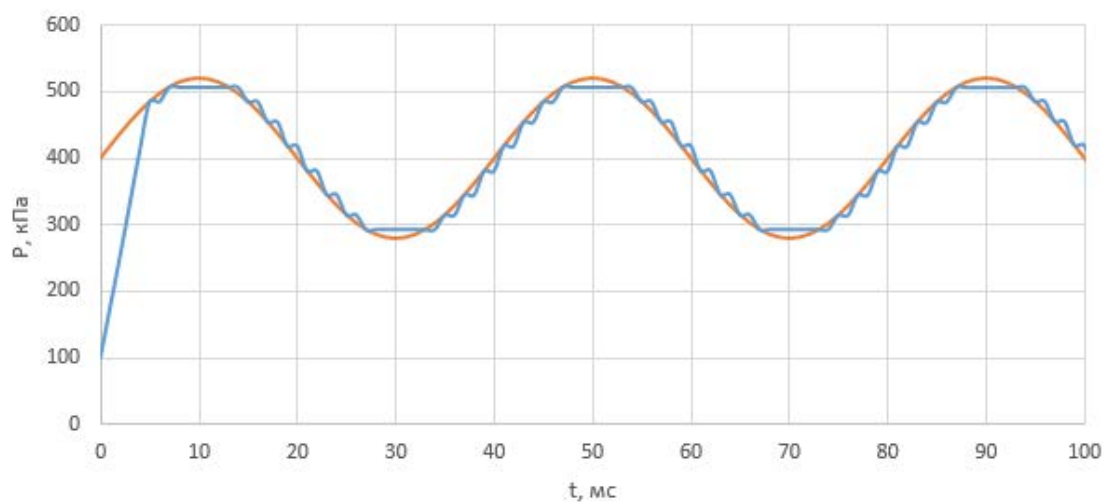


Рисунок 3.13 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

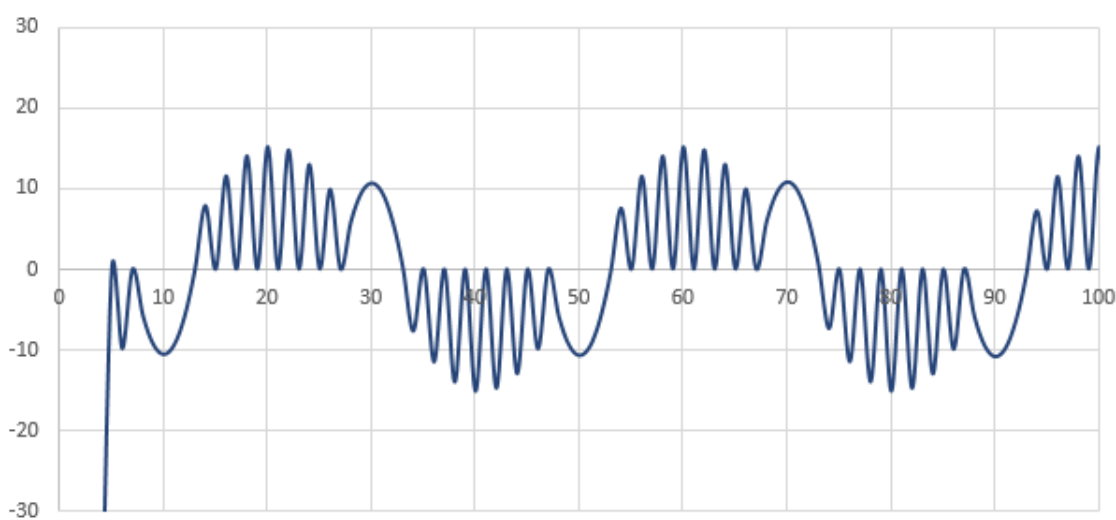


Рисунок 3.14 – График погрешности

При увеличении давления и частоты сигнал также формируется с погрешностью до 15 %.

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

Изменим частоту на 50 Гц.

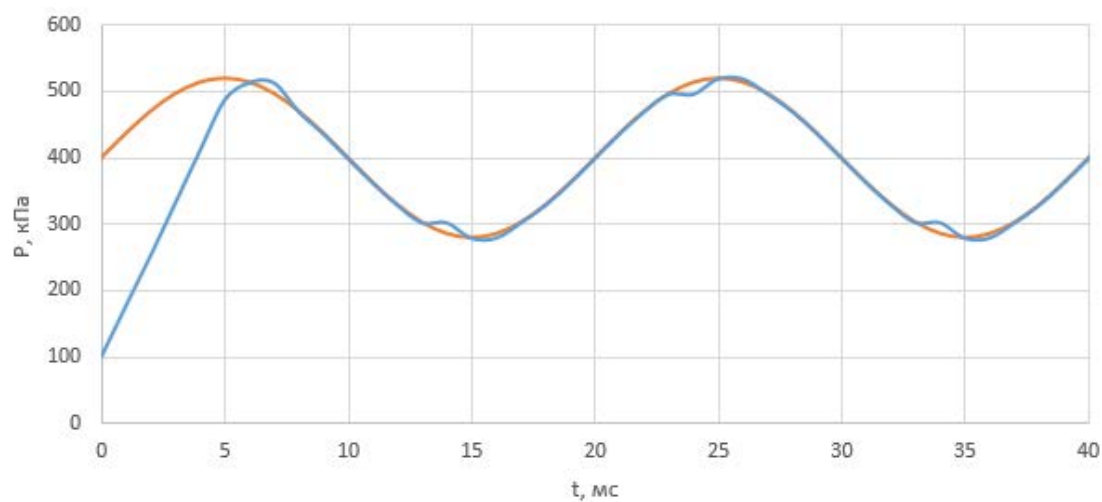


Рисунок 3.15 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

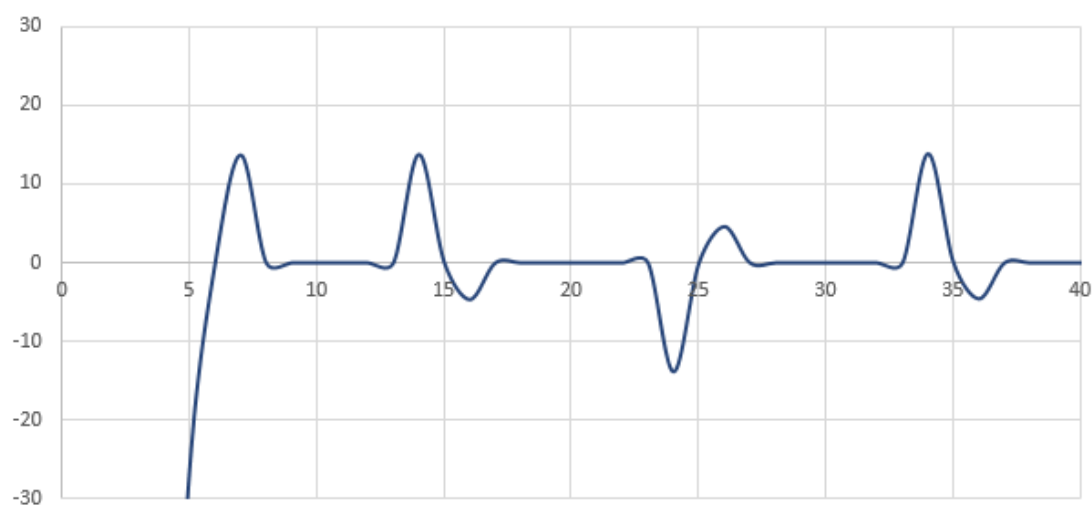


Рисунок 3.16 – График погрешности

Формирование сигнала в момент подачи и сброса давления происходит с минимальной погрешностью.

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

В процессе моделирования выяснили, что максимальная частота, на которой выходной сигнал формируется с относительной погрешностью до 20 %, это около 75 Гц.

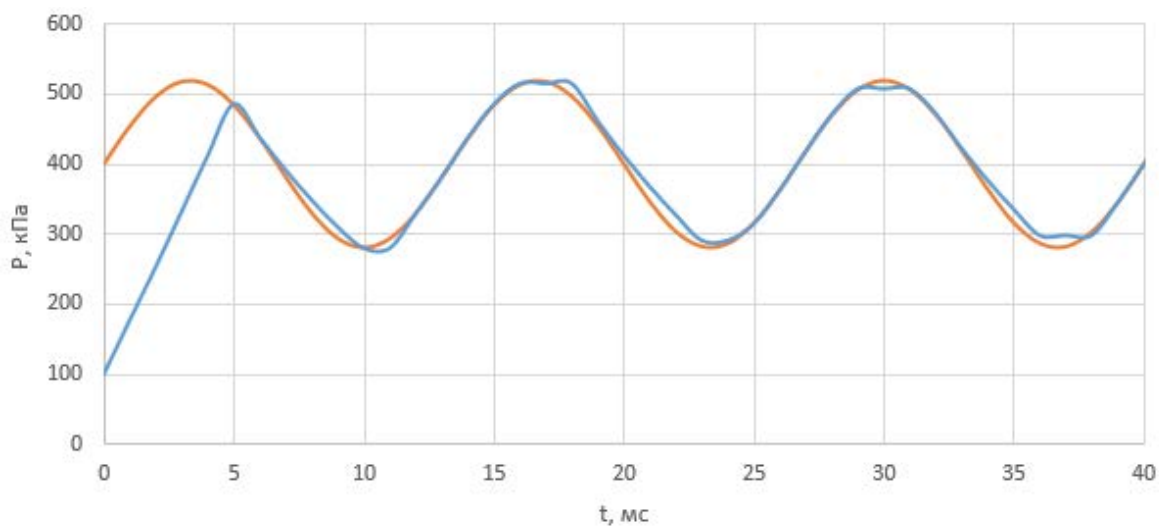


Рисунок 3.17 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

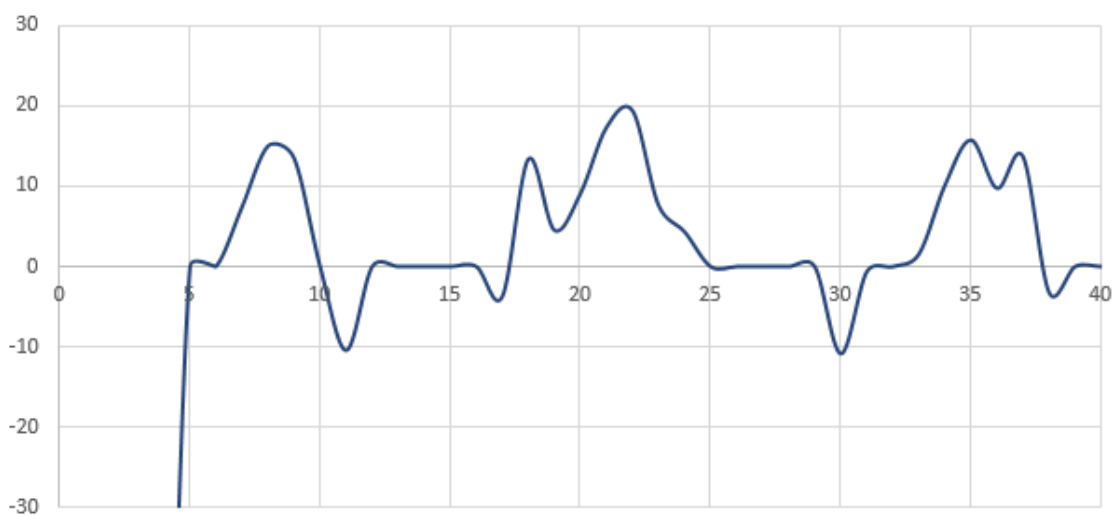


Рисунок 3.18 – График погрешности

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

Выводы по главе:

1. В данной главе был произведен анализ возможности использования ПИД-регулятора для формирования давления. Можем сделать вывод, что использование ПИД-регулятора в нашем случае нецелесообразно, т.к. система должна быть универсальной, подстраиваться под любой сигнал, а ПИД-регулятор необходимо будет каждый раз перенастраивать.

2. В данной главе был смоделирован алгоритм формирования давления. На минимальной частоте сигналы формируются с погрешностью до 15 %. Увеличивая частоту до 50 Гц, среднее давление до 400 кПа и амплитуду модуляции до 30 %, выяснили, что погрешность формирования сигналов не увеличивается. При увеличении частоты до 75 Гц получили относительную погрешность формирования пульсирующего давления около 20 %.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 88 |

4 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДА

В данной главе необходимо выяснить корректность работы смоделированного алгоритма, путем сравнения с результатами, полученными экспериментальным путем, на оборудовании кафедры, которое имеется в данный момент.

4.1 Состав стенда

На текущий момент на стенде установлены клапаны SMC SX10, описание которых было приведено во второй главе.

Данный клапан имеет высокую скорость срабатывания, около 0.45 мс на включение и около 0.4 мс на выключение, и пропускную способность 150 л/мин при 2.5 бар.

Управление клапанами происходит с помощью широтно-импульсной модуляции. Поэтому клапан не может постоянно находиться в открытом состоянии.

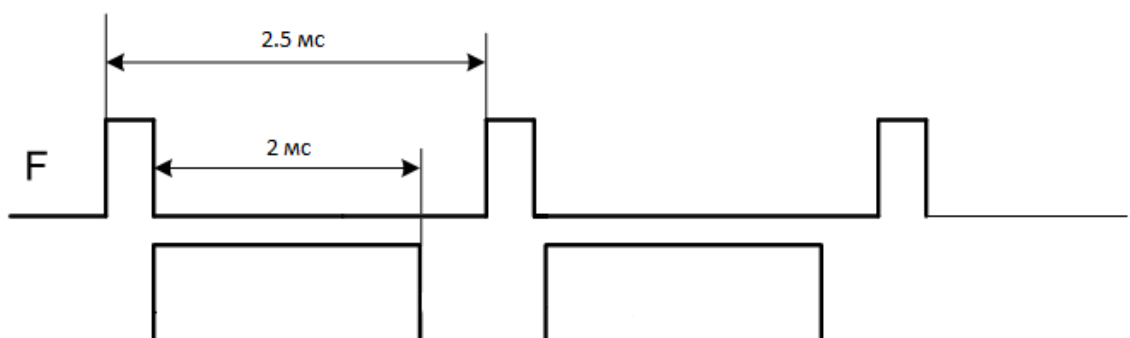


Рисунок 4.1 – Частота дискретизации

Частота дискретизации в данном случае 400 Гц, а время открытого состояния клапанов 2 мс.

В дальнейшем для проверки работоспособности алгоритма, подставим в модель вышеупомянутые параметры и сравним с экспериментальными данными полученными на динамическом измерительном стенде.

Сигнал задается с помощью генератора АКТАКОМ АНР-3122. Это двухканальный генератор, который может формировать сигнал произвольной или стандартной (синусоидальный, треугольный, прямоугольный) формы по обоим каналам одновременно с помощью математических выражений или графически. Частота выходного сигнала от 0.02 Гц до 10 МГц.

Считывание сигнала происходит с помощью виртуального осциллографа АКТАКОМ АСК-3117. Это четырехканальный виртуальный осциллограф с пределом допускаемой основной относительной погрешностью $\pm 2.5\%$.

4.2 Экспериментальные исследования

Сформируем несколько сигналов на данном стенде и определим максимальную скорость нарастания выходного сигнала, для того чтобы сравнить с этим же параметром в модели алгоритма.

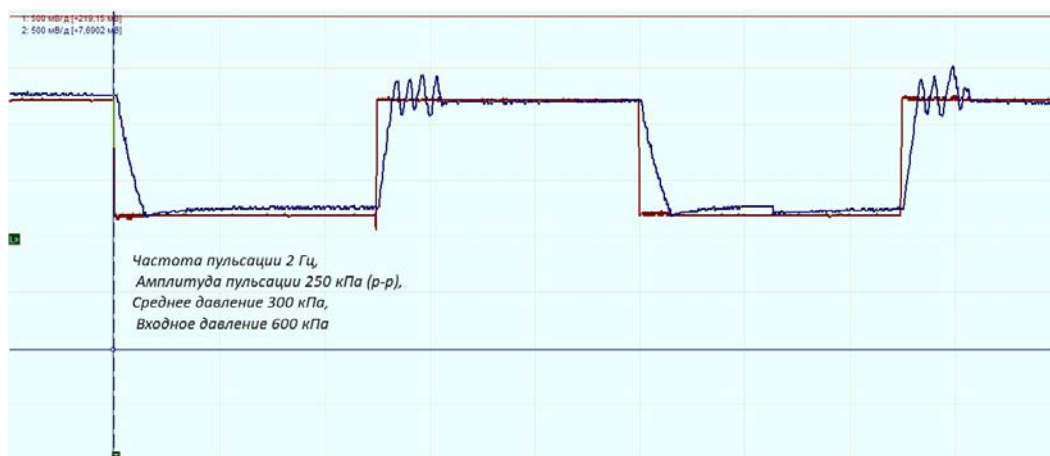


Рисунок 4.2 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

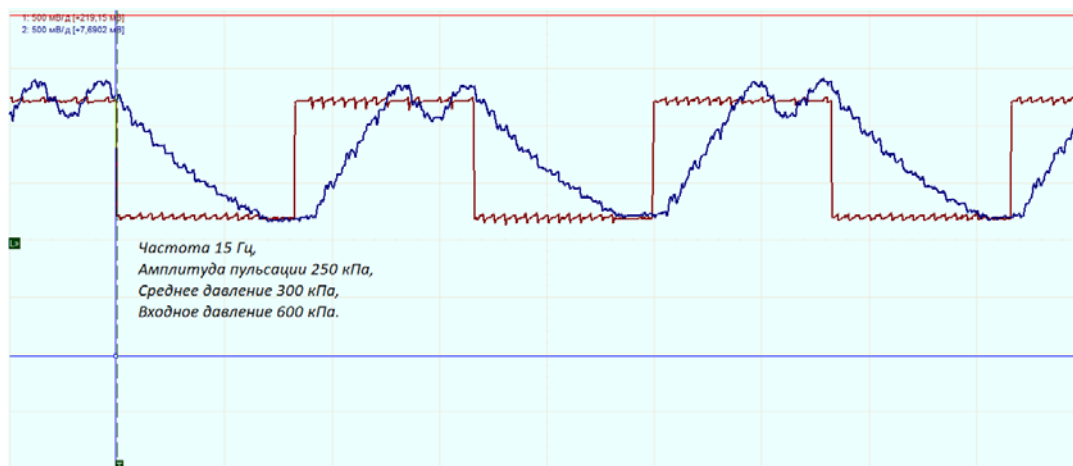


Рисунок 4.3 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

Получаем скорость нарастания выходного сигнала примерно 20,8 кПа за 1 мс.

Скорость спада выходного сигнала в данном случае получается 12,5 кПа за 1 мс.

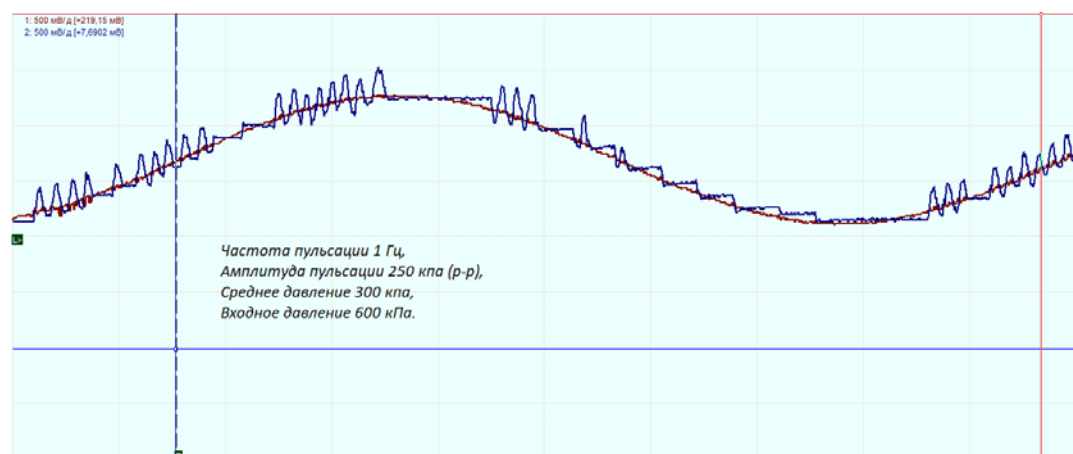


Рисунок 4.4 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

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

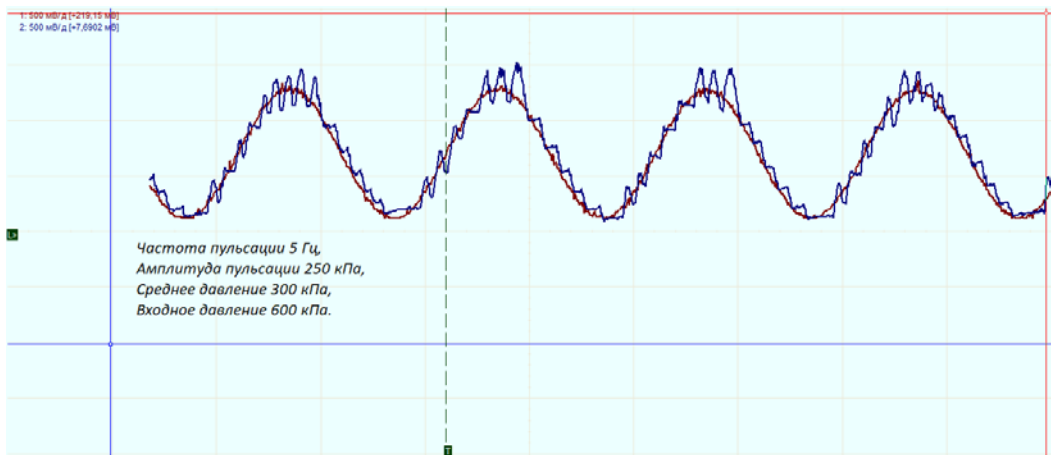


Рисунок 4.5 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

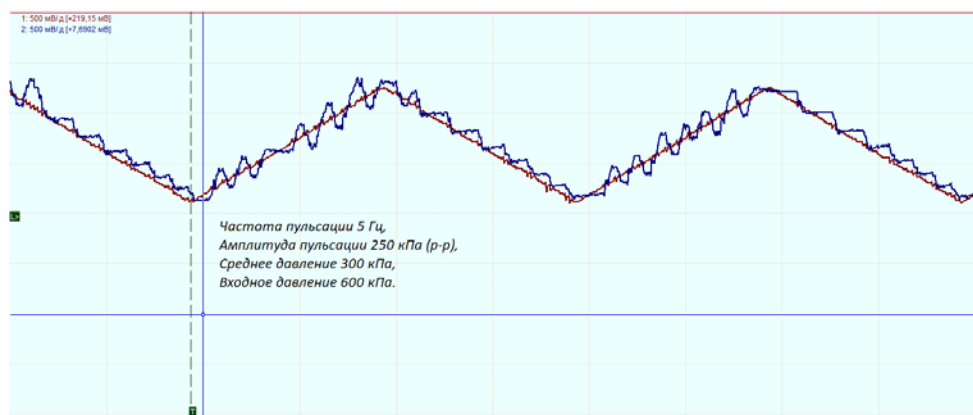


Рисунок 4.6 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

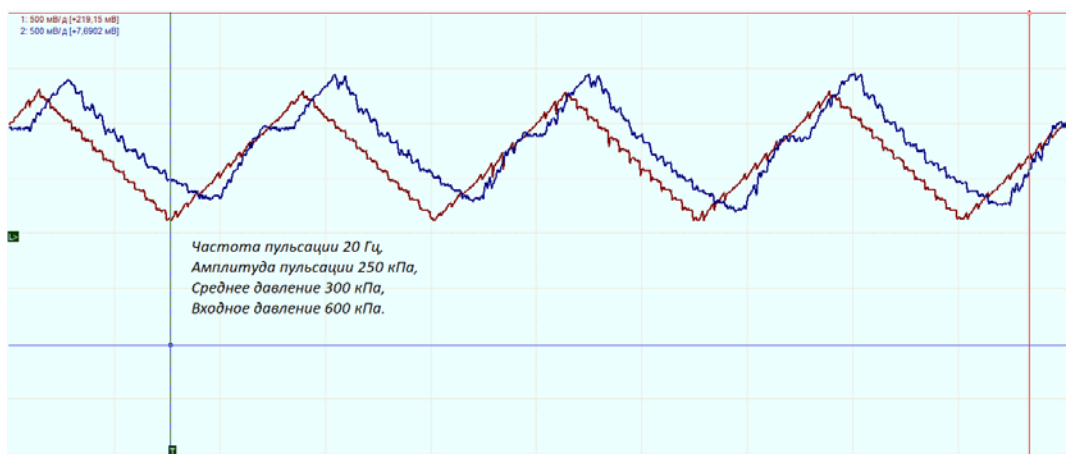


Рисунок 4.7 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

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

На графиках видим колебания выходного сигнала. Это происходит из-за того, что у клапанов SX10 нет возможности регулировать их расход.

Смоделируем сигнал частотой 1 Гц и средним давлением 350 кПа в условиях применения стенда с клапанами SX10 и получили следующий результат:

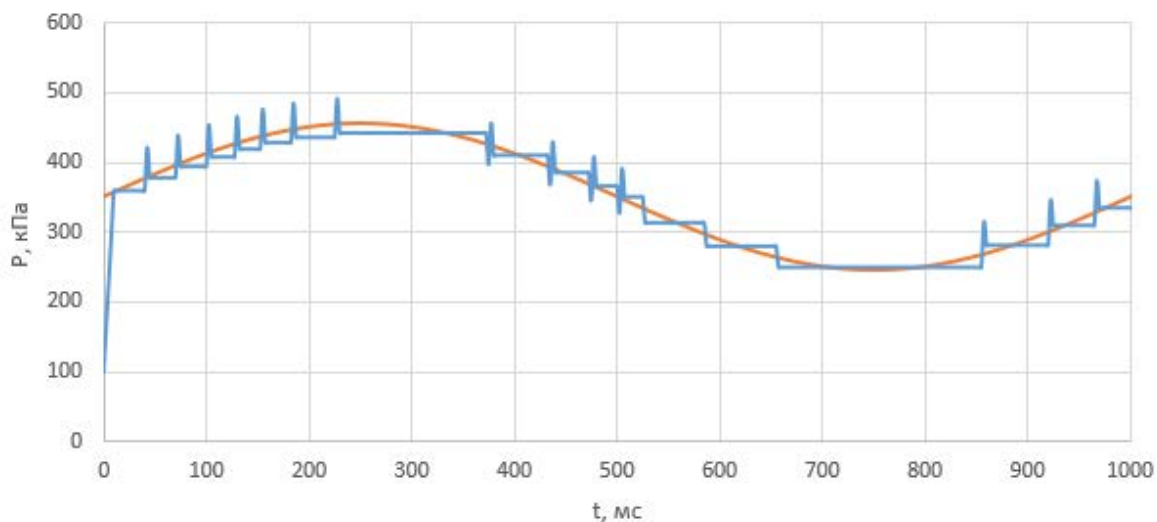


Рисунок 4.8 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

Погрешность формирования выходного сигнала доходит до 40 %.

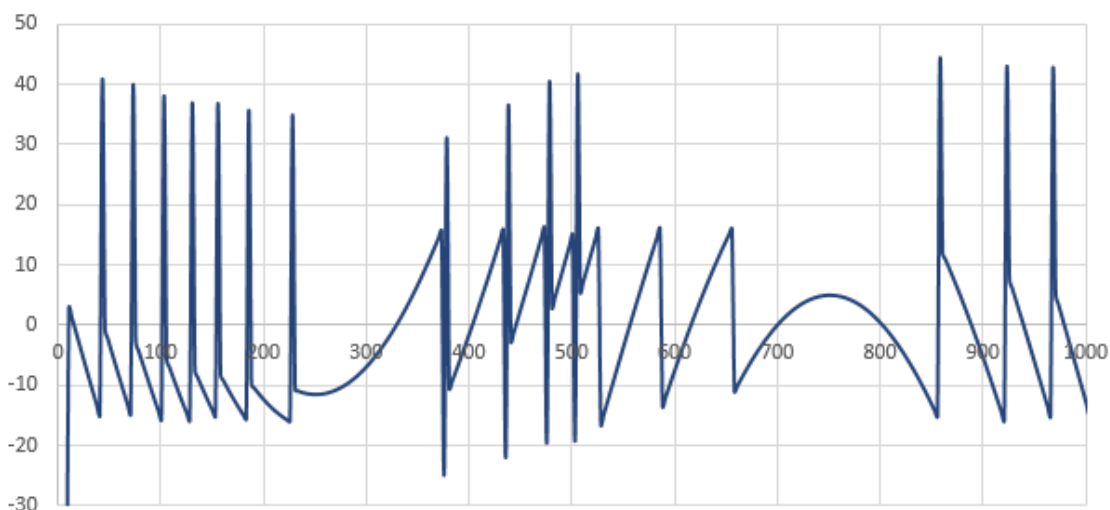


Рисунок 4.9 – График погрешности

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

Изменим частоту на 5 Гц.

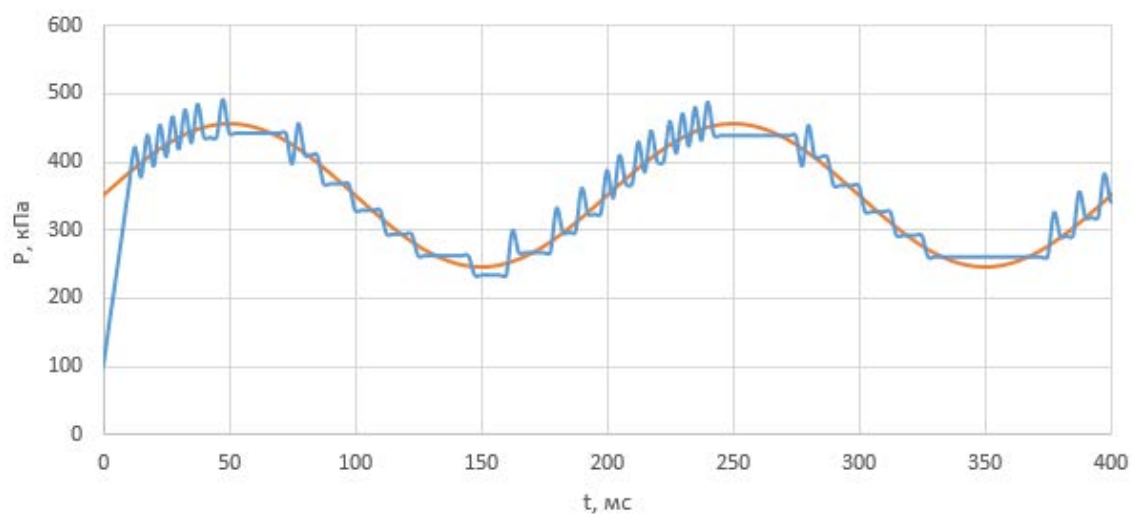


Рисунок 4.10 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

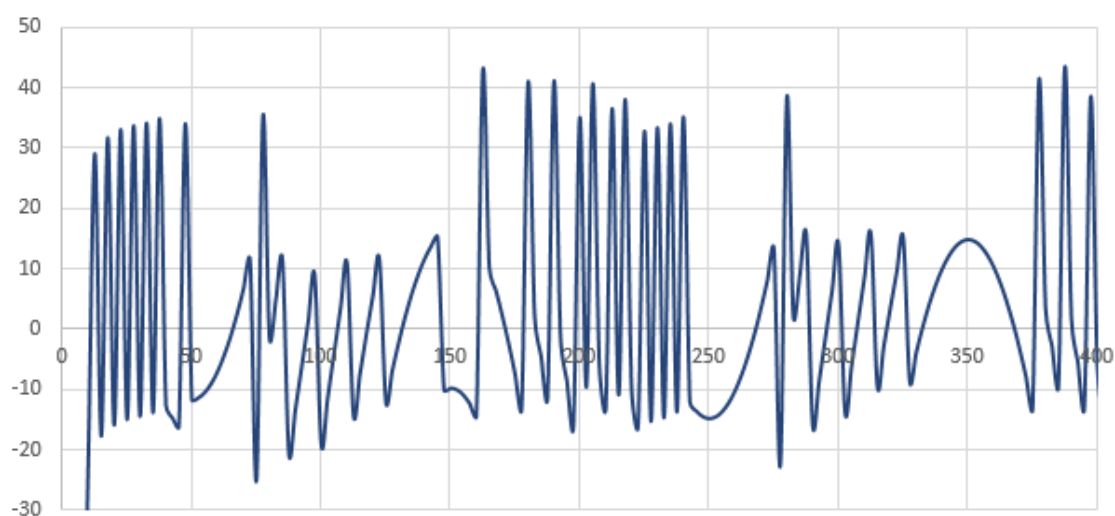


Рисунок 4.11 – График погрешности

Погрешность формирования выходного сигнала достигает до 40 %.

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

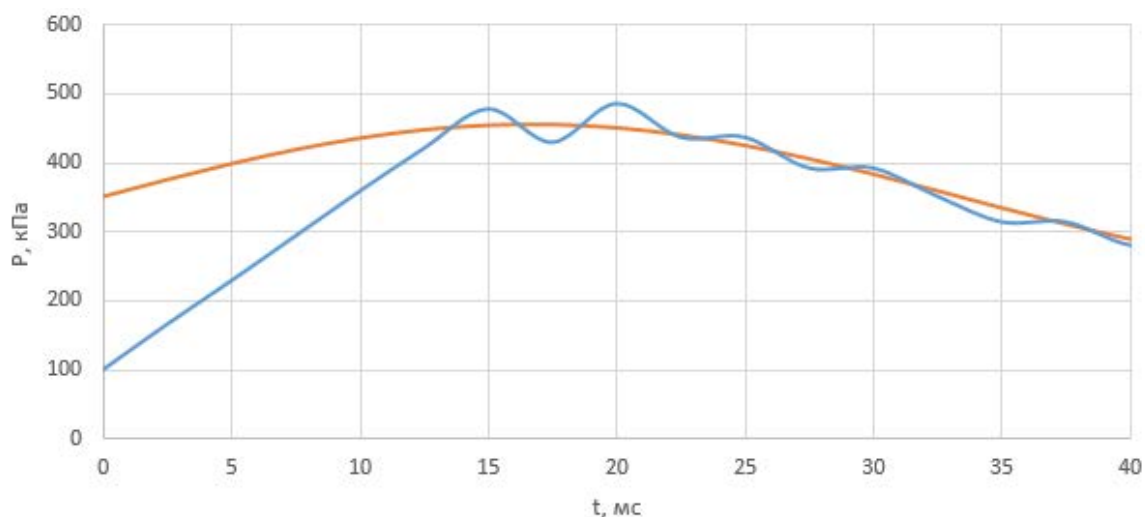


Рисунок 4.12 – Входной (красный) и выходной (синий) сигналы

Проанализировав полученные данные в ходе моделирования алгоритма, можем сказать, что скорость нарастания выходного сигнала получается около 25 кПа за 1 мс. Скорость спада выходного сигнала получаем около 16 кПа за 1 мс.

Проанализировав графики, видим, что разработанная модель алгоритма формирования пульсирующего давления в условиях стенда с клапанами SX10 работает корректно, и формирует выходной сигнал с меньшей погрешностью, чем есть на данный момент.

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

Выводы по главе:

1. В ходе выполнения четвертой главы, были проведены экспериментальные исследования, целью которых было подтвердить корректность работы разработанного алгоритма в условиях стенда с клапанами SX10. Проанализировав полученные данные можем сказать, что результаты достаточно близки друг к другу, следовательно, можем сделать вывод, что модель алгоритма работает корректно.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 96 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был выполнен аналитический обзор устройств формирования пульсирующего давления, разработан алгоритм работы стенда, смоделирован данный алгоритм и проведены экспериментальные исследования, направленные на проверку разработанного алгоритма.

В ходе написания первой главы был рассмотрен принцип работы устройств формирования пульсирующего давления. Затем все было сведено к двум методам формирования давления это метод с постоянным объемом и изменяющимся количеством воздуха и метод с постоянным количеством воздуха и изменяющимся объемом. Для дальнейшей реализации был выбран первый вариант.

Во второй главе был разработан алгоритм формирования пульсирующего давления. Был проведен анализ электропневмоклапанов, представленных на рынке. Представлены основные технические характеристики данных клапанов. Исходя из требований по быстродействию и пропускной способности был выбран клапан Matrix 860 series. Также в блоке управления клапанами вместо Arduino atmega 2560 была подобрана отладочная плата Nucleo-f303RE на основе микроконтроллера STM32f303RET6 (ARM-cortex M4).

В ходе выполнения третьей главы была проанализирована возможность использования ПИД-регулятора для реализации алгоритма. Было решено от него отказаться, вследствие того, что будущая установка должна быть универсальной и подстраиваться под любой входной сигнал. В данном случае ПИД-регулятор необходимо будет настраивать под каждый входной сигнал отдельно. Затем был смоделирован алгоритм формирования пульсирующего давления. Используя данный алгоритм для разработки стенда возможно получить выходной сигнал с частотой до 75 Гц, средним давлением до 400 кПа и пульсациями до 30 % с погрешностью до 20 %, что соответствует техническому заданию на выпускную квалификационную работу.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 97 |

В четвертой главе было проведено экспериментальное исследование на текущем оборудовании кафедры, для того чтобы сравнить возможности стенда с разработанной моделью и подтвердить корректность работы этой модели. Разработанная модель формирует пульсирующее давление достаточно близко к значениям полученным экспериментальным путем.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 98 |

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 8.009-84. Межгосударственный стандарт «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений», Государственная система обеспечения единства измерений. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 27 с.
2. ГОСТ 22520-85. Межгосударственный стандарт «Датчики давления, разряжения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП», Общие технические условия. Государственная система обеспечения единства измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 24 с.
3. Датчики давления Метран-150, руководство по эксплуатации.
4. Olivari, D. An analysis of turbulent unsteady jets. Seventh Cranfield Fluidics Conference. 12-14 Nov.1975, Stuttgart.
5. Пат. 2405978 Российская Федерация, МПК F15B 21/12. Способ генерации пульсаций давления / А.А. Хитрово. – № 2009110332/06; заявл. 20.03.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34. – 5 с.
6. Pat. 5142483 U.S., G06F 15/20. Pressure regulating system for positive shut-off pressure controller / D. Scott Basham. – № 5.142.483; 24.04.1990; 25.08.1992, № 19. – 23 p.
7. Пат. 2319126 Российская Федерация, МПК G01L 27/02. Способ задания давления в контролируемом объеме и установка для его осуществления / А.В. Жестков, А.А. Логиновский, В.А. Логиновский, Е.С. Харин. – № 2006128956/28; заявл. 09.06.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7. – 9 с.
8. Задатчики давления. – https://kip-k-s.ru/info/article/zadatchiki_davleniya/
9. Грановский, В.А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения / В.А. Грановский. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
10. Различия между микроконтроллерами AVR, ARM, 8051 и PIC. – http://digitrode.ru/computing-devices/mcu_cpu/1253-mikrokontrollery-8051-pic-avr-i-arm-otlichiya-i-osobennosti.html
11. Solenoid valves 820 Series. – <https://www.bibus.uk/products-solutions/pneumatics/valves/high-speed-valves/matrix-series-820/>

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 99 |

12. Новоселова, Е.С. Исследование статических характеристик системы программного регулирования давления / Е.С. Новоселова. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2003. – 65 с.

13. Мозжечков, В.А. Построение минимально-переключательных законов управления линейными динамическими объектами / В.А. Мозжечков. – М.: МЦНМО, 1998. – 164 с.

14. Васильев, Ф.П. Численные методы оптимизации / Ф.П. Васильев. – М.: МЦНМО, 2011. – 620 с.

15. Воронов, А.А. Основы теории автоматического управления Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А.А. Воронов. – М.: Энергия, 1986. – 309 с.

16. Солодовников, В.В. Теория автоматического регулирования техническими системами: Учебное пособие для машиностроительных и приборостроительных вузов / В.В. Солодовников, А.В. Яковлев. – М.: Изд-во МГТУ, 1993. – 492 с.

17. Первозванский, А.А. Курс теории автоматического управления / А.А. Первозванский. – М.: Наука, 1986. – 616 с.

18. Лукас, В.А. Теория автоматического управления / В.А. Лукас. – М.: Недра, 1990. – 416 с.

19. Солодовников, В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 535 с.

20. Foxboro Company, Basics of Proportional-Integral-Derivative Control, Control Engineering / Foxboro Company. – USA, 1998. – 75 p.

21. Gordon, L.M. Feedback Control Modes, Process Automation Series / L.M. Gordon. – USA: Foxboro-McGraw-Hill, 1985. – 17 p.

22. Ерофеев, А.А. Теория автоматического управления / А.А. Ерофеев. – СПб: Политехника, 1998. – 294 с.

23. Первозванский, А.А. Курс теории автоматического управления / А.А. Первозванский. – М.: Наука, 1978. – 350 с.

24. Архангельский, В.И. Интегрированные АСУ в промышленности / В.И. Архангельский, И.Н. Богаенко, Н.А. Рюмптин. – К.:НПК «Киевский институт автоматики», 1995. – 134 с.

25. Katsuhiko, O. Modern Control Engineering / O. Katsuhiko. – USA: Englowood Cliff, 1980. – 219 p.

26. Shinskey, F.G. Process control system / F.G. Shinskey, L.E. Frase. – USA: Mcgraw-Hill Book Company, NewYork, 1979. – 330 p.

27. Foxboro Company, Process control system / Foxboro Company. – USA, 1981. – 175 p.

28. Shinskey, F.G. Feedback Controllers for the Process Industries / F.G. Shinskey. – USA: Mcgraw- Hill, New York, 1994. – 412 p.

29. Smith, C.A. Principle and Practice of Automatic Process Control / C.A. Smith, A.B. Corripio. – USA: New York, 1985. – 248 p.

30. Abdul Adheem, M.K. The clarifying and simplifying of the spec systems concept and the way of developing it / M.K. Abdul Adheem. – Baghdad: University of technology, 1995. – 156 p.

31. Shinskey, F.G. Process Control Systems: Applications, Design and Adjustment / F.G. Shinskey. – USA: McGraw-Hill, 1988. – 386 p.

32. Воронов, А.А. Теория автоматического управления, часть 1. Теория линейных систем автоматического управления / А.А. Воронов, Д.П. Ким. – М.: Высшая школа, 1986. – 368 с.

33. Теория автоматического управления: учебник: в 2 ч. / под ред. Х.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – Ч. 1. – 367 с.

34. Аязян, Т.К. Расчет автоматических систем с типовыми алгоритмами регулирования: учебное пособие / Т.К. Аязан – Уфа: Изд-во УНИ, 1986. – 135 с.

35. Попов, Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / Е.П. Попов. – М.: Наука, 1978. – 357 с.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 101 |

36. Попов, Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / Е.П. Попов. – М., Наука, 1989. – 577 с.

37. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления / В.Я. Ротач. – М.: МЭИ, 2004. – 214 с.

38. Автоматизированное проектирование систем автоматического управления / под ред. В.В Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 332 с.

39. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления /В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 992 с.

40. Ключев, А.С. Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка / А.С. Ключев. – М.: Энергия, 1967. – 302 с.

41. Рождественский, Д.А. Микропроцессорные устройства в системах управления: учебное пособие вузов ТУСУР / Д.А. Рождественский. – Томск: ТМЦДО, 2003. – 130 с.

42. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 3 т. / под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. Т. 1. – 748 с.

43. Регуляторы давления газа / В.М. Плотников, В.А. Подрешетников, А.П. Дроздов, В.У. Гончаров. – М.: Недра, 1982. – 125 с.

44. Чекмазов, В.И. Некоторые вопросы динамики пневматического редуктора давления / В.И. Чекмазов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1966. – №8. – С. 115–119.

45. Арзуманов, Ю.Л. Исследование характеристик блока регулирования давления / Ю.Л. Арзуманов, Е.С. Новоселова, Е.М. Халатов, В.И. Чекмазов // сб. Системы автоматического управления и их элементы. – Тула: ТулГУ, 1996. – С. 26–32.

46. Буркхардт, Р. Регуляторы давления газа / Р. Буркхардт, В. Кизеветтер. – М.: Изд-во Мин-ва коммун, хоз-ва РСФСР, 1962. – 151 с.

47. Малиованов, М.В. Обобщенная динамическая модель пневматического пружинного редуктора давления /М.В, Малиованов. – М.: Наука, 1971. – 287 с.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 102 |

48. Подчуфаров, Б.М. Динамика газового пружинного редуктора давления // Основы управления и регулирования тепломеханических систем. Учебное пособие / Б.М. Подчуфаров. – Тула: ТулПИ, 1982. – 387 с.

49. Малиованов, М.В. Упрощенная динамическая модель пневматического пружинного редуктора давления / М.В, Малиованов. – М.: Наука, 1971. – 193 с.

50. Прусенко, В.С. Пневматические регуляторы / В.С, Прусенко. – М.: Энергия, 1966. – 155 с.

51. Семенчев, Е.А. Исследование динамики системы: регулятор давления предохранительный клапан // Газовые приводы и системы управления / Е.А. Семенчев. – Тула: ТЛИ, 1982. – 425 с.

| | | | | | | |
|------|-------|----------|-------|------|-----------------------------------|------|
| | | | | | ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-201.ВКР | Лист |
| Изм. | Лист. | № докум. | Подп. | Дата | | 103 |