

**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  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

**РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ МАКЕТА БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ КЛАПАНАМИ  
ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
**ЮУрГУ – 12.03.01.2017.308-009. ВКР**

**Нормоконтролер, к.т.н. доцент каф. ИнИТ**

\_\_\_\_\_ / А.С. Волосников  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

**Руководитель, инженер**

\_\_\_\_\_ / Г.М. Грудцинов  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

**Автор**

**студент группы КЭ–436**

\_\_\_\_\_ / А.В. Рязанов  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

## АННОТАЦИЯ

Рязанов А.В. Разработка принципиальной схемы, изготовление и испытание макета блока управления клапанами динамического измерительного стенда. - Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭКН; 2017, 58 с. 15 ил., библиогр. список -16 найм., 6 прил.

В выпускной квалификационной работе разработан макет блока управления клапанами динамического измерительного стенда с целью обеспечения возможности формирования пульсирующего давления для таких целей, как измерение динамических характеристик приборов измерения давления или исследование поведения системы управления при воздействии пульсирующего давления.

В процессе выполнения данной работы были проведены основные этапы проектирования, разработана функциональная схема, принципиальная схема и сконструирован макет устройства. Для автоматизации процесса проектирования были использован программный пакет: Microsoft Visio 2010.

					ЮУрГУ - 12.03.01.2017.308-009. ВКР			
Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.	Рязанов				Разработка принципиальной схемы. изготовление и испытание макета блока управления клапанами динамического измерительного стенда	Лит.	Лист	Листов
Пров.	Грудцинов						5	58
Н. Контр.	Волосников					ЮУрГУ Кафедра ИнИТ		
Утв.	Шестаков							

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ОБЗОР МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ .....	7
1.1 Метод механического формирования импульсов давления.. .....	7
1.2 Формирования пульсирующего давления методом дозированной подачи воздуха в рабочий объем. ....	8
2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ/ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ КЛАПАНАМИ.....	10
2.1 Анализ технического задания и технических требований .....	10
2.2 Функциональная схема формирования сигналов управления клапанами.....	11
2.3 Общая структурная схема блока управления. ....	13
3 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ, ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ.....	17
3.1 Блок питания.....	17
3.2 Индикаторы погрешности. ....	20
3.3 Выходной каскад. ....	26
3.4 Переключатель режима работы. ....	33
3.6 Расчет и проверка рабочих режимов элементов схемы.....	36
4 РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТНОЙ ПЛАТЫ КАНАЛА ВКЛЮЧЕНИЯ КЛАПАНА.....	37
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	42
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	43
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ....	44

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		4

## ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности, для управления технологическими процессами, необходимо постоянно контролировать значение 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 применения огромного числа средств, предназначенных для измерения величины давления или разности давлений, различающихся по физической природе, 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.

Все перечисленные операции в производстве и при обслуживании датчиков выполняются в статическом режиме, однако при проектировании зачастую нужен анализ поведения систем и датчиков в динамическом режиме работы.

Выпускная квалификационная работа выполнена с целью разработать принципиальную схему блока управления клапанами, изготовить и испытать блок управления клапанами динамического измерительного стенда по формированию пульсирующего давления.

Актуальность работы заключается в том, что данное устройство может применяться для измерения динамических характеристик приборов измерения, таких как: время установления выходного сигнала, динамические погрешности измерения, полоса пропускания. Также возможно использование устройства для исследования поведения систем управления при воздействии пульсирующего давления, например: достоверность информации в системах с дублированием

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

приборов измерения давления, резонансные явления в системах измерения давления, контроль исправности и контроль разрывов трубопроводов.

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>6</i>

# 1 ОБЗОР МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ

Существуют различного вида приборы задания давления. Наибольшей популярностью пользуются калибраторы и задатчики давления (помпы, прессы, электрические компрессоры), главным назначением которых является поверка и калибровка датчиков давления. Недостаток приборов этого вида в том, что они специализируются на создании и воспроизведении избыточного и абсолютного давления, давления-разрежения в установившемся режиме.

Задачей разрабатываемого стенда является создание пульсирующего давления и измерения динамических характеристик приборов измерения давления.

Мною были рассмотрены устройства, которые похожи по назначению с предоставленным на разработку устройством. То есть рассмотренные устройства тоже используются для формирования пульсирующего давления, но имеют разные методы реализации. Ниже приведены патенты этих устройств, созданных в разное время.

## 1.1 Метод механического формирования импульсов давления.

Этот метод описан в патенте № 489977. Он характерен тем, что в устройстве не задействованы электрические способы подачи импульсов, а только механические, что дает возможность проводить испытания на высоких частотах пульсации.

Изобретение относится к области приборостроения, в частности к устройствам для создания пульсаций давления, используемым для динамических испытаний дифференциальных датчиков давления или систем, например, в экспериментальной аэродинамике.

Высокая частота пульсации давления достигается тем, что в предлагаемом генераторе дополнительная успокоительная емкость, в которой размещен испытываемый датчик давления, соединена с полостью статора отверстием сброса давления, успокоительная емкость магистрали подачи давления обхватывает часть статора и соединена с его полостью несколькими отверстиями, а нерабочая часть

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		7

ротора профилирована аналогично рабочей и снабжена катушкой индуктивности с сердечником, установленной на статоре. [1]

Возможен так же способ формирования пульсирующего давления, описанный в патенте № 2405978 . Поток текучей среды подают под постоянным давлением на вход насоса, рабочий элемент которого, например мембрану, колеблют с заданной чистотой и амплитудой нагнетания, модулированной пульсацией заданных частот, амплитуды и формы. В результате на выход насоса формируется пульсирующий поток текучей среды, имеющий высокочастотную составляющую частоты нагнетания и низкочастотную составляющую пульсаций. Затем подают текучую среду в акустический фильтр, при этом фильтруют частоту нагнетания акустическим фильтром, получая на выходе фильтра низкочастотную составляющую пульсаций текучей среды. [2]

1.2 Формирования пульсирующего давления методом дозированной подачи воздуха в рабочий объем.

Такой способ, описан в патенте № 2319126.

Способ заключается в том, что с помощью схемы регулирования давления и трубопроводной магистрали задают «грубо» установленное значение давления в контролируемом объеме, затем периодически замеряют в нем давление и, при отклонении его величины от заданной, вычисляют количество сжатого газа, которое необходимо ввести в контролируемый объем или удалить из него, и подавая или удаляя необходимое количество газа с помощью схемы регулирования до достижения в контролируемом объеме заданного давления, которое затем «прецизионно» поддерживают, для того, чтобы обеспечить его в контролируемом объеме. [3]

По принципу этого устройства был предложен принцип работы стенда, показанный на рисунке 1.

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

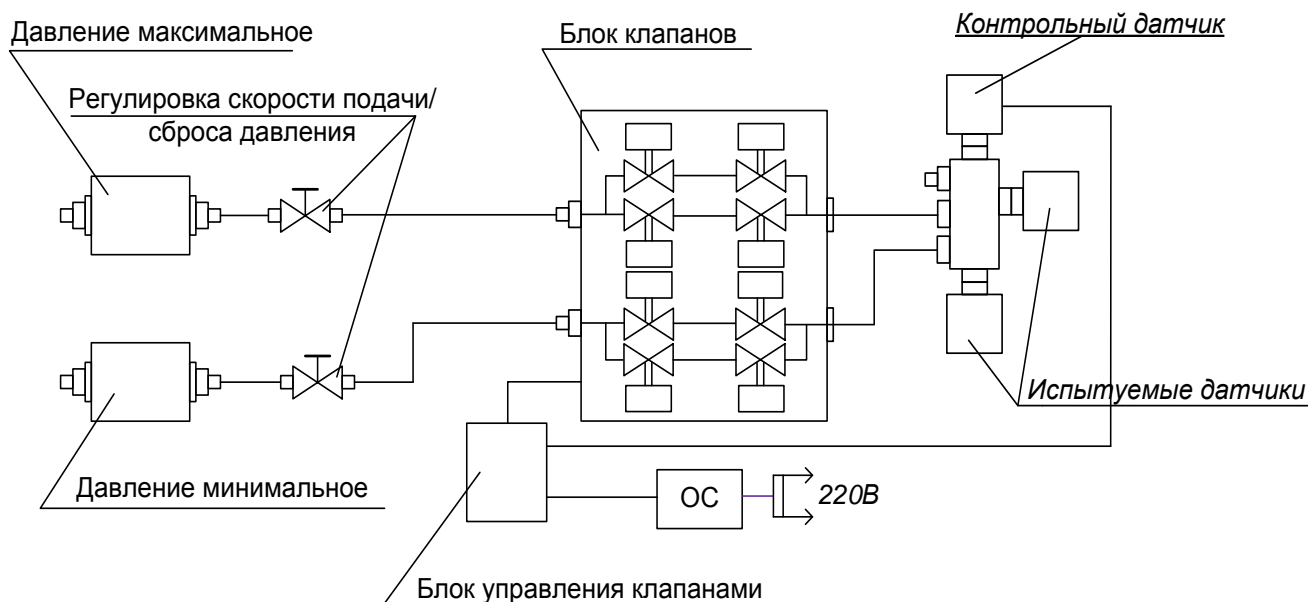


Рисунок 1 – Общая структурная схема устройства формирования давления

Стенд состоит из двух емкостей с неизменным объемом рабочей среды (воздуха, газа). Скорость подачи воздуха регулируется с помощью двух регуляторов, с выходов емкостей воздух подается на блок клапанов.

В блоке клапанов реализовано два варианта работы клапанов – на подачу давления в рабочий объем и на сброс давления. Включение клапанов исполнено в форме последовательного и параллельного соединения. Обеспечение последовательного пропускания воздуха через два клапана и открывания их с перекрытием во времени уменьшает минимальный единичный объем газа, так как такое включение позволяет сократить эффективное время открытого состояния клапанов. Параллельное пропускание воздуха через цепочку клапанов обеспечивает увеличение частоты пульсаций давления.

Открытие/закрытие клапанов осуществляется с помощью блока управления клапанами. На этот блок подается два сигнала. Один подается с контрольного датчика давления, подключенного к рабочему объему, а другой с образцового устройства. Эти два сигнала сравниваются между собой и, исходя из этого, определяется включение клапанов на подачу давления в рабочий объем или на сброс давления из этого объема. Одновременно осуществляется расчет разницы показаний и вычисляется погрешность установления давления.

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

12.03.01.2017.009.00 ПЗ

Лист

9



## 2 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ/ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ КЛАПАНАМИ

### 2.1 Анализ технического задания и технических требований.

Предложенная модель стенда определяет следующие требования для блока управления.

1. Два аналоговых входа для подключения к блоку датчика давления и опорного сигнала, для сравнения с ним полученного значения.

2. Восемь выходов управления клапанами SX10, для управления соответственно четырьмя парами клапанов.

3. Светодиодные индикаторы включения клапанов, чтобы пользователь мог определять состояние (рабочее/не рабочее) определенного клапана.

4. Внешний интерфейс USB для подключения к персональному компьютеру.

5. Должен быть реализован определенный алгоритм работы клапанов, в соответствии с рисунком 3.

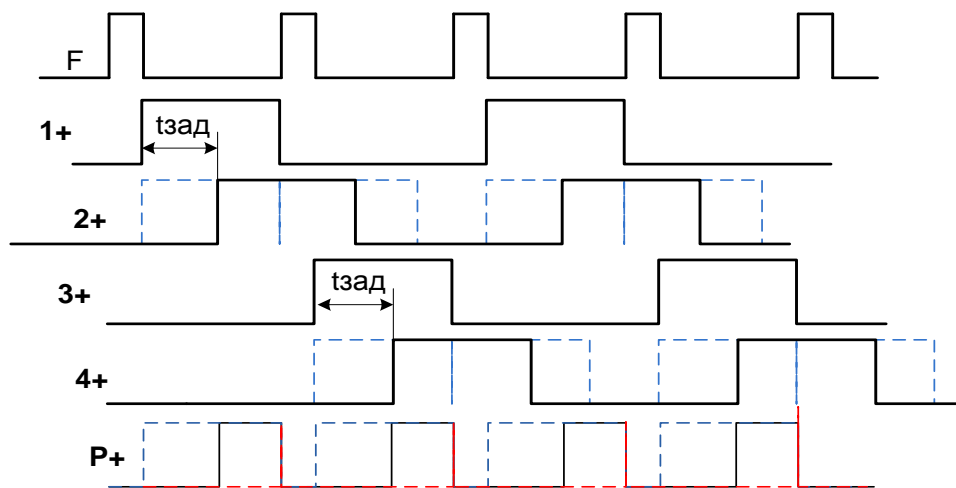


Рисунок 2 – Режимы работы клапанов при формировании заданного давления, где:

F – частота дискретизации;

1+, 2+, 3+, 4+ – сигналы управления клапанами 1, 2, 3, 4 соответственно;

tзад – время задержки включения клапанов;

P+ – эффективное время открытия клапанов.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

12.03.01.2017.009.00 ПЗ

Лист

10

6. Построение графиков сформированного давления и образцового сигнала с последующим их выводом на персональный компьютер.

7. Расчет максимального за определенный промежуток времени значения погрешности формирования давления в процентах и вывод его на персональный компьютер и двухразрядный светодиодный индикатор, закрепленный на корпусе блока для быстрого получения информации.

8. Выбор режима управления клапанами (ручное/программное). Ручное управление служит для установления каких-либо настроек, связанных с работой клапанов. Программное управление предназначается для формирования требующихся сигналов.

9. Частота дискретизации входных сигналов должна быть в пределах  $F = 0,3 - 1,0$  кГц, установка частоты с помощью интерфейса USB.

10. Энергонезависимая память настроек для сохранения их и последующего старта устройства с этими настройками.

11. Суммарное время формирования сигналов управления клапанами должно быть не больше 0,2 мс

## 2.2 Функциональная схема формирования сигналов управления клапанами.

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

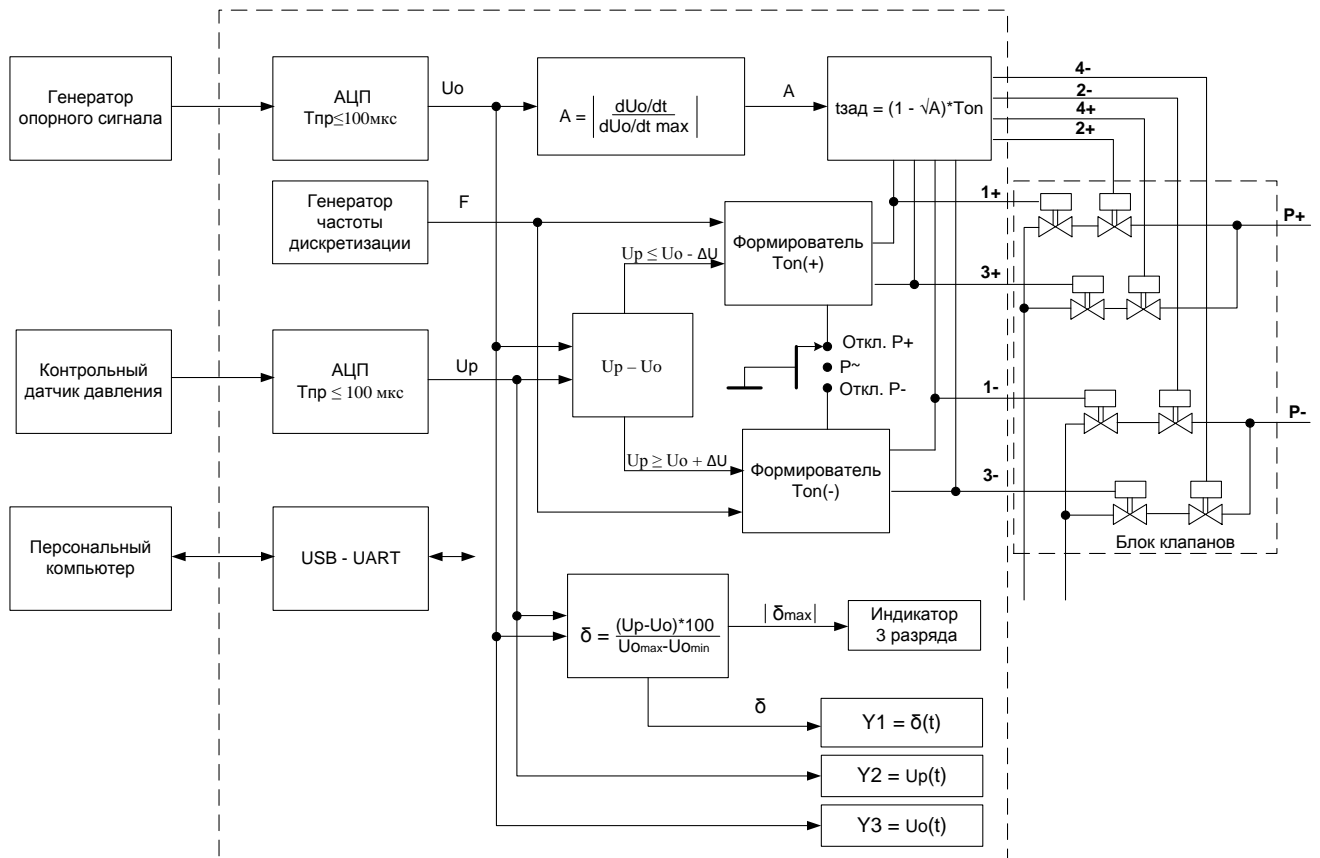


Рисунок 3 – Функциональная схема блока управления клапанами

Как уже говорилось, на блок управления клапанами подается два аналоговых сигнала. Первый сигнал – опорный, служит для образца сформированного сигнала. Второй подается с контрольного датчика давлений, который подключен к рабочему объему пульсирующего давления вместе с поверяемыми датчиками и формирует сигнал измерения.

Опорный сигнал подается на АЦП. С выхода АЦП сигнал подается на вход вычислителя, там вычисляется нормированная производная напряжения от времени. Затем вычисляется время задержки открытия клапанов в последовательной цепочке по формуле

$$t_{зад} = (1 - \sqrt{A}) \cdot T_{он}. \quad (1)$$

Сигнал с контрольного датчика подается на АЦП. После АЦП он сравнивается с опорным сигналом, и формируется команда на включение клапанов – на подачу или сброс давления.

Параллельно вычисляется погрешность между двумя этими сигналами и выдается на LED индикаторе в виде двухразрядного числа.

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

12.03.01.2017.009.00 ПЗ

Лист

12

### 2.3 Общая структурная схема блока управления.

Анализируя функциональную схему, мы определили задачи блока управления, которые выполняются на программном уровне.

Поскольку основные задачи блока управления выполняет микроконтроллер, сначала выберем наиболее подходящий по условиям технического задания микроконтроллер.

При выборе микроконтроллера будем руководствоваться техническим заданием. По заданию нам необходимо: 2 аналоговых входа, минимум 2 цифровых входа, 8 выходов управления клапанами, минимум 10 цифровых выходов для вывода на индикатор значения погрешности формирования давления, внешний интерфейс USB, расчет и, частота дискретизации входных сигналов от 0,3 до 1 кГц, управление по интерфейсу USB, энергонезависимая память настроек. Таким образом, контроллер должен иметь: 2 аналоговых входа, минимум 13 цифровых входа/выхода, разъем для подключения USB, энергонезависимую память настроек.

Для удобства и простоты проектирования воспользуемся платформами известной марки Arduino. Процессоры в этой платформе работают на кварцевом генераторе частотой от 8 до 400 МГц. Данные минимальные требования выполняются многими платформами этой компании. Из линейки платформ Arduino, выберем плату Arduino Mega 2560 показанной на рисунке 4, так как она удовлетворяет всем поставленным требованиям и имеет перспективу решения дополнительных задач в процессе эксплуатации стенда.

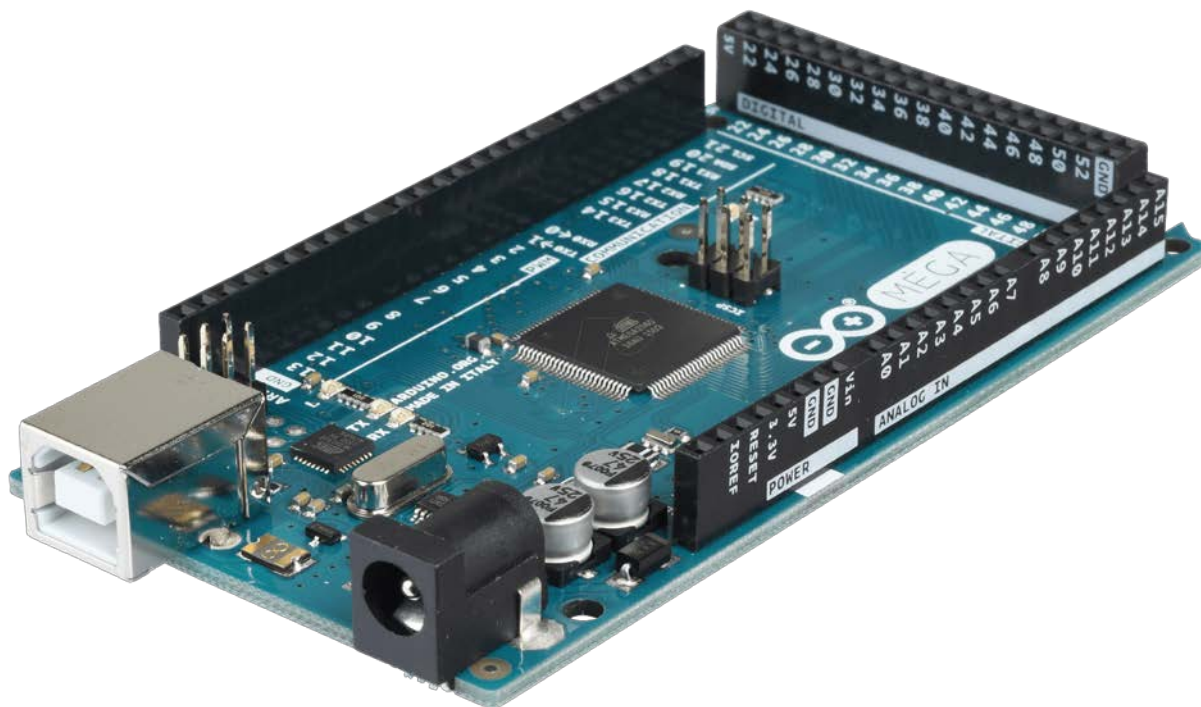


Рисунок 4 - Плата Arduino Mega 2560

Arduino Mega построена на микроконтроллере ATmega2560. Плата имеет 54 цифровых входа/выходов с допустимым током нагрузки до 40 мА (14 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта UART, кварцевый генератор 16 МГц, USB коннектор, разъем питания, разъем ICSP и кнопка перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB или подать питание при помощи адаптера AC/DC, или аккумуляторной батареей.

Платформа может работать при внешнем питании от 6 В до 20 В. При напряжении питания ниже 7 В, вывод 5V может выдавать менее 5 В, при этом платформа может работать нестабильно. При использовании напряжения выше 12 В регулятор напряжения может перегреться и повредить плату. Рекомендуемый диапазон от 7 В до 12 В.

Микроконтроллер ATmega2560 имеет: 256 кБ флеш-памяти для хранения кода программы (4 кБ используется для хранения загрузчика), 8 кБ ОЗУ и 4 Кб EEPROM (которая читается и записывается с помощью библиотеки EEPROM).

Каждый из 54 цифровых выводов Mega, используя функции pinMode(), digitalWrite(), и digitalRead(), может настраиваться как вход или выход. Выводы работают при напряжении 5 В. Каждый вывод имеет

нагрузочный резистор (стандартно отключен) 20-50 кОм и может пропускать до 40 мА.

Длина и ширина печатной платы Mega2560 составляют 10,2 и 5,3 см соответственно. Разъем USB и силовой разъем выходят за границы данных размеров. Три отверстия в плате позволяют закрепить ее на поверхности. Расстояние между цифровыми выводами 7 и 8 равняется 0,4 см, хотя между другими выводами оно составляет 0,25 см. [4]

На базе выбранного контроллера используем схему блока управления, представленную на рисунке 4.

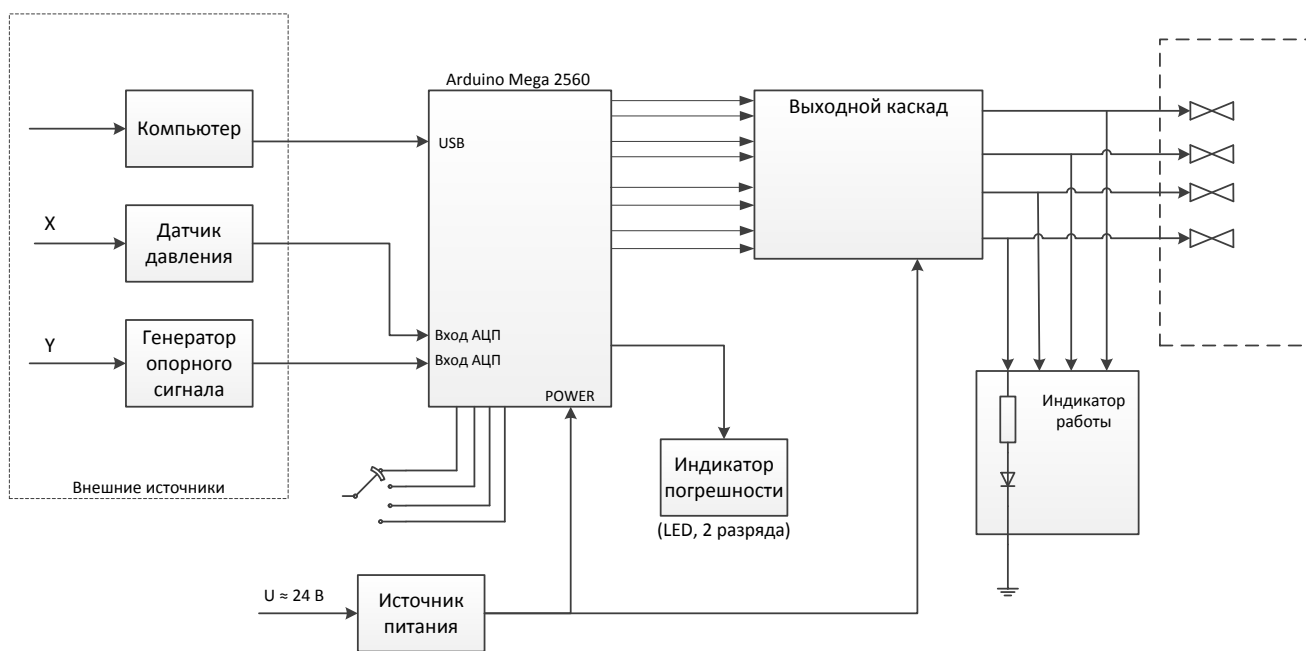


Рисунок 5 – Структурная схема блока управления клапанами

На данной схеме такие устройства, как компьютер, датчик давления и генератор опорного сигнала не относятся к блоку управления клапанами, соответственно определим их как внешние источники.

Выходной каскад выполнен по схеме электронных ключей управления клапанами.

Программная часть и подключение по USB выполнены при помощи выбранной смонтированной платы Arduino Mega 2560 (фирма «Arduino»), в которую встроен микропроцессор ATmega2560. Она выполняет следующие функции: расчет разницы между показаниями датчика и опорного сигнала,

определение погрешности, управление электронными ключами выходного каскада, вывод значения погрешности на индикатор.

Для каждого ключа на корпус блока управления выведен диодный индикатор работы клапана, который светится, когда клапан открыт.

Для управления клапанами, а значит и для питания выходного каскада, требуется источник питания на 24 В, поэтому и питание платы микроконтроллера выполнено от источника 24 В, для этого можно использовать преобразователь напряжения.

Погрешности отображается на LED индикаторе, для четкого определения пользователем достоверности показаний датчиков.

Тумблер предназначен для переключения между режимами: подача давления, сброс давления, программное управление клапанами и режим покоя (когда все клапаны закрыты).

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		16

### 3 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ, ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

#### 3.1 Блок питания.

Блок питания – это электронное устройство, формирующее напряжение, необходимое определенному компоненту, из других источников питания.

Нам нужно подать питание на два компонента: высокочастотные клапаны и плата микроконтроллера. Из технических условий следует, что выбранный нами микроконтроллер питается напряжением 9 В. А для клапанов нужно 24 В.

Из соображений, что лучше выбрать один источник питания, а затем преобразовать из одного значения напряжения в другое, выберем источник питания 24 В.

Для преобразования напряжения используем регулируемый стабилизатор напряжения LM317. Устройство LM317 представляет собой регулируемый трехконтактный стабилизатор положительного напряжения, способный обеспечивать силу тока более 1,5 А в диапазоне выходного напряжения от 1,25 до 37 В. Для установки выходного напряжения требуется только два внешних резистора. Устройство имеет типичное линейное регулирование 0,01% и типичное регулирование нагрузки 0,1%. Он включает в себя ограничение тока, защиту от тепловой перегрузки и безопасную защиту рабочей зоны. Защита от перегрузки остается работоспособной, даже если терминал ADJUST отключен.

Выпускается LM317 в монолитном корпусе нескольких вариантов и имеет три вывода:

1. ADJUST. Вывод для задания (регулировки) выходного напряжения. В режиме стабилизации тока соединяется с плюсом выходного контакта.
2. OUTPUT. Вывод с низким внутренним сопротивлением для формирования выходного напряжения.
3. INPUT. Вывод для подачи напряжения питания.

Устройство LM317 является универсальным в своем применении, оно в том числе использует программируемое регулирование выходного сигнала и локальное регулирование нагрузки. Или, подключив фиксированный резистор между



клеммами ADJUST и OUTPUT, устройство LM317 может функционировать как прецизионный регулятор тока. Дополнительный выходной конденсатор может быть добавлен для улучшения переходного отклика. Терминал ADJUST можно использовать для достижения очень высоких коэффициентов отбрасывания пульсаций, чего трудно достичь со стандартными трехконтактными регуляторами. Гибкость LM317 позволяет ему быть настроенным на выполнение множества различных функций в режиме постоянного тока. [5]

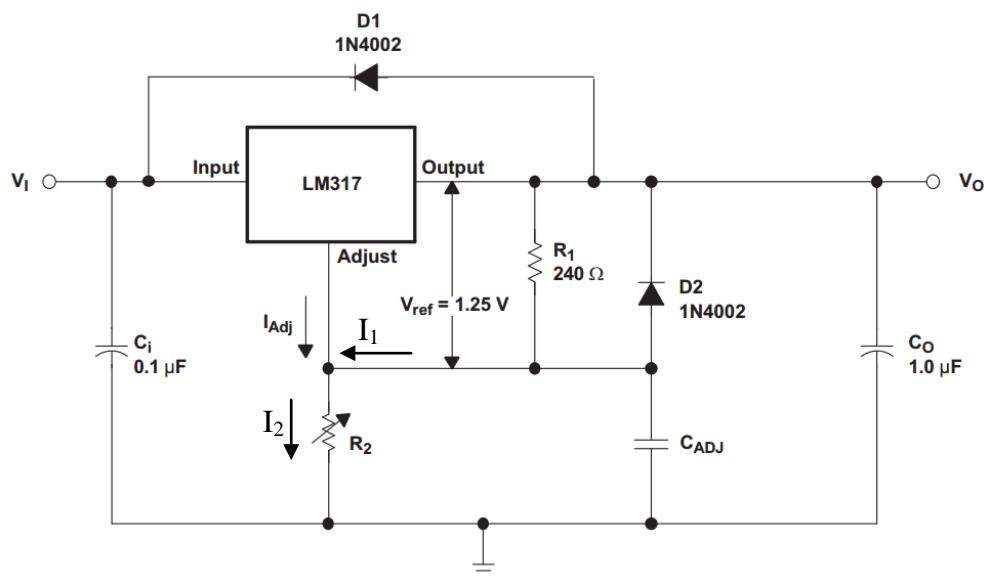


Рисунок 6 – Вариант типового подключения LM317 в схеме регулируемого источника напряжения

На схеме (рисунок 6) входное и выходное напряжения обозначены  $V_i$  и  $V_o$  соответственно. Входное напряжение подается с источника питания 24 В. Выходное напряжение подается на плату микроконтроллера. Так как рекомендуемое входное напряжения платы Arduino Mega 2560 составляет от 7 В до 12 В, то берем среднее напряжение 9 В. Соответственно выходное напряжение  $V_o$  регулятора должно быть 9 В.

В данной схеме присутствует регулятор напряжения LM317. Три конденсатора:

- $C_i$  номиналом 0,1 мкФ обеспечивает достаточную фильтрацию входного напряжения  $V_i$  на регуляторе напряжения;
- $C_{ADJ}$  рекомендуется для улучшения подавления пульсаций. Это предотвращает усиление пульсаций на резисторе R2;

·  $C_0$  улучшает переходный отклик.

Вместе с конденсатором  $C_2$  используем диоды защиты D1 и D2. Диоды обеспечивают разряд конденсатора через цепи с низким импедансом для предотвращения разряда конденсатора в выход регулятора. Диоды возьмем рекомендуемые технической спецификацией, т.е. диод выпрямительный 1N4002 с максимальным постоянным обратным напряжением 100 В и максимальным прямым(выпрямленным за полупериод) током 1 А. [6]

Конденсатор  $C_1$  выбираем рекомендуемой емкостью 0,1 мкФ, с напряжением не меньше напряжения питания  $V_i = 24$  В. Возьмем керамический ЧИП конденсатор smd 0805 емкостью 0,1 мкФ, рабочее напряжение его составляет 50 В, точность +80-20%, температурный коэффициент емкости  $\gamma_{5v}$ .

#### Конденсатор $C_{ADJ}$

Конденсатор  $C_0$  выбираем рекомендуемой емкостью 0,1 мкФ. Возьмем керамический ЧИП конденсатор smd 0805 емкостью 1 мкФ, рабочее напряжение его составляет 25 В, точность +80-20%, температурный коэффициент емкости  $\gamma_{5v}$ .

Два резистора R1 и R2 используются для регулирования выходного напряжения. Рассчитаем какой номинал резистора необходимо использовать чтобы на выходе получить 9 В (напряжение для питания микроконтроллера).

Чтобы найти выходное напряжение  $V_o$ , нам нужно сложить опорное напряжение  $V_{ref}$  и напряжение на резисторе R2.  $V_{ref}$  дано в описании устройства и равно 1,25 В, а напряжение на резисторе мы рассчитаем как ток  $I_2$  умноженный на сопротивление R2.

Ток  $I_2$  находится путем сложения токов  $I_1$  и  $I_{ADJ}$ .  $I_{ADJ}$  из описания устройства равен 0,05 мА. Найдем  $I_1$ , разделив опорное напряжение  $V_{ref}$  на сопротивление R1:

$$I_1 = \frac{V_{ref}}{R1} = \frac{1,25}{240} = 5,2 \text{ мА.} \quad (2)$$

В итоге получится следующая формула

$$V_o = (I_{ADJ} + I_1) \cdot R2 + V_{ref}. \quad (3)$$

Преобразуем ее для нахождения номинала R2 при заданном значении  $V_o$ :

$$R2 = \frac{V_o - V_{ref}}{I_{ADJ} + I_1}. \quad (4)$$

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

Найдем значение R2:

$$R2 = \frac{9 - 1,25}{0,05 + 5,2} = 1,48 \text{ кОм.} \quad (5)$$

Так как такой номинал резистора очень сложно подобрать. Выбираем более близкий номинал резистора из ряда E24 1,5 кОм. Рассчитаем получаемое на выходе напряжение при этом номинале

$$V_o = (0,05 + 5,2) \cdot 1,5 + 1,25 = 9,125 \text{ В.} \quad (6)$$

Такое значение напряжения вполне подходит для выбранного микроконтроллера.

Рассчитаем мощность резистора:

$$P = V \cdot I_2 = 7,5 \cdot 5,25 \cdot 10^{-3} = 39,4 \text{ мВт} \quad (7)$$

С запасом выбираем мощность не менее двух указанных мощностей ( $P \geq 78,8 \text{ мВт}$ ). Тип резистора выбираем SMD (для поверхностного монтажа). Наиболее подходит резистор 0805 сопротивлением 1,5 кОм, номинальной мощностью 0,125 Вт, точностью 5 %.

Выбор точности резистора обусловлен тем, что платформа Arduino Mega 2560 может работать при внешнем питании от 7 В до 12 В. Поэтому в данном случае не принципиально использовать высокую точность.

### 3.2 Индикаторы погрешности.

По условиям технического задания в блоке управления требуется индикатор погрешности.

Погрешность в нашем случае будет вычисляться в микроконтроллере и выводиться для удобного считывания пользователем информации, в виде двухразрядного числа. Для данной функции подойдет семисегментный двухразрядный индикатор. Они бывают двух видов: с жидко-кристаллическим дисплеем и светодиодные. В светодиодных индикаторах, чтобы увеличить размеры цифр на индикаторе и одновременно сохранить достаточную яркость каждого элемента, используется несколько светодиодов, включенных последовательно и их хорошо видно при слабом освещении. А в ЖК индикаторах при слабом освещении

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

нужно подсвечивать дисплей. Исходя из этого, выбираем светодиодный индикатор.

Он может подключаться двумя способами: каждый сегмент напрямую к выводам микроконтроллера или с помощью семисегментного драйвера. Для упрощения схемы используем выводы микроконтроллера. На микроконтроллере нам потребуется 10 цифровых выводов, так как для управления индикатором нужно 8 выводов на каждый сегмент и 2 для управления одним из двух разрядов (рисунок 7).

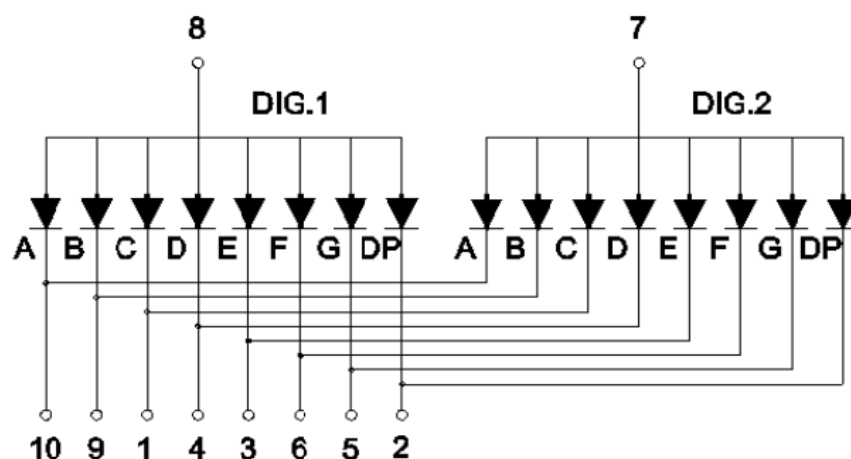


Рисунок 7 – Схема выводов двухразрядного семисегментного индикатора с общим анодом

Так как схемы построения индикаторов на общем катоде и на общем аноде не сильно различаются, выберем индикатор фирмы Vetlux с общим анодом. Для лучшего считывания индикатора выберем индикатор красного цвета VL-D56A-22UR, размером 25.00 x 19.00 мм. Прямой ток, протекающий на каждом светодиоде для этого цвета, равен  $I_{пр} = 25$  мА. Суммарный ток составит  $I_{\Sigma} = 200$  мА. [7]

Построим схему подключения индикатора к плате микроконтроллера Arduino Mega 2560 (рисунок 8). На схеме каждый светодиод отображает определенный сегмент.

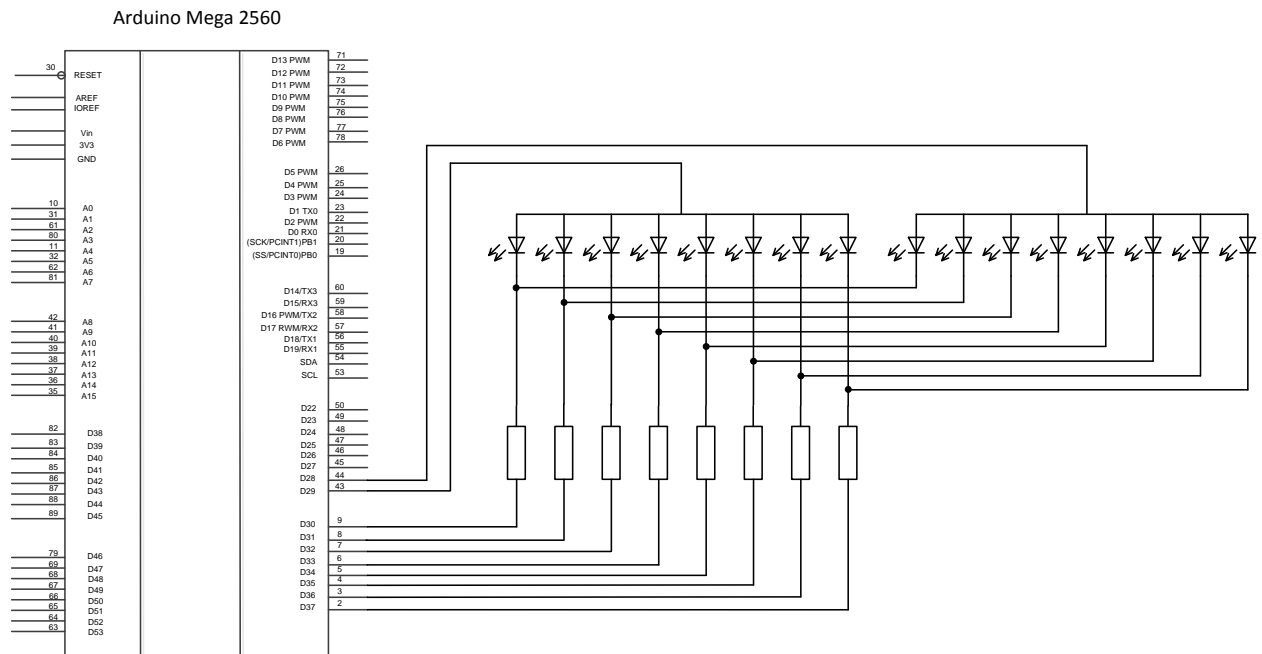


Рисунок 8 – Схема подключения семисегментного двухразрядного индикатора к плате микроконтроллера

Подберем резисторы, ограничивающие ток на светодиодах. Максимальный постоянный ток светодиодов составляет 25 мА, а нам нужно выбрать рабочий ток  $I_{\text{раб}}$ . С учетом возможных скачков напряжения зададим рабочий ток, как половину от максимального  $I_{\text{раб}} = 13$  мА. Напряжение с выводов Arduino 5 В, также учитывается падение напряжения на самих диодах, в справочнике это максимальное значение 2,5 В. Отсюда номинал каждого резистора рассчитывается как:

$$R = \frac{U_R - U_D}{I_{\text{раб}}} = \frac{5 - 2,5}{0,013} = 192 \text{ Ом.} \quad (8)$$

Выбираем номинал резистора из ряда E24 200 Ом.

Рассчитаем значение тока при этом резисторе:

$$I_{\text{раб}} = \frac{U_R - U_D}{R} = \frac{2,5}{200} = 12,5 \text{ мА.} \quad (9)$$

Максимальный ток, который будет поступать с выводов микроконтроллера равен 12,5 мА.

Рассчитаем мощность резистора:

$$P = (U_R - U_D) \cdot I_{\text{раб}} = 2,5 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} = 31 \text{ мВт} \quad (10)$$

С запасом выбираем мощность не менее двух указанных мощностей ( $P \geq 70$  мВт). Тип резистора выбираем SMD (для поверхностного монтажа). Для удобства монтажа выберем резистор 0805 сопротивлением 200 Ом, номинальной мощностью 0,125 Вт, точностью 5 %.

Учитывая, что каждый светодиод потребляет ток 12,5 мА, то суммарный ток на общем аноде (с учетом восьми светодиодов) составит 100 мА. Соответственно для подачи напряжения на общий анод диодов воспользуемся транзисторным ключом (рисунок 9).

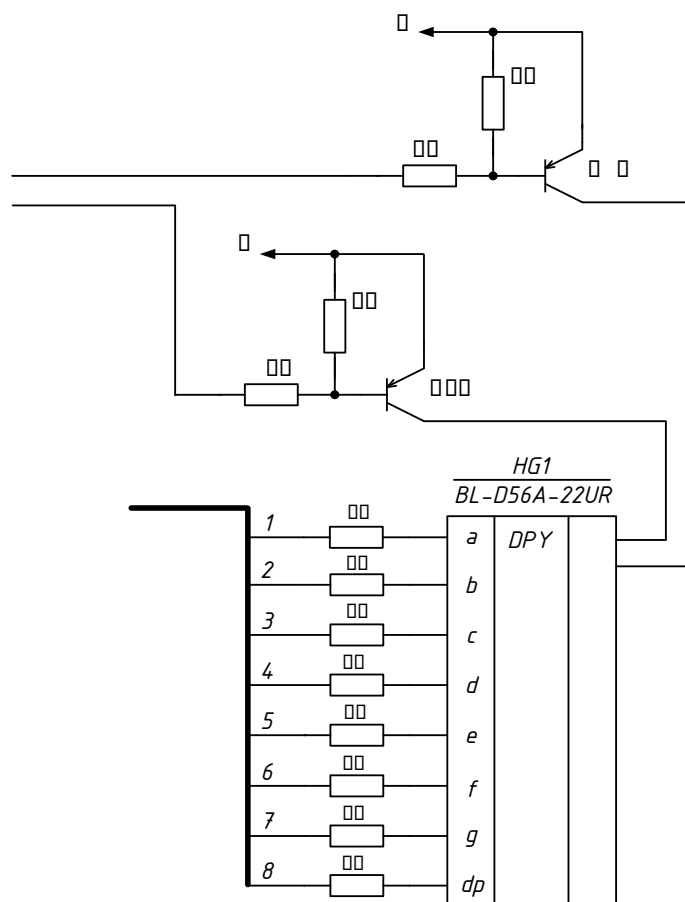


Рисунок 9 – Подключения семисегментного двухразрядного индикатора с транзисторными ключами

На данной схеме представлено два одинаковых участка цепи, соответственно и элементы VT1 и VT2 выберем одинаковые.

Для выбора транзистора определим параметры на участке цепи, где находится этот транзистор. Рабочее напряжение поступает на коллектор транзистора с выводов Arduino и равно  $U_{\text{раб}} = 5$  В (реальное  $U_{\text{раб}} = 4,5$  В), с запасом

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

12.03.01.2017.009.00 ПЗ

Лист

23

возьмем  $U_{раб} = 10$  В. Суммарный ток, который будет проходить по транзистору, как мы уже определили, будет равен  $I_{раб} = 100$  мА.

По этим параметрам выберем транзистор KSA1015 с параметрами: максимальное напряжение коллектор-эмиттер при заданном токе коллектора и разомкнутой цепи базы  $U_{кэо}$  (макс) = - 50 В; максимально допустимый ток коллектора  $I_{к}$  (макс) = - 0,15 А, статический коэффициент усиления тока  $\beta$  не менее 120. [8]

Ключи управляются подачей на транзисторы логической единицы или логического нуля.

Низкий уровень на выходе Arduino при больших нагрузках ( $U_{пит} = 5$  В) будет максимум  $U_{л0} = 0,7$  В.

Высокий уровень на выходе Arduino при больших нагрузках ( $U_{пит} = 5$  В) будет минимум  $U_{л1} = 4,2$  В

Так как минимальное напряжение логической единицы на выходе контроллера = 4,2 В, то падение напряжения на обоих резисторах R5 и R6 составит:

$$U_{R5,R6} = U_{пит} - U_{л1} = 0,8 \text{ В} \quad (11)$$

Для надежного запираания транзистора требуется обеспечить напряжение база – эмиттер не более 0,2 – 0,3 В. Для этого возьмем соотношение резисторов R5 к R6, как 2 к 1. Это значит падение напряжения на резисторе R5 составит 0,54 В, а на резисторе R6 - 0,26 В, что достаточно для запираания транзистора.

Для обеспечения режима насыщения транзистора при токе коллектора не менее 120 мА выбираем ток базы из соотношения:

$$I_б \geq \frac{I_{к}}{\beta} \quad (12)$$

Из этого следует  $I_б = 1,2$  мА.

Условия для расчета сопротивления R5

$$R5 = 2 \cdot R6; \quad (13)$$

$$I_{R5} = I_б + I_{R6} = \frac{I_{к}}{\beta} + \frac{U_{R6}}{R6}, \quad (14)$$

где  $U_{R6}$  – падение напряжения на резисторе R6 возьмем 1,1 В, так оно должно быть не меньше напряжения насыщения база-эмиттер на транзисторе при его запертом состоянии, которое для выбранного транзистора равно 1,1 В.

$$R5 = \frac{U_{R5}}{I_{R5}}. \quad (15)$$

Отсюда общее уравнение для нахождения сопротивления резистора R6 примет вид:

$$R5 = \frac{U_{R5}}{\frac{I_{\kappa}}{\beta} + \frac{U_{R6}}{R6}}; \quad (16)$$

$$R5 = \frac{3,7}{\frac{150 \cdot 10^{-3}}{120} + \frac{1}{2R5}} = \frac{3,7}{\frac{150 \cdot 10^{-3}}{120} + \frac{1 \cdot 2}{R5}} = \frac{3,7 \cdot 120 \cdot R5}{R5 \cdot 150 \cdot 10^{-3} + 240}; \quad (17)$$

$$R5 \cdot (R5 \cdot 150 \cdot 10^{-3} + 240) = 444R5; \quad (18)$$

$$150 \cdot 10^{-3} \cdot R5^2 + 240R5 - 444R5 = 0; \quad (19)$$

$$150 \cdot 10^{-3} \cdot R5^2 - 204R5 = 0; \quad (20)$$

$$R5 \cdot (150 \cdot 10^{-3} \cdot R5 - 204) = 0; \quad (21)$$

$$\begin{cases} R5 = 0, \\ 150 \cdot 10^{-3} \cdot R5 = 204; \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} R5 = 0, \\ R5 = 1360. \end{cases} \quad (23)$$

Отсюда сопротивление резистора  $R5 = 1360$  Ом. Из формулы (13) сопротивление резистора  $R6 = 2720$  Ом.

Из номинальных сопротивлений выбираем сопротивление ряда E24 для  $R5 = 1,3$  кОм, для  $R6 = 2,7$  кОм

Рассчитаем значение тока базы  $I_6$  при выбранных номиналах резисторов:

$$I_{R5} = \frac{U_{R5}}{R5} = \frac{3,7}{1,3 \cdot 10^3} = 2,85 \text{ мА}. \quad (24)$$

Максимальный ток, который будет поступать на вход микроконтроллера, равен 2,85 мА.

Так как по резистору протекает импульсный ток, рассчитаем сначала импульсную мощность резистора как

$$P_{\text{им}} = U_{R5} \cdot I_{R5} = 2,85 \cdot 10^{-3} \cdot 3,7 = 10,5 \text{ мВт}. \quad (25)$$



Для выбора резистора используем среднюю мощность, и так как на данном участке цепи два транзистора будут включаться по очереди, то скважность будет равна  $Q = 2$ . Находим  $P_{cp}$

$$P_{cp} = \frac{10,5 \cdot 10^{-3}}{2} = 5,25 \text{ мВт.} \quad (26)$$

С запасом выбираем мощность не менее двух указанных мощностей,  $P \geq 10,5 \text{ мВт}$ . Тип резистора выбираем SMD (для поверхностного монтажа). Для удобства монтажа выберем резистор 0805 сопротивлением 1,3 кОм, номинальной мощностью 0,125 Вт, точностью 5 %.

Рассчитаем мощность резистора R6.

Импульсная мощность резистора R6:

$$P_{им} = \frac{U_{R6}^2}{R6} = \frac{1,21}{2,7 \cdot 10^3} = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.} \quad (27)$$

Рассчитаем среднюю мощность  $P_{cp}$  (скважность равна  $Q = 2$ )

$$P_{cp} = \frac{0,45 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ мВт.} \quad (28)$$

С запасом выбираем мощность не менее двух указанных мощностей,  $P \geq 0,45 \text{ мВт}$ . Тип резистора выбираем SMD (для поверхностного монтажа). Для удобства монтажа выберем резистор 0805 сопротивлением 2,7 кОм, номинальной мощностью 0,125 Вт, точностью 5 %.

Так как оба разряда семисегментного двухразрядного индикатора идентичны, то и расчет и выбор параметров для второго транзистора осуществляется как в предыдущем варианте.

### 3.3 Выходной каскад.

Одним из условий технического задания является требование управления восьмью электро-пнеumo-клапанами. Для управления клапанами необходимы электронные ключи. Эту функцию можно реализовать с помощью разных компонентов, например:

- оптореле,
- транзистор,
- тиристор.

Выбор элементов происходил по следующим характеристикам. Оптореле обладает коммутируемым напряжением до 500 В, коммутируемым током до 40 А, но довольно низким быстродействием. Главным преимуществом оптореле является гальваническая развязка.

Транзисторы обладают аналогичными коммутируемыми токами и напряжением. Быстродействие по сравнению с оптореле значительно преобладает.

Тиристоры предназначены, в основном, для работы в цепях переменного тока. Их недостатком является невозможность отключения тиристора внешним воздействием.

Исходя из всего вышесказанного, для управления клапанами используем транзисторные ключи, которые предназначены для бесконтактной коммутации цепей нагрузки под воздействием внешних управляющих сигналов. Так как для нашего случая значительно является быстродействие, чем гальваническая развязка.

Для построения электронных ключей на транзисторах возможно использование двух схем (рисунок 10).

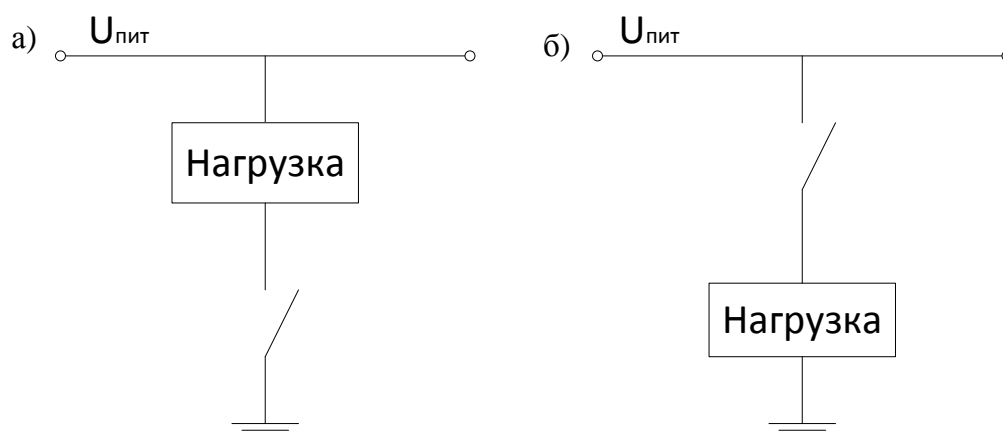


Рисунок 10 – Схемы построения электронных ключей: а) схема с общим питанием; б) схема с общей землей

Из двух вариантов выбираем схему с общей землей, так как в схеме с общим питанием напряжение присутствует на нагрузке, даже когда ключ будет разомкнут.

Принципиальная схема электронного транзисторного ключа будет выглядеть так (рисунок 11).

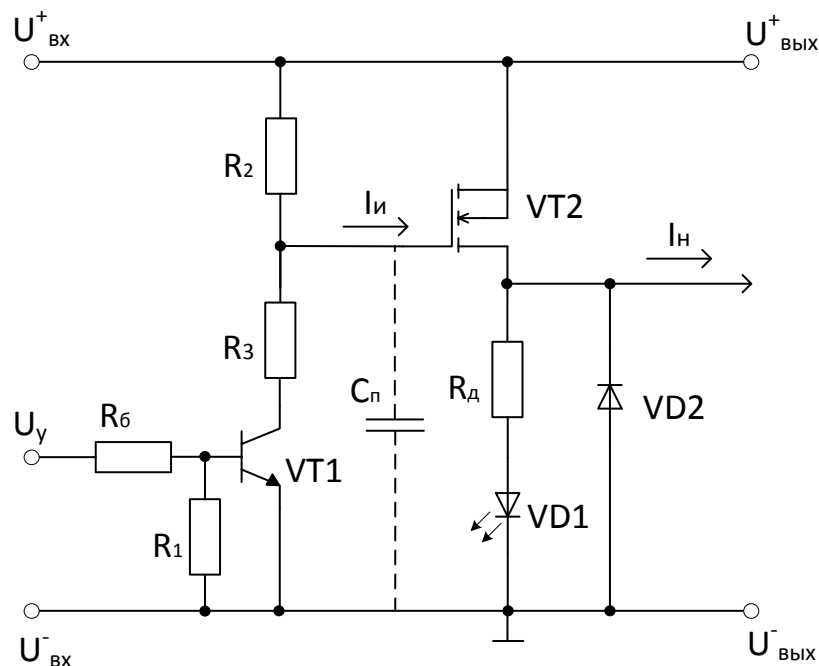


Рисунок 11 – Принципиальная схема электронного ключа

Напряжение питания  $U^+_{\text{ВХ}}$ ,  $U^-_{\text{ВХ}}$  поступает с источника питания и равно 24 В и 0 В соответственно. Напряжение управления  $U_y$  используется для управления транзистором VT1 для закрытия транзистора напряжение  $U_y = 0$  В, для открытия  $U_y = 5$  В. VT1 в свою очередь открывает полевой транзистор VT2. Светодиод VD1 используется для индикации открытого состояния ключа, последовательно с диодом в цепь включен резистор  $R_d$  предназначен для ограничения тока диода. Диод VD2 предназначен для защиты от обратного выброса напряжения на индуктивной нагрузке. Сопротивление на базе биполярного транзистора обозначается  $R_6$ . Резисторы  $R_2$  и  $R_3$  нужны для определения режима работы выходного транзистора. Также в схеме присутствует паразитная емкость  $C_{\text{п}}$ , которую необходимо учитывать при расчетах номиналов компонентов.

Выбор элементов начнем с полевого транзистора VT2. Он выбирается с учетом тока потребления нагрузкой  $I_H$ . Выбранные электро-пневмо-клапаны в нормальном режиме с учетом запаса потребляют 2 А. Значит выбираем транзистор с Р-каналом с током стока не менее 2 А. Транзистор IRF5305PBF с пороговым напряжением включения транзистора 2.4 В. Это значит, что транзистор будет открыт при подаче на затвор напряжения более 4 В. [9]

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

12.03.01.2017.009.00 ПЗ

Лист

28

Для обеспечения стабильной работы схемы необходимо выбрать рабочий ток  $I_{\text{раб}}$  транзистора VT1. Зададим его в сто раз больше начального тока коллектора транзистора VT1:  $I_{\text{раб}} \geq 100 \cdot I_{\text{к0}}$ . Выберем транзистор VT1, у которого напряжение коллектор-эмиттер не меньше напряжения питания, т.е.  $> 24$  В.

Возьмем биполярный транзистор BC547. Его напряжение коллектор-эмиттер равно 45 В. Начальный ток коллектора транзистора равен 5 мкА. Из этого рабочий ток транзистора должен быть равен 0,5 мА. [10]

Рассчитаем общее сопротивление резисторов R1 и R2:

$$(R1 + R2) = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{раб}}} = \frac{24}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 48 \text{ кОм} \quad (29)$$

Далее рассчитаем отдельно транзистор R2. Пороговое напряжение включения полевого транзистора VT2 составляет 4 В. С запасом возьмем значение  $U_{\text{отк}} = 6$  В. Рассчитаем резистор R2:

$$R2 = \frac{U_{\text{отк}}}{I_{\text{раб}}} = \frac{6}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 12 \text{ кОм} \quad (30)$$

Из номинальных сопротивлений выбираем из ряда E12 12 кОм.

Так как по резистору протекает импульсный ток, рассчитаем сначала импульсную мощность резистора:

$$P_{\text{им}} = U_{R2} \cdot I_{\text{раб}} = 6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 3 \text{ мВт}. \quad (31)$$

Для выбора резистора используем среднюю мощность:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{им}}}{Q} = \frac{P_{\text{им}} \cdot \tau}{T}, \quad (32)$$

Выберем скважность Q из требований технических характеристик электропневмо-клапанов, не менее 2. Находим  $P_{\text{ср}}$  при выбранном значении:

$$P_{\text{ср}} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,5 \text{ мВт}. \quad (33)$$

С запасом выбираем мощность не менее двух указанных мощностей  $P \geq 3$  мВт. Тип резистора выбираем SMD (для поверхностного монтажа). Для удобства монтажа выбираем резистор 0805 сопротивлением 12 кОм, номинальной мощностью 0,125 Вт, точностью 5 %.

Далее рассчитаем резистор R3:

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

$$R3 + R2 = 48 \text{ кОм}; \quad (34)$$

$$R3 = 48 - 12 = 36 \text{ кОм}. \quad (35)$$

Из номинальных сопротивлений выбираем из ряда E24 36 кОм.

Падение напряжения на резисторе R3 составит  $U_{R3} = 18 \text{ В}$ .

Также рассчитаем сначала импульсную мощность резистора:

$$P_{\text{им}} = U_{R3} \cdot I_{\text{раб}} = 18 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 9 \text{ мВт}. \quad (36)$$

Далее для выбора резистора находим среднюю мощность  $P_{\text{ср}}$  по формуле ( ) при выбранном значении скважности  $Q = 2 \text{ мс}$ :

$$P_{\text{ср}} = \frac{9 \cdot 10^{-3}}{2} = 4,5 \text{ мВт}, \quad (37)$$

С запасом выбираем мощность не менее двух указанных мощностей  $P \geq 9 \text{ мВт}$ . Тип резистора выбираем SMD (для поверхностного монтажа). Для удобства монтажа выбираем резистор 0805 сопротивлением 36 кОм, номинальной мощностью 0,125 Вт, точностью 5 %.

Рассчитаем постоянную времени цепи управления транзистором VT2 с учетом паразитной емкости  $C_{\text{п}}$ . Для этого нарисуем эквивалентную схему (рисунок 12).

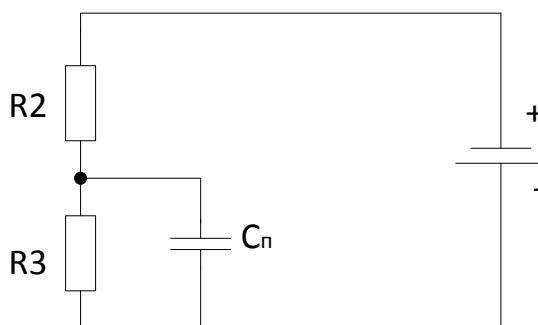


Рисунок 12 – Эквивалентная схема включения емкости  $C_{\text{п}}$

Постоянная времени будет равна:

$$\tau = RC = \left( \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \right) \cdot C_{\text{п}}, \quad (38)$$

Общая паразитная емкость будет равна  $C_{\text{п}} = 3430 \text{ пФ}$ . Сюда входят входная емкость транзистора 3400 пФ и монтажная емкость, которая примерно будет равна 30 пФ. Отсюда постоянная времени

$$\tau = \left( \frac{12 \cdot 36 \cdot 10^6}{48 \cdot 10^3} \right) \cdot 3430 \cdot 10^{-12} = 30,9 \text{ мкс}, \quad (39)$$

что вполне приемлемо для наших задач.

Далее рассчитаем сопротивление базы резистора  $R_6$  и резистор  $R_1$ . Ток базы связан с током коллектора соотношением

$$I_{6,min} = \frac{I_K}{\beta}. \quad (40)$$

Ток коллектора у биполярного транзистора в нашем случае 0,5 мА. Коэффициент  $\beta$  в описании минимальный равен  $\approx 100$ .

$$I_{6,min} = \frac{0,5}{100} = 5 \text{ мкА}. \quad (41)$$

Для обеспечения гарантированного режима насыщения во всех условиях эксплуатации выбираем ток базы в 3 раза больше: 15 мкА.

Сопротивление базы рассчитаем как:

$$R_6 = \frac{U_y - U_{6э}}{I_6}, \quad (42)$$

где  $U_y$  – выходное напряжения логической единицы на выходе процессора, минимальное значение составляет 4,2 В,  $U_{6э}$  – напряжение насыщения базы-эмиттера на транзисторе, для этого транзистора при максимальных нагрузках оно равно 900 мВ.

$$R_6 = \frac{4,2 - 0,9}{15 \cdot 10^{-6}} = 0,22 \text{ МОм}. \quad (43)$$

Из номинальных сопротивлений выбираем из ряда E24 220 кОм.

Рассчитаем импульсную мощность для резистора  $R_6$

$$P_{им} = (U_y - U_{6э}) \cdot I_6 = 3,3 \cdot 15 \cdot 10^{-6} = 49 \text{ мкВт}. \quad (44)$$

Рассчитаем среднюю мощность  $P_{ср}$ , (скважность равна  $Q = 2$  мс)

$$P_{ср} = \frac{49 \cdot 10^{-6}}{2} = 25 \text{ мкВт}. \quad (45)$$

С запасом выбираем мощность не менее двух указанных мощностей ( $P \geq 49$  мкВт). Тип резистора выбираем SMD (для поверхностного монтажа). Для удобства монтажа выбираем резистор 0805 сопротивлением 220 кОм, номинальной мощностью 0,125 Вт, точностью 5 %.

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

Теперь вычислим резистор R1. Для обеспечения открытого состояния транзистора, возьмем минимальное значения выходного напряжения логической единицы, которое равно  $U_{л1} = 4,2$  В. Ток через резистор  $R_6$  мы вычислили ранее, он равен 15 мкА. Минимальный ток базы транзистора для обеспечения режима насыщения должен быть 5 мкА. Выбираем ток базы 10 мкА и ток резистора  $R1 = 5$  мкА. Отсюда рассчитаем сопротивление резистора R1.

$$R1 = \frac{U_{6э}}{I} = \frac{0,9}{5 \cdot 10^{-6}} = 180 \text{ кОм.} \quad (46)$$

Здесь можно как и у индикатора а можно так оставить

Из номинальных сопротивлений выбираем наиболее близкое к нашему значению. Из ряда E24 выбираем номинал 180 кОм.

Рассчитаем импульсную мощность для резистора R1:

$$P_{им} = U_{л1} \cdot I_6 = 4,2 \cdot 15 \cdot 10^{-6} = 63 \text{ мкВт} \quad (47)$$

Для выбора резистора используем среднюю мощность  $P_{ср}$ :

$$P_{ср} = \frac{63 \cdot 10^{-6}}{2} = 31,5 \text{ мкВт.} \quad (48)$$

С запасом выбираем мощность не менее двух указанных мощностей  $P \geq 63$  мкВт. Тип резистора выбираем SMD (для поверхностного монтажа). Для удобства монтажа выбираем резистор 0805 сопротивлением 180 кОм, номинальной мощностью 0,125 Вт, точностью 5 %.

Оценим постоянную времени цепи управления транзистором VT1 (рис. 10).

$$\tau = RC = R_6 \cdot C_{п} = 220 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-12} = 6,6 \text{ мкс,} \quad (49)$$

Задержка включения клапана SX10 составляет 600 - 800 мкс, так что постоянная времени удовлетворяет условиям технического задания.

Рассчитаем сопротивление резистора светодиода VD1. Для этого сначала выберем светодиод VD1.

Так как у нас нет строгих требований к условиям видимости, возьмем светодиод зеленый BL-L314PGC круглой формы, диаметром 3 мм. У него максимальный импульсный прямой ток  $I_{и.макс} = 150$  мА, максимальное обратное напряжение  $U_{об.макс} = 5$  В, рабочий ток этого диода составляет 25 мА. Также имеется потеря напряжения на самом диоде 2,4 В. [11]

Отсюда  $R_D$

$$R_D = \frac{U_R - U_D}{I_{\text{раб}}} = \frac{24 - 2,4}{25 \cdot 10^{-3}} = 864 \text{ Ом.} \quad (50)$$

Выбираем номинал резистора из ряда E24 910 Ом.

Рассчитаем значение тока при этом резисторе:

$$I_{\text{раб}} = \frac{U_R - U_D}{R} = \frac{21,4}{910} = 23 \text{ мА.} \quad (51)$$

Так как на светодиоде тоже протекает импульсный ток, рассчитаем импульсную мощность резистора  $R_D$

$$P_{\text{им}} = (U_R - U_D) \cdot I_{\text{раб}} = 21,4 \cdot 23 \cdot 10^{-3} = 0,49 \text{ Вт,} \quad (52)$$

затем рассчитываем среднюю мощность  $P_{\text{ср}}$

$$P_{\text{ср}} = \frac{0,49}{2} = 0,245 \text{ Вт.} \quad (53)$$

С запасом выбираем мощность не менее двух указанных мощностей  $P \geq 0,49$  Вт. Тип резистора выбираем SMD (для поверхностного монтажа). Наиболее подходит резистор 1210 сопротивлением 910 Ом, номинальной мощностью 0,5 Вт, точностью 5 %.

Выберем диод защиты VD2. Так как по цепи протекает импульсный ток, то выбираем импульсный диод. Для выбора обозначим характеристики участка цепи, на котором расположен диод. Напряжение, поступающее на диод, равно 24 В. С запасом возьмем в два раза больше, 48 В. Прямой ток на этом диоде будет равен 2 А, с запасом берем 3 А. Для этих характеристик подходит диод импульсный FR302. Его характеристики: Максимальное постоянное обратное напряжение 100 В, максимальный прямой (выпрямленный за полупериод) ток 3 А, максимально допустимый прямой импульсный ток 200 А. [12]

### 3.4 Переключатель режима работы.

Тумблер предназначен для переключения между режимами: подача давления, сброс давления, программное управление клапанами и режим покоя (когда все клапаны закрыты) (рисунок 13).

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33



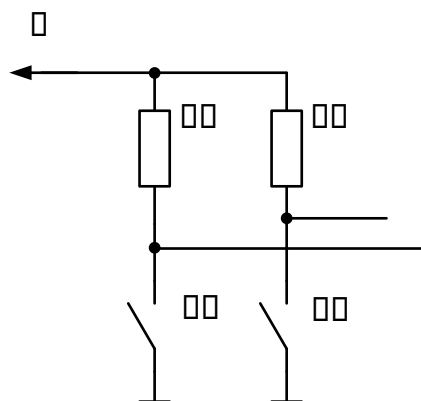


Рисунок 13 – Схема переключателя

Рассчитаем резисторы R3, R4 в данной схеме.

Из описания технической спецификации микроконтроллера atmega 2560, который установлен на плате, напряжение логического нуля на входе Arduino при напряжении питания  $U_{пит} = 2,4 \text{ В} \div 5,5 \text{ В}$  будет определяться от  $-0,5 \text{ В}$  до  $0,3 \cdot U_{пит} \text{ В}$ . Таким образом  $U_{л0} = -0,5 \text{ В} \div 1,5 \text{ В}$ . Напряжение логической единицы на входе Arduino при напряжении питания  $U_{пит} = 2,4 \text{ В} \div 5,5 \text{ В}$  будет определяться от  $0,7 \cdot U_{пит} \text{ В}$  до  $U_{пит} + 0,5 \text{ В}$ . Таким образом  $U_{л1} = 3,5 \text{ В} \div 5,5 \text{ В}$ . Максимальный входной ток на входе платы, к которому подключены контакты ключа, составляет  $I_{вх} = 1 \text{ мкА}$ . Нам нужно, чтобы на вход подавалась логическая «1», поэтому для расчета возьмем минимальное напряжение для логической «1». Из этих условий:

$$R3, R4(\text{макс}) = \frac{U_{л1}(\text{мин})}{I_{вх}} = \frac{3,5}{1 \cdot 10^{-6}} = 3,5 \text{ МОм}. \quad (54)$$

Так как полученное значение максимально-допустимое, возьмем резистор из ряда E24 номиналом 200 кОм.

Рассчитаем мощность резистора при формировании лог. «0»,

$$P = \frac{U_{п}^2}{R3} = \frac{25}{200 \cdot 10^3} = 125 \text{ мкВт}. \quad (55)$$

С запасом выбираем мощность не менее двух указанных мощностей,  $P \geq 250 \text{ мкВт}$ . Тип резистора выбираем SMD (для поверхностного монтажа). Для удобства монтажа выбираем резистор 0805 сопротивлением 200 кОм, номинальной мощностью 0,125 Вт, точностью 5 %.

Для данных переключателей выберем тумблер SMTS-101 (on-off). Его параметры: рабочее напряжение  $U_{раб} = 250 \text{ В}$ , рабочий ток  $I_{раб} = 1,5 \text{ А}$ .

### 3.5 Принципиальная схема блока управления (приложение А).

Принципиальная схема состоит из нескольких составных частей:

1. Блок питания.
2. Индикатор погрешности.
3. Выходной каскад.
4. Переключатель.
5. Плата микроконтроллера.

Для управления клапанами на блок управления подается напряжение питания с внешнего источника (блок питания)  $U_{пит} = 24$  В. Это напряжение необходимо для нормальной работы клапанов. Соответственно такое напряжение подается на электронные ключи клапанов.

Далее рассмотрим элементы контактного соединения.

Так как на плате Arduino Mega 2560 используются гнезда для контактов с расстоянием 2,54 мм, то для подключения вилок ХР2, ХР3, ХР4 используем вилки штыревые DS1021. Для подключения необходимо 25 контактов, исходя из этого выбираем DS1021-1x40, в которой количество контактов в ряду 40. Предельное постоянное напряжение через эти контакты не менее 500 В, в течение 1 минуты, сопротивление контактов не более 0,01 Ом, рабочий ток 1 А.

Разъем ХР1 крепится на корпус блока управления для удобства подключения внешнего источника питания. Для этого возьмем вилку, так как обычно для проводов, с которых идет напряжение питания, используется гнездо. Выбираем вилку DB-9М на 9 контактов с пайкой на кабель. Сопротивление контактов не более 0,1 Ом, предельный ток 5 А, предельное напряжение переменного тока, в течение 1 минуты, не менее 1000 В.

Для подключения аналоговых датчиков XS1, XS2 используем высокочастотный разъем. Для этого возьмем разъем CP50-73ФВ с монтажом на корпус нашего блока управления. Рабочее напряжение разъема 10 В, сопротивление контактов не более 0,01 Ом.

Для подключения клапанов объединим выходы электронных ключей. Так как для измерительного стенда используется 8 клапанов, то выберем розетку DB-

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

25F на 25 контактов с пайкой на кабель. Она также будет крепиться на корпус блока управления. Свободные контакты останутся не использованными и никак не повлияют на функционирование розетки. Данный разъем имеет следующие характеристики: сопротивление контактов не более 0,1 Ом, предельный ток 5 А, предельное напряжение переменного тока, в течение 1 минуты, не менее 1000 В.

### 3.6 Расчет и проверка рабочих режимов элементов схемы.

Проверка рабочих режимов элементов осуществляется при помощи карт рабочих режимов электронных компонентов. В карте сравниваются рабочие режимы элементов по схеме и по нормам технической документации.

Для каждого элемента используется отдельная форма карты рабочих режимов:

1. Карта рабочих режимов полевых транзисторов и транзисторных сборок (Приложение Б).

2. Карта рабочих режимов диодов (выпрямительных, импульсных, универсальных), варикапов и диодных сборок (Приложение В).

3. Карта рабочих режимов резисторов, резисторных сборок, терморезисторов, поглотителей и потенциометров (Приложение Г).

4. Карта рабочих режимов транзисторов и транзисторных сборок (Приложение Д).

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

#### 4 РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТНОЙ ПЛАТЫ КАНАЛА ВКЛЮЧЕНИЯ КЛАПАНА

При изготовлении печатных плат используются две группы основных материалов: проводниковые и электроизоляционные.

Самое широкое распространение среди проводниковых материалов получила медь марки МО (ГОСТ 14958-69) высокой проводимости, а в качестве изоляционного материала широко используется гетинакс или стеклотекстолит.

Толщина основания печатной платы выбирается в основном в зависимости от механических нагрузок на печатную плату и ее конструктивных особенностей. Для многослойных печатных плат суммарная толщина определяется количеством слоев, количеством прокладок с учетом усадки при прессовании.

Выбор материала основания производят с учетом обеспечения физико-механических и электрических параметров печатных плат при воздействии механических нагрузок, климатических факторов и химически агрессивных сред.

По размещению проводящего рисунка печатные платы делятся на односторонние, двусторонние и многослойные.

Односторонние и двусторонние печатные платы просты по конструкции и не сложны в изготовлении.

Для реализации конструкции печатных узлов нужны материалы, которые устойчивы к механическим и климатическим воздействиям, удовлетворяют ряду технологических требований и обеспечивают надежность узлов.

Для изготовления печатных плат обычно используют фольгированные листовые диэлектрики. Исходными для изготовления фольгированных диэлектриков могут быть бумага или стеклоткань, пропитанные синтетическими смолами, или полимерные плёнки из лавсана, фторопласта и др. На поверхность этих материалов приклеиваются металлическая фольга.

Материалы оснований плат должны выдерживать механические и климатические воздействия в соответствии с требованиями на РЭА.

- Неплоскостность поверхностей основания платы должна быть не более 0,1 мм на 100 мм.

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>37</i>

- Непараллельность поверхностей основания платы – не более 0,5 мм. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) основания платы должен быть близок к ТКЛР элементов поверхностного монтажа, устанавливаемых на печатную плату.

Основной целью процесса конструирования является создание коммутационного устройства для объединения группы ЭРЭ в функциональный узел с обеспечением требуемых механических и электрических параметров в заданном диапазоне эксплуатационных характеристик при минимальных затратах.

Компоновка изделия позволяет определить размеры и форму печатной платы, способы и точки крепления, конфигурацию пазов, вырезов отверстий и т.п. Сведения об элементной базе и электрических характеристиках принципиальной схемы определяют компоновку ЭРЭ, размещение элементов рисунка печатной платы и их параметры, количество проводящих слоёв, класс точности.

Для изготовления макета обычно используют печатные платы. Такое вид монтажа называют объемным монтажом.

Для удобства создания прототипа канала включения клапанов, сначала графически изобразим схему электрических соединений электронных компонентов (рисунок 14). Для проверки достаточно собрать схему для включения одного клапана, так как остальные будут идентичны ей. Примерная компоновка элементов на макетной плате изображена на рисунке 10, соединения выполнены проводом МГТФ = 0,12.

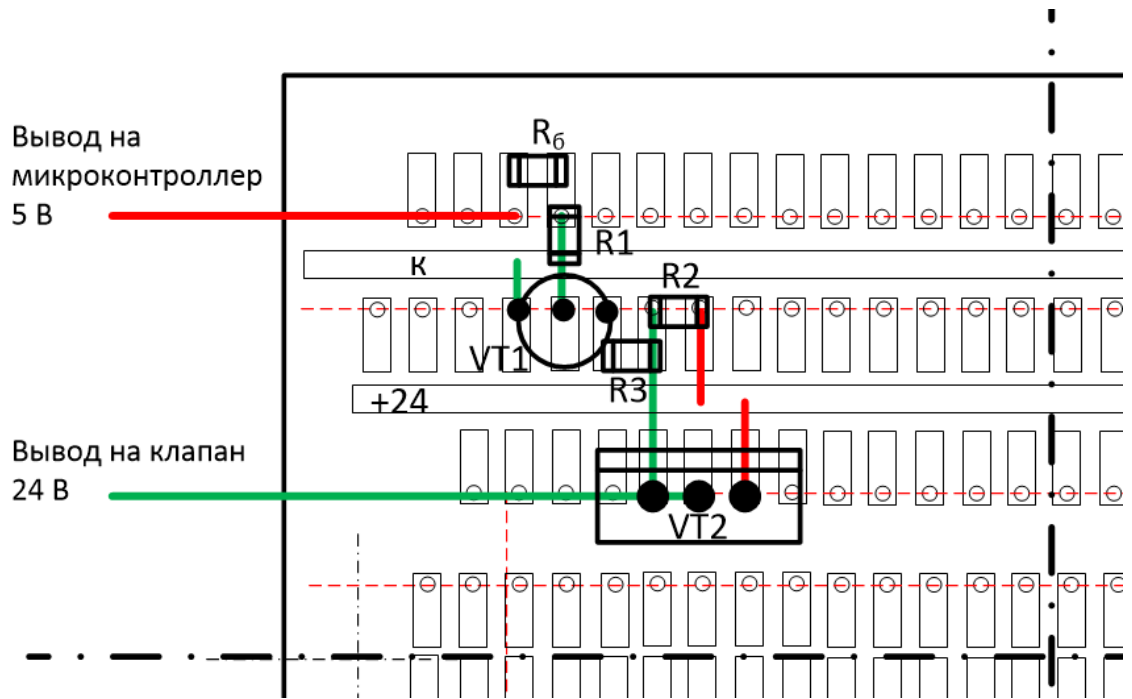


Рисунок 14 – Изображение макетной платы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

12.03.01.2017.009.00 ПЗ

Лист

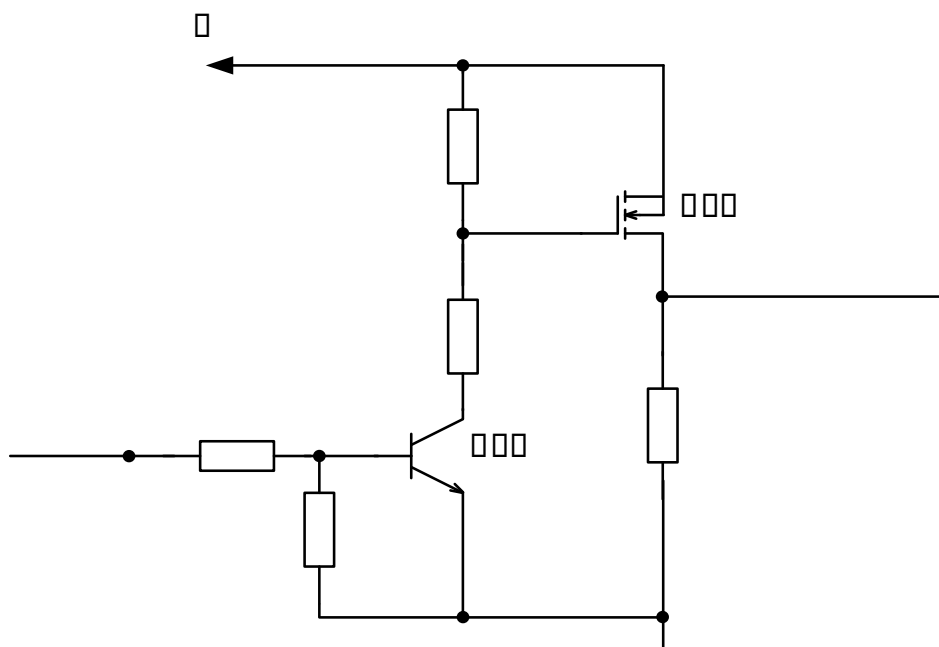
39

## 5 ПРОВЕРКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ КАНАЛА ВКЛЮЧЕНИЯ КЛАПАНА

Для проверки функционирования канала включения клапана используем схему, представленную на рисунке 15. В эксперименте использовались полупроводниковые приборы, немного отличающиеся по характеристикам от выбранных в разделе 3. Также не использовались элементы, проверка работы которых требует подключения реальной нагрузки.

Осуществлялись следующие замены (см. рисунок 10):

- 1) Транзистор VT1: IRF5305PBF заменен на IRF4905PBF;
  - 2) Резистор R<sub>г</sub>: 0805 сопротивлением 220 кОм заменен на 1206 220 кОм;
  - 4) Резистор R1: 0805 сопротивлением 180 кОм заменен на 1206 100 кОм;
  - 5) Резистор R2: 0805 сопротивлением 12 кОм заменен на 1206 11 кОм;
  - 6) Резистор R3: 0805 сопротивлением 36 кОм заменен на 1206 22 кОм;
  - 7) Диод защиты VD2 не использован;
  - 8) Светодиод VD1 и вместе с ним резистор R<sub>д</sub> не использованы;
- Вместо нагрузки использован резистор сопротивлением 100 Ом.



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

12.03.01.2017.009.00 ПЗ

Лист

40

Таблица 1 – Параметры сигналов канала включения клапана

Параметры сигнала	Тип сигнала	
	Входной	Выходной
Длительность импульса, мс	0,5	0,7
Период, мс	1,2	1,2
Амплитуда, В	5	≈ 25
Задержка первого каскада: - передний фронт, мкс - задний фронт, мкс		2 4
Задержка второго каскада: - передний фронт, мкс - задний фронт, мкс		2 41
Задержка общая: - передний фронт, мкс - задний фронт, мкс		4 45

Данное испытание макета канала включения клапана проводилось на имеющихся приборах:

1. Генератор импульсов Г5 – 54.

Режим измерения:

- частота  $\nu = 1000$  Гц,
- напряжение  $U = 5$  В,
- временной сдвиг 0,1 мс,
- длительность импульса 0,5 мс.

2. Осциллограф С1 – 55.

3. Источник питания: тип «ТЕС88», напряжением до 30 В, силой тока до 5

А.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выпускной квалификационной работы разработана принципиальная схема блока управления клапанами, изготовлен и испытан макет выходного каскада блока управления клапанами динамического измерительного стенда по формированию пульсирующего давления. Для этого были произведены следующие шаги:

- Изучена литература по формированию пульсирующего давления, рассмотрены принципы формирования и измерения пульсирующего давления.
- Рассмотрены существующие системы для реализации модели создания пульсаций в потоке давления, которые имеют применение в теплотехнических отраслях промышленности.
- Разработан принцип управления электро-пневмо-клапанами для создания пульсирующего давления.
- Произведена проверка рабочей модели выходного каскада блока управления клапанами.

Данный блок управления может быть использован как в лабораторных стендах для обучения студентов технических специальностей, так и в промышленном производстве.

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		42

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 489977 СССР, М. Кл. G 011 27/00. Генератор прямоугольных импульсов для динамической калибровки датчиков давления / В.В. Иванов, В.И. Лагутин. – № 1959386/18-10; заявл. 24.08.73; опубл. 30.10.75, Бюл. № 40. – 2 с.

2. Пат. 2405978 Российская Федерация, МПК F15B 21/12. Способ генерации пульсаций давления / А.А. Хитрово. – № 2009110332/06; заявл. 20.03.09; опубл. 10.12.10, Бюл. № 34. – 5 с.

3. Пат. 2319126 Российская Федерация, МПК G01L 27/02, G05D 16/00. Способ задания давления в контролируемом объеме и установка для его осуществления / А.В. Жестков, А.А. Логиновский. – № 2006128956/28; заявл. 09.08.06; опубл. 10.03.08, Бюл. № 7. – 9 с.

4. Arduino Mega 2560 – <http://amperka.ru/product/arduino-mega-2560>.

5. Technical specifications: LM317. – USA, Dallas (Texas): Texas Instruments Incorporated, 2017. – 31 p.

6. Technical specifications: 1N4001, 1N4002, 1N4003, 1N4004, 1N4005, 1N4006, 1N4007. – USA, Denver (Colorado): Semiconductor Components Industries, LLC, 2012. – 7 p.

7. Technical specifications: led numeric display, 2 digit BL-D56X-22. – China, Zhenluo road zhenhai (Ningbo): Betlux Electronics, 2017. – 4 p.

8. Technical specifications: KSA1015. – USA, South Portland (Maine): Fairchild Semiconductor Corporation, 2002 – 4 p.

9. Technical specifications: IRF5305PBF. – USA, El Segundo (California): International Rectifier, 2005. – 8 p.

10. Technical specifications: BC546/547/548/549/550. – USA, South Portland (Maine): Fairchild Semiconductor Corporation, 2002 – 4 p.

11. Technical specifications: Round Type LED lamp, BL-L314. – China, Zhenluo road zhenhai (Ningbo): Betlux Electronics, 2017. – 3 p.

12. Technical specifications: FR301 - FR307. – USA, Plano (Texas): Diodes Incorporated, 2007. – 2 p.

					<i>12.03.01.2017.009.00 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43