

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»

(наименование кафедры)

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Промышленная электроника

(направленность (профиль)/ специализация)

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему Шагающий робот

|              |                       |                  |
|--------------|-----------------------|------------------|
| Студент      | <u>В.В. Богатырев</u> | _____            |
|              | (И.О. Фамилия)        | (личная подпись) |
| Руководитель | <u>Е.С. Глибин</u>    | _____            |
|              | (И.О. Фамилия)        | (личная подпись) |
| Консультанты | <u>О.Н. Брега</u>     | _____            |
|              | (И.О. Фамилия)        | (личная подпись) |

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент, А.А. Шевцов \_\_\_\_\_

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Тольятти 2017

## Аннотация

Объем выпускной квалификационной работы – стр. 61, таблиц – 2, рисунков – 53.

В работе разработана плата контроллера управления мобильного шагающего робота.

Структура работы представлена восемью разделами, заключением и списком литературы.

Определены актуальность темы, цели и задачи, в заключении сделаны выводы о проделанной работе.

Характерной чертой данной разработки является выполнение задачи сохранения горизонтального положения платформы робота при движении по наклонным поверхностям.

Сегодня шагающие роботы – это активно развивающееся направление в робототехнике. Ряд промышленно развитых стран ведет постоянные исследования и интенсивные разработки шагающих роботов. Подобный интерес является причиной возможности внедрения подобного рода роботов в различные сферы деятельности человека.

Целью работы является разработка платы контроллера управления мобильного шагающего робота, а также алгоритмов его передвижения по наклонной поверхности при удержании платформы в горизонтальном положении.

Предложена структурная схема мобильного шагающего робота. Обоснованно выбраны отдельные конструктивные элементы. Разработаны схема электрическая принципиальная, печатная плата и сборочный чертеж. Разработаны алгоритм движения и программное обеспечение. Произведена оценка безопасности и экологичности проекта. Выполнен экономический расчет.

## Abstract

The volume of graduate qualified work is – p. 61, tables – 2, figures – 53.

Board controller to control the walking robot has been developed.

The structure of the work is 8 sections, conclusion and references.

The relevance of the topic, goals and objectives are determined.

A key feature of this development is to keep the horizontal position of robot's platform while moving on inclined surfaces.

Today walking robots are an actively developing field in robotics. A number of industrialized countries conduct constant researches and intense development of walking robots. The reason of similar interest is the possibility of the introduction of such in different spheres of human activity.

The aim of this work is development of a board controller to control the walking robot, as well as algorithm of its movement over the inclined surface while holding the platform in a horizontal position.

The structural diagram of the walking robot is proposed. Each structural elements have been selected reasonably. Also it was designed the schematic circuit diagram, printed circuit Board and Assembly drawing. The motion algorithm and software are developed, produced the assessment of the safety and environmental performance of the project, economic calculation is performed.

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 5  |
| 1 Актуальность и обзор аналогов .....                                    | 7  |
| 2 Разработка структурной схемы .....                                     | 14 |
| 3 Выбор комплектующих и обоснование .....                                | 16 |
| 3.1 Выбор микроконтроллера .....   | 16 |
| 3.2 Выбор датчика расстояния.....  | 20 |
| 3.3 Выбор сервопривода.....  | 20 |
| 3.4 Выбор драйвера управления сервоприводами.....                        | 22 |
| 3.5 Выбор датчика акселерометра-гироскопа .....                          | 23 |
| 3.6 Выбор стабилизатора напряжения .....                                 | 24 |
| 4 Разработка принципиальной схемы .....                                  | 26 |
| 5 Разработка печатной платы и сборочного чертежа .....                   | 34 |
| 6 Разработка алгоритма движения шагающего робота .....                   | 38 |
| 6.1 Взаимодействие микроконтроллера с микросхемами PCA9685 и MPU-6050 .. | 38 |
| 6.2 Работа с сервоприводами .....  | 40 |
| 6.3 Работа с ультразвуковым датчиком .....                               | 42 |
| 6.4 Вычисление текущего угла наклона платформы.....                      | 43 |
| 6.5 Обоснование выбора алгоритма движения шагающего робота.....          | 45 |
| 6.6 Описание алгоритма передвижения шагающего робота .....               | 46 |
| 6.7 Блок схема алгоритма передвижения шагающего робота.....              | 52 |
| 7 Безопасность и экологичность проекта .....                             | 56 |
| 8 Экономический расчет .....   | 58 |
| Заключение.....  | 59 |
| Список используемой литературы .....                                     | 60 |

## Введение

Сегодня одно из активно развивающихся направлений в науке является робототехника. Активное развитие этого направления можно объяснить потребностью человечества в автоматизации всех производственных процессов и в повышении их эффективности и качества.

Основными классами разрабатываемых роботов являются манипуляционные и мобильные.

Манипуляционные роботы – это роботы, оснащенный манипулятором, устройство программного управления и имеющий несколько степеней свободы, предназначенный для выполнения двигательных или управляющих функций в ходе выполнения производственного процесса. Манипуляционные роботы находят свое применение в автомобилестроении для осуществления сварки и перемещения частей кузовов по сборочной линии (рисунок 1), в медицине для проведения операций где необходима высокая точность действий в строительстве и т.д.

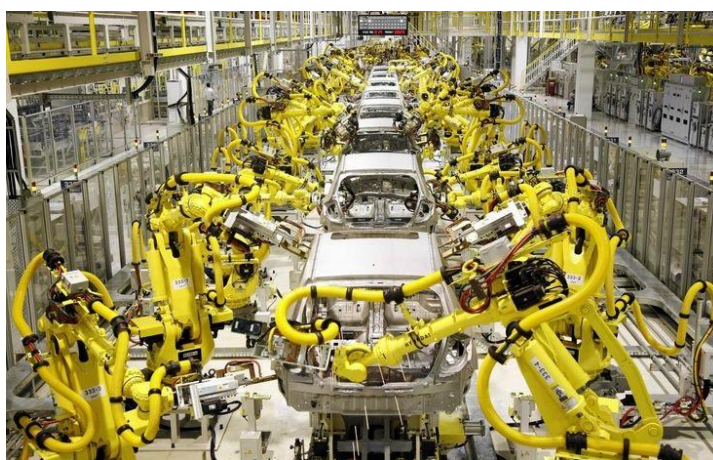


Рисунок 1 – Применение манипуляционных роботов в автомобилестроении

Мобильные роботы – это роботы, оснащенные движущимся шасси с автоматически управляемыми приводами. Мобильные роботы могут иметь колесную либо гусеничную базу, могут передвигаться посредством использования механических конечностей, летать, ползать, карабкаться по вертикальным поверхностям или же плавать в воде.

Подобно манипуляционным мобильные роботы активно внедряются в различные сферы человеческой деятельности. В связи с этим, сегодня трудно кого-то удивить роботом пылесосом, производящем уборку в вашем доме, роботом гидом (рисунок 2) который может провести для вас экскурсию по музею или выставке искусств, или квадрокоптером соседского мальчишки, которого он запускает во дворе.

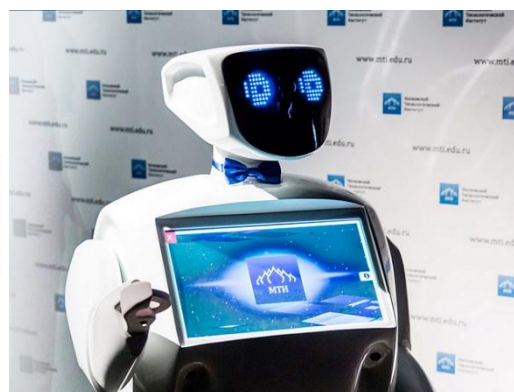


Рисунок 2 – Робот пылесос компании iRobot (слева) и робот-гид Алантим (справа)

Мобильные роботы и робототехнические комплексы находят свое применение как в военной сфере, так и в гражданской. В связи с этим разнятся и методы их применения. Например, некоторые зарубежные страны всерьез задумываются над тем чтобы использовать беспилотные летательные аппараты (БПЛА) для доставки почтовых посылок, а другие страны уже сегодня используют их для разведывания местоположения неприятеля и доставки «подарков» в виде средств массового поражения. В зависимости от выполняемой роботом задачи появляется такое требование как способность робота перемещаться в той или иной среде. Робот летает? Хорошо. Плавает? Еще лучше. Но что если есть необходимость перемещаться по тем участкам суши, которые роботы оснащенные колесной или гусеничной базой преодолеть не в состоянии? Для решения таких задач идеально подходят шагающие роботы. Рассмотрим их подробнее.

## 1 Актуальность и обзор аналогов

Шагающие роботы – это активно развивающееся направление в робототехнике. Однако сегодня шагающие роботы не являются столь распространенными, как их колесные или гусеничные собратья. Основной причиной тому, пожалуй, является необходимость разработки алгоритмов передвижения и взаимодействия с окружающим робота пространством, сложность которых возрастает по мере увеличения количества решаемых задач. На ряду с этим усложняется и конструкция проектируемого робота. Чем больше задач нужно реализовать и чем выше трудность их выполнения, тем большим количеством разнообразных датчиков необходимо оснастить нашу шагающую платформу.

Ряд промышленно развитых стран ведет постоянные исследования и интенсивную разработку шагающих роботов. Причиной подобного интереса является возможность внедрения подобного вида роботов в различные сферы деятельности человека. Шагающие роботы обладают неоспоримым преимуществом по сравнению с колесными либо гусеничными агрегатами заключающимся в способности передвигаться по участкам земной поверхности, по которым передвижение путем использования колесной либо гусеничной базы не представляется возможным. Используя эту особенность появляется возможность использовать таких роботов для: разведывания местности; в поисково-спасательных целях, когда нужно передвигаться по обломкам разрушенных зданий либо же внутри зданий и сооружений где есть необходимость передвижения по лестницам, узким коридорам и шахтам. Имея возможность управлять в отдельности каждой конечностью и задавать их месторасположение относительно несущей платформы, такие роботы могут быть использованы в сельском хозяйстве для высадки семян, при этом не «затаптывая» уже посаженные или проросшие культуры, либо же использоваться для поиска мин и разминирования минных полей где крайне важна точность движений. Используя алгоритмы для сохранения горизонтального положения платформы, можно использовать подобных роботов в медицине для передвижения людей с ограниченными способностями, или же для эвакуации

раненных с поля боя, с места крушения и так далее. Оснатив робота вакуумными присосками можно получить мойщика окон, который не рискует своей жизнью каждый раз взбираясь на высоту.

Примером роботов используемых для поиска мин является робот, разработанный компанией CSIC и получивший название SIL06 (рисунок 3). Этот робот обладает шестью ногами и подвижной головой оснащенной целым набором индуктивных и емкостных датчиков, помогающих в обнаружении мин. Перемещение робота осуществляется посредством одновременного перемещения трех ног, тем самым обеспечивая надежную опору на трех точках, скорость и маневренность.



Рисунок 3 – Робот, ищущий мины SIL06 от компании CSIC

Примером использования роботов в сельском хозяйстве можно рассматривать робота-фермера Prospero (рисунок 4), который является разработкой американского изобретателя Дэвида Дорхаута. Эти роботы оснащены несколькими контейнерами с удобрениями и семенами, а также устройством для бурения лунок, в которые в последствии семена высаживаются. После этого место высадки помечается специальным маркером, который является сигналом для других подобных роботов что здесь посадка уже произведена. Помимо этого, робот имеет возможность совершать обмен информации с себе подобными посредством использования канала инфракрасной беспроводной связи.





Рисунок 4 – Робот-фермер Prospero

Роботом, которому нипочем вертикальные преграды является робот RiSE (рисунок 5) разработанный компанией Boston Dynamics. Это шестиногий робот, имеющий на кончиках своих ног специальными приспособлениями, которые меняют свои свойства в зависимости от рода поверхности с которой они соприкасаются. Каждая нога оснащена двумя электромоторами. Благодаря бортовому компьютеру и набору датчиков робот способен производить оценку уровня наклона поверхности, а используя хвост, расположенный в задней части платформы, робот может сохранять равновесие или дополнительно опираться на него при подъеме.



## Рисунок 5 – Робот RiSE от компании Boston Dynamics

Робот BigDog (рисунок 6) компании Boston Dynamics планировался как робот-спутник для солдат находящихся в сложных природно-климатических условиях. Робот обладает четырьмя ногами приводимыми в действия четырьмя гидродвигателями каждая, которые в свою очередь запитываются от двухтактного одноцилиндрового ДВС. В связи с этим робот является крайне шумным. Обладает набором датчиков положения и усилия, а благодаря продвинутому алгоритму является крайне устойчивым даже во время передвижения по льду и при оказывании на робота толчковых воздействий. Развитие проекта в настоящий момент приостановлено.



Рисунок 6 – Робот BigDog от компании Boston Dynamics

Робот LittleDog (рисунок 7) созданный компанией Boston Dynamics по заказу DARPA является продолжением исследований производимых при разработке BigDog. Однако в отличии от большого брата он приводится в движении электродвигателями что позволяет значительно снизить уровень производимого роботом шума. LittleDog имеет меньшие габариты и грузоподъемность по сравнению с BigDog, но он обладает улучшенным алгоритмом движения благодаря чему передвигается быстрее и плавнее. Робот оснащен камерой и набором датчиков

которые позволяют ему определять свое текущее местоположение в пространстве и наличие препятствий перед собой, а интеллектуальная система на основе полученных данных позволяет не только выбрать один из заранее запрограммированных шаблонов движения для преодоления препятствия, но создавать и запоминать новые. Это значит, что робот способен к обучению.



Рисунок 7 – Робот LittleDog от компании Boston Dynamics

Другой разработкой от компании Boston Dynamics является робот WildCat (рисунок 8), разрабатываемый в рамках DARPA.

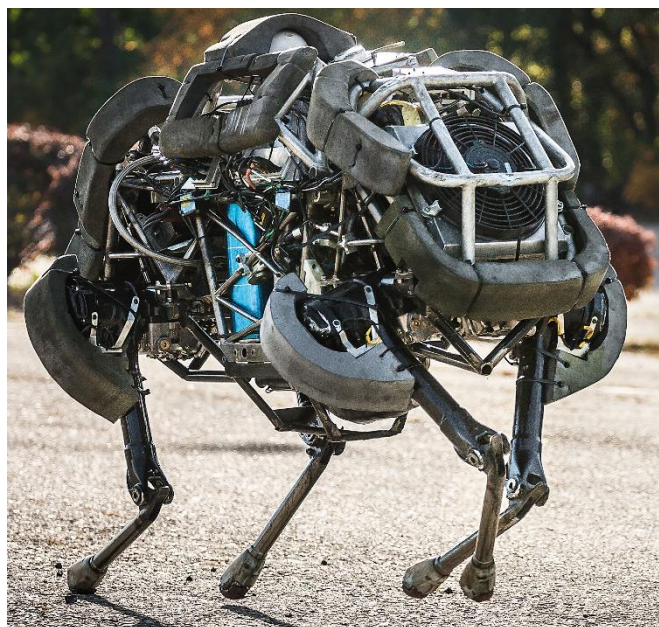


Рисунок 8 – Робот WildCat от компании Boston Dynamics

Информации об этом проекте очень мало. Из немногочисленных видео роликов можно сделать вывод что робот приводится в движение благодаря гидравлической системе, которая в свою очередь запитывается от электрогенератора, приводимого в действие двигателем внутреннего сгорания. Также известно, что робот обладает меньшей массой и грузоподъемностью по сравнению с BigDog. Кроме того, робот использует совершенно иной алгоритм передвижения, благодаря которому он может развивать скорость до 25 км/ч.

Робот iC (рисунок 9) разработанный компанией MicroMagic Systems. Робот оснащен шестью ногами на каждую из которых приходится по 3 сервомотора, головой – камерой, на управление которой отведено 2 сервомотора и еще 1 сервомотор для открытия и закрытия «глаза» во время фотографирования. Камера используется в совокупности с удаленно установленным ПК для распознавания лиц и образов. Также с ПК на управляющий контроллер могут поступать команды о необходимости совершения поворота платформы или следования головы за каким-либо объектом, однако решение о том какие сигналы и в какой последовательности подавать их на сервомоторы принимает только бортовой контроллер p.Brain и никто иной.

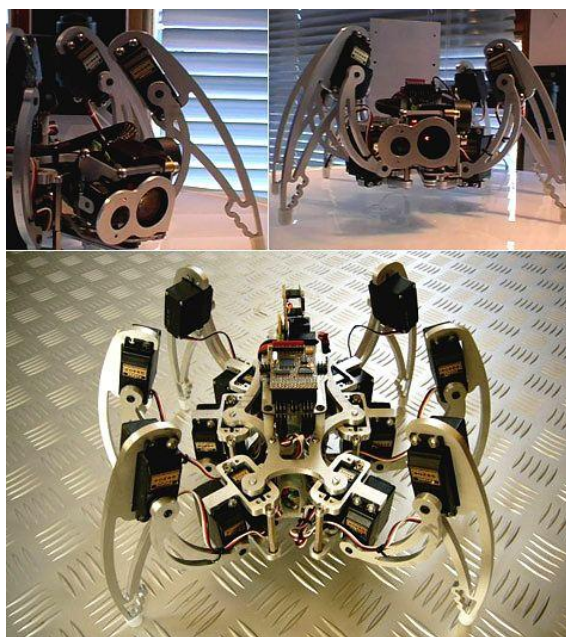


Рисунок 9 – Робот iC от компании MicroMagic Systems

А вот робота Nector (рисунок 10) разработанного в стенах университета Билефельда в Германии можно полноправно называть гигантским насекомым. Он обладает шестью ногами, которые приводятся в действие 18 электродвигателями. По словам создателей этого робота, основной его изюминкой является вовсе конструкция робота или его конечностей, а уникальный алгоритм управления позволяющий каждой отдельной конечности действовать обособленно и при этом координируя их с действиями остальных конечностей. Имея небольшой набор датчиков и камеру робот имеет возможность получать информацию об окружающей его среде.

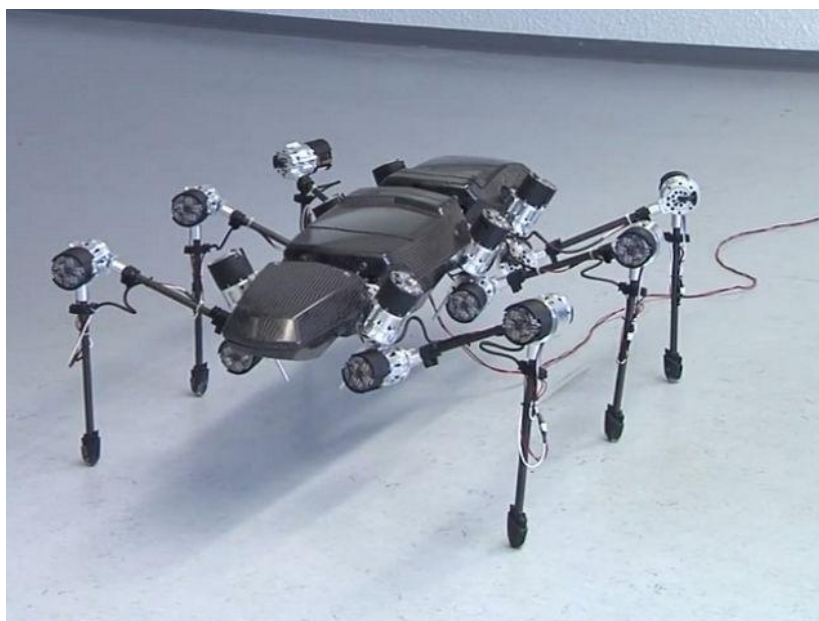


Рисунок 10 – Робот Nector разработанный в университете Билефельда

Подводя итог можно сказать что сегодня в основном развиваются роботы гуманоиды – двуногие, роботы квадроподы – четырехногие и роботы гексаподы – шестиногие.

Шестиногие роботы являются самой многочисленной группой среди механизмов способных передвигаться посредством искусственных ног. Это связано с тем что задача сохранения статической устойчивости для шестиногих аппаратов решается проще в сравнение с другими конструкциями.

## 2 Разработка структурной схемы

Для выполнения поставленной задачи необходимо устройство управления способное к считыванию и обработке сигналов, поступающих с датчиков, и передающее управляющие сигналы на устройства использующиеся для передвижения, т.е. микроконтроллер. Во время движения перед платформой может возникнуть какое-либо препятствие, в связи с чем появляется необходимость использования датчика расстояния. Этот датчик измеряет расстояние перед собой и передает эту информацию в микроконтроллер, на основе которой микроконтроллер будет принимать решение остановиться или продолжить движение. Непосредственно для самого передвижения предложено использовать сервоприводы. Следует отметить что для построения одной ноги предполагается использовать по три сервопривода что позволит обеспечить 2 степени свободы и дополнительную подвижность. Учитывая, что проектируется шестиногий робот суммарное количество используемых сервоприводов равняется 18. Так как для обеспечения движения кроме подачи управляющих сигналов на сервоприводы также требуется обеспечить их питание, которое микроконтроллер обеспечить явно не сможет, предлагается использовать драйвер для управления сервоприводами. Для выполнения задачи сохранения горизонтального положения платформы робота необходимо отслеживать изменение угла наклона платформы и изменение вектора ускорения, в связи с чем проявляется необходимость использовать датчик акселерометра-гироскопа. Обеспечивать питание предлагается от двухбаночного литий полимерного аккумулятора с выходным напряжением 7,4 В (рисунок 11).



Рисунок 11 – Используемый аккумулятор

Так как питание микроконтроллера непосредственно от источника питания без использования стабилизатора недопустимо, то добавим также в список необходимых элементов использование регулируемого стабилизатора напряжения.

Таким образом, подводя итог к выше сказанному мы можем составить структурную схему шагающего робота (рисунок 12).

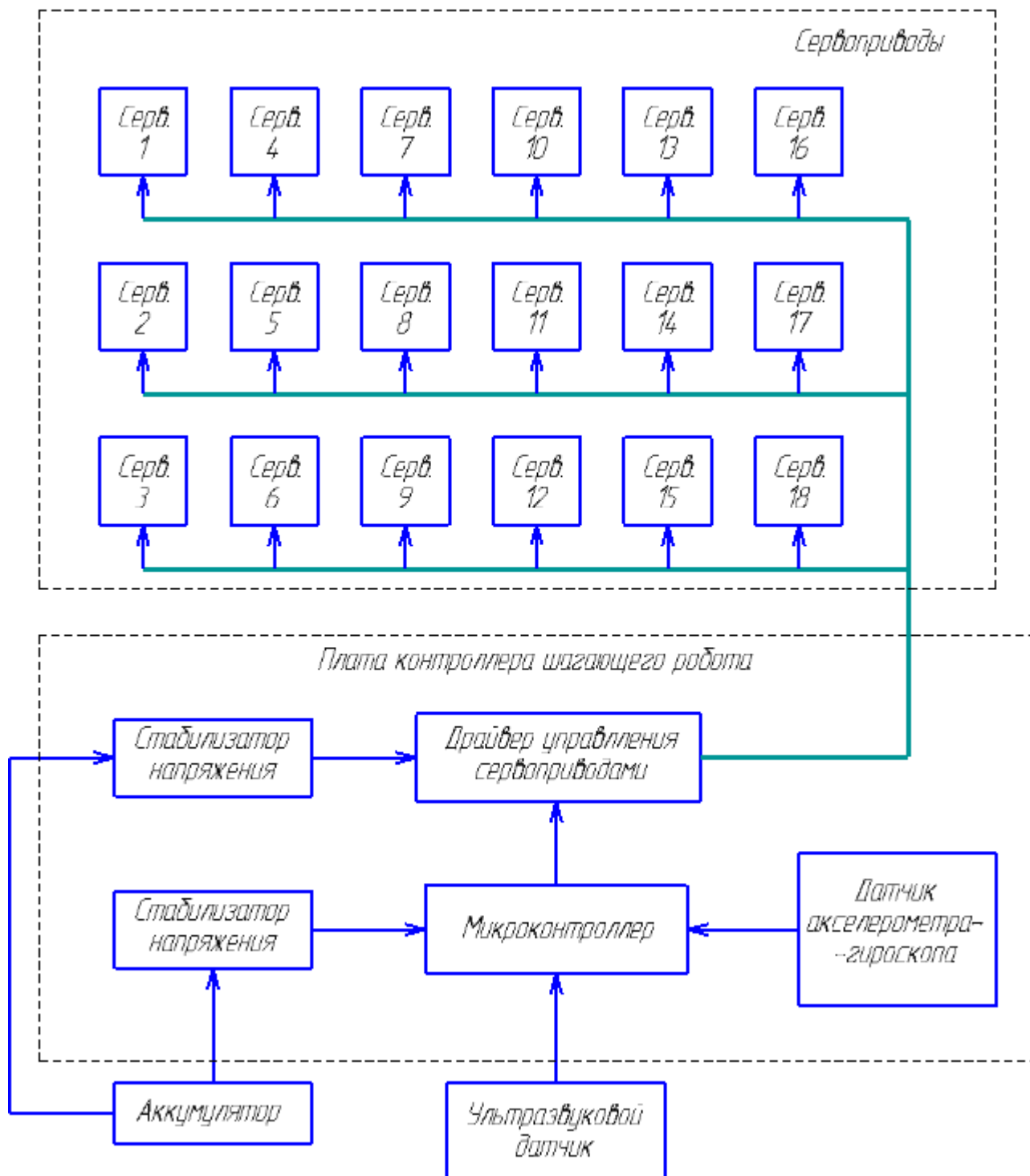


Рисунок 12 – Структурная схема шагающего робота

### 3 Выбор комплектующих и обоснование

#### 3.1 Выбор микроконтроллера

Для того чтобы выбрать микроконтроллер для выполнения задачи управления шагающим роботом рассмотрим основные и наиболее распространённые семейства микроконтроллеров. К ним можно отнести семейство микроконтроллеров MSC-51. Это восьми битный микроконтроллер архитектуры CISC (Complex Instruction Set Computer) – микропроцессор с полным набором команд, для которого характерны: нефиксированная длина команды, выполнение кодирования арифметического действия одной командой, малое количество регистров, где у каждого строго определена выполняемая им функция. Микроконтроллеры этой серии за одну машинную команду могут выполнять одно действие, при том что они обладают большим множеством различных машинных команд. В зависимости от сложности задачи на выполнение одной машинной команды может затрачиваться от 1 до 4 машинных циклов, при том что длительность одного машинного цикла фиксирована и равна 12 периодам резонатора, т.е. на выполнение одной задачи будет затрачено 12, 24 или 48 тактов.

Микроконтроллеры компании Microchip – PIC – восьми разрядный микроконтроллер RISC (Reduced Instruction Set Computer) – микропроцессор с сокращенным набором команд. PIC содержит специфичную систему команд состоящую из 35 основных машинных команд и 14 дополнительных (оптимизированных под компилятор C), каждая из которых выполняется за один машинный цикл или за 4 такта. Отличительной чертой этих микроконтроллеров является их низкое энергопотребление по сравнению с другими, а также быстрая загрузка. Свое применение микроконтроллеры находят в бортовых системах автомобилей и сигнализациях.

Не меньшее распространение получили семейство микроконтроллеров от компании Atmel – AVR. AVR – это восьми разрядные микроконтроллеры с усовершенствованной RISC архитектурой, которые в отличие от стандартного RISC ядра располагают значительно большим количеством команд. К тому же одна



команда выполняется за один такт. У данного семейства микроконтроллеров имеется 3 подсемейства: tinyAVR, megaAVR, XMEGA AVR отличающиеся величиной ПЗУ, ОЗУ, количеством выводов, периферии и т.д. Для микроконтроллеров семейства AVR характерно разнообразие периферии, а также характерным является использование специальных устройств – программаторов для загрузки программ в микроконтроллер.

Относительно новым является семейство 32 и 64 битный микропроцессоров архитектуры ARM (Advanced RISC Machine) – усовершенствованная RISC машина, отличающаяся от предыдущих архитектур тем, что обладает значительно большей производительностью и менее затратное энергопотребление. Семейство микроконтроллеров ARM находится практически в том же ценовом диапазоне что и озвученные ранее модели, что в свою очередь связано с особенностью изготовления самого микроконтроллера. Свое применение данные микроконтроллеры находят в сотовых телефонах, карманных и одноплатных компьютерах, планшетах и т.д.

Для разработки опытного образца лучше использовать микроконтроллеры в DIP-корпусе, так как выводы в таком корпусе имеют большую отдаленность друг от друга по сравнению с другими корпусами, в связи с чем упрощается задача вытравливания дорожек на плате, а также это позволит облегчить процесс отладки. Рассмотрим и занесем в таблицу 1 популярные модели восьми битных микроконтроллеров.

Стоит отметить что выборка производилась только среди микропроцессоров, обладающих объемом ОЗУ не менее 1024 байт, и объемом ПЗУ не менее 16 килобайт.

Таблица 1 – Обзор восьми битных микроконтроллеров, имеющих в свободной продаже

| Наименование<br>(Производитель)                   | Объем ПЗУ,<br>кбайт | Объем ОЗУ,<br>байт | Тактовая<br>частота, МГц | Кол-во<br>выводов | Стоимость,<br>руб.* |
|---|---------------------|--------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|
| ATMEGA16A-<br>PU<br>(Microchip<br>Technology Inc) | 16                  | 1024               | 16                       | 40                | 245                 |

|   |                     |                    |                          |                   |                     |
|---|---------------------|--------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|
| PIC18F4550-I/P<br>(Microchip<br>Technology Inc)       | 32                  | 2048               | 48                       | 40                | 492                 |
| Наименование<br>(Производитель)                       | Объем ПЗУ,<br>кбайт | Объем ОЗУ,<br>байт | Тактовая<br>частота, МГц | Кол-во<br>выводов | Стоимость,<br>руб.* |
| ATmega32-16PU<br>(Microchip<br>Technology Inc)        | 32                  | 2048               | 16                       | 40                | 510                 |
| PIC18F4520-I/P<br>(Microchip<br>Technology Inc)       | 32                  | 1536               | 40                       | 40                | 387                 |
| ATMEGA168-<br>20PU<br>(Microchip<br>Technology Inc)   | 16                  | 1024               | 20                       | 28                | 369                 |
| ATMEGA168PA-<br>PU<br>(Microchip<br>Technology Inc)   | 16                  | 1024               | 20                       | 28                | 210                 |
| PIC18F25K22-<br>I/SP<br>(Microchip<br>Technology Inc) | 32                  | 1536               | 64                       | 28                | 235                 |
| ATMEGA328P-<br>PU<br>(Microchip<br>Technology Inc)    | 32                  | 2048               | 20                       | 28                | 200                 |
| PIC18F2455-I/SP<br>(Microchip<br>Technology Inc)      | 24                  | 2048               | 48                       | 28                | 194                 |

\* цены приведены по данным интернет-магазина [terraelectronica.ru](http://terraelectronica.ru) в мае 2017 года

Предполагается что для решения поставленной задачи на ранних этапах проектирования будет минимальным и достаточным условие, чтобы микропроцессор обладал объемом ОЗУ равным 1024 байт и объемом ПЗУ равным 16 килобайт. Тогда из приведенных в таблице данных видно, что под данное условие наиболее точно попадают микропроцессоры ATMEGA16A-PU за 245 рублей, ATMEGA168-20PU за 369 рублей и ATMEGA168PA-PU за 210 рублей. Характеристики остальных микропроцессоров считаются избыточными, поэтому не принимаются к дальнейшему рассмотрению.

Так как при решении поставленной задачи разница будет ли микропроцессор работать на частоте 20 МГц или 16 МГц не является существенной, а вот цена на

АТМЕГА168-20PU почти в 1.75 раза превышает цену на АТМЕГА168РА-PU и почти в 1.5 раза превышает цену на АТМЕГА16А-PU, то было принято решение отказаться от этого микропроцессора в пользу двух оставшихся. Отличие в цене между АТМЕГА16А-PU и АТМЕГА168РА-PU составляет не более 20 процентов, и они практически равны если сравнивать их по характеристикам, приведенным в таблице 1, однако АТМЕГА16А-PU выпускается в корпусе DIP-40, в отличие от АТМЕГА168РА-PU выпускаемого в корпусе DIP-28, из чего следует что он будет занимать больше места, да и в принципе такое большое количество выводов будет избыточным для решения поставленной задачи. Из этого следует что для дальнейшего проектирования будет использоваться микропроцессор АТМЕГА168РА-PU (рисунок 13).

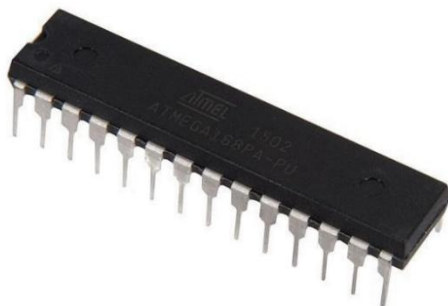


Рисунок 13 – Микроконтроллер АТМЕГА168РА-PU в DIP-корпусе

Расшифруем маркировку выбранного микроконтроллера АТМЕГА168РА-PU: Первые две буквы АТ являются обозначением компании производителя Atmel. Следующие буквы МЕГА указывают на принадлежность к семейству микроконтроллеров. Цифры 168 обозначают то что данный микроконтроллер имеет 16 килобайт встроенной flash-памяти восьмой модификации. Следующие за этим буква Р значит что это энергоэкономичная версия микроконтроллера потребляющая ток величиной до 100 нА, находясь в режиме Power Down. Буква А также указывает на то что данная модель относится к специальным версиям с пониженным энергопитанием от 1,8 до 5,5 В. Следующая за этим буква Р указывает на вид корпуса микроконтроллера и в нашем случае это значит что мы используем DIP-корпус. Последняя буква U означает промышленное температурное исполнение

микроконтроллера, которое допускает его использование при температурах от –45°С до +85°С.

### 3.2 Выбор датчика расстояния

Для того чтобы избежать столкновения с препятствиями возможно использование датчиков расстояния инфракрасного или ультразвукового излучения. Для решения поставленной задачи предлагается использовать ультразвуковой датчик HC-SR04 (рисунок 14), устанавливаемый в передней части платформы робота. Выбор в пользу данного датчика обусловлен его широкой распространенностью и значительно меньшей ценой по сравнению с инфракрасными датчиками расстояния.

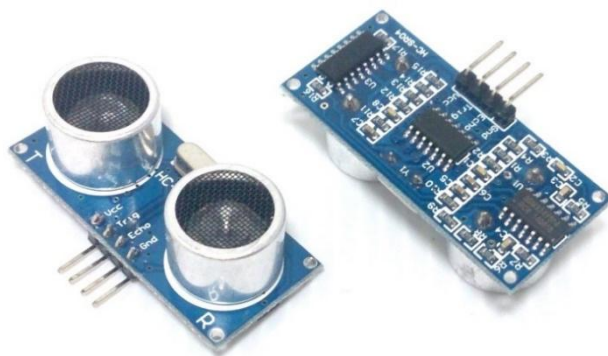


Рисунок 14 – Ультразвуковой датчик расстояния HC-SR04

### 3.3 Выбор сервопривода

Как было сказано ранее, для перемещения было решено использовать сервоприводы. На чем основывается данное решение? Дело в том, что для решения подобного рода задачи, т.е. приведения платформы в движение, возможно использование либо сервоприводов, либо шаговых двигателей. Однако шаговые двигатели с достаточно большим крутящим моментом обладают большими габаритами, а для их крепления необходимо использование крепежи более сложного конструктивного исполнения. Приведем к сравнению несколько моделей

сервоприводов и выберем один из них. Основные характеристики сервомоторов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Обзор сервомоторов.

| Модель                  | Крутящий момент, кг/см | Диапазон вращения | Напряжение питания, В | Стоимость, руб*. |
|-------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|------------------|
| Tower Pro SG90          | 1.6                    | 180°              | 4,8 – 6               | 270              |
| Robotic Servo SM-S4303R | 3.3                    | 360°              | 4,8 – 6               | 425              |
| Tower Pro SG5010        | 5.5                    | 180°              | 4,8 – 6               | 500              |
| Tower Pro MG90S         | 1.8                    | 180°              | 4,8 – 6               | 560              |
| Robotic Servo SR311     | 3                      | 180°              | 6                     | 625              |
| Tower Pro MG995         | 8.5                    | 180               | 4,8 – 6               | 800              |

\*Цены приведены по данным интернет магазина robot-kit.ru на май 2017

Для отладки алгоритма передвижения выберем самый дешевый сервопривод Tower Pro SG90. Его основные характеристики:

- Напряжение питания: 4.8 – 6 В
- Диапазон вращения: 180°
- Крутящий момент при напряжении питания: 4.8 В 1.6 кг/см
- Скорость поворота вала: 60°/0.1 с
- Минимальная длительность импульса: 10 мкс
- Частота следования импульсов: 50 Гц

Изображение выбранного сервопривода приведено на рисунке 15.



Рисунок 15 – Сервопривод Tower Pro SG90

### 3.4 Выбор драйвера управления сервоприводами

Для обеспечения возможности управления большим количеством сервоприводов одновременно предлагается использовать микросхему PCA9685 (рисунок 16). Это микросхема, которая при подключении к микроконтроллеру по I<sup>2</sup>C интерфейсу, и обеспечении ей необходимого обвеса способна передавать управляющие импульсы с микроконтроллера на сервоприводы. Тот факт что микросхема PCA9685 обладает лишь 16 ШИМ выводами не является критичным, так как при обеспечении должного питания задачу управления двумя оставшимися сервоприводами может на себя взять сам микроконтроллер. Выбор в пользу этой микросхемы сделан ввиду ее широкой распространенности и низкой цены за штуку. Легкого подключения к микроконтроллеру и наличию удобной библиотеки для работы с сервоприводами.

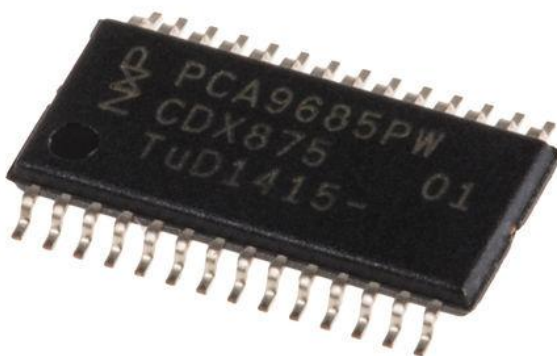


Рисунок 16 – Микросхема PCA9685

### 3.5 Выбор датчика акселерометра-гироскопа

Для выполнения условия сохранения горизонтального положения платформы робота необходимо отслеживать изменение угла наклона платформы и изменение вектора ускорения. Для решение данной задачи лучше всего подойдет использование микроэлектромеханического (MEMS) датчика акселерометра-гироскопа. Данный вид датчиков имеет широкую выбор как по функциональности, так и по цене. В данной работе предлагается использовать наиболее дешевый датчик трёх осевого акселерометра-гироскопа GY-521 (рисунок 17). Несмотря на низкую цену он обладает широким функционалом, таким как к примеру возможность генерирования прерываний по событиям и выполнение роли ведущего устройства.



Рисунок 17 – Датчик акселерометр-гироскоп GY-521

Однако с целью уменьшения количества готовых используемых элементов предлагается вместо готового датчика акселерометр-гироскоп GY-521 использовать его микросхему MPU-6050. Из документации на эту микросхему известно, что для работы ей необходимо обеспечить напряжение питания в диапазоне от 2,375 до 3,46 В, а максимальное значение потребляемого тока равняется 3,9 мА. Для этой задачи выберем стабилизатор MIC5232-3.3YD5 TR (рисунок 18), обеспечивающий на выходе фиксированное напряжение 3,3 В и 10 мА, что более чем достаточно для работы микросхемы.

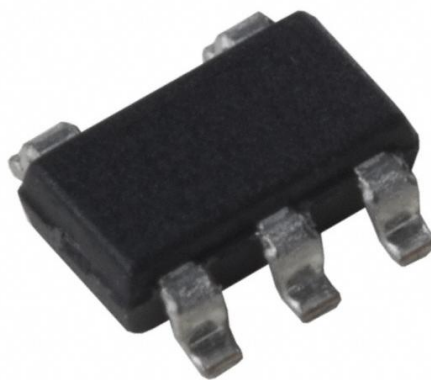


Рисунок 18 – Стабилизатор MIC5232-3.3YD5 TR

### 3.6 Выбор стабилизатора напряжения

Для питания робота ранее было выбрано использование аккумулятора с величиной выходного напряжения 7,4 В. Однако ни микроконтроллер, ни микросхема PCA9685, ни датчик расстояния, ни датчик акселерометр-гироскоп не могут питаться от такого напряжения. Так как для перечисленных элементов, а также для сервопривода возможным напряжением питания является 5 В, то предлагается использовать понижающий стабилизатор напряжения с уровня 7,4 до 5 В. Также предлагается использовать 2 стабилизатора, один для питания элементов контроллера, второй для питания сервоприводов. Для питания элементов контроллера предложено использовать такой же стабилизатор какой используют в контроллере Arduino Nano V3 – AMS1117-5,0 (рисунок 19). Это линейный стабилизатор с малым падением напряжения, подавая на вход, которого 6,5 – 12 В на выходе мы будем получать 5 В и 800 мА.





Рисунок 19 – Линейный стабилизатор напряжения AMS1117-5,0

Причина по которой появляется необходимость использовать второй, более мощный стабилизатор заключается в том, что одновременно работает несколько сервоприводов, а среднее потребление одного сервопривода около 200 мА. То есть при использовании данного стабилизатора мы бы смогли обеспечить одновременное питание не более чем трех серводвигателей. К тому же во время предварительного испытания алгоритма прямолинейного движения было установлено что пиковое потребление тока не превышает 2,1 А. В таком случае для обеспечения питания сервоприводов предлагается использовать регулируемый импульсный преобразователь напряжения LM2596SX-5.0/NOPB (рисунок 20). Подавая на вход преобразователя напряжения более 6.5 В на выходе мы можем снимать напряжение 5 В и выходной ток до 3 А.

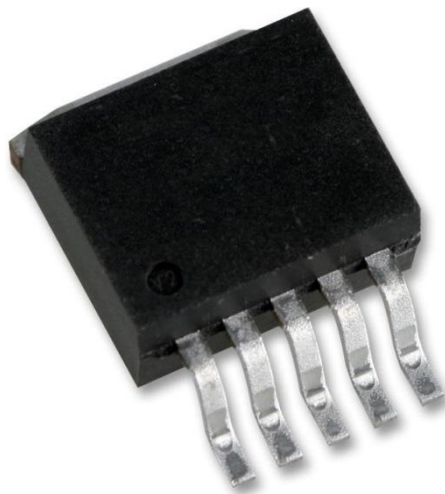


Рисунок 20 – регулируемый импульсный преобразователь напряжения LM2596SX-5.0/NOPB

#### 4 Разработка принципиальной схемы

При разработке схемы электрической принципиальной

Схема подключения микроконтроллера AVR согласно рекомендации производителя, приведена на рисунке 21.

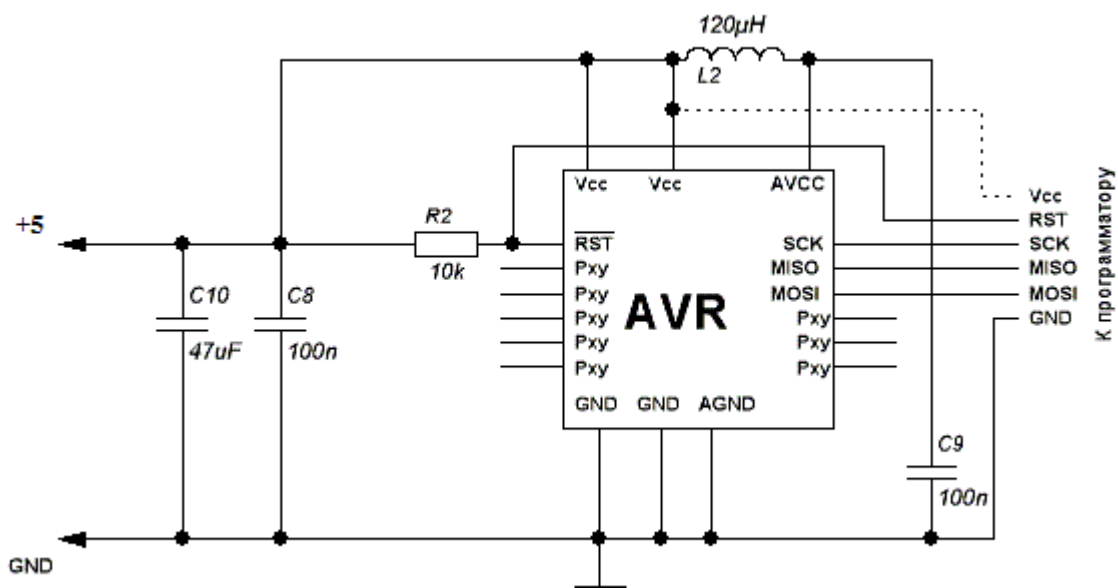


Рисунок 21 – Схема питания микроконтроллера

Здесь Vcc и GND – это выводы непосредственного питания микроконтроллера. AVCC и AGND – это выводы подводящие питание к аналого-цифровому преобразователю, являющемуся достаточно точным измерителем напряжения. Подача питания на вывод AVCC является обязательной и допускается чтобы на него подавалось такое же напряжение что и на вывод Vcc. Однако питание рекомендуется подключать через дополнительный низкочастотный индуктивный фильтр. Делается это с целью устранения возможных помех, возникающих в цепи питания. Установка конденсатора емкостью 47 мкФ обуславливается необходимостью сглаживать глубокие броски напряжения, а установка керамического конденсатора емкостью 100 нФ обусловлена необходимостью сглаживать краткие импульсные помехи, вызванные работой других схем в цепи питания

Для обеспечения успешного запуска микроконтроллера и возможности в случае необходимости его принудительно перезагрузить используется цепь сброса микроконтроллера, приведенная на рисунке 22.

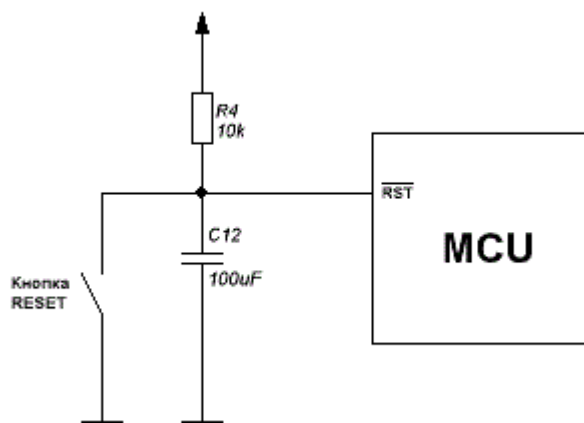


Рисунок 22 – цепь сброса микроконтроллера

Такая схема включения позволяет по нажатию кнопки reset перезагружать микроконтроллер и работает она следующим образом: при запуске схемы конденсатор разряжен и до окончания заряда на вывод RST поступает низкий логический уровень, в связи с чем микроконтроллер не запускается. По окончании зарядки конденсатора на вывод RST поступает высокий логический уровень, после чего микроконтроллер запускается. При нажатии на кнопку reset конденсатор разрядится и на вывод RST снова будет поступать низкий логический уровень, что вызовет перезагрузку микроконтроллера. Длительности перезагрузки определяется постоянной времени  $\tau = RC$ .

При подключении микросхемы PCA9685 между выводами Vcc и GND рекомендуется подключать конденсатор емкостью 10 мкФ. Соответственно к выводам Vcc и GND подводятся те же линии питания что и к микроконтроллеру. Вывод EXTCLK является входом внешнего тактирующего генератора, и в случае отсутствия одного необходимо подключить данный вывод к земле. Вывод OE – это вход разрешения работы выходов драйвера, являющийся инверсным, в связи с чем его следует подключать к земле через 10 кОм резистор. Вывод SDA и SCL микросхемы подключаются к линии SDA и SCL микроконтроллера (выводы PC4 и PC5 соответственно), а также через резисторы с сопротивлением 10 кОм подключаются к линии питания Vcc. Все ШИМ вывода подключаются к выходной

клемме через резисторы сопротивлением 220 Ом. Схема подключения микросхемы PCA9685 приведена на рисунке 23.

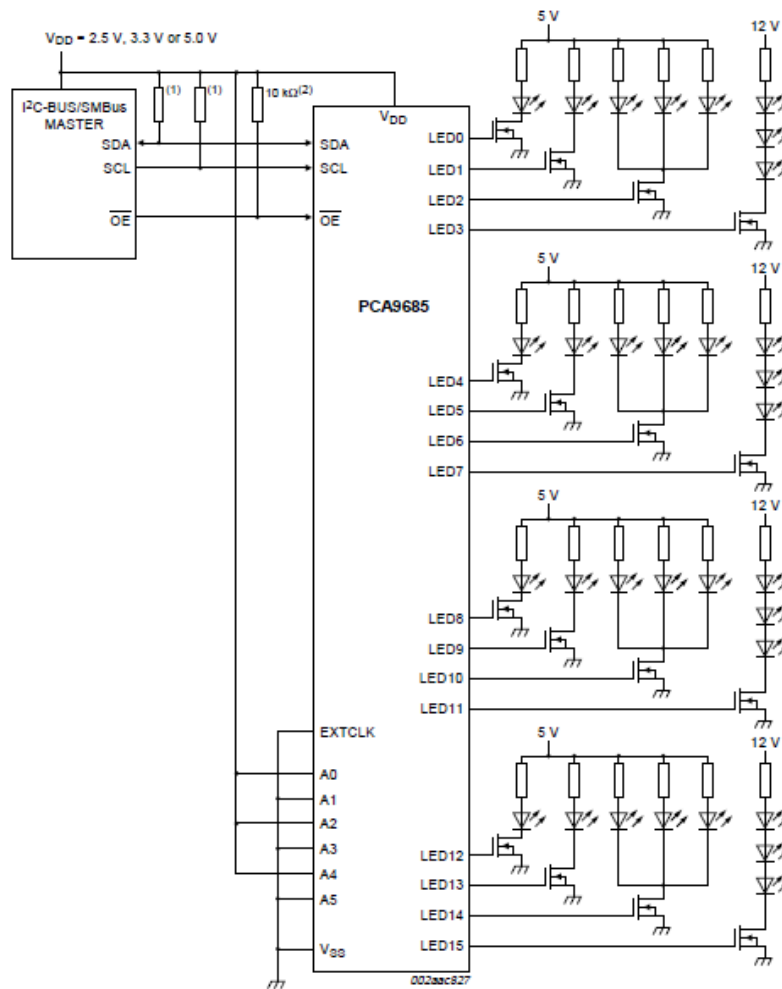


Рисунок 23 – Схема подключения микросхемы PCA9685.

Подключение стабилизатора обеспечивающего понижение напряжения питания с 5,0 до 3,3 В с целью запитывания микросхемы MPU-6050 приведена на рисунке 24.

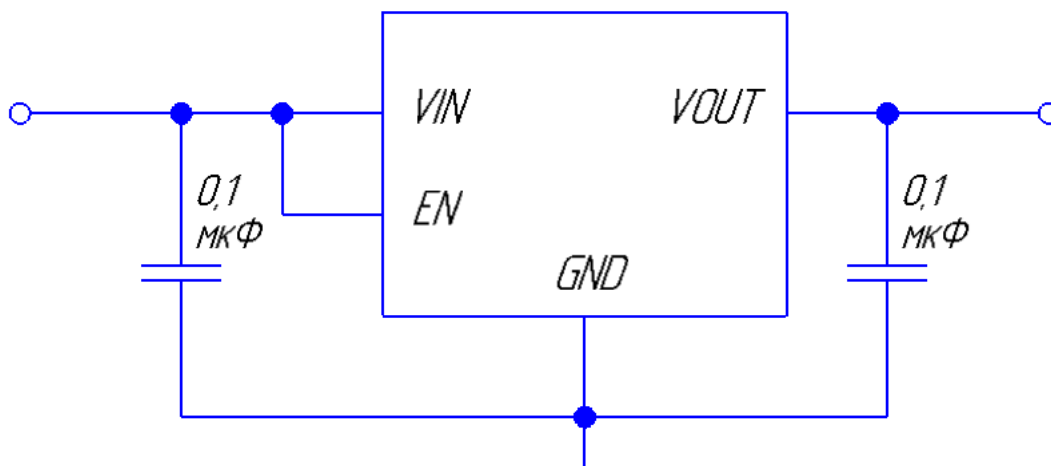


Рисунок 24 – схема подключения стабилизатора обеспечивающего питание микросхемы MPU-6050.

При подключении микросхемы MPU-6050 следует подключить конденсатор емкостью 0,1 мкФ между выводами VDD и GND. Вывод VDD подводится к линии питания 3,3 В, а вывод GND подводится к линии GND стабилизатора напряжения. Вывод CLKIN – вход внешнего тактирующего генератора, и в случае отсутствия одного необходимо подключить данный вывод к земле. Вывод VLOGIC подключается к линии питания 3,3 В и между выводами GND и VLOGIC подключается конденсатор емкостью 0,01 мкФ. REGOUT – вывод для подключения фильтрующего конденсатора, а вывод FSYNC – вход синхронизации, который в случае неиспользования подключается на землю. Между выводами REGOUT и GND подключается конденсатор емкостью 0,1 мкФ. Вывод SDA и SCL микросхемы подключаются к линии SDA и SCL микроконтроллера (выводы PC4 и PC5 соответственно), а также через резисторы с сопротивлением 4,7 кОм подключаются к линии питания 3,3 В. Между выводами CPOUT и GND подключается конденсатор емкостью 2,2 нФ. Схема подключения микросхемы MPU-6050 приведена на рисунке 25.

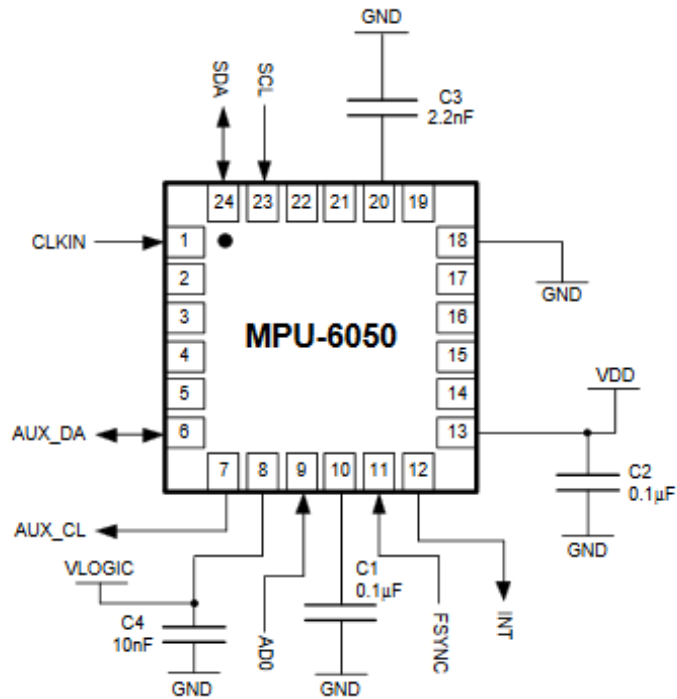


Рисунок 25 – Схема подключения микросхемы MPU-6050.

Схема подключения линейного стабилизатора AMS1117-5,0 приведена на рисунке 26. Наличие на входе и выходе электролитических конденсаторов емкостью 100 мкФ и керамических емкостью 0,1 мкФ обуславливается необходимостью сглаживать глубокие броски напряжения и краткие импульсные помехи соответственно.

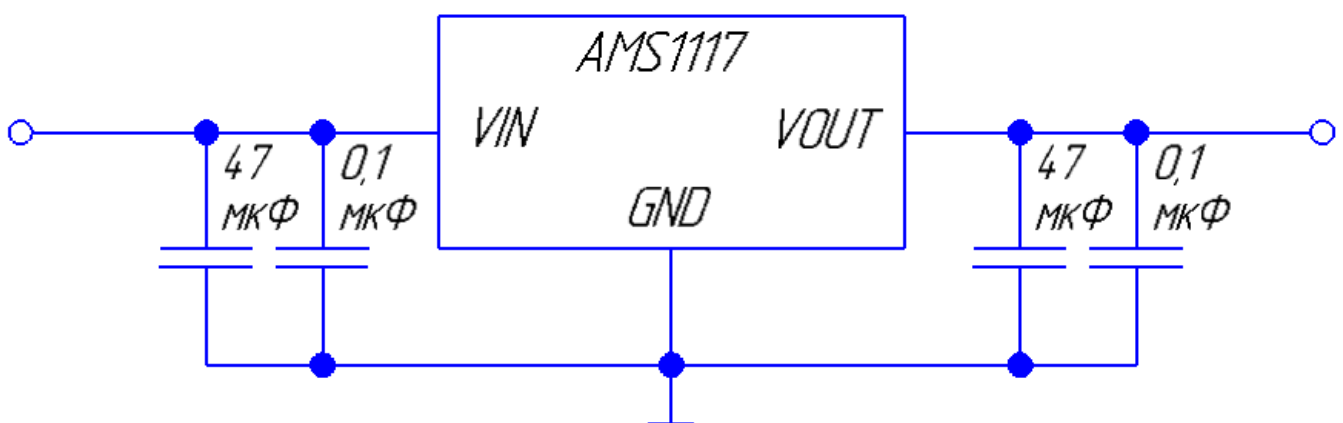


Рисунок 26 – схема подключения линейного стабилизатора AMS1117-5,0.

Схема подключения импульсного стабилизатора LM2596S-ADJ приведена на рисунке 27.

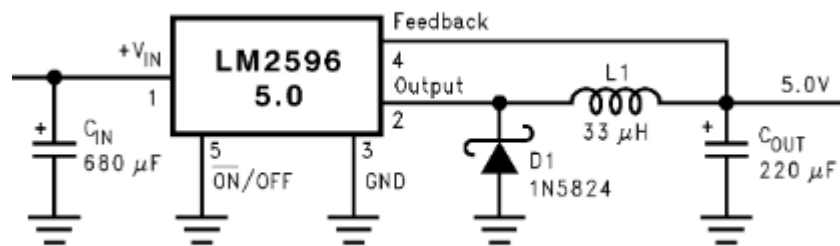


Рисунок 27– Схема подключения импульсного стабилизатора LM2596SX-5.0/NOPB.

Ультразвуковой датчик будет использоваться как отдельный готовый элемент и будет подключаться к специальной контактной колодке. К выводам колодки последовательно подводятся линия GND, вывод PB0 микроконтроллера, вывод PB1 микроконтроллера, линия питания Vcc.

Полная схема электрическая принципиальная приведена на рисунке 28. Оформление схемы производилось в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D



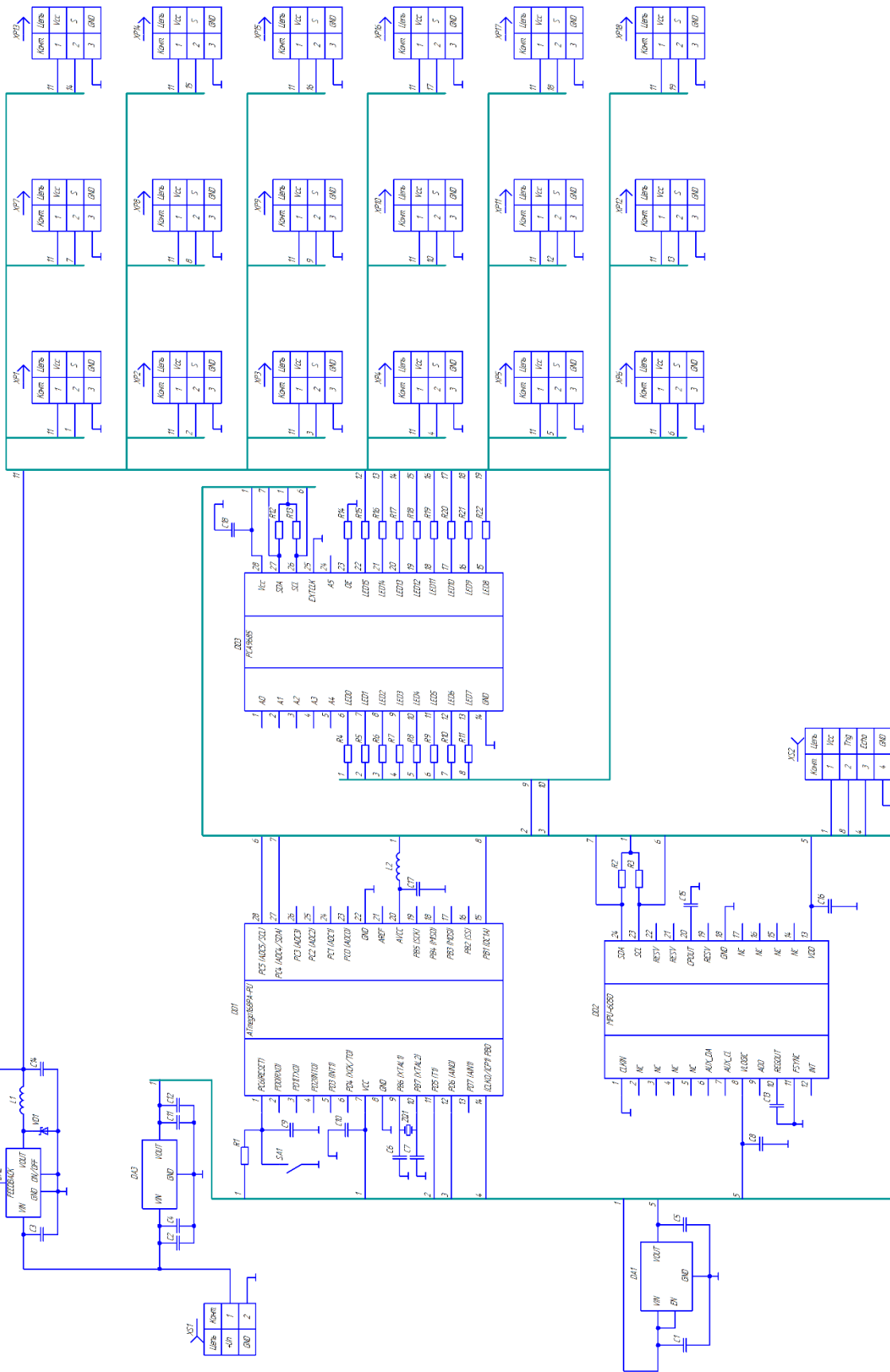


Рисунок 28 – Схема электрическая принципиальная проектируемой платы контроллера

## 5 Разработка печатной платы и сборочного чертежа

Разработка печатной платы была произведена в системе автоматизированного проектирования DipTrace. После окончания проектирования печатной платы и сборочного чертежа, они были перенесены в программу КОМПАС-3D, в которой проводилась окончательная подготовка чертежей по требованиям ЕСКД.

Основные этапы работы по разработке чертежей приведены на рисунках 29 - 35.

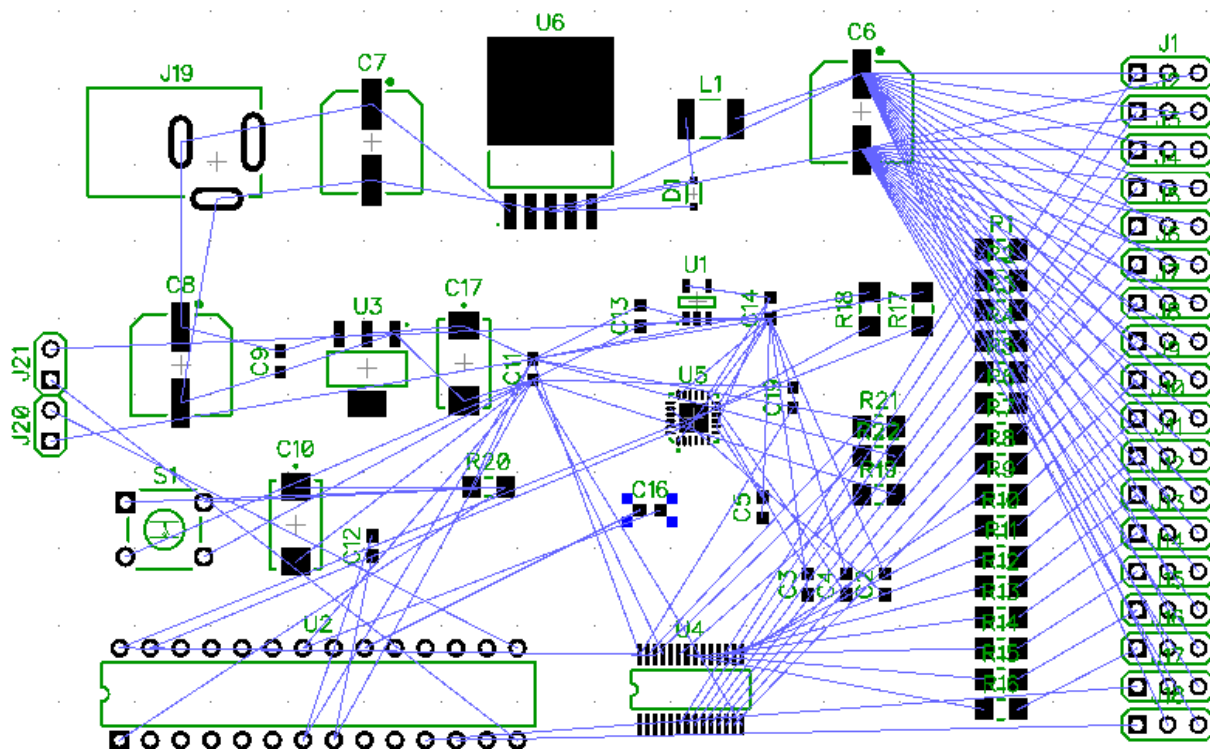


Рисунок 29 – размещение корпусов элементов и настройка соединений между элементами платы

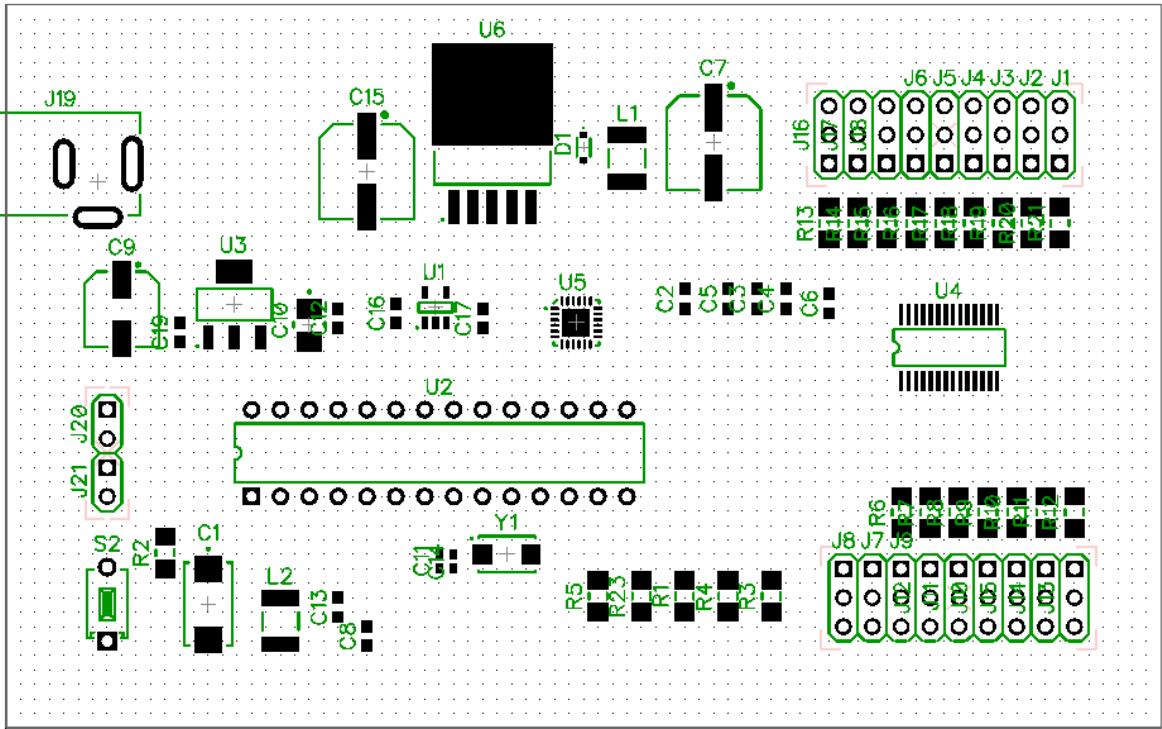


Рисунок 30 – Компонентная компоновка элементов платы

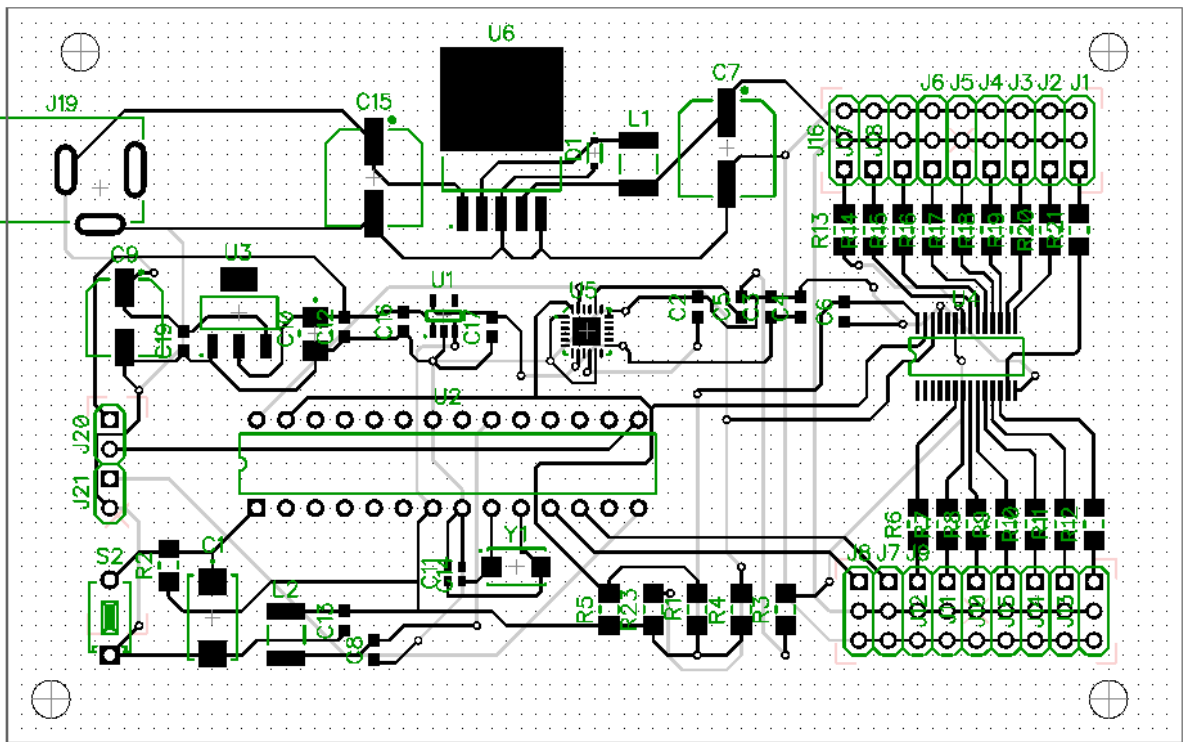


Рисунок 31 – Трассировка дорожек с первой стороны

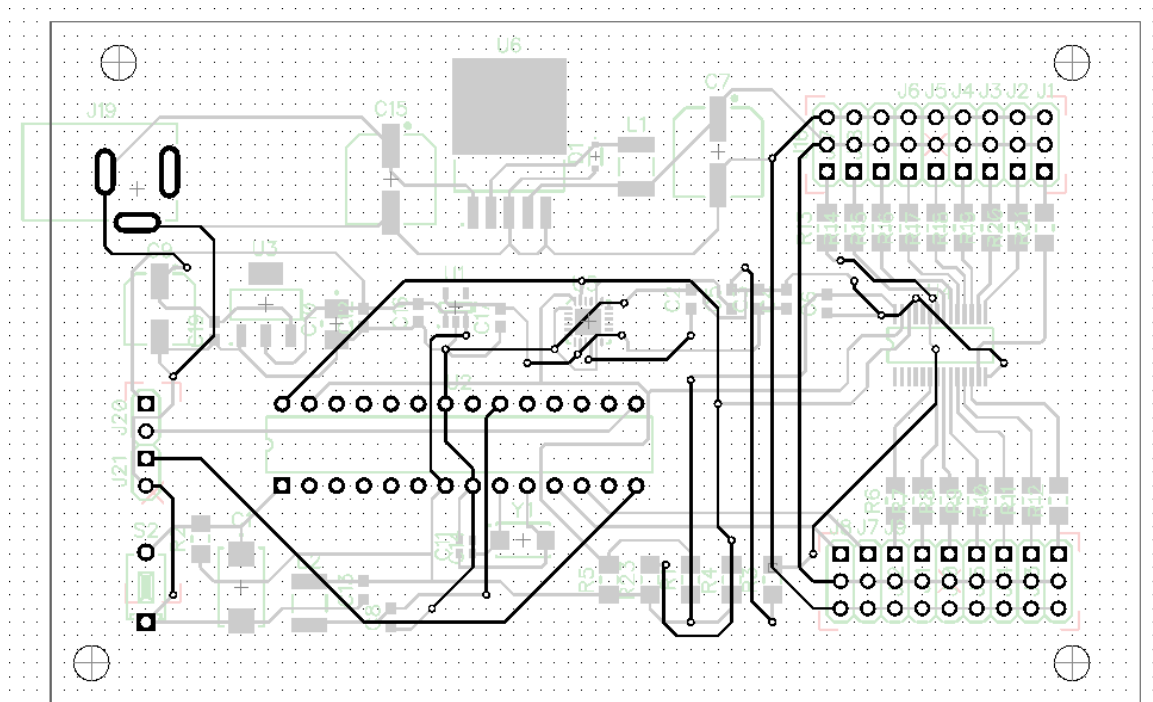


Рисунок 32 – Трассировка дорожек со второй стороны

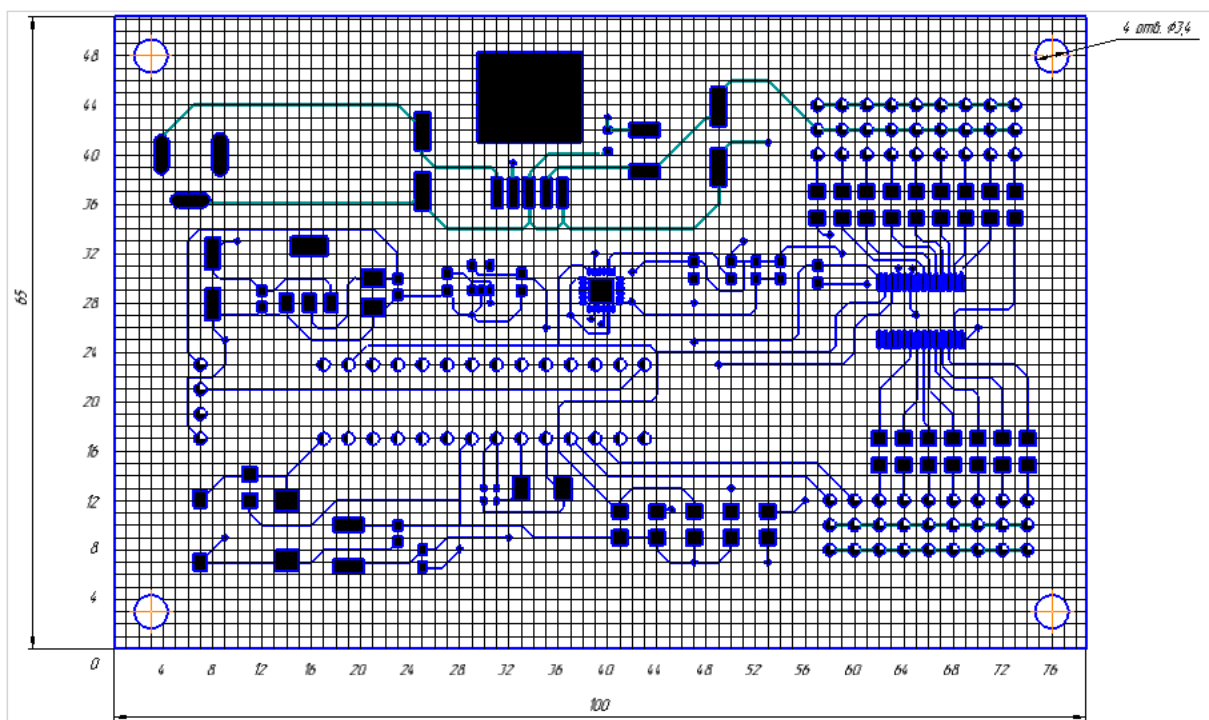


Рисунок 33 – Экспортированная в Компас и оформленная согласно требованиям ЕСКД первая сторона печатной платы

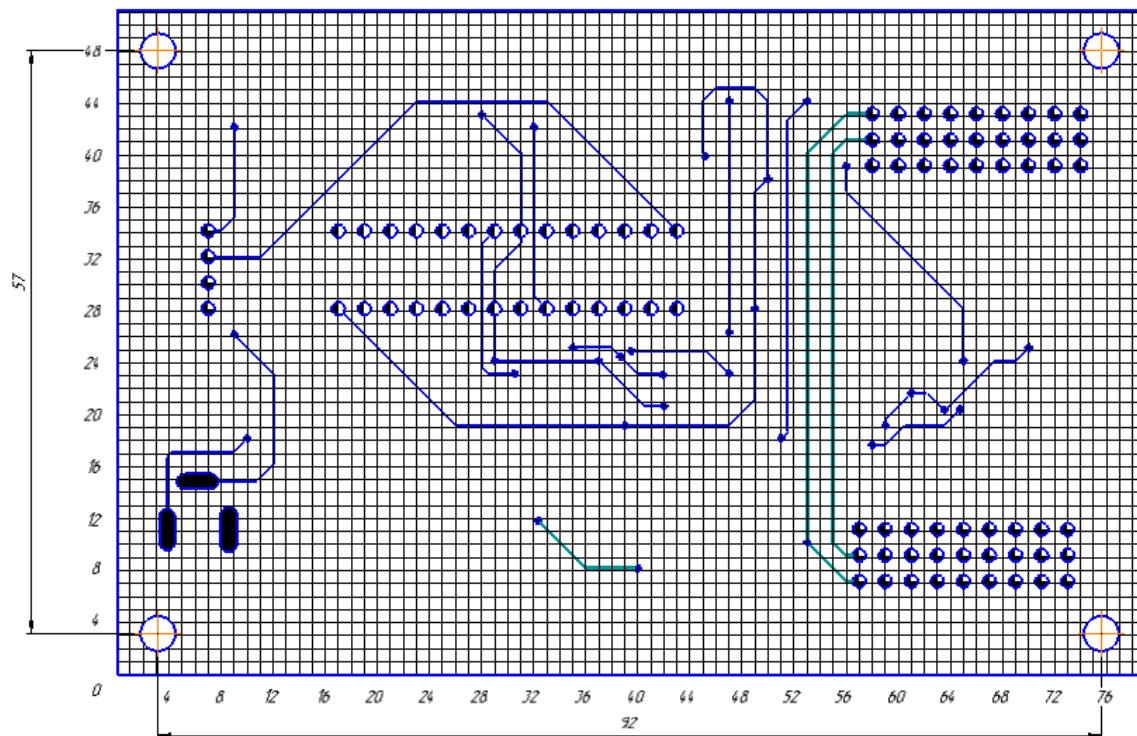


Рисунок 34 – Экспортированная в Компас и оформленная согласно требованиям ЕСКД первая сторона печатной платы

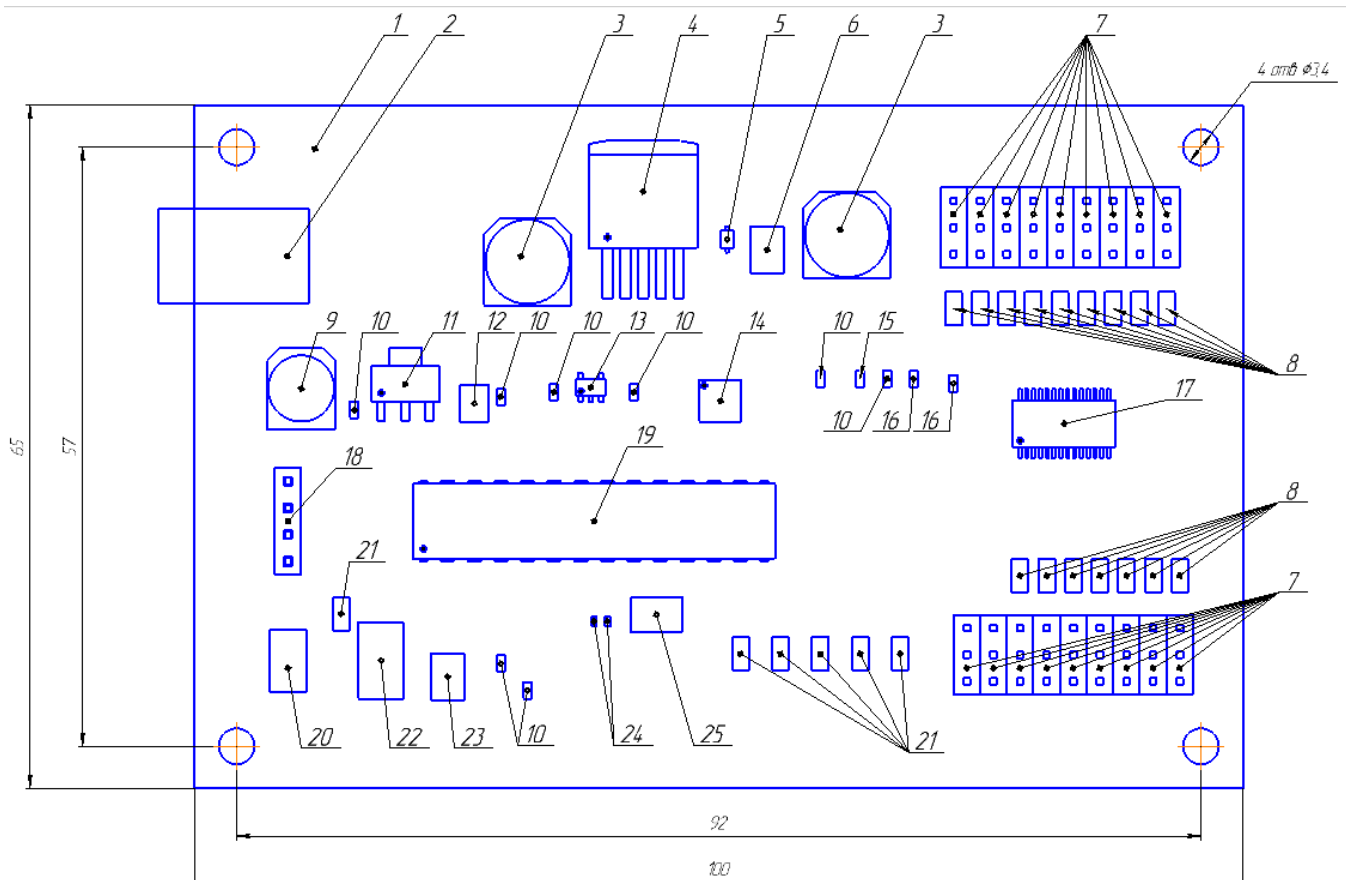


Рисунок 35 – Разработка сборочного чертежа в САПР Компас 3D

## 6 Разработка алгоритма движения шагающего робота

### 6.1 Взаимодействие микроконтроллера с микросхемами PCA9685 и MPU-6050

Взаимодействие микроконтроллера с микросхемами PCA9685 и MPU-6050 осуществляется путем использования  $I^2C$  интерфейса.  $I^2C$  интерфейс – это последовательный протокол передачи данных, использующий для выполнения этой задачи два двунаправленных канала связи, первый из которых называется шиной последовательных данных (SDA), а второй – шиной тактирования (SCL).

При подключении устройств обязательным условием является подключение устройств к одной линии питания для совпадения логического уровня, а также обязательным является включение 10 кОм резисторов между линией питания и линией SDA, линией питания и линией SCL. Подключение нескольких устройств по  $I^2C$  интерфейсу приведено на рисунке 36.

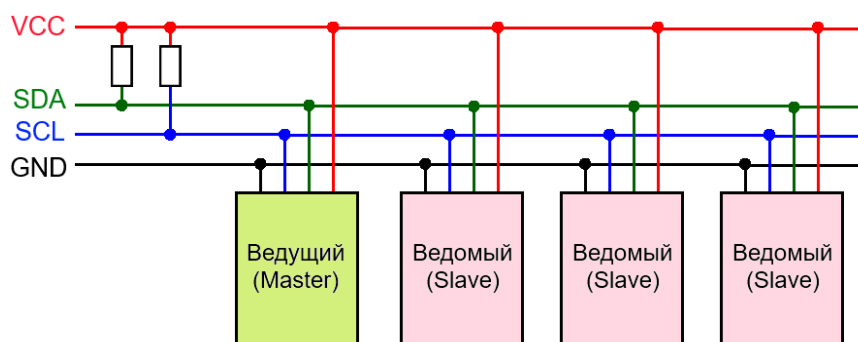


Рисунок 36 – Схема подключения нескольких устройств по  $I^2C$  интерфейсу

При подключении нескольких устройств по  $I^2C$  интерфейсу, одно из них должно выступать в роли ведущего (Master), в то время как другие будут выполнять роль ведомых (Slave). Ведущее устройство инициализирует начало передачи данных и генерирует сигналы синхронизации. Ведомое устройство передает данные по запросу ведущего. Каждое ведомое устройство обладает уникальным адресом, по которому ведущее устройство совершает к нему обращение.

Обмен данными по  $I^2C$  интерфейсу происходит в следующем порядке. Ведущее устройство генерирует 9 тактовых импульсов и посылает их по линии SCL.

Одновременно с этим на линию SDA выставляется адрес устройства, к которому происходит обращение. Этот адрес тактируется первыми 7-ю битами, в связи с чем появляется ограничение на одновременное подключение не более 127 устройств ( $2^7 = 128 - 1$  т.к. счет начинается с 0). Затем идет бит посылки, т.е. бит определяющий будет осуществляться запись или чтение данных. Последний бит – бит подтверждения (ACK) означающий что ведомое устройство приняло запрос. Если на первый пакет с адресом приходит подтверждение от ведомого устройства, то обмен продолжается, и информация передается также 9-ти битными пакетами, где 8 битов –это передаваемая информация и 1 бит – бит подтверждения что устройство приняло весь байт информации. Если связь оказывается внезапно прерванной и бит подтверждения не приходит, то ведущее устройство прекращает передачу данных. Процесс приема и передачи информации по  $I^2C$  интерфейсу приведен на рисунке 37. Для микроконтроллеров Atmel, поддерживающих программирование на С-программаторах, для обеспечения удобного обмена данных по  $I^2C$  интерфейсу используется стандартная библиотека Wire.

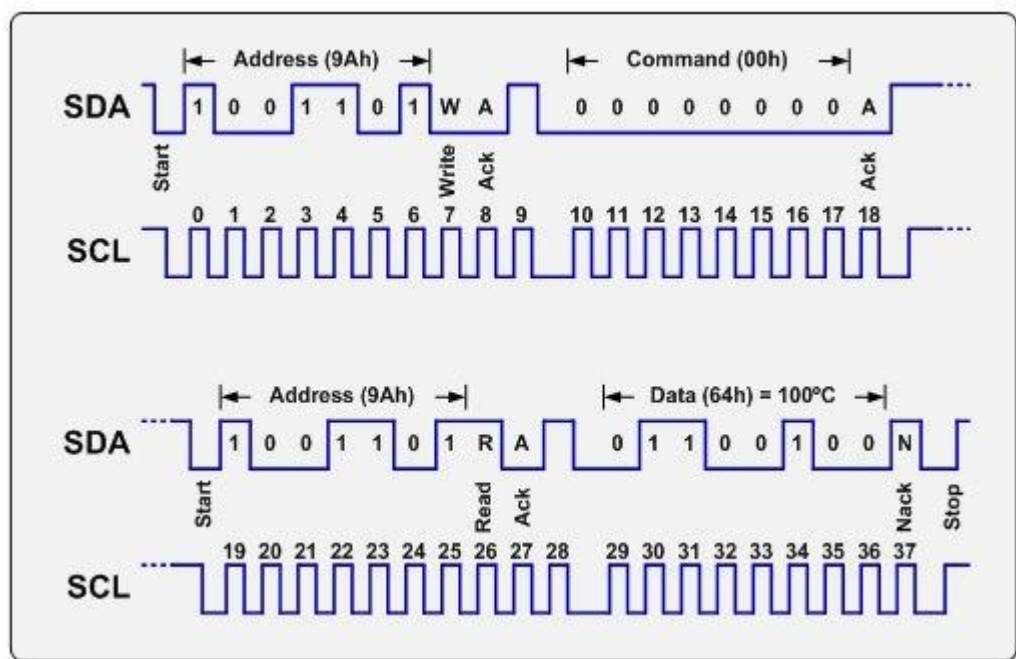


Рисунок 37 – прием и передача данных по  $I^2C$  интерфейсу

## 6.2 Работа с сервоприводами

Для того чтобы понять, как работать с сервоприводами нужно представлять, как работает сам сервопривод и из чего он состоит. Структурная схема большинства сервоприводов приведена на рисунке 38.

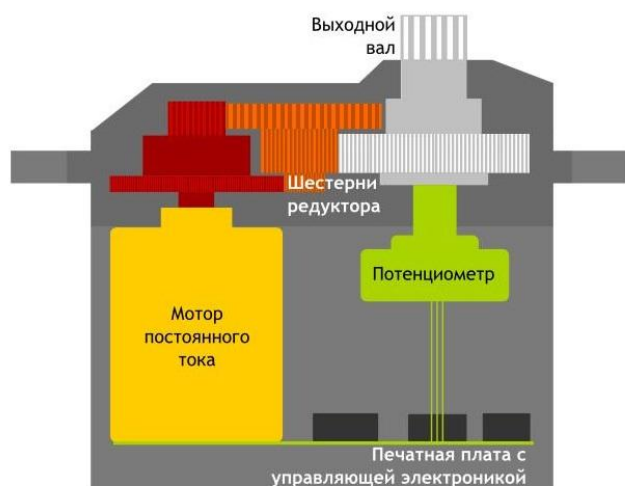


Рисунок 38 – Структурная схема сервопривода

Потенциометр (рисунок 39) представляет из себя трехвыводной элемент к крайним выводам которого подключаются напряжение питания и земля. При вращении ротора изменяется положение прикрепленного к нему вывода и соответственно изменяется уровень снимаемого со среднего вывода напряжения. Плата управления содержит устройство сравнения, которое сравнивает уровень напряжения, снимаемого с среднего вывода с сигналом, поступающим с контроллера по сигнальному выводу. При их неравенстве управляющая плата подает импульсы на мотор. Мотор через редуктор передает вращательное движение на ротор потенциометра что приводит к изменению снимаемого с его среднего вывода уровня напряжения. Управляющие импульсы с платы будут поступать до тех пор, пока уровень снимаемого напряжения и сигнал управления с контроллера не станут равны. Управляющим сигналом с контроллера является широтно-импульсно модулированный сигнал (ШИМ или PWM). Широтно-импульсная модуляция – это способ передачи энергии при помощи изменения длительности импульсов,



следующих с постоянной частотой. Величину напряжения управляющего сигнала при этом можно найти по формуле (1):

$$U_{\text{сигн}} = E_{\text{пит}} * \frac{t_{\text{имп}}}{T}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{сигн}}$  – величина управляющего сигнала,  $E_{\text{пит}}$  – напряжение питания,  $t_{\text{имп}}$  – длительность импульса,  $T$  – период импульса



Рисунок 39 – Потенциометр, использующийся в сервоприводах

Для управления 16 сервоприводов с помощью микросхемы PCA9685 используется библиотека Adafruit PWM Servo Driver Library. Из этой библиотеки мы используем 3 команды:

`pwm.begin()` – команда указывающая на начало передачи данных по  $I^2C$  интерфейсу;

`pwm.setPWMFreq()` – команда для установки частоты следования управляющих импульсов;

`pwm.setPWM(a, b, c)`, где  $a$  – это число, указывающее на номер канала на который подается сигнал. Оно может принимать значение от 0 до 15. Следующее за ним число  $b$  – это задержка на срабатывание в миллисекундах.  $c$  – величина подаваемого ШИМ сигнала.

Для управления оставшимися двумя сервоприводами используется удобная библиотека Servo для работы с которой необходимо:

`Servo s1` – объявление переменной типа Servo;

`s1.attach(5)` – подключение созданной переменной к указанному в скобках ШИМ выводу микроконтроллера;

`s1.write(20)` – подача управляющего импульса на обозначенный ранее вывод, причем значение в скобках задается не в виде ШИМ сигнала (для 8-битного микроконтроллера от 0 до 255), а в виде угла от 0° до 180°.

### 6.3 Работа с ультразвуковым датчиком

Ультразвуковой датчик расстояния HC-SR04 – это цифровой датчик, обладающий четырьмя выводами: Vcc, Trig, Echo и Gnd. Для питания датчика необходимо на выводы Vcc и Gnd подключать +5 В и землю соответственно. Вывод Trig используется для формирования сигнала – звуковой волны, а вывод Echo для считывания сигнала, пришедшего обратно. Согласно данным из документации на выводе Trig необходимо сформировать импульс длительностью 10 мкс. После подачи этого сигнала, на выходе датчика формируется 8 импульсов частотой 40 кГц каждый. После этого в течении промежутка времени необходимого для прохождения волной пути от источника излучения до препятствия и обратно на вывод Echo выставляется высокий логический уровень. Для расчета расстояния пройденного сигнала можно воспользоваться формулой (2):

$$S = \frac{V * t}{2} \quad (2)$$

где  $V$  – скорость звука в воздухе;  $t$  – время, за которое звуковая волна проходит расстояние от датчика до препятствия и обратно.

Для того чтобы узнать время, за которое волна проходит все расстояние мы используем функцию `pulseIn()`. Однако до тех пор, пока звуковая волна не вернется все это время функция будет удерживать управление микроконтроллером на себе. Для того что бы избежать этой проблемы введем ограничение по времени для ожидания звуковой волны равное 8800 мкс. Этого времени достаточно чтобы обнаружить препятствие на расстоянии 148 см. Если по истечению времени волна так и не вернулась, то срабатывает тайминг который может быть ошибочно

воспринят как нулевое расстояние до объекта. Поэтому в случае возвращения функцией 0 мы считаем, что расстояние максимальное.

#### 6.4 Вычисление текущего угла наклона платформы

Рассмотрим возможную программную реализацию вычисления текущего угла.

Объявляем переменные, в которых будут храниться углы угловой скорости на текущем и предыдущем шаге, что является необходимым при вычислении угла методом дискретного интегрирования:

```
float angularVelocity = 0.0f, prevAngularVelocity = 0.0f;
```

Выставляем порог чувствительности, ниже которого данные будут приниматься за 0:

```
const int16_t MIN_GY = 8;
```

Объявляем переменные для вычисления шага интегрирования:

```
float time1 = 0.0f, prevTime = 0.0f;
```

Объявляем переменные для хранения приращение угла на текущем шаге и хранения абсолютного угла поворота:

```
float delta_angle = 0.0f;
```

```
float gyro_angle = 90.0f;
```

Объявляем переменную для расчета изменения угла между вызовами функции вычисления текущего положения:

```
float deltaPhi = 0.0f;
```

Создаем функцию вычисления текущего угла наклона:

```
void updateAngleMPU(){ // Функция опроса гироскопа
```

В данной программе используется прямой доступ к регистру данных посредством встроенной библиотеки Arduino – Wire. Устанавливаем соединение с устройством, имеющим адрес 0x68 (как раз наш датчик MPU6050):

```
Wire.beginTransmission(0x68);
```

Назначаем регистр с которого хотим начать считывать данные:

```
Wire.write(0x47); // starting with register 0x3B (ACCEL_XOUT_H)
```

Не закрываем линию связи:

```
Wire.endTransmission(false);
```

Так как нам необходимо только угловая скорость вокруг оси Y, то запрашиваем 2 байта (2 регистра) начиная с установленного ранее (0x47):

```
Wire.requestFrom(0x68, 2, true);
```

Записываем значения угловой скорости в размерности разрядов АЦП:

```
int16_t gz = Wire.read() << 8 | Wire.read(); // 0x47 (GYRO_ZOUT_H) & 0x48 (GYRO_ZOUT_L)
```

Сразу проверяем условие не входит ли считанное значение в зону нечувствительности, которую мы определили ранее, если не входит, то рассчитываем угол, иначе обновляем время опроса и выходим из функции:

```
if (gy > MIN_GY || gy < -MIN_GY) {
```

Переводим значения угловой скорости из размерности разрядов АЦП в размерность градусы/секунду по ранее описанному принципу:

```
angularVelocity = gy / 16.4f;
```

Рассчитываем шаг интегрирования:

```
time1 = (micros() - prevTime) / 1000000.0f ;
```

Рассчитываем приращение угла и интегрируем данные:

```
delta_angle = ((angularVelocity + prevAngularVelocity) * time1) / 2.0f;
```

```
gyro_angle += delta_angle;
```

```
deltaPhi += delta_angle;
```

Производим запись необходимых параметров для расчетов на следующем шаге интегрирования:

```
prevAngularVelocity = angularVelocity;
```

```
prevTime = micros();
```

```
}
```

## 6.5 Обоснование выбора алгоритма движения шагающего робота

На данный момент существуют несколько вариантов реализации алгоритма прямолинейного хождения для шестиногого робота. Одним из наиболее часто встречаемых являются передвижение подобно шестиногим насекомым, например, муравьям, т. е. в один момент времени робот находится в устойчивом состоянии опираясь на три ноги – 2 с одной стороны (передняя и задняя) и одна с другой (средняя). Вторым вариантом является последовательный переставление одной ноги за другой вперед, при этом в то время пока движение совершает одна нога туловище совершает небольшое перемещение вперед. Алгоритм передвижения, пародирующий насекомых, является достаточно устойчивым, скорость перемещения при этом будет выше чем если бы мы переставляли только по одной ноге за раз. Однако при поочередном передвижении ног мы получаем лучшее распределение массы робота, следовательно, снижается нагрузка на отдельно взятую ногу, что является критичным при использовании дешевых и слабых сервомоторов. Кроме того, в рамках необходимости решения задачи сохранения горизонтального положения платформы, проще всего отслеживать одновременно влияние изменения положения одной ноги, чем трех одновременно. В связи с этим дальнейшее рассмотрение получает алгоритм последовательного переставления одной ноги за другой с сопутствующим этому перемещением туловища.

## 6.6 Описание алгоритма передвижения шагающего робота

При первоначальном запуске робота после загрузки микроконтроллера выставляется начальное положение ног т.е. сервоприводы, отвечающие за положение ног, переводятся в среднее положение, а сервоприводы, отвечающие за суставы, переводятся в нижнее положение. На рисунке 40 отображены расположение и назначение сервоприводов на момент окончания загрузки микроконтроллера. Здесь Сервоприводы с пометкой L1...L6 отвечают за движение ног вперед и назад. Сервоприводы с пометкой K1...K12 – сервоприводы, отвечающие за движение суставов вверх и вниз. После этого наступает пауза в несколько секунд перед началом непосредственно самого движение.

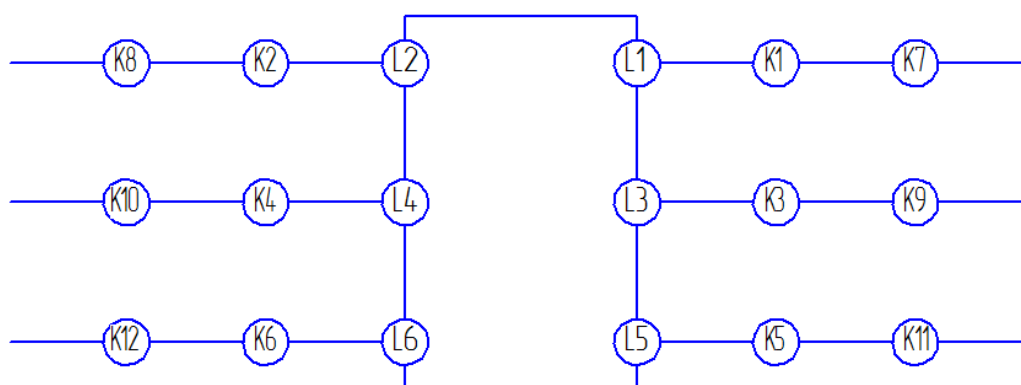


Рисунок 40 – Расположение и назначение сервоприводов

Вслед за паузой происходит опрос ультразвукового датчика. Если расстояние до препятствия превышает критическое или оно не обнаружено вовсе, то робот начинает подготовку к прямолинейному движению. Иначе наступает секундная пауза, после которой датчик опрашивается вновь.

Подготовка к прямолинейному движению заключается в выстраивании ног в соответствии с заранее установленным алгоритмом. Заключается он в том, что у каждой ноги есть 2 крайних положения и 4 промежуточных. Прежде чем совершить шаг нога должна оказаться в крайнем заднем положении. Из условия что мы начинаем движение с первой ноги (сервопривод с пометкой L1) то первая нога соответственно должна оказаться в крайнем заднем положении. Предполагается что ноги передвигаются в следующем порядке 1, 6, 3, 2, 5, 4. Из этого следует что

четвертая нога займет крайнее переднее положение, а оставшиеся 4 ноги займут промежуточные положения так как показано на рисунке 41.

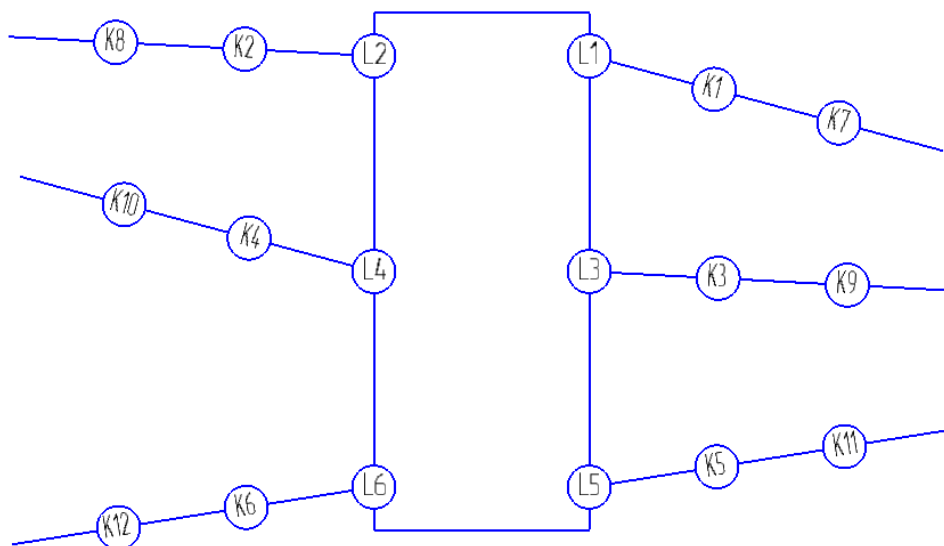


Рисунок 41 – Положение ног после окончания подготовки.

Передвижение ног происходит по две за раз, при этом сначала необходимое положение занимает первая и шестая нога, затем вторая и пятая, и в последнюю очередь третья и четвертая.

Варианты возможного расположения каждой из ног показаны на рисунке 42.

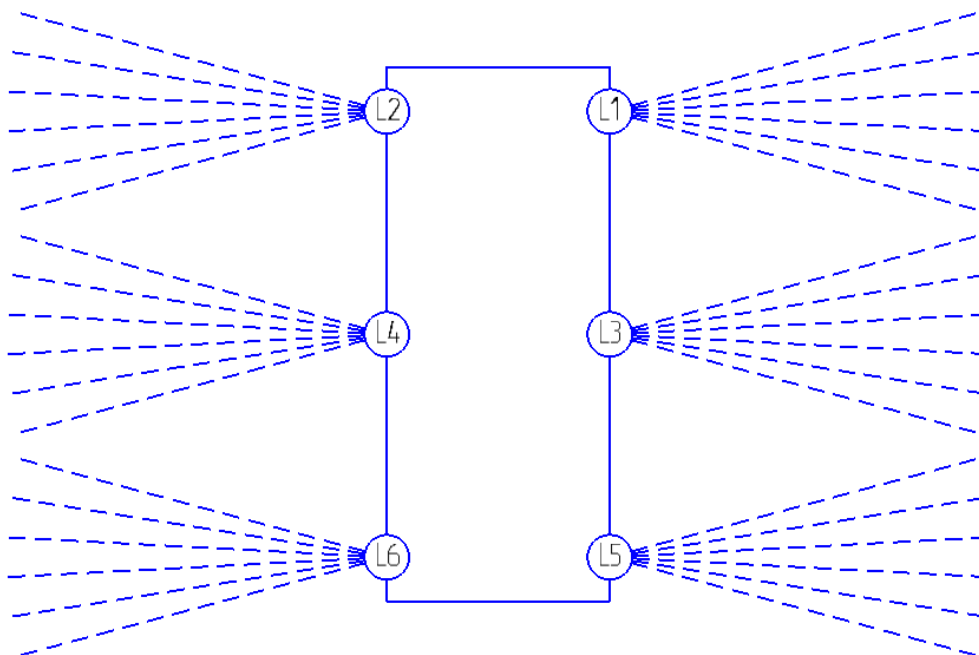


Рисунок 42 – Варианты возможного расположения каждой отдельной ноги.

Как было сказано ранее прямолинейное движение начинается с совершения первой ногой одного шага. Один шаг можно разделить на 3 части:

1. Передвижение суставов двигаемой ноги из низкого положения в высокое.

2. Сдвиг передвигаемой ноги из крайнего заднего положение в переднее. Остальные 5 ног в это время так же сдвигаются из одного промежуточного состояния в следующее.

3. Суставы передвигаемой ноги переходят из высокого положения в низкое.

Во время исполнения третьего этапа нога опускается постепенно и при снижении на каждые пять градусов происходит опрос датчика акселерометра гироскопа с целью установления произошло ли изменение угла наклона платформы. Если изменение угла не зафиксировано, то происходит сравнение нынешнего положения ноги с тем в которое совершается переход. Если эти значения не равны, то нога продолжает опускаться. Если после очередного спуска датчик зафиксировал изменение угла наклона платформы, то происходит подъем ноги на  $1^\circ$ , после которого датчик опрашивается вновь с целью выяснения вернулась ли платформа в горизонтальное положение. Если нет, то действие повторяется. Как только горизонтальное положение достигнуто в специально отведенную переменную сохраняется текущее положение ноги, которая осуществляла переход. Таким образом при последующем переходе эта нога будет осуществлять подъемов не из низшего своего возможного положения, а из того в котором она находилась при последнем переходе. В случае если нога спокойно опустилась и при этом изменение угла наклона платформы не было зафиксировано, то переменной, отвечающей за сохранение текущего положения ноги, присваивается значение соответствующее низшему положению.

Во время непосредственного движения платформы, нога которая переставляется из крайнего заднего положения в крайнее переднее осуществляет сдвиг на  $30^\circ$ , в то время как остальные ноги сдвигаются на  $6^\circ$  назад относительно своего предыдущего положения. Стоит отметить что каждый раз, когда очередная



нога совершает полный шаг из крайнего заднего положения в крайнее переднее, последующая за ней нога должна занимать крайнее заднее положение.

Расположение ног при завершении первого, второго, третьего, четвертого, пятого и шестого шагов соответственно продемонстрированы на рисунках 43-48.

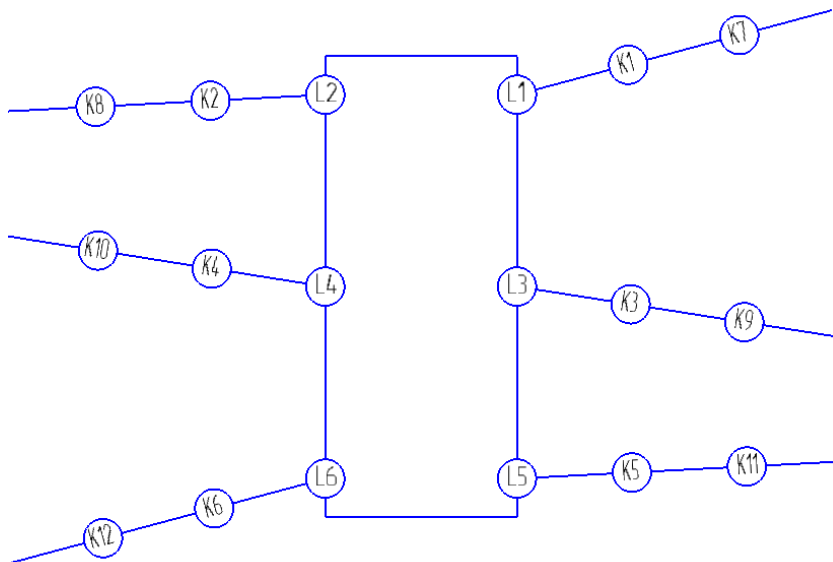


Рисунок 43 – положение ног по завершению первого шага.

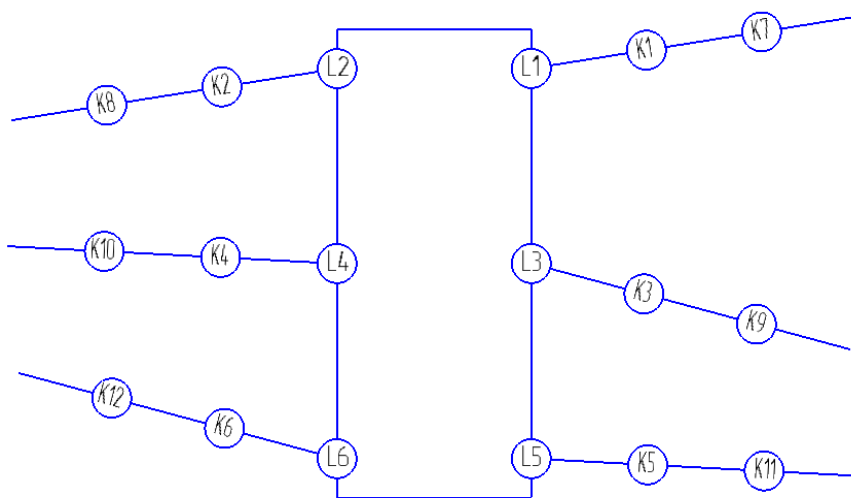


Рисунок 44 – положение ног по завершению второго шага.

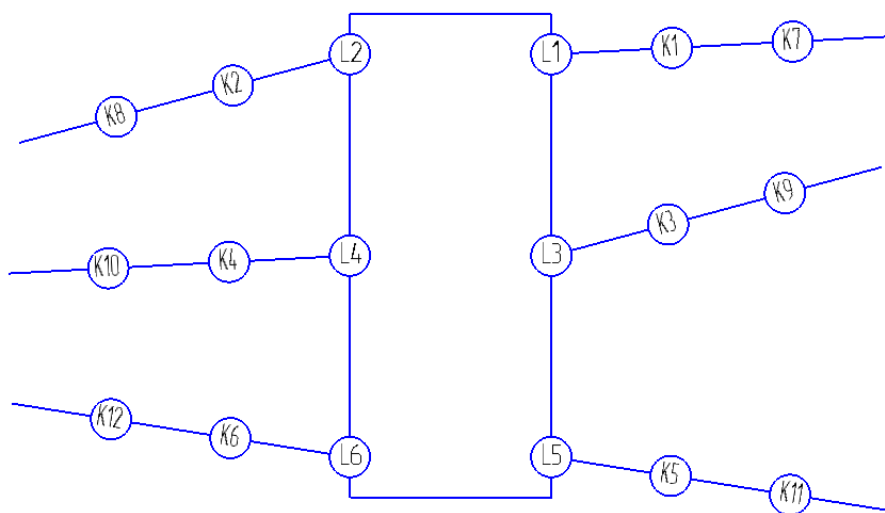


Рисунок 45– Положение ног по завершению третьего шага.

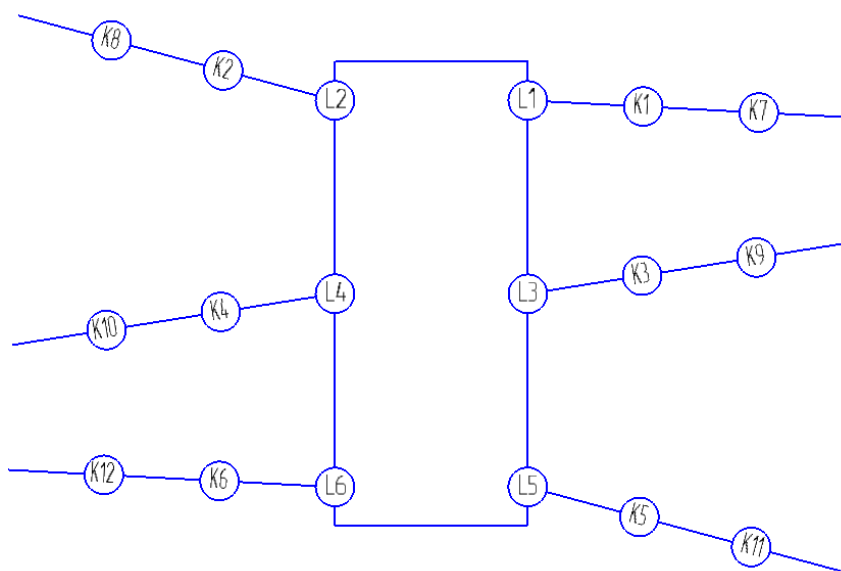


Рисунок 46 – Положение ног по завершению четвертого шага.

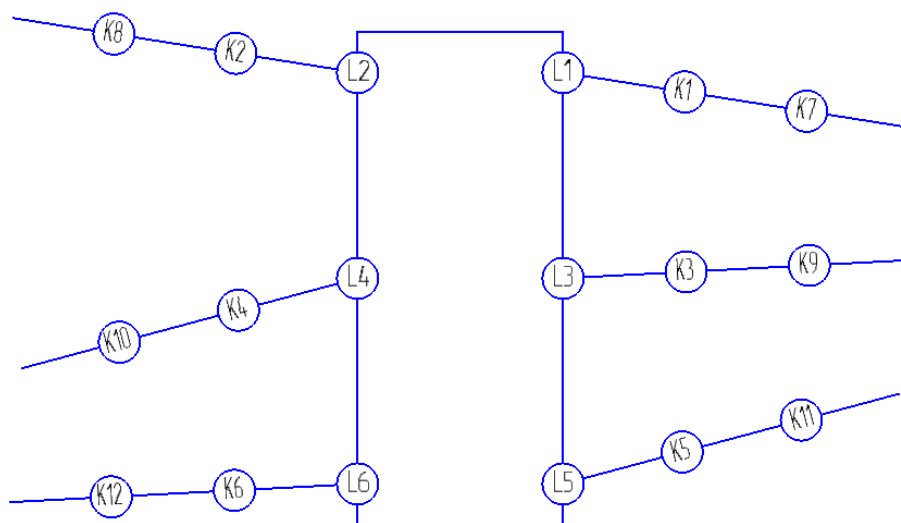


Рисунок 47 – Положение ног по завершению пятого шага.

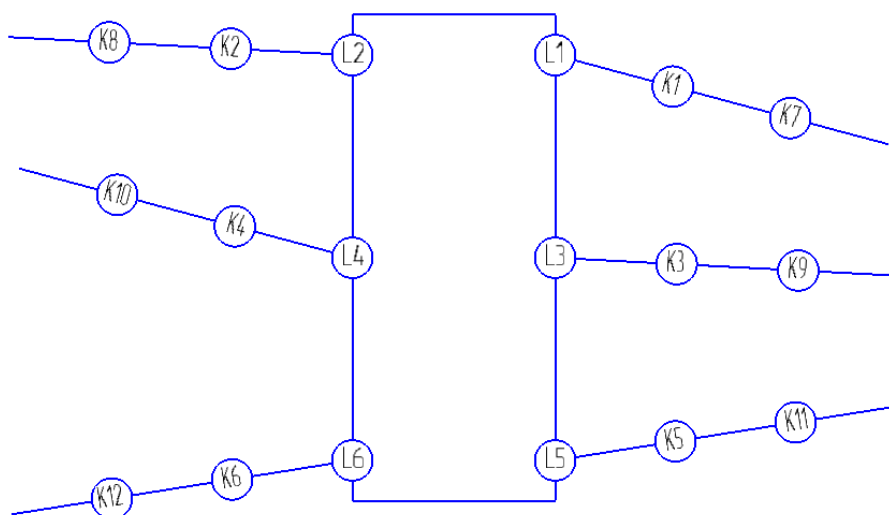


Рисунок 48 – Положение ног по завершению шестого шага.

Как видно положение ног по завершению шестого шага соответствует тому как они были расположены по окончании подготовки к прямолинейному движению. Из этого можно сделать вывод что такая последовательность является цикличной, и достаточной для движения прямо без дополнительных манипуляций и изменения положения ног, кроме описанных ранее.

Также ранее было описано что перед началом движения производится опрос ультразвукового датчика с целью обнаружения препятствия. Однако данный опрос производится по завершению каждого шага. В связи с этим возникает несколько особенностей при обнаружении препятствий. Используя только лишь ультразвуковой датчик для обнаружения объектов преграждающих путь, мы не имеем возможности определить, что это именно: статическое препятствие (стена, стол, коробка и т.д.), попросту неспособное к самостоятельному передвижению, или же живое существо. На данном этапе проектирования робот будет оставаться на месте до тех пор, пока препятствие не исчезнет, либо пока его не перенесет оператор. Пример программы, позволяющей совершать простое прямолинейное движение без столкновений с препятствиями, приведен в приложение А.

## 6.7 Блок схема алгоритма передвижения шагающего робота

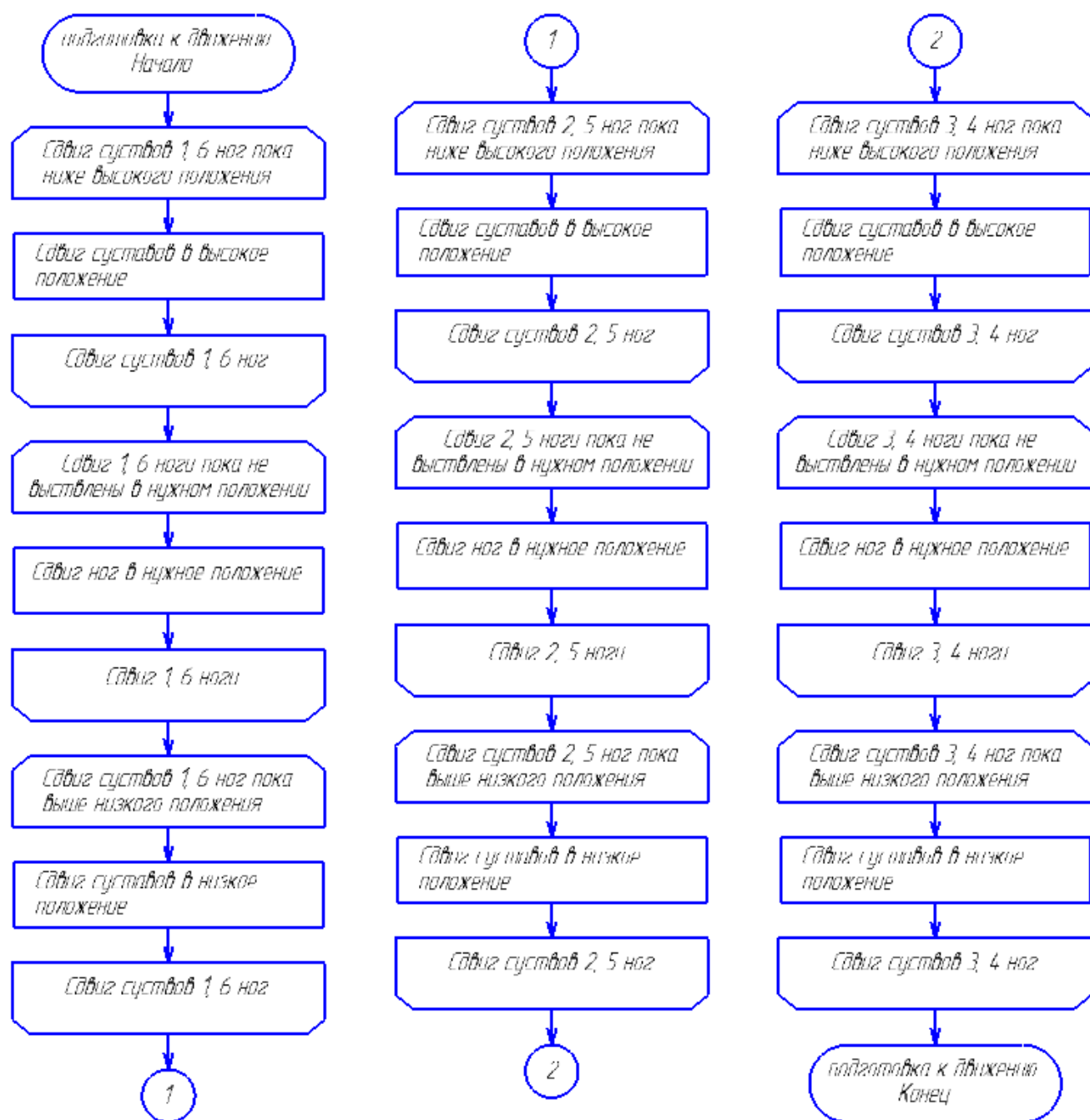


Рисунок 49 – Функция подготовки к движению

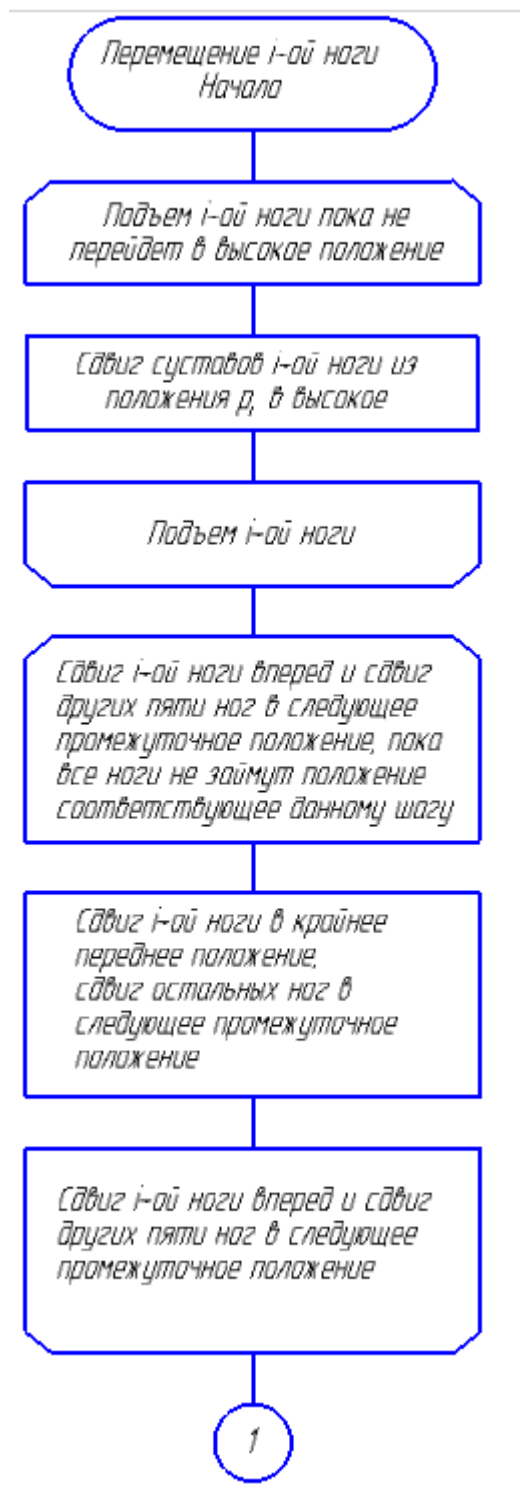


Рисунок 50 – Первая часть функции, отвечающей за передвижение *i*-ой ноги

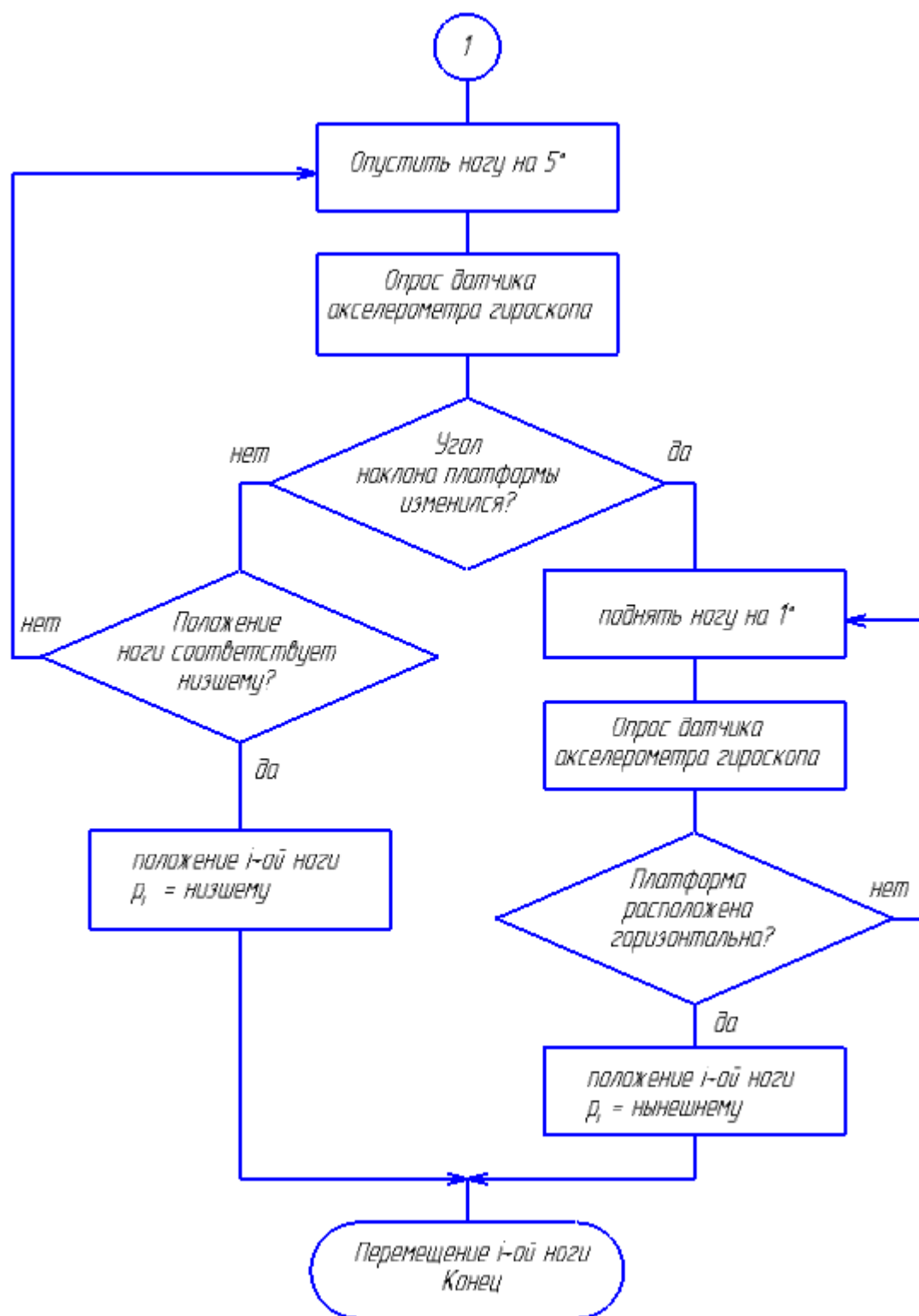


Рисунок 51 – Вторая часть функции, отвечающая за перемещение  $i$ -ой ноги

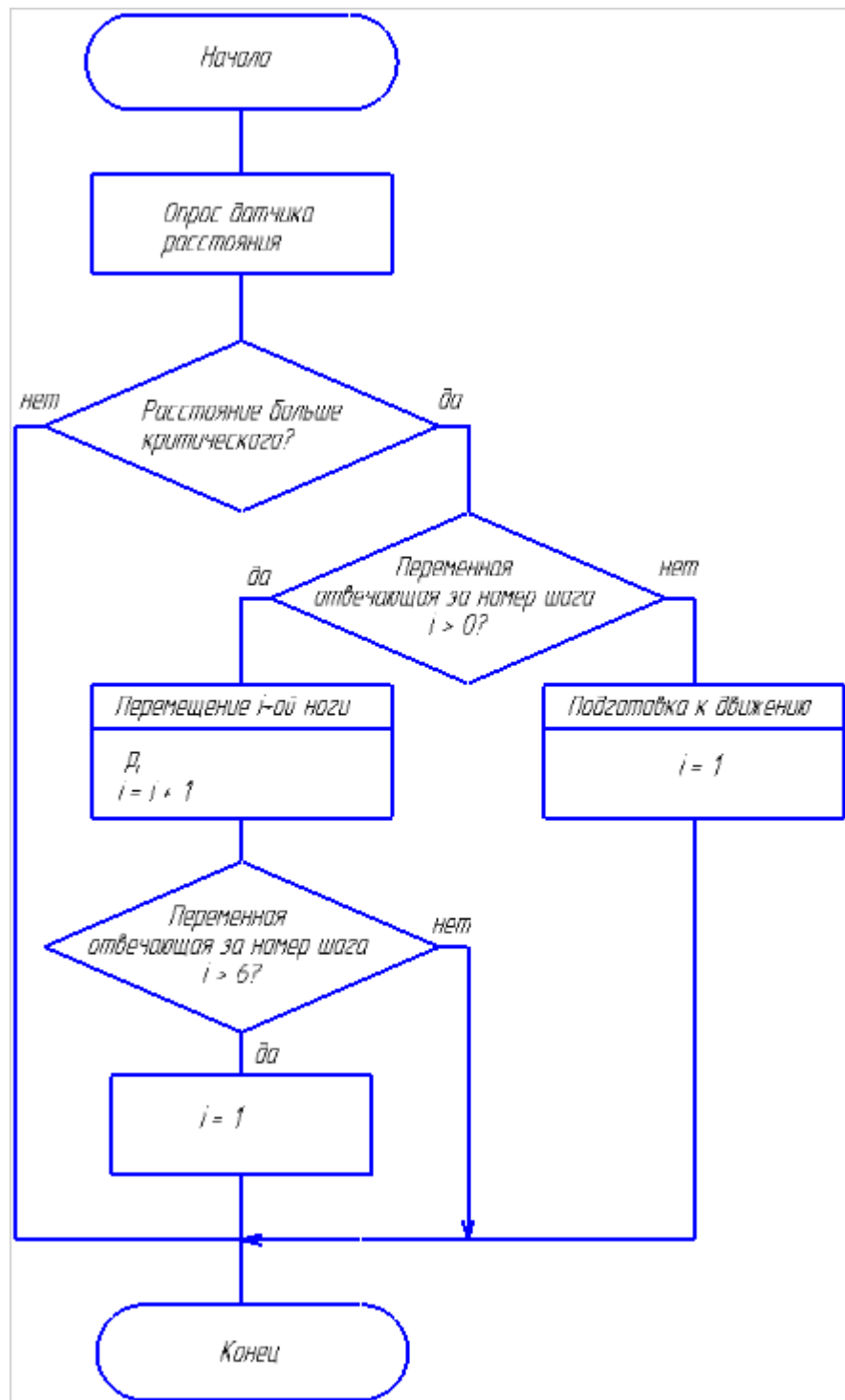


Рисунок 52 – Блок схема алгоритма движения шагающего робота

## 7 Безопасность и экологичность проекта

В процессе сборки возможно возникновение необходимости использования электрического либо ручного инструмента. В случае использования ручного инструмента не допускается его применение кроме как по прямому назначению, при передвижении запрещается переносить инструмент, который может быть классифицирован как колющий, направленным в сторону впереди идущих людей. Перед использованием электрических приборов необходимо прежде всего проверить состояние токоведущего кабеля на наличие разрывов изоляции или кабеля. Ни в коем случае не допускается использование электроприборов с оголёнными проводами. В случае возникновения неполадок во время работы с электроприборами таких как запах жженого пластика, дым, искрение, следует немедленно обесточить неисправный инструмент. В случае работы с электричеством запрещается использовать любой вид ручного инструмента, ручки которого не обладают резиновой или пластиковой изоляцией. Перед использованием подобного рода инструмента обязательно нужно проверить целостность изоляционного слоя.

При работе с паяльными аппаратами сперва необходимо убедиться в целостности токоведущих кабелей, а затем что во время работы у токоведущего кабеля не будет возможности соприкоснуться с горячей поверхностью паяльника. Помещение, в котором осуществляется процесс пайки должно быть хорошо проветриваемо, а рабочее место должно иметь качественное освещение. Свет от приборов освещения должен попадать только на рабочую область стола и ни коим образом в глаза рабочего. Во время пайки не допускается попадание испарений в глаза или дыхательные пути рабочего. В связи с этим обязательным условием является использование специальных очков респираторов. Смена респиратора должна осуществляться не реже чем раз в две недели. К использованию рекомендуются респираторы оснащенные обратным клапаном т.к. это способствует рассеиванию избыточного тепла и влаги, что повышает комфортность в его



использовании. При возникновении затруднений в процессе дыхания через респиратор, требуется немедленно провести замену респиратора на новый.

В процессе пайки схем с плотной компоновкой не допустимо длительное нагревание одного участка платы, так как это может привести к разрушению токоведущих дорожек или выхода из строя близко расположенных элементов. При попадании паяльных кислот или флюсов на кожу рук и лица незамедлительно смыть их под струей воды. В случае получения ожога во время использования паяльной установки немедленно обратиться за помощью.

При использовании литий полимерных аккумуляторов не допускается их хранения при уровне заряда менее 40% и температуре окружающей среды не выше 20°C. Перезаряд одного элемента не должен превышать 4.2 В, а разряд одного элемента ниже 3 В. Запрещается использование аккумуляторов с признаками механических повреждений, вздутых, имеющих повреждение в проводке. Категорически не рекомендуется бить аккумулятор, бросать на пол, нагревать, резать и т.д. Перед эксплуатацией убедиться в целостности аккумулятора, в достаточном уровне заряда, в правильности маркировки выводов.

Перед подключением схемы к источнику питания необходимо убедиться в целостности и надежности всех не припаянных проводников. При обнаружении разрыва или отсутствия проводника следует произвести его замену или подключить заново и только после этого подавать питание. В случае обнаружения неисправности во время работы, первым делом необходимо отключить схему от источника питания, и лишь затем предпринимать попытки по устранению неполадок.

## 8 Экономический расчет

Стоимость каждого отдельно взятого элемента и общая стоимость полученной платы контроллера и прототипа шагающего робота приведены на рисунке 53.

| №  | Наименование  | Кол. | Цена, р. |
|----|---|------|----------|
| 1  | Конд. кер. 100 нФ, 25 В, 10%, SMD, GRM1188R71E104KA01D    | 8    | 32       |
| 2  | Конд. электролит. 47 мкФ, 10В, 20%, SMD, B41121A3476M000  | 1    | 4        |
| 3  | Конд. электролит. 220 мкФ, 10В, 20%, SMD, B41121A3227M000 | 2    | 44       |
| 4  | Конд. кер. 18 пФ, 50 В, 5%, SMD, GRM1555C1H180J           | 2    | 4        |
| 5  | Конд. кер. 10 нФ, 50 В, 5%, SMD, GRM1887U1H103JA01D       | 2    | 4        |
| 6  | Конд. тант. 100 мкФ, 16 В, 10%, SMD, TECTAP 100/16V D 10  | 1    | 30       |
| 7  | Конд. тант. 47 мкФ, 10 В, 10%, SMD, TECTAP 47/10V B 10    | 1    | 18       |
| 8  | Конд. кер. 2,2 нФ, 50 В, 5%, SMD, GRM1885C1H222JA01D      | 1    | 2        |
| 9  | MIC5232-3.3YD5 TR   | 1    | 40       |
| 10 | LM2596SX-5.0/NOPB   | 1    | 230      |
| 11 | AMS1117-5.0   | 1    | 15       |
| 12 | АТмега168РА-PU  | 1    | 210      |
| 13 | MPU-6050  | 1    | 610      |
| 14 | PCA9685   | 1    | 160      |
| 15 | Индуктивность 22 мкГн, SMD, CM453232-220KL                | 1    | 35       |
| 16 | Индуктивность 100 мкГн, SMD, CM453232-101KL               | 1    | 14       |
| 17 | Резистор 0,25 Вт, 10 кОм, 1%, SMD, RC1206FK-0710KL        | 5    | 4,5      |
| 18 | Резистор 0,25 Вт, 220 Ом, 1%, SMD, RC1206FK-07220RL       | 16   | 14,4     |
| 19 | EVQ-PE504K  | 1    | 33       |
| 20 | BAT60A  | 1    | 7        |
| 21 | PLS-3 (DS1021-1x3), вилка штыревая                        | 18   | 36       |
| 22 | PJ-002AH, разъем питания                                  | 1    | 56       |
| 23 | PBS-4 (DS-1023 - 1x4), гнездо на плату                    | 1    | 38       |
| 24 | AVM3-8.000MHZ-D2Y-T, Кристалл, 8 МГц, SMD                 | 1    | 54       |
| 25 | SCS-28 (DS1009-28AN), DIP панель 28 контактов             | 1    | 5        |
| 26 | Tower Pro SG90  | 18   | 4860     |
| 27 | CF-2H-70Г-1,5 мм  | 1    | 120      |
| 28 |   |      |          |
| 29 |   |      |          |

Итого: 6679,9 р.

Рисунок 53 – Расчет стоимости компонентов электронной платы управления и полученного прототипа шагающего робота

## Заключение

В рамках выполнения бакалаврской работы была проведена работа по исследованию существующих мобильных робототехнических систем и областях их применения. Определено наиболее перспективное и доступное направление развития, рассмотрены уже существующие модели шагающих роботов и на основе описанной информации обоснована актуальность текущей разработки. Разработана структурная схема разрабатываемой платы контроллера и подобраны основные элементы схемы. Разработана схема электрическая принципиальная и печатная плата разрабатываемого изделия. Описан процесс работы с каждым функциональным элементом, обеспечивающих безопасное передвижение шагающего робота. Разработан и описан алгоритм перемещения шагающего робота без столкновений с препятствиями. Произведена оценка экологичности и безопасности проекта, а также оглашены основные требования по безопасному взаимодействию с роботом. Произведен экономический расчет производимого изделия.

## Список используемой литературы

1. Александров А.А. Электротехнические чертежи и схемы / Александров К.К., Кузьмина Е.Г. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 288с.
2. Промышленная электроника: Учебник для вузов / Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е.; Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.: ил.
3. Электронные промышленные устройства: Учеб. для студ. вузов спец. «Пром. электрон.»/ В.И. Васильев, Ю.М. Гусев, В.Н. Миронов и др. – М.: Высш. шк., 1988. – 303 с.: ил.
4. Глибин Е.С. Программирование электронных устройств : электронное учеб. пособие / Е.С. Глибин, А.В. Прядилов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2014.: 1 оптический диск
5. Жеребцов И.П. Основы электроники. – 5-е изд., перераб. и под. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с.: ил.
6. Электроника и микропроцессорная техника : учебник / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 6-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2013. – 800 с. – (Бакалавриат).
7. Фокин В. Г., Шаныгин С. В. Обзор и перспективы развития мобильных шагающих робототехнических систем // Молодой ученый. — 2015. — №18. — С. 207-215.
8. SIL06 – шестиногий робот-миноискатель [Электронный ресурс]: статья. – режим доступа: <http://www.dailytechinfo.org/military/589-sil06-shestinogij-robot-minoiskatel.html>
9. Использование команд роботов типа Prospero может в корне изменить существующие сельскохозяйственные технологии [Электронный ресурс]: статья. – режим доступа: <http://www.dailytechinfo.org/robots/3202-ispolzovanie-komand-robotov-tipa-prospiero-mozhet-v-korne-izmenit-suschestvuyuschie-selskohozyaystvennyye-tehnologii.html>
10. RiSE: карабкающийся робот [Электронный ресурс]: статья. – режим доступа: <http://plurrimi.com/science/70>

11. BigDog [Электронный ресурс]: электронная энциклопедия. – режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/BigDog>
12. LittleDog, младший «брат» робота BigDog, мал, да удал [Электронный ресурс]: статья. – режим доступа: <http://www.dailytechinfo.org/military/1361-littledog-mladshij-brat-robota-bigdog-mal-da-udal.html>
13. Компания Boston Dynamics представляет нового четвероногого робота – робота WildCat [Электронный ресурс]: статья. – режим доступа: <http://www.dailytechinfo.org/robots/5242-kompaniya-boston-dynamics-predstavlyaet-novogo-chetveronogogo-robota-robota-wildcat.html>
14. iC Нехарод Мэтта Дентона [Электронный ресурс]: статья. – режим доступа: [https://myrobot.ru/news/2007/10/20071025\\_1.php](https://myrobot.ru/news/2007/10/20071025_1.php)
15. Робот-насекомое по имени Hector делает свои первые шаги [Электронный ресурс]: статья. – режим доступа: <http://www.dailytechinfo.org/robots/6573-robot-nasekomoe-po-imeni-hector-delaet-svoi-pervye-shagi.html>
16. Atmel. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/392279/ATMEL/ATMEGA168PA-PU.html>
17. MPU-6050. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: [https://cdiweb.com/datasheets/invensense/MPU-6050\\_DataSheet\\_V3%204.pdf](https://cdiweb.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf)
18. PCA9685. [Электронный ресурс]: документация. – режим доступа: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/424208/NXP/PCA9685.html>
19. Ultrasonic Ranging Module HC - SR04 [Электронный ресурс]: документация – режим доступа: <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>
20. SG90 9g Micro Servo [Электронный ресурс]: документация – режим доступа: <http://www.micropik.com/PDF/SG90Servo.pdf>
21. Интерфейс I<sup>2</sup>C и Arduino [Электронный ресурс]: статья. – режим доступа: <http://soltau.ru/index.php/arduino/item/371-interfejs-i2c-i-arduino>

22. Ryuichi Iwamasa, Nikita Pashenkov. One-Chip Solution to Intelligent Robot Control: Implementing Hexapod Subsumption Architecture Using a Contemporary Microprocessor // International Journal of Advanced Robotic Systems, volume 1, issue 2, June 1 2004. URL: <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.5772/5625>
23. Jaichandar Kulandaidasan Sheba , Mohan Rajesh Elara, Edgar Martínez-García, Le Tan-Phuc, Trajectory Generation and Stability Analysis for Reconfigurable Klann Mechanism Based Walking Robot. // Robotics, Network and System Sciences, Vol. 5(3) No. 13, 30 June 2016. URL: <http://www.mdpi.com/2218-6581/5/3/13/htm>
24. Yi-Jen Mon, The Gyroscope Sensor Test by Using Arduino Platform. // International Journal of Scientific & Technology Research, June 2016, volume 4, issue 06. URL: <https://doaj.org/article/277c66e2aa88427b8700c9c7a57647de>
25. Nunzio Abbate, Adriano Basile, Carmen Brigante, Alessandro Faulisi, and Fabrizio La Rosa, Modern Breakthrough Technologies Enable New Applications Based on IMU Systems. // Journal of Sensors, volume 2011 (2011), Article ID 707498, 7 page. URL: <https://www.hindawi.com/journals/js/2011/707498/>
26. Hong-Chao Zhuang, Hai-Bo Gao and Zong-Quan Deng, Gait Planning Research for an Electrically Driven Large-Load-Ratio Six-Legged Robot. // Applied Sciences, volume 7, issue 3, March 18 2017. URL: <http://www.mdpi.com/2076-3417/7/3/296/htm>