
ГЛАВА I. МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ BELSU-BOT[©]

В строительстве, коммунальном хозяйстве и других отраслях народного хозяйства остро стоит вопрос повышения производительности труда, которое в сегодняшних условиях требует применения роботизированных устройств. Применение данных устройств при ликвидации последствий катастроф позволит спасти жизнь и здоровье многим людям. Однако, существующие на сегодняшний конструкции мобильных робототехнических устройств не находят широкого применения из-за высокой стоимости и низких технических характеристик. При реализации проекта предполагается разработать робототехническое устройство, не уступающее лучшим зарубежным аналогам.

Комплексная методика проектирования позволит повысить технические характеристики устройства за счет рационального сочетания особенностей конструкции и механических свойств ответственных деталей и учета этого сочетания при программировании робота.

Реализация проекта позволит повысить эффективность и конкурентоспособность отечественной промышленности.

При выполнении проекта впервые предполагается решать проблему проектирования мобильного робототехнического устройства комплексно, рассматривая совместно разработку конструкции, технологии изготовления ответственных деталей и программного обеспечения. Выполняемый проект соответствует передовым достижениям отечественной и зарубежной науки.

В зависимости от рабочей среды различают пять типов мобильных роботов: наземные, подземные, летающие, плавающие и космические [9].

Наземные мобильные роботы, в свою очередь, в зависимости от способа передвижения подразделяются на следующие классы: колесные, шагающие, гибридные и специализированные.

[©] *Афонин А.Н., Алейников А.Ю., ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород*

Шагающие мобильные роботы [9], как правило, имитируют способы передвижения тех или иных живых существ. Основным признаком классификации шагающих мобильных роботов является число конечностей. Шагающие мобильные роботы могут быть с 2, 4, 6, 8 и более конечностями. 2 конечности имеют как правило роботы, копирующие человека (андроиды). Роботы с 4 конечностями копируют движения животных, а роботы с 6 и более конечностями – насекомых. Основная область применения шагающих роботов связана с использованием их для передвижения по местности с большим количеством препятствий или неровностей, например с необходимостью взбираться и спускаться по ступенькам лестницы.

Основными недостатками шагающих роботов является сложность их конструкции и сложность управления ими. В связи с этим в настоящее время они являются либо экспериментальными образцами, на которых проводятся исследования, либо дорогими игрушками с ограниченным набором возможностей.

Наибольшее распространение в настоящее время нашли колесные мобильные наземные роботы [3, 4]. Известно большое количество способов классификации колесных наземных мобильных роботов.

По количеству колес различают 1, 2, 3, 4, 6, 8 и более колесные роботы. Увеличение количества колес как правило повышает проходимость робота, однако при этом увеличивается его масса и сложность конструкции.

При классификации по способу управления работой колес различают следующие группы колесных роботов: группа с жестко закрепленными колесами (с поворотом за счет изменения скорости и/или направления вращения колес по разным бортам); автомобильная группа (поворот осуществляется только за счет передних колес); группа с произвольным независимым управлением поворотом каждого колеса влево или вправо; группа роботов, способных перемещаться во всевозможных направлениях. Большинство применяемых на практике колесных мобильных роботов относится ко второй и третьей группам, т.к. данный метод управления обеспечивает наилучшую динамику машины. Что касается роботов, колеса которых могут поворачиваться в любую сторону, то они пока находятся на стадии экспериментальных исследований.

К особой разновидности колесных мобильных роботов относятся гусеничные роботы, на колеса которых для повышения проходимости

надеваются гусеницы.

Гибридные мобильные наземные роботы [6] способны перемещаться как при помощи колес, так и при помощи конечностей.

К специализированным роботам относятся рельсовые роботы, адсорбционные роботы (способные передвигаться по наклонным участкам с помощью вакуумных присосок), роботы на магнитной или воздушной подушке, ползающие роботы (например змееподобные [1]) и т.д. [9].

Область применения каждой из разновидностей специализированных роботов резко ограничено, т.к. каждая из них изначально ориентирована на решение узкого круга специальных задач.

На основании анализа достоинств и недостатков рассмотренных выше групп мобильных роботов можно сделать вывод о том, что для решения поставленной задачи создания универсального мобильного робота для работы в условиях слабопересеченной местности наиболее подходящим является 4-х или 6 колесный мобильный робот автомобильного типа.

При проектировании мобильного робота важное значение имеет правильный выбор формы и размеров его основных деталей. К таким деталям относятся в первую очередь рама и детали подвески.

Подвеска колес мобильного робота автомобильного типа может иметь различную конструкцию. В результате анализа большого количества возможных вариантов подвески [8] были выбраны варианты торсионной подвески и подвески с пружинным амортизатором.

Расчет диаметра торсиона проводился по методике [8]

$$d = \sqrt[4]{\frac{32T}{\pi G \varphi}},$$

где T – крутящий момент, Нм;

G – вес робота, Н;

$\varphi = \frac{2a}{D}$ – угол закручивания торсиона;

a – допустимый прогиб;

D – диаметр колеса робота, мм

Расчет показал, что исходя из предполагаемых массогабаритных показателей робота, диаметр торсиона, обеспечивающий необходимую жесткость, не обеспечивает выполнения обеспечения требований прочности на кручение и изгиб.

В связи с этим был сделан вывод о целесообразности применения

подвески с пружинным амортизатором.

На основе разработанных предложений по конструкции мобильного робота были рассмотрены различные варианты его компоновки, в частности 6 колесная (рис. 1) и 4 колесная. Исходя из анализа массогабаритных характеристик различных вариантов конструкции был сделан вывод о предпочтительности 4 колесного варианта конструкции.

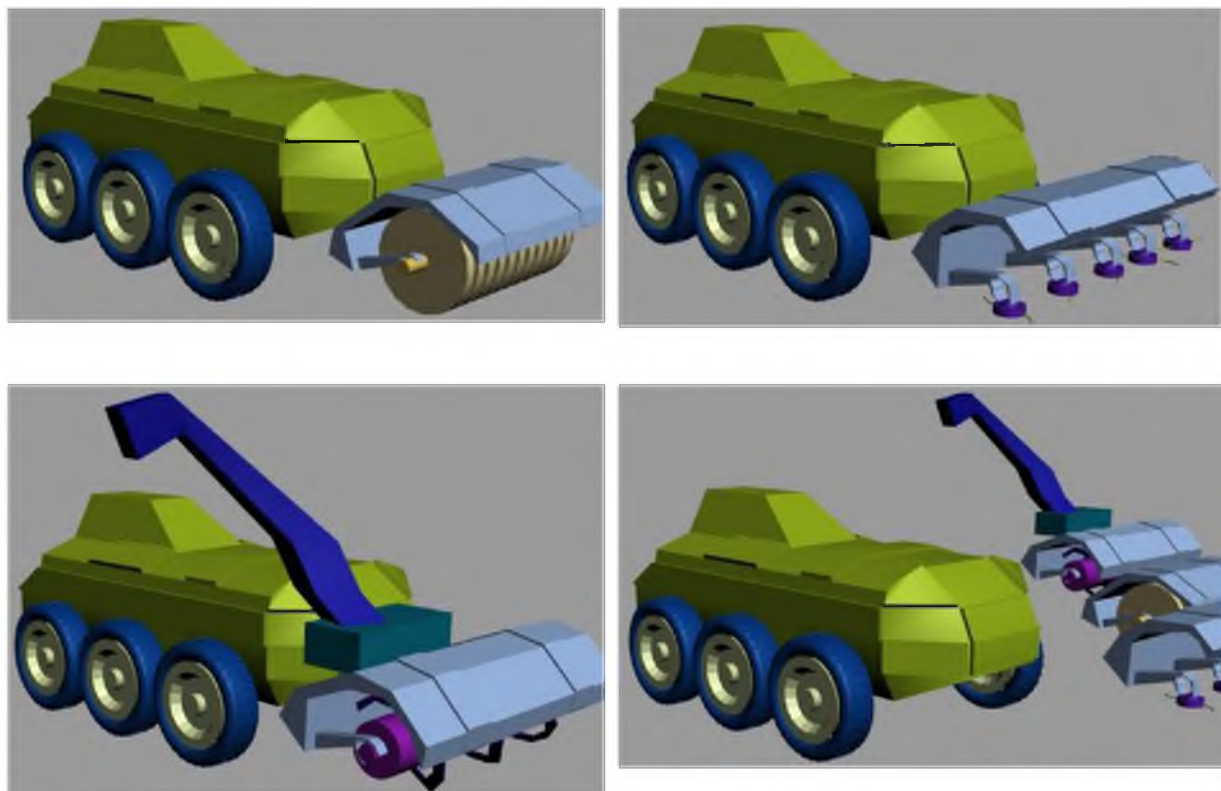


Рисунок 1 – 6 колесная компоновка мобильного робота

Для 4 колесной компоновки мобильного робота была создана компьютерная 3D модель (рис. 2).

Ввиду сложной формы деталей мобильного робота их расчет на прочность был произведен с помощью численного метода конечных элементов (МКЭ) [2, 5].

Методика расчета на прочность деталей мобильного робота с помощью МКЭ включала в себя следующие этапы:

1. задание геометрии моделируемых тел
2. разбиение деформируемых тел на конечные элементы;
3. задание механических свойств материала деформируемых тел;
4. определение начальных и граничных условий;

5. расчет эквивалентных напряжений и деформаций конструкции;
- 6 анализ результатов моделирования.

В результате моделирования получены поля напряжений и деформаций в деталях мобильного робота. Пример распределения полей напряжений по Мизесу в раме робота приведен на рис. 3. Распределение полей эквивалентных деформаций приведено на рис. 4.

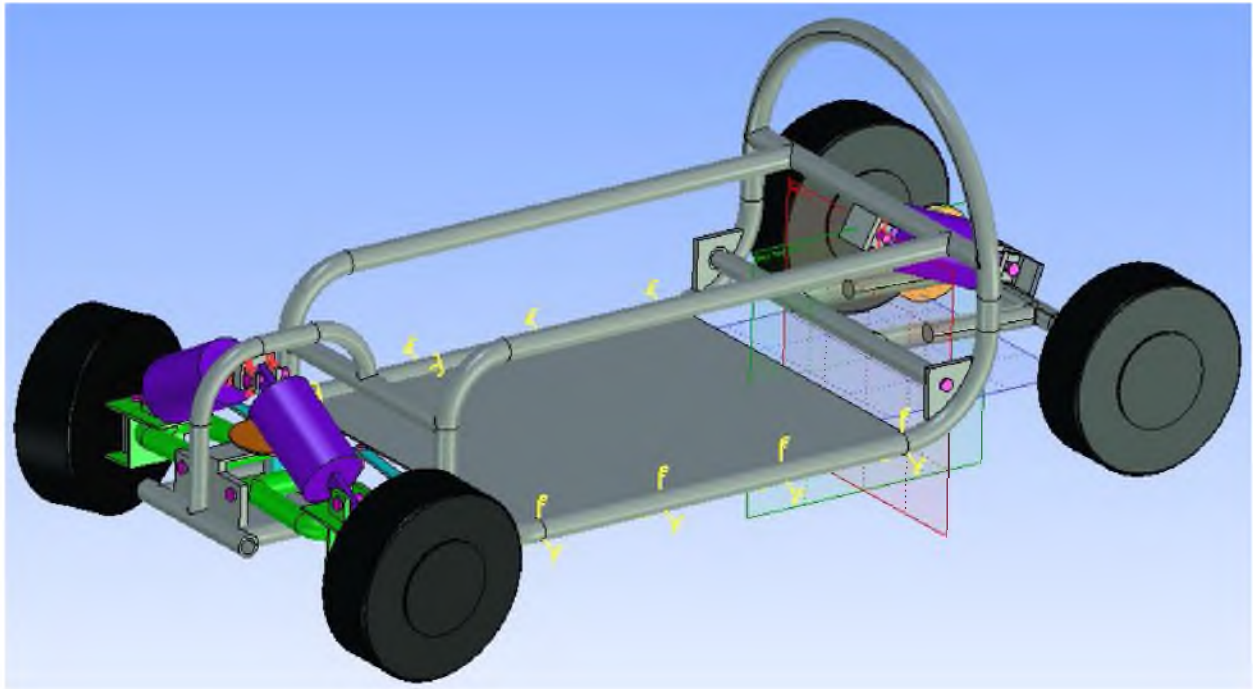


Рисунок 2 – 3D модель мобильного робота.

Проведенное моделирование позволило исследовать напряженно-деформированное состояние наиболее ответственных тяжело нагруженных деталей.

Полученные при моделировании поля напряжений и деформаций позволяют назначать требуемые параметры качества ответственных деталей спроектированного мобильного робота и обоснованно разрабатывать технологию их изготовления

В соответствии с правилами устройства электрических установок [7] (п.5.3.11) для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, независимо от их мощности рекомендуется применять электродвигатели синхронные или асинхронные с короткозамкнутым ротором.

Для привода механизмов, имеющих тяжелые условия пуска или работы либо требующих изменения частоты вращения, следует применять электродвигатели с наиболее простыми и экономичными методами пуска или регулирования частоты вращения, возможными в данной установке.

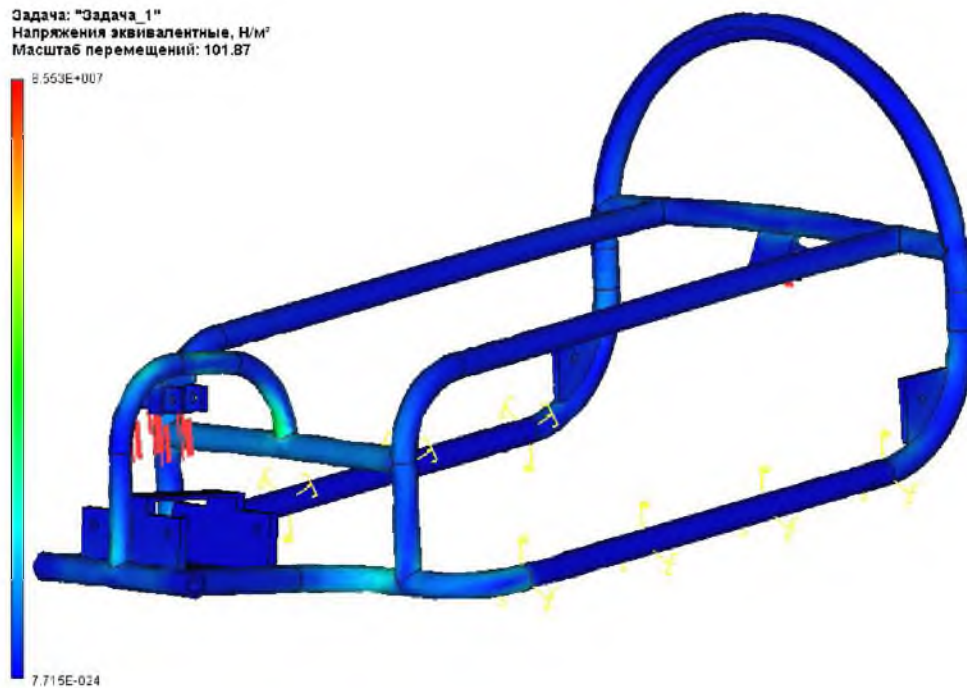


Рисунок 3 - Распределение полей напряжений по Мизесу в раме робота, МПа

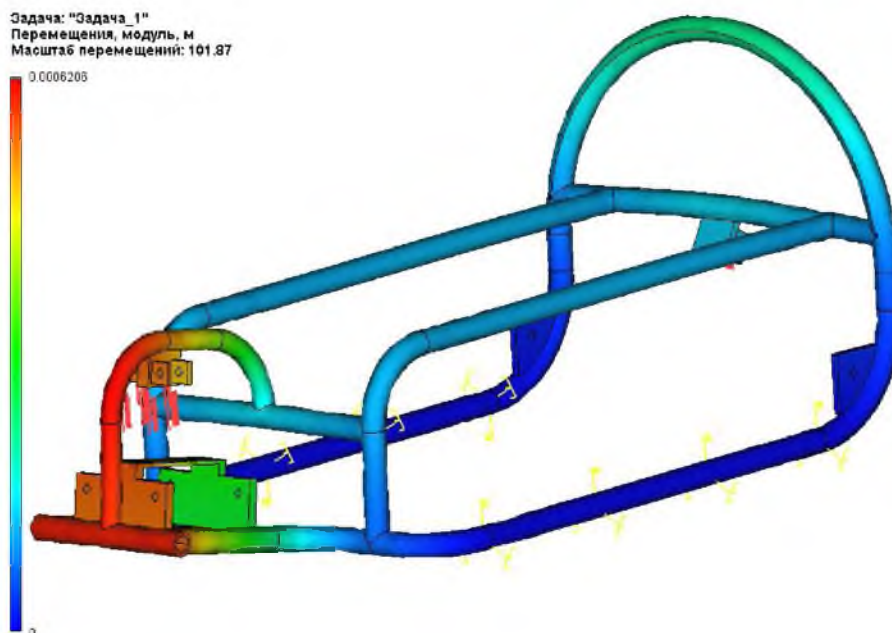


Рисунок 4 - Распределения полей абсолютных перемещений в раме робота, мм.

Основными предпосылками выбора тягового электрического привода передвижения является ряд технических требований.

а) Питание робота должно осуществляться от источника постоянного тока (аккумуляторной батареи) с конечным зарядом, в связи с чем двигатель должен обладать высоким коэффициентом полезного действия;

В соответствии с 5.3.14 ПУЭ электродвигатели постоянного тока допускается применять только в тех случаях, когда электродвигатели переменного тока не обеспечивают требуемых характеристик механизма или неэкономичны.

Двигатели постоянного тока обладают высоким пусковым моментом и большой перегрузочной способностью.

б) Двигатель передвижения робота должен быть способен менять частоту и направление вращения с сохранением крутящего момента;

в) Предполагается использование робота в тяжелых условиях, в том числе при высокой влажности, агрессивности среды и наличия взвешенных частиц пыли.

В соответствии с 5.3.16 ПУЭ электродвигатели, устанавливаемые на открытом воздухе, должны иметь исполнение не менее IP44 или специальное, соответствующее условиям их работы (например, для открытых химических установок, для особо низких температур).

В соответствии с п. 5.3.17. ПУЭ электродвигатели, устанавливаемые в помещениях, где возможно оседание на их обмотках пыли и других веществ, нарушающих естественное охлаждение, должны иметь исполнение не менее IP44 или продуваемое с подводом чистого воздуха. Корпус продуваемого электродвигателя, воздухопроводы и все сопряжения и стыки должны быть тщательно уплотнены для предотвращения присоса воздуха в систему вентиляции.

При продуваемом исполнении электродвигателя рекомендуется предусматривать задвижки для предотвращения всаса окружающего воздуха при останове электродвигателя. Подогрев наружного (холодного) воздуха не требуется.

В соответствии с п. 5.3.18. ПУЭ Электродвигатели, устанавливаемые в местах сырых или особо сырых, должны иметь исполнение не менее IP43 и изоляцию, рассчитанную на действие влаги и пыли (со специальной обмазкой, влагостойкую и т.п.).

В соответствии с п. 5.3.19. ПУЭ Электродвигатели, устанавливаемые

в местах с химически активными парами или газами, должны иметь исполнение не менее IP44 или продуваемое с подводом чистого воздуха при соблюдении требований, приведенных в 5.3.17. Допускается также применение электродвигателей исполнения не менее IP33, но с химически стойкой изоляцией и с закрытием открытых неизолированных токоведущих частей колпаками или другим способом.

г) Двигатель должен удовлетворять требованиям надежности и отказоустойчивости в диапазоне индустриальном диапазоне температур в условиях частых пусков.

Проведем сравнительную характеристику приводов.

а) Коллекторный двигатель.

Достоинства: относительно невысокая сложность системы управления, невысокая цена, простота эксплуатации и ремонта, достаточно большой ресурс.

Недостатки: эффективные конструкции с точки зрения технических возможностей (с большим КПД и малой массой) коллекторных двигателей являются низкомоментными и быстроходными, поэтому, необходимо применение редукторов.

б) Шаговый двигатель

Преимущества шагового двигателя:

- стабильность работы в широком диапазоне нагрузок;
- при управлении не требуется обратной связи, так как поворот ротора осуществляется по шагам на заданный угол;
- отсутствуют трущиеся и искрящиеся части (щетки);
- двигатель имеет продолжительный срок эксплуатации;
- двигатель имеет высокий крутящий момент на низких скоростях;
- защита от перегрузки. Двигатель не может быть поврежден из-за механической перегрузки.

Недостатки шагового двигателя:

- необходимость системы управления;
- низкая эффективность, вследствие чего двигатель использует значительную энергию несмотря на нагрузку;
- крутящийся момент падает при увеличении скорости вращения;
- двигатель склонен к резонансу. Для плавного движения необходимо применение микро-шагового режима.
- низкий крутящийся момент по отношению к инерции. Двигатель не

способен быстро увеличивать нагрузку.

Двигатель обладает низкой полезной мощностью по отношению к размеру и весу.

в) Бесколлекторный двигатель постоянного тока

Достоинства бесколлекторного двигателя:

-частота вращения изменяется в широком диапазоне

-возможность использования во взрывоопасной и агрессивной среде

-большая перегрузочная способность по моменту

-высокие энергетические показатели (КПД более 90 %)

-большой срок службы, высокая надёжность и повышенный ресурс работы за счёт отсутствия скользящих электрических контактов.

Недостатки бесколлекторного двигателя :

- относительно сложная система управления двигателем;

-высокая стоимость двигателя, обусловленная использованием дорогостоящих материалов в конструкции ротора (неодимовые магниты, подшипники, валы и пр).

С учетом анализа достоинств и недостатков двигателей наиболее оптимальным с точки зрения эффективности является бесколлекторный двигатель в комбинации с редуктором.

Произведем приблизительный расчет требуемой мощности двигателя.

Для этого положим вес работа равным 25 кг, максимальная скорость движения 1 м/с, радиусы 4-х колес равными 300 мм.

При движении по прямой на расстояние l м, формула для вычисления скорости имеет вид:

$$v^2 = v_0^2 + 2ad \quad (1)$$

где d — расстояние, пройденное роботом, v_0 — его начальная скорость

$$(v_0 = 0),$$

Уравнение для вычисления ускорения примет вид:

$$a = \frac{v^2 - v_0^2}{2d} \quad (2)$$

где v — скорость работа, a - ускорение работа.

После подстановки значений, получим ускорение $a=0,5$ м/с.

Формула для вращательного момента, необходимого для перемещения робота с ускорением имеет вид:

$$M = J\alpha \quad (3)$$

Где $J = \frac{mgr^2}{2}$ — момент инерции и $\alpha = \frac{a}{r}$ — угловое ускорение.

В результате, формула для вращательного момента примет вид:

$$M = \frac{mgra}{2} \quad (4)$$

Здесь $g = 9.80665 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения (округлим его до 10), r — радиус колеса, m — масса всего робота

Подставив значения, получим $M=18.75\text{Нм}$

Частота вращения колес будет составлять 3,33 рад/сек.

Механическая мощность двигателя пропорциональна крутящему моменту и частоте вращения:

$$P = M \times \nu \quad (5)$$

Таким образом, для заданных условий значение P будет приближенно составлять 62 Ватт.

Для робота предлагается использовать модель двигателя с восьмикратным запасом по электрической мощности VM1418ZXF.

Основные характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики двигателя

№	Параметр	Значение
1	Мощность, Ватт	500W
2	Частота вращения под нагрузкой, об/мин (без редуктора)	2800
3	Частота вращения без нагрузки, об/мин (без редуктора)	3100
4	Потребляемый ток при полной нагрузке, А	<13 А
5	Момент, н/м	28
6	Коэффициент передачи редуктора	1:6
7	Напряжение питания, В	48
8	Вес	6 кг

Для управления двигателем необходимо использование микроконтроллерной системы управления. (72U1583. Характеристики системы управления представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики системы управления

№	Параметр	Значение
1	Номинальное напряжение, В	48
2	Номинальная мощность, Ватт	500
3	Функция реверса 0	присутствует
4	Функция управления скоростью	присутствует
5	Вес, кг	1.2

Система управления мобильным роботом состоит из следующих основных узлов:

Беспроводной модуль приемопередатчика для персонального компьютера

Устройство предназначено для обеспечения возможности двунаправленного обмена данными персонального компьютера с роботом по беспроводному каналу на частоте 433 МГц.

Структурная схема беспроводного модуля приемопередатчика для персонального компьютера приведена на рисунке 5.

Устройство соединяется с персональным компьютером посредством интерфейса USB. Преобразователь интерфейсов (блок 2) преобразовывает интерфейс USB в UART с уровнями TTL. Далее, сигнал поступает на беспроводной приемопередатчик (блок 3.)

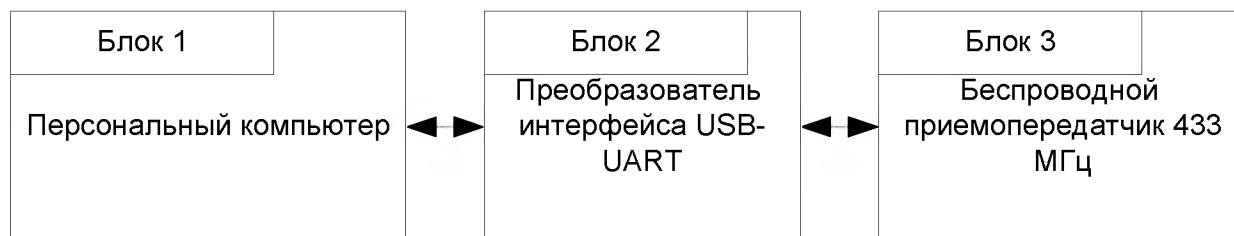


Рисунок 5 – Структурная схема беспроводного модуля приемопередатчика для персонального компьютера

Схема электрическая принципиальная беспроводного модуля приемопередатчика для персонального компьютера приведена на рисунке 6.

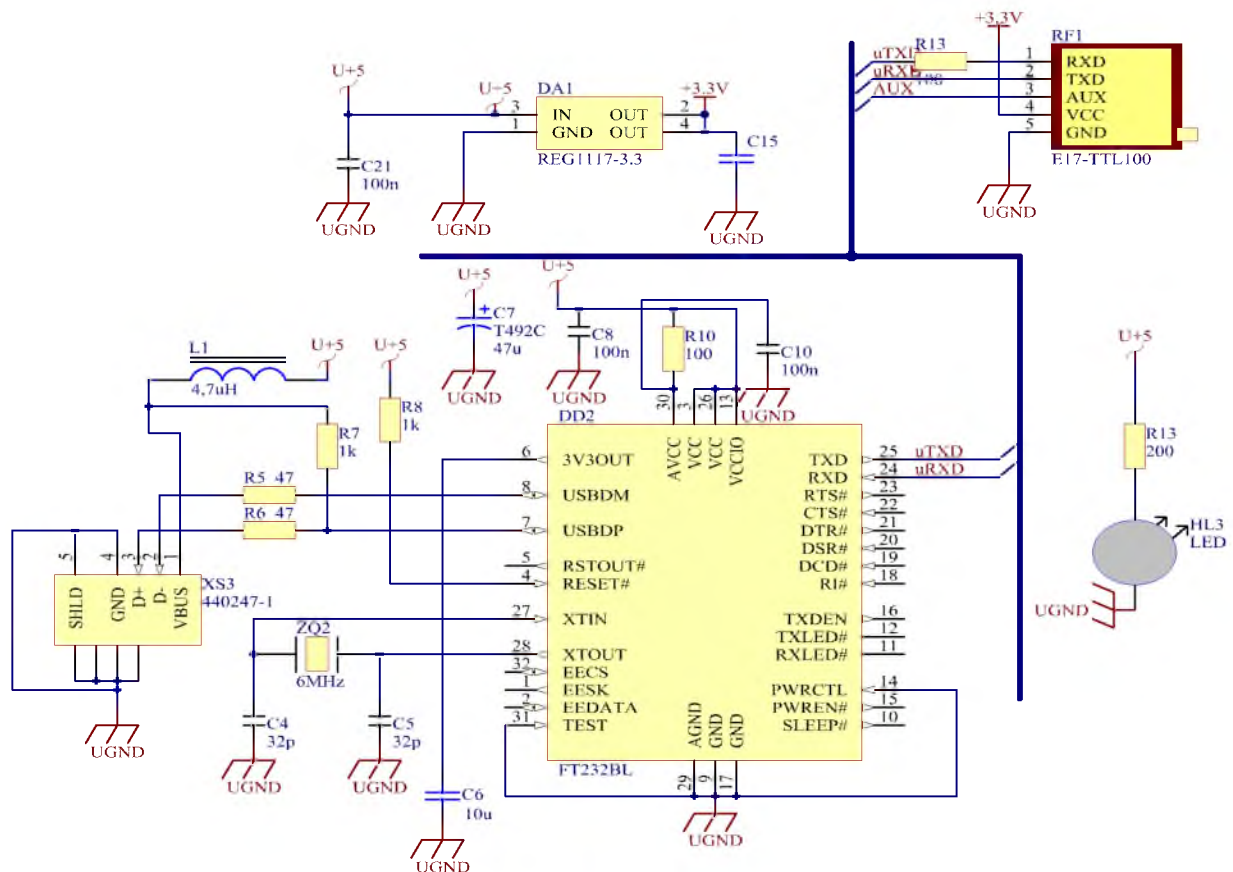


Рисунок 6 - Схема электрическая принципиальная беспроводного модуля приемопередатчика для персонального компьютера.

Преобразователь интерфейса USB в UART представлен в схеме элементом DD1, работающим на частоте 6 МГц, стабилизированной кварцевым резонатором ZQ2. Питание преобразователя осуществляется по линии USB интерфейса (5 вольт), а беспроводного приемо-передатчика RF1 – напряжением 3.3 В, которое получается посредством преобразователя DA1.

Внешний вид печатной платы устройства приведен на рисунке 7.

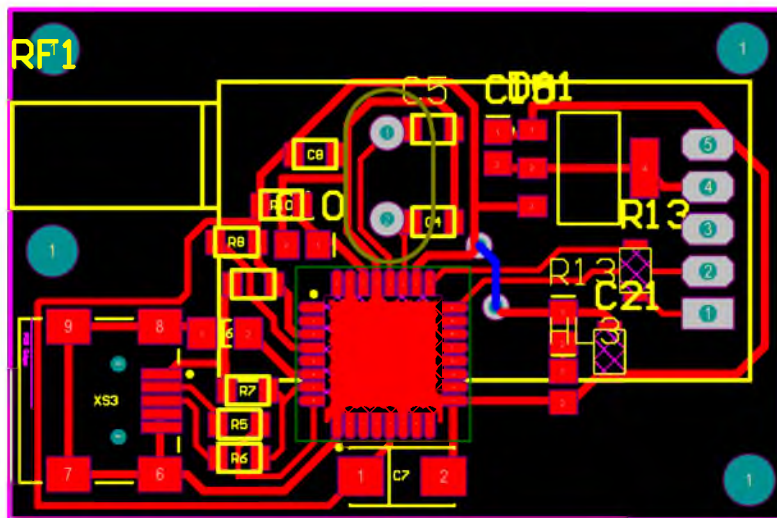


Рисунок 7 – Внешний вид печатной платы устройства

Фотография макета устройства приведена на рисунке 8.



Рисунок 8 – Фотография макета устройства

Модуль управления режимами работы бесколлекторного тягового привода (ведущая плата)

Устройство предназначено для управления скоростью вращения, направлением вращения, режимом торможения ведущего тягового привода и его активацией.

Структурная схема модуля управления режимами работы бесколлекторного тягового привода приведена на рисунке 9.

Основой устройства является микроконтроллер Atmega64 (блок 2). С

персональным компьютером по беспроводному интерфейсу обмен данными осуществляется посредством блока 1. Обмен данными с ведомыми устройствами (модулем управления приводом поворота, модулем ультразвуковой навигации) осуществляется посредством интерфейса RS485 при помощи блока драйвера интерфейса (блок 5). Управление скоростью вращения тягового привода производится посредством резистивного цифро-аналогового R2R преобразователя (блок 4). Управление включением, торможением и направлением вращения двигателя осуществляется через оптопару гальванической развязки (блок 7). Световая и звуковая сигнализация о режимах и аварийных состояниях осуществляется посредством блока 7.

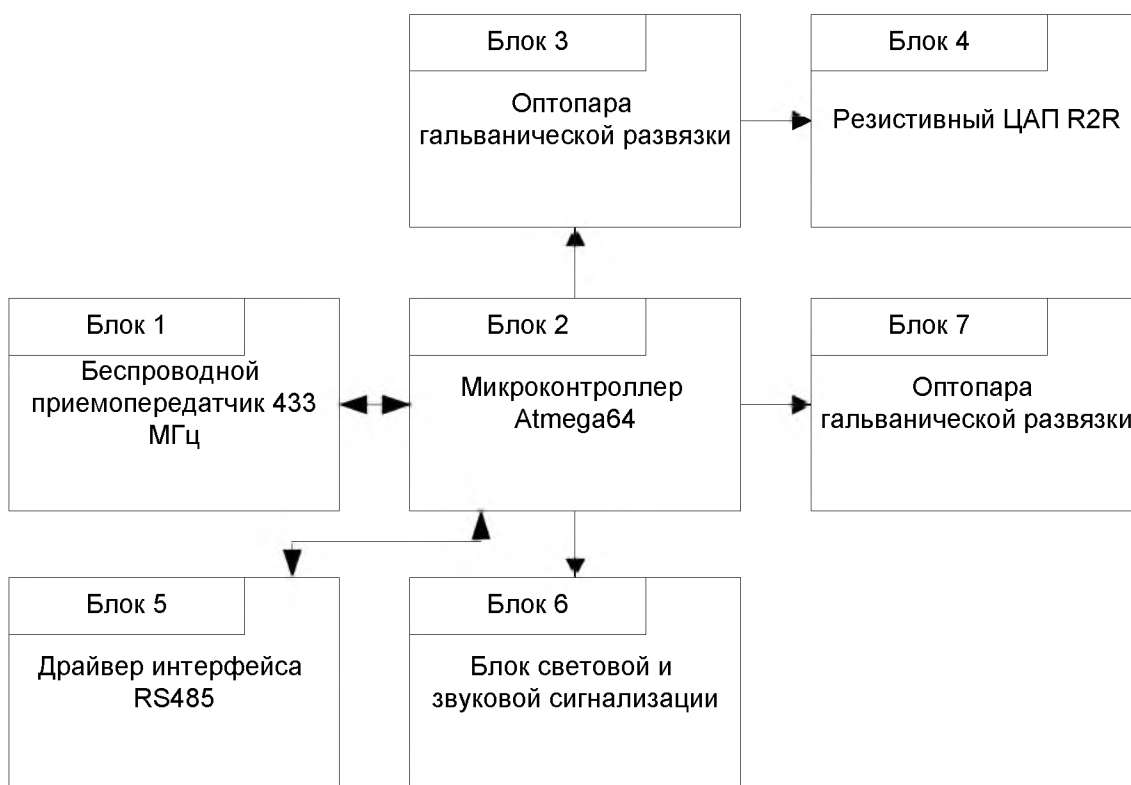


Рисунок 9 - Структурная схема модуля управления режимами работы бесколлекторного тягового привода

Схема электрическая принципиальная модуля управления режимами работы бесколлекторного тягового привода представлена на рисунке 10.

Микроконтроллер Atmega 64 представлен в схеме элементом DD1. Рабочая частота стабилизируется кварцевым резонатором ZQ2 (14.7456

МГц). Резистивный цифро-аналоговый преобразователь построен из набора резисторов R13R21R12R20R11R19R10R18R9R17R8R16R7R15R16.

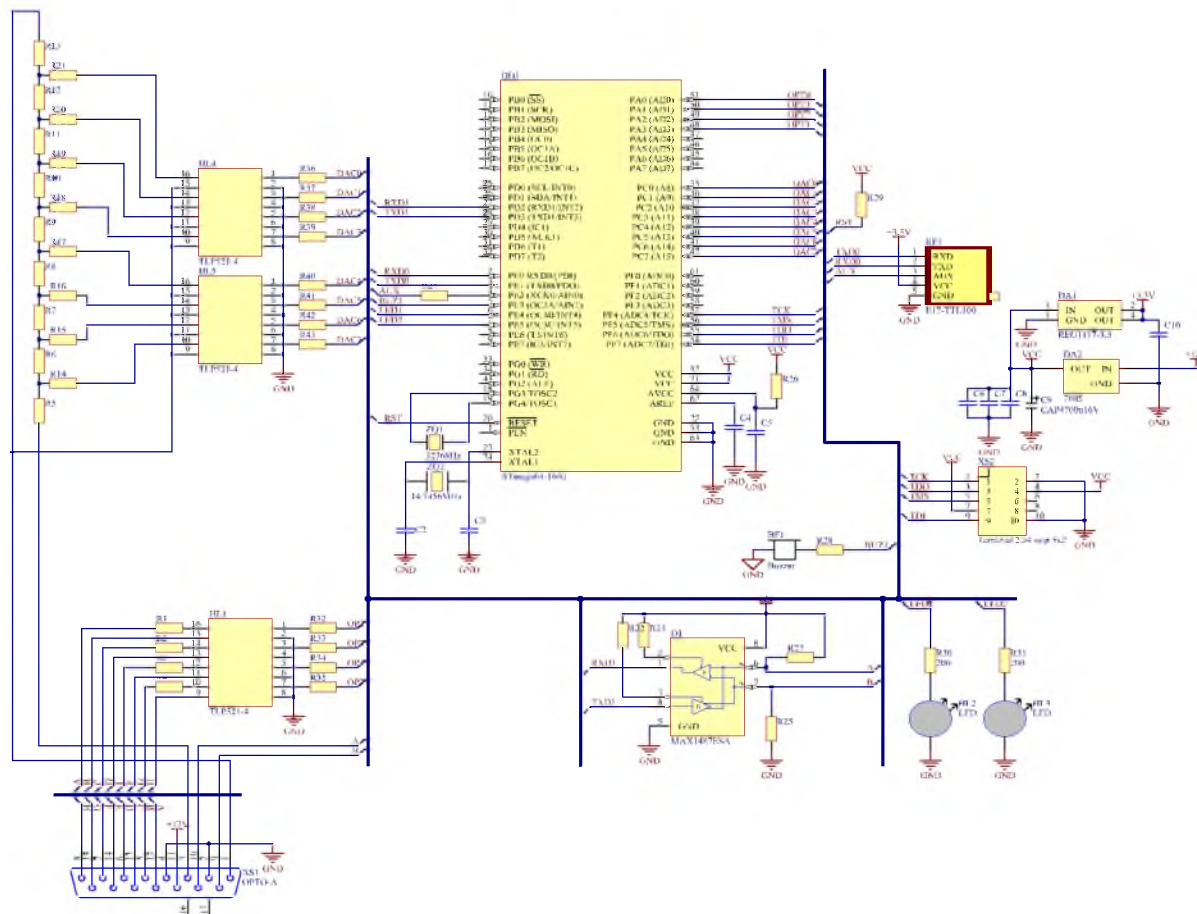


Рисунок 10 - Схема электрическая принципиальная модуля управления режимами работы бесколлекторного тягового привода.

Гальваническая развязка между ЦАП и микроконтроллером осуществляется посредством оптопар HL4 и HL5. Шина управления режимами работы двигателя гальванически развязана от микроконтроллера оптопарой HL1. Драйвер интерфейса RS485 MAX13487 представлен элементом D1. Беспроводной приемопередатчик E17-TTL100 представлен элементом RF1. Программирование устройства осуществляется через интерфейс JTAG посредством разъема XS2 программатором AVRJTAGICE2. Звуковая сигнализация производится элементом BF1. Световая сигнализация производится элементами HL2, HL3. Питание платы осуществляется от внешнего стабилизированного источника питания

напряжением 12 В.

2.1.1 Трассировка печатной платы и сборка устройства

Внешний вид печатной платы устройства приведен на рисунке 11.

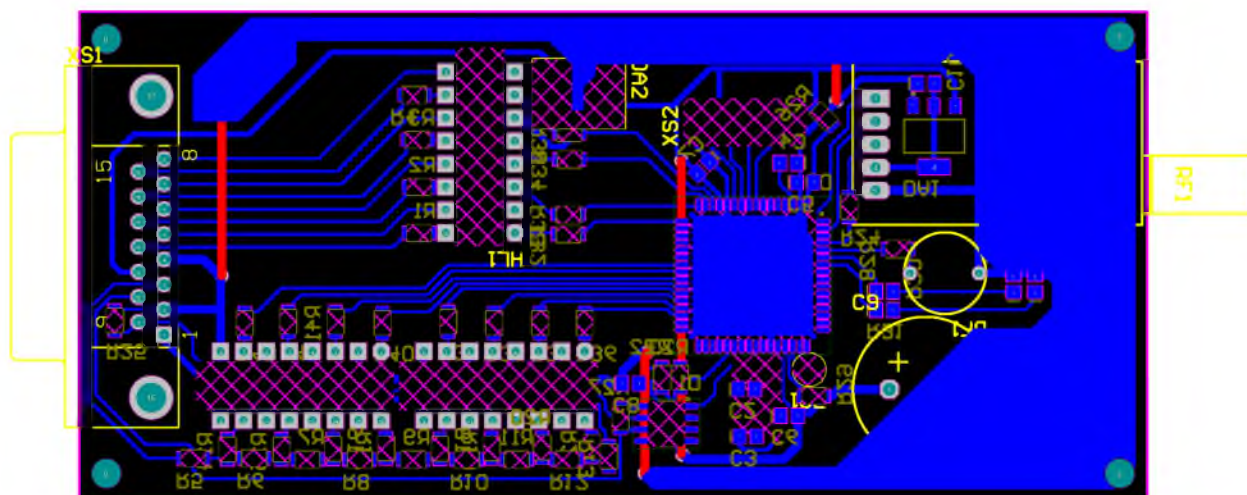


Рисунок 11 – Внешний вид печатной платы устройства

Трассировка печатной платы выполнена на двух слоях. Ее габаритные размеры составляют 53ммX118мм.

Фотография сборки устройства приведена на рисунке 12.

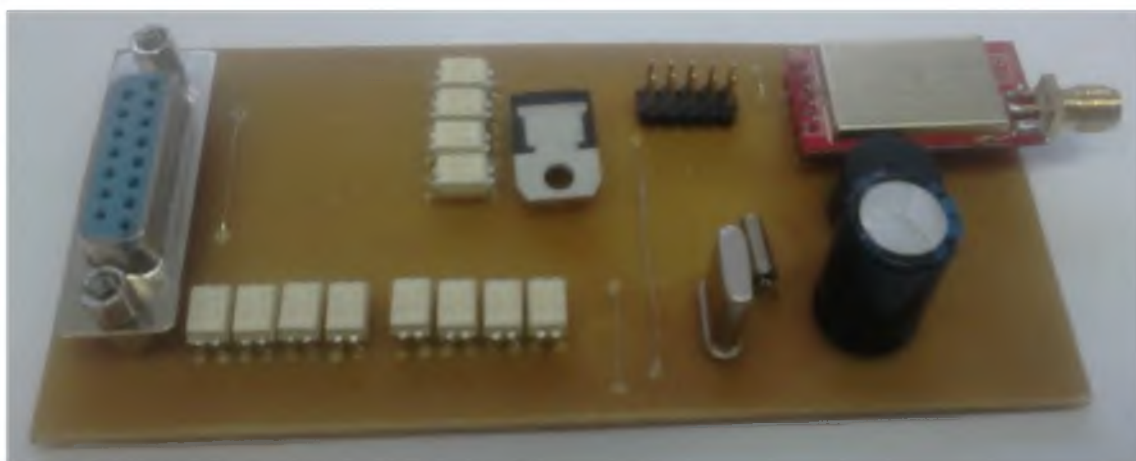


Рисунок 12 – Фотография сборки устройства

Модуль управления приводом поворота

Устройство предназначено для задания и поддержания угла поворота передних колес робота.

Структурная схема модуля управления приводом поворота приведена на рисунке 13.

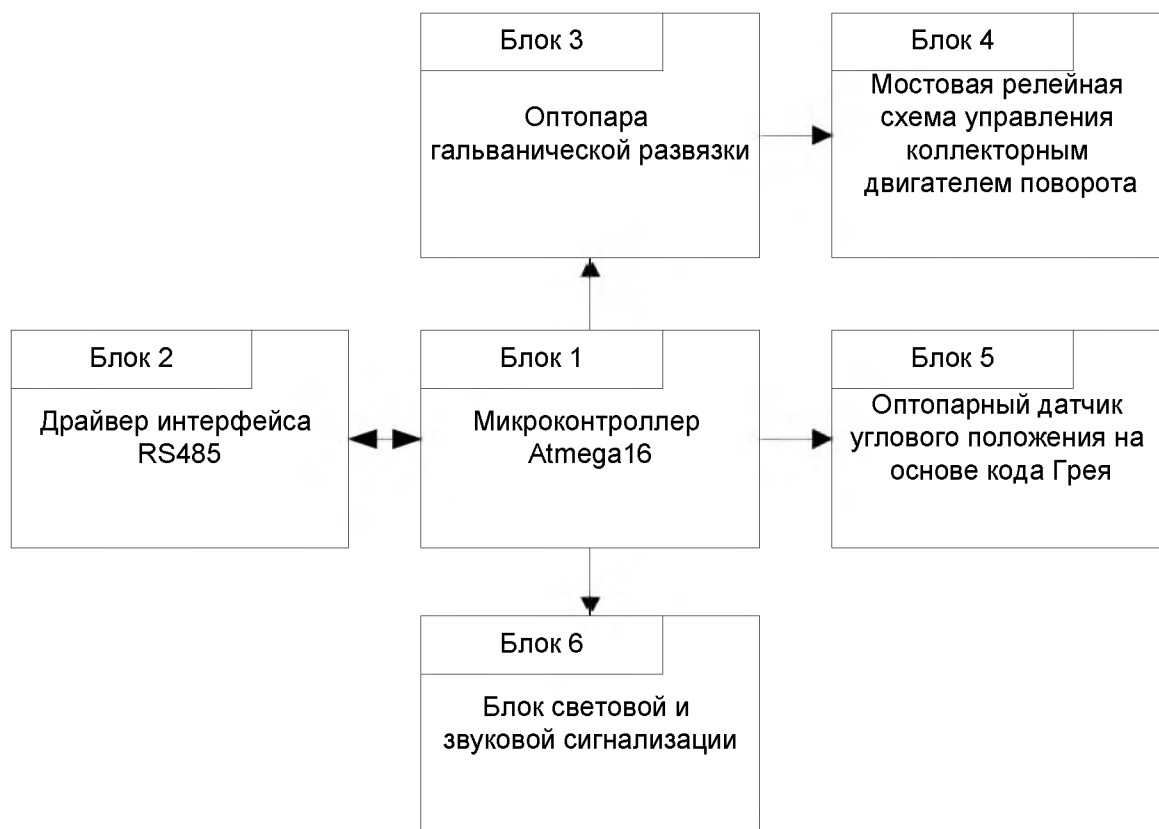
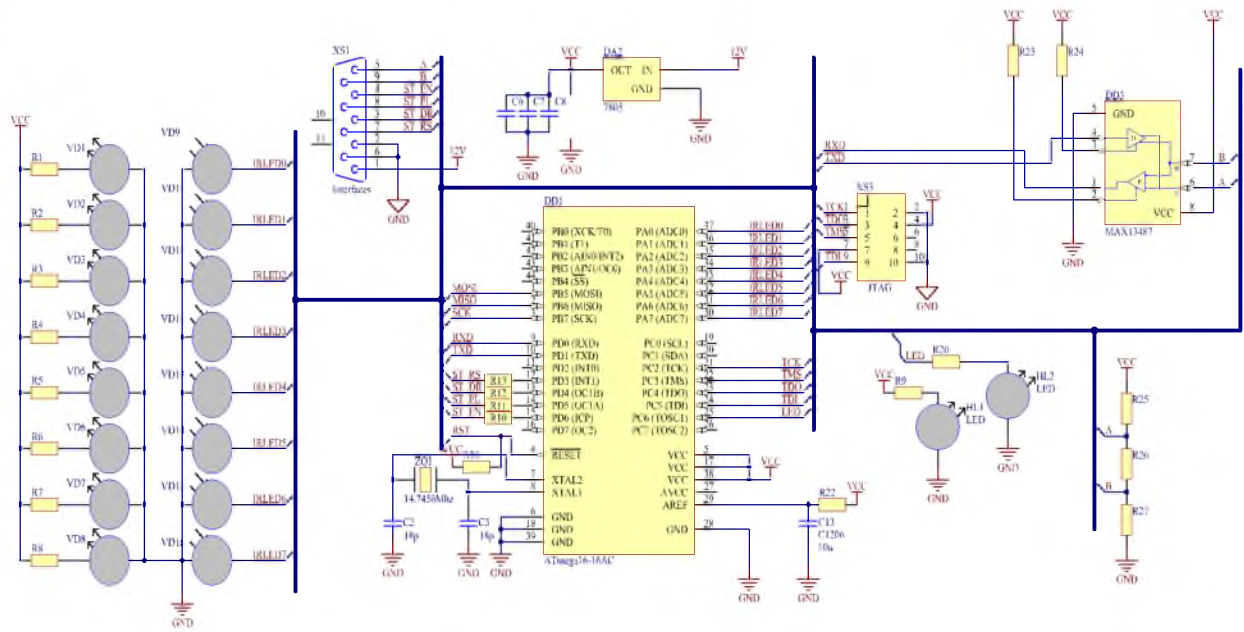


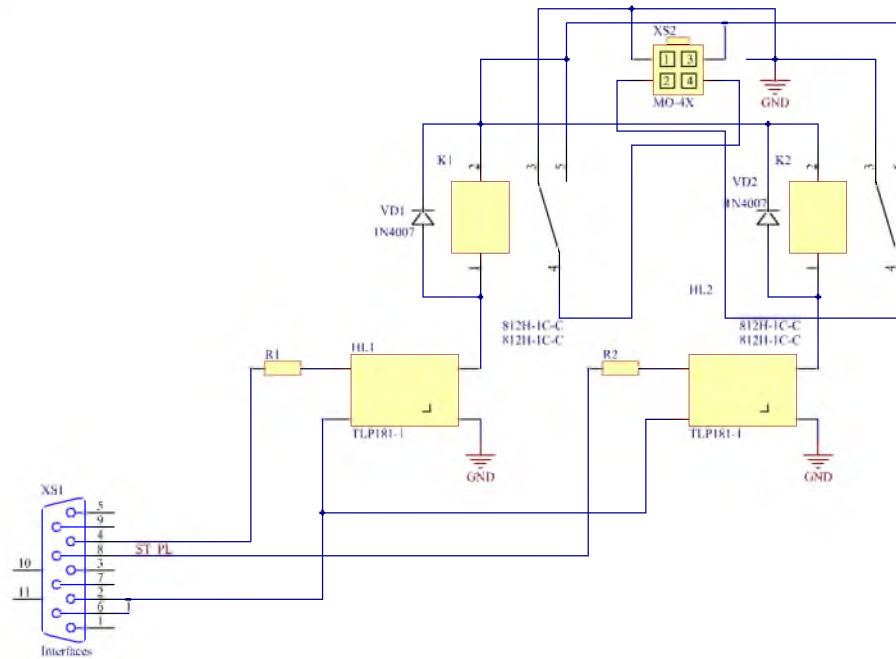
Рисунок 13 – Структурная схема модуля управления приводом поворота

За обработку и выполнение команд по заданию угла поворота отвечает микроконтроллер Atmega16 (блок 1). Обмен данными ведущей платой осуществляется по интерфейсу RS485 посредством драйвера интерфейса. (блок 2). Включение коллекторного двигателя и задание направление вращения осуществляется через мостовую схему управления (блок 4), коммутируемую микроконтроллером через оптопару гальванической развязки (блок 3). Идентификация текущего угла поворота осуществляется по коду Грея посредством оптопарного датчика углового положения (блок 5). Световая сигнализация о режимах и аварийных состояниях осуществляется посредством блока 6.

Схема электрическая принципиальная модуля управления приводом поворота приведена на рисунке 14.



(a)



(б)

Рисунок 14 – Схема электрическая принципиальная модуля управления приводом поворота (а- главный блок, б- блок реле)

Основой устройства является микроконтроллер Atmega16 DD1, рабочая частота которого стабилизирована кварцевым резонатором ZQ1. (14.7456 МГц). Считывание кода Грея осуществляется посредством набора оптопар, собранных на элементах VD1-VD16. Подключение к сети RS485

осуществляется посредством драйвера MAX13487 DD3 (схема а). Программирование устройства осуществляется через интерфейс JTAG посредством разъема XS3. Коммутация коллекторного мотора и задание направления вращения осуществляется посредством релейной мостовой схемы на элементах K1K2, гальванически развязанных с основной схемой посредством оптронов HL1HL3 (схема б).

Внешний вид печатной платы устройства приведен на рисунке 15.

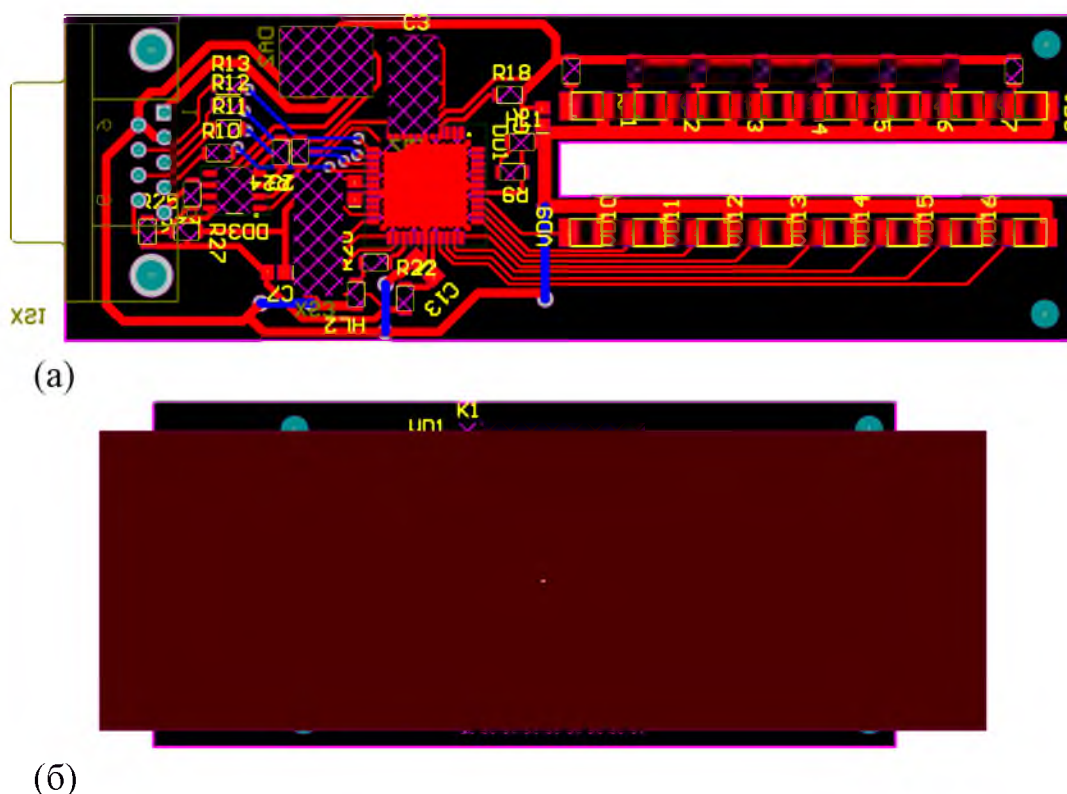


Рисунок 15 - Внешний вид печатной платы устройства
(а- главный блок, б- блок реле)

Трассировка печатных плат выполнена на двух слоях. Они имеют габаритные размеры 111ммх36мм и 84ммх39мм соответственно.

Фотография сборки устройства приведена на рисунке 16.

Модуль ультразвуковой навигации

Модуль ультразвуковой навигации предназначен для обнаружения Роботом препятствий и иных объектов, расстояния до них, а также для построения карты местности.

Структурная схема модуля ультразвуковой навигации приведена на рисунке 17.

За формирование управляющих сигналов и считывание информации об окружающих препятствиях с датчиков расстояния (блок 3, блок 4, блок 5) отвечает микроконтроллер и т.д. Atmega16 (блок 1). Связь с ведущей платой осуществляется посредством интерфейса RS485 через драйвер (блок 2). Световая и звуковая сигнализация о режимах и аварийных состояниях осуществляется посредством блока 6.

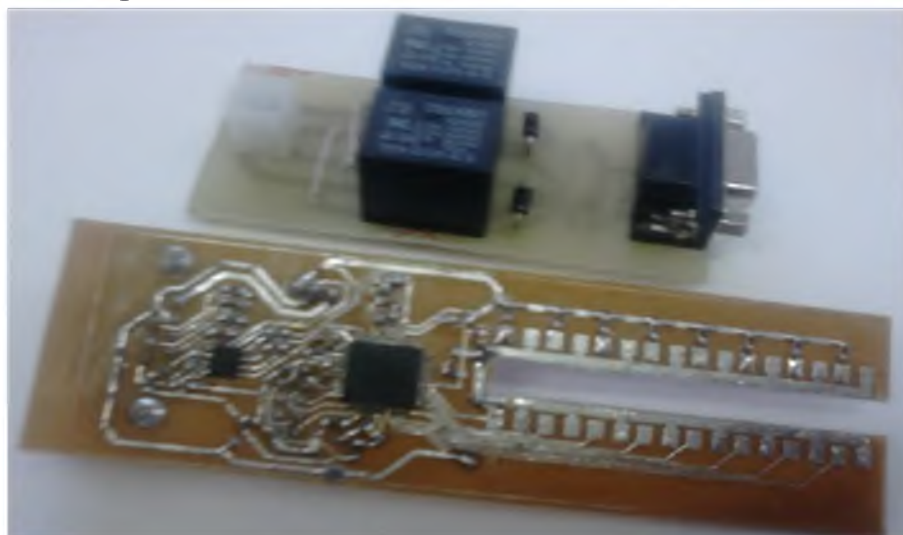


Рисунок 16. – Фотография сборки.

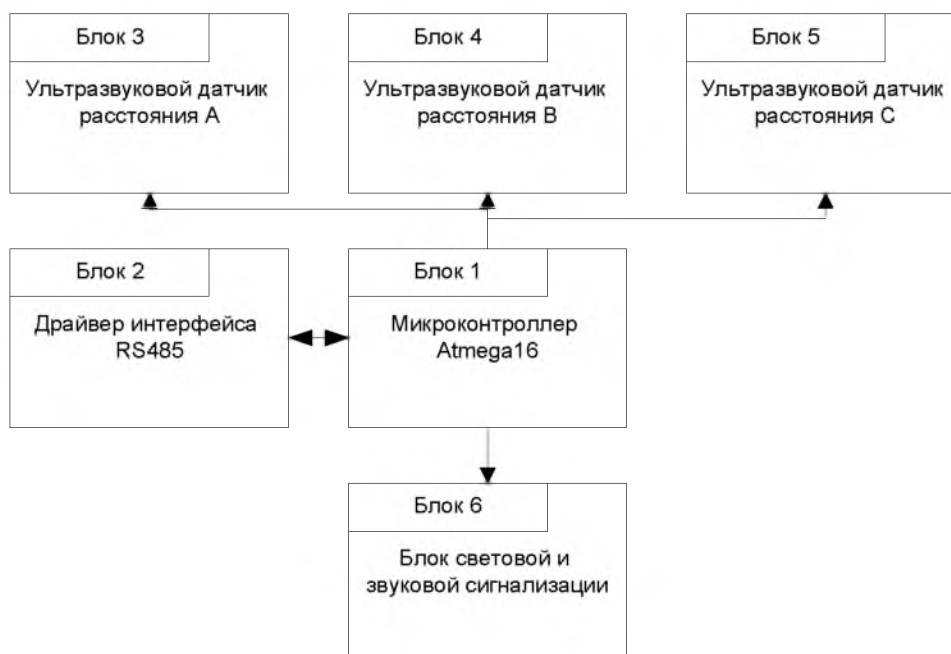


Рисунок 17 – Структурная схема модуля ультразвуковой навигации

Схема электрическая принципиальная модуля ультразвуковой навигации приведена на рисунке 18.

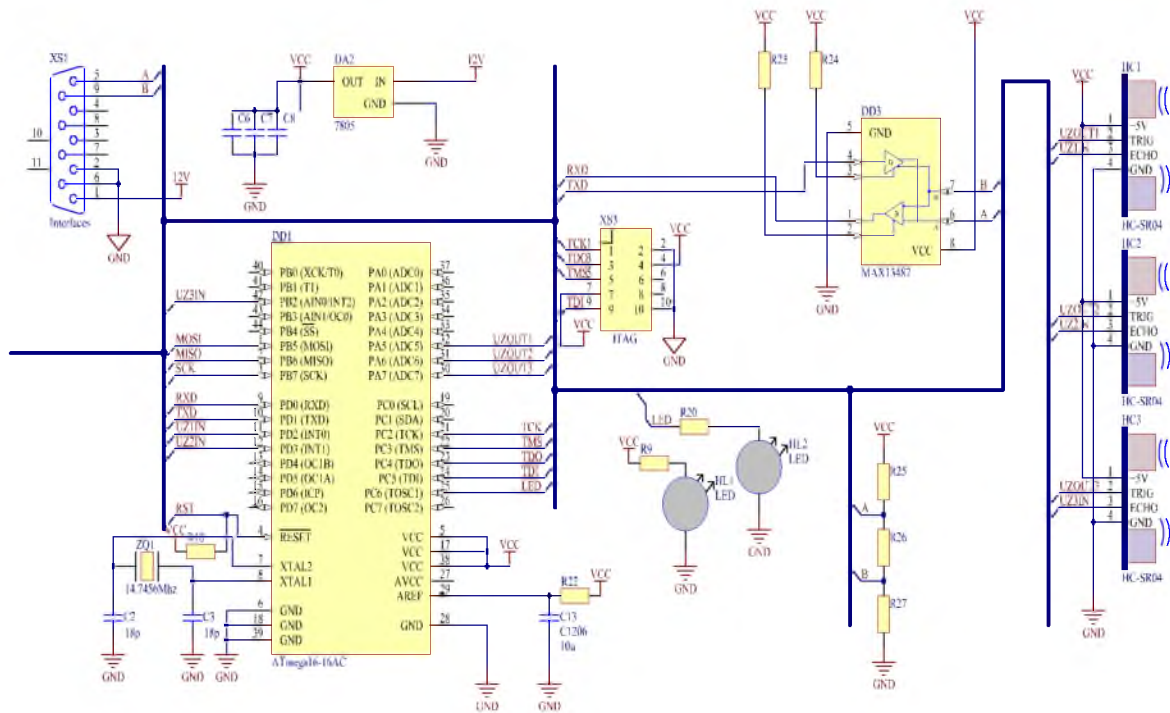


Рисунок 18. – Схема электрическая принципиальная модуля ультразвуковой навигации

Микроконтроллер в схеме представлен элементом DD1, работающий на частоте 14.7456 МГц (стабилизирована кварцевым резонатором ZQ1.)Обследование местности осуществляется посредством 3-х ультразвуковых датчиков расстояния HC1HC2HC3. Программирование устройства осуществляется по интерфейсу JTAG через разъем XS3.

Внешний вид печатной платы приведен на рисунке 19.

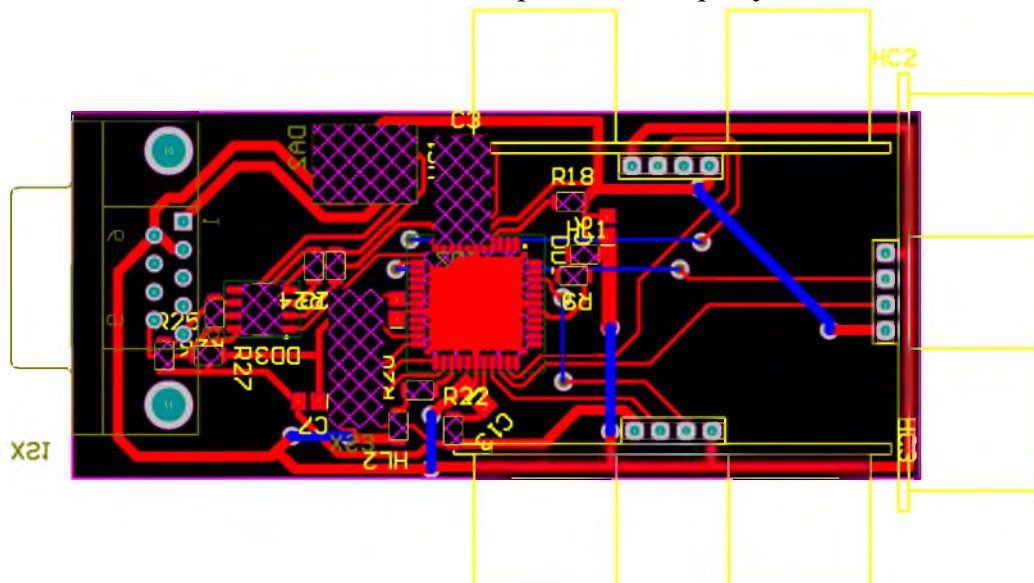


Рисунок 19. – Внешний вид печатной платы.

Трассировка печатной платы выполнена на двух слоях. Плата имеет габаритные размеры 84ммх36мм.

Фотография сборки устройства приведена на рисунке 20.

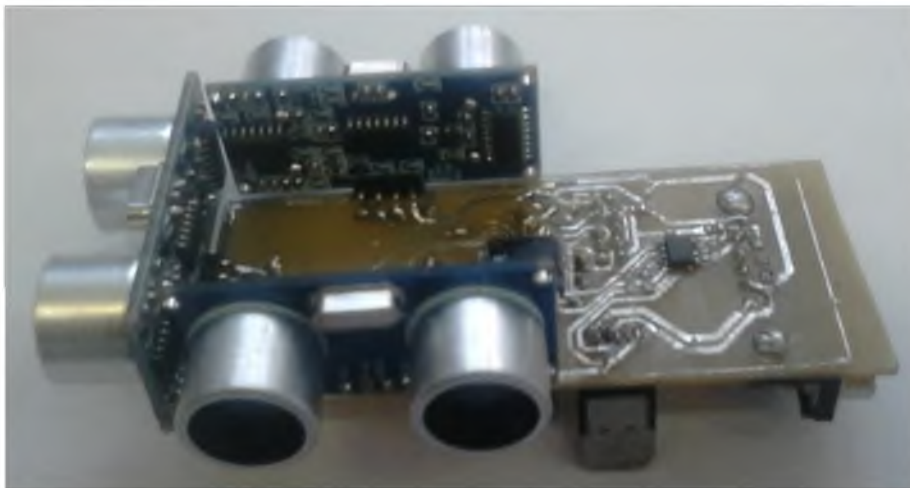


Рисунок 20 – Фотография сборки устройства.

4. СБОРКА МОБИЛЬНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

В соответствии с описанными выше технологиями были изготовлены механические узлы и система управления робототехническим устройством. Мобильный робот в сборе представлен на рис. 21.



Рисунок 21. – Мобильный робот BelSU-bot .

Изготовленный мобильный робот имеет следующие характеристики:

Масса, кг	53
Мощность ходового электродвигателя, кВт	1
Максимальная скорость, км/час	20
Габаритные размеры, мм	1350x620x510

Разработанное мобильное робототехническое устройство может использоваться в качестве бульдозера, погрузчика и т.д. в зависимости от установленного рабочего органа. Применение разработанного мобильного робота в машиностроении, в строительстве, коммунальном хозяйстве и других отраслях народного хозяйства, при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и т.д., позволит повысить производительность труда и снизить влияние опасных и вредных факторов на оператора, повысив качество его жизни.

Список литературы:

1. Алейников А.Ю., Афонин А.Н. Мобильное робототехническое устройство с волнообразным принципом передвижения // Современные материалы, техника и технология: Матер. 4-й Междунар. научно-практической конф. – Курск, ЮЗГУ, 2014. – С. 44-48;
2. Бурман, З.И. Программное обеспечение матричных алгоритмов и метода конечных элементов в инженерных расчетах [Текст] / З.И. Бурман, Г.А. Артюхин, Б.Я. Зархин. - Москва: Машиностроение, 1988. – 256 с.
3. Евграфов В.В. Динамика и управление движением колесных роботов / Дисс. ... к.т.н., Москва: МГУ им. Ломоносова, 2008
4. Кампион Г., Бастен Ж., д'Андреа-Новель Б. Структурные свойства и классификация кинематических и динамических моделей колесных мобильных роботов // Нелинейная динамика, 2011, Т. 7, №4. - С. 733–769.
5. Митчелл, Э. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными [Текст] / Э. Митчелл. Р. Уэйт. Пер. с англ. - Москва: Мир, 1981. – 216 с.
6. Павловский В.Е., Шишканов Д.В. Исследование динамики и синтез управления колесными аппаратами с избыточной подвижностью, М., ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, препринт, №12, 2006.
7. Правила устройства электрических установок. 7 издание, 2003
8. Успенский И.Н., Мельников А.А. Проектирование подвески автомобиля. - М.: Машиностроение, 1976. – 168 с.
9. Юревич Е.И. Основы робототехники. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.