

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта
Высшая школа автоматизации и робототехники

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Разработка мобильного робота. Платформа

по дисциплине

«Конструирование модулей мехатронных устройств в робототехнике»

Выполнили

студенты гр. 3331506/70401

Водорезов Г.И.
Деникин В.А.
Засецкий В.С.
Кондратченко О.О.
Куликов М.М.
Кученов Д.С.
Ларионов А.А.
Ляховский М.В.
Соколов Д.А.
Ярмак С.О.

Руководитель

начальник отдела «Конструирование
робототехнических систем»

Прямыцын И.Б.

«__» _____ 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель курс. проекта,
нач. отдела «Конструирование
робототехнических систем»

(подпись, дата)

И.Б. Прямицын

Отв. исполнитель,
студент

(подпись, дата)

М.В. Ляховский
(концепция, отчет)

Исполнители:

студент

(подпись, дата)

Г.И. Водорезов
(корпус, сборка)

студент

(подпись, дата)

В.А. Деникин
(компоновка)

студент

(подпись, дата)

В.С. Засецкий
(электрическая схема)

студент

(подпись, дата)

О.О. Кондратченко
(провода)

студент

(подпись, дата)

М.М. Куликов
(колесо)

студент

(подпись, дата)

Д.С. Кученов
(колесо)

студент

(подпись, дата)

А.А. Ларионов
(расчеты, привод)

студент

(подпись, дата)

Д.А. Соколов
(компоновка, сборка)

студент

(подпись, дата)

С.О. Ярмак
(отчет)

СОДЕРЖАНИЕ

1 Техническое задание	4
2 Анализ технических требований.....	5
3 Расчет средства передвижения платформы	6
3.1 Определение требований к характеристикам привода.....	6
3.2 Подбор составных частей привода	10
4 Подбор электронных компонентов.....	15
4.1 Список электронных компонентов	15
4.2 Назначение электронных компонентов.....	15
4.3 Расчет времени работы цепи	17
5 Заключение.....	19
Список использованных источников	20
Приложение А Сборочный чертеж платформы.....	21
Приложение Б Спецификация на сборочный чертеж платформы.....	22
Приложение В Чертеж основания подшипникового узла	23
Приложение Г Принципиальная электрическая схема	24

1 Техническое задание

Разработать подвижную платформу мобильного робота для участия в кубке РТК.

Основные требования, предъявляемые к платформе:

- габаритные размеры Д×Ш×В: 350×400×400 мм;
- масса платформы: не более 6,5 кг;
- масса мобильного робота: не более 10 кг;
- тип средства передвижения: колесный;
- тип приводов: независимый;
- тип питания: автономное;
- тип управления: телеуправление (камеры, беспроводная связь);
- дополнительно: наличие крепления для манипулятора.

2 Анализ технических требований

Существующие мобильные роботы используют следующие типы средств передвижения или шасси: колесные, гусеничные, комбинированные, самоорганизующиеся и др. [1]. Целью создания робота является участие в кубке РТК, что подразумевает различные условия эксплуатации, начиная от движения по каменистой поверхности и заканчивая падениями с высоты. Наиболее широкий выбор применений и простоту использования обеспечивает колесное шасси. Выберем для платформы стандартную колесную формулу 4×4, т.е. 4 колеса, из которых все ведущие.

Габаритные размеры и масса платформы ограничены техническими требованиями, однако предел стоимости и изготовления деталей и закупки компонентов не указывается. Это позволяет использовать любые доступные материалы и компоненты. Например, прочный и относительно легкий алюминий; компактные приводы Maxon; малогабаритные современные аккумуляторы большой емкости.

Направленность соревнований на быстрое прототипирование и внедрение рабочих решений дает возможность использовать популярные инструменты, такие как Raspberry Pi/Arduino/STM, а также доступные на рынке преобразователи напряжения и платы расширения. Большое количество готовых библиотек и схем соединения сокращает время подготовки к участию в соревновании, различные встроенные интерфейсы связи обеспечивают подключение широкого спектра устройств, от простых датчиков до камер видеонаблюдения.

3 Расчет средства передвижения платформы

3.1 Определение требований к характеристикам привода

Необходимо определить следующие требования к характеристикам привода:

- частота вращения выходного вала, об/мин;
- крутящий момент на выходном валу, Н·м.

Зададимся диаметром колес $d = 130$ мм и номинальной скоростью передвижения платформы $v = 0,3$ м/с.

Рассмотрим равномерное качение ведущего колеса по горизонтальной опорной поверхности и проведем расчеты исходя из теории автомобиля и автомобильного колеса. Расчетная схема приведена на рисунке 3.1.

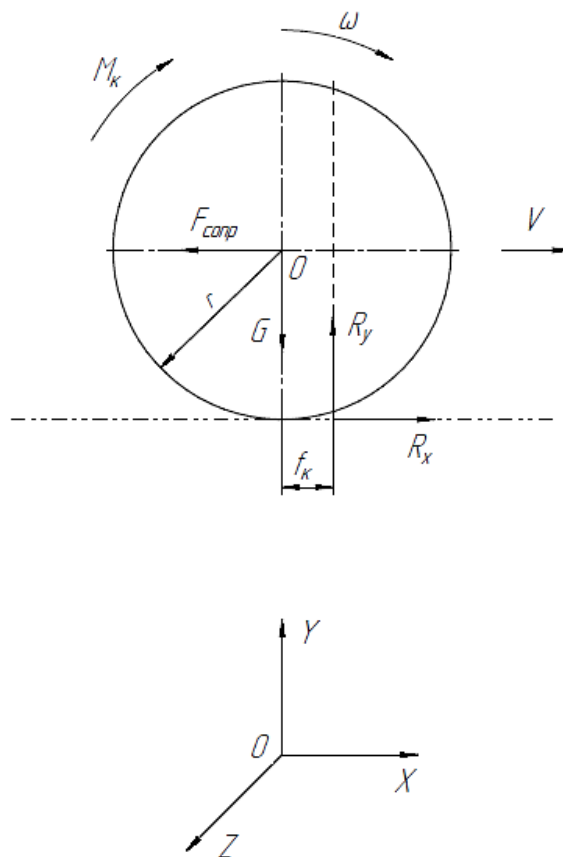


Рисунок 3.1 – Расчетная схема колеса

Запишем второй закон Ньютона для поступательного и вращательного движения в векторной форме

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F}_{\text{сопр}} + \vec{G} + \vec{R}_y + \vec{R}_x, \quad (3.1)$$

$$J \cdot \vec{\varepsilon} = \vec{M}_k + \vec{R}_y \cdot \vec{f}_k + \vec{R}_x \cdot \vec{r}, \quad (3.2)$$

где a – линейное ускорение, м/с²;

ε – угловое ускорение, 1/с²;

m – масса робота, приходящаяся на колесо, кг;

J – момент инерции колеса, кг·м²;

G – сила тяжести, приходящаяся на колесо, Н;

$F_{\text{сопр}}$ – продольная сила колеса, Н;

R_x – продольная реакция опорной поверхности, Н;

R_y – нормальная реакция опорной поверхности, Н;

M_k – крутящий момент колеса, Н·м;

f_k – коэффициент сопротивления качению колеса, м;

r – радиус колеса, м.

С учетом равномерного движения ($a = 0$ и $\varepsilon = 0$) в проекциях на оси системы координат получим

$$OX: 0 = -F_{\text{сопр}} + R_x \rightarrow R_x = F_{\text{сопр}}, \quad (3.3)$$

$$OY: 0 = -G + R_y \rightarrow R_y = G, \quad (3.4)$$

$$OZ: 0 = -M_k + R_y \cdot f_k + R_x \cdot r \rightarrow M_k = R_y \cdot f_k + R_x \cdot r. \quad (3.5)$$

Оценить коэффициент сопротивления качению с ростом скорости можно по следующей формуле [2]

$$f_k = f_0 \cdot (1 + A_f \cdot v^2), \quad (3.6)$$

где f_0 – коэффициент сопротивления качению при около нулевой скорости, м;

A_f – коэффициент влияния скорости, м⁻².

Таблицы значений данных коэффициентов для различных видов опорных поверхностей приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Значения коэффициента f_0 [2]

Тип покрытия	Состояние покрытия	Диапазон значений
Асфальтобетонная дорога	Хорошее	0,008...0,015
	Удовлетворительное	0,015...0,030
Гравий укатанный	—	0,020...0,025
Грунтовая дорога	Сухое	0,025...0,035

Таблица 3.2 – Значения коэффициента A_f [2]

Тип автомобиля	Размерность скорости	
	км/ч	м/с
Легковой	$(4...5) \cdot 10^{-5}$	$(5,1...6,5) \cdot 10^{-4}$
Грузовой	$(2...3) \cdot 10^{-5}$	$(2,6...3,9) \cdot 10^{-4}$

Выберем значения коэффициентов для наихудшего случая, т.е. $f_0 = 0,035$ м и $A_f = 6,5 \cdot 10^{-4}$ м⁻². Тогда коэффициент сопротивления качению из (3.6) равен

$$f_k = 0,035 \text{ м} \cdot (1 + 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2} \cdot (0,3 \text{ м})^2) = 0,035 \text{ м}.$$

Предельное значение продольной реакции опорной поверхности определяется по формуле

$$R_{x\max} = \varphi \cdot G, \quad (3.7)$$

где φ – коэффициент сцепления колеса.

Коэффициент сцепления зависит от многих факторов, среди которых конструкция колеса и шины, скорость движения и состояние опорной поверхности. Типичные значения для различных видов опорных поверхностей приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения коэффициента φ [3]

Тип покрытия	Состояние покрытия	Диапазон значений
Асфальтобетонная дорога	Сухое	0,7...0,8
	Влажное	0,45...0,55
Грунтовая дорога	Сухое	0,4...0,6
	Влажное	0,2...0,45
Песок	Сухое	0,2...0,4
	Влажное	0,35...0,5

Поступим аналогично и выберем значение коэффициент равным максимальному, т.е. $\varphi = 0,8$. Тогда значение продольной реакции из (3.7) равно

$$R_{x\max} = 0,8 \cdot G = 0,8 \cdot m \cdot g = 0,8 \cdot \frac{10 \text{ кг}}{4} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} =$$

$$= 19,6 \text{ Н.}$$

Примем $R_x = R_{x\max} = 19,6 \text{ Н.}$

Поставим найденные значения в выражение (3.5) и получим значение крутящего момента

$$M_k = R_y \cdot f_k + R_x \cdot r = G \cdot f_k + R_{x\max} \cdot \frac{d}{2} =$$

$$= m \cdot g \cdot f_k + R_{x\max} \cdot \frac{d}{2} =$$

$$= \frac{10 \text{ кг}}{4} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,035 \text{ м} + 19,6 \text{ Н} \cdot \frac{0,13 \text{ м}}{2} =$$

$$= 2,14 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Примем коэффициент запаса $S = 1,3$ и с его учетом получим расчетный крутящий момент на выходном валу

$$M_{\text{расч}} = S \cdot M_k = 1,3 \cdot 2,14 \text{ Н} \cdot \text{м} = 2,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Т.к. колесо совершает вращательное движения вокруг мгновенного центра вращения (точки контакта с опорной поверхностью), то угловую скорость можно найти следующим образом

$$\omega = \frac{v}{r}. \quad (3.8)$$

Частота вращения колеса определяется по формуле

$$n = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot d} = \frac{30 \cdot \omega}{\pi}. \quad (3.9)$$

Подставим известные значения в (3.8), (3.9) и найдем угловую скорость и расчетную частоту вращения выходного вала

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2v}{d} = \frac{2 \cdot 0,3 \text{ м/с}}{0,13 \text{ м}} = 4,6 \text{ 1/с},$$

$$n_{\text{расч}} = n = \frac{30 \cdot 4,6 \text{ 1/с}}{3,14} = 44 \text{ об/мин.}$$

Развиваемая мощность, как произведение крутящего момента на угловую скорость, равна

$$P = M_{\text{расч}} \cdot \omega = 2,8 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot 4,6 \frac{1}{\text{с}} = 13 \text{ Вт.}$$

Таким образом, к характеристикам привода предъявляются требования, приведенные в таблице 3.4. Они являются основанием для последующего выбора составных частей привода.

Таблица 3.4 – Требования к характеристикам привода

Характеристика	Требования
Частота вращения выходного вала	44 об/мин
Крутящий момент на выходном валу	2,8 Н·м

3.2 Подбор составных частей привода

Выберем составные части привода согласно руководству, приведенному в каталоге Махон [4, стр. 64]. Выбор модульной системы начинается с редуктора.

Так как особых требований к типу двигателя в техническом задании не предъявляется, рассмотрим более простые с точки зрения устройства и управления коллекторные двигатели постоянного тока и соответствующие им редукторы.

В соответствии с требованиями на характеристики привода (табл. 3.4) и дополнительным критерием выбора в виде минимальных размеров подходит редуктор GPX 22 UP. Возможными конфигурациями редуктора с учетом не-точностей рассчитанных параметров являются варианты с тремя и четырьмя ступенями. Руководствуясь более короткой конструкцией и минимизацией крутящего момента двигателя, выберем версию с тремя ступенями и высоким передаточным числом. Характеристики редуктора приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Характеристики редуктора GPX 22 UP

Характеристика	Значение
Число ступеней	3
Передаточное число	150
Максимальный КПД	90 %
Максимальная длительно допустимая входная частота вращения	8000 об/мин
Максимальный длительно допустимый момент	4,3 Н·м
Максимальная длительно передаваемая мощность	20 Вт
Длина	42 мм
Масса	87 г
Наличие подшипника на выходном валу	Шарикоподшипник

Рассчитаем частоту вращения и момент, приведенные к валу двигателя по следующим формулам

$$n_{\text{дв}} = n_{\text{расч}} \cdot i, \quad (3.10)$$

$$M_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{расч}}}{i \cdot \mu}, \quad (3.11)$$

где i – передаточное число редуктора;

μ – КПД редуктора.

Подставив значения в формулы (3.10) и (3.11), получим

$$n_{\text{дв}} = 44 \frac{\text{об}}{\text{мин}} \cdot 150 = 6600 \text{ об/мин},$$
$$M_{\text{дв}} = \frac{2,8 \text{ Н} \cdot \text{м}}{150 \cdot 0,90} = 0,022 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Данным редуктором в соответствии с модульной системой комплектуются несколько моделей двигателей. Выберем двигатель с графитовыми щетками, т.к. он более пригоден для работы с переменной нагрузкой. Модель DCX 22 L удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям. Следующий этап – выбор обмотки, т.е. номинального напряжения двигателя.

Желаемая частота вращения при холостом ходе рассчитывается по механической характеристике

$$n_{\text{теор}} = n_{\text{дв}} + \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M_{\text{дв}}, \quad (3.12)$$

где $\Delta n / \Delta M$ – средняя крутизна механической характеристики модели, (об/мин)/Н·м.

Средняя крутизна механической характеристики двигателя DCX 22 L равна $\Delta n / \Delta M = 33 \cdot 10^3$ (об/мин)/Н·м. Тогда

$$n_{\text{теор}} = 6600 \frac{\text{об}}{\text{мин}} + 33 \cdot 10^3 \frac{\text{об/мин}}{\text{Н} \cdot \text{м}} \cdot 0,022 \text{ Н} \cdot \text{м} =$$
$$= 7330 \text{ об/мин}.$$

Зададимся стандартным напряжением источников питания 24 В. Чтобы обеспечить желаемую частоту вращения при максимальном возможном напряжении на двигателе, значение скоростной постоянной должно превышать минимальное значение.

Минимальное значение скоростной постоянной рассчитывается по формуле

$$k_{\text{теор}} = \frac{n_{\text{теор}}}{U}, \quad (3.13)$$

где U – максимальное возможное напряжение на двигателе, В.

После подстановки значений в (3.13) получим

$$k_{\text{теор}} = \frac{7330 \text{ об/мин}}{24 \text{ В}} = 305 \text{ (об/мин)/В.}$$

Превышение этого значения, характеризующее резерв регулирования скорости, обеспечивают конфигурации с номинальным напряжением 9/12/18 В. Выберем конфигурацию с наибольшим значением длительно допустимого момента, т.е. DCX 22 L 18 В.

Рассчитаем ток, соответствующий значению крутящего момента на двигателе, по формуле

$$I_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{дв}}}{k_m} + I_0, \quad (3.14)$$

где k_m – моментная постоянная двигателя, (Н·м)/А;

I_0 – ток холостого хода, А.

Моментная постоянная двигателя DCX 22 L 18 В равна $k_m = 14,6 \cdot 10^{-3}$ (Н·м)/А. Подставим значения в (3.14), получим

$$I_{\text{дв}} = \frac{0,022 \text{ Н} \cdot \text{м}}{14,6 \cdot 10^{-3} \text{ (Н} \cdot \text{м)/А}} + 0,0546 \text{ А} = 1,56 \text{ А.}$$

Характеристики двигателя приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Характеристики двигателя DCX 22 L 18 В

Характеристика	Значение
Тип	Коллекторный, графитовые щетки
Номинальное напряжение	18 В
Номинальная скорость	10800 об/мин
Номинальный момент	32,2 Н·м
Номинальный ток	2,26 А
Максимальный КПД	91 %
Длина	47,2 мм
Вес	95 г

Рабочая точка двигателя, рассчитанная исходя из требований (табл. 3.4), приведена на рисунке 3.2. Она лежит в области с длительным режимом работы привода.

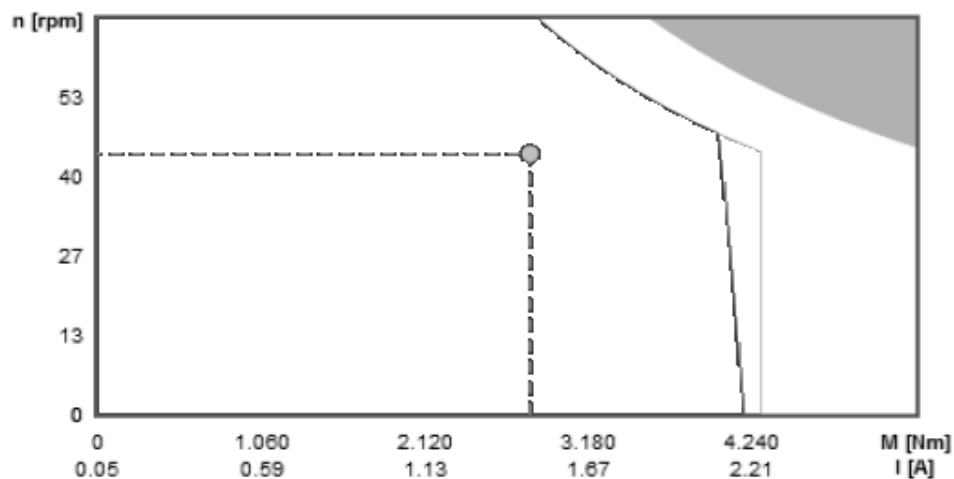


Рисунок 3.2 – Рабочая точка двигателя

Далее выберем регулятор и датчик скорости двигателя – контроллер EPOS4 Compact 50/5 CAN с длительно допустимым входным током 5 А и инкрементальный дифференциальный энкодер ENX 10 EASY 512 имп/об.

Итоговый состав привода приведен в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Привод

Составная часть	Наименование
Редуктор	GPX 22 UP
Двигатель	DCX 22 L 18 B
Датчик скорости	ENX 10 EASY 512 имп/об
Регулятор скорости	EPOS4 Compact 50/5 CAN

4 Подбор электронных компонентов

4.1 Список электронных компонентов

Платформа включает в себя следующие электронные компоненты:

1. Одноплатный компьютер Raspberry Pi Zero W
2. Микроконтроллер STM32F103C8T6
3. Драйвер двигателя EPOS4 Compact 50-5 CAN 4 шт.
4. Понижающий преобразователь XL4016 2 шт.
5. Понижающий преобразователь LM2596 2 шт.
6. Приемник CAN 4 шт.
7. Камера Innomaker OV9281

4.2 Назначение электронных компонентов

Для простоты управления двигателями постоянного тока можно использовать готовые платы драйверов. По одному на каждый двигатель. Номинальный ток одного двигателя равен 2,3 А, номинальное напряжение – 18 В. Общее потребление 4 двигателей равно 9,2 А. При подключении аккумулятора напрямую к драйверам двигателей мощность будет падать пропорционально разряжению аккумулятора. Поэтому рационально использовать понижающие преобразователи. Их нужно выбирать с точки зрения возможности поддержания номинального тока в цепи в течение продолжительного времени. Были выбраны понижающие преобразователи XL4016 в количестве 2 шт. Характеристики представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Характеристики понижающего преобразователя XL4016.

Характеристика	Значение
Входное напряжение	5–40 В
Выходное напряжение	1,2–35В
Максимальный выходной ток	9 А

Сервоприводы манипулятора управляются ШИМ сигналом, для этого выбрана плата ШИМ контроллера PCA9685. Она имеет 16 независимых каналов для вывода ШИМ сигнала и удобные 3-х пиновые разъемы для подключения сервоприводов. Сервоприводы потребляют максимум 1 А, всего их 4, значит общее потребление 4 А. Потребление всей силовой цепи примерно 13 А. Поэтому понижающие преобразователи XL4016 были выбраны в количестве 2 штук.

Архитектура управляющих модулей состоит из верхнего и нижнего уровней. На верхнем уровне одноплатный компьютер Raspberry Pi Zero W. Он занимается обменом данными по каналу связи Wi-Fi с внешним устройством – пультом, через которое пользователь осуществляет телеуправлением платформой.

Для обратной связи установлена камера, которая транслирует изображение на пульт в реальном времени. За нижний уровень отвечает микроконтроллер STM32F103C8T6. Он производит обмен данными с компьютером через интерфейс UART, управляет драйверами двигателей через CAN и управляет ШИМ контроллером через I2C.

Для питания логики выбраны понижающие преобразователи LM2596 в количестве 2 шт. Один нужен для понижения входного напряжения до 5 В, второй – для понижения до 3,3 В. Характеристики представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Характеристики понижающего преобразователя LM2596.

Характеристика	Значение
Входное напряжение	4–40 В
Выходное напряжение	1,2–35В
Максимальный выходной ток	3 А

Источником питания является Li-Ion аккумулятор. От него питание распределяется ко всем электронным компонентам через понижающие преобразователи: для двигателей XL4016, для логики LM2596.

Для обеспечения длительного времени работы нужно учитывать два фактора: номинальную емкость и ток разряда. Зависимость напряжения от степени разряда при разных нагрузках представлена на рисунке 4.1.

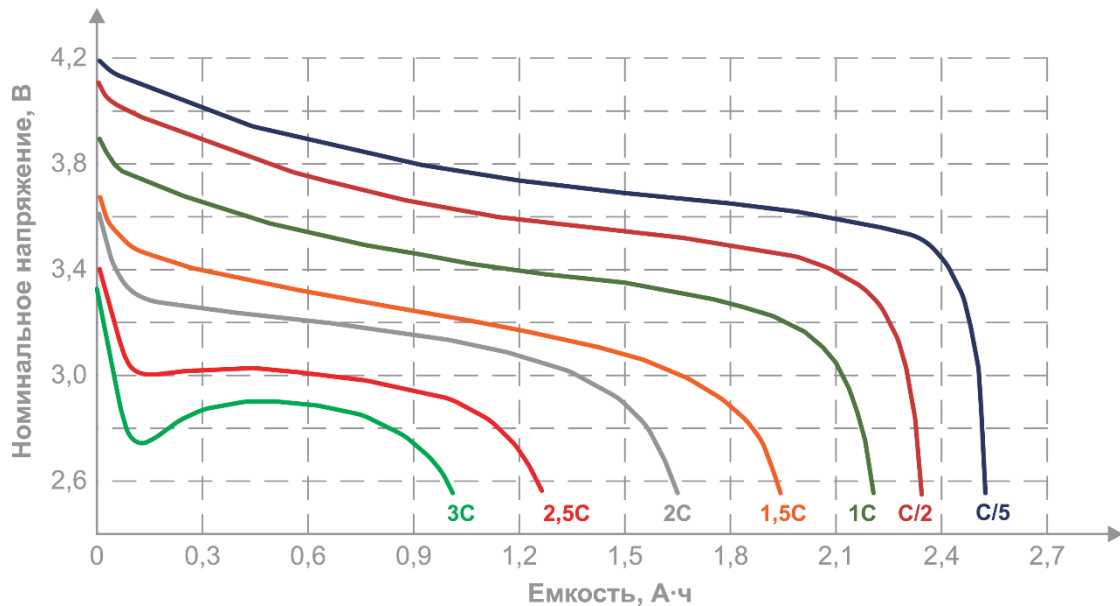


Рисунок 4.1 – График зависимости напряжения от степени разряда при разных нагрузках

4.3 Расчет времени работы цепи

Так как мощность на входе и выходе понижающего преобразователя примерно одинаковая, зная ток на выходе, можно посчитать ток на входе:

$$I_{\text{вх}} = \frac{V_{\text{ном}}}{V_{\text{двиг}}} \cdot I_{\text{вых}}, \quad (4.1)$$

где $I_{\text{вх}}$ – ток на входе понижающих преобразователей;

$I_{\text{вых}}$ – ток на выходе понижающих преобразователей;

$V_{\text{ном}}$ – напряжение на аккумуляторе;

$V_{\text{двиг}}$ – напряжение на выходе понижающих преобразователей.

Подставим значения в (4.1), получим

$$I_{\text{вх}} = \frac{22,2 \text{ В}}{18 \text{ В}} \cdot 13 \text{ А} = 16 \text{ А}.$$

Исходя из ассортимента магазина был выбран аккумулятор ТА-25С-26000-6S1P. Характеристики его представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Характеристики аккумулятора ТА-25С-26000-6S1P.

Характеристика	Значение
Емкость	26000 мАч
Выходное напряжение	22.2 В
Максимальный выходной ток	300 А

Время работы можно посчитать по формуле:

$$T_{\text{раб}} = \frac{C_{\text{аккумулятор}}}{I_{\text{вх}}}, \quad (4.2)$$

Подставим значения в формулу 4.2:

$$T_{\text{раб}} = \frac{26 \text{ А} \cdot \text{ч}}{16 \text{ А}} = 1,6 \text{ ч.}$$

5 Заключение.

В результате выполнения работы разработана колесная платформа мобильного робота с возможностью установки манипулятора.

В ходе выполнения работы был произведен расчет для определения максимальной мощности и момента двигателя, расчет потребляемой мощности силовой части цепи, а также расчет времени работы системы от аккумулятора. На основе полученных данных произведен подбор всех электронных компонентов. Разработана принципиальная электрическая схема подключения компонентов.

Для установки двигателей были разработаны крепления с подшипниковыми узлами. Это позволило разгрузить вал привода от неосновных сил нагрузки, перенеся их на корпуса шарнирных узлов.

Согласованным с другой командой решением присоединения манипулятора к платформе является центрирование с помощью отверстия в месте присоединения и выступающей частью манипулятора, фиксация — при помощи четырех болтовых соединений. Центрирование захватного устройства осуществляется при помощи внутреннего диаметра фланца и внешнему диаметру вала шарнира манипулятора, фиксация — при помощи четырех винтов.

Для модели платформы составлен сборочный чертеж и чертеж для подшипникового узла.

Окончательным результатом проделанной работы является модель платформы в САПР SolidWorks.

Список использованных источников

1. Васильев, А.В. Принципы построения и классификация шасси мобильных роботов наземного применения и планетоходов / А.В. Васильев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – № 1(164). – С. 124-131.
2. Селифонов В.В., Хусаинов А.Ш., Ломакин В.В. Теория автомобиля: Учебное пособие. – М.: МГТУ "МАМИ", 2007. – 102 с.
3. Сазонов, И.С. Теория автомобиля: учеб. пособие / И.С. Сазонов, В.А. Ким, Ки Йонг Чой. – Могилев: Белорус. – Рос. ун-т, 2017. – 164 с.:ил
4. Махон. Ассортимент продукции 2020/21. Руководство по выбору. – 548 с.

Приложение А
Сборочный чертеж платформы

Приложение Б
Спецификация на сборочный чертеж платформы

Приложение В

Чертеж основания подшипникового узла

Приложение Г
Принципиальная электрическая схема