

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

Работа допущена к защите
Руководитель ОП
_____ Е. А. Серикова
« ___ » _____ 20__ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
бакалавра

вид ВКР (работа бакалавра, дипломный проект, дипломная работа, магистерская диссертация)

**МЕХАНИЗМ ШАГАНИЯ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ**

по направлению подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических
процессов и производств
направленность (профиль) 15.03.04_03 Автоматизация технологических
машин и оборудования

Выполнил
студент гр. 3331504/60301 <подпись> Е. А. Ракшин

Руководитель
профессор <подпись> А. Н. Тимофеев

Консультант
по нормоконтролю <подпись> Е. А. Серикова

Санкт-Петербург
2020

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

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ОП

Е.А. Серикова
« 4 » октября 2019 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы

студенту группы 3331504/60301 Ракшину Егору Александровичу

1. Тема работы: Механизм шагания мобильной робототехнической системы
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 01.06.2020.
3. Исходные данные по работе: Выпускная работа посвящена разработке и исследованию механизма шагания (МШ) мобильной робототехнической системы для исследования Луны. Масса робототехнической системы, кг – 100-150. Длительность одного цикла шагания, с – 3. Габариты МШ не более 1700x1200x600.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Титульный лист. Задание. Реферат. Содержание. Введение. Информационный обзор по механизмам шагания (МШ) транспортных систем. Разработка вариантов и обоснование выбора принципиальной схемы МШ. Разработка кинематики МШ. Описание конструкции МШ. Заключение. Список литературы. Приложения.
5. Перечень графического материала (лист формата А1): Принципиальная схема (плакат) – 4л. Кинематическая схема – 2 л. Сборочный чертёж МШ – 3.5 л. Чертёж деталей – 2 л. Расчётный плакат – 7 л.
6. Дата выдачи задания: 01.10.2019

Руководитель ВКР _____ А. Н. Тимофеев
(подпись) инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению _____
(дата)

Студент _____ Е.А. Ракшин
(подпись) инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

На 128 с., 65 рисунков, 8 таблиц, 6 приложений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДВИЖИТЕЛЬ, МЕХАНИЗМ ШАГАНИЯ, ЛУННЫЙ ГРУНТ, КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА, МЕХАТРОНИКА.

Тема выпускной квалификационной работы: «Механизм шагания мобильной робототехнической системы».

В работе изложен процесс анализа и проектирования конструкции движителя планетохода, предназначенного для перемещения по морям Луны.

Задачи, которые решались в ходе исследования:

- 1) Анализ движителей;
- 2) Функциональное описание принципа шагания;
- 3) Создание математической модели, описывающей принцип шагания;
- 4) Геометрический и силовой анализ механизма с последующим выбором привода;
- 5) Разработка конструкции механизма.

Работа содержит анализ реальных механизмов и машин, используемых в космической технике. Разработана принципиальная схема колёсно-шагающего движителя. Разработана кинематическая схема движителей с подвеской. Спроектирован движитель планетохода с модульной конструкцией. Проведена оптимизация последовательности шагания с поэтапным описанием критичных случаев. Изучены наиболее важные аспекты шагания по неподготовленной поверхности небесного тела.

Результат работы – конструкция движителя, которую можно использовать на планетоходах различной конфигурации.

Области применения конструкции – космическая техника и испытательные макеты для проведения экспериментов на Земле на аналогах лунного грунта.

ABSTRACT

128 pages, 65 figures, 8 tables, 6 appendices.

KEYWORDS: WHEEL DRIVER, STEPPING MECHANISM, MOON SOIL, SPACE TECHNOLOGY, MECHATRONICS.

The subject of graduate qualification work: "The walking mechanism of a mobile robotic system."

This work contains a process of analysis and construction of structures designed to move around lunar mares. There are tasks, solved during the research:

- 1) Analysis of drives;
- 2) A functional description of the walking principle;
- 3) Creating a mathematical model which describes the principles of walking;
- 4) Geometric and force analysis of the mechanism with the subsequent selection of the drive;
- 5) Development of the design of the mechanism.

The work contains an analysis of real types and machines used in space industry. A schematic diagram of a wheeled walking mover has been developed. A kinematic scheme of mover with suspension was developed. The driver of a planet rover with a modular design was designed. The optimization of the walking sequence was carried out with a phased description of the most critical cases. The most important aspects of walking along the unprepared surface of a celestial body were studied.

The result of the work is the design of the driver of the planet rover, which can be used in planet rovers with different configurations.

The application area of the construction is space technology, planet rovers and test models for conducting experiments on analogues of lunar soil.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей работе применяют следующие обозначения и сокращения:

ВР	– волновой редуктор;
ДОС	– датчик обратной связи;
КШД	– колёсно-шагающий движитель;
ЛЗ	– левое заднее колесо;
ЛП	– левое переднее колесо;
МР	– мотор-редуктор;
МК	– мотор-колесо;
МШ	– механизм шагания;
ПЗ	– правое заднее колесо;
ПП	– правое переднее колесо;
ПР	– планетарный редуктор;
ПУ	– плата управления;
РИТЭГ	– радиоизотопный термоэлектрический генератор;
СК	– система координат;
СЛАУ	– система линейных алгебраических уравнений;
ТСП	– твёрдо-смазочное покрытие;
ЧР	– червячный редуктор;
ЭКР	– энерго-кинематический расчёт.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.	8
1 Аналитический обзор конструкций и типовые механизмы шагания. . .	9
1.1 Типовые движители в космической технике.	11
1.2 Последовательность перемещения планетохода.	13
1.3 Модель грунта и основные препятствия на Луне.	16
1.4 Патентный обзор конструкций движителей космической техники.	20
1.5 Анализ найденных изобретений.	22
1.6 Обзор и выбор механизма шагания.	24
1.7 Подвеска планетохода.	28
1.8 Технические решения в узлах космической техники.	31
2 Принципиальная схема движителя лунохода.	36
2.1 Модернизация способа передвижения транспортного средства с колёсно-шагающим движителем (КШД).	37
2.2 Разработка и описание кинематической схемы колёсно-шагающего движителя	48
2.3 Описание конструкции механизма шагания	52
2.4 Организация управления движителем	57
3 Расчёт механизма шагания.	59
3.1 Расчётные случаи.	59
3.2 Геометрический расчёт и оптимизация траектории шагания	67
3.3 Силовой расчёт механизма шагания	77
3.4 Выбор двигателя и энерго-кинематический расчёт привода	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	96
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.	97
ПРИЛОЖЕНИЕ А Принципиальная схема	100
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Кинематическая схема.	102
ПРИЛОЖЕНИЕ В Сборочный чертёж.	103
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Рабочие чертежи деталей	107

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Расчётная схема	109
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Расчёт и оптимизация механизма шагания	114

ВВЕДЕНИЕ

Главный вопрос, который ставится при освоении лунного пространства – может ли человек выдержать длительные межпланетные путешествия. Постройка лунных баз и космических станций позволит изучить влияние космической среды на человеческий организм в долгосрочной перспективе.

В данной выпускной квалификационной работе проводится исследование и проектирование механизма шагания движителя лунохода модульного типа, т.е. конструкции высокой взаимозаменяемости, которую можно присоединять к различным типам будущих космических машин. Следует отметить актуальность и новизну применения модульных конструкций в космической технике, так как большая часть узлов механизмов и машин в космической отрасли в настоящее время предполагает только узкоспециализированное применение.

Введение универсальных модульных приспособлений может дать значительный организационный и экономический эффект как на стадии проектирования, так на стадии производства. [2]

1 Аналитический обзор конструкций и типовые механизмы шагания

Широкий спектр научно-технического оборудования планетоходов и их приводной части позволяет изучать поверхности небесных тел различными способами. Ниже изложен процесс выбора вида движителя для изучения только равнинных (морских) зон Луны. Этот выбор основан на том, что гористые (материковые) районы труднодоступны для изучения из-за труднодоступных горных массивов. Рассмотрим функциональную схему планетохода, изображённую на рисунке 1.

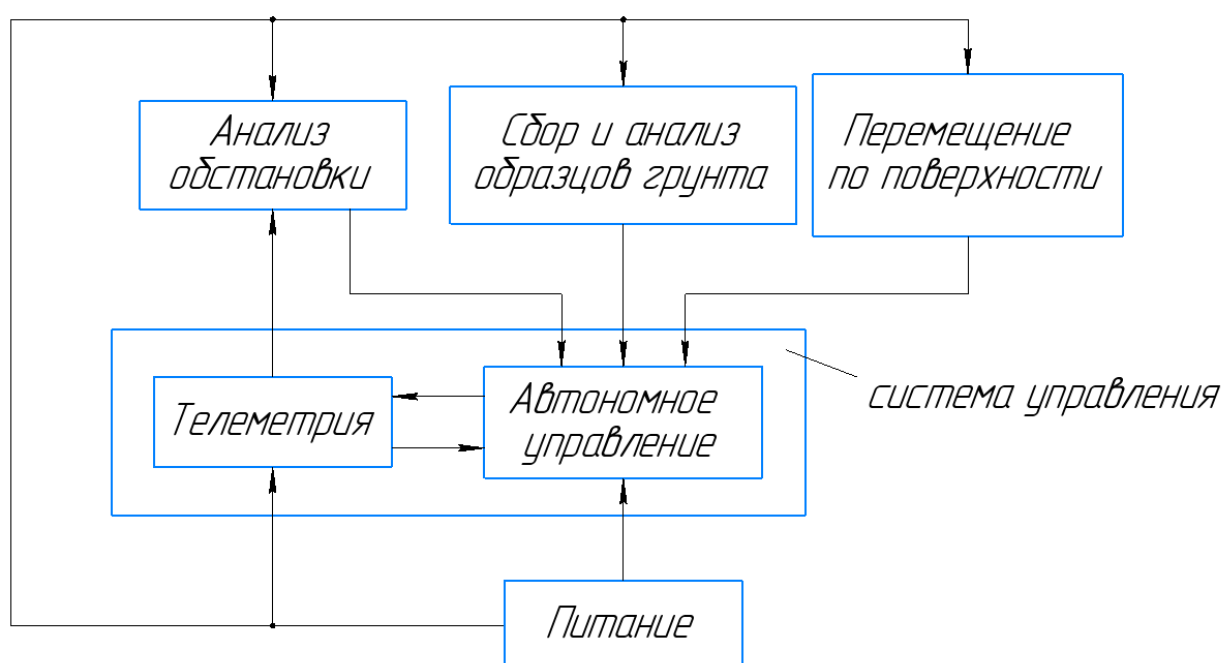


Рисунок 1 – Функциональная схема планетохода

Основное назначение планетохода – изучение поверхностного грунта. Эту задачу выполняют манипуляционные системы, пенетраторы, анализаторы грунта. Лаборатории по исследованию грунта могут располагаться как на Земле, так и внутри самого планетохода.

Планетоход представляет собой некоторый каркас или контейнер, к которому присоединяются остальные подсистемы. Система управления планетоходом иерархическая, подразделяется на собственное (автономное)

управление и на команды с Земли по телеметрии. Автономное управление обладает высоким быстродействием, однако все действия заданы программно, и вне зависимости от степени совершенства программного обеспечения машины, уступают качественно управлению от человека. По этой причине в особых случаях команды с наибольшим приоритетом отдаются по телеметрии с Земли. Уровни управления также согласуются между собой, выдавая оптимальный алгоритм действий.

Перемещение планетохода по поверхности Луны обеспечивается с помощью особых устройств – движителей, содержащих в себе приводы перемещения, оценки положения, подвеску.

Анализ обстановки производится с помощью сенсорных систем и телеметрии.

Питание всех подсистем обеспечивается встроенными устройствами. РИТЭГ выполняет такую функцию, к тому же вследствие радиоактивного распада радиоактивных изотопов генератор выделяет большое количество тепловой энергии, которую можно использовать для обогрева требуемых узлов машины. В качестве внешних накопительных устройств могут быть использованы солнечные панели.

Описание всех подсистем в подробностях выходит за рамки выпускной работы, поэтому далее будет проводиться анализ только движителей планетоходов с последующим конструктивным анализом и попыткой активного конструирования. Остальные подсистемы планетоходов будут отображены схематично.

Основная инженерная задача, которая ставится при проектировании планетоходов в целом – способ перемещения научно-исследовательского оборудования по небесному телу.

Планетоходы, в отличие от других транспортных средств, передвигаются по неподготовленной и малоизученной поверхности, поэтому на движитель планетохода накладываются высокие требования к проходимости и

устойчивости. Объясняется это тем, что на нынешнем этапе развития космической техники ремонт планетоходов при эксплуатации невозможен.

1.1 Типовые движители в космической технике

Во второй половине прошлого века изучение поверхности Луны привело к разработке планетоходов на основе различных движителей. Один из первых советских планетоходов – «Луноход 1» использовал колёсные движители с подвеской на торсионах. К корпусу лунохода крепились блоки движителей, по 2 устройства на каждый борт планетохода. Макет такого блока изображён на рисунке 2. [11]



Рисунок 2 – Блок колёсных движителей с подвеской [11]

Основное внимание при выборе движителя ориентируется на колёсные, гусеничные и шагающие виды. Значительно меньшее внимание уделяется другим типам движителей, так как они не могут обеспечить противоречивые требования к лёгкости конструкции и высокой проходимости. [2]

Сравнительная таблица характеристик колёсных, шагающих и гусеничных движителей отображена ниже.

Таблица 1 – Сравнительная таблица характеристик наиболее распространённых движителей

Движитель	Преимущества	Недостатки
Колёсный	Высокая скорость перемещения	Низкий удельный КПД
Гусеничный	Лучшие массогабаритные характеристики	Есть вероятность сброса гусеницы при расклинке движителя камнями
Шагающий	Лучшая проходимость	Низкая скорость перемещения

Гусеничные движители, как показал опыт эксплуатации наземной техники, используются в основном на тяжелонагруженных машинах вследствие равномерного распределения удельного давления на грунт. В данной работе производится проектирование движителя для малонагруженного лунохода. Вероятность сброса гусеницы исключает использование гусеничного движителя, как надёжного способа перемещения по поверхности Луны.

Шагающий движитель представляет собой систему, преобразующую комбинацию вращений приводов в требуемую траекторию движения выходного звена. По количеству приводов такие движители могут быть одноприводными с рычажным механизмом, преобразующим вращение двигателя в траекторию шагания, а также многоприводными шагающими системами с конфигурируемыми траекториями шагания. Первый вариант проще по конструкции и дешевле, но обеспечение требуемой траектории шагания может негативно влиять на габариты механизма. Второй вариант представляет собой более гибкую систему, требующую согласованного управления множеством приводов, что также усложняет конструкцию и повышает её стоимость. Выбор той или иной компоновки зависит от задач, выполняемых машиной.

На рисунке 3 изображён первый марсоход “ПрОП-М” с шагающим движителем на основе параллелограммного одноприводного механизма. [12]

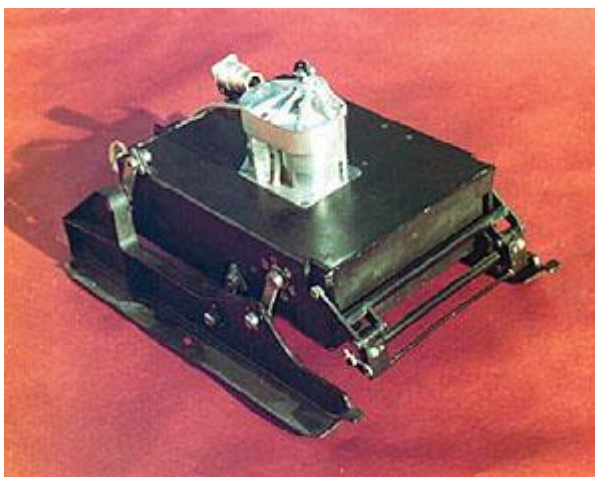


Рисунок 3 – Планетоход с шагающим движителем

Из недостатков шагающих движителей стоит выделить неравномерные нагрузки на ведущий вал привода, отсутствие управления высотой машины и отсутствие возможности выбора точки опоры. [2]

С учётом различных условий движения планетохода, требование по сохранению энергоэффективности породило особый движитель, сочетающий в себе положительные свойства колёса и шагания – колёсно-шагающий движитель (КШД).

В общем исполнении КШД может быть представлен как мотор-колесо на выходном звене шагающего механизма. При такой компоновке колёсный движитель выполняет основные маршевые перемещения по поверхности, а шагающий привод повышает манёвренность планетохода. В работе будет использован этот тип движителей.

1.2 Последовательность перемещения планетохода

В ходе изучения двигательной деятельности млекопитающих было выявлено несколько последовательностей движения их конечностей (аллюры и

локомоции). Ритм локомоций, коэффициент производительности шагания, а также последовательности перемещения опор позволяют описать любую походку. [2]

В отличие от кинематики бега млекопитающих, перемещение планетохода по поверхности может обеспечиваться не только равномерным перемещением корпуса, но также и фазной походкой, в процессе которой последовательно активируются приводы шагания. Фазная походка надёжнее, так как при последовательном заносе очередного шагающего привода, остальные приводы являются опорами, что уменьшает нагрузку на приводы и риск опрокидывания.

На рисунке 4 упрощённо отображён планетоход с позициями колёс.

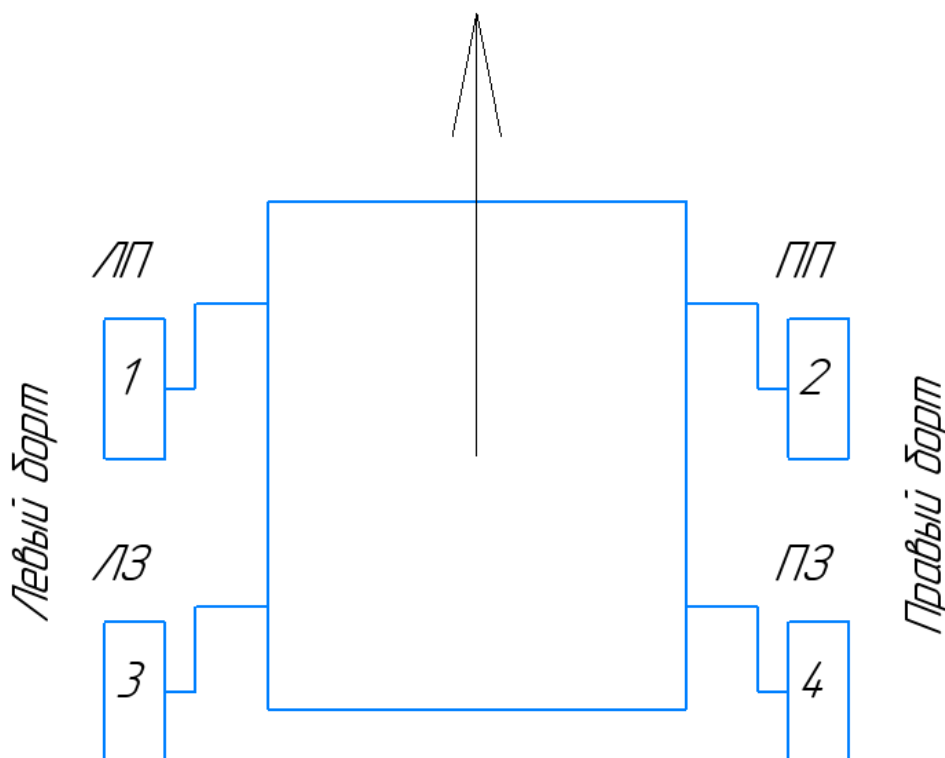


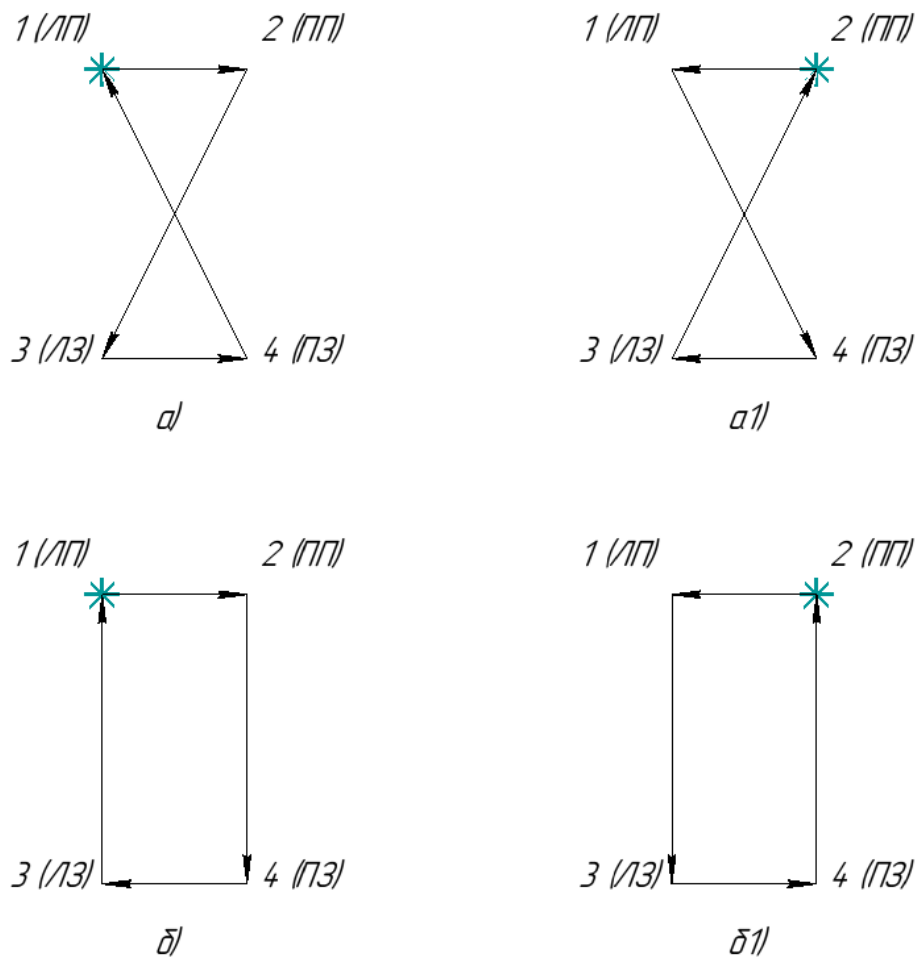
Рисунок 4 – Позиции колёс относительно корпуса планетохода, направление движения указано стрелкой

Для сокращения названий колёс введём обозначение левого и правого бортов - Л и П соответственно; Переднее и заднее колесо обозначается как П и З соответственно.

Таким образом:

- 1) ЛП (левое переднее колесо);
- 2) ПП (правое переднее колесо);
- 3) ЛЗ (левое заднее колесо);
- 4) ПЗ (правое заднее колесо).

Особый интерес представляют аллюры диагональные и латеральные с последовательными перемещениями опор, изображённые на рисунке 5.



а) асимметричная диагональная прямая (1-2-3-4); а1) асимметричная диагональная обратная (2-1-4-3); б) асимметричная латеральная прямая (1-2-4-3); б1) асимметричная латеральная обратная (2-1-3-4); * — начало траектории

Рисунок 5 – Последовательности движения конечностей

Под диагональным аллюром подразумевается перемещение конечностей с последовательным шаганием передних колёс, а затем – задних и наоборот. При смене очереди шагания переднего и задних колёс происходит последовательная смена борта (с левого борта на правый и наоборот). Таким образом, достигается лучшая проходимость при шагании.

Под латеральным аллюром подразумевается последовательное перемещение колёс с изменением передней части на заднюю и наоборот. В отличие от диагональных аллюров, здесь смена левого и правого бортов не происходит, что ухудшает проходимость, однако увеличивает скорость шагания. Как пример, аллюры при беге галопом у лошадей являются латеральными. [6]

На рисунке 5 отображены 4 основных аллюра, виды которых описаны выше. Здесь начало движения для определённости обозначим звёздочкой.

Активация шагающего привода производится после контакта предыдущего с грунтом. Таким образом, корпус планетохода всегда опирается минимум на 3 опоры, что повышает устойчивость.

Стоит отметить, что не обязательно ограничиваться единственной последовательностью при проектировании курса движения планетохода. Застревание колеса в грунте, худшая проходимость по одну из сторон бортов могут создавать условия для выбора той или иной последовательности шагания.

1.3 Модель грунта и основные препятствия на Луне

Луна представляет собой небесное тело с большим количеством ударных кратеров, в окрестности которых лежит большое количество деформируемого грунта – реголита. Интерес для изучения представляют равнинные поверхности, содержащие на внешних слоях реголит, геолого-физические свойства которого помогут узнать состав и историю формирования Луны. На рисунке 6 изображено типовое лунное море.

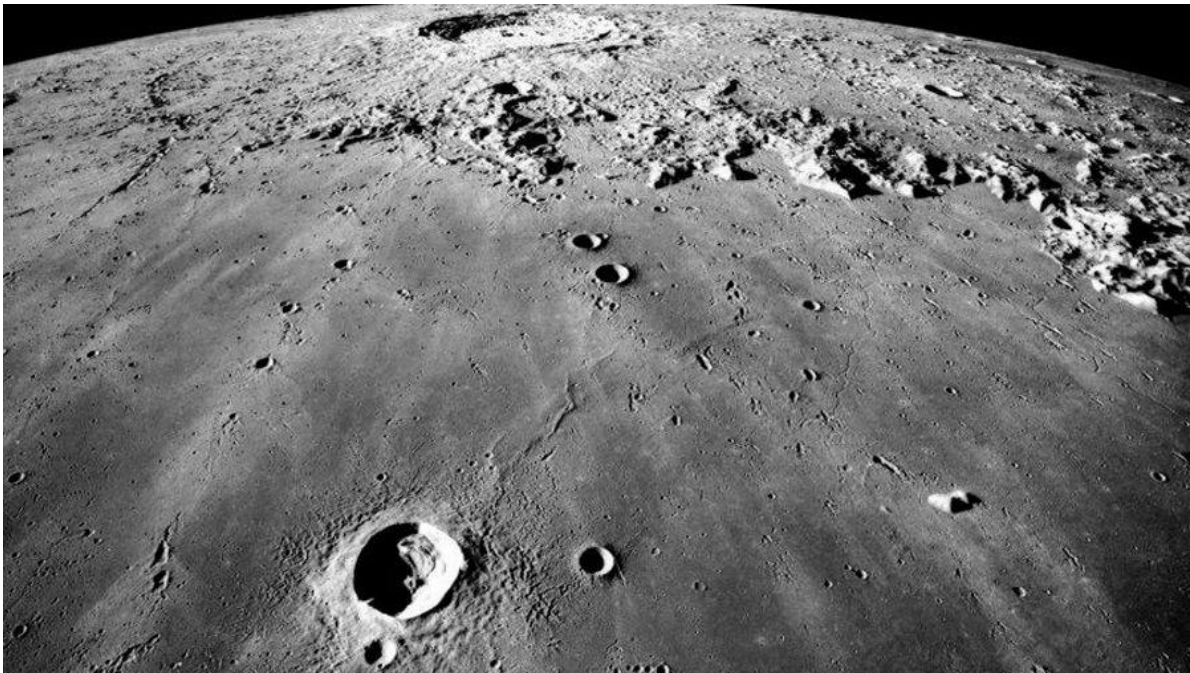


Рисунок 6 – Море Дождей на Луне

По физико-механическим свойствам реголит напоминает сухой кварцевый песок, поэтому дальнейшие расчёты, связанные с проходимостью КШД будут опираться на модель этого аналога.

Основные математические модели представления рельефа небесного тела – детерминированные и стохастические.

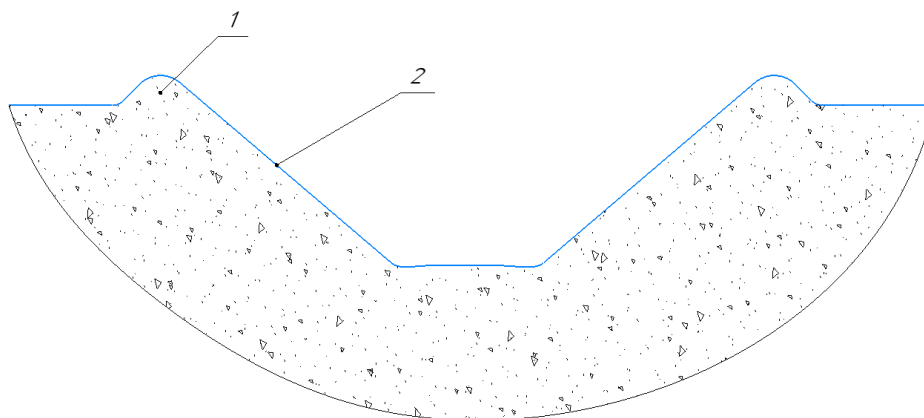
Стохастические модели описывают рельеф в виде вероятностных распределений препятствий, которые задают средние энергозатраты, ресурсы машины и т.п. [1] В данной работе эта модель не рассматривается и упрощена до усреднённого значения параметров механизма шагания.

Детерминированные модели представляют собой математическое описание неоднородностей рельефа. Наибольший интерес представляют те неровности, которые наиболее распространены на пересекаемой планетоходом поверхности. В данной работе эта модель упрощена до самого опасного вида пересекаемой местности – кратеров. Для классификации типоразмеров кратеров вводится их буквенное обозначение. Для самых распространённых типов кратеров – от А до С. [2] Основными параметрами кратера являются его

относительная глубина, угол наклона стенки и угол наклона валика кратера (если он есть).

Отношение глубины кратера к его диаметру называется относительной глубиной ξ и измеряется в пропорциональном соотношении. Для кратеров типов А – С относительная глубина лежит в диапазоне $\xi = \frac{1}{4} \dots \frac{1}{14}$, то есть на единицу глубины кратера приходится 4 ÷ 14 единиц его диаметра.

Упрощённое отображение кратера и его валика изображено на рисунке 7.



1 – вал кратера; 2 – уклон кратера

Рисунок 7 – Поперечное сечение участка грунта с кратером

Самые трудные для преодоления кратеры типа «А» представляют собой наклонные поверхности до 35-40° относительно горизонта. [2] Дальнейшие расчёты будут проводиться с учётом самого опасного случая – застревание планетохода в таком кратере с максимальным углом наклона. Этот угол определяется экспериментально на специальных испытательных стендах по имитации тягово-сцепных свойств. Такие стенды используют аналоги лунного грунта – кварцевый песок, так как у него наиболее схожий с реголитом коэффициент юза.[2] В данной работе предлагается взять аналитическое значение, определённое углом трения в деталях механизмов и машин.

Таблица 2 – Характеристики основных типов лунных кратеров

Параметр	Тип кратера				
	А	АВ	В	ВС	С
Относительная глубина ξ (отношение глубины к диаметру)	$\frac{1}{4} \dots \frac{1}{5}$	$\frac{1}{6} \dots \frac{1}{7}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{14}$
Наличие вала	Есть	Есть	Есть	Следы	Нет
Угол наклона стенки кратера	35 – 45°	30 – 40°	20 – 25°	65°	8 – 10°
Угол наклона внешней кромки вала	10 – 20°	10 – 15°	5°	-	-

Кратер типа ВС имеет наибольший угол наклона стенок, однако, у него небольшая относительная глубина, в 2 раза меньшая, чем у кратера типа А.

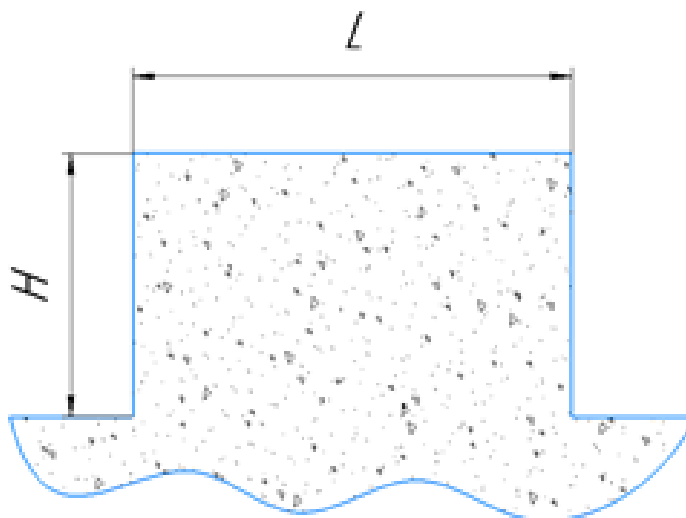
Основные расчётные случаи, при которых требуется применить шагание – застревание в грунте и перешагивание труднопреодолимых препятствий. Причем последний случай имеет меньший приоритет, т.к. в случае столкновения с препятствием, его можно объехать. Так или иначе, будет целесообразным выбрать для расчёта наиболее распространённый вид препятствия для расширения возможностей механизма шагания (МШ).

При застревании в грунте МШ должен вынести опору движителя как можно дальше от области буксования, следовательно, основным требованием к траектории шагания является её протяжённость.

Основными видами препятствий являются: камень призматической или цилиндрической формы, кратер в плане круговой формы, холмы в плане круговой формы, валик кратера неограниченной длины, ступенчатая неровность неограниченной длины и ров неограниченной длины. [1]

Так как задача преодоления препятствий скруглённой и наклонной формы больше относится к тяговым характеристикам колёсной базы движителя, предлагается рассмотреть наиболее трудное для преодоления МШ ступенчатое препятствие. Высоту траектории следует обеспечить как можно большую, если она не влияет негативно на габариты МШ. Поэтому высота

перешагиваемого препятствия определяется уже после выбора траектории шагания по его длине. Ступенчатое препятствие изображено на рисунке 8.



L – протяжённость препятствия; H – высота препятствия

Рисунок 8 – Ступенчатое препятствие

1.4 Патентный обзор конструкций движителей космической техники

Основная задача патентного поиска – обзор отечественных и зарубежных решений. Это необходимо при проектировании нового механизма, чтобы определить основные тенденции при конструировании реальных машин, эксплуатируемых различными аэрокосмическими организациями.

Исходные данные к проекту: произвести обзор и анализ прототипов колёсно-шагающих движителей.

Ключевые слова:

- колёсно-шагающий движитель (англ. wheel-stepping engine)
- мобильная робототехническая система (англ. mobile robotic system)
- механизм шагания (англ. stepping mechanism)
- траектория шагания (англ. lunar soil)

Индексы МПК:

– В62D – с двигателями, взаимодействующими с поверхностью дороги, например шагающие транспортные средства.

– В60В - колеса транспортных средств.

На табл. 3 отображены основные патенты РФ и СССР.

Таблица 3 – Патенты Российской Федерации

№	Название изобретения	№ патента	Индекс МПК	Дата приоритета	Патентовладелец (заявитель)	Авторы
1	Колесно-шагающий двигатель с функцией активной подвески	RU2671661C1	В62D 57/02	2017-06-23	Маленков М.И. и другие	Волов В.А. (RU) Гусева Н.К. (RU) Конколович А.Г. (RU) Маленков М.И. (RU)
2	Способ передвижения транспортного средства с колесно-шагающим двигателем	SU698830A1	В62D 57/02	1977-08-03	Кемурджиан А.Л. и другие	Кемурджиан А.Л. (RU) Громов В.В. (RU) Кажукало И.Ф. (RU)
3	Колесно-шагающий двигатель транспортного средства	SU715376A1	В62D 57/02 В60В 19/00	1877-10-24	Кажукало И.Ф. Кузьмин М.М.	Кажукало И.Ф. (RU) Кузьмин М.М. (RU)

На табл. 4 отображены основные зарубежные патенты.

Таблица 4 – Зарубежные патенты

№	Название изобретения	№ патента	Индекс МПК	Дата приоритета	Патентовладелец (заявитель)	Авторы
1	Rough terrain amphibious vehicle	US3057319A	B62D 57/02	1960-06-23	E. A Wagner	E. A Wagner
2	Moving equipment	JPS60148780A	B62D 57/02	2006-09-04	Niigata Univ, 国立大学法人 新潟大学	Niigata Univ, 国立大学法人 新潟大学
3	Walking wheeled vehicle	US3842926A	B62D 57/02	1970-04-29	Secretary of the Army, Washington, DC.	Joseph W. (US) St. Clair Shore (US) Clifford D. B. (US) Madison H. (US) Howard C. M. (US)

1.5 Анализ найденных изобретений

В табл. 3 и 4 приведены патенты, которые имеют непосредственное отношение к колёсно-шагающим движителям и механизмам шагания в целом. Вышеописанные патенты описывают устройства, применяемые в космической и сельскохозяйственной технике.

Патентообладателями в основном являются компании или производственные объединения.

Наибольшую активность среди изобретений в данной тематике за последнее время проявляет Россия и США.

На рисунке 1 представлен график изобретательской активности по количеству патентов в Российской Федерации или за рубежом.

Основной индекс МПК, который встречается чаще остальных в найденных патентах:

– B62D 57/02 - с двигателями, взаимодействующими с поверхностью дороги, например шагающие транспортные средства.

Из этого можно сделать вывод, что применение колёсно-шагающего двигателя в данной работе целесообразно. Предыдущие работы, направленные на данный вид двигателей, связанный с исследованием космического пространства, применяли другую компоновку и другие механизмы шагания.

На рисунке 9 изображена изобретательская активность по теме двигателей транспортной техники в СССР и России с 1948 по 2019 г. По оси ординат показано число патентов за год.



Рисунок 9 – График изобретательской активности с 1948 г. по 2019 г.

Из графика выше можно сделать вывод, что наиболее активная разработка двигателей для космической техники приходилась на период с 1960

по 2000 г., что соответствует периоду «космической гонки» между наиболее развитыми космическими державами.

1.6 Обзор и выбор механизма шагания

Для того, чтобы определить форму и вид механизма шагания, необходимо провести анализ реальных механизмов и машин. На рисунке 10 изображён многоприводный робот “*ATHLETE*”, разработанный в NASA. [14]

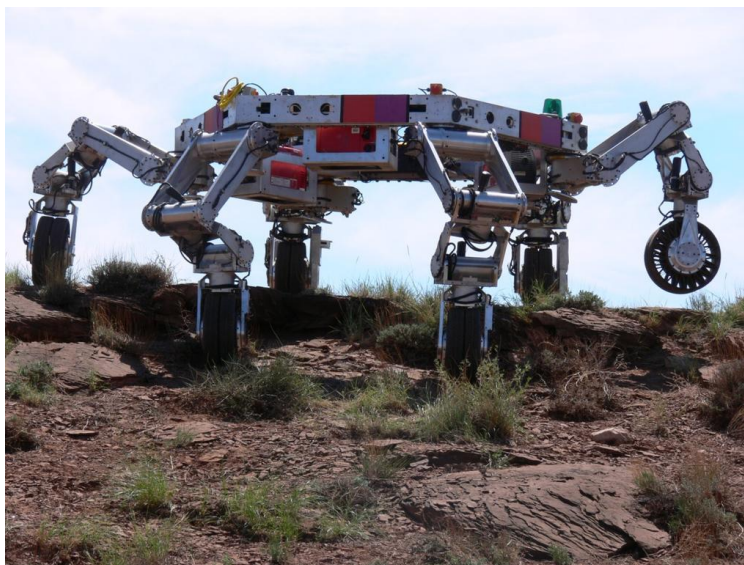
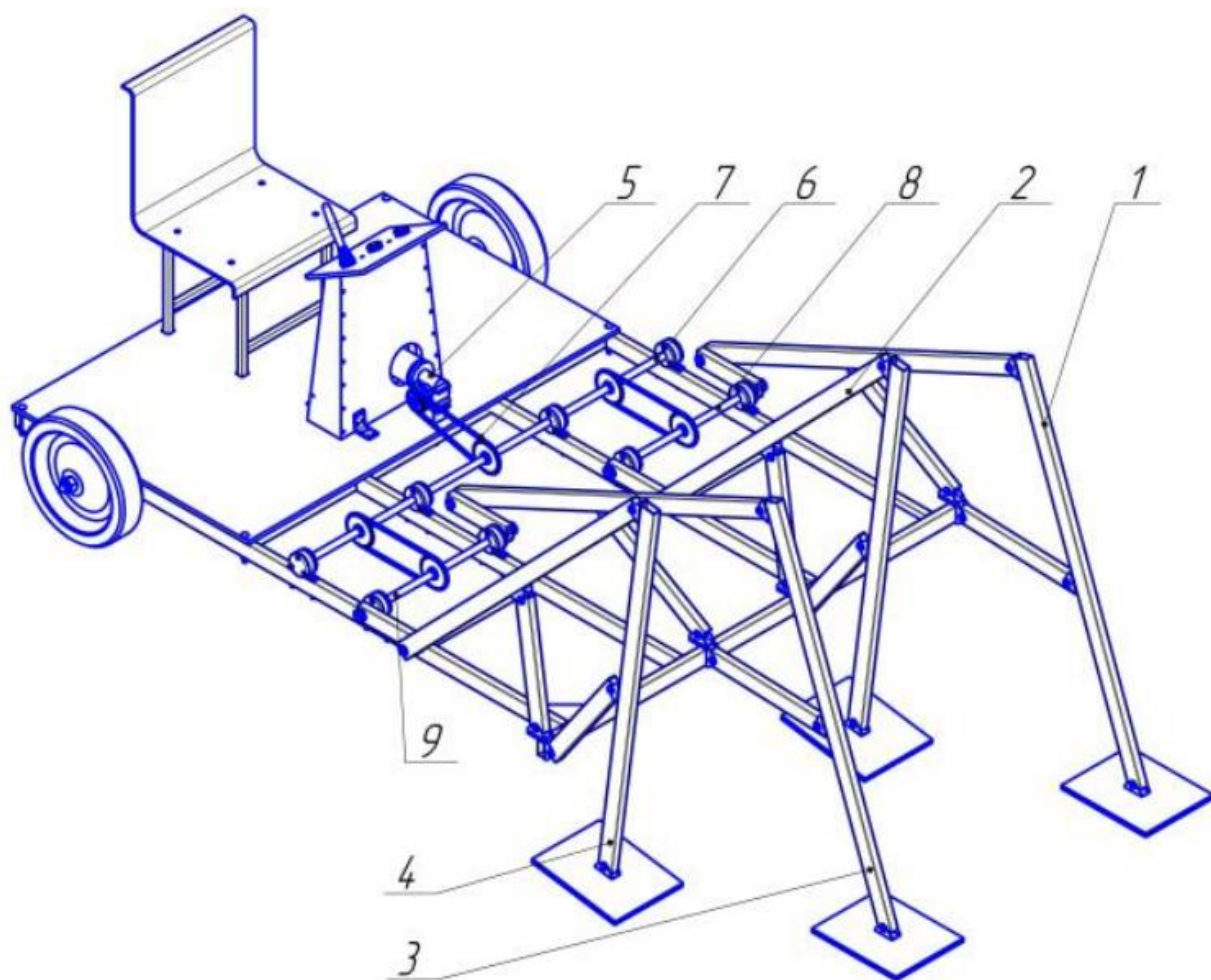


Рисунок 10 – Колёсно-шагающий многоприводный робот “*ATHLETE*”

В целях облегчения приводной части, предлагается выполнить шагающий механизм в виде одноприводного рычажного механизма. Это решение также упрощает конструкцию движителя.

Одним из простейших механизмов шагания является механизм Чебышева. Он представляет собой четырёхшарнирный механизм с вынесенным шатуном. На рисунке 11 изображён прототип транспортного устройства с механизмами шагания Чебышева. [13]



1, 2, 3, 4 – механизмы шагания; 5 – мотор-редуктор; 7 – цепная передача; 6, 8, 9 – валы

Рисунок 11 – Конструкция транспортного устройства с шагающими механизмами Чебышева

Другой вариант механизма шагания – механизм Кланна, изображённый на рисунке 12. Данный механизм состоит из вращающегося звена, кривошипа, двух шатунов и двух сцепок. Все звенья соединены плоскими шарнирами. [14]

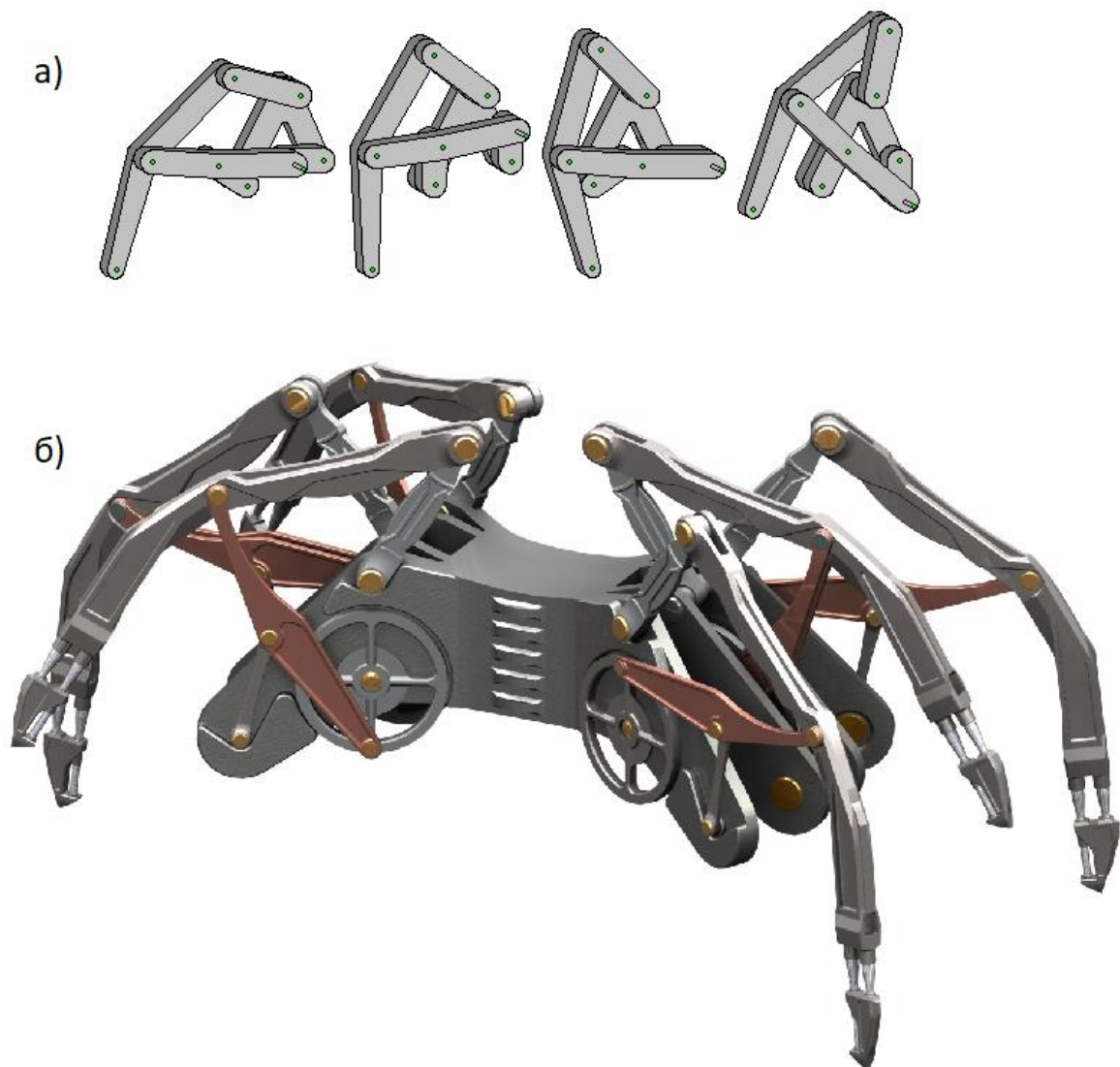


Рисунок 12 – Исполнение механизма Кланна: а) Механизм Кланна при четырёх разных положениях кривошипа; б) Пример применения механизма на мобильном роботе с шестью конечностями [14]

В конце прошлого века скульптор Тео Янсен разработал свой механизм шагания (рис. 13), приводная часть которого работает от прибрежного ветра. [15]



Рисунок 13 – Шагающая кинематическая скульптура Тео Янсена – “*Strandbeest*”
[15]

Сравнительная таблица вышеизложенных одноприводных механизмов шагания:

Таблица 5 – Сравнение МШ

Механизм	Преимущества	Недостатки
Чебышева	Простая конструкция	Ограниченная кинематика движения
Кланна	Малые габариты	Сложная конструкция
Тео Янсена	Наиболее приближенная к локомоциям млекопитающих траектория движения	Сложная конструкция

Так как требования к конструкции МШ планетохода – малые габариты и простота конструкции, то механизм Тео Янсена нецелесообразен.

Механизм Кланна, по сравнению с механизмом Чебышева, содержит большее количество звеньев, что усложняет конструкцию.

В данной работе предлагается использовать механизм Чебышева.

1.7 Подвеска планетохода

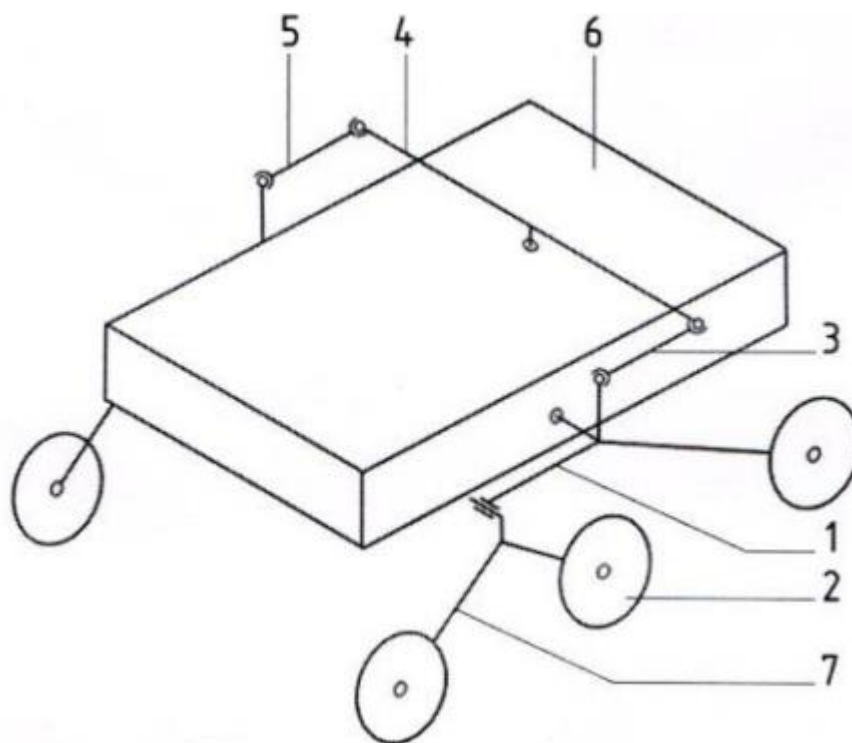
Подвеска планетохода аналогична подвескам земных машин и содержит направляющие механизмы, упругие элементы, амортизаторы.

Подвеска обеспечивает плавность хода, гасит ударные нагрузки и обеспечивает постоянный контакт движителя с грунтом. Различные технические решения, обусловленные физико-механическими свойствами грунта, ландшафтом, гравитацией и т.п. определяют конструкцию планетохода. По этой причине подвеска планетохода для исследования Луны может значительно отличаться от машины для исследования поверхности другого небесного тела, например, Марса. Однако анализ некоторых технических решений планетоходов по исследованию других небесных тел необходим для того, чтобы знать на принципиальном уровне о способах обеспечения вышеописанных функций подвесок.

Одним из наиболее успешных исполнений подвески планетохода стала подвеска типа *Rocker-Bogie*, используемая в конструкции четырёх реальных американских марсоходов и конструкции китайского лунохода. [3]

На рисунке 14 изображена структурно-кинематическая схема подвески типа *Rocker-Bogie*.

Сообщение между правым и левым бортами выполняется с помощью межбортового коромысла или дифференциала, который обеспечивает контакт колёс, как на левой, так и на правой части планетохода. Основной недостаток такой конструкции – необходимость обеспечить дополнительное пространство на верхней части корпуса для межбортового соединения.

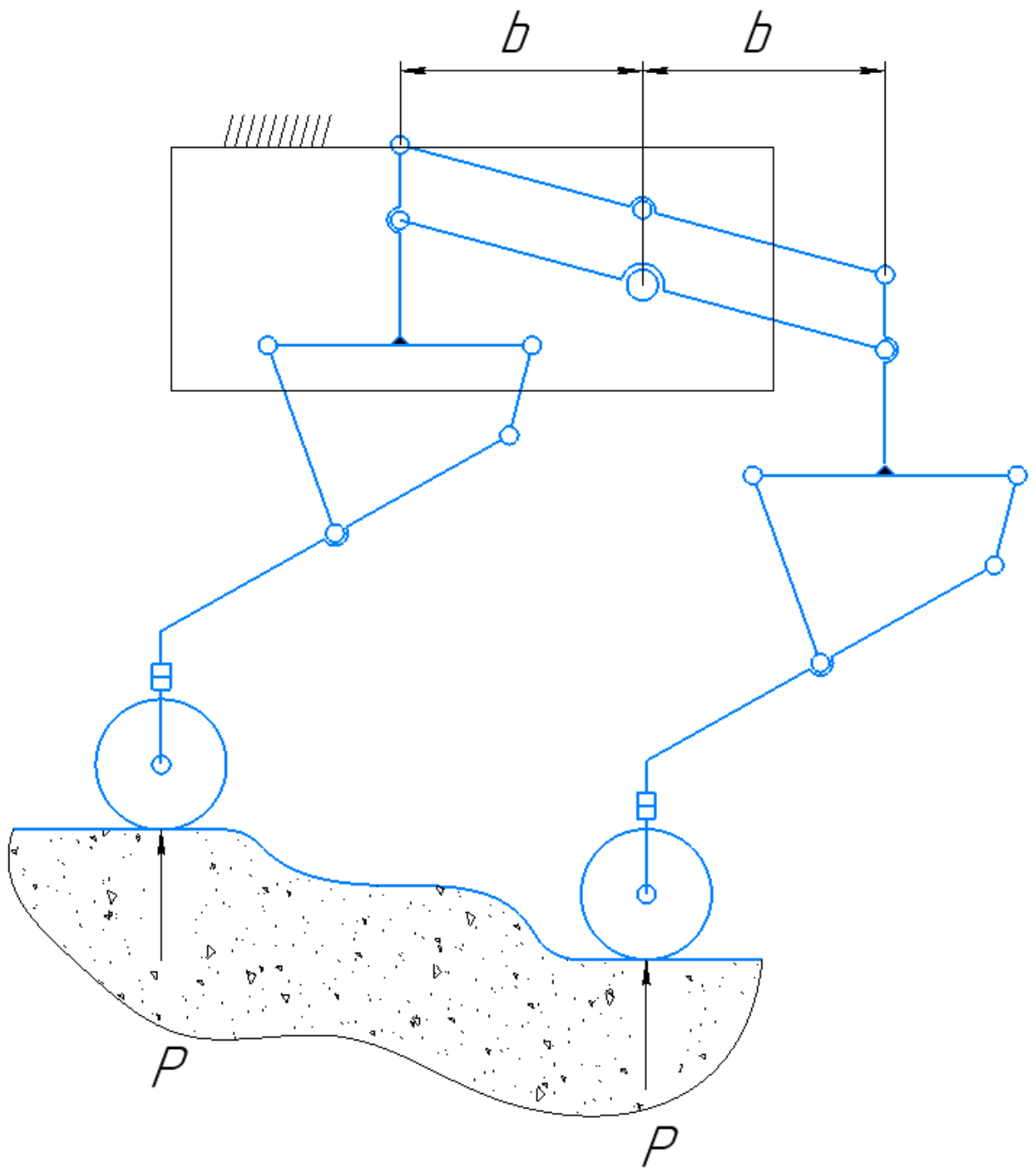


1 – балансир тележки (*rocker*); 2 – колесо; 3, 5 – левая и правые тяги соответственно; 4 – коромысло; 6 – рама шасси; 7 – тележка (*bogie*)

Рисунок 14 – Структурно-кинематическая схема подвески *Rocker-Bogie*

Так как подвеска лунохода в данной работе должна обладать модульной конструкцией, то применение межбортового соединения недопустимо. В данном случае должна быть продумана подвеска для четырёхколёсного планетохода, поэтому следует пересмотреть структурно-кинематическую схему подвески.

Для четырёхколёсных планетоходов широко распространены параллелограммные механизмы. Они обеспечивают малые продольные перемещения колёс при вертикальном ходе подвески, что уменьшает энергетические потери при излишних движениях планетохода по неровностям. Пример подвески с параллелограммным механизмом изображён на рисунке 15.



b – плечи балансира; P – нормальные реакции грунта

Рисунок 15 – Параллелограммный механизм подвески колёс

Применение параллелограммного механизма оправдано в случае заделки на торсионах, т.к. здесь производится замыкание на корпус реактивных крутящих моментов от мотор-колёс. Незамкнутые реактивные крутящие моменты дополнительно нагружают торсион в заделке механизма.

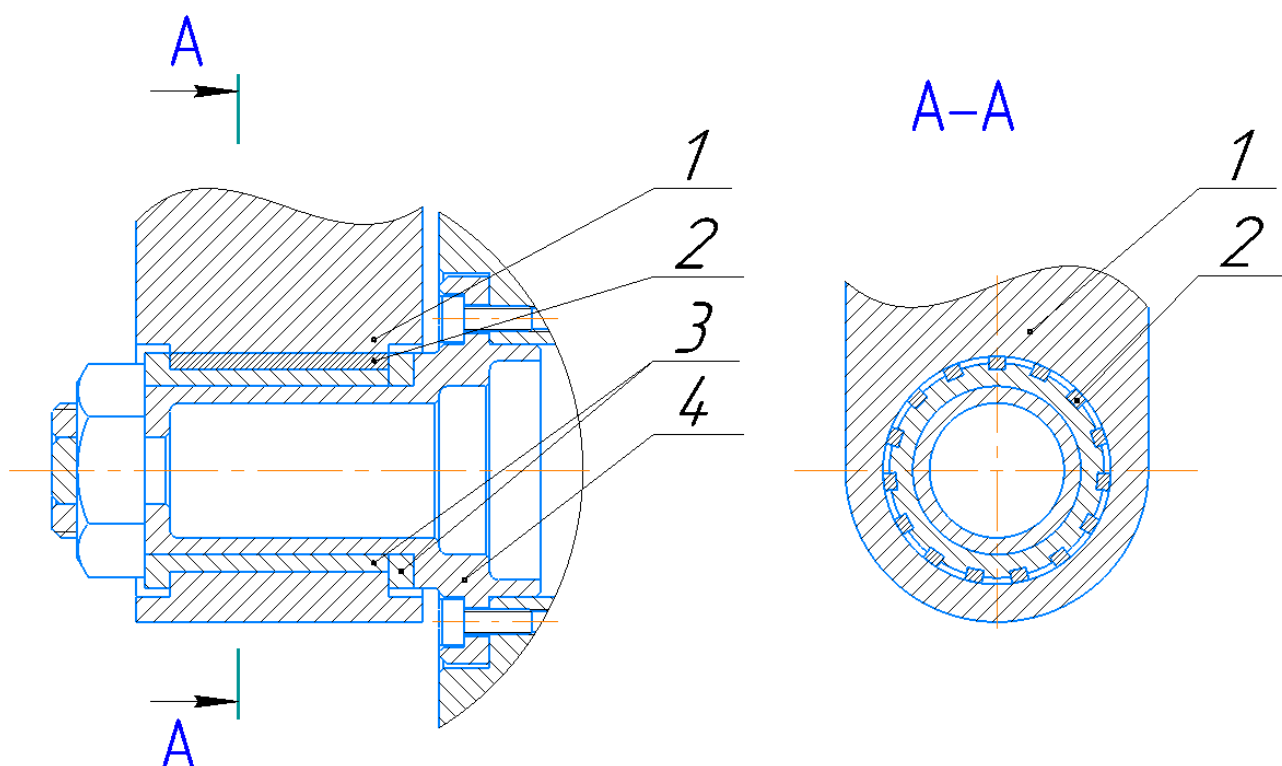
Такой вариант подвески может быть использован для разрабатываемого в данной работе механизма шагания. В заделке коромысла можно установить пружину кручения вместо торсиона, т.к. нагрузки на коромысло невелики.

1.8 Технические решения в узлах космической техники

Основной проблемой при эксплуатации космической техники является герметизация уязвимых к вакууму и радиации узлов. Опыт эксплуатации техники в условиях сильного вакуума и низкой гравитации в течение прошлого века показал необходимость применения особых смазок и герметиков, а также модифицирования уплотнительных узлов. При высоком вакууме окисные пленки, всегда присутствующие на поверхности трения в условиях земной атмосферы, уничтожаются, а их восстановление в бескислородной среде практически невозможно. Из-за ухудшения теплообмена значительно повышается температура в зоне трения, отрицательно сказывающаяся на микро-и-макроструктурных свойствах материалов. К тому же, на изделия воздействует радиация и большие перепады температур в несколько сотен градусов (на Луне от -173 до 127 градусов Цельсия).

Существуют, по крайней мере, три направления, в которых может решаться проблема обеспечения работоспособности узлов трения: размещение узлов в герметизированном объеме, применение твердых смазок и твёрдо-смазочных покрытий (ТСП) на поверхностях трения и использование для деталей трения самосмазывающихся композиционных материалов. Комбинация этих методов предпочтительна. [2]

Примером плоского шарнира с использованием ТСП является пара трения, состоящая из серебряного припоя марки ПСр40 и сплава титана ВТ14 (рис. 16). Шарнир с таким элементом трения скольжения может работать при огромном диапазоне температур и при высоком вакууме. [5]



1 – рычаг с продольными пазами; 2 – слой припоя ПСр40; 3 – титановая втулка ВТ14; 4 – цапфа

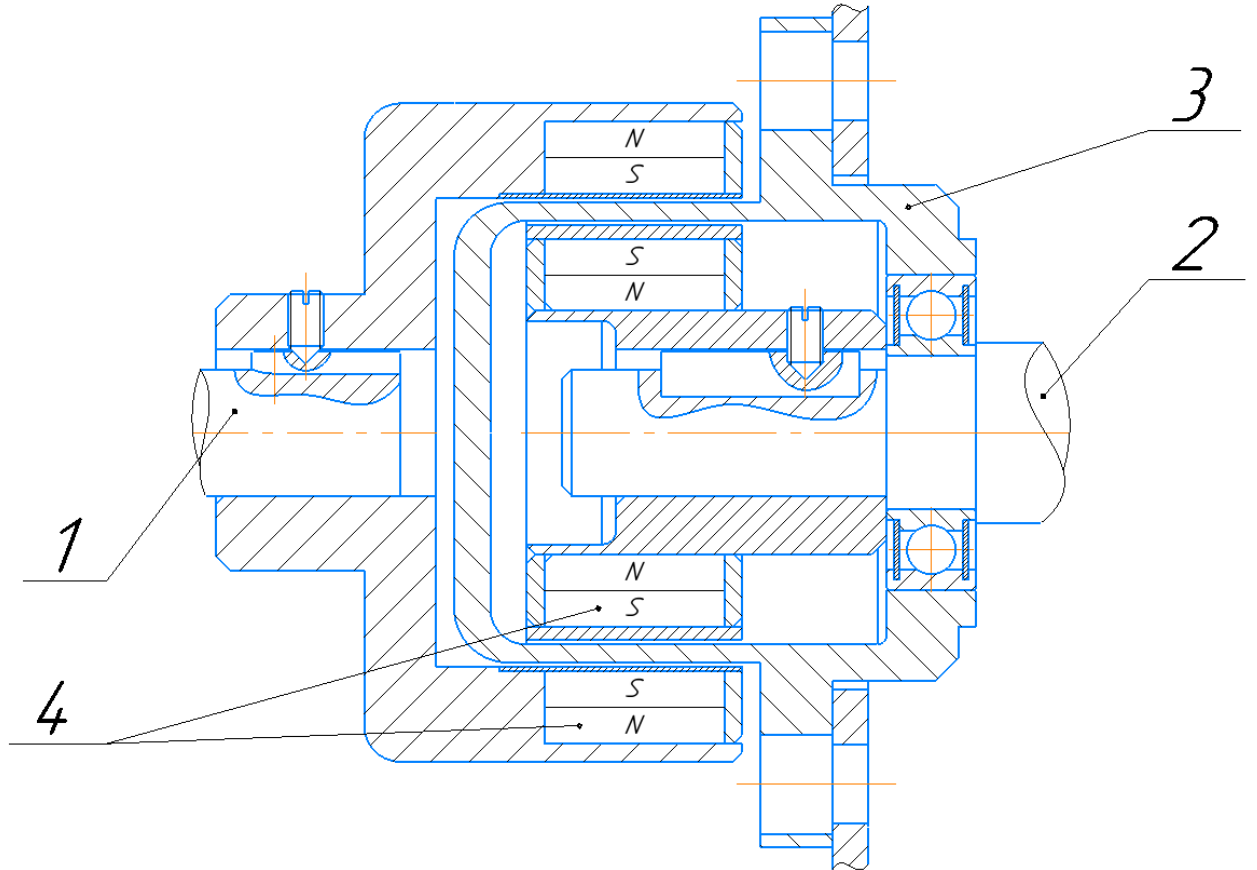
Рисунок 16 – Плоский шарнир с использованием ТСП

Правильное проектирование пар трения космических механизмов предусматривает определённую последовательность действий: анализ задачи, поиск прототипов и т.п.

Для уплотнения конструкций, работающих в температурном поле -196 до 300 °С применяются упругие металлические элементы, компенсирующие большие тепловые деформации.

Значительно сложнее уплотнить подвижные элементы с поступательными или вращательными движениями. Такие уплотнения могут быть выполнены с частичной или полной герметизацией. Для полной герметизации используют гермоводы с постоянными магнитами, электромагнитами, магнитожидкостями и др. [7][8]

Для соединения валов, например, между редуктором и двигателем, можно использовать специальную вакуумную муфту с постоянными магнитами, изображённую на рисунке 17. [17]

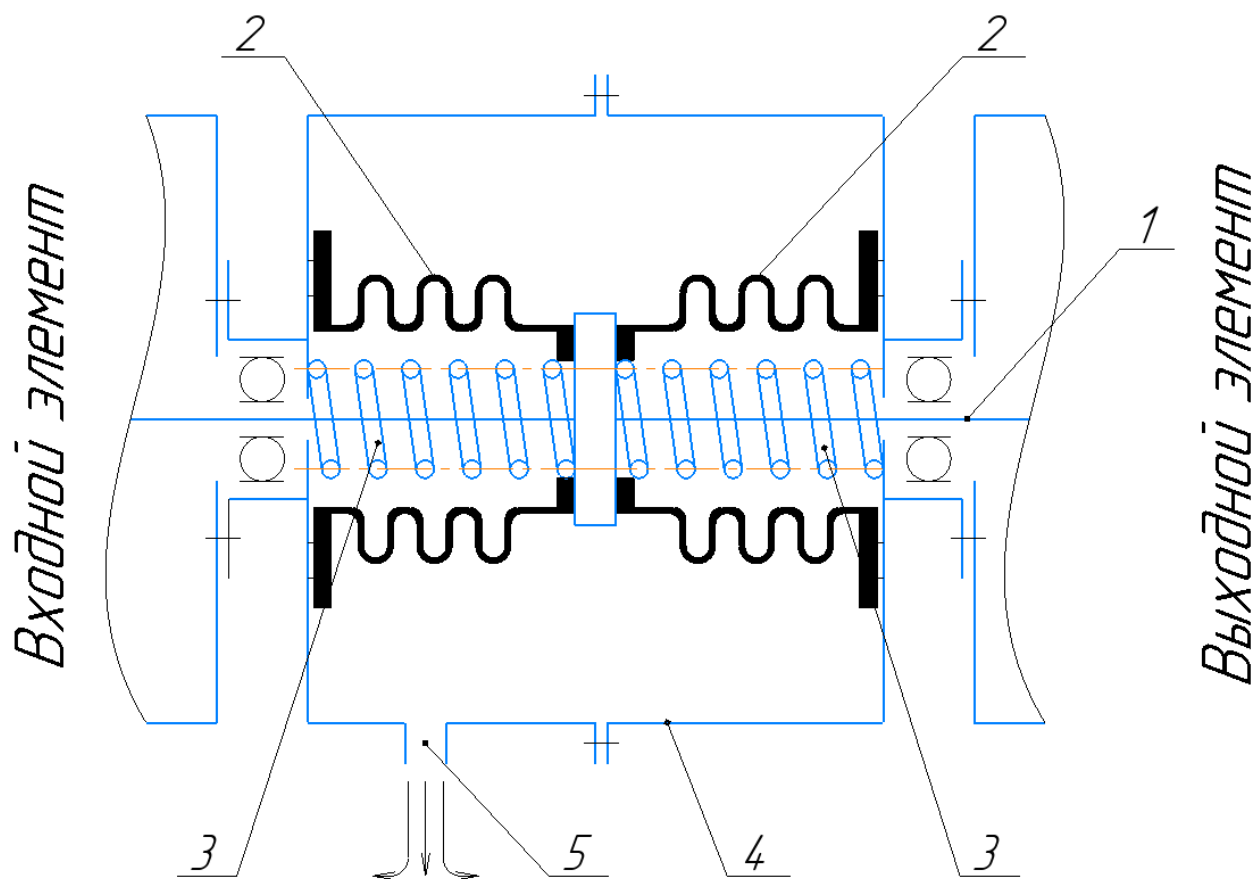


1 – внешняя полумуфта; 2 – внутренняя полумуфта; 3 – герметичный экран; 4 – постоянные магниты;

Рисунок 17 – Вакуумная муфта с постоянными магнитами

Передача вращения осуществляется от ведущего элемента 1 к ведомому элементу 2 (и наоборот) с помощью магнитных полей, образованных постоянными магнитами 4 ведущего и ведомого элементов. Герметизация элементов муфты выполняется с помощью тонкостенного экрана 3, изготовленного из немагнитной стали. Недостатком такой муфты является невысокий передаваемый момент в 1-2 Н · м, так как при его увеличении резко возрастают потери в стали и габариты конструкции.

Наиболее эффективным уплотнительным устройством являются сильфонные торцевые уплотнения. Сильфоны изготавливаются из антифрикционных пластмасс. Пример такого уплотнения изображён на рисунке 18. [5]



1 – вал; 2 – сильфоны; 3 – пружины сжатия; 4 – корпус гермоввода; 5 – отверстие для откачки воздуха

Рисунок 18 – Гермоввод с двумя сильфонами

Такое уплотнение обладает отличными массогабаритными показателями. При достаточно высокой герметичности эти уплотнения имеют огромный ресурс в температурном диапазоне от -196 до 200°C . [2]

Основной недостаток уплотнения – ограничение по скорости во избежание плавления сильфона в силу его низкой теплопроводности, а также

относительная сложность конструкции по сравнению с рассмотренными выше вариантами.

Для питания двигателя с датчиками и передачи информации о положениях механизма требуется обеспечить надёжное и герметичное электрическое соединение. Для такой цели в электрике широко распространены цилиндрические соединители (рис. 19). [19]



Рисунок 19 – Соединитель типа 2PMT

Провода припаиваются к хвостовикам контактов соединителя и покрываются герметиком.

2 Принципиальная схема движителя лунохода

Чтобы понять, какие критерии при проектировании механизма шагания лунохода являются преваляющими, необходимо для начала определиться с процессом шагания и разобраться в кинематике шагания в целом.

Так как механизмы шагания планетохода для каждого колеса одинаковы, предлагается рассмотреть кинематическую схему для одного колёсно-шагающего движителя (КШД).

В первую очередь, следует разобраться с самим процессом шагания, какие функции он выполняет.

Поверхность Луны представляет собой слой деформируемого рыхлого реголита, причём деформации при спрессовывании пропорциональны глубине рыхлого участка. Из этого следует, что деформации грунта неравномерны и в некоторых областях могут быть достаточно велики и, как следствие, труднопреодолимы для планетохода.

Классический колёсный движитель при застревании в таком грунте может не вывести планетоход из этой опасной зоны. Предлагаемый вариант с колёсно-шагающим движителем (КШД) предполагает перешагивание опасной зоны с помощью шагающего механизма с поочерёдной (фазной) походкой каждой из опор.

Передние по направлению движения колёса по окончании фазы шагания их в ведущем режиме перемещаются на величину шага, кратную длине колёсной базы планетохода, обеспечивая опорный след, который может быть использован задними по движению колёсами. [14] Предлагается взять шаг механизма, равный колёсной базе лунохода.

Фазное перемещение машины увеличивает её устойчивость и обеспечивает наибольшее число опор в процессе шагания. Стоит отметить, что все колёса при выполнении шагов заблокированы для обеспечения шагания след в след. Ниже изложен предлагаемый способ передвижения транспортного средства с колёсно-шагающим движителем.

2.1 Модернизация способа передвижения транспортного средства с колёсно-шагающим движителем (КЖД)

Рассмотрим процесс передвижения планетохода с помощью механизмов шагания в случае застревания колёс в зоне с рыхлым грунтом. Для упрощения схемного отображения, рассматривается многоприводный механизм шагания, по кинематике представляющий собой двухподвижный манипулятор с заделкой в корпусе. В реальной модели используется одноприводный рычажный механизм.

На рисунке 20 изображена структурная схема планетохода в исходном положении перед процессом шагания.

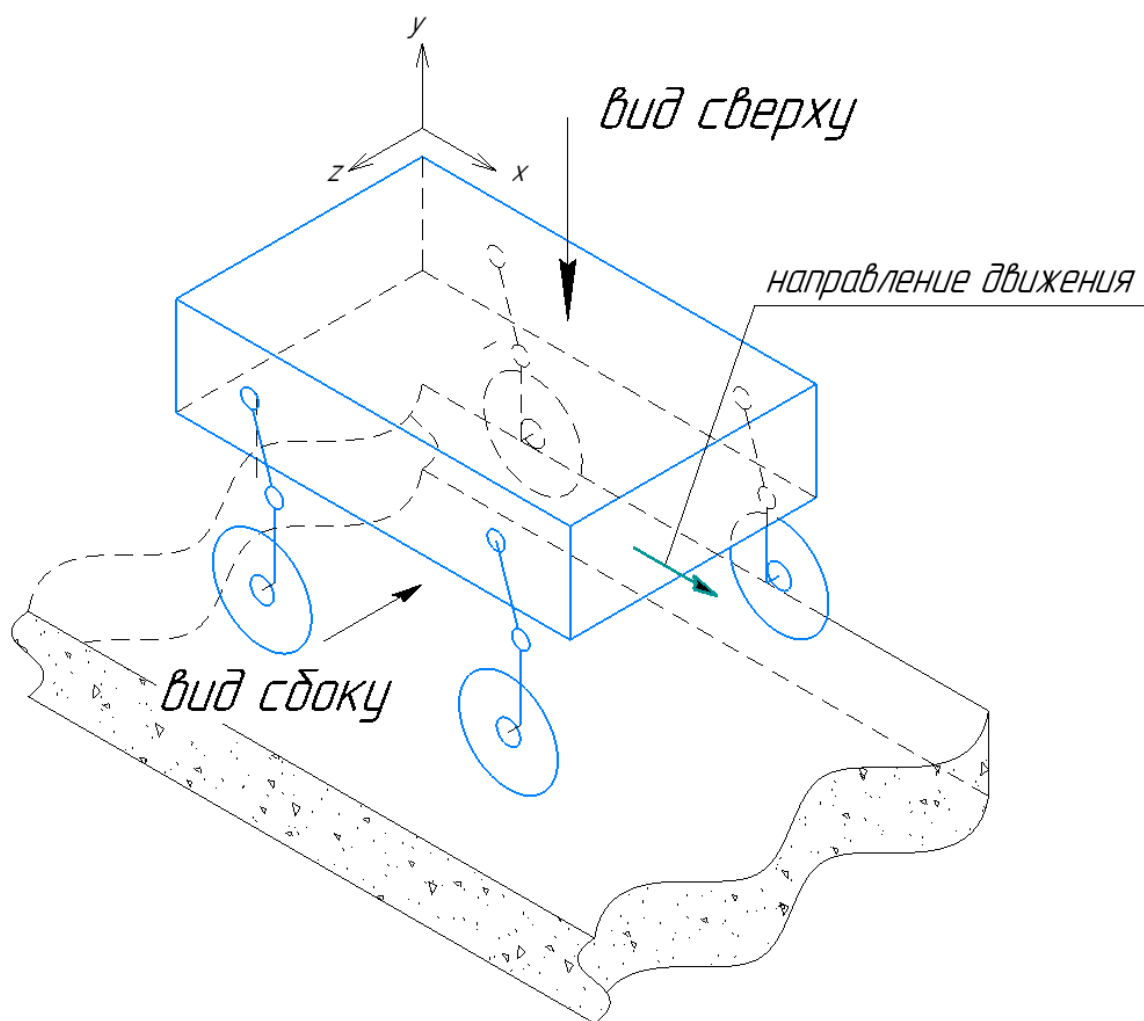
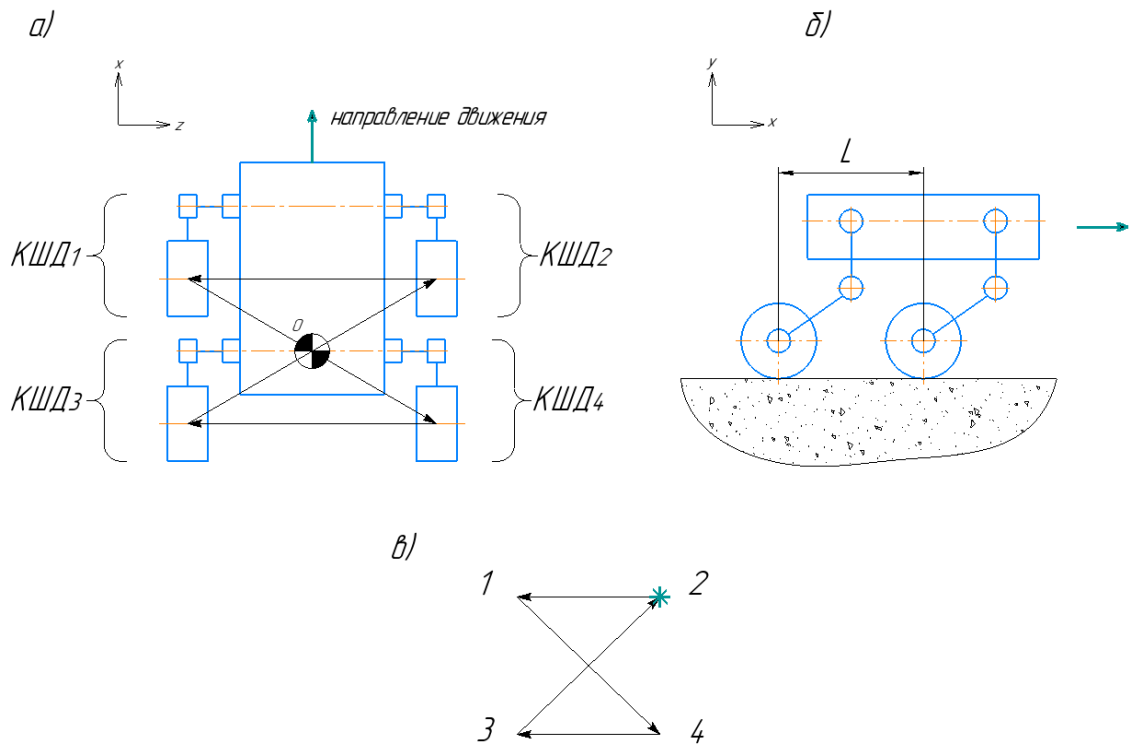


Рисунок 20 – Структурная схема планетохода в исходном положении перед началом цикла шагания, вид в изометрии

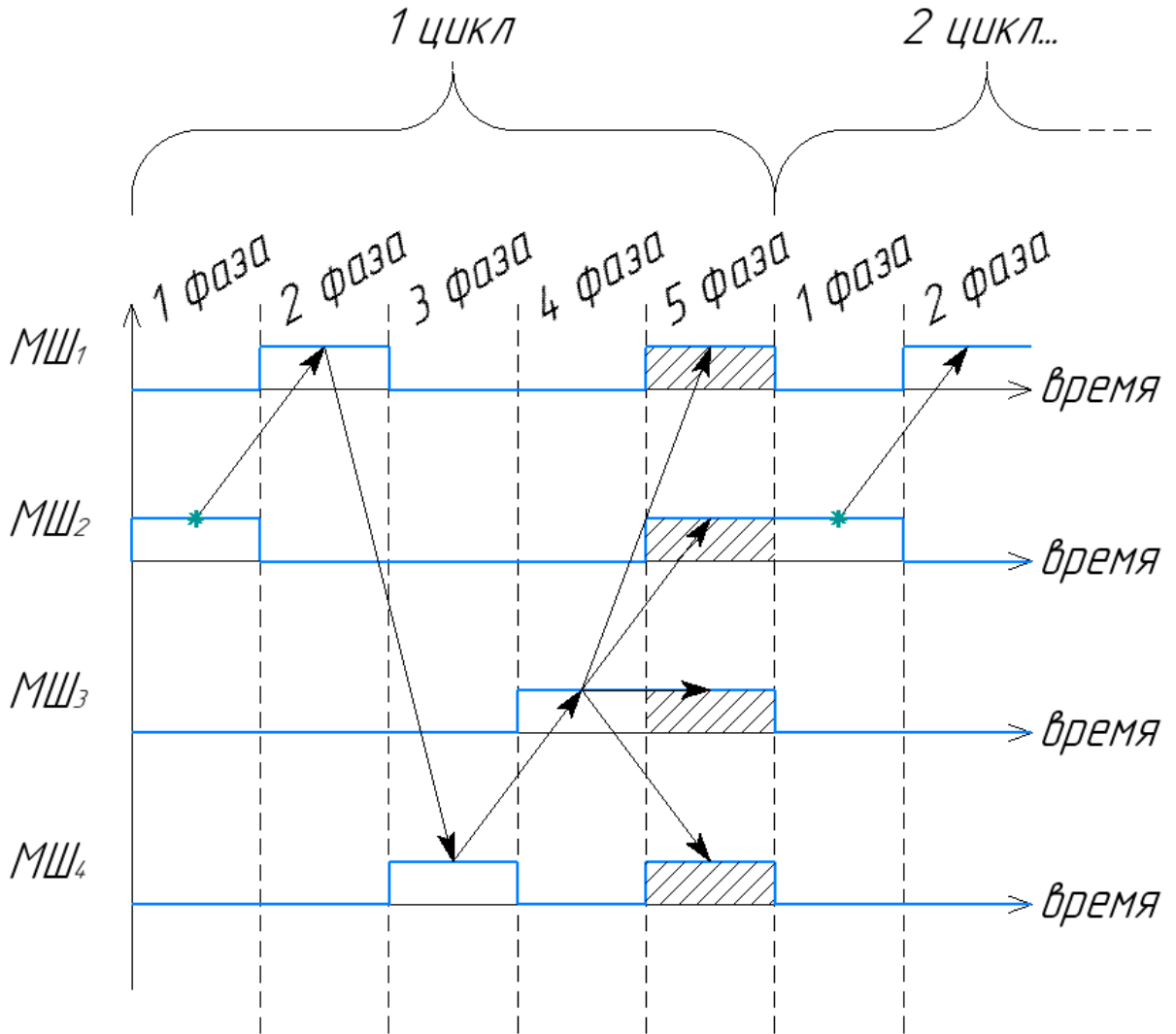
Процесс шагания след в след выполняется по разработанным методам из научных работ прошлого века. [10] В данной работе предлагается дополнить последовательности шагания циклограммами, задающими разные последовательности шагания (аллюры), применение которых варьируется при различных условиях на Луне. Описание условий, относительно которых требуется применить ту или иную последовательность, в данной работе опускается. Предлагается рассмотреть пример по одной последовательности. На рисунке 21в изображён диагональный аллюр (примеры прочих аллюров см. в п. 1.2, рис. 5).



L – колёсная база; КШД_{1..4} – колёсно-шагающие движители 1-4; 0 – центр масс в начальном положении; * – начало последовательности шагания

Рисунок 21 – Начальное положение планетохода и одна из последовательностей шагания: а) Вид планетохода сверху; б) Вид планетохода сбоку; в) Последовательность шагания (аллюр)

Согласно аллюру, изображённому на рисунке 21, можно составить циклограмму с последовательностью шагания 2-1-4-3. Циклограмма изображена на рисунке 22.



$MШ_{1..4}$ – механизмы шагания 1-4

Рисунок 22 – циклограмма для механизмов шагания

На рисунке выше видно, что на последней фазе цикла шагания активны все МШ (области заштрихованы). Эта фаза необходима для выведения в первоначальное положение корпуса планетохода относительно его движителей.

Шагание требуется в ситуациях, когда движители стоят на очень рыхлом грунте. Для обеспечения дополнительной устойчивости в процессе шагания,

предлагается создавать каждым колесом движителя специальные зоны с уплотнённым грунтом – опорные следы (рис. 23). Такие следы могут быть образованы при вращении колеса с неподвижным планетоходом, благодаря чему колесо буксует и углубляется в грунт, образуя лунку с опорным следом. [10]

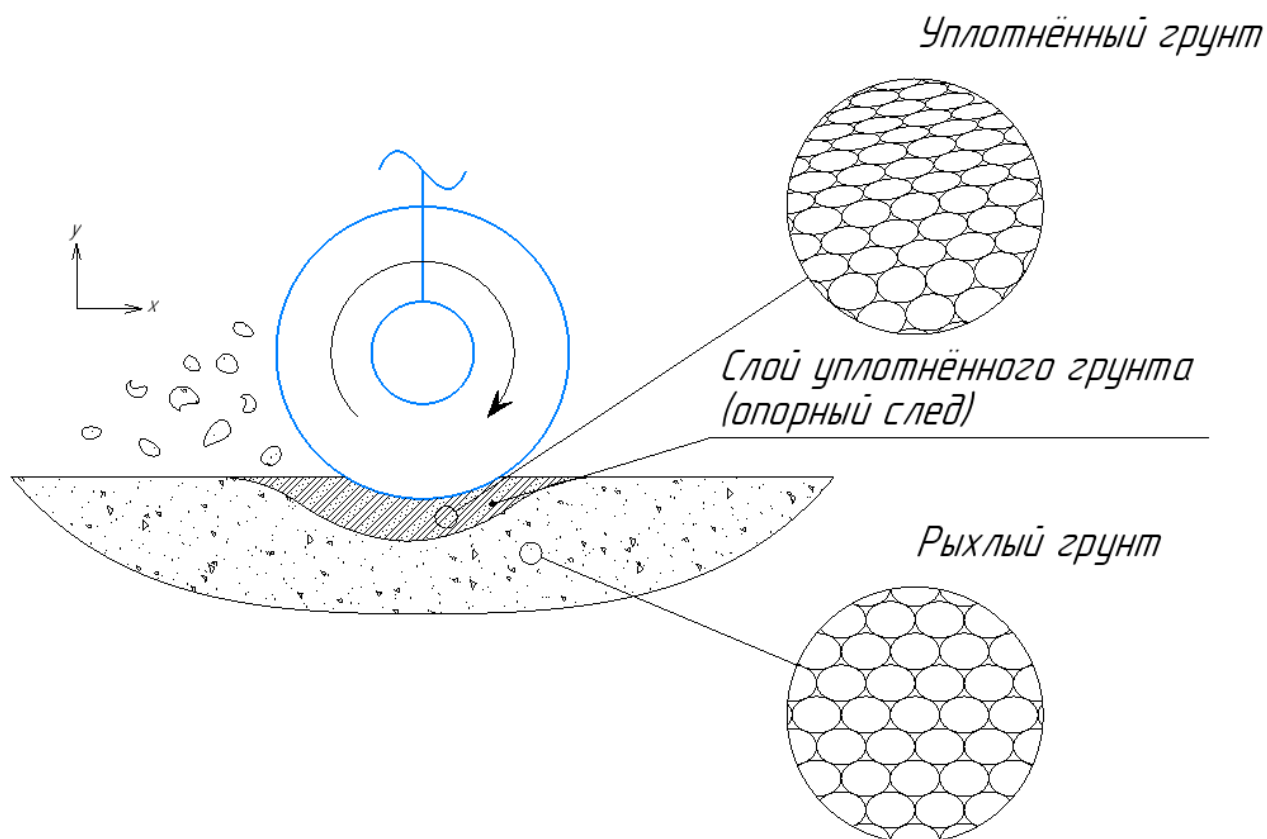
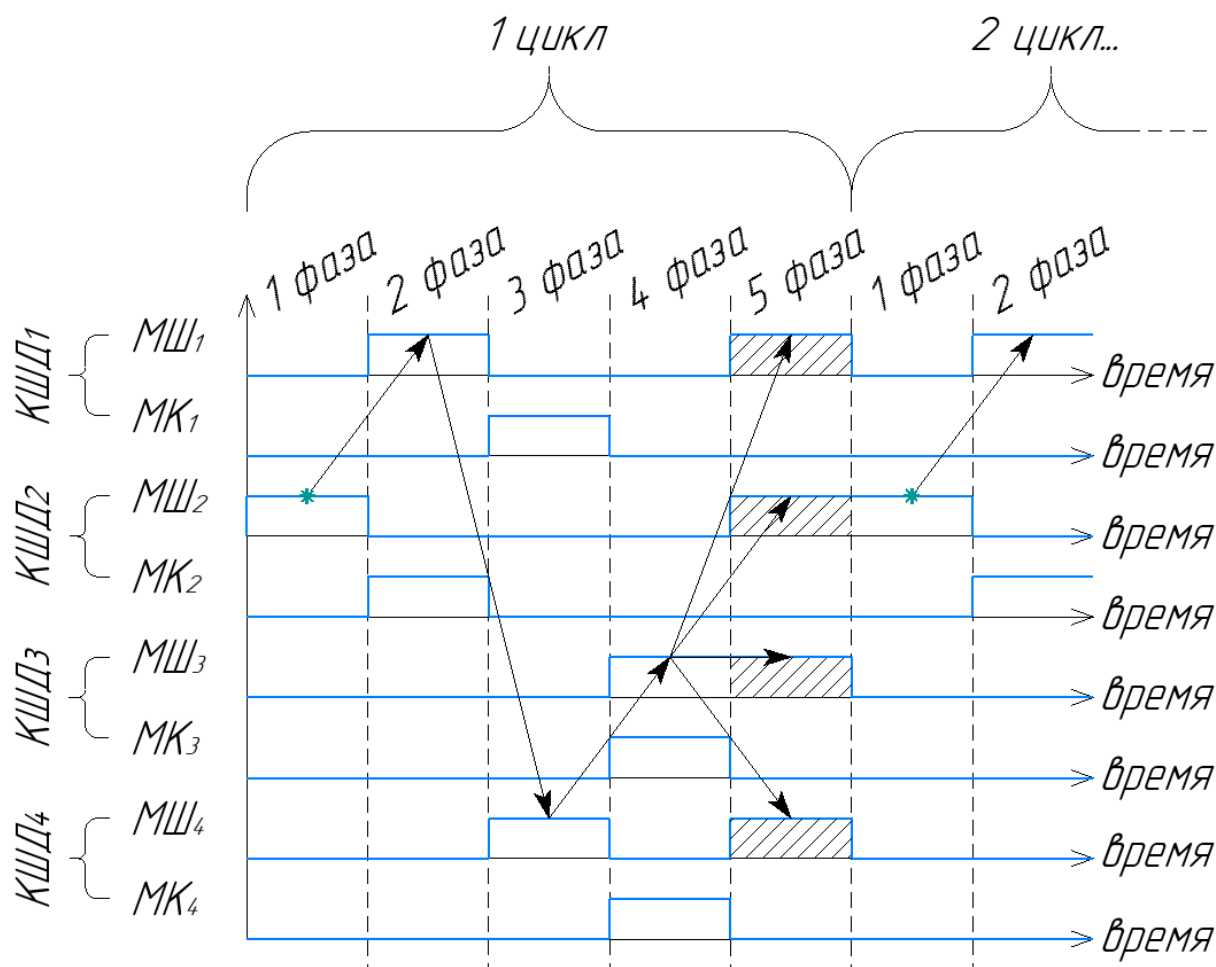


Рисунок 23 – Образование опорного следа при вращении колеса с неподвижным корпусом планетохода, вид сбоку

Следует дополнить циклограмму последовательностью включения вращения мотор-колёс (МК). Дополненная циклограмма изображена на рисунке 24.

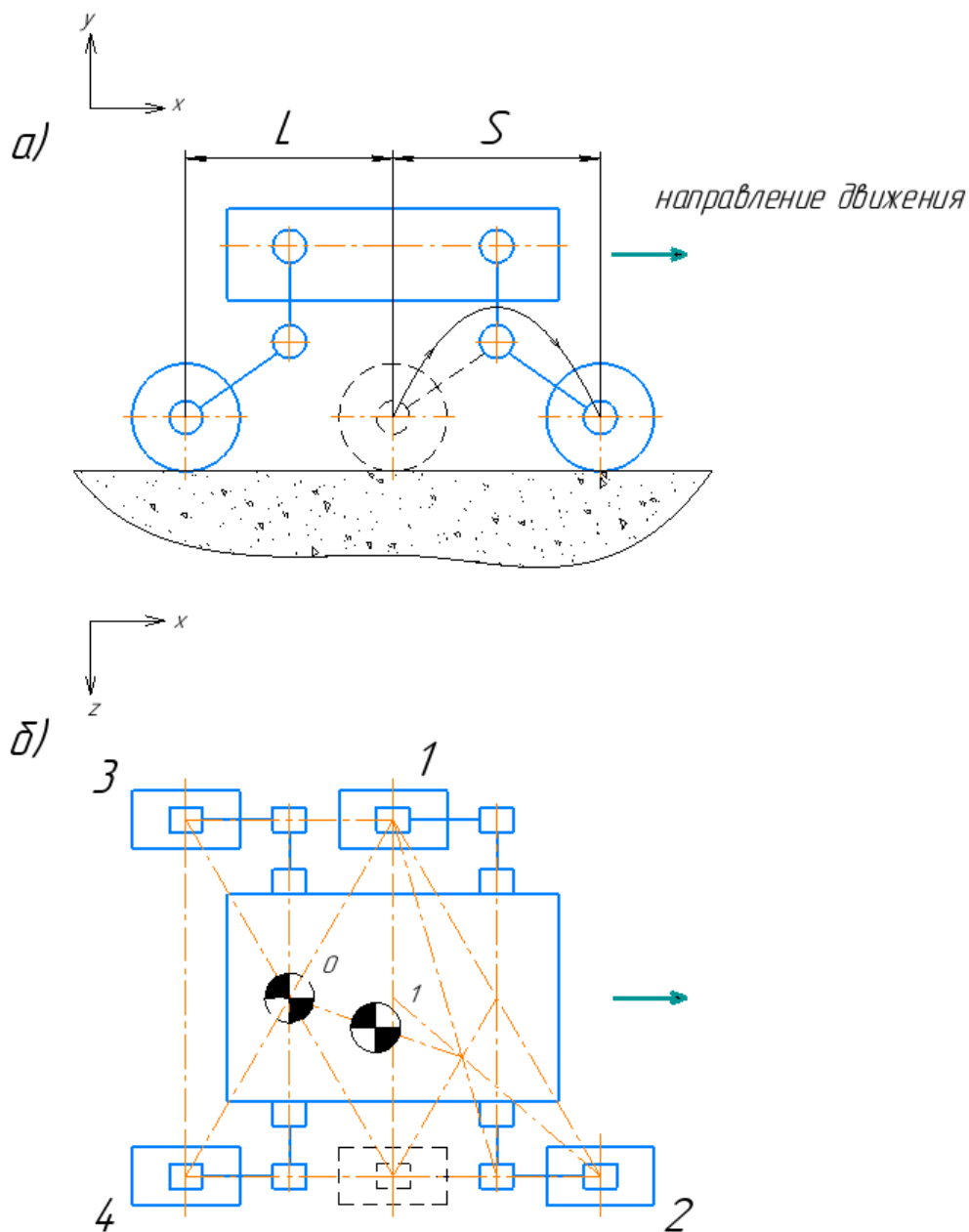
Полученная таким образом циклограмма отображает все последовательности активации приводов шагания и мотор-колёс для одного цикла. Ниже изложены 5 фаз шагания (1 цикл) с описанием активируемых приводов, а также траекторией движения центра масс.



МШ_{1..4} – механизмы шагания 1-4; МК_{1..4} – мотор-колёса 1-4; КШД_{1..4} – колёсно-шагающие движители 1-4;

Рисунок 24 – циклограмма для механизмов шагания

1 фаза. Активен привод механизма шагания МШ₂ (рис. 25):



L – колёсная база; S – длина перешагивания;

Рисунок 25 – Цикл шагания планетохода, 1 фаза: а) вид сверху; б) вид сбоку

Заметно смещение центра масс по сравнению с первоначальным положением машины (с точки 0 до точки 1). Длина перешагивания

$$S = i \cdot L, \text{ где } i \in Z.$$

В данном случае $i = 1$. Стрелкой показано направление движения колеса в процессе шагания. Цифрами обозначены порядковые номера движителей.

2 фаза. Активен привод механизма шагания МШ₁ и мотор-колесо МК₂ (рис. 26):

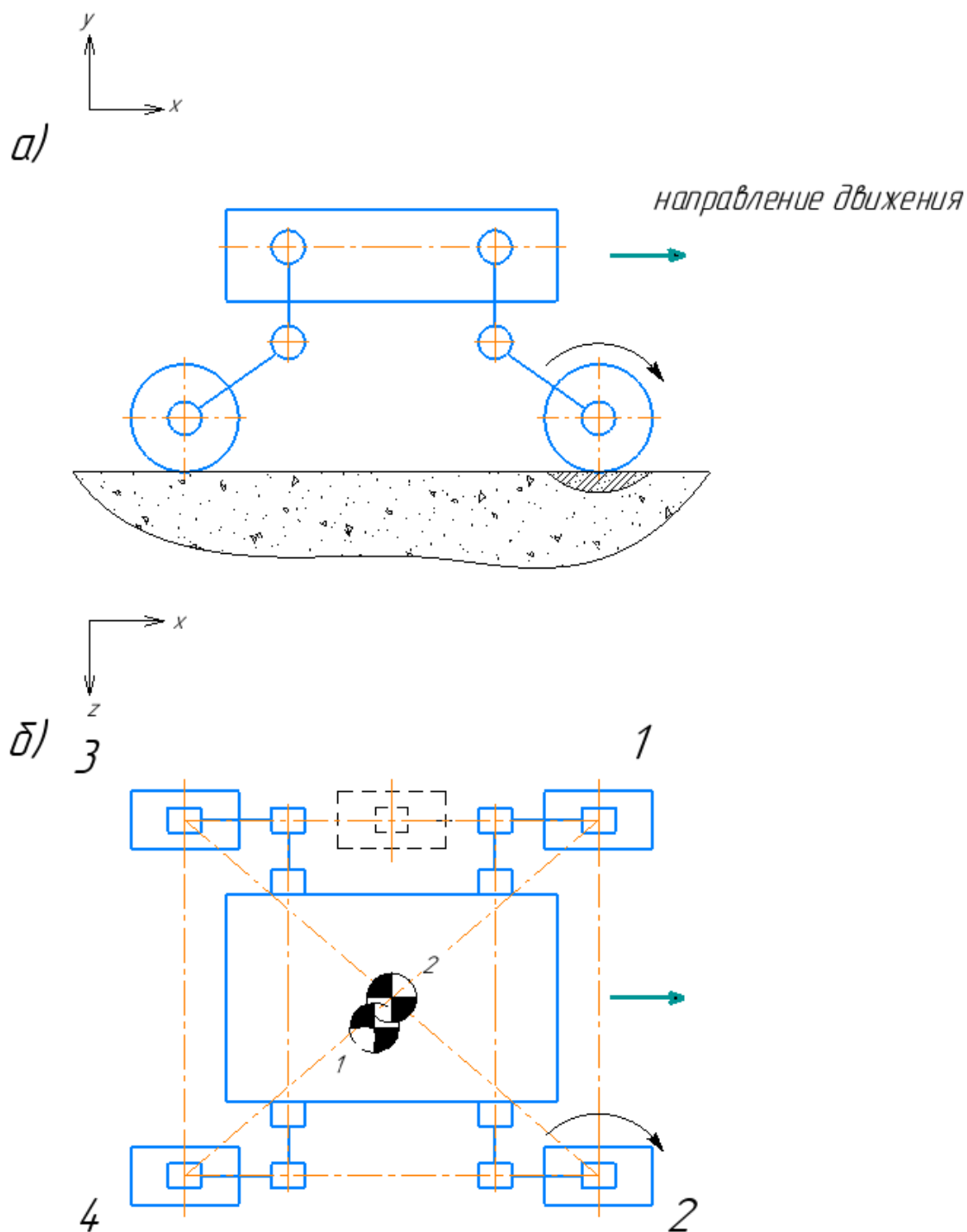


Рисунок 26 – Цикл шагания планетохода, 2 фаза: а) вид сверху; б) вид сбоку

Заметно смещение центра масс по сравнению с предыдущим положением машины (с точки 1 до точки 2).

3 фаза. Активен привод механизма шагания МШ₄ и мотор-колесо МК₁ (рис. 27). Центр масс смещается с точки 2 до точки 3.

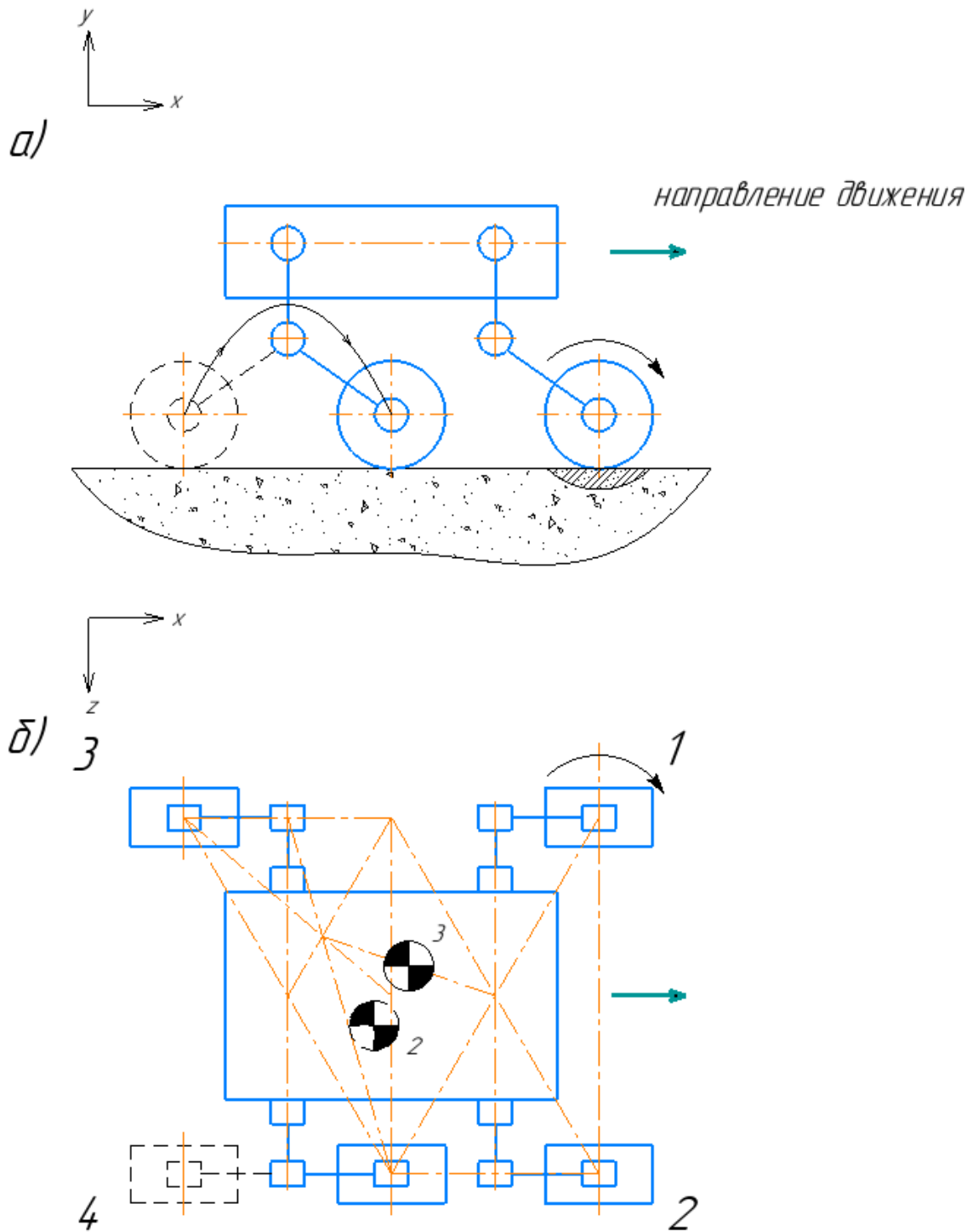


Рисунок 27 – Цикл шагания планетохода, 3 фаза: а) вид сверху; б) вид сбоку

4 фаза. Активен привод механизма шагания МШ₃ и мотор-колёса МК₃, МК₄ (рис. 28). Центр масс смещается с точки 3 до точки 4.

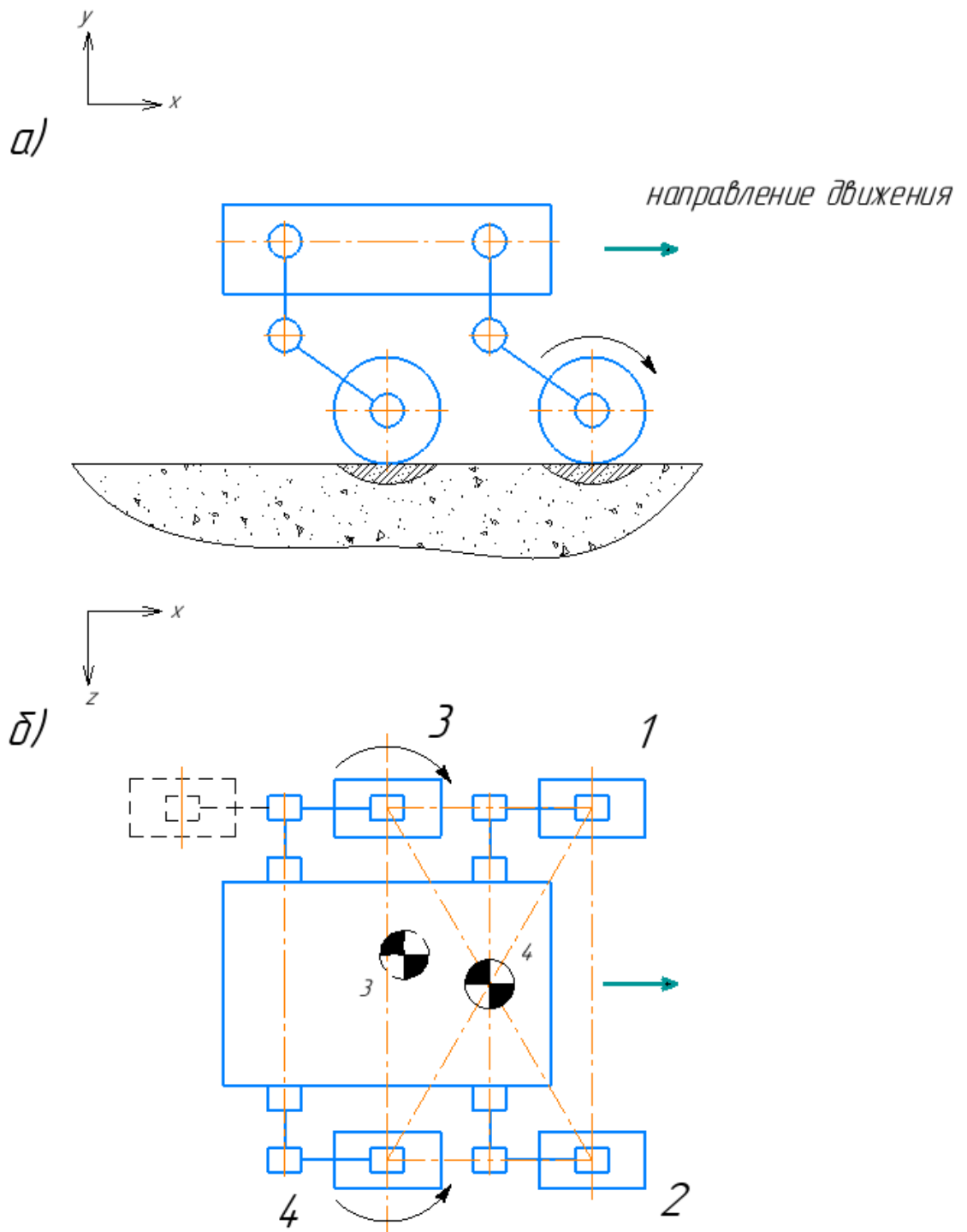


Рисунок 28 – Цикл шагания планетохода, 4 фаза: а) вид сверху; б) вид сбоку

5 фаза. Активны приводы механизмов шагания МШ₁, МШ₂, МШ₃, МШ₄ (рис. 29). В данной заключительной фазе активны все 4 привода шагания, которые перемещают планетоход вперёд по направлению движения. Центр масс смещается к задней части машины (с токи 4 до точки 0). На рисунке отображен опорный след при следующей фазе шагания (начало нового цикла).

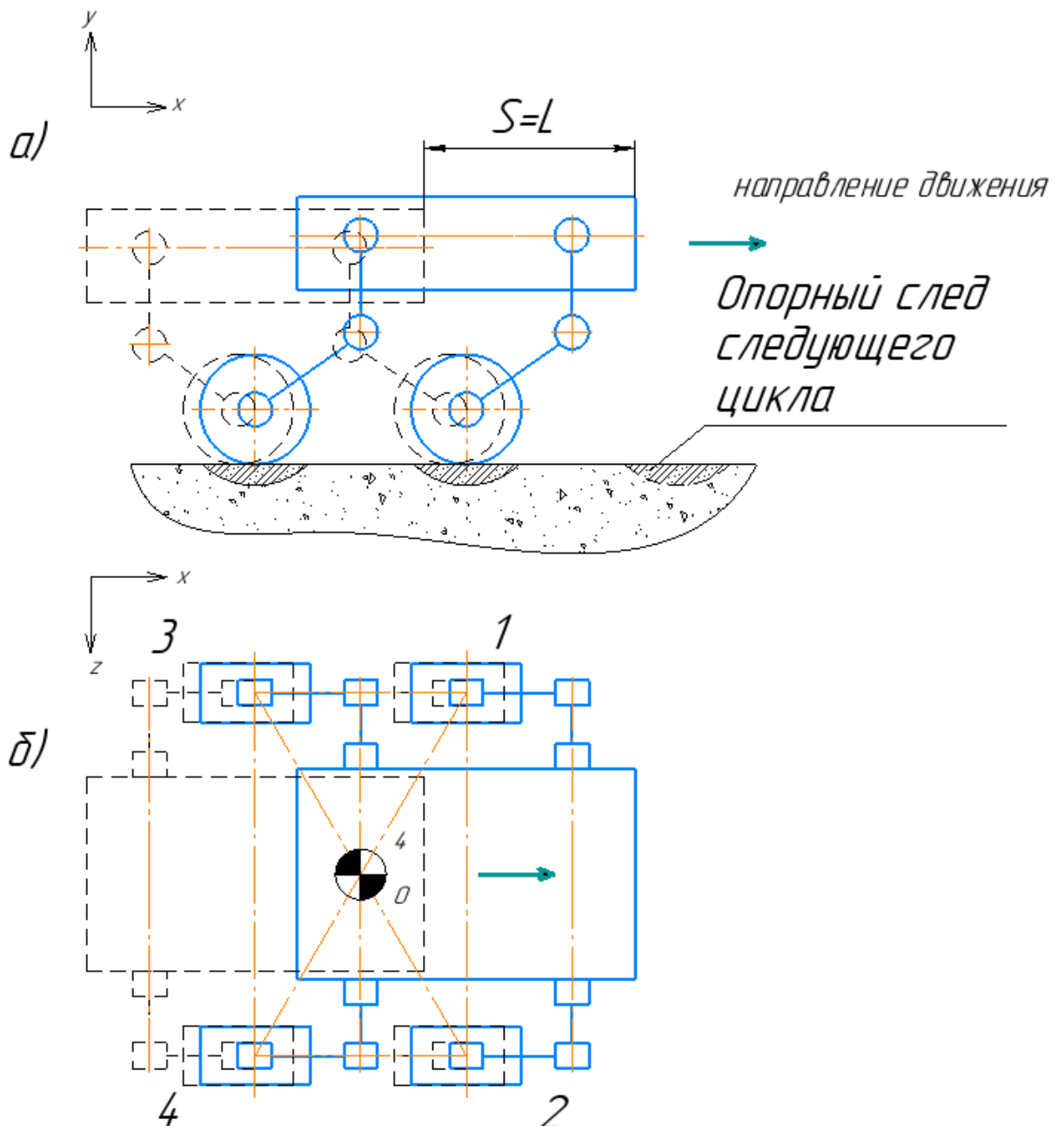


Рисунок 29 – Цикл шагания планетохода, 1 фаза: а) вид сверху; б) вид сбоку

Стоит отметить, что в процессе шагания в каждой из фаз происходит изменение положения центра масс (рис. 30), по этой причине следует предусматривать некоторое балансирующее устройство, компенсирующее это смещение. Задача проектирования такого устройства выходит за рамки данной работы и далее не рассматривается. Для упрощения предлагается рассматривать планетоход в процессе шагания как абсолютно устойчивый.

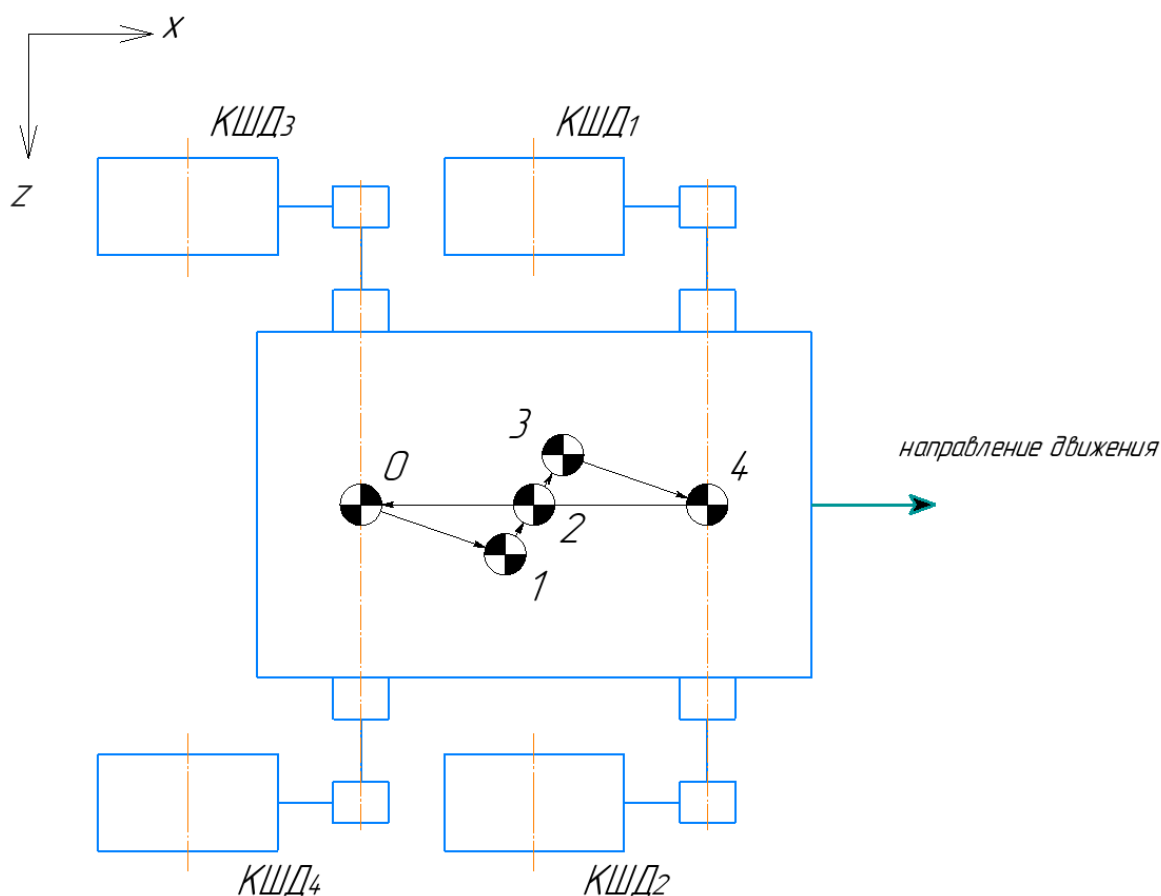


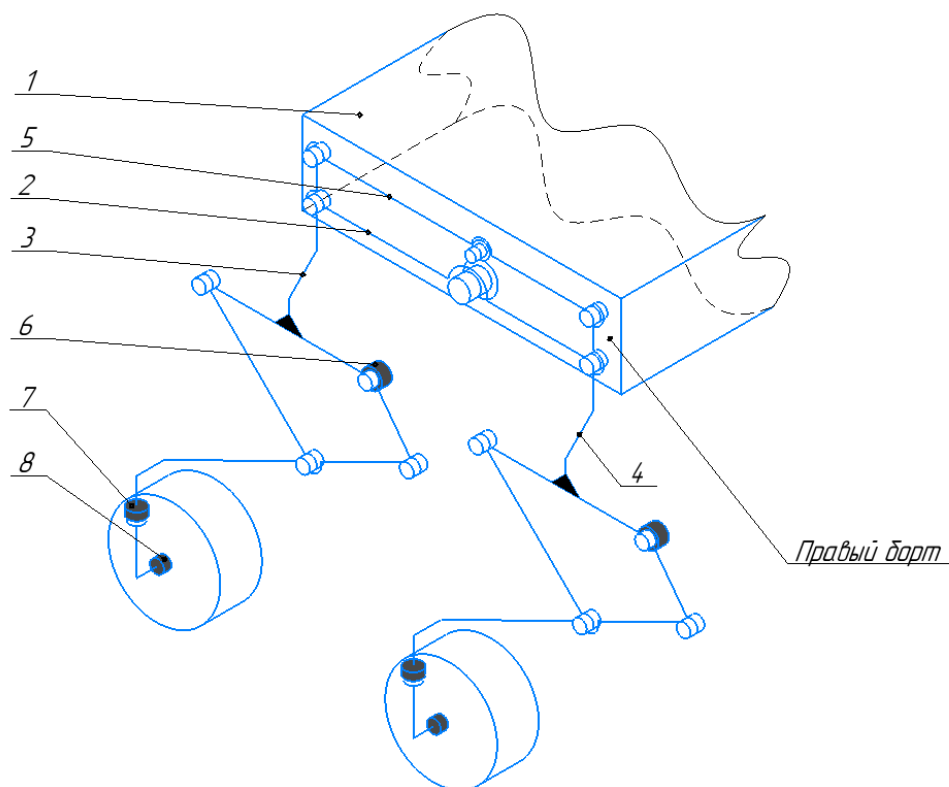
Рисунок 30 – Дрейф центра масс при различных фазах шагания планетохода, вид сверху

На рисунке выше изображено перемещение центра масс при разных фазах шагания. Смещение по точкам 0-1 соответствует 1 фазе, смещение по точкам 1-2 – 2 фазе и т.д.

Описанный выше пятифазный цикл шагания может повторяться несколько раз, пока планетоход не окажется на более устойчивой поверхности с менее рыхлым грунтом.

2.2 Разработка и описание кинематической схемы колёсно-шагающего движителя

Перед тем, как учитывать расчётные случаи и разрабатывать математическую модель, следует разобраться с компоновкой основных элементов лунохода. Рассмотрим структурно-кинематическую схему планетохода с движителями, изображённую на рисунке 31



1 – корпус; 2 – горизонтально качающееся коромысло; 3, 4 – вертикально качающиеся коромысла; 5 – вспомогательный шатун; 6 – привод механизма шагания; 7 – привод поворота колеса; 8 – привод мотор-колеса

Рисунок 31 – Структурно-кинематическая схема лунохода

Параллелограммные механизмы прикреплены к корпусу 1 на его левом и правом бортах (левый борт на рисунке выше не отображён). Эти механизмы состоят из качающегося коромысла 2 с заделкой в корпусе, вспомогательного шатуна 5 и вертикально качающихся коромысел 3, 4, к которым присоединены механизмы шагания 6. Привод поворота 7 обеспечивает руление мотор-колесом 8.

Так как основной задачей является разработка механизма шагания к данной мобильной робототехнической системе, то отображение подвески схемное. На рисунке 32 показана кинематическая схема колёсно-шагающего движителя, содержащего механизм шагания для левого переднего колеса.

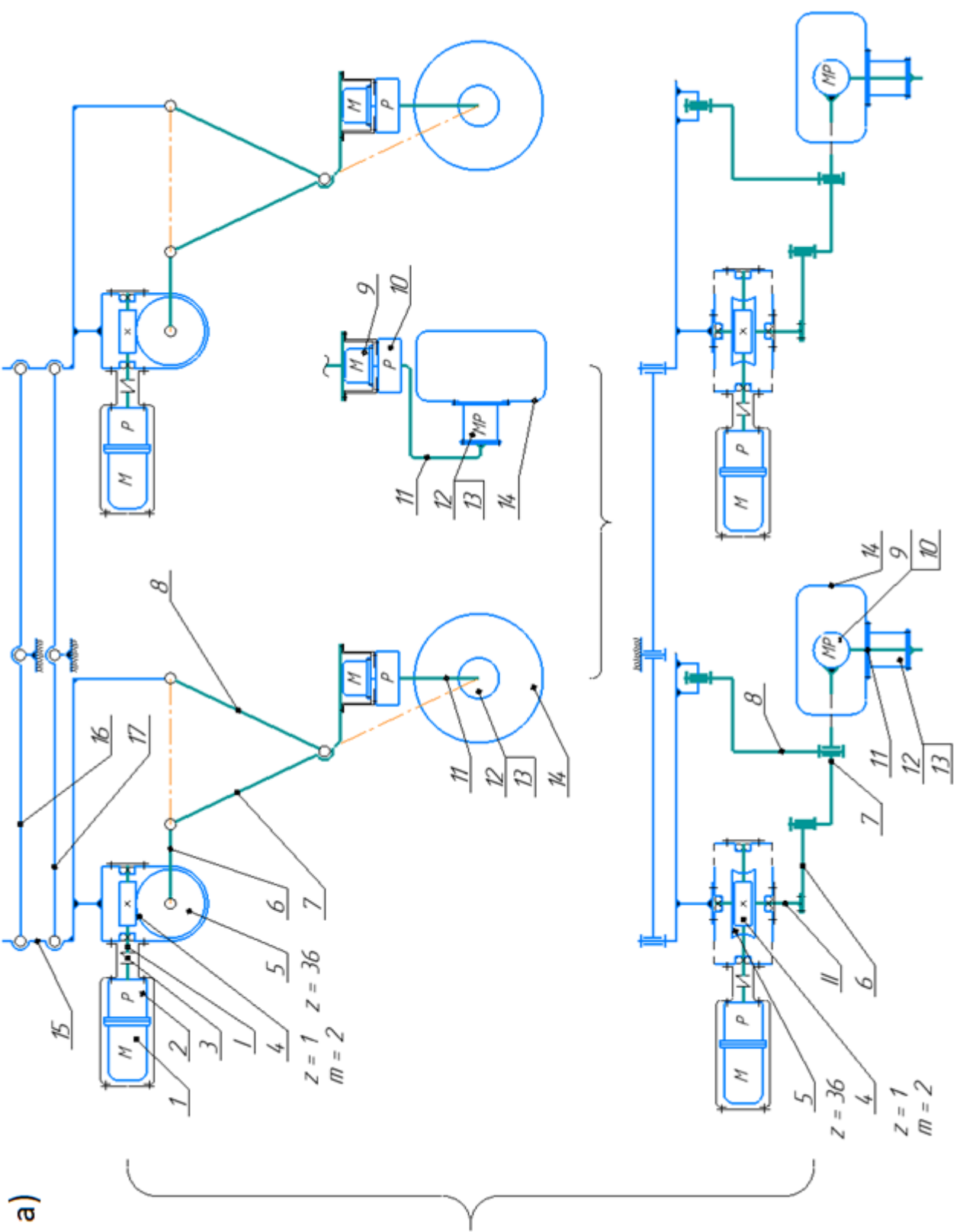
Двигатель 1 приводит в движение планетарный редуктор 2 и через компенсационную муфту 3 вращает вал I с закреплённым на нём червяком 4. Червяк приводит в движение червячное колесо 5, посаженное на вал II. Через фланцевое соединение вал II вращает кривошип 6. Коромысло 7 соединяет кривошип 6 и шатун 8 с помощью плоских шарниров.

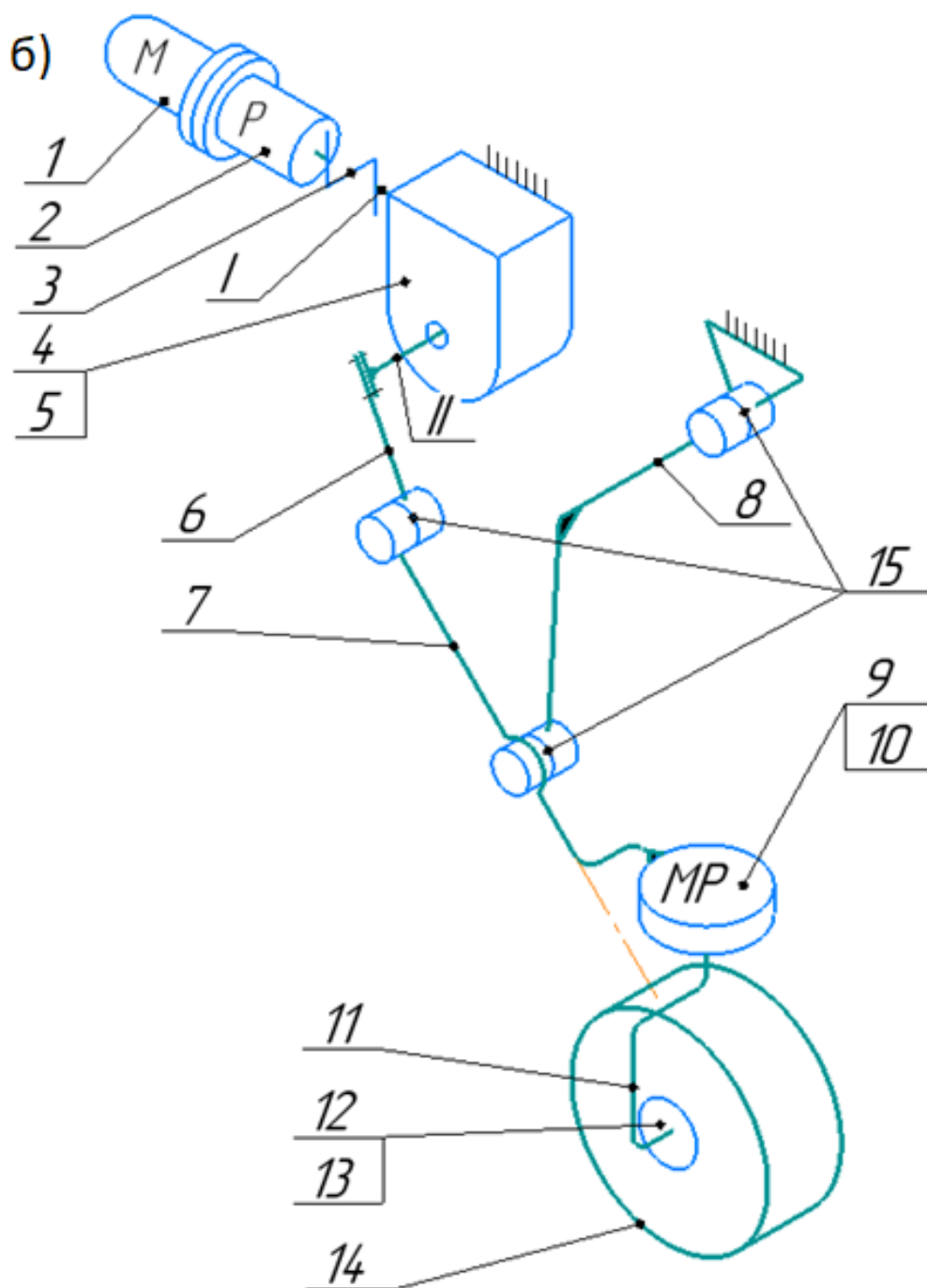
На другом конце коромысла 7 установлен привод поворота, состоящий из двигателя 9 и волнового редуктора 10. Работа привода поворота приводит к вращению рулевого рычага 11 с прикреплённым к нему мотор-колесом.

Мотор-колесо состоит из двигателя 12 и планетарного редуктора 13. На выходе этого привода установлено колесо 14.

Движитель монтируется на подвеску, содержащую вертикально качающиеся коромысла 15. Они в свою очередь держатся на основном и вспомогательном коромыслах 17 и 16 соответственно.

Таким образом, колёсно-шагающий движитель состоит из трёх приводов, выполняющих быстрое перемещение (мотор-колесо), шагание на случай застревания колёс в грунте (механизм шагания) и поворот колёс для корректировки курса движения (поворотный привод). Рассмотрим конструктивные особенности выбора тех или иных узлов данного движителя.





1 – двигатель; 2 – планетарный редуктор; 3 – компенсационная муфта;
 4 – червяк; 5 – червячное колесо; 6 – кривошип; 7 – шатун; 8 – шатун; 9 –
 двигатель; 10 – волновой редуктор; 11 – рулевой рычаг; 12 – двигатель;
 13 – планетарный редуктор; 14 – колесо; 15 – вертикально качающееся
 коромысло; 16 – вспомогательный шатун; 17 – горизонтально качающееся
 коромысло;

Рисунок 32 – а) кинематическая схема; б) аксонометрическое изображение колёсно-шагающего движителя

2.3 Описание конструкции механизма шагания

Особые окружающие условия при эксплуатации космической техники (высокий вакуум, радиация и т.п.) накладывают некоторые ограничения на узлы механизмов. Вместе с тем на поверхности Луны сила тяжести приблизительно в 6 раз ниже, чем на Земле, что позволяет значительно улучшить массогабаритные характеристики исполнительных узлов механизмов, и нагрузки на приводы будут соответственно ниже.

К механизму шагания (МШ) лунохода не предъявляются высокие требования по точности и скорости, поэтому основная задача при проектировании приводной части данного механизма шагания – наиболее лёгкая, простая и надёжная конструкция. Рассмотрим конструктивные особенности, возникающие при вышеизложенных требованиях.

В условиях лунной гравитации возникают сравнительно небольшие нагрузки на механизм шагания, следовательно, потребной момент на кривошипе механизма невелик. Обеспечить соответствующий момент на кривошипе может компоновка двигателя и редуктора, т.к. применение безредукторного привода увеличивает его вес почти в 50 раз. [11]

Решить задачу компоновки мотор-редуктора можно двумя способами:

- 1) Двигатель с высоким крутящим моментом и редуктор с небольшим передаточным числом;
- 2) Двигатель с малым крутящим моментом и редуктор с большим передаточным числом.

Первый вариант более выгоден по сравнению со вторым в плане энергоэффективности, но невыгоден в плане массы и габаритов. На привод МШ не накладываются высоких требований по энергоэффективности, поэтому лучше использовать привод с малым моментом и высоким передаточным числом.

Для обеспечения меньших габаритов, высокое передаточное число от одного редуктора лучше разбить на последовательно соединённые редукторы с

меньшими передаточными числами. В данном случае выгодно использовать последовательно соединённые планетарный и червячный редуктора.

В космической технике применение неметаллических элементов по типу уплотнителей, манжет и пр. крайне затруднительно, т.к. резина не выдерживает условий высокого вакуума и большого температурного поля. По этой причине следует пересмотреть классические для земных условий узлы деталей машин.

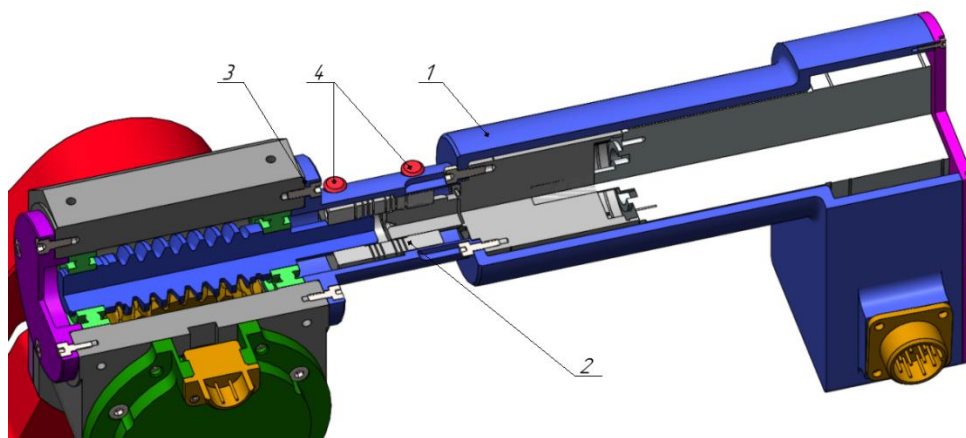
В связи с этим было решено двигатель и планетарный редуктор (ПР) выбрать по каталогу, а конструкцию червячного редуктора спроектировать самостоятельно, чтобы обеспечить особые для космоса условия работы.

Для соединения планетарного и червячного редукторов требуется установить муфту, компенсирующую неточности при монтаже. Такими свойствами обладает пружинная муфта, изображённая на рисунке 33. [18]



Рисунок 33 – Пружинная муфта

На рисунке 34 изображён способ обеспечения герметичности выходного вала привода шагания с пружинной муфтой. Привод помещён в закрытый корпус 1, который через глухое фланцевое соединение 3 стягивается болтами к корпусу червячного редуктора. Отверстия для монтажа муфты 2 после настройки закрываются пробками с конической резьбой 4. Чертёж этого узла изображён на сборочном чертеже (см. приложение В).



1 – кожух привода; 2 – компенсирующая пружинная муфта; 3 – фланцевое соединение; 4 – конические пробки

Рисунок 34 – Сборка привода механизма шагания в 3д модели, вырез в четверти

Энергообмен между приводами и контроллером движителя обеспечивается по защищённым от космической среды проводам. Провода объединены в жгут, обмотаны лентой, поверх надет чулок из стеклоткани. На рисунке ниже изображена последовательность подключения от приводов к контроллеру движителя. На рисунке 35 схематично изображено подключение проводов к контроллеру движителя.

Контроллер крепится к платику, соединяющий движитель с корпусом планетохода (на рисунке не изображён).

В процессе объезда препятствий, на приводах поворота колёс движителя возникающие неточности могут отклонить планетоход от курса движения. Требуемая точность по положению обеспечивается с помощью волнового редуктора с большим передаточным числом.

В мотор-колесо движителя встраивается планетарный редуктор, т.к. его многопоточная передача момента обеспечивает компактность привода.

Передачу осевых и радиальных сил между звеньями шагающего механизма можно обеспечить с помощью плоского шарнира, изображённого на рисунке 36.

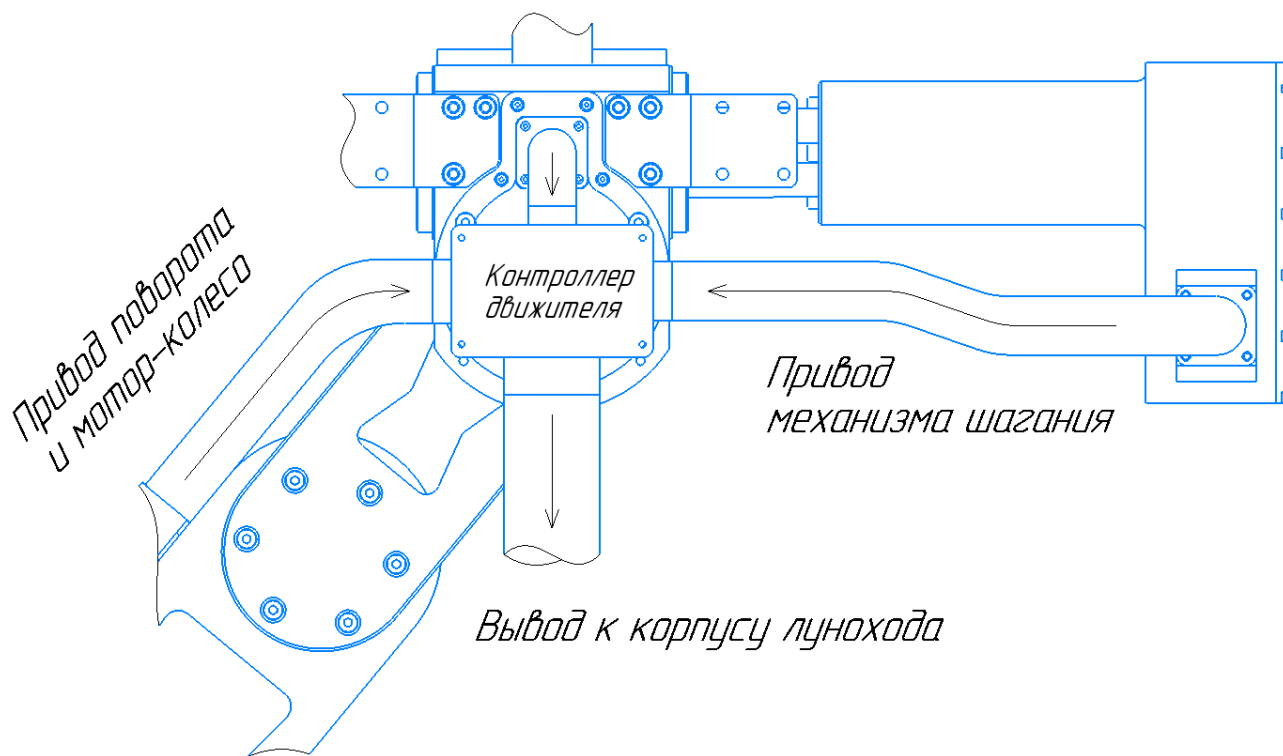
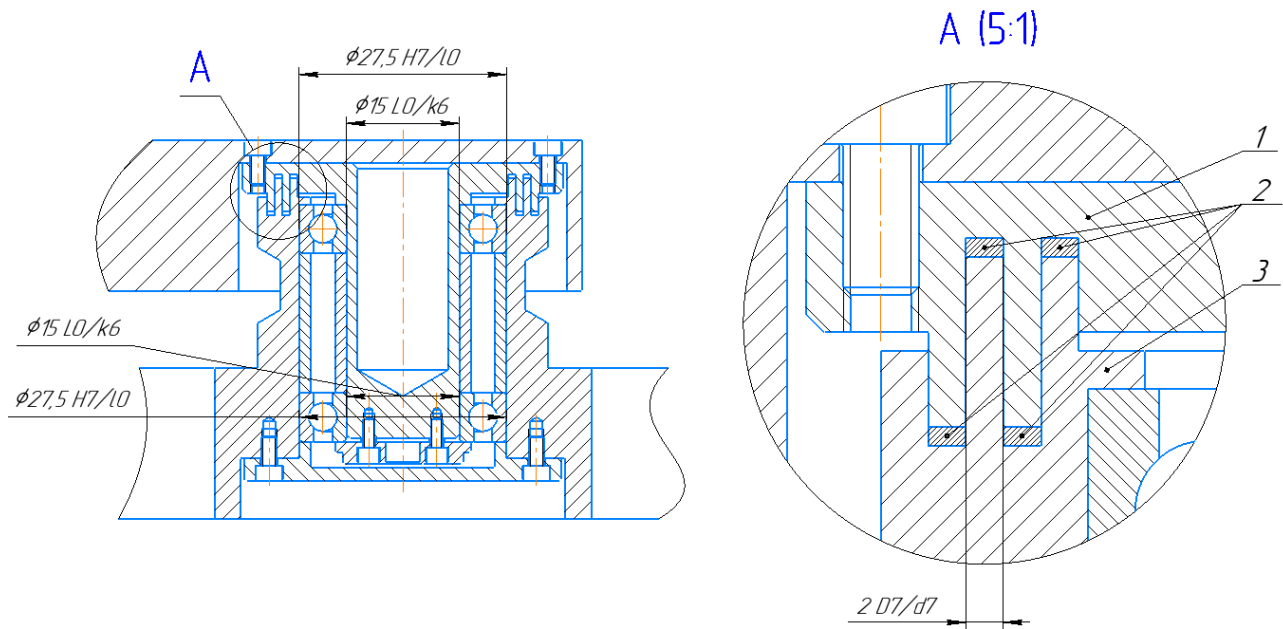


Рисунок 35 – Схематичное изображение подключения приводов к контроллеру двигателя



1 – вал с концентрическими канавками; 2 – магнитные кольца; 3 – ответная часть

Рисунок 36 – Плоский шарнир

Между валом 1 и ответной частью 3 обеспечен зазор в осевых канавках, в которых расположена твёрдая смазка, состоящая из смеси мелкодисперсного дисульфида молибдена и ферромагнетика. Ферромагнетиком служит никель, который, не ухудшая смазочных свойств порошковой смеси, придает ей необходимые магнитные свойства. В ответную часть 3 вклеены магнитные кольца 2, которые удерживают своим постоянным магнитным полем порошок внутри зазора, не давая ему вытекать наружу. Такое решение является заменой лабиринтному уплотнению с манжетой и также обеспечивает герметичность конструкции. [2] 3д модель такого шарнира изображена на рисунке 37.

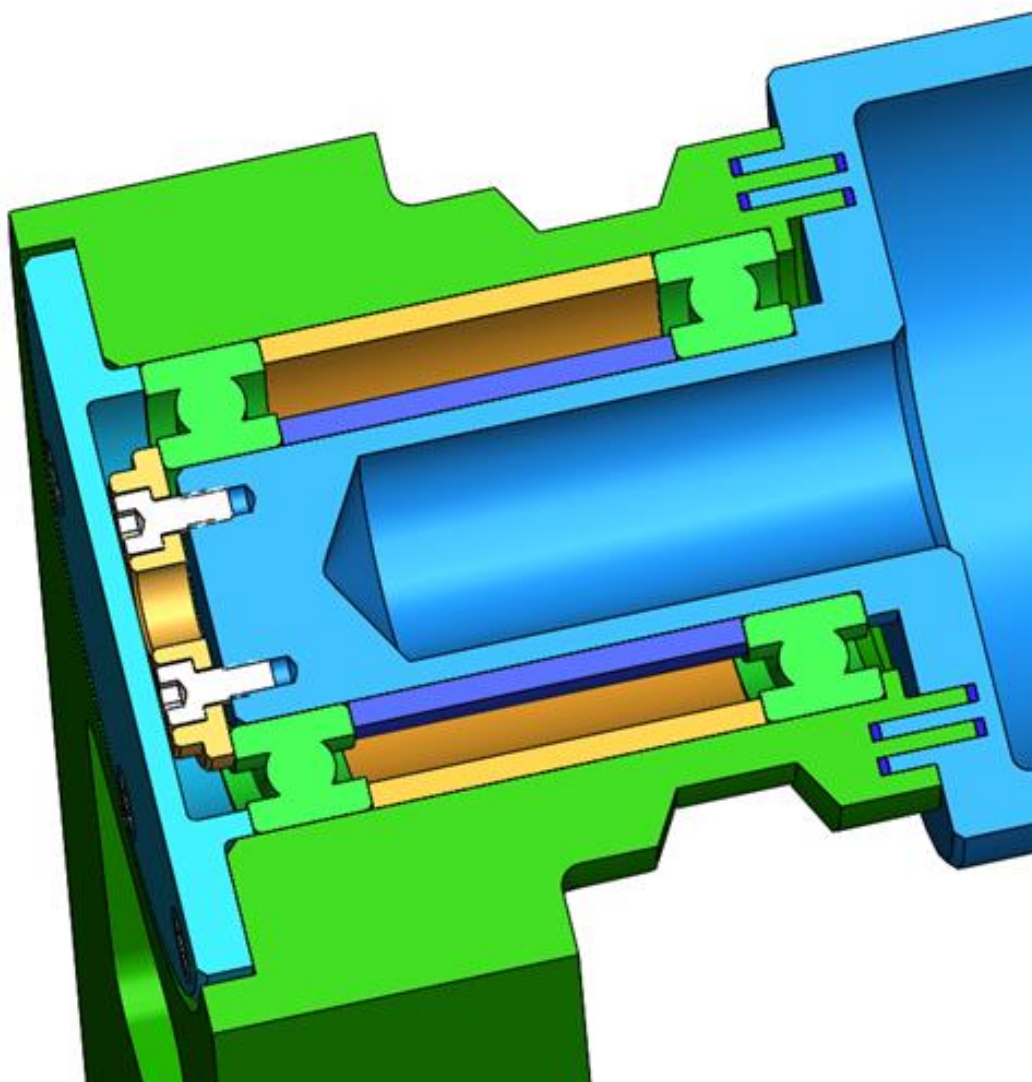


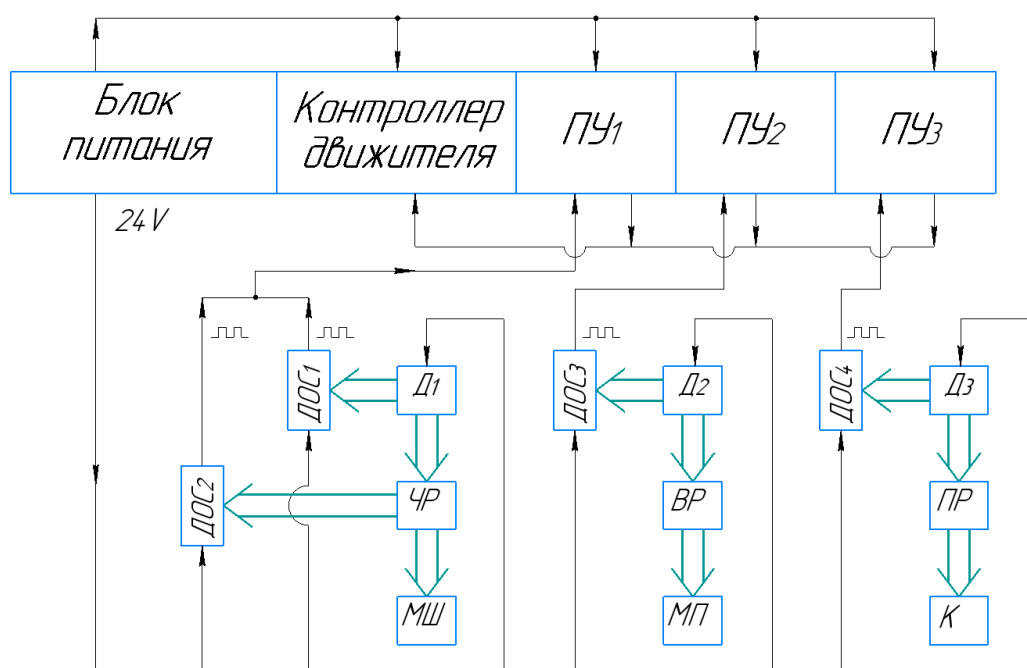
Рисунок 37 – Сборка плоского шарнира в 3д модели

2.4 Организация управления двигателем

Для функционирования мобильной робототехнической системы необходимо обеспечить её питание. Кроме источника питания требуется установить следящие системы, контролирующие приводную часть двигателя. Роль следящих систем выполняют платы управления, регулирующие питание на приводах и обеспечивающие обмен информацией с датчиков положения.

Для каждого двигателя устанавливается одно рабочее бортовое питание. По аналогичной системе производится контроль всех приводов в двигателе. Роль такой системы выполняет контроллер двигателя. Полученная система управления преобразует ШИМ сигналы с датчиков и передаёт на контроллер планетохода.

Структурно-функциональная схема для колёсно-шагающего двигателя изображена на рисунке 38.



ПУ₁, ПУ₂, ПУ₃ – платы управления; ДОС_{1...4} – датчики обратной связи; Д_{1...3} – двигатели приводов; ЧР – червячный редуктор; ВР – волновой редуктор; ПР – планетарный редуктор; МШ – механизм шагания; МП – механизм поворота; К – колесо

Рисунок 38 – Структурно-функциональная схема двигателя

За положением кривошипа на приводе механизма шагания (МШ) следят два датчика – один на выходном валу мотор-редуктора D_1 , а второй – на выходном валу червячного редуктора (ЧР). Два датчика здесь используются по нескольким причинам. Во-первых, из-за больших энергетических потерь привода, связанных с высоким передаточным числом редукторов на механизме шагания, положение механизма определить по одному датчику, расположенному на валу мотор-редуктора D_1 затруднительно. Возникают неточности положения, связанные с малой жёсткостью компенсационной муфты на выходе мотор-редуктора. Лучше разделить задачи позиционирования механизма и измерения угловой скорости двигателя на два отдельных датчика. Во-вторых, на случай выхода из строя одного из датчиков в процессе работы, можно использовать оставшийся, т.к. с обоих датчиков возможно получить скорость вращения и положения интегро-дифференциальными преобразованиями.

3 Расчёт механизма шагания

Для того, чтобы определиться с приемлемой траекторией шагания, габаритами механизма и типоразмером привода, необходимо рассмотреть расчётные случаи при шагании, после чего построить математическую модель, учитывающую основные аспекты данных случаев.

Математическая модель описывает кинематику и динамику механизма, позволяет определить положения звеньев, а также их скорости и ускорения. В результате данного анализа делаются выводы и рекомендации по выбору приводной части.

Расчётными случаями будут служить ситуации с наиболее опасными окружающими условиями для механизма шагания. На этом этапе задаётся модель поведения нагрузок на механизм, после чего можно выполнить поиск нагрузок на привод механизма.

3.1 Расчётные случаи

В первую очередь стоит рассмотреть номинальный режим работы механизмов шагания, когда планетоход шагает след в след.

В критической ситуации, когда планетоход застревает в грунте, не все приводы шагания могут работать. В такой ситуации следует рассмотреть случай протаскивания одним механизмом шагания всего планетохода.

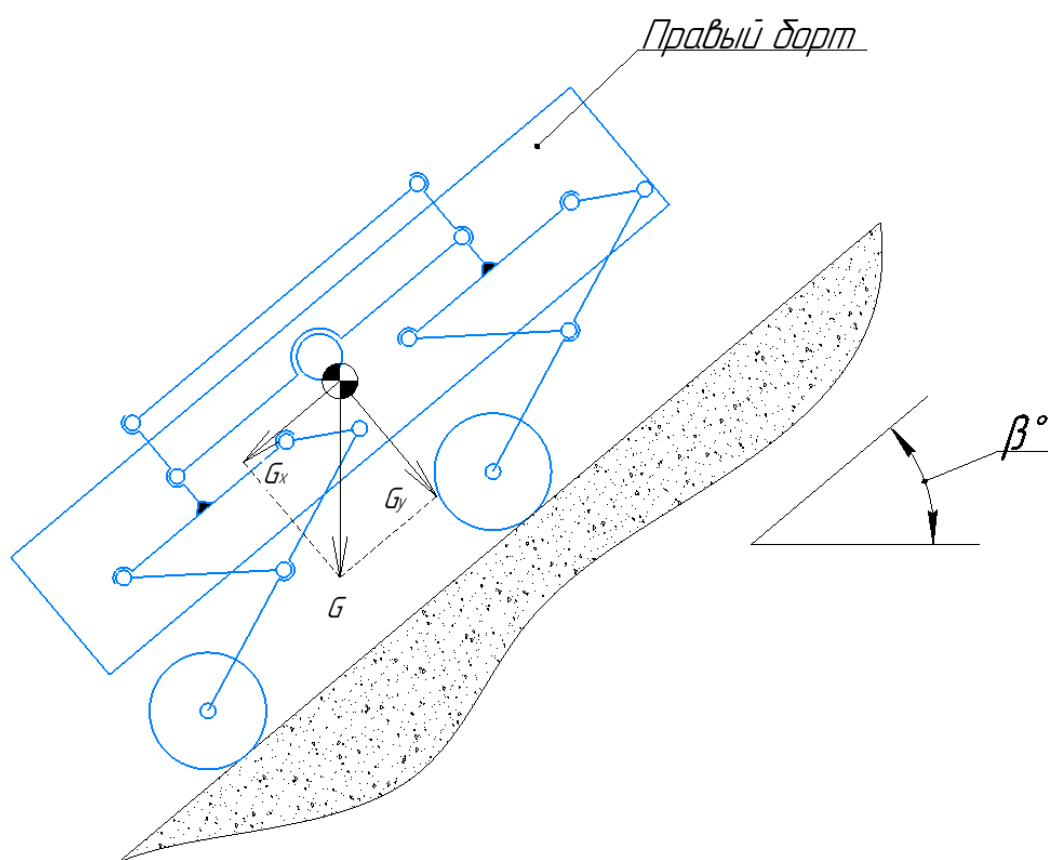
Для расширения возможностей механизма шагания, и, как следствие, повышения манёвренности, возможно рассмотрение случая перешагивания механизмов шагания ступенчатого препятствия с высотой, большей радиуса колеса. Однако такой режим шагания может не быть обеспечен, т.к. высота траектории шагания при её оптимизации не является требуемым критерием.

Вышеописанные случаи наиболее критичны, так как производят нагрузки на привод механизма шагания. Остальные ситуации, при которых данный привод не работает, не представляют интереса.

Расчётный случай 1

Рассмотрим расчётный случай, когда планетоход застревает в грунте на склоне кратера (рис. 39). В такой ситуации приемлемо движение механизмов шагания след в след, что обеспечивает высокую проходимость.

По такому способу шагания были проведены расчётные исследования и эксперименты, по результатам которых было выявлено, что макет с шагающим движителем след в след может преодолевать подъёмы с сыпучим грунтом вплоть до угла естественного откоса этого грунта. В таких условиях передвижение ни одним из распространённых движителей уже невозможно.[14]

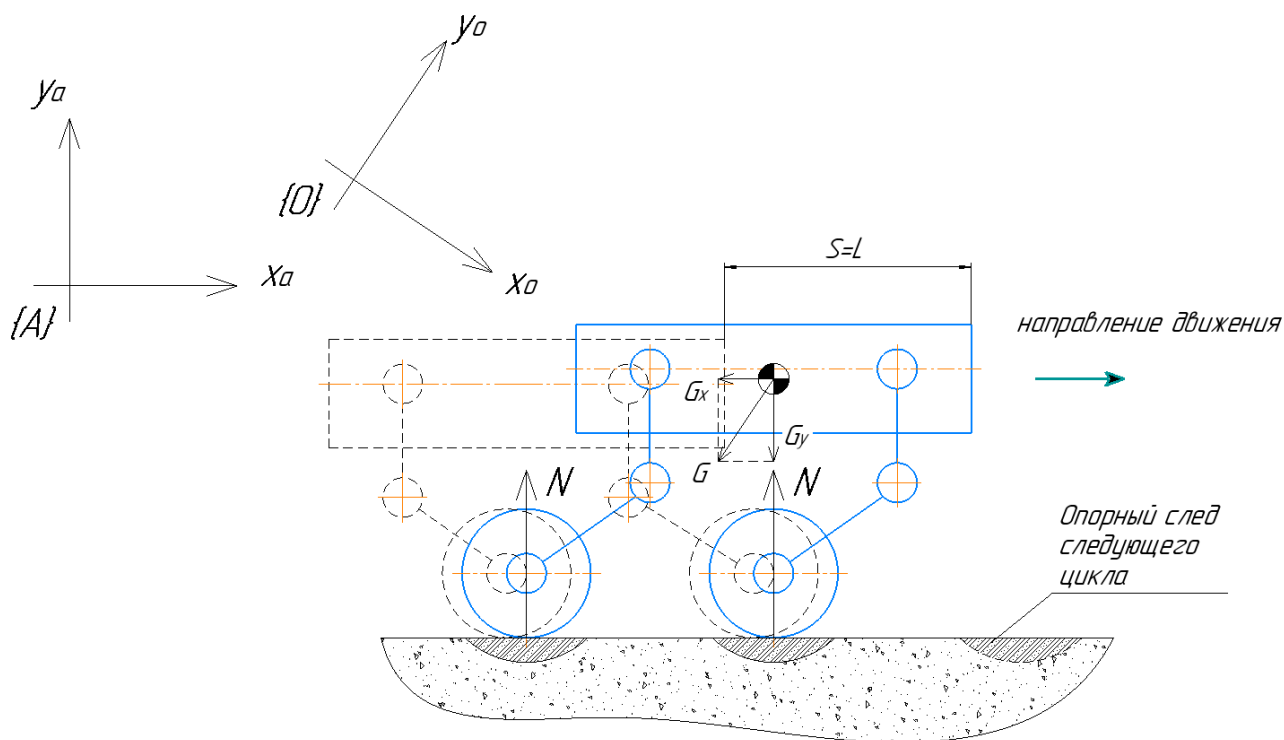


G_x, G_y – составляющие силы тяжести G ; β – угол наклона стенки кратера, градус

Рисунок 39 – Расчётный случай с застрявшим колесом на грунте под наклоном, вид сбоку

В процессе цикла последовательного перемещения колёс по опорным колёям, нагрузки на привод сравнительно невысоки, т.к. привод механизма

шагания при остановке стопорится о червячное колесо редуктора привода. Интерес представляет последняя фаза произвольного цикла шагания, когда все четыре движителя выводят планетоход в первоначальное положение, соответствующее первой фазе следующего цикла (рис. 40). Так как подвеска в данном случае не влияет на нагрузку механизмов шагания, дальнейшие схематичные изображения планетохода с движителями упрощены.



{O} – система координат абсолютная; {A} – система координат относительно планетохода; G – результирующая сила тяжести; G_x – проекция силы тяжести на OX_a ; G_y – проекция силы тяжести на OY_a ; N – нормальная реакция опоры, Н; S – длина шага; L – колёсная база

Рисунок 40 – Планетоход, вид сбоку

На рисунке выше изображен планетоход в последней фазе движения, в процессе которой производится перенос корпуса на длину шага S . Так как машина находится на склоне кратера, то сила тяжести при переносе системы координат относительно планетохода разделяется на составляющую по оси абсцисс и по оси ординат.

В данном случае важными являются две системы координат (СК): СК Луны $\{O\}$ и СК относительно корпуса планетохода $\{A\}$. Такой перенос сделан для удобства расчётов, т.к. расчёт всей модели для абсолютной СК приведёт к тригонометрическим преобразованиям для каждой силы. Нормальная реакция подразумевает реакцию опоры грунта на колёса движителей. Так как математическая модель лунного грунта еще относительно плохо изучена, предлагается для дальнейших расчётов взять аналог в виде кварцевого песка, по своим физико-механическим свойствам напоминающий реголит. [2]

Так как определить проскальзывание колёс в грунте без экспериментального подтверждения проблематично, расчётный случай предлагается упростить и далее рассматривать работу движителей с фиксированными опорами. Принципиально такая схема представляет собой четыре механизма шагания с заделкой на выходном звене и с прикрепленной к ним фермой в виде корпуса.

Расчётный случай 2

Рассмотренный выше расчётный случай соответствует номинальной работе механизмов шагания, однако стоит отметить чрезвычайные ситуации, когда опоры колёс застревают в грунте и не могут шагать. В таком случае любой свободный привод должен обеспечить шагание с последующим вытягиванием машины из зоны буксования. Для определённости рассмотрим расчётный случай, где вытягивающим будет движитель с передним по направлению движения колесом.

На рисунке 41 изображён расчётный случай, в котором может шагать только переднее правое колесо (подвеска не отображена). В отличие от предыдущего случая, здесь принцип шагания заключается в протаскивании механизмом шагания всего корпуса. Проскальзывание колеса должно учитываться, т.к. шагание подразумевает некоторый юз. Коэффициент юза и прочие характеристики грунта соответствуют кварцевому песку, как и в предыдущем случае.

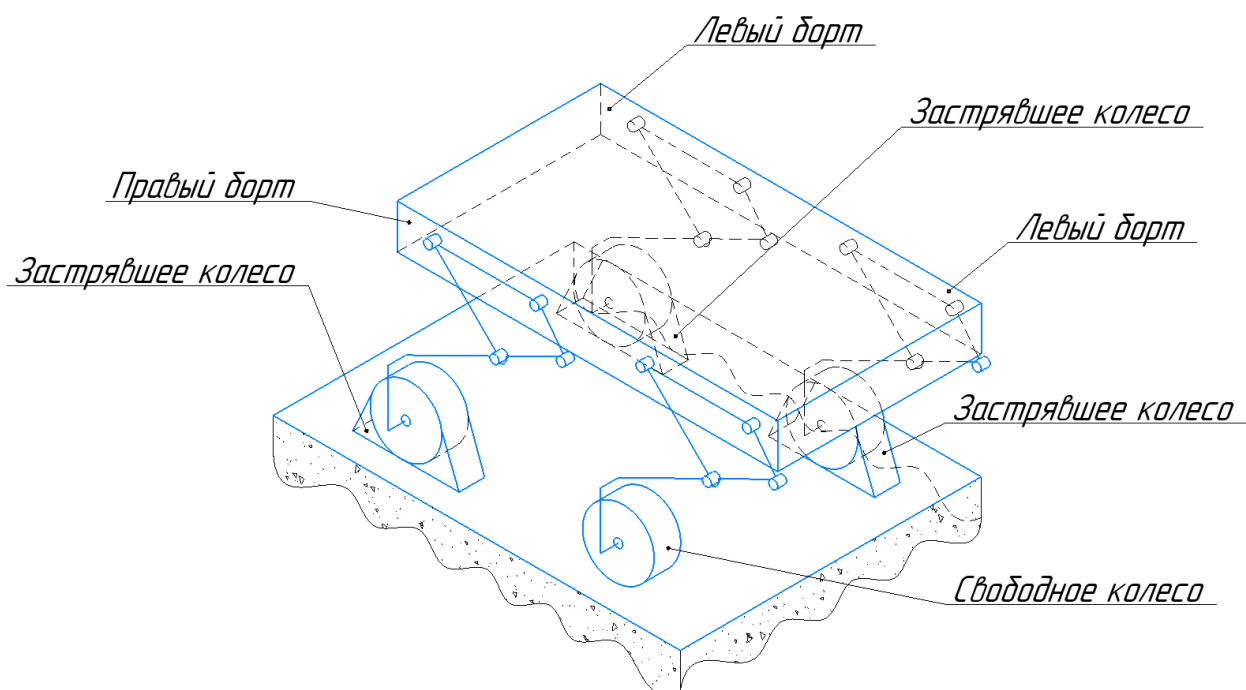


Рисунок 41 – Аксонометрическое изображение планетохода с тремя застрявшими движителями

Рассмотрим алгоритм шагания в аварийной ситуации, изображённый на рисунке 42. В случае застревания колёс, самое ненагруженное колесо протаскивает планетоход до тех пор, пока остальные колёса не будут освобождены от слоя грунта. Проверка работоспособности механизмов шагания выполняется после каждого цикла переноса и протаскивания.

Для лучшего продвижения планетохода от одного тянущего механизма шагания колёса на застрявших движителях свободно вращаются, чтобы обеспечивать меньшее сопротивление движению при вытягивании планетохода из зоны буксирования. Ещё меньшее сопротивление будет, если обеспечить вращение колёс по направлению шагания, однако расчёт тяговых характеристик колёсной базы движителя не входит в данную работу и далее не рассматривается.

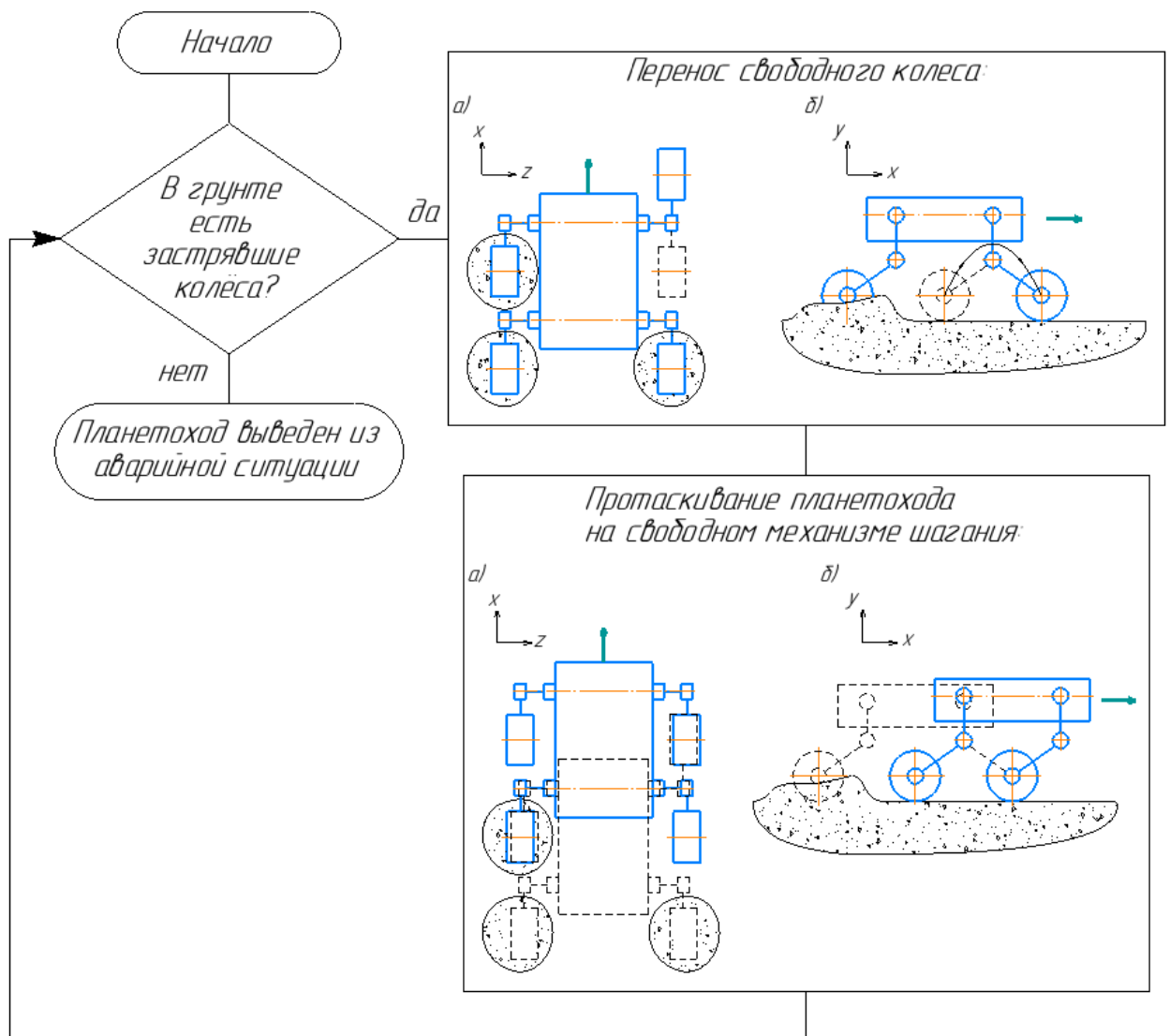
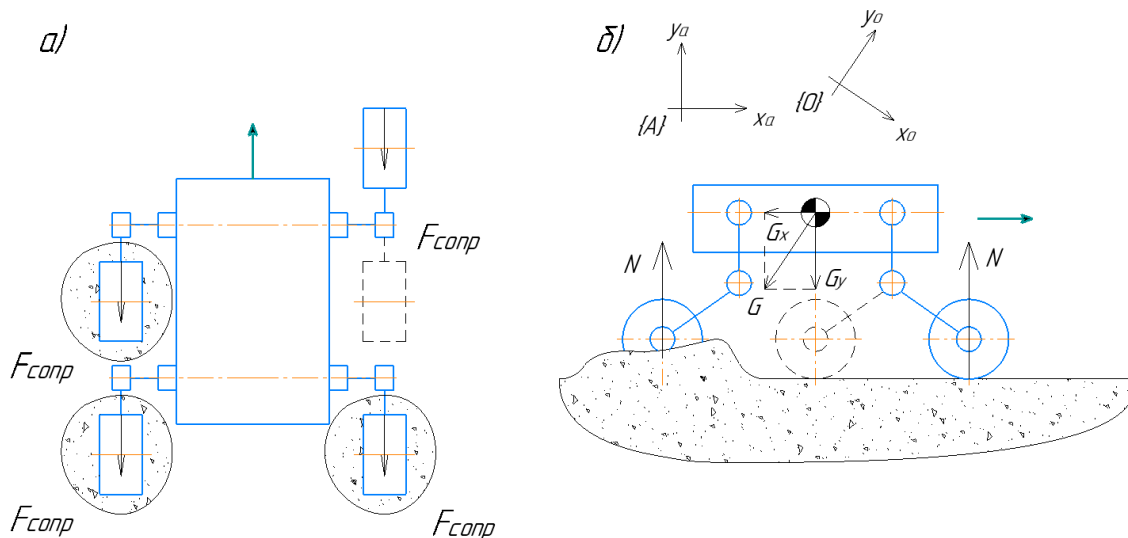


Рисунок 42 – Алгоритм при шагании в аварийной ситуации:
 а) Вид планетохода сверху; б) Вид планетохода сбоку

Так или иначе, свободно вращающиеся колёса будут создавать сопротивление движению, т.к. некоторая площадь колёс находится в объёме грунта, к тому же есть собственное сопротивление движению шагающего движителя. Так как эти силы для каждого колеса могут быть разными, и определение каждого из этих усилий невозможно без ряда экспериментов, предлагается взять усреднённое для всех колёс значение. На рисунке 43 изображена расчётная схема для такого случая (подвеска не отображена).



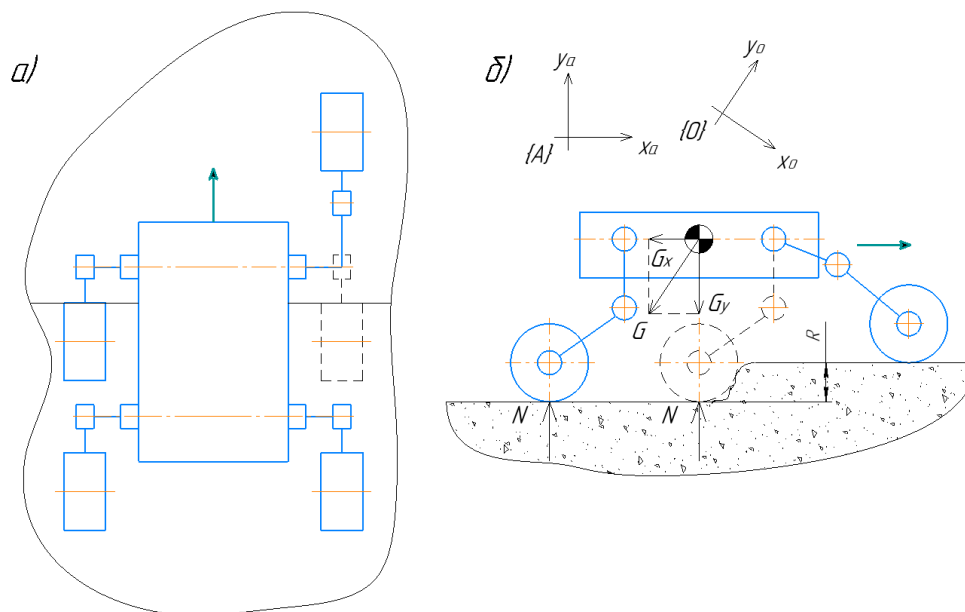
$\{O\}$ – система координат абсолютная; $\{A\}$ – система координат относительно планетохода; G – результирующая сила тяжести; G_x – проекция силы тяжести на Ox_a ; G_y – проекция силы тяжести на Oy_a ; N – нормальная реакция опоры; $F_{сопр}$ – сила сопротивления движению, Н

Рисунок 43 – Расчётная схема при работе одного механизма шагания: а) Вид планетохода сверху; б) Вид планетохода сбоку

Стоит отметить, что влияние усреднённых сил сопротивления движению $F_{сопр}$ на шагающий привод переменное, т.к. некоторый период времени колесо занесено над грунтом и на привод механизма шагания в этот момент не оказывается влияние сопротивления движению от колёс.

Расчётный случай 3

Для улучшения проходимости планетохода и расширения возможностей колёсно-шагающего движителя стоит рассмотреть расчётный случай, при котором планетоход сталкивается с препятствием, по высоте меньшим или равным радиусу колеса (рис. 44).



R – радиус колеса

Рисунок 44 – Перешагивание препятствия: а) Вид планетохода сверху; б) Вид планетохода сбоку

На рисунке выше изображён случай при столкновении планетохода с препятствием, равным по высоте радиусу колеса R (подвеска не отображена). Данный расчётный случай является исключительно дополнением к функционалу механизма шагания, поэтому возможность перешагивания препятствия может быть не обеспечена в результате синтеза траектории шагания.

Составим сравнительную таблицу с описанием критериев для расчёта.

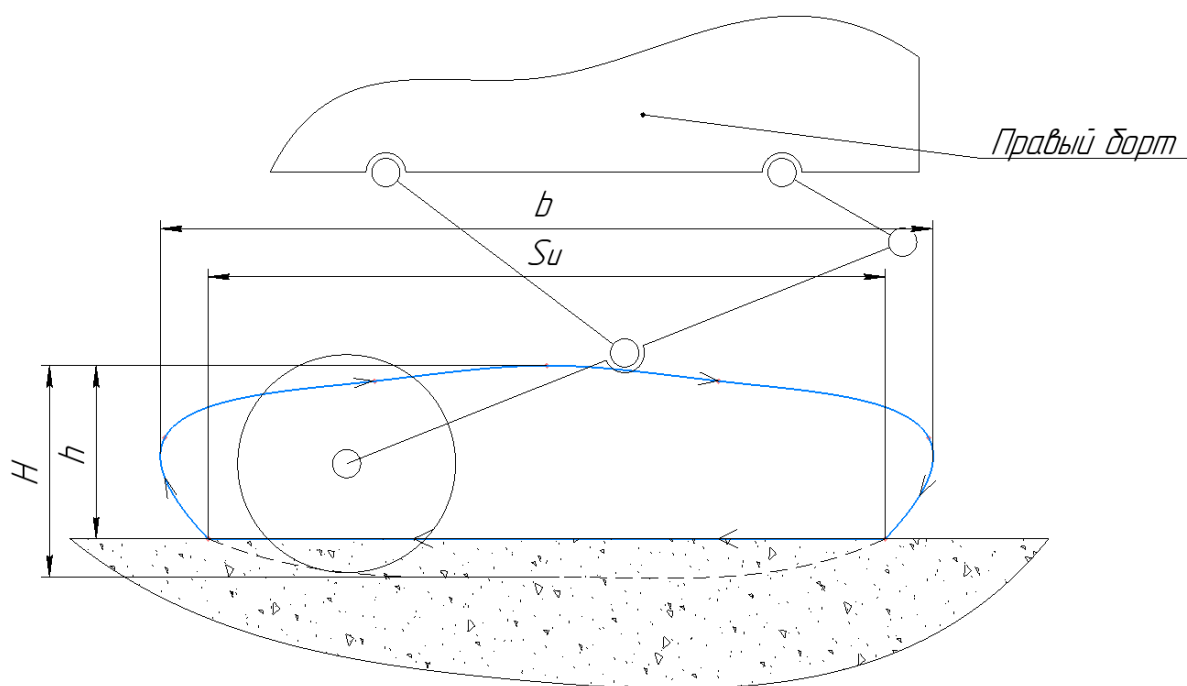
Таблица 6 – Требования к расчётным случаям

	Расчётный случай 1	Расчётный случай 2	Расчётный случай 3
Критерии при расчёте	<ul style="list-style-type: none"> - Опоры движителя неподвижны - Работают все приводы шагания 	<ul style="list-style-type: none"> - Сопротивление движению грунта приложено ко всем колёсам движителя - Работает один привод шагания 	<ul style="list-style-type: none"> - Высота траектории шагания выше или равна радиусу колеса (по возможности)

3.2 Геометрический расчёт и оптимизация траектории шагания

Задачей геометрического анализа привода механизма шагания является определение оптимальной траектории шагания.

В первую очередь, стоит определить вид траектории шагания. Для механизма Чебышева характерна траектория, изображённая на рисунке 45.



b – протяжённость траектории; H – высота траектории; $S_{и}$ – длина используемого шага; h – высота используемого шага

Рисунок 45 – Траектория движения нижней точки колеса механизма шагания

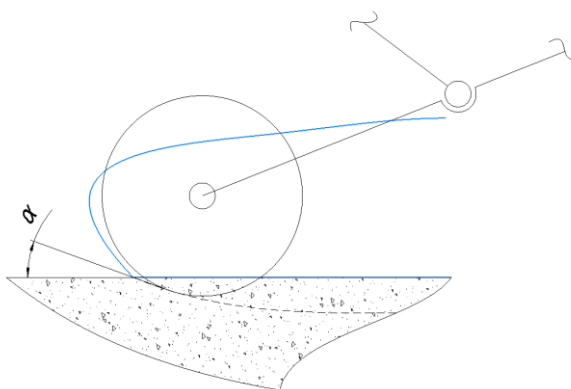
Ни один из участков траектории для данного механизма не является прямолинейным, по причине чего некоторая часть траектории всегда будет находиться условно под поверхностью грунта. Это геометрическое свойство можно использовать для определения длины шага механизма, т.к. при прохождении вышеописанного участка колесо упирается в грунт и производится шагание. Протяжённость такого участка называется используемым шагом $S_{и}$. Высота траектории H , и, как следствие, высота

используемого шага h в данном случае не подбираются, а являются следствием геометрии механизма шагания.

В теории механизмов шагания некоторые параметры траектории определяются экспериментально [2], по этой причине предлагается часть этой теории упростить для приемлемой расчётной модели. Определим геометрические условия для определения длины используемого шага $S_{и}$.

При проектировании механизмов и машин существует понятие угла давления. Это угол между вектором линейной скорости выходного звена и реакцией, действующей с ведущего звена на выходное звено. Эта реакция без учета сил трения направлена по общей нормали к взаимодействующим поверхностям. Угол давления определяется экспериментально. Для классического кулачкового механизма с поступательно движущимся толкателем допустимый угол давления равен $25^\circ \dots 35^\circ$. [21]

В случае воздействия выходного звена (грунт) на ведущее звено (колесо) возникают деформации грунта, по причине чего угол давления изменяется (рис. 46). Для определённости допустим значение угла давления $\alpha = 20^\circ$. В таком случае появляется некоторое пятно контакта – участок траектории с протяженностью, равной длине используемого шага $S_{и}$.

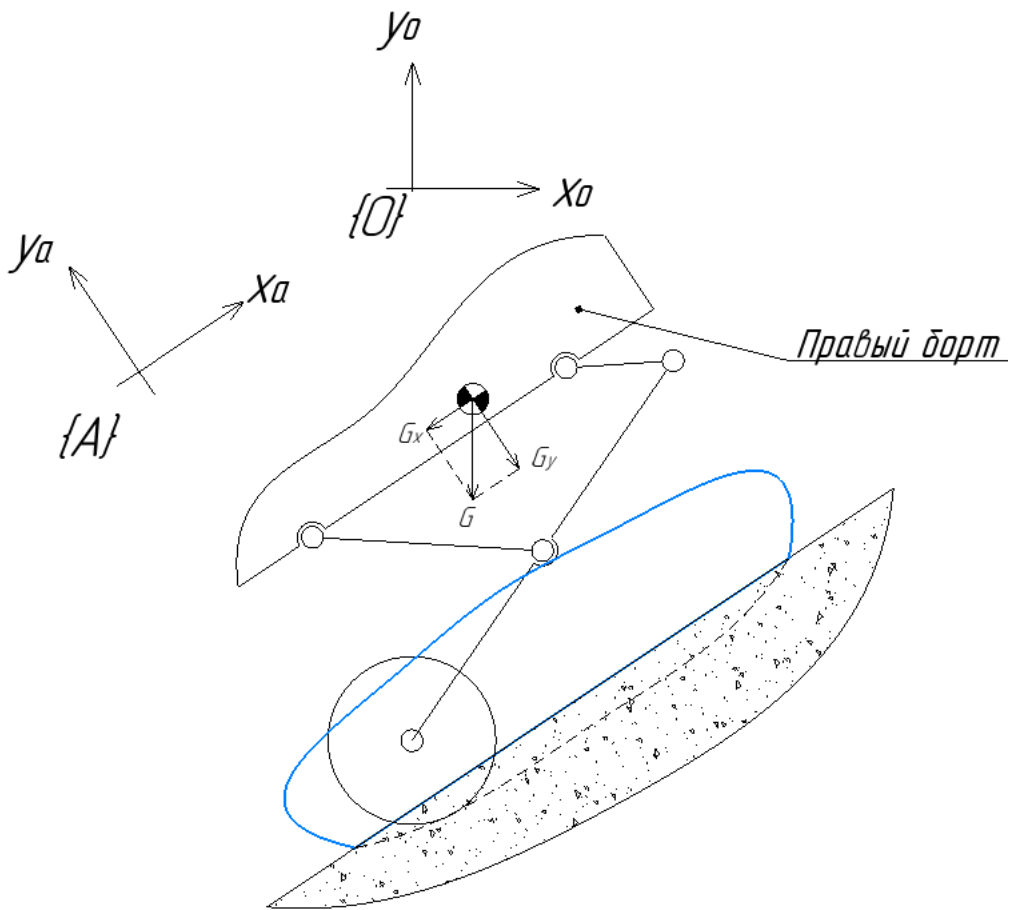


α – угол давления колеса с грунтом

Рисунок – 46 Участок траектории шагания

В участке контакта колеса с грунтом угол давления совпадает с углом между касательной траектории шагания и горизонтом. По этой причине, далее рассматривается геометрическая зависимость этого угла от положения механизма.

Далее предлагается рассмотреть процесс шагания по наклонной стенке кратера – таким образом, будет рассмотрена ситуация, когда проекции силы тяжести дополнительно увеличивают нагрузки на привод механизма шагания. На рисунке 47 изображён механизм шагания на наклонном участке с отображённой траекторией движения колеса.

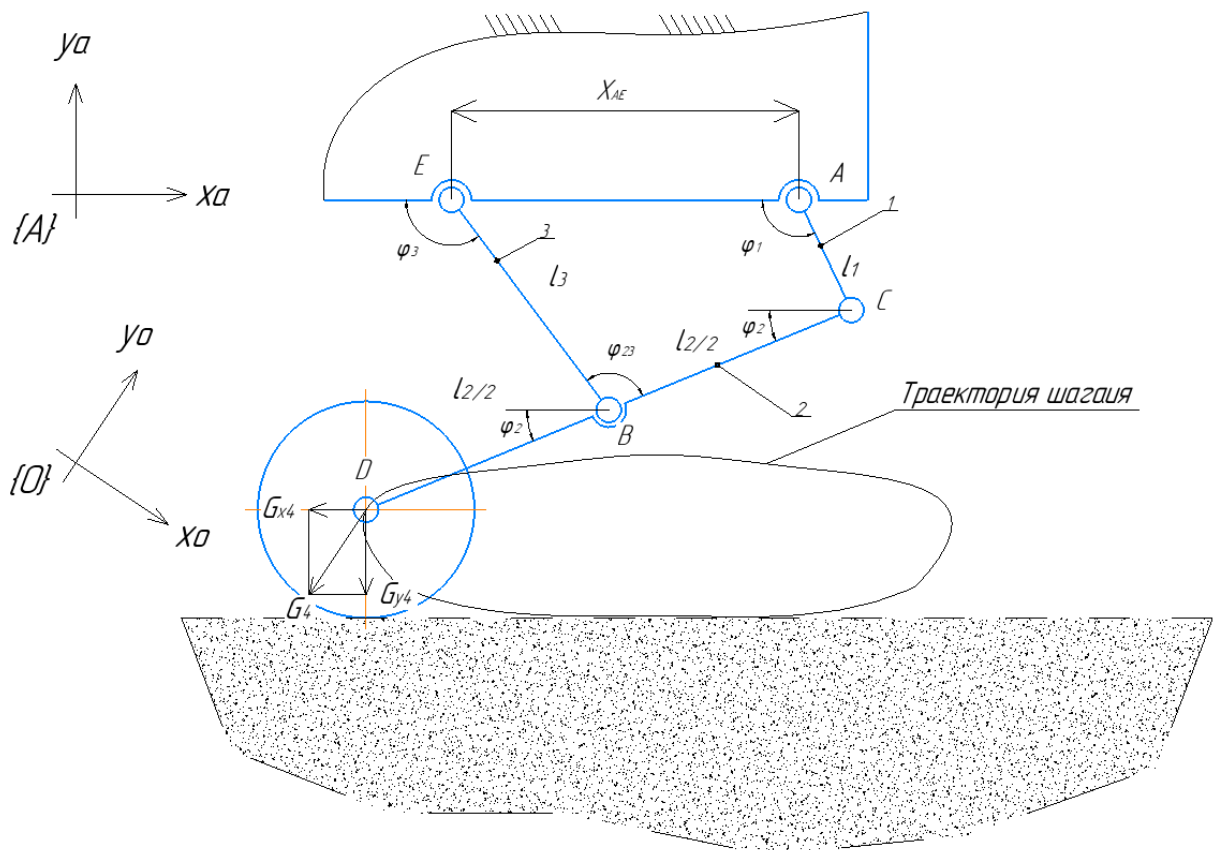


$\{O\}$ – система координат абсолютная; $\{A\}$ – система координат относительно планетохода; G – результирующая сила тяжести; G_x – проекция силы тяжести на OX_a ; G_y – проекция силы тяжести на OY_a

Рисунок – 47 Участок траектории шагания

Корпус планетохода условно фиксируется, и траектория движения рассматривается относительно системы координат (СК) планетохода $\{A\}$. Введём буквенно-цифровые обозначения звеньев и точек механизма шагания.

На рисунке 48 изображён механизм шагания в произвольном положении. Механизм имеет одну степень подвижности. Входная координата – положение кривошипа φ_1 . Для упрощения расчётов колесо будет рассматриваться как материальная точка. Прочие силы тяжести, прилагаемые к другим звеньям, здесь не отображены, но будут учтены в силовом анализе.



$\{O\}$ – система координат абсолютная; $\{A\}$ – система координат относительно планетохода; G – результирующая сила тяжести; G_x – проекция силы тяжести на OX_a ; G_y – проекция силы тяжести на OY_a .

Рисунок 48 – Механизм шагания в произвольном положении

Так как большая вариативность длин звеньев механизма Чебышева не позволяет прийти к единой компоновке, далее предлагается выбрать фиксированное соотношение звеньев и их геометрические положения следующего вида:

- 1) $CB = BD = BE$;
- 2) $CB \parallel BD$;
- 3) $AE \parallel X_a$.

Векторная форма уравнения звеньев механизма:

$$\begin{cases} \overline{AC} = \overline{AE} + \overline{EB} - \overline{BC}; \\ \overline{CD} = \overline{EB} + \overline{BD}. \end{cases}$$

Переводим из векторной формы в систему групповых уравнений:

$$\begin{cases} l_1 \cdot \cos\varphi_1 = X_{AE} + l_3 \cdot \cos\varphi_3 - \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_2 \\ l_1 \cdot \sin\varphi_1 = Y_{AE} + l_3 \cdot \sin\varphi_3 - \frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_2 \\ l_2 \cdot \cos\varphi_2 = l_3 \cdot \cos\varphi_3 + \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_2 \\ l_2 \cdot \sin\varphi_2 = l_3 \cdot \sin\varphi_3 + \frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_2 \end{cases}$$

Благодаря тригонометрическим соотношениям

$$\sin\varphi_2 = \sqrt{1 - \cos\varphi_2^2} \text{ и } \sin\varphi_3 = \sqrt{1 - \cos\varphi_3^2}$$

данную систему из четырёх неизвестных уравнений удобно решить методом Крамера. Таким образом, известны угловые зависимости $\varphi_2(\varphi_1)$ и $\varphi_3(\varphi_1)$.

Из четырёхугольника ACBE можно найти угол $\varphi_{23}(\varphi_1)$:

$$\varphi_{23}(\varphi_1) = 180^\circ - \varphi_2(\varphi_1) + \varphi_3(\varphi_1)$$

Положение выходной точки D :

$$X_D(\varphi_1) = l_1 \cdot \cos\varphi_1 + l_2 \cdot \cos\varphi_2(\varphi_1);$$

$$Y_D(\varphi_1) = l_1 \cdot \sin\varphi_1 + l_2 \cdot \sin\varphi_2(\varphi_1).$$

В итоге определено положение колеса относительно положения кривошипа.

Для определения угла между касательной к траектории шагания и горизонтом, воспользуемся формулой касательных:

$$tg\alpha(\varphi_1)_i = \frac{Y_D(\varphi_1)_{i+1} - Y_D(\varphi_1)_i}{X_D(\varphi_1)_{i+1} - X_D(\varphi_1)_i}$$

где $\alpha(\varphi_1)$ – искомый угол в -том положении.

С помощью программного продукта Mathcad были получены результаты по вышеописанной математической модели.

На рисунке 49б изображена зависимость искомого угла от положения кривошипа, разбитого на 50 дискретных позиций, где $i = 0,1 \dots 49$. Точками отмечены узлы, показывающие равенство $\alpha_i = 20^\circ$. В этих положениях колесо касается и отрывается от грунта соответственно, область, входящая в промежуток между двумя точками является рабочей зоной (рис. 50), в которой выполняется шагание (на рис. 49б – область заштрихована).

Такая траектория получена при произвольных длинах звеньев механизма:

$$AC = l_1 = 0.136 \text{ м}, CB = l_2 = 0.514 \text{ м}, AE = l_3 = 1.028 \text{ м}.$$

Если из графика, изображённого на рисунке 49б вычесть условное значение угла давления 20° , можно найти искомый угол φ_{1_search} с областью углового положения кривошипа

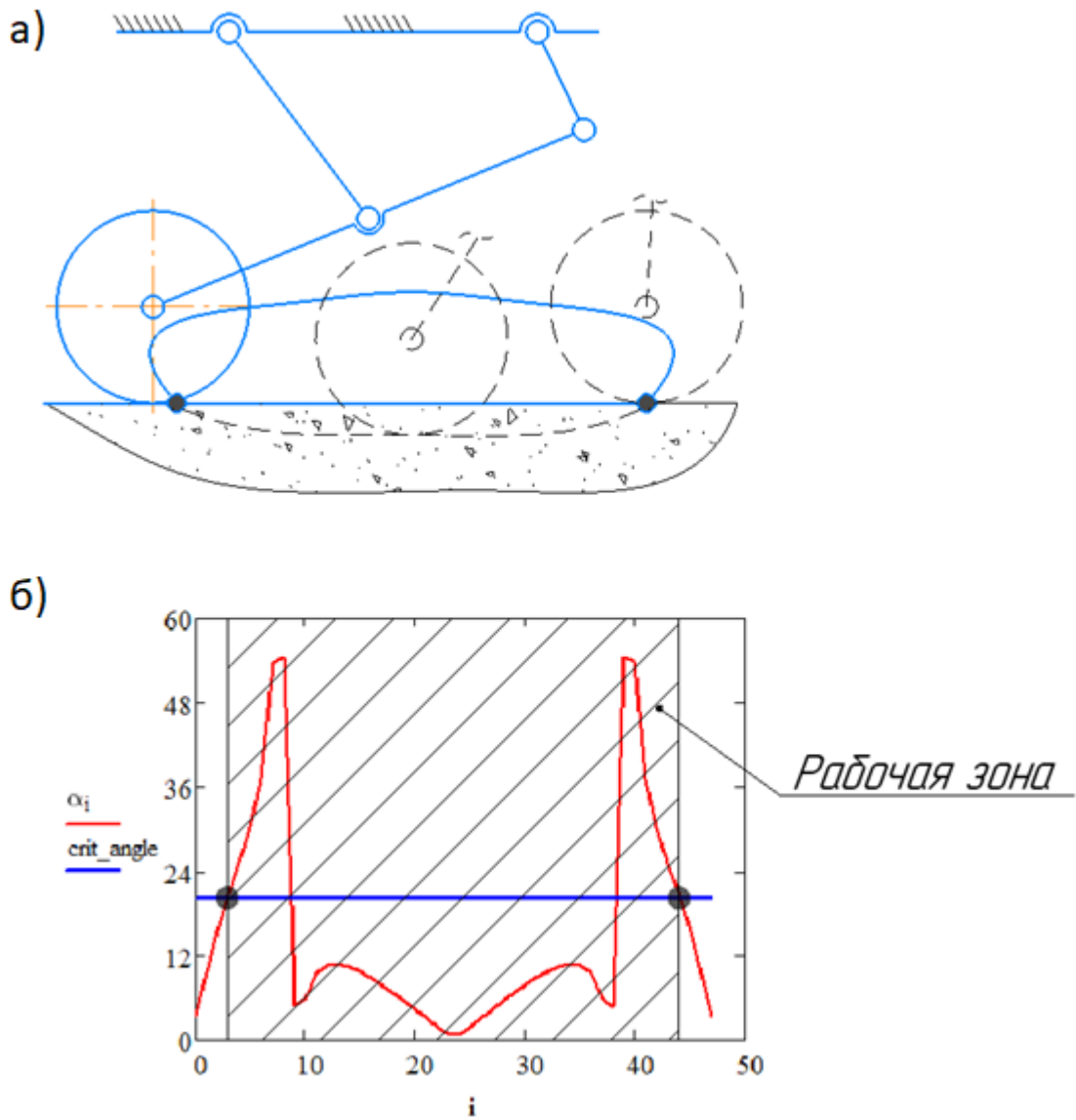
$$\varphi_1 \in [2\pi - \varphi_{1_search}; \varphi_{1_search}],$$

где происходит контакт колеса с грунтом.

Так как траектория симметрична относительно её вертикальной оси, то искомая длина используемого шага $S_{и}$:

$$S_{и} = 2|X_D(0) - X_D(\varphi_{1_search})|.$$

По вышеописанной математической модели можно составить параметры траекторий при наборе произвольных длин звеньев механизма. Для оптимизации предлагается выборка минимум из 5-7 таких значений, потому что меньший набор не даст полной картины о видах типовых траекторий для данного механизма шагания.



α_i – искомый угол в i -том положении кривошипа, градус; $crit_angle$ – обозначение угла давления 20°

Рисунок 49 – Определение используемого участка шагания: а) используемый участок траектории относительно механизма шагания; б) зависимость угла между касательной к траектории шагания и горизонтом от положения кривошипа

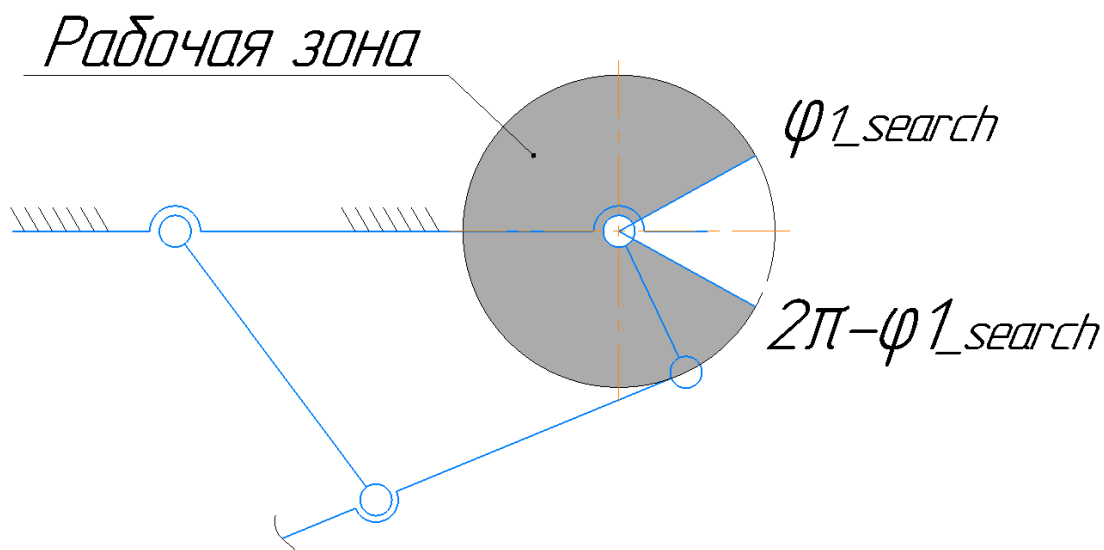


Рисунок 50 – Отношение области используемого шага на траектории вращения кривошипа механизма шагания

Предлагаемые варианты:

Вариант №1:

$$AC = l_1 = 0.2 \text{ м}, BE = l_3 = 0.5 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.4 \text{ м}.$$

Вариант №2:

$$AC = l_1 = 0.25 \text{ м}, BE = l_3 = 0.6 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.5 \text{ м}.$$

Вариант №3:

$$AC = l_1 = 0.148 \text{ м}, BE = l_3 = 0.318 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.421 \text{ м}.$$

Вариант №4:

$$AC = l_1 = 0.225 \text{ м}, BE = l_3 = 0.5 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.5 \text{ м}.$$

Вариант №5:

$$AC = l_1 = 0.136 \text{ м}, BE = l_3 = 0.514 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.3 \text{ м}.$$

По вариантам были построены траектории механизмов шагания. После обсуждения этих траекторий с руководителем ВКР, были выведены две наиболее перспективные варианты: 1 и 5. Добавлен контрольный вариант, являющийся собой среднее арифметическое этих вариантов.

Вариант №0:

$$AC = l_1 = \frac{0.2 + 0.136}{2} = 0.168 \text{ м}, CE = l_3 = \frac{0.5 + 0.514}{2} = 0.507 \text{ м},$$

$$AE = X_{AE} = \frac{0.4 + 0.3}{2} = 0.35 \text{ м}.$$

Полученный набор траекторий изображён на рис. 51. Из совмещённого графика видно, что большая часть траекторий принимают вытянутую форму, что благоприятно влияет на процесс шагания.

Чтобы выбрать оптимальную траекторию, требуется составить ряд критериев. Для этого обратимся к теории шагающих механизмов. [2]

Путь перемещения машины за один цикл S_M определяется из длины используемого шага $S_{и}$:

$$S_M = S_{и} \cdot \frac{n_0}{z_0} \cdot (1 - s_{ю}),$$

где

$s_{ю} = 0.06$ – коэффициент юза для кварцевого песка; $z_0 = 4$ – общее число опор; $n_0 = 3$ – максимальное постоянное число опор.

КПД используемой части траектории шагания:

$$\eta_{шаг} = \frac{S_M}{b} \cdot 100\%,$$

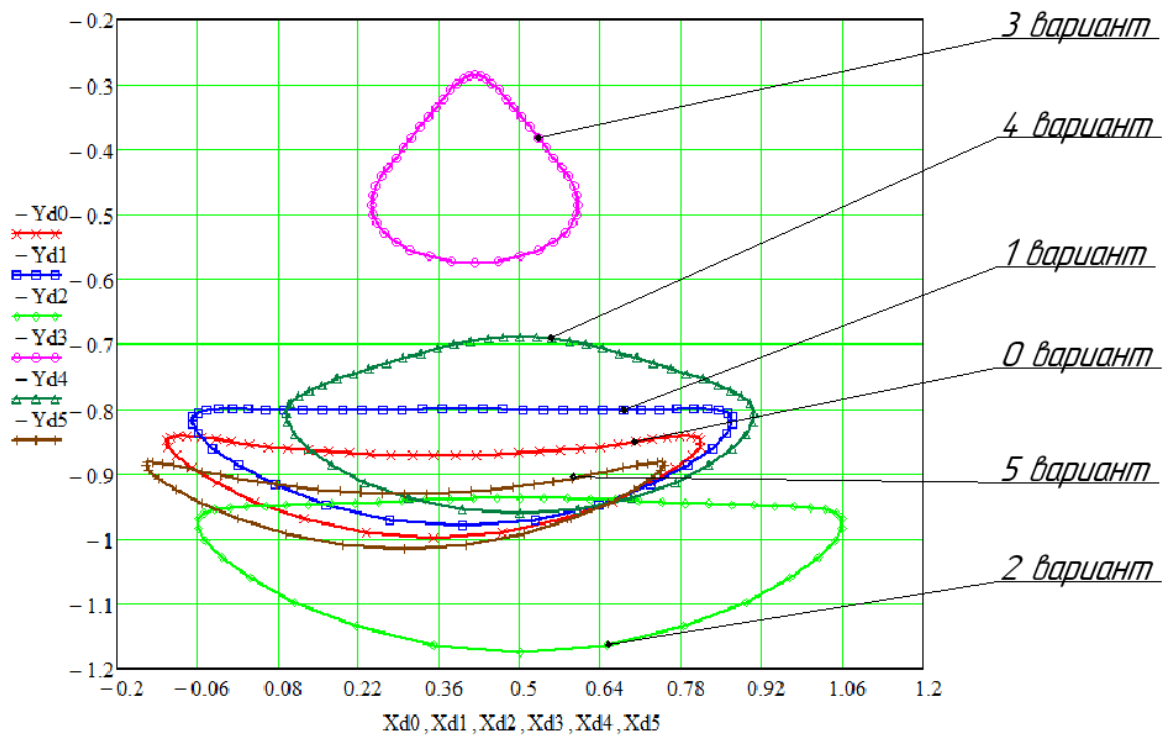
где b – протяжённость траектории шагания:

$$b = X_{d_max} - X_{d_min}.$$

Высота используемого шага h :

$$h = Y_{d_max} - Y_{d_min}$$

Если некоторые вышеописанные свойства траектории для варианта исполнения удовлетворяет критериям оценки, то за каждый удовлетворяющий результат добавляется 1 балл рейтинга. Вариант с наибольшим рейтингом рассматривается как оптимальный. Совмещённый график траекторий шагания изображён на рисунке 51.



X_{d0}, Y_{d0} – 0 вариант; X_{d1}, Y_{d1} – 1 вариант; X_{d2}, Y_{d2} – 2 вариант;
 X_{d3}, Y_{d3} – 3 вариант; X_{d4}, Y_{d4} – 4 вариант; X_{d5}, Y_{d5} – 5 вариант

Рисунок – 51 Совмещённый график траекторий шагания для различных вариантов, м

Составим сравнительную таблицу по данным критериям с информацией о выполнении или невыполнении условий критерия оптимизации (табл. 7).

Таблица 7 — Сравнение вариантов исполнения траектории шагания

Критерий оценки		Вариант, №					
		0	1	2	3	4	5
b	Выше усреднённого	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да
η	Выше усреднённого	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
S_M	Выше усреднённого	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да

Продолжение таблицы 7

Критерий оценки		Вариант, №					
		0	1	2	3	4	5
h	Ниже усреднённого	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Да
Рейтинг		4	3	2	0	0	4

Из табл. 7 видно, что оптимальными являются траектории 0 и 5, однако высота используемого шага h у траектории 5 меньше, а это значит, что механизм обладает меньшими габаритами, поэтому выбираем вариант 5:

$$AC = l_1 = 0.136 \text{ м}, CE = l_3 = 0.514 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.3 \text{ м}.$$

3.3 Силовой расчёт механизма шагания

Для выбранного набора длин звеньев механизма шагания далее предлагается провести его анализ с применяемыми расчётными случаями.

Следует оценить возможность подъёма колеса над ступенчатым препятствием. Высота используемого шага

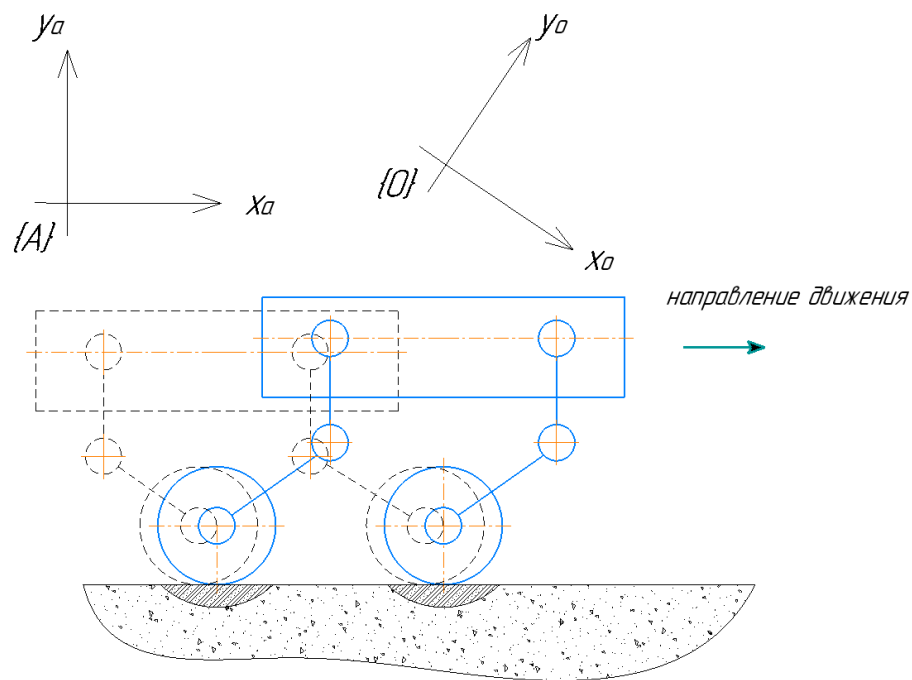
$$h = 0.133 \text{ м},$$

причём

$$h < R_{\text{колеса}} = 0.2 \text{ м},$$

по причине чего перешагивание препятствия согласно расчётному случаю невозможно выполнить и данный расчётный случай не рассматривается.

Рассмотрим расчётный случай, при котором одновременно работают все четыре привода механизма шагания (рис. 52).



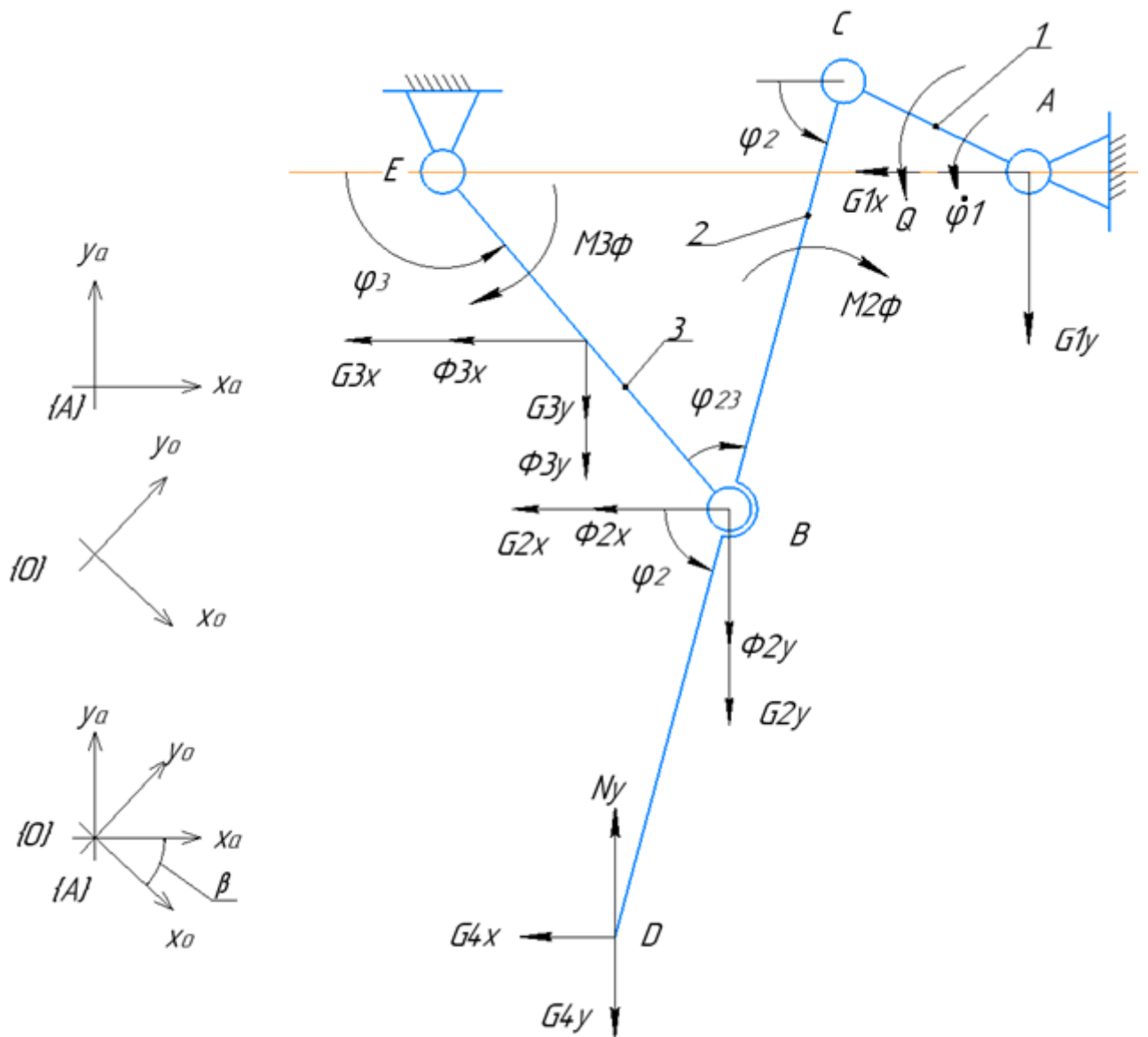
{O} – система координат абсолютная; {A} – система координат относительно планетохода;

Рисунок 52 – Расчётный случай номинального режима шагания, вид планетохода сбоку

Так как одновременно активны все четыре механизма шагания, то предлагается рассмотреть один из этих механизмов и проследить за зависимостью потребного момента на кривошипе от его углового положения.

Для расчётной схемы силы, изображённой на рисунке 53, инерции и силы тяжести приложены к условным центрам масс каждого звена ($S_{1...4}$), расположенным в их геометрическом центре (звено рассматривается как стержень с круглым поперечным сечением). Исключениями являются первое звено, условный центр масс которого находится в заделке кривошипа; четвёртое звено – в точке крепления D с колесом (колесо на схеме не отображено). Составляющие сил спроецированы на оси системы координат относительно планетохода $\{A\}$.

Задачей данного этапа расчёта является поиск момента Q , прилагаемого на кривошип. Пример расчётов искомых усилий на звене 2 предлагается ниже.



G – силы тяжести; Φ – силы инерции; M_ϕ – моменты сил инерции; N_y – нормальная реакция опоры; Q – момент на валу кривошипа; $\dot{\phi}_1$ – угловая скорость вращения кривошипа; $\{O\}$ – система координат абсолютная; $\{A\}$ – система координат относительно планетохода; β – угол наклона кратера, градус

Рисунок 53 – Расчётная схема механизма шагания в произвольном положении

Значение проекций сил инерции для второго звена на оси X_a и X_a соответственно:

$$\Phi_{2x} = -m_2 \cdot \ddot{X}_b \cdot \dot{\phi}_1,$$

$$\Phi_{2y} = -m_2 \cdot \ddot{Y}_b \cdot \phi_1$$

где m_2 – масса звена 2, \ddot{X}_b, \ddot{Y}_b – проекции аналога ускорения в точке b на оси X_a и Y_a соответственно. Так как аналоги скоростей и ускорений являются следствием геометрического анализа, их расчёт приводится в Приложении 1.

Момент сил инерции:

$$M_{2\phi} = -J_2 \cdot \ddot{\phi}_2 \cdot \phi_1^2,$$

где $\ddot{\phi}_2$ – аналог углового ускорения вокруг точки B , J_2 – момент инерции звена 2:

$$J_2 = \frac{m_2 \cdot l_2^2}{12}.$$

Проекции силы тяжести G_2 на оси X_a и Y_a :

$$G_{2x} = G_2 \cdot \sin\beta;$$

$$G_{2y} = G_2 \cdot \cos\beta.$$

Так как все четыре привода работают одновременно, реакции опор на каждом колесе распределяются равномерно. Нормальная реакция опоры для одного механизма:

$$N_y = \frac{M}{4} \cdot g_l,$$

где $M = 100$ – масса планетохода, кг, $g_l = 1.62$ – ускорение свободного падения на Луне, M/c^2 . Аналогичные расчёты применяются и к другим звеньям.

Возникающие в кинематических парах реакции компенсируют друг друга, приводя систему в статическую неопределённость. Для решения этой неопределённости мысленно разобьём механизм на звенья (рис. 54) и составим системы уравнений для каждого звена.

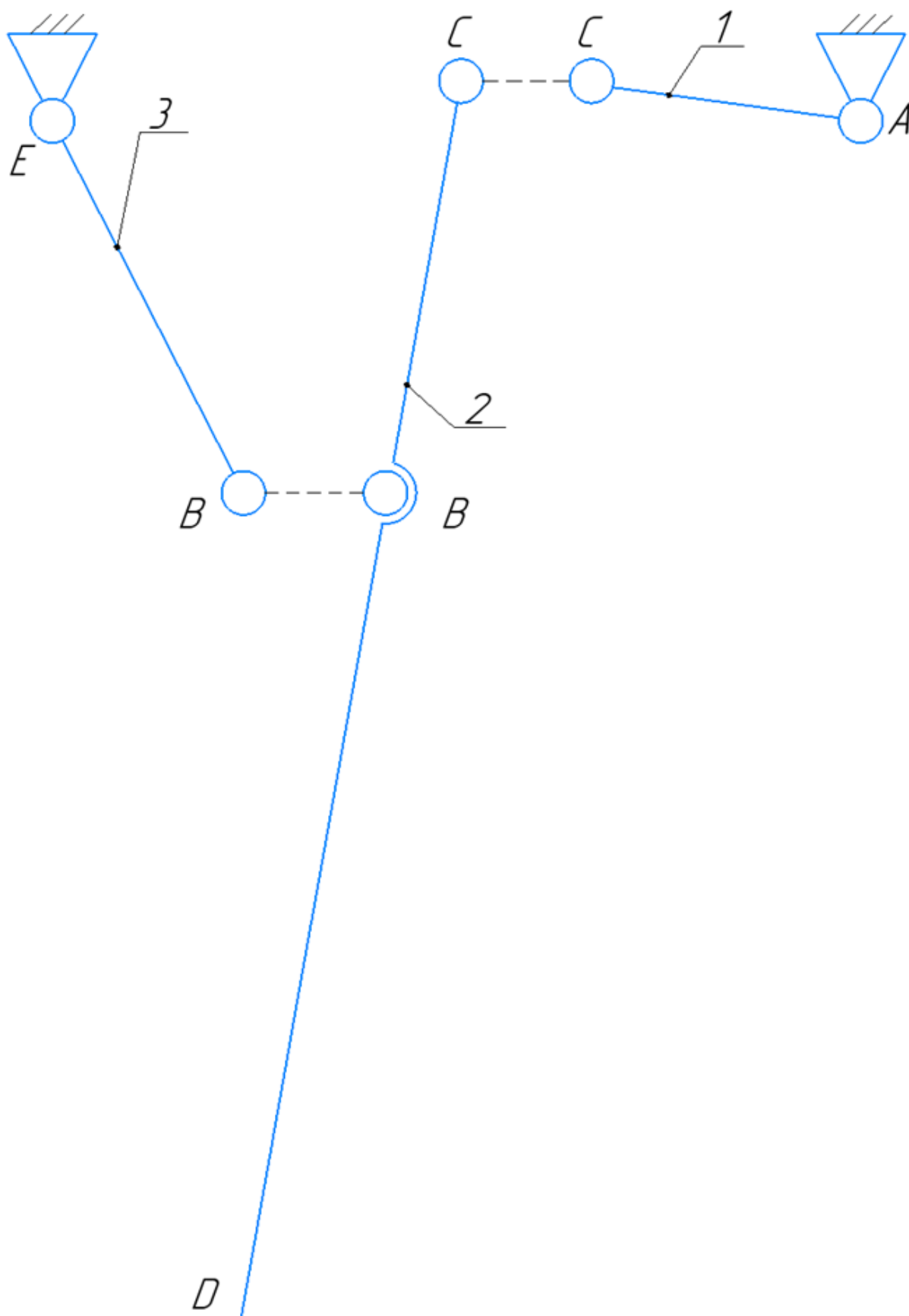


Рисунок 54 – Разбиение механизма на звенья

Составим систему уравнений к расчётной схеме звена 3, изображённую на рисунке 55.

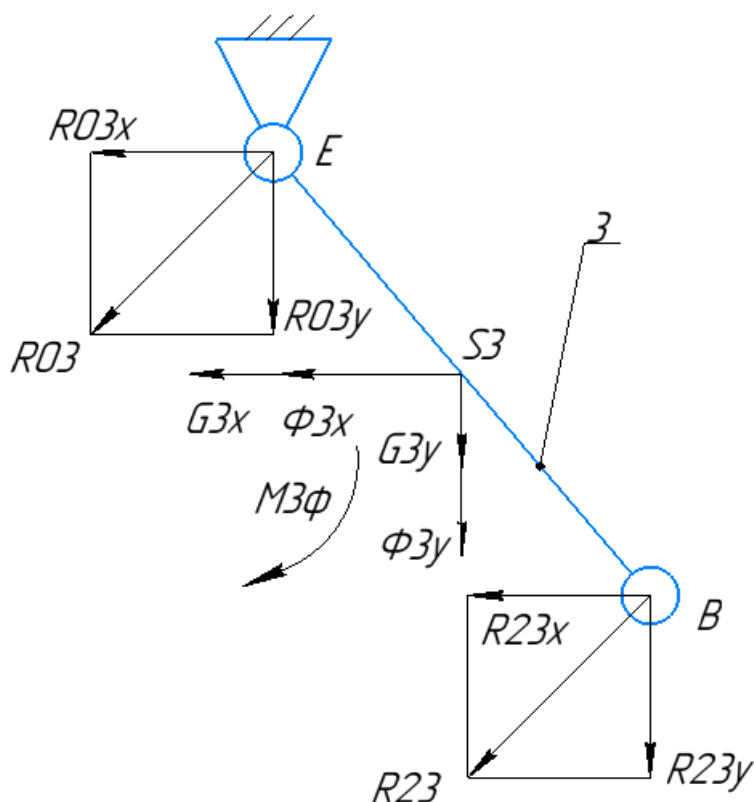


Рисунок 55 – расчётная схема для звена 3

Уравнения равновесия для звена 3 (рис. 55):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0: R_{23x} + \Phi_{3x} + R_{03x} + G_{3x} = 0; \\ \sum F_y = 0: R_{23y} + \Phi_{3y} + R_{03y} + G_{3y} = 0; \\ \sum M_E = 0: -R_{23x}(Y_B - Y_E) - (\Phi_{3x} + G_{3x})(Y_{S3} - Y_E) - R_{23y}(X_E - X_B) - \\ \quad - (\Phi_{3y} + G_{3y})(X_E - X_{S3}) - M_{3\Phi} - G_3(X_E - X_{S3}) = 0. \end{array} \right.$$

Составим систему уравнений к расчётной схеме звена 3, изображённую на рисунке 56.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0: R_{12x} + R_{32x} + \Phi_{2x} + G_{4x} + G_{2x} = 0; \\ \sum F_y = 0: R_{12y} + R_{32y} + \Phi_{2y} + G_{2y} + G_{4y} - N_y = 0; \\ \sum M_B = 0: -G_{4x}(Y_D - Y_B) + (G_{4y} - N_y)(X_D - X_B) - \\ -R_{12y}(X_B - X_C) + R_{12x}(Y_B - Y_C) - M_{2\phi} = 0. \end{array} \right.$$

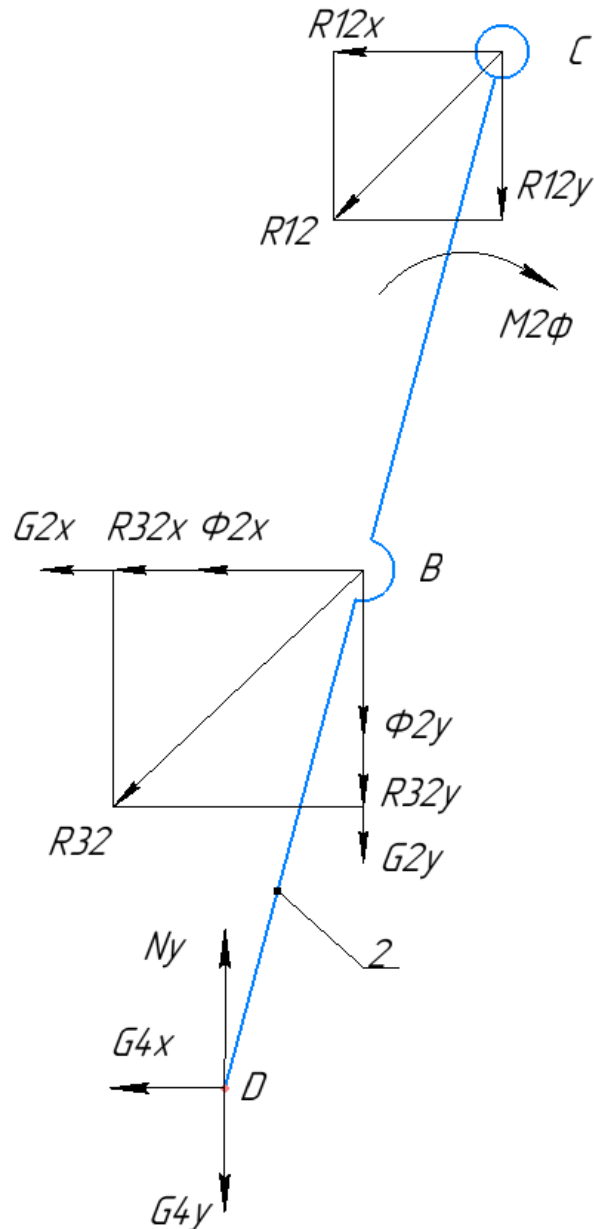


Рисунок 56 – расчётная схема для звена 2

Составим систему уравнений к расчётной схеме звена 3, изображённую на рисунке 57.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0: R_{01x} + R_{21x} + G_{1x} = 0; \\ \sum F_y = 0: R_{01y} + R_{21y} + G_{1y} = 0; \\ \sum M_A = 0: R_{21y}(X_c - X_A) + R_{21x}(Y_A - Y_c) + Q = 0. \end{array} \right.$$

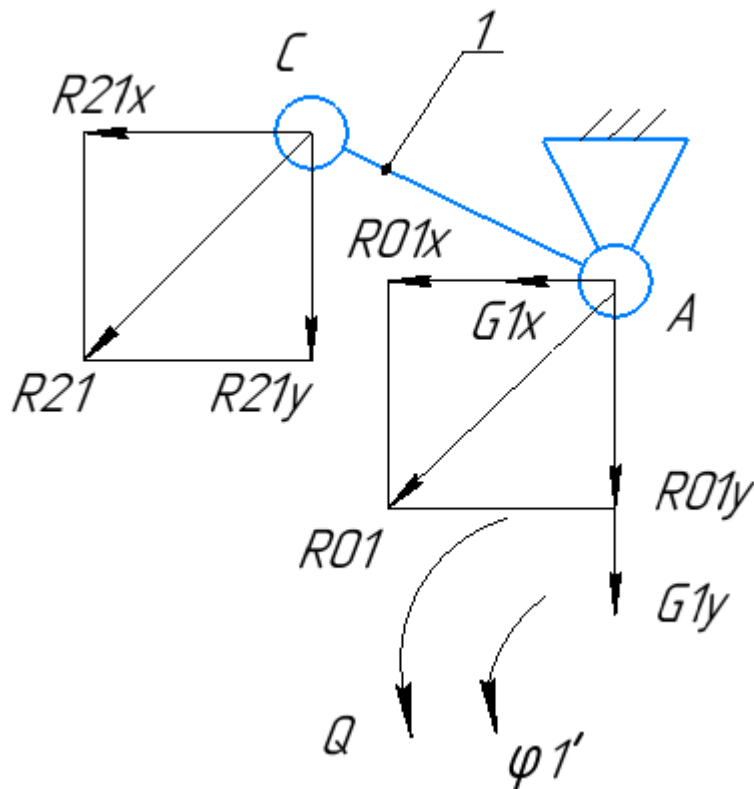


Рисунок 57 – расчётная схема для звена 1

Так как реакции на одном шарнире в разбитых звеньях друг друга нивелируют, то очевидно

$$R_{ij} = -R_{ji}.$$

Стоит отметить, что система имеет ровно 9 неизвестных, поэтому найти потребной момент на валу кривошипа Q можно через любой известный метод решения систем уравнений. Воспользуемся методом Крамера.

В результате получаем зависимость значений потребного момента на валу кривошипа от положения кривошипа. Данная зависимость изображена на рисунке 58.

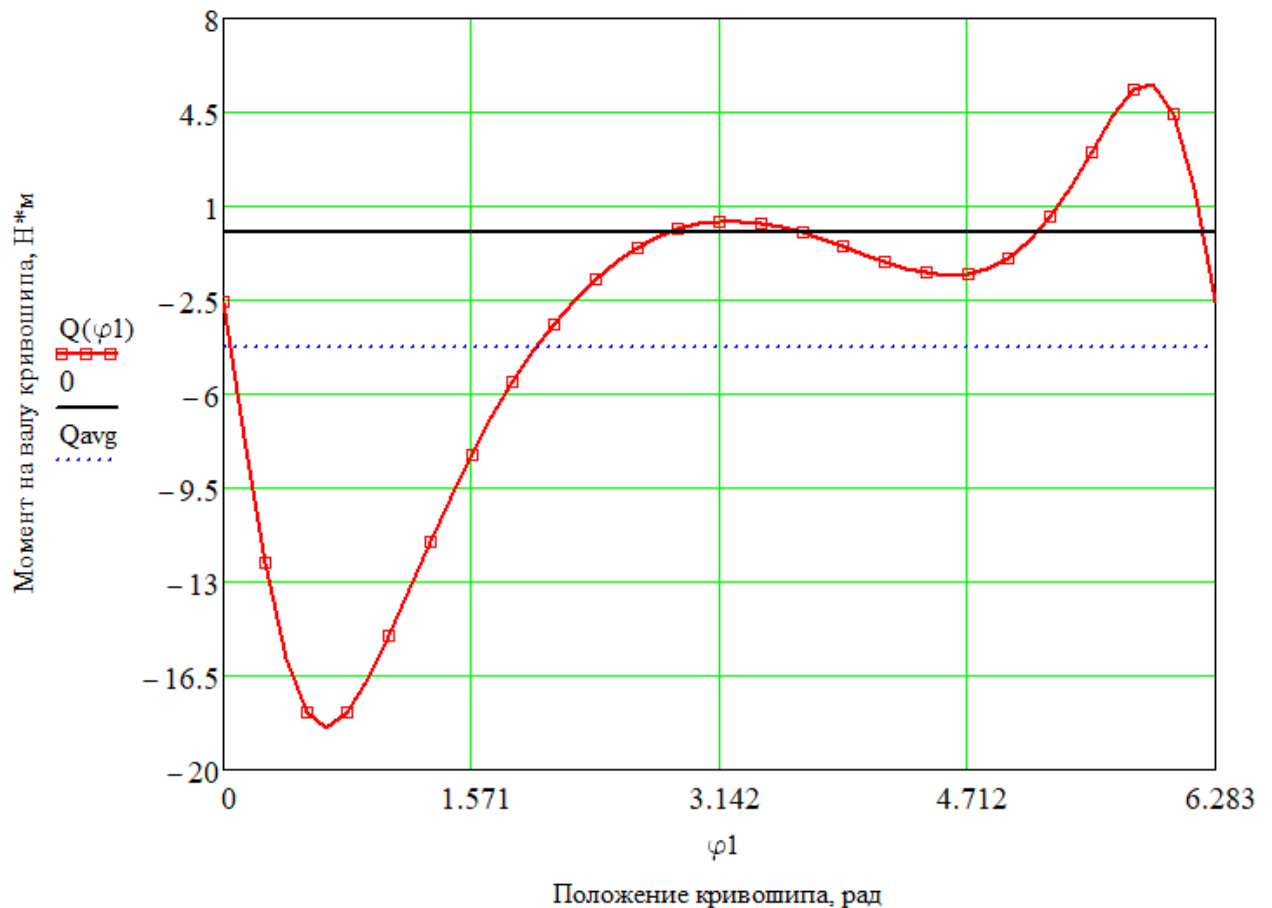


Рисунок 58 – График зависимости момента на кривошипе от его положения

Требуемым для приемлемой работы моментом в данном расчётном случае будет максимальное по модулю значение. Здесь максимальное абсолютное значение $|Q_{max1}| = 18.44 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

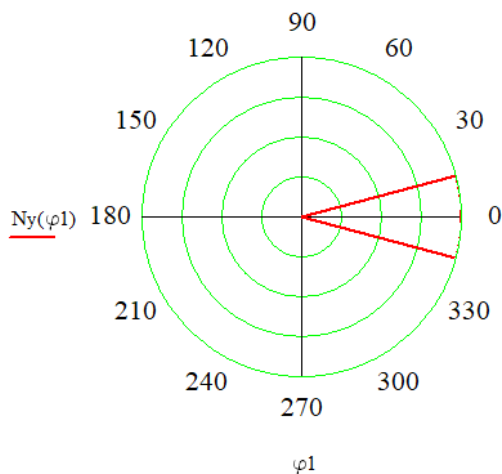
В расчёте момента Q на кривошипе при аварийной ситуации, когда единственный свободный механизм шагания выполняет процесс шагания, возникает ряд различий по сравнению с предыдущим расчётным случаем. Рассмотрим эти особенности.

Так как в течение некоторого периода времени колесо занесено над грунтом, нормальная реакция опоры имеет вид условной функции:

$$\begin{cases} N_y = \frac{M}{4} \cdot g_{л}, \text{ если } [(0 < \varphi_1 < \varphi_{1search}) \text{ или } (2\pi - \varphi_{1search} < \varphi_1 < 2\pi)], \\ \text{иначе } N_y = 0, \end{cases}$$

где φ_1 – угол поворота кривошипа, $\varphi_{1_{search}}$ – угловое положение кривошипа, при котором колесо касается с грунтом и затем отрывается от грунта.

$\varphi_{1_{search}} = const$ и имеет одинаковое значение, как для контакта, так и для отрыва колеса от грунта вследствие симметричности траектории шагания. Нагрузочная диаграмма для реакции опоры изображена на рисунке 59.



φ_1 – угловое положение кривошипа, градус; $N_y(\varphi_1)$ – функция реакции опоры, зависящая от положения кривошипа

Рисунок 59 – Нагрузочная диаграмма реакции опоры в полярных координатах

Так как все опоры планетохода приведены в движение, на них воздействуют силы сопротивления движению от грунта. Однако эти силы для каждого колеса различаются из-за неравномерной насыпки грунта и прочих физико-механических свойств. Предлагается упростить данный расчётный случай и усреднить значение сопротивления движению от грунта на четыре колеса. Таким образом:

$$F_{сопр} = 4 \cdot N_y \cdot f,$$

где f – коэффициент сопротивления движению:

$$f = \frac{A_{\Gamma}}{M \cdot g \cdot S_M \cdot 100},$$

где A_{Γ} – работа на псевдоциклическое прессование грунта механизмом шагания:

$$A_r = \frac{1}{(\mu + 1) \cdot (c \cdot \frac{B}{10^6})^{\frac{1}{\mu}}} \cdot Pz^{\frac{\mu+1}{\mu}},$$

где B – площадь опорной поверхности; μ, c – параметры грунта. Для кварцевого песка $\mu = 1$. Требуется найти неизвестный параметр c . Для кварцевого песка $f = 0.15$. Согласно расчётной модели выше эмпирически было определено значение $c = 13$.

Найдём высоту просадки колеса в грунт:

Удельное давление на грунт одного колеса:

$$q = \frac{M \cdot g_{\text{л}}}{4 \cdot B},$$

а также

$$q = c \cdot h_{\text{просадки}}^{\mu},$$

где $h_{\text{просадки}}$ – высота просадки колеса в грунт.

Таким образом

$$h_{\text{просадки}} = \sqrt[\mu]{\frac{M \cdot g_{\text{л}}}{4 \cdot B \cdot c}}$$

Колесо планетохода просаживается примерно на 50 мм, что составляет 12% от его диаметра $D_{\text{колеса}} = 0.4$ м. Системы уравнений для нового случая:

Звено 3.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0: R_{23x} + \Phi_{3x} + R_{03x} + G_{3x} = 0; \\ \sum F_y = 0: R_{23y} + \Phi_{3y} + R_{03y} + G_{3y} = 0; \\ \sum M_E = 0: -R_{23x}(Y_B - Y_E) - (\Phi_{3x} + G_{3x})(Y_{S3} - Y_E) - R_{23y}(X_E - X_B) - \\ - (\Phi_{3y} + G_{3y})(X_E - X_{S3}) - M_{3\Phi} - G_3(X_E - X_{S3}) = 0. \end{array} \right.$$

Звено 2.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0: R_{12x} + R_{32x} + \Phi_{2x} + F_{\text{сопр.}} + G_{4x} + G_{2x} = 0; \\ \sum F_y = 0: R_{12y} + R_{32y} + \Phi_{2y} + G_{2y} + G_{4y} - N_y = 0; \\ \sum M_B = 0: -(F_{\text{сопр.}} + G_{4x})(Y_D - Y_B) + (G_{4y} - N_y)(X_D - X_B) - \\ - R_{12y}(X_B - X_C) + R_{12x}(Y_B - Y_C) - M_{2\Phi} = 0. \end{array} \right.$$

Звено 1.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0: R_{01x} + R_{21x} + G_{1x} = 0; \\ \sum F_y = 0: R_{01y} + R_{21y} + G_{1y} = 0; \\ \sum M_A = 0: R_{21y}(X_C - X_A) + R_{21x}(Y_A - Y_C) + Q = 0. \end{array} \right.$$

Отличие от предыдущего расчётного случая в системе уравнений заключается в том, что учитывается сила сопротивления $F_{\text{сопр.}}$, приложенная к точке крепления колеса.

В результате получаем зависимость значений потребного момента на валу кривошипа от положения кривошипа (рис. 60).

Требуемым для приемлемой работы моментом в данном расчётном случае будет максимальное по модулю значение. Здесь максимальное абсолютное значение $|Q_{\text{max2}}| = 37.8 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Тогда искомым потребной момент из двух расчётных случаев:
 $Q_{\text{потреб.}} = \max\{|Q_{\text{max1}}|, |Q_{\text{max2}}|\} = |Q_{\text{max2}}| = 37.8 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

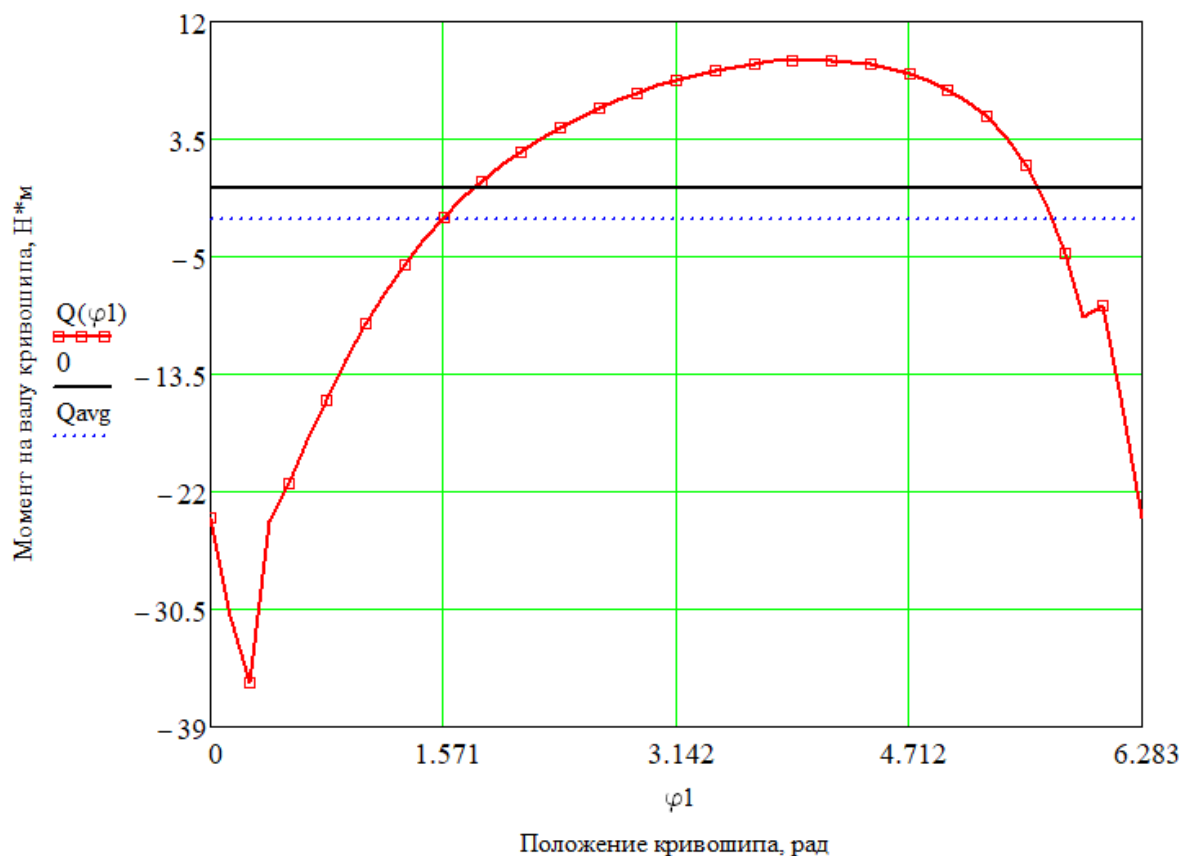


Рисунок 60 – График зависимости момента на кривошипе от его положения

3.4 Выбор двигателя и энерго-кинематический расчёт привода

Выбор кинематической схемы привода и редуктора в частности, разбивка общего передаточного числа между отдельными передачами предполагает множество решений. При принятии решения о выборе схемы редуктора или привода в целом необходимо учитывать не только габариты передач, но и ряд других факторов: экономичность, надежность, технологичность при производстве, сборке и в эксплуатации.

Так как наибольший по модулю момент на кривошипе развивается в случае, когда один привод тащит весь планетоход, то дальнейший анализ законов движения будет рассматриваться для этого расчётного случая.

На рисунке 61 схематично изображён привода механизма шагания в аксонометрии.

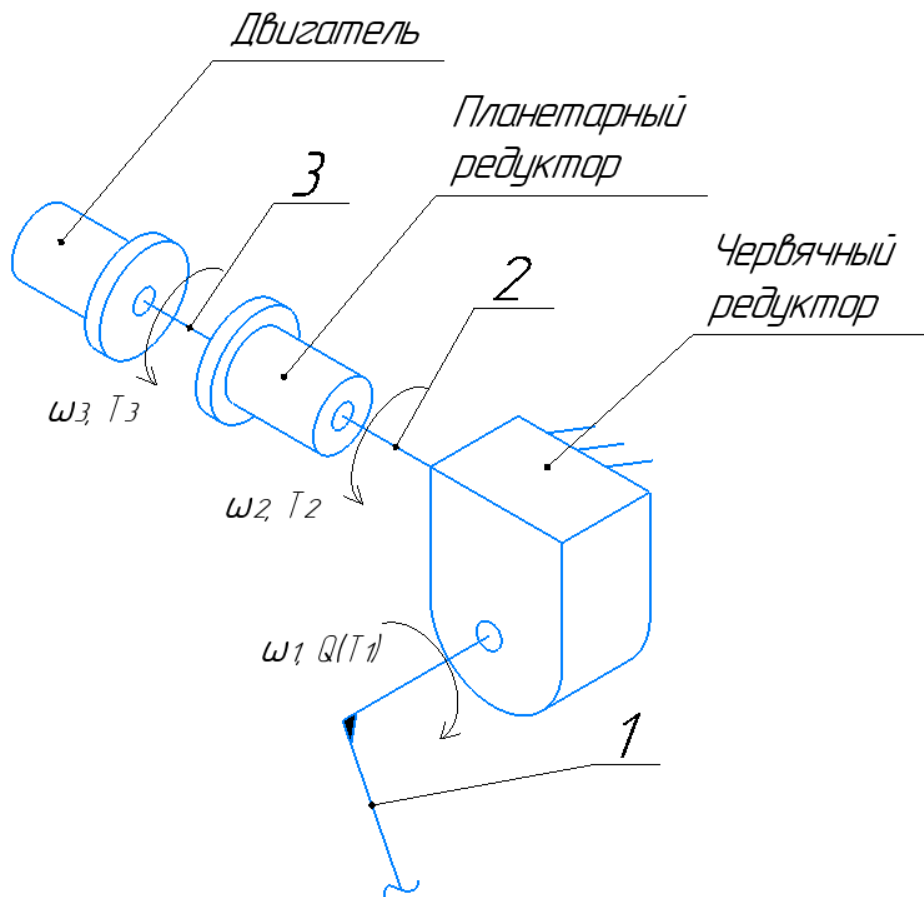


Рисунок 61 – Аксонометрическое изображение привода механизма шагания

На кинематической схеме выше изображен привод механизма шагания. Вал двигателя вращает входной вал редуктора, на выходном валу 1 которого должен обеспечиваться потребной момент $Q_{\text{потреб.}}$.

Вводные данные:

КПД червячного редуктора $\eta_{\text{чр}} - 40\%$;

КПД планетарного редуктора $\eta_{\text{пр}} - 60\%$;

Передаточное число червячного редуктора $i_{12} = 36$;

Передаточное число планетарного редуктора $i_{23} = 4.3$;

Угловая скорость вращения кривошипа $n_1 = 20 \text{ мин}^{-1}$.

По интенсивности изменения скорости во времени приводы разделяются на два класса: постоянные и динамичные.

Для постоянных приводов время установившегося движения значительно превышает время переходного процесса. Такой режим работы больше подходит для компрессоров, насосов и подобных машин. Механизм шагания обладает сравнительно небольшим периодом движения, поэтому под этот класс привод механизма шагания не подойдёт. [13]

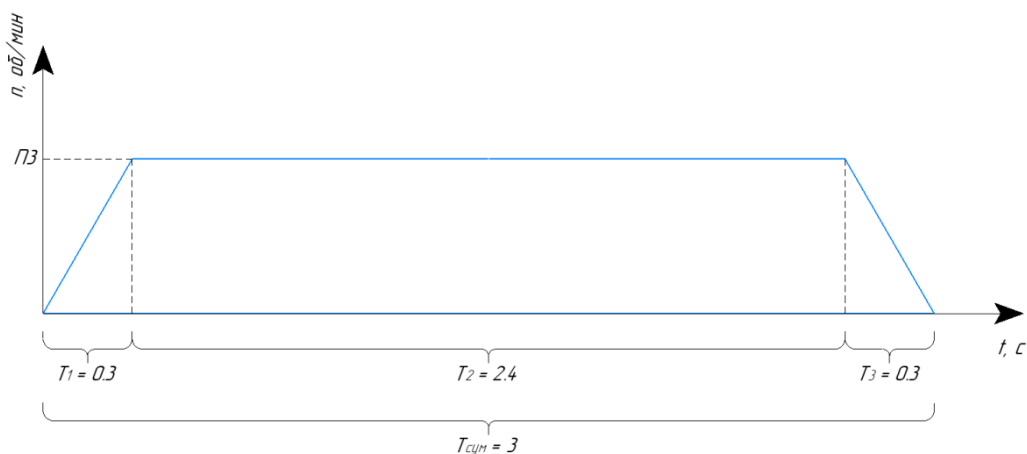
Динамичные привода имеют устройства перемещения из одного положения в другое. Технические требования для таких приводов должны содержать сведения об алгоритме процесса и данные о быстродействии. Привод механизма шагания обладает данными свойствами.

Так как на механизм шагания не накладывается требование точности, то его закон движения можно аппроксимировать трапецией.

По найденным аналогам скоростей и ускорений выходного звена (см. Приложение А) в определённых расчётных случаях можно задать закон движения привода. Период вращения составляет

$$T_{sum} = \sum_{i=1}^3 T_i = \frac{60}{n_1} = 3 \text{ с.}$$

На рисунке 62 изображён трапецеидальный закон движения привода.



n_3 — угловая скорость вала двигателя, $\text{об}\cdot\text{мин}^{-1}$

Рисунок 62— Закон движения

Где T_1, T_3 – время разгона и торможения соответственно. Обычно каждая из этих составляющих равна примерно 10% от общего времени, поэтому

$$T_1 = T_3 = T_{sum} \cdot 0.1 = 0.3 \text{ с.}$$

T_2 – время установившегося движения. Соответственно

$$T_2 = T_{sum} - (T_1 + T_3) = 3 - (0.3 + 0.3) = 2.4 \text{ с.}$$

Скорость вращения привода при номинальном режиме n_3 определяется в результате энерго-кинематического расчёта (ЭКР).

Расчёт для вала 1:

Мощность

$$P_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} \cdot Q_{\text{потреб.}}$$

Расчёт для вала 2:

Мощность

$$P_2 = P_1 / \eta_{\text{ЧР}},$$

угловая скорость

$$n_2 = i_{12} \cdot n_1,$$
$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30},$$

МОМЕНТ

$$T_2 = P_2 / \omega_2.$$

Расчёт для вала 3:

Мощность

$$P_3 = P_2 / \eta_{\text{ПР}},$$

угловая скорость

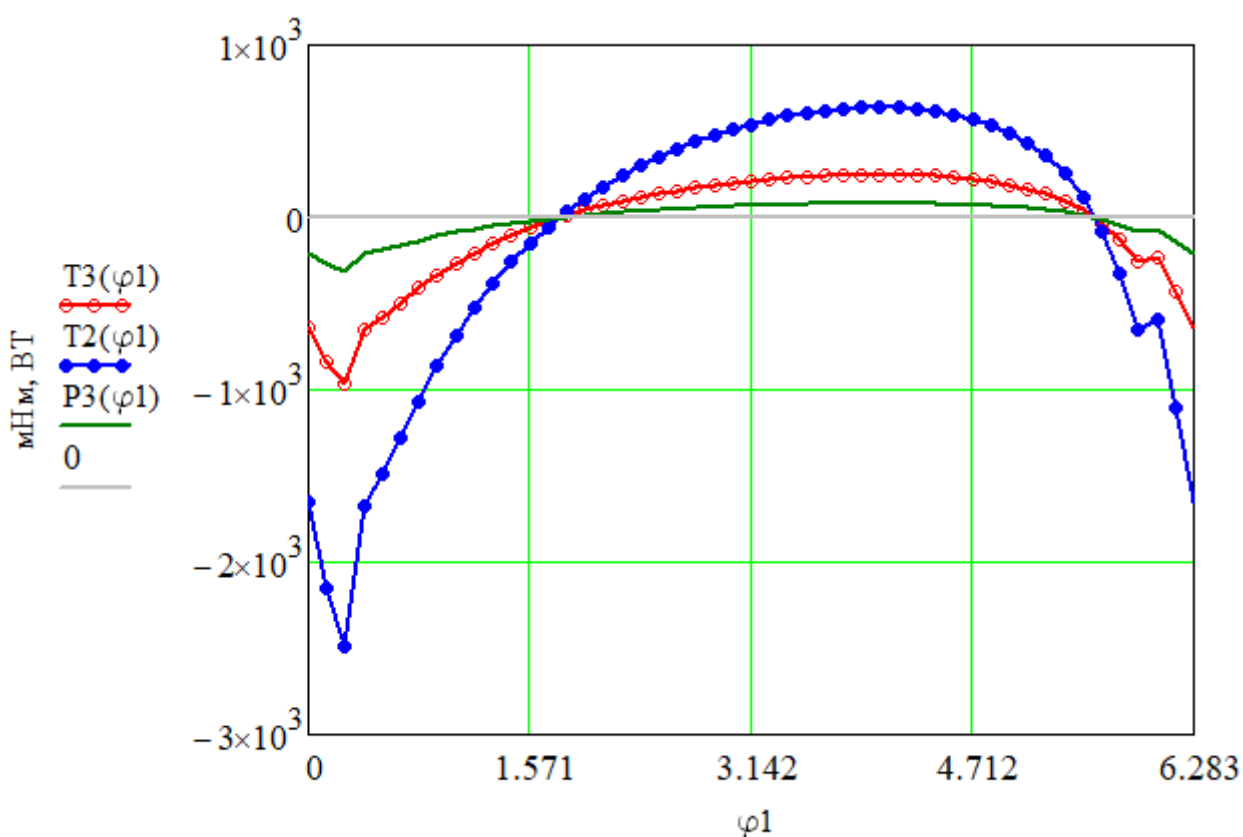
$$n_3 = i_{23} \cdot n_2,$$
$$\omega_3 = \frac{\pi \cdot n_3}{30},$$

МОМЕНТ

$$T_3 = P_3 / \omega_3.$$

Из каталога “Махон motor” подбираем двигатель с наиболее приближённым значением угловой скорости, момента и мощности в соответствии с графиками выше. Самое близкое значение будет соответствовать приемлемому передаточному числу планетарного редуктора. Для передаточного числа $i_{23} = 4.3$.

В результате анализа зависимости из рисунка 63 составим таблицу с описанием максимального значения по модулю, а также среднего значения для момента и мощности двигателя, а также момента на планетарном редукторе.



T_3, T_2 – моменты на валу двигателя и на выходе планетарного редуктора соответственно, $\text{мН} \cdot \text{м}$; P_3 – потребляемая мощность на валу двигателя, Вт .

Рисунок 63 – Совмещённый график зависимостей мощностей и моментов от положения кривошипа

Таблица 8 — Сравнительная таблица

	Максимальное значение по модулю (округлено до большего)	Среднее значение
Момент на двигателе, мН · м	867	-46.61
Момент на планетарном редукторе, мН · м	2239	-121
Мощность на двигателе, Вт	281	-15

Приведенный момент инерции (ПМИ) определяется как коэффициент при половине квадрата обобщенной скорости в выражении кинетической энергии механической системы. Для данного механизма формула ПМИ выглядит следующим образом

$$J_{пр} = J_{п} \cdot i_{12}^2 + J_{п} \cdot i_{23}^2 + 5J_{п} + (X_{s3}^2 + Y_{s3}^2) \cdot m_3 + (\dot{X}_d^2 + \dot{Y}_d^2) \cdot m_2 + J_1 \cdot \dot{\phi}_1^2 + J_2 \cdot \dot{\phi}_2^2 + J_3 \cdot \dot{\phi}_3^2,$$

где $J_{п}$ – момент инерции ротора двигателя, $5J_{п}$ – приведенный момент инерции редуктора, X_{s3}, Y_{s3}, \dots – аналоги линейной скорости центров масс звеньев механизма, J_1, J_2, J_3 – моменты инерции звеньев механизма, $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3$ – аналоги угловой скорости звеньев механизма.

График зависимости приведенного на вал кривошипа момента инерции от положения кривошипа изображён на рисунке 64.

Из полученных значений момента T_3 , угловой скорости n_3 и потребной мощности P_3 подбираем двигатель и планетарный редуктор по каталогу (рис. 65). [20]

Датчик положения выбирать не требуется, так как в двигатель уже установлен инкрементальный энкодер.

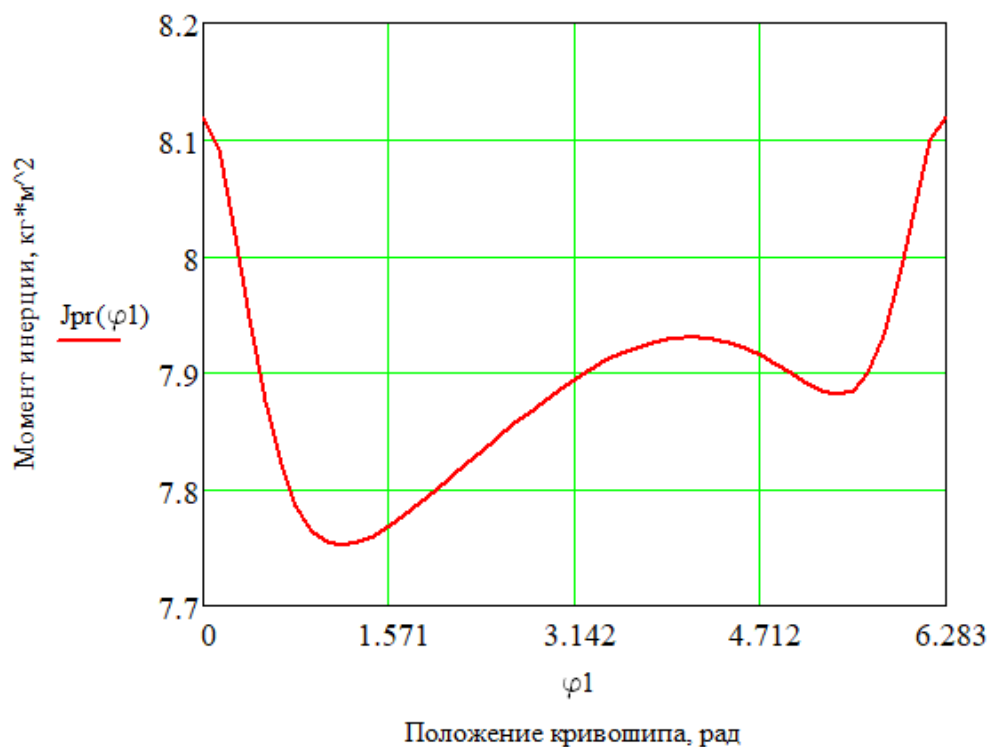


Рисунок 64 – Зависимость приведённого момента инерции от положения кривошипа

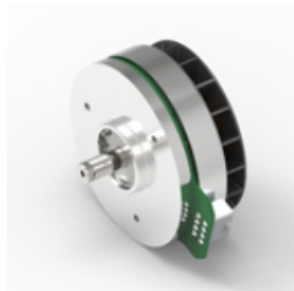
GEAR



Planetary Gearhead GP 52 C Ø52 mm, 4 - 30 Nm, Ceramic Version
Part No.: 223081

Diameter: 52 mm
Reduction Ratio: 4.3 : 1
Torque: 4 Nm

MOTOR



EC 90 flat Ø90 mm, brushless, 360 W, with Hall sensors
EC 90 flat Ø90 mm, brushless, 360 W, with Hall sensors
Part No.: 607950

Diameter: 90 mm
Type performance: 360 W
Nominal voltage: 24 V
Idle speed: 3210 rpm
Maximum torque: 953 mNm

Рисунок 65 – Планетарный редуктор и двигатель

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксплуатация космических изделий требует особых инженерных решений. Классические надёжные конструкции, используемые на Земле, в космосе непригодны из-за слишком больших габаритов и массы, а также из-за особых космических условий – радиации, чрезмерно низкой или высокой силы тяжести и т.п.

В данной выпускной работе были изучены варианты исполнения движителей планетоходов, а также способы защиты мехатронных узлов изделия от экстремальной космической среды.

В процессе выполнения работы некоторые аспекты, связанные с недостаточной информированностью, были опущены или упрощены до более примитивных случаев. По этой причине возможна дальнейшая доработка, как математической модели, так и конструкции.

Для того, чтобы получить более качественную информацию об особенностях и недостатках конструкции, необходимо провести ряд экспериментальных исследований тягово-сцепных свойств в условиях имитации силы тяжести на Луне. Такие исследования проводятся на имитационных стендах на Земле, после чего подтверждается пригодность исследуемой конструкции.

Стоит отметить, что часть исследований и расчётов в данной работе были проведены с несколько большей точностью благодаря накопленному опыту проектирования от различных инженерных организаций, занимающихся разработкой космической техники. Такой опыт носит общедоступный характер, сформировавший общие тенденции при проектировании механизмов, работающих в различных условиях. Основной стиль исполнения узлов космической техники заимствован из механизмов земных летательных аппаратов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Авотин Е.В., Болховитинов И.С., Кемурджиан А. Л., Маленков М.И., Шпак Ф.П. Динамика планетохода. М.: Наука, 1979 г. – 440с.
- 2 Планетоходы / А.Л. Кемурджиан, В.В. Громов, И.Ф. Кажукало и др.; Под ред. А.Л. Кемурджиана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.: ил.
- 3 М.И. Маленков, В.А. Волон Сравнительный анализ компонентов ходовой части самоходных шасси планетоходов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015.
- 4 Артоболевский И.И. Механизмы в современной технике. В 7 томах. Т. II: Кулисно-рычажные и кривошипно-ползуные механизмы – 2-е изд., переработанное. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.
- 5 Узлы трения самоходных шасси и планетоходов: учебное пособие, // М.И. Маленков, В.Н. Смелов под ред. Ю.Н. Пономарева; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2007. – 65 с.
- 6 Гамбарян П. П. Бег млекопитающих. М. – Л.: Наука, 1972, 325 с.
- 7 Уплотнения и уплотнительная техника : Справочник / А.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др.; Под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1986- 464 с., ил.
- 8 Русанов М.А. Разработка торцового комбинированного магнитожидкостного уплотнения пожарного насоса / М.А. Русанов, А.В.Топоров, Е.А.Топорова В сборнике: Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2013. С. 103-105.
- 9 Тимофеев А.Н. Механизмы перемещения рабочих органов технологического оборудования: учеб. пособие / А. Н. Тимофеев, Д. Е. Каледина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 374 с.

10 А. с. № 698830 (СССР). Способ передвижения транспортного средства с колёсно-шагающим двигателем/ А. Л. Кемурджиан, В. В. Громов. И. Ф. Кажукало. – Оpubл. в БИ, 1979, № 43, М. Кл. В 62d 57/02.

11 Луноход-1. История создания и интересные факты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dosoaftor.ru/2017/04/23/lunohod-1-istoriya-sozdaniya-i-interesnyie-faktyi/>

12 Прибор оценки проходимости – Марс [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B1%D0%BE%D1%80_%D0%BE%D1%86%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%B8_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8_%E2%80%94%D0%9C%D0%B0%D1%80%D1%81

13 Волков Ю.П., Тушкина Т.М., Третьяков А.М. Транспортное средство с двигателем на основе механизма Чебышева / / Южно-сибирский научный вестник. БТИ ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2017/4/58_293-296.pdf

14 Механизм Кланна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BC_%D0%9A%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0

15 Янсен Тео [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%BD%D1%81%D0%B5%D0%BD,%D0%A2%D0%B5%D0%BE>

16 ATHLETE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/ATHLETE>

17 Магнитные муфты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://erga.ru/products/magnetic_systems_and_device/magnetic_coupling/

18 Муфта пружинная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.etm.ru/cat/nn/4791075/>

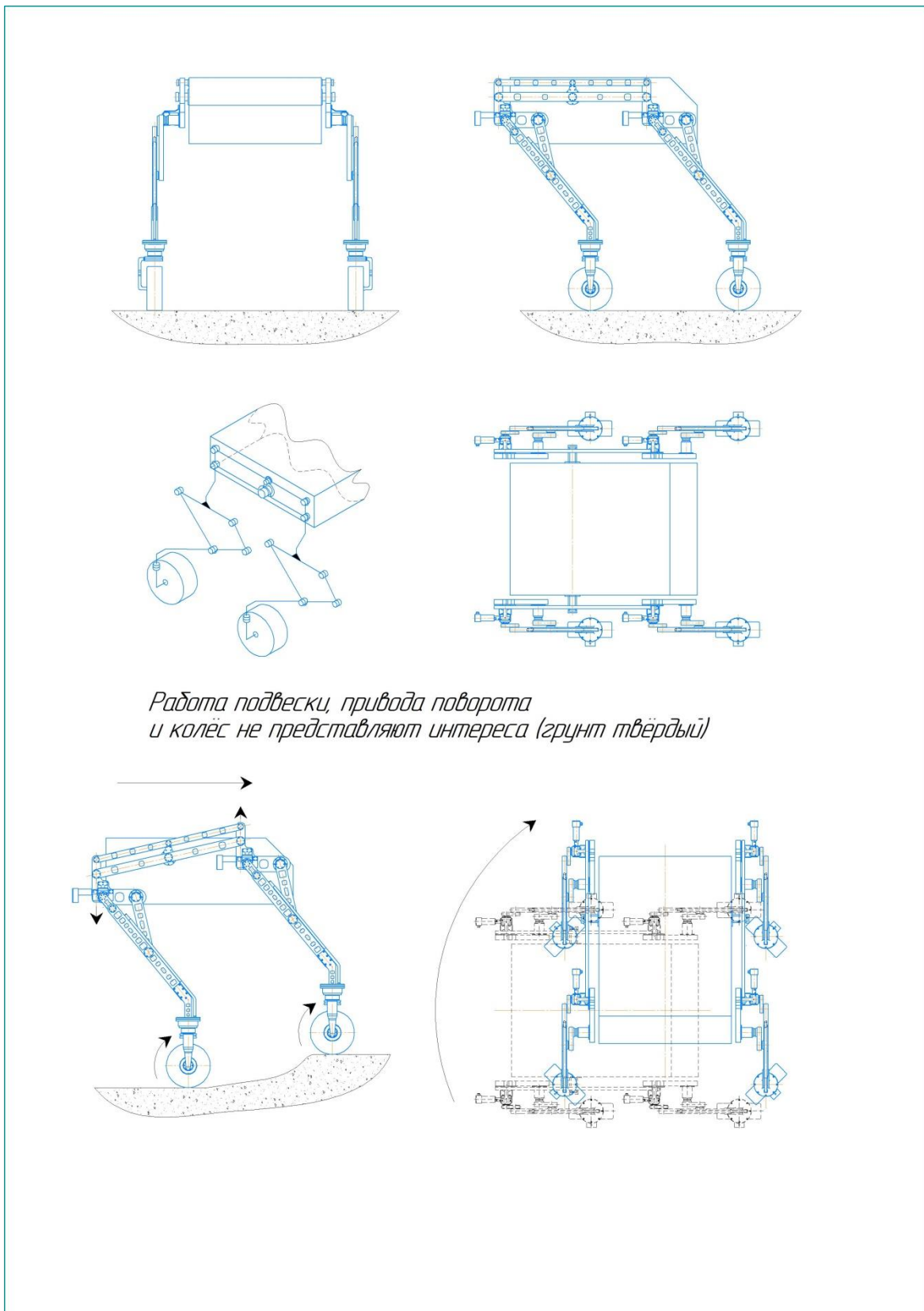
19 Соединители электрические, цилиндрические, низкочастотные типа 2РМТ, 2РМДТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radiant.su/files/images/iset/2009.11.17-2rmt.pdf>

20 Угол давления в кулачковых механизмах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spargalki.ru/mashinostroenie-materialy/205-teoria-mashin-i-mehanizmov.html?start=27>

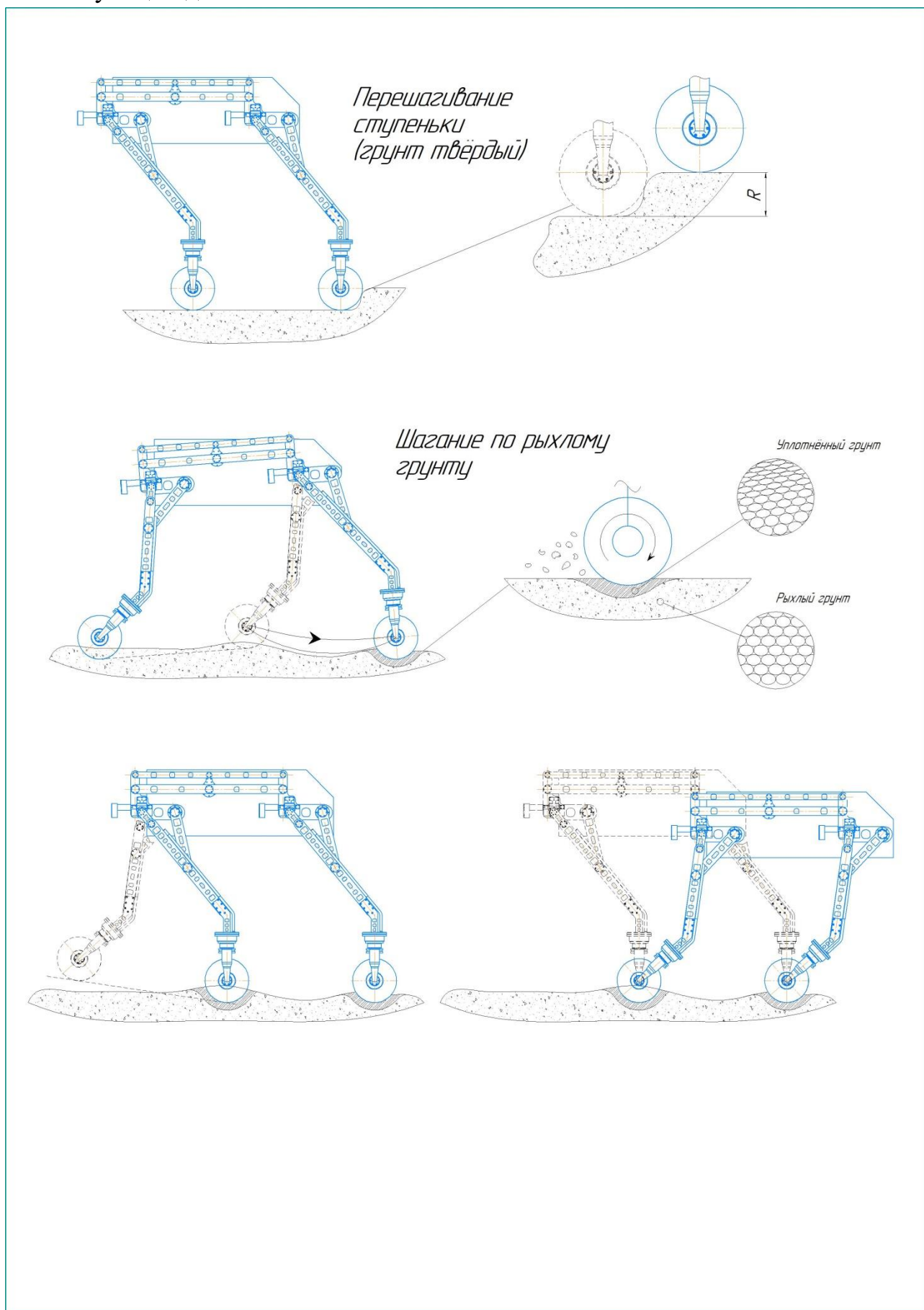
21 Каталог “Махон” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/catalog>

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Принципиальная схема

Общий вид планетохода и типовые условия эксплуатации

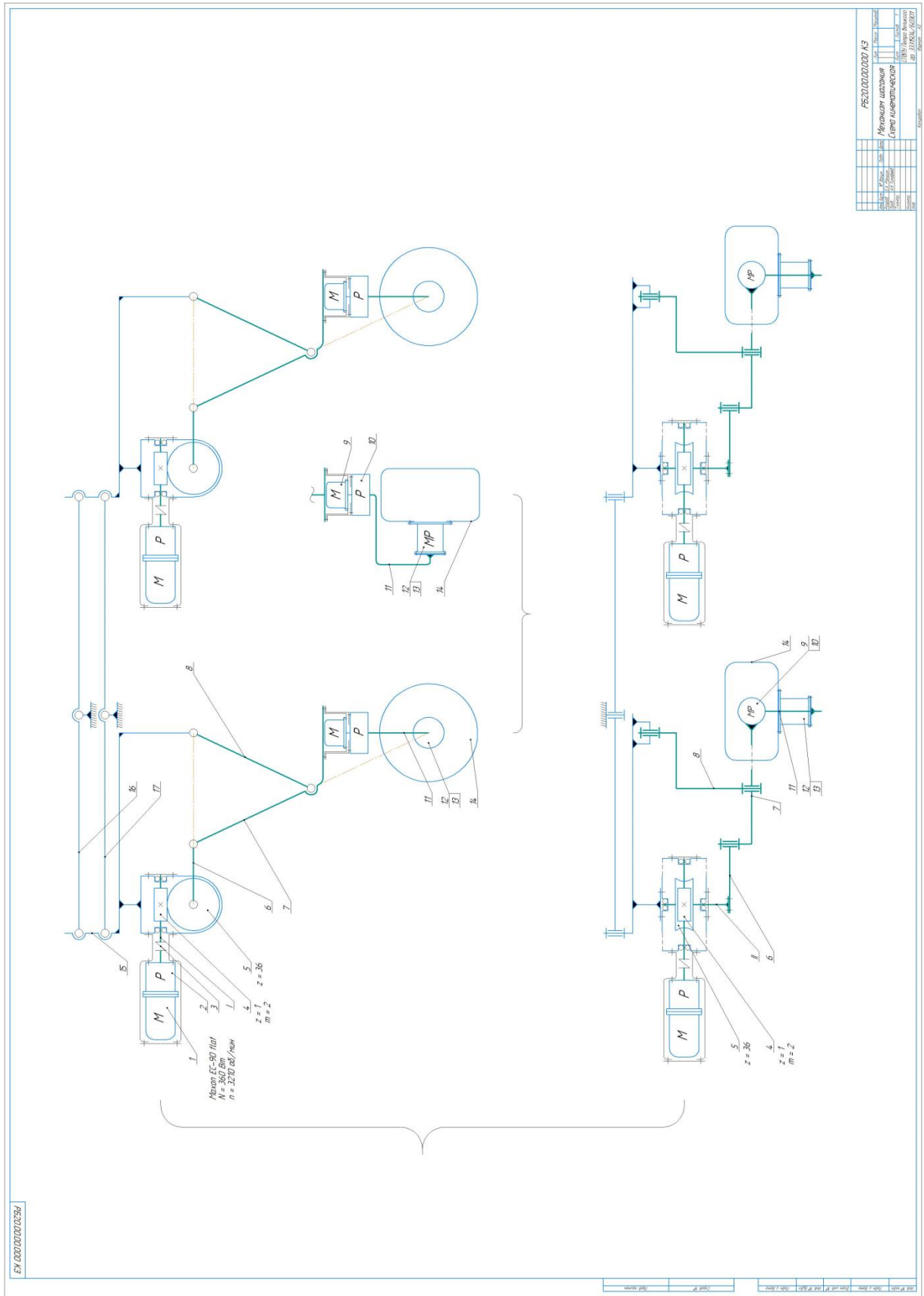


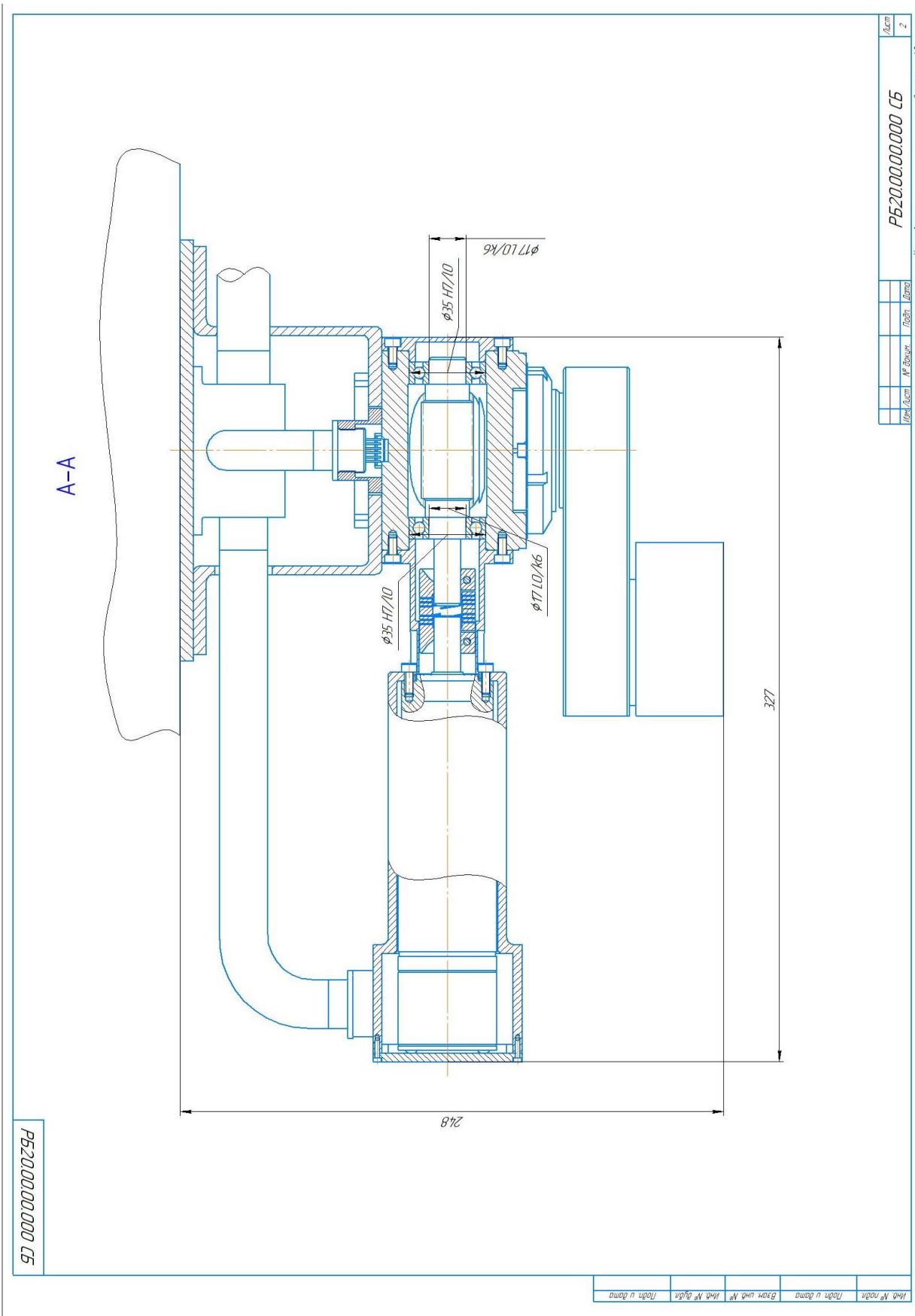
Функции движителя



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

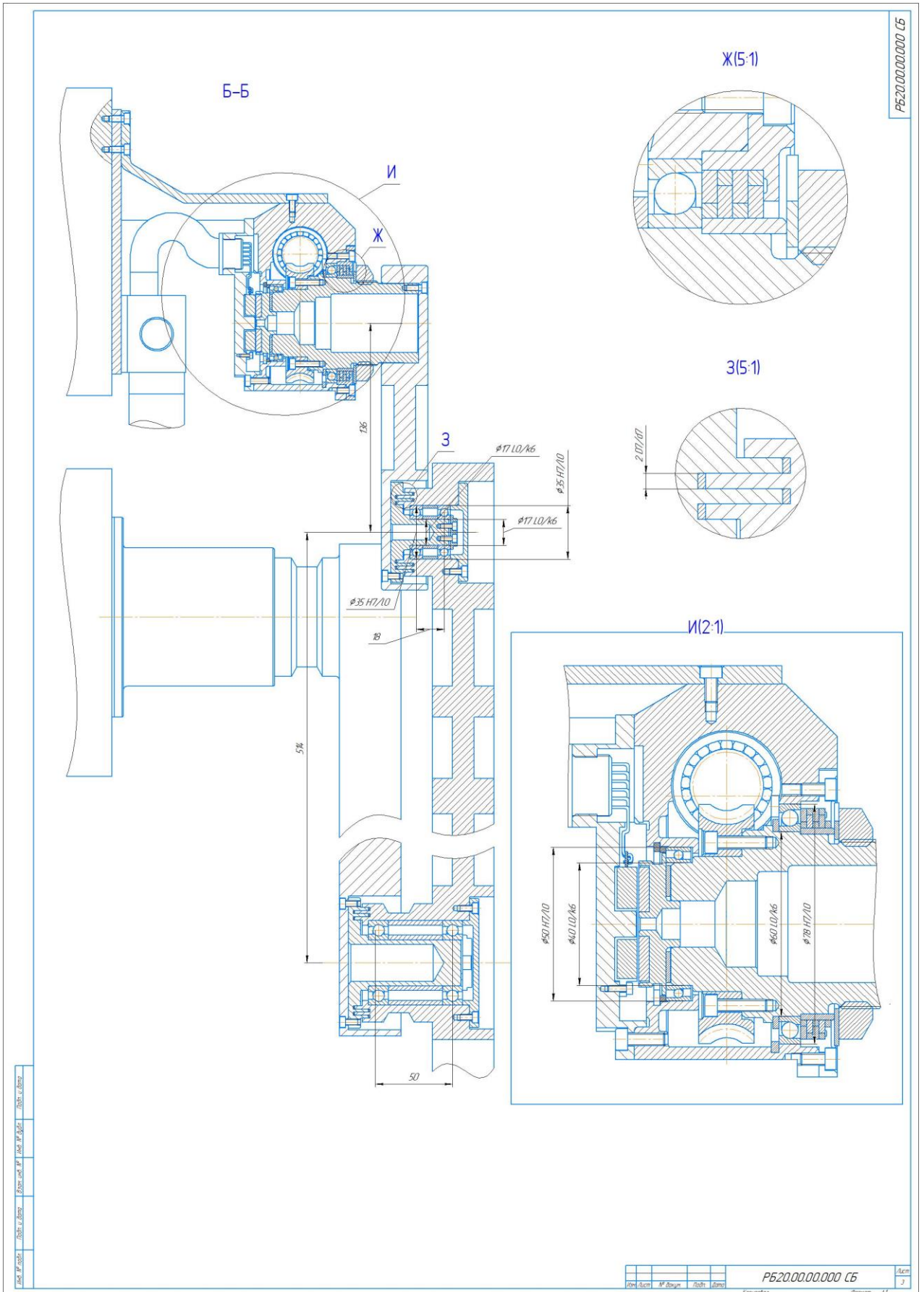
Кинематическая схема





Имб № модн	Имб № модн	Имб № модн	Имб № модн	Имб № модн	Имб № модн
Имб № модн	Имб № модн	Имб № модн	Имб № модн	Имб № модн	Имб № модн

Лист	2
Имя файла	
№ докум.	
Изд.	
Изм.	
Контракт	P5200000000 C5
Контракт	42



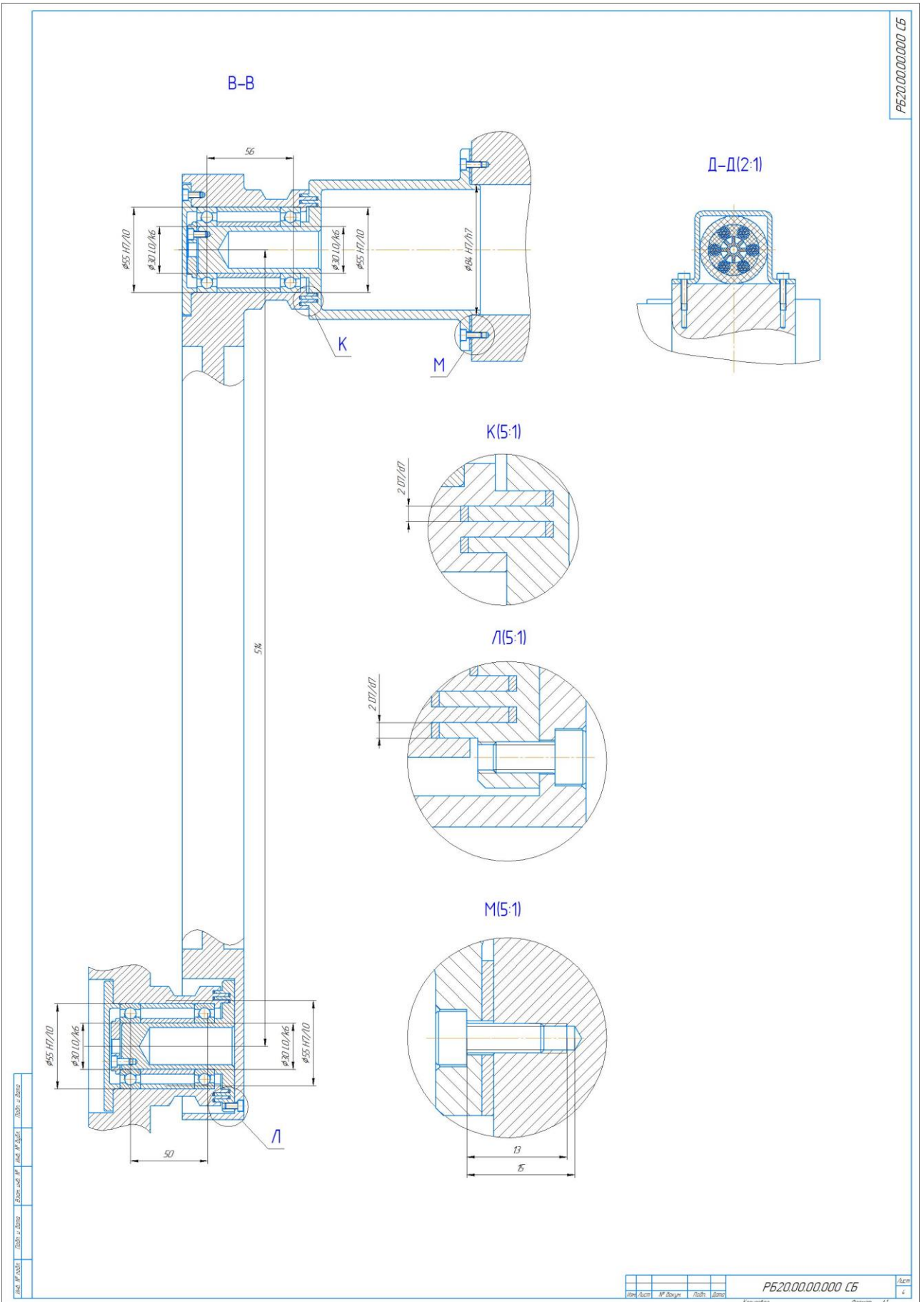
P620.00.00.0000 C6

Лист № 0000
 Дата: 00.00.00
 Имя: И.И.И.
 Фамилия: И.И.И.
 Должность: И.И.И.

И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.
И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.	И.И.И.

P620.00.00.0000 C6

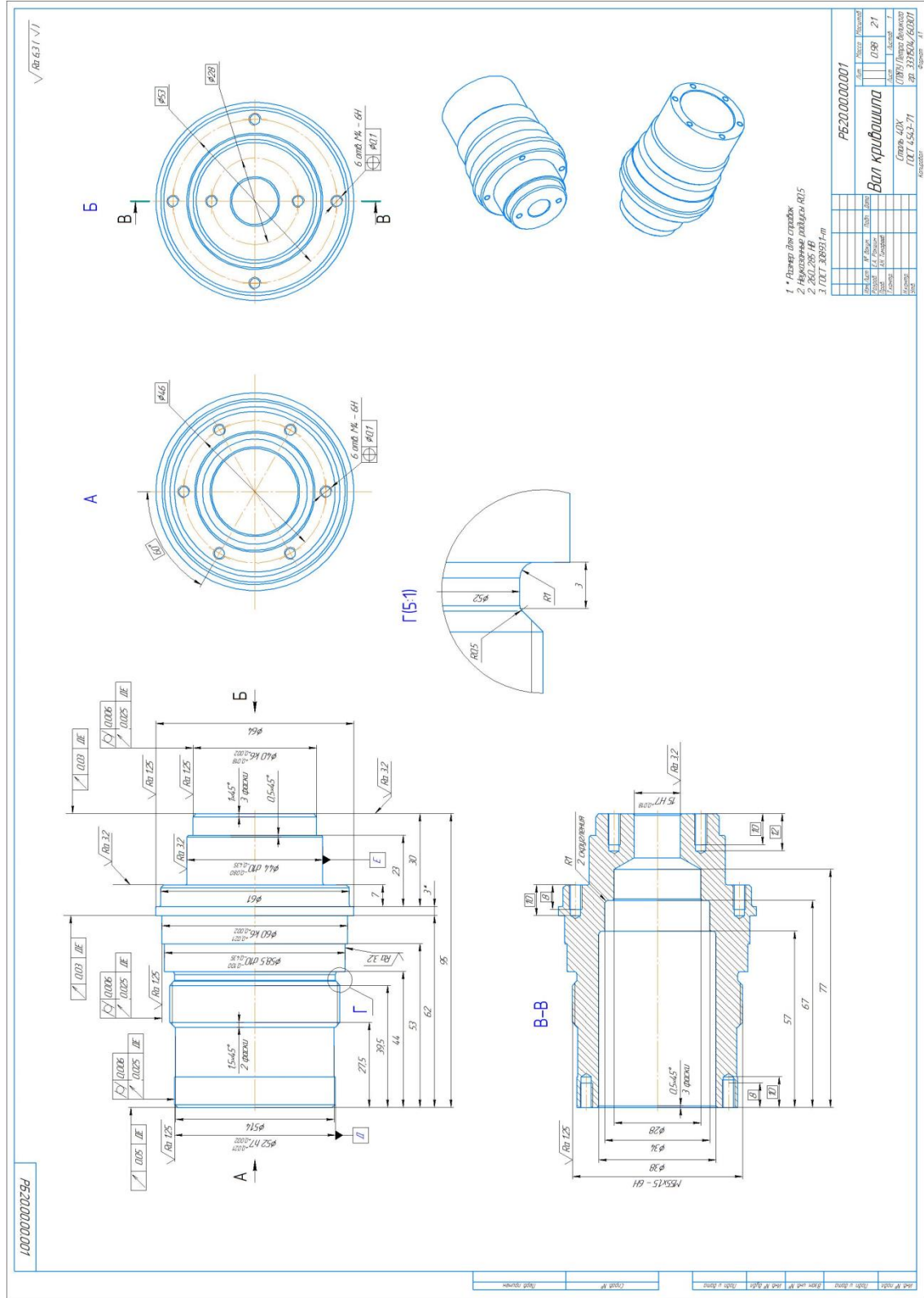
И.И.И. 3



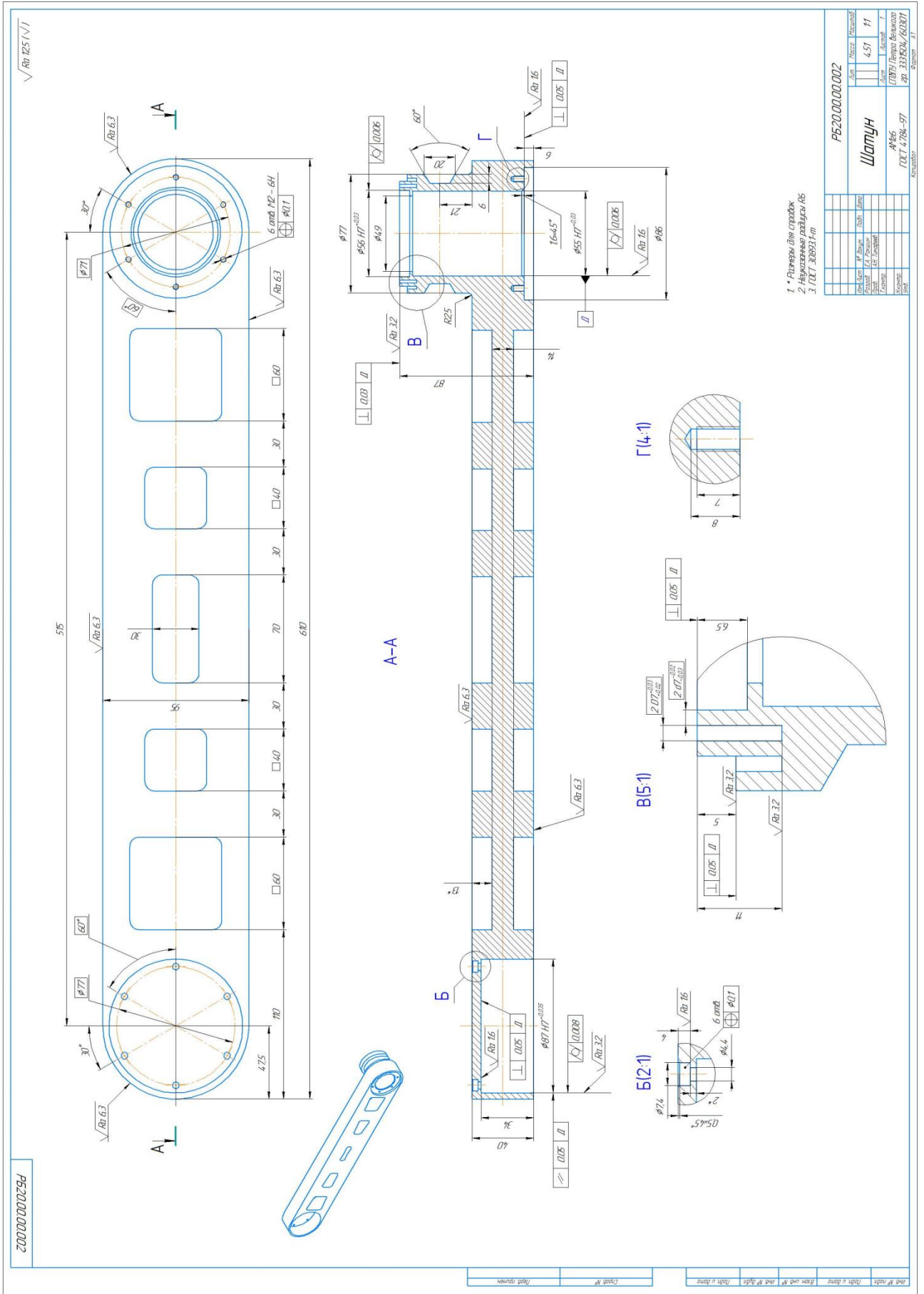
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Рабочие чертежи деталей

Рабочий чертёж детали «Вал»



Рабочий чертёж детали «Шатун»

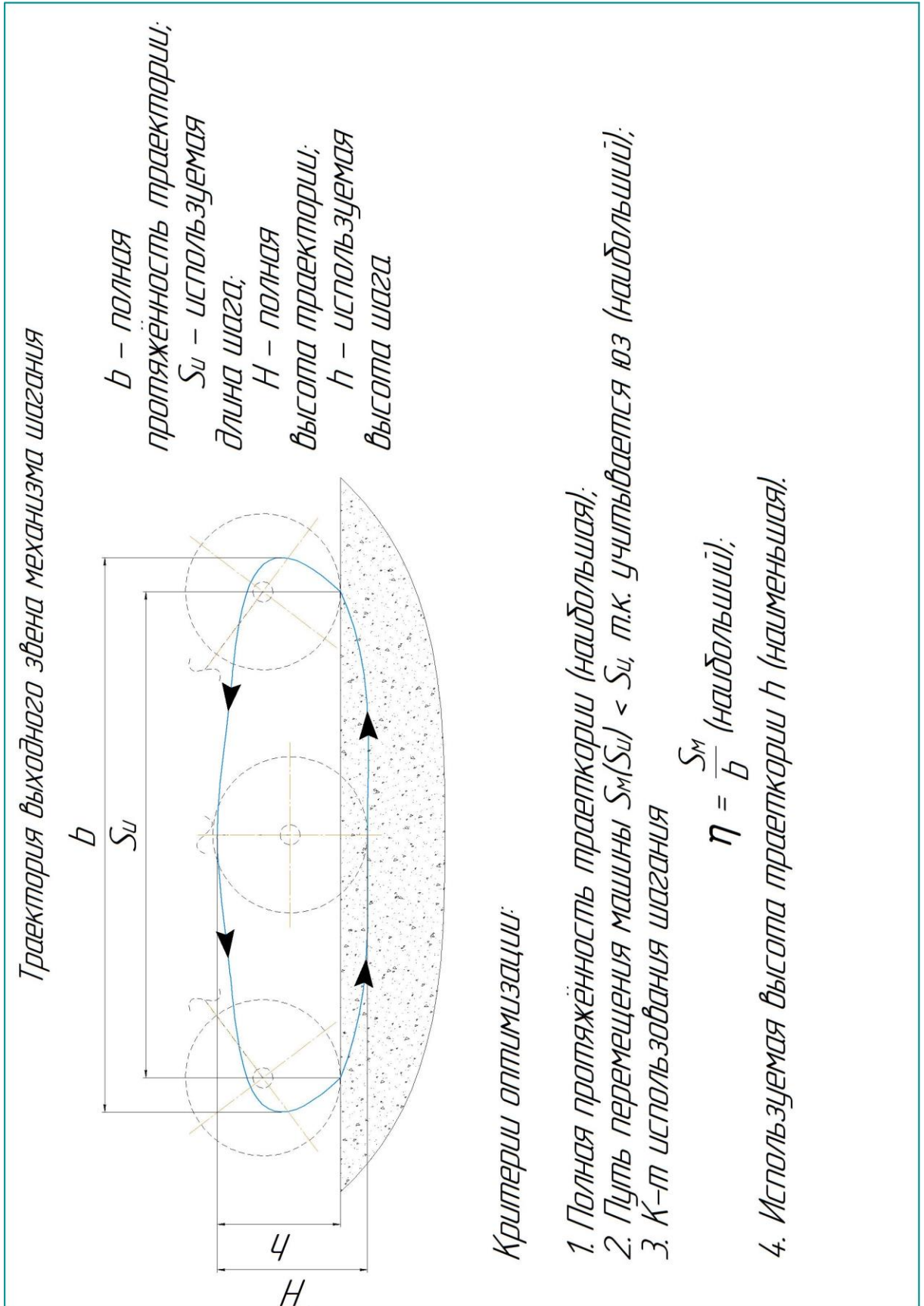


1. Размеры для справок.
2. Неказенные размеры по ГОСТ 30893-11.
3. ГОСТ 30893-11.

№ документа		Исполнитель		Проверенный		Утвержденный	
№ документа	Исполнитель	Проверенный	Утвержденный	№ документа	Исполнитель	Проверенный	Утвержденный
РБ20.000.00.002	Шатуны						
	МНБ						
	ГПТ 4.704-97						
	РП 333624/40301						
	Бланк 11						

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Расчётная схема

Общий вид траектории и параметры оптимизации с критериями

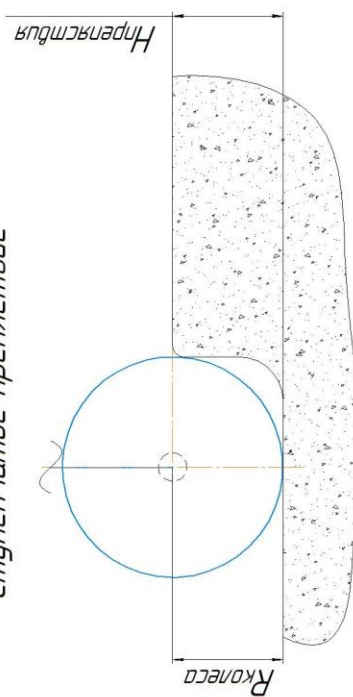


Сравнение траекторий и перешагивание препятствия

Вариант №	b	SM	η	h	Итого
0	+	+	+	+	4
1	+	+	-	+	3
2	+	+	-	-	2
3	-	-	-	-	0
4	-	-	-	-	0
5	+	+	+	+	4

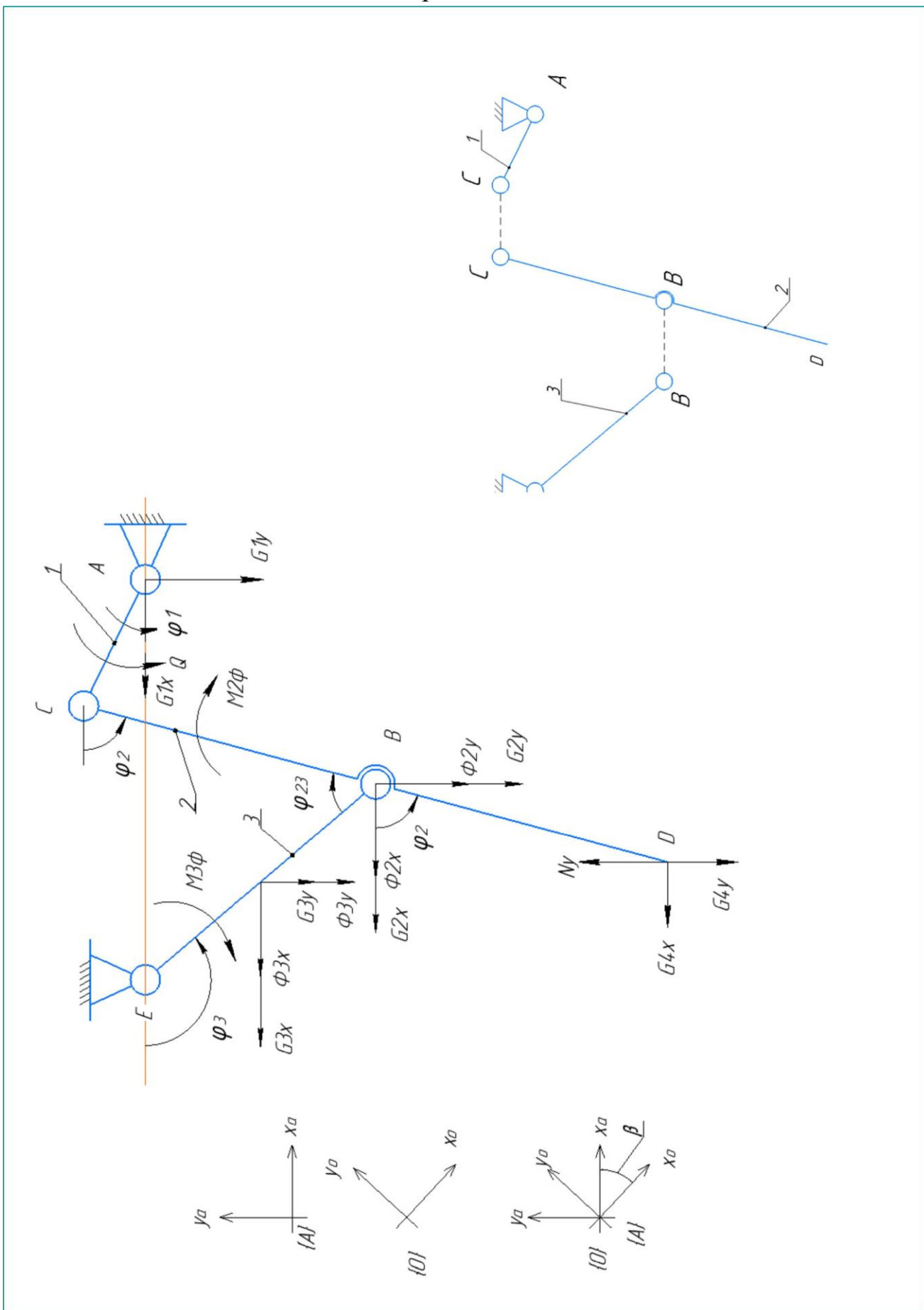
0 или 5 вариант?
Т.к. $h_0 > h_5$, поэтому выбираю вариант 5

Ступенчатое препятствие:



$h_5 < R$ – перешагивание
ступенчатого препятствия
невозможно одеспечить

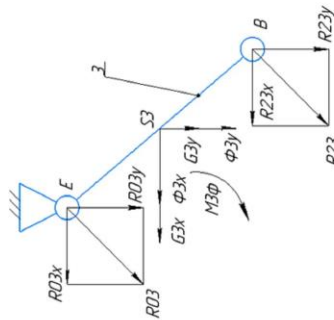
Расчётная схема механизма в произвольном положении



Уравнения равновесия для мысленно разбитых звеньев

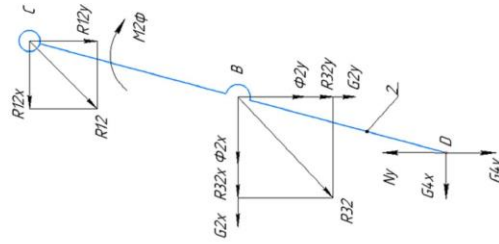
Звено 3:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0: R_{23x} + \Phi_{3x} + R_{03x} + G_{3x} = 0; \\ \sum F_y = 0: R_{23y} + \Phi_{3y} + R_{03y} + G_{3y} = 0; \\ \sum M_E = 0: -R_{23x}(Y_B - Y_E) - (\Phi_{3x} + G_{3x})(Y_{S3} - Y_E) - R_{23y}(X_E - X_B) - \\ - (\Phi_{3y} + G_{3y})(X_E - X_{S3}) - M_{3\Phi} - G_3(X_E - X_{S3}) = 0. \end{array} \right.$$



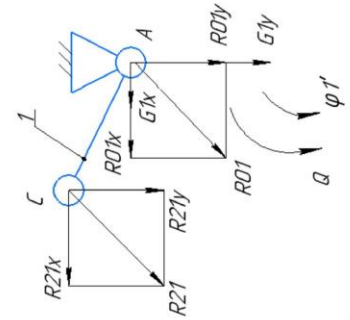
Звено 2:

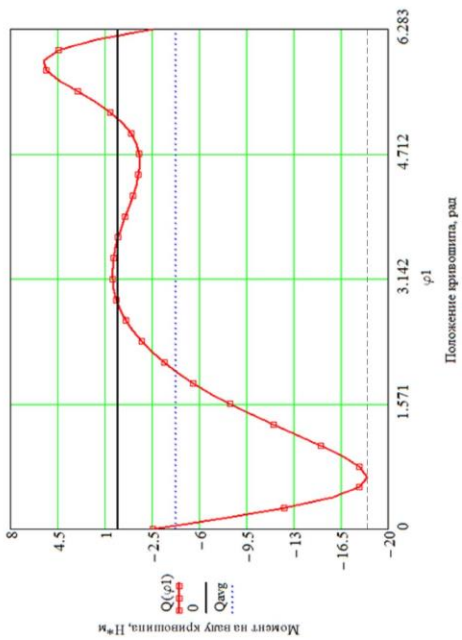
$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0: R_{12x} + R_{32x} + \Phi_{2x} + G_{4x} + G_{2x} = 0; \\ \sum F_y = 0: R_{12y} + R_{32y} + \Phi_{2y} + G_{2y} + G_{4y} - N_y = 0; \\ \sum M_B = 0: -G_{4x}(Y_D - Y_B) + (G_{4y} - N_y)(X_D - X_B) - \\ - R_{12y}(X_B - X_C) + R_{12x}(Y_B - Y_C) - M_{2\Phi} = 0. \end{array} \right.$$



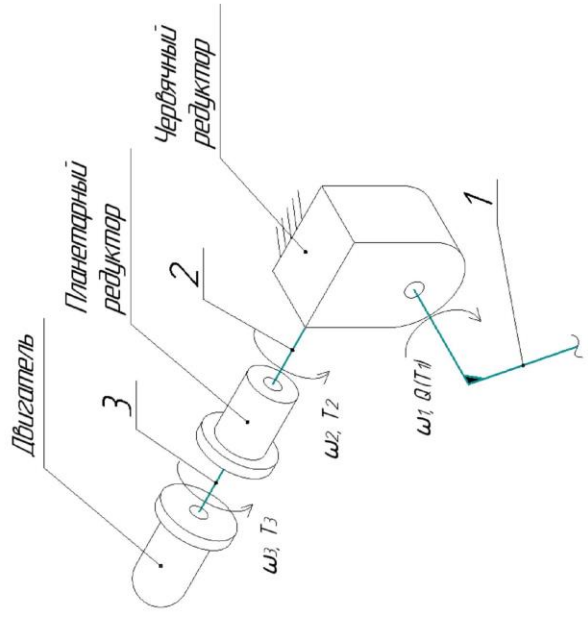
Звено 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = 0: R_{01x} + R_{21x} + G_{1x} = 0; \\ \sum F_y = 0: R_{01y} + R_{21y} + G_{1y} = 0; \\ \sum M_A = 0: R_{21y}(X_c - X_A) + R_{21x}(Y_A - Y_C) + Q = 0. \end{array} \right.$$





$$|Q_{max}| = 18.44 \text{ Н*М}$$



GEAR

Planetary Gearhead GP 52 C Ø52 mm, 4 - 30 Nm,
Ceramic Version
Part No.: 223081

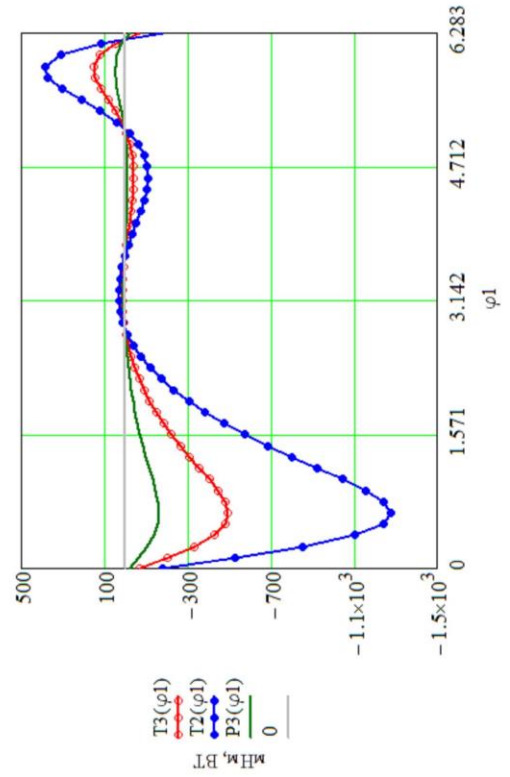
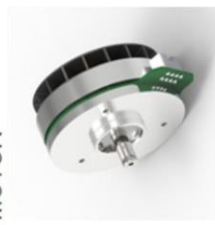
Diameter: 52 mm
Reduction Ratio: 4.3 : 1
Torque: 4 Nm



MOTOR

EC 90 flat Ø90 mm, brushless, 360 W, with Hall sensors
EC 90 flat Ø90 mm, brushless, 360 W, with Hall sensors
Part No.: 607950

Diameter: 90 mm
Type performance: 360 W
Nominal voltage: 24 V
Idle speed: 3210 rpm
Maximum torque: 953 mNm



ПРИЛОЖЕНИЕ Е
Расчёт и оптимизация механизма шагания
 Листинг MathCad.

$$\lambda := \begin{pmatrix} \frac{200 + 136}{2} & 200 & 250 & 148 & 225 & 136 \\ \frac{500 + 514}{2} & 500 & 600 & 318 & 500 & 514 \\ \frac{400 + 300}{2} & 400 & 500 & 421 & 500 & 300 \end{pmatrix}$$

длина кривошипа
длина шатуна
межкосевое расстояние

$$l1 := \frac{\lambda_{0,k}}{1000} = 0.136$$

$$l3 := \frac{\lambda_{1,k}}{1000} = 0.514$$

$$l2 := l3 \cdot 2 = 1.028$$

$$X_{ae} := \frac{\lambda_{2,k}}{1000} = 0.3$$

$$Y_{ae} := 0$$

$$\chi := 24$$

$$\varphi1 := 0, \frac{\pi}{\chi} .. 2 \cdot \pi$$

$$o := 2\chi + 1 = 49 \quad \text{сколько точек} \quad \varphi23(\varphi1) := \text{angle}(\cos\varphi23(\varphi1), \sin\varphi23(\varphi1))$$

$$AC = AE + EB - BC:$$

$$a(\varphi1) := (l1 \cdot \cos(\varphi1) - X_{ae})^2 + (l1 \cdot \sin(\varphi1) - Y_{ae})^2$$

$$\cos\varphi23(\varphi1) := \frac{\frac{l2^2}{4} + l3^2 - a(\varphi1)}{l2 \cdot l3}$$

$$\sin\varphi23(\varphi1) := -\sqrt{1 - (\cos\varphi23(\varphi1))^2}$$

$$\cos\varphi_3(\varphi_1) := \frac{\begin{bmatrix} -(X_{ae} - l_1 \cdot \cos(\varphi_1)) & \frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_{23}(\varphi_1) \\ -(Y_{ae} - l_1 \cdot \sin(\varphi_1)) & l_3 - \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_{23}(\varphi_1) \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} l_3 - \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_{23}(\varphi_1) & \frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_{23}(\varphi_1) \\ -\left(\frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_{23}(\varphi_1)\right) & \left(l_3 - \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_{23}(\varphi_1)\right) \end{bmatrix}}$$

$$\sin\varphi_3(\varphi_1) := \frac{\begin{bmatrix} l_3 - \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_{23}(\varphi_1) & -(X_{ae} - l_1 \cdot \cos(\varphi_1)) \\ -\left(\frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_{23}(\varphi_1)\right) & -(Y_{ae} - l_1 \cdot \sin(\varphi_1)) \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} l_3 - \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_{23}(\varphi_1) & \frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_{23}(\varphi_1) \\ -\left(\frac{l_2}{2} \cdot \sin\varphi_{23}(\varphi_1)\right) & \left(l_3 - \frac{l_2}{2} \cdot \cos\varphi_{23}(\varphi_1)\right) \end{bmatrix}}$$

$$\varphi_3(\varphi_1) := \text{angle}(\cos\varphi_3(\varphi_1), \sin\varphi_3(\varphi_1))$$

$$\varphi_2(\varphi_1) := \varphi_{23}(\varphi_1) + \varphi_3(\varphi_1)$$

$$\varphi_3'(\varphi_1) := \frac{\left| \begin{pmatrix} -11 \cdot \sin(\varphi_1) & \frac{12}{2} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1)) \\ 11 \cdot \cos(\varphi_1) & -\frac{12}{2} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1)) \end{pmatrix} \right|}{\left| \begin{pmatrix} -13 \cdot \sin\varphi_3(\varphi_1) & \frac{12}{2} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1)) \\ 13 \cdot \cos\varphi_3(\varphi_1) & -\frac{12}{2} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1)) \end{pmatrix} \right|}$$

$$\varphi_2'(\varphi_1) := \frac{\left| \begin{pmatrix} -13 \cdot \sin\varphi_3(\varphi_1) & -11 \cdot \sin(\varphi_1) \\ 13 \cdot \cos\varphi_3(\varphi_1) & 11 \cdot \cos(\varphi_1) \end{pmatrix} \right|}{\left| \begin{pmatrix} -13 \cdot \sin\varphi_3(\varphi_1) & \frac{12}{2} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1)) \\ 13 \cdot \cos\varphi_3(\varphi_1) & -\frac{12}{2} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1)) \end{pmatrix} \right|}$$

$$\varphi_2''(\varphi_1) := \frac{\begin{bmatrix} 11 \cdot \cos(\varphi_1) + \frac{12}{2} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1)) \cdot (\varphi_2'(\varphi_1))^2 - 13 \cdot \cos\varphi_3(\varphi_1) \cdot (\varphi_3'(\varphi_1))^2 & 13 \cdot \sin\varphi_3(\varphi_1) \\ 11 \cdot \sin(\varphi_1) + \frac{12}{2} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1)) \cdot (\varphi_2'(\varphi_1))^2 - 13 \cdot \sin\varphi_3(\varphi_1) \cdot (\varphi_3'(\varphi_1))^2 & -13 \cdot \cos\varphi_3(\varphi_1) \end{bmatrix}}{\begin{pmatrix} -\frac{12}{2} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1)) & 13 \cdot \sin\varphi_3(\varphi_1) \\ \frac{12}{2} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1)) & -13 \cdot \cos\varphi_3(\varphi_1) \end{pmatrix}}$$

$$\varphi_3''(\varphi_1) := \frac{\begin{bmatrix} -\frac{12}{2} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1)) & 11 \cdot \cos(\varphi_1) + \frac{12}{2} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1)) \cdot (\varphi_2'(\varphi_1))^2 - 13 \cdot \cos\varphi_3(\varphi_1) \cdot (\varphi_3'(\varphi_1))^2 \\ \frac{12}{2} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1)) & 11 \cdot \sin(\varphi_1) + \frac{12}{2} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1)) \cdot (\varphi_2'(\varphi_1))^2 - 13 \cdot \sin\varphi_3(\varphi_1) \cdot (\varphi_3'(\varphi_1))^2 \end{bmatrix}}{\begin{pmatrix} -\frac{12}{2} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1)) & 13 \cdot \sin\varphi_3(\varphi_1) \\ \frac{12}{2} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1)) & -13 \cdot \cos\varphi_3(\varphi_1) \end{pmatrix}}$$

$$g := 1.62 \quad n_1 := 20 \quad \omega_1 := \frac{\pi \cdot n_1}{30} = 2.094$$

Расчет масс звеньев:

$$m_1 := 0.67 \quad m_2 := 3.9 \quad m_3 := 2.5 \quad m_4 := 1.5$$

Расчет сил тяжести звеньев:

$$G_1 := m_1 \cdot g = 1.085 \text{ Н}$$

$$G_2 := m_2 \cdot g = 6.318 \text{ Н}$$

$$G_3 := m_3 \cdot g = 4.05 \text{ Н}$$

$$G_4 := m_4 \cdot g = 2.43 \text{ Н}$$

**Угол наклона
кратера:**

$$\beta := 40$$

$$G_{1x} := G_1 \cdot \sin(\beta) \quad G_{2x} := G_2 \cdot \sin(\beta)$$

$$G_{1y} := G_1 \cdot \cos(\beta) \quad G_{2y} := G_2 \cdot \cos(\beta)$$

$$G_{3x} := G_3 \cdot \sin(\beta) \quad G_{4x} := G_4 \cdot \sin(\beta)$$

$$G_{3y} := G_3 \cdot \cos(\beta) \quad G_{4y} := G_4 \cdot \cos(\beta)$$

Моменты инерции звеньев:

$$J_1 := \frac{m_1 \cdot l_1^2}{12} = 0.00103 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_2 := \frac{m_2 \cdot l_2^2}{12} = 0.343 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$J_3 := \frac{m_3 \cdot l_3^2}{12} = 0.055 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Моменты сил инерции звеньев:

$$M_{2\phi}(\varphi_1) := -J_2 \cdot \varphi_2''(\varphi_1) \cdot (\omega_1)^2$$

$$M_{3\phi}(\varphi_1) := -J_3 \cdot \varphi_3''(\varphi_1) \cdot (\omega_1)^2$$

Определяем координаты точек и координаты центров масс звеньев:

$$X_a := 0$$

$$Y_a := 0$$

$$X_e := X_{ae}$$

$$Y_e := 0$$

$$X_c(\varphi_1) := l_1 \cdot \cos(\varphi_1)$$

$$Y_c(\varphi_1) := l_1 \cdot \sin(\varphi_1)$$

$$X_b(\varphi_1) := l_3 \cdot \cos(\varphi_3(\varphi_1))$$

$$Y_b(\varphi_1) := l_3 \cdot \sin(\varphi_3(\varphi_1))$$

$$X_d(\varphi_1) := X_c(\varphi_1) + l_2 \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1))$$

$$Y_d(\varphi_1) := Y_c(\varphi_1) + l_2 \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1))$$

$$X_{s3}(\varphi_1) := \frac{l_3}{2} \cdot \cos(\varphi_3(\varphi_1))$$

$$Y_{s3}(\varphi_1) := \frac{l_3}{2} \cdot \sin(\varphi_3(\varphi_1))$$

Аналоги скорости и ускорения точек:

$$X_{s3}'(\varphi_1) := \frac{d}{d\varphi_1} X_{s3}(\varphi_3(\varphi_1))$$

$$Y_{s3}'(\varphi_1) := \frac{d}{d\varphi_1} Y_{s3}(\varphi_3(\varphi_1))$$

$$X_{s3}''(\varphi_1) := \frac{d^2}{d\varphi_1^2} X_{s3}(\varphi_3(\varphi_1))$$

$$Y_{s3}''(\varphi_1) := \frac{d^2}{d\varphi_1^2} Y_{s3}(\varphi_3(\varphi_1))$$

$$X_c'(\varphi_1) := \frac{d}{d\varphi_1} X_c(\varphi_1)$$

$$Y_c'(\varphi_1) := \frac{d}{d\varphi_1} Y_c(\varphi_1)$$

$$X_c''(\varphi_1) := \frac{d^2}{d\varphi_1^2} X_c(\varphi_1)$$

$$Y_c''(\varphi_1) := \frac{d^2}{d\varphi_1^2} Y_c(\varphi_1)$$

$$X_b'(\varphi_1) := \frac{d}{d\varphi_1} X_b(\varphi_3(\varphi_1))$$

$$Y_b'(\varphi_1) := \frac{d}{d\varphi_1} Y_b(\varphi_3(\varphi_1))$$

$$X_b''(\varphi_1) := \frac{d^2}{d\varphi_1^2} X_b(\varphi_3(\varphi_1))$$

$$Y_b''(\varphi_1) := \frac{d^2}{d\varphi_1^2} Y_b(\varphi_3(\varphi_1))$$

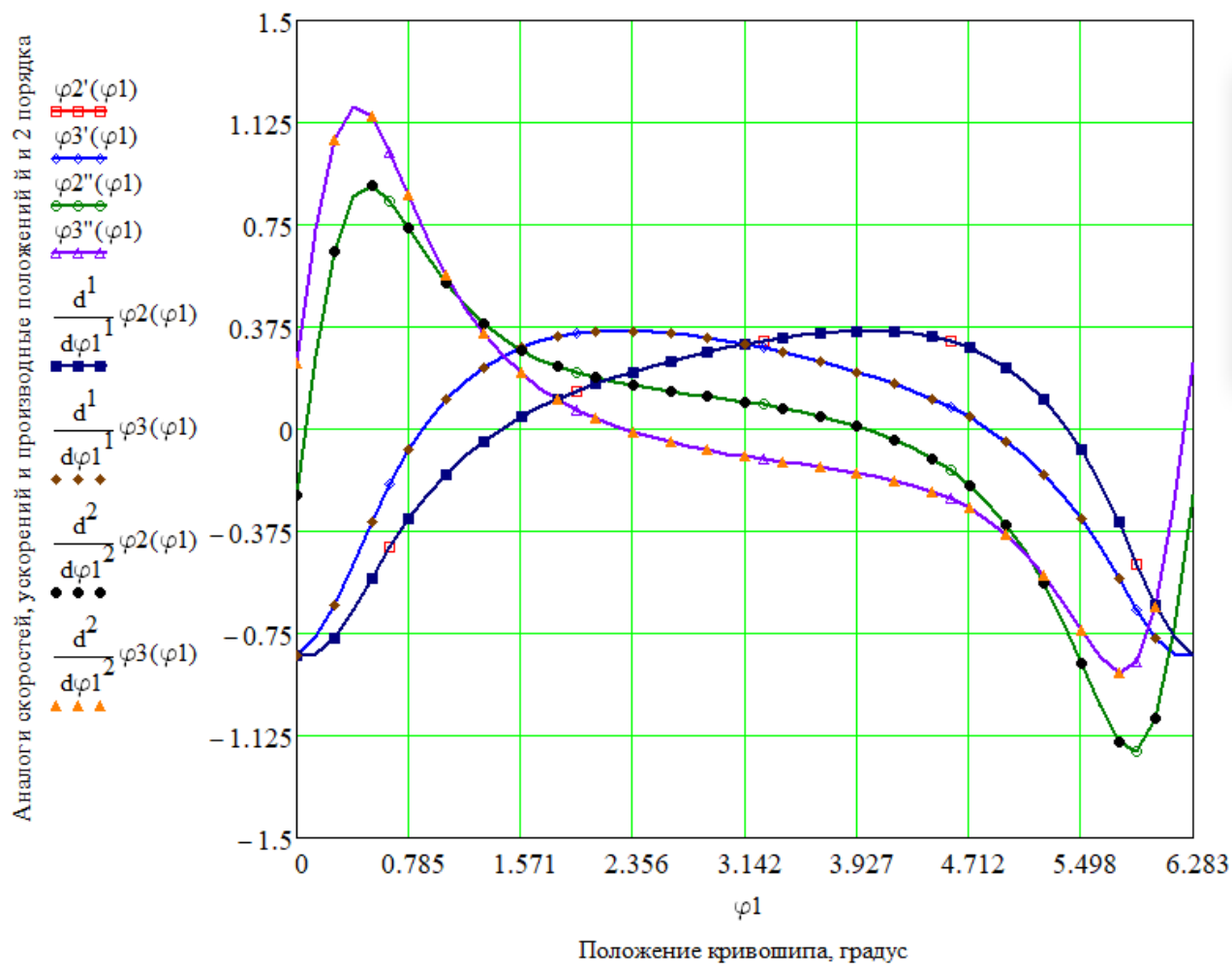
$$X_d'(\varphi_1) := X_b'(\varphi_3(\varphi_1)) - \frac{l_2}{2} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1))$$

$$Y_d'(\varphi_1) := Y_b'(\varphi_3(\varphi_1)) + \frac{l_2}{2} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1))$$

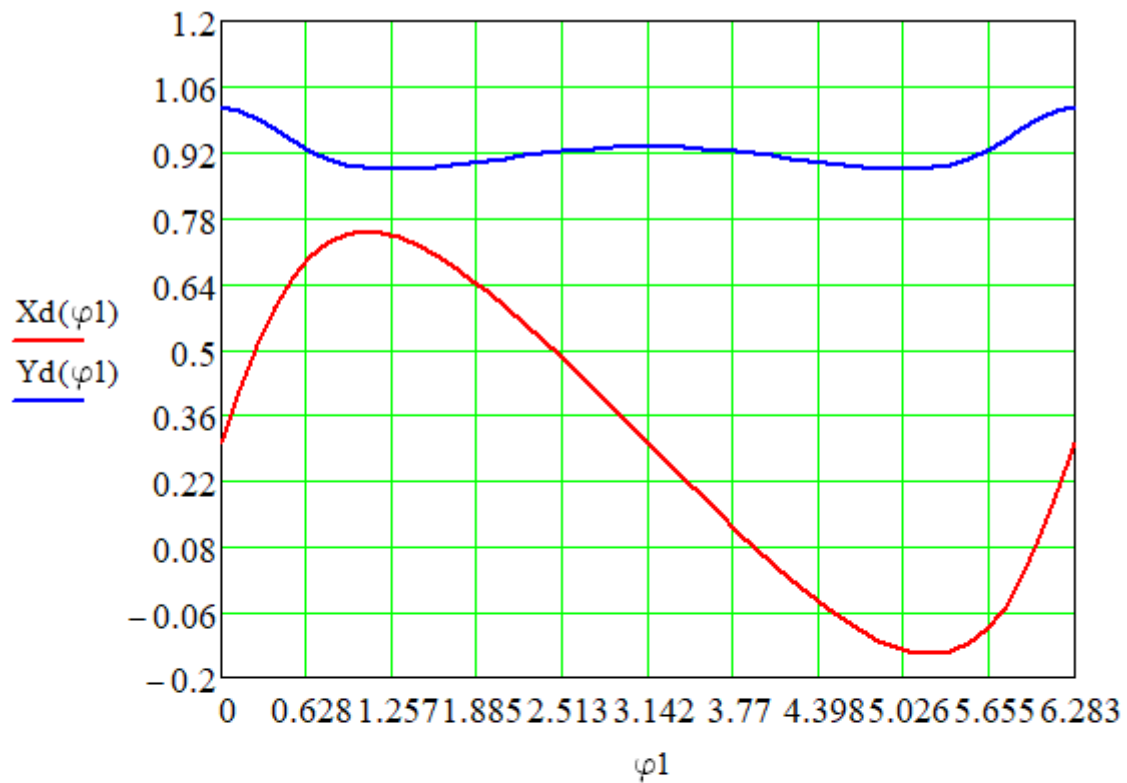
$$X_d''(\varphi_1) := X_b''(\varphi_3(\varphi_1)) - \frac{l_2}{2} \cdot \cos(\varphi_2(\varphi_1))$$

$$Y_d''(\varphi_1) := Y_b''(\varphi_3(\varphi_1)) - \frac{l_2}{2} \cdot \sin(\varphi_2(\varphi_1))$$

Сравнение аналогов скоростей и ускорений с производными 1 и 2 степени.



Графики совпадают, следовательно, геометрический расчёт верный.



$$\begin{aligned}
 x1 &:= 0 & x2 &:= 3 \\
 Yd_{\max} &:= \text{Maximize}(Yd, x1) = 0 & Yd_{\min} &:= \text{Minimize}(Yd \\
 Yd(Yd_{\max}) &= 1.015 & Yd(Yd_{\min}) &= 0.882
 \end{aligned}$$

$$h := Yd(Yd_{\max}) - Yd(Yd_{\min}) = 0.133$$

$$\begin{aligned}
 \underline{x1} &:= 0 & \underline{x2} &:= 3 \\
 Xd_{\max} &:= \text{Maximize}(Xd, x1) = 1.065 & Xd_{\min} &:= \text{Minimize}(Xd \\
 Xd(Xd_{\max}) &= 0.75 & Xd(Xd_{\min}) &= -0.15
 \end{aligned}$$

$$b := Xd(Xd_{\max}) - Xd(Xd_{\min}) = 0.901$$

$$i := 0..(2 \cdot \chi - 1)$$

$$\alpha_i := \left| \frac{\operatorname{atan} \left(\frac{Yd(t_{i+1}) - Yd(t_i)}{Xd(t_{i+1}) - Xd(t_i)} \right)}{\operatorname{deg}} \right|$$

crit_angle := 20 критический угол наклона (пятно контакта)

Используемый шаг Si:

$$\operatorname{opt_angle}(i) := \operatorname{linterp}(vx, \alpha, i)$$

$$i_opt := \operatorname{root}(\operatorname{opt_angle}(i) - \operatorname{crit_angle}, i, 0, 5) = 2.898$$

$$\operatorname{opt_angle}(i_opt) = 20$$

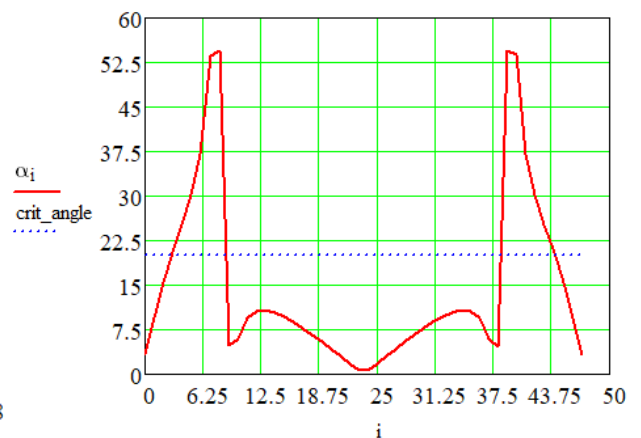
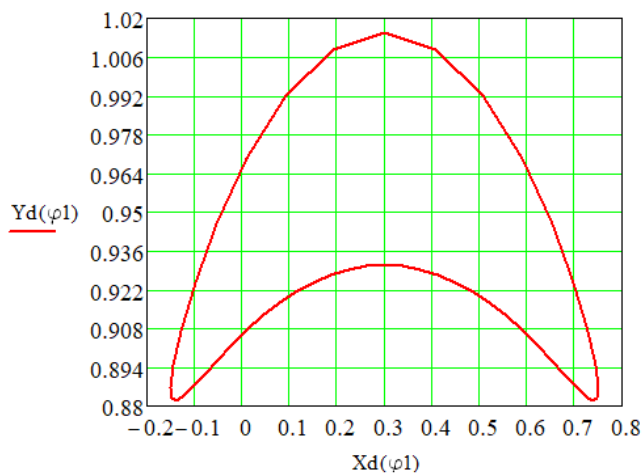
$$\varphi1_search := i_opt \cdot \frac{\pi}{\chi} = 0.379 \quad \varphi1_search \cdot \frac{180}{\pi} = 21.735^\circ$$

$$Xd(\varphi1_search) = 0.582$$

$$S_H := 2 \cdot |Xd(0) - Xd(\varphi1_search)| = 0.564$$

Переключить механизм

$$k \equiv 5$$



Путь перемещения машины S_M :

$z_0 := 4$ сколько опор

$n_0 := 3$ макс. постоянное число опор

$s_{ю} := 0.06$ к-т юза для кварцевого песка (схож по свойствам с реголитом)

$$S_M := S_{И} \cdot \frac{n_0}{z_0} \cdot (1 - s_{ю}) = 0.397$$

$$b = 0.901$$

$$h = 0.133$$

Наименьшая высота:

$$h_{min} := |Y_d(Y_{dmax}) - Y_d(180)| = 0.103$$

КПД шагания:

$$\eta_{step} := \frac{S_M}{b} \cdot 100 = 44.13 \%$$

Работа на деформацию грунта:

$\mu := 1$ показатель опорной поверхности

$c := 13$ параметры грунта для кварцевого песка - аналог реголита

$D := 400$ диаметр колеса

$b_{кол} := 100$ ширина колеса

$$B := b_{кол} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2} = 6.283 \times 10^4 \text{ площадь опорной поверхности, мм}^2$$

$M := 100$ масса планетохода, кг

$$P_z := \frac{M}{4} \cdot g = 40.5 \text{ Нормальная реакция на 1 опоре, Н}$$

$$A_g := \frac{1}{(\mu + 1) \cdot \left(c \cdot \frac{B}{10^6} \right)^{\frac{1}{\mu}}} \cdot (P_z)^{\frac{(\mu+1)}{\mu}} = 1.004 \times 10^3$$

Удельное давление на грунт:

$$q := \frac{M \cdot \frac{g}{4}}{B \cdot 10^{-6}} = 644.578 \text{ Па}$$

$q = c \cdot h^\mu = c \cdot h$; c -const (?), h =...

$$h_{\text{прос}} := \sqrt[\mu]{\frac{q}{c}} = 49.583$$

$$\frac{h_{\text{прос}}}{D} \cdot 100 = 12.39\%$$

Коэффициент сопротивления движению:

$$f := \frac{A_{\Gamma}}{M \cdot g \cdot S_{\text{М}} \cdot 100} = 0.156$$

Сила сопротивления при вытягивании планетохода из грунта:

$$F_{\text{сopr}} := 4 \cdot P_z \cdot f = 25.265 \text{ Н}$$

Силы инерции:

$$\Phi_{2x}(\varphi_1) := -m_2 \cdot Xb''(\varphi_3(\varphi_1)) \cdot (\omega_1)^2$$

$$\Phi_{2y}(\varphi_1) := -m_2 \cdot Yb''(\varphi_3(\varphi_1)) \cdot (\omega_1)^2$$

$$\Phi_{3x}(\varphi_1) := -m_3 \cdot Xs3''(\varphi_3(\varphi_1)) \cdot (\omega_1)^2$$

$$\Phi_{3y}(\varphi_1) := -m_3 \cdot Ys3''(\varphi_3(\varphi_1)) \cdot (\omega_1)^2$$

$$Fsopr = 25.265$$

$$M \cdot x = v$$

Реакция опоры:

$$M = 100$$

$$Ny(\varphi_1) := \begin{cases} \frac{M}{4} \cdot g & \text{if } (0 \leq \varphi_1 < \varphi_{1_search}) \vee (2 \cdot \pi - \varphi_{1_search} \leq \varphi_1 \leq 2 \cdot \pi) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\underline{\underline{M}}(\varphi_1) := \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(Yb(\varphi_1) - Ye) & -(Xe - Xb(\varphi_1)) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (Yb(\varphi_1) - Yc(\varphi_1)) & -(Xb(\varphi_1) - Xc(\varphi_1)) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(Ya - Yc(\varphi_1)) & -(Xc(\varphi_1) - Xa) & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$v(\varphi_1) := \begin{bmatrix} -\Phi_{3x}(\varphi_1) - G3x \\ -G3y - \Phi_{3y}(\varphi_1) \\ (\Phi_{3x}(\varphi_1) + G3x) \cdot (Ys3(\varphi_1) - Ye) + \Phi_{3y}(\varphi_1) \cdot (Xe - Xs3(\varphi_1)) + M3\phi(\varphi_1) + G3y \cdot (Xe - Xs3(\varphi_1)) \\ -\Phi_{2x}(\varphi_1) - Fsopr - G2x - G4x \\ -G2y - G4y - \Phi_{2y}(\varphi_1) + Ny(\varphi_1) \\ M2\phi(\varphi_1) - (G4y - Ny(\varphi_1)) \cdot (Xd(\varphi_1) - Xb(\varphi_1)) + (Fsopr + G4x) \cdot (Yd(\varphi_1) - Yb(\varphi_1)) \\ -G1x \\ -G1y \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{A}(\varphi 1) := \text{lsolve}(M(\varphi 1), v(\varphi 1))$$

$$Q(\varphi 1) := A(\varphi 1)_8$$

$$Q_{\text{avg}} := \frac{\sum_{i=0}^{\frac{360}{\chi}} Q(i)}{\frac{360}{\chi} + 1} = -2.298$$

$$x := 0$$

$$Q_{\text{max}} := \text{Maximize}(Q, x) = -2.237$$

$$Q_{\text{min}} := \text{Minimize}(Q, x) = 0.379$$

$$Q(Q_{\text{max}}) = 9.228$$

$$Q(Q_{\text{min}}) = -37.774$$

$$\text{abs_Qmax} := \max(|Q(Q_{\text{max}})|, |Q(Q_{\text{min}})|) = 37.774$$

$$\eta_{\text{чр}} := 0.4 \quad i_{12} := 36 \quad n_1 = 20 \text{ мин}^{-1}$$

$$\eta_{\text{пр}} := 0.6 \quad i_{23} := 4.3$$

$$\omega_1 := \frac{\pi n_1}{30} = 2.094 \quad P_1(\varphi_1) := \omega_1 \cdot Q(\varphi_1)$$

$$P_2(\varphi_1) := \frac{P_1(\varphi_1)}{\eta_{\text{чр}}} \quad n_2 := i_{12} \cdot n_1 = 720$$

$$\omega_2 := \frac{\pi n_2}{30} = 75.398 \quad T_2(\varphi_1) := \frac{P_2(\varphi_1)}{\omega_2} \cdot 1000$$

$$n_3 := i_{23} \cdot n_2 = 3096 \quad \omega_3 := \frac{\pi n_3}{30} = 324$$

$$P_3(\varphi_1) := \frac{P_2(\varphi_1)}{\eta_{\text{пр}}} \quad T_3(\varphi_1) := \frac{P_3(\varphi_1)}{\omega_3} \cdot 1000$$

$$T_{3\text{avg}} := \frac{\sum_{i=0}^{\chi} T_3(i)}{\frac{360}{\chi} + 1} = -61.858 \quad P_{3\text{avg}} := \frac{\sum_{i=0}^{\chi} P_3(i)}{\frac{360}{\chi} + 1} = -20.055$$

$$\underline{x} := 0$$

Момент на двигателе, мНм:

Мощность на двигателе, Вт:

$$T3_{\max} := \text{Maximize}(T3, x) = -2.237 \quad P3_{\max} := \text{Maximize}(P3, x) = -2.237$$

$$T3_{\min} := \text{Minimize}(T3, x) = 0.379 \quad P3_{\min} := \text{Minimize}(P3, x) = 0.379$$

$$T3(T3_{\max}) = 248.394$$

$$P3(P3_{\max}) = 80.532$$

$$T3(T3_{\min}) = -1.017 \times 10^3$$

$$P3(P3_{\min}) = -329.636$$

$$\text{abs_T3max} := \max(|T3(T3_{\max})|, |T3(T3_{\min})|) = 1.017 \times 10^3$$

$$\text{ceil}(\text{abs_T3max}) \rightarrow 1017$$

$$\text{abs_P3max} := \max(|P3(P3_{\max})|, |P3(P3_{\min})|) = 329.636$$

$$\text{ceil}(\text{abs_P3max}) \rightarrow 330$$

$$\text{Param} := \begin{pmatrix} \text{abs_T3max} \\ n3 \\ \text{abs_P3max} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1016.729 \\ 3096 \\ 329.636 \end{pmatrix}$$

$$T2_{\max} := \text{Maximize}(T2, x) = -2.237$$

$$T2_{\min} := \text{Minimize}(T2, x) = 0.379$$

$$T2(T2_{\max}) = 640.855$$

$$T2(T2_{\min}) = -2.623 \times 10^3$$

$$T_{\text{avg}} := \frac{\sum_{i=0}^{\frac{360}{\chi}} T2(i)}{\frac{360}{\chi} + 1} = -159.594$$

$$\text{abs_T2max} := \max(|T2(T2_{\max})|, |T2(T2_{\min})|) = 1016.729$$

$$\text{ceil}(\text{abs_T2max}) \rightarrow 1017$$

$$J_p := 5 \cdot 10^{-3}$$

$$J_{pr}(\varphi_1) := J_p \cdot i_{12}^2 + J_p \cdot i_{23}^2 + 5 \cdot J_p + [(X_{s3}'(\varphi_1)^2 + Y_{s3}'(\varphi_1)^2) \cdot m_3 +$$

$$+ (X_{d}'(\varphi_1)^2 + Y_{d}'(\varphi_1)^2) \cdot m_2 + J_1 \cdot \omega_1^2 + J_2 \cdot \varphi_2'(\varphi_1)^2 + J_3 \cdot \varphi_3'(\varphi_1)^2]$$