

Муниципальное бюджетное образовательное учреждение  
«Средняя общеобразовательная школа №7 г. Пензы»  
Министерство образования Пензенской области

II РЕГИОНАЛЬНЫЙ ФЕСТИВАЛЬ ТВОРЧЕСКИХ ОТКРЫТИЙ И  
ИНИЦИАТИВ «ЛЕОНАРДО»

Секция «Математическая»

Проектная работа

«От бионических моделей движения к роботизированным платформам»

Выполнил: Горбачев Илья  
Александрович, 9 класс  
Руководитель: Лемина Ирина  
Валентиновна, учитель математики  
высшей категории

Пенза 2022

## Паспорт проекта

№	Наименование пункта	Описание
1.	Название проекта	От бионических моделей движения к роботизированным платформам
2.	Автор проекта	Горбачев Илья, 9 класс
3.	Аннотация проекта	<p>С начала развития робототехники, появился интерес к области применения, требующий от роботизированной системы повышенной мобильности в условиях реального мира. Зачастую требуется применение роботов, использующих шагающее движение, вместо колесного.</p> <p>В данной работе изучена механика передвижения живых организмов, проведен анализ шагающих роботизированных платформ с конечностями, имитирующими, движение животных, для выявления наиболее эффективной модели при замене человека в экстремальных условиях.</p> <p>Вывели базовые зависимости, отвечающие за устойчивость шагающих роботизированных платформ, и привели формулы, которые позволяют производить динамическое планирование перемещения робота с сохранением устойчивости, исходя из индивидуальных параметров платформы, таких как масса составных звеньев робота и длины этих звеньев. Создали управляемую модель конечности робота-антропода и программу управления движения к ней.</p>
4.	Проблема, на решение которой направлен проект	<p>В современном мире используется большое количество различных роботизированных платформ в самых различных целях, однако большинство из них традиционно являются колёсными или гусеничными, что обусловлено простотой управления. Это значит, что все они имеют схожие недостатки. В тоже время, природа в ходе эволюции разработала совершенные системы передвижения, изучив которые возможно улучшить характеристики создаваемых платформ.</p>
5.	Цель проекта	<p>Рассмотреть механизмы движения различных бионических моделей, выявить их ограничения и преимущества. Разработать роботизированную «платформу-конечность» антропода.</p>
6.	Задача проекта	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Рассмотреть механизмы движения бионических моделей гексапода, квадропода и антропода.</li> <li>2. Выявить их ограничения и преимущества для различных областей применения.</li> <li>3. Определить самую эффективную модель для</li> </ol>

		<p>замены человека в экстремальных условиях.</p> <p>4. Рассчитать кинематику движения роботизированной платформы антропода.</p> <p>5. Построить роботизированную платформу-конечность антропода.</p>
7.	Сроки реализации проекта	<p>Подготовительный – октябрь 2021</p> <p>Основной – ноябрь 2021</p> <p>Заключительный – декабрь 2021</p>
8.	Ожидаемые результаты проекта	<p>В ходе проекта мы изучим природную механику движения животных с разным количеством конечностей. Сравним классические роботизированные платформы с шагающими. Проведем сравнительный анализ шагающих платформ и выберем наиболее подходящую платформу для работы в экстремальных условиях. Исследуем кинематику движения двухногого шагающего робота и изготовим управляемую модель конечности робота-антропода.</p>

## Содержание

Введение .....	5
1. Биомеханика и робототехника .....	7
1.1. Механика движения в природе .....	7
1.2. Основные типы платформ в робототехнике .....	12
2. Сравнительный анализ шагающих платформ и разработка роботизированной платформы-антропода.....	14
2.1. Сравнительный анализ шагающих роботизированных платформ .....	14
2.2. Кинематика движения робота-антропода и создание управляемой модели .....	18
Заключение .....	20
Список использованных источников: .....	22
Приложения	

## **Введение**

Применение в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы – это бионика. Бионический подход заключается в изучении и использовании опыта живой природы при создании технических систем. Известно, что живые организмы качественнее решают задачи распознавания сложных объектов в реальном времени, чем технические системы обработки сенсорной информации; а тела животных имеют существенно лучшие характеристики массы и габаритов, чем современные приводы. Многие животные отлично адаптированы к среде обитания. Они плавают, бегают, совершают прыжки, удерживаются на различных поверхностях, умеют летать. Изучение строения животных и бактерий становится той областью, в которой создатели роботов черпают новые идеи. Также один из наиболее впечатляющих разделов робототехники — это создание анималистических роботов и андроидов. Многие устройства, включая предназначенные для выполнения узкоспециализированных задач, сохраняют сходство с человеком и имеют антропоморфные черты.

Основное преимущество бионического подхода состоит в заимствовании у природы готовых к использованию схем и идей. Разработчики могут отказаться от длительных испытаний способов передвижения устройств и их взаимодействия с окружающей средой — работающий прототип всегда перед глазами. Тем не менее, бионика имеет определенные ограничения, поскольку не все природные решения оказываются оптимальными по сравнению с современными достижениями инженерной мысли.

**Актуальность исследования:** В современном мире используется большое количество различных роботизированных платформ в самых различных целях, однако большинство из них традиционно являются колёсными или гусеничными, что обусловлено простотой управления. Это значит, что все они имеют схожие недостатки. В тоже время, природа в ходе эволюции разработала совершенные системы передвижения, изучив которые возможно улучшить характеристики создаваемых платформ.

**Цель работы:** рассмотреть механизмы движения различных бионических моделей, выявить их ограничения и преимущества. Разработать роботизированную «платформу-конечность» антропода.

**Задачи исследования:**

1. Рассмотреть механизмы движения бионических моделей гексапода, квадропода и антропода.
2. Выявить их ограничения и преимущества для различных областей применения.
3. Определить самую эффективную модель для замены человека в экстремальных условиях.
4. Рассчитать кинематику движения роботизированной платформы антропода.
5. Построить роботизированную платформу-конечность антропода.

**Объект исследования:** движение конечностей живых организмов и их роботизированных аналогов.

**Предмет исследования:** кинематика движения двуногой роботизированной платформы.

**Методы исследования:** теоретические – анализ, сравнение, обобщение, моделирование; эмпирические: анализ литературы, наблюдение, тестирование образца.

Теперь уже мало у кого есть сомнения, что рано или поздно роботы, безусловно, займут свое место рядом с человеком. С начала развития робототехники, появился интерес к области их применения, требующий от роботизированной системы повышенной мобильности в условиях реального мира. Сюда относится выполнение задач, требующих передвижения по пересечённой местности, завалам, внутри зданий, сооружениям, узким шахтам и т.п. Зачастую требуется применение роботов, использующих шагающее движение, вместо колесного.

Мы рассмотрим способы передвижения животных и их аналогов – роботизированных платформ, имитирующих природную механику движения, и исследуем кинематику движения двухногого шагающего робота.

## **1. Биомеханика и робототехника**

Биомеханика — раздел естественных наук, изучающий движения животных организмов, в частности человека. Она возникла на стыке физико-математических и биологических областей знания. Кроме того, биомеханика обслуживает такие области действия как разработка роботов (бионика), инженерная биомеханика, медицинская биомеханика.

### **1.1. Механика движения в природе**

Конечности млекопитающих формировались сходными образами, т. к. они имеют общих предков. Они имеют схожий скелет и строение мышц, разница в распределении длин сегментов скелета и прилагаемых мышечных усилиях. Строение лап насекомых, существенно отличается и будет рассмотрено отдельно.

Строение конечностей напоминает пружину, суставы у млекопитающих при ходьбе выпрямляются только в крайне-верхней точке толчка, в остальное время они частично согнуты. Несколько сочленений в суставах обеспечивают достаточную упругость конструкции необходимую для гашения ударного воздействия при беге, прыжках и ходьбе даже в том случае, если один из суставов в этот момент целиком выпрямлен, что является актуальным при достаточно большом весе собственного тела.

**Антропод.** Механика движения для антропода и четырехногих млекопитающих схожа и заключается в использовании стопы как рычага для первоначального толчка в голеностопном суставе, с последующим продолжением данного движения за счет распрямления коленного и тазобедренных суставов, а также распрямления пальцев стопы. В случае бега или прыжка распрямление происходит очень быстро, придавая телу необходимый импульс.

Основное назначение пальцев стопы в поддержании равновесия в покое, а также гашении ударной нагрузки в момент приземления при беге либо прыжке. Нога прямоходящего млекопитающего (см. приложение 1, рис. 1) имеет

достаточную опору, что обусловлено наличием ярко-выраженной стопы. Опора осуществляется на всю поверхность стопы, что в тоже время накладывает ограничения на длину стопы.

Короткая стопа делает тело менее устойчивым, сокращая суммарную площадь опоры, сила первоначального толчка относительно не велика, т. к. такая стопа дает слабый рычаг. Последующее распрямление коленного и тазобедренного суставов имеют маленькую величину проекции вектора скорости на горизонтальную плоскость и направленно в основном вверх, что обусловлено разнонаправленными суставами.

Длинная стопа обеспечивает хорошую опору в статическом состоянии и хороший рычаг для придания первоначального импульса движения. При этом она ограничивает возможности маневра, и накладывает ограничения на стиль движения. Это резкие прыжки, как у кенгуру (см. приложение 1, рис. 2 и 3).

Разнонаправленное распрямление суставов прямоходящего млекопитающего обеспечивает возможность удерживать центр тяжести над площадью опоры ограниченного стопами, но при этом накладывает ограничение на основное направление усилия распрямления суставов — вверх, что в свою очередь влияет на скорость перемещения.

Алгоритм движения вперед в режиме ходьбы сводится к следующей последовательности: перенос веса на опорную ногу → подъем переносимой ноги → перемещение ноги в направлении движения → постановка ноги на грунт → перенос массы на обе ноги → смена ролей ног и возврат к пункту 1.

При этом не стоит забывать о постоянном контроле положения тела и балансировании центром тяжести для избегания падения, а также работе стоп и таза как механизмов смещения центра тяжести. Все эти движения должны быть увязаны в одну систему с движением вперед и не препятствовать ей.

**Квадропад.** Передние и задние ноги у четырёхногого млекопитающих имеют различное строение. Передняя нога (см. приложение 1, рис. 4) имеет малую площадь опоры, т.к. четырех точек достаточно для задания плоскости. Центр тяжести находится над площадью опоры. Это облегчает поддержание



равновесия. Одинаковое направление распрямления суставов передних ног позволяет развивать гораздо большие скорости, чем в случае с двуногим прямоходящим. Задние ноги (см. рис.5) опираются не на всю стопу а только на пальцы, и как правило имеют более длинную стопу, что позволяет использовать ее как более эффективный рычаг, придавая большую скорость. Задние конечности менее приспособлены к прыжку вверх, и более к прыжку вперед, чем у прямоходящих.

Горизонтальное расположение тела также влияет на распределение прилагаемого усилия по направлению вперед, т. к. усилие от задних ног прилагается к задней части туловища существенно сзади центра тяжести, то и распределение усилия будет направленно вперед и вверх.

За большую устойчивость и скорость приходится жертвовать маневренностью — свобода перемещения ноги при единичном шаге гораздо меньше, а значит нужно больше шагов для разворота (см. рис.6). Изменение направления бега возможно только большими радиусами, что обусловлено как достаточно большой собственной инерцией, так и ограничениями перемещения конечностей.

При движении можно выделить следующие основные алгоритмы.

Движение вперед шагом осуществляется, как правило, попарным шагом диагонально расположенных конечностей, для чего:

1. опорные для данного шага конечности распрямляются максимально назад и вниз, в то время как переносимые конечности подбираются под корпус и переносятся вперед. Причем немаловажно, что высота подъема конечностей не должна быть слишком большой, что обеспечивает принятие веса на данную конечность при заваливании.

2. При прохождении точки равновесия передняя переносимая конечность немного ускоряется, что вызывает легкое заваливание тела вперед и вбок к данной конечности, и она принимает на себя вес. После чего задняя переносимая конечность также касается поверхности.

3. В этот момент происходит смена ролей пар конечностей. Первой отрывается от поверхности передняя конечность, за ней, с небольшим

запаздыванием толчком отрывается задняя конечность, что придает импульс движения вперед и не дает на данном этапе завалиться назад.

4. Переходим к пункту 1 настоящего алгоритма.

**Гексоподы.** В природе они представлены насекомыми.

Мы будем рассматривать строение конечностей и особенности передвижения взрослых особей. Лапы расположены по три справа и слева от тела симметрично относительно строительной оси.

У насекомых можно выделить несколько основных схем движения не связанных с полётом. Строение лапы насекомого отчасти напоминает строение ноги млекопитающего (см. приложение 1, рис. 7). Так же можно выделить плечо (бедро), локоть (голень) и кисть или стопу, которая может быть представлена как одним так большим количеством сегментов. Расположение лап преимущественно в вертикальной плоскости.

1. Паукоподобное строение лап (как пример - водомерки) предполагает распределение малого веса насекомого на большую площадь опоры за счет длины ног, многократно превышающей размеры тела насекомого. Лапы покрыты множеством волосков, для распределения нагрузки и расположены вертикально с максимально высоким положением колена. Такое строение конечностей позволяет перемещаться по воде, используя силу поверхностного натяжения жидкости. От мощной мускулатуры пришлось отказаться для облегчения конструкции. В каждый момент времени перемещается одна лапа — остальные стоят на поверхности. Центр тяжести насекомого перемещается путём сгибания остальных пяти лап таким образом, чтобы находиться максимально близко к геометрическому центру площади опоры. Это позволяет распределить нагрузку равномерно на все лапы. Данные насекомые обладают большой скоростью и маневренностью, но только на абсолютно ровной поверхности.

2. Кузнечики (и иные прыгающие насекомые). При данном типе строения задние конечности имеют гораздо большие относительно туловища размеры и мощную мускулатуру конечностей, что позволяет совершать прыжок на приличное расстояние, многократно превышающее собственные размеры. Для

мягкого приземления при этом используются крылья. Для обеспечения максимально сильного прыжка ноги расположены вертикально, параллельно друг другу и направлены назад. Передние конечности так же расположены вертикально, но гораздо менее акцентированы на вертикальное направление, что позволяет при необходимости разворачивать их близко к горизонтальной плоскости. Прыжковые лапы у данного типа насекомых являются самым прочным элементом из конструкции, что обусловлено огромными усилиями, которые прилагаются при прыжке. Разворот задних лап для таких насекомых это тяжелая задача. Нагрузка в момент прыжка на поверхность во много раз превышает собственный вес насекомого.

3. Жуки (а также, муравьи, и др.) имеют равномерно развитые и достаточно подвижные ноги, редко превышающие длину тела насекомого, крепятся к грудному отделу панциря насекомого. Задние ноги, как правило, чуть более развитые чем остальные, что необходимо для поддержания веса брюшка. Расположение ног преимущественно вертикальное, хотя в отдельных случаях, при перемещении, они могут разворачиваться в горизонтальную плоскость. Ноги являются достаточно подвижными. При движении могут перемещаться как по одной, так и произвольно, но таким образом, чтобы обеспечивать надежную опору на поверхность — в каждый момент времени на поверхности стоит не менее 3-х ног. Как правило, за один раз перемещается 1 пара ног. Передние ноги также могут использоваться в качестве рук — при этом тело опирается на две задние пары ног.

Ноги при движении не пересекаются. Обладает средней нагрузкой на опорную поверхность, распределяющей вес тела на 6 лап в состоянии покоя и минимум на 4 лапы в движении. Ноги свободно перемещаются как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, позволяя преодолевать препятствия сопоставимые, а в ряде случаев и превышающие собственный рост. Легко меняет направление движения.

Таким образом, из анализа способов перемещения насекомых мы видим, что наиболее проходимой является жукоподобная конструкция. Кузнечнику требуется

система приземления (крылья). А водомерка слишком хрупкая и не может работать на пересеченной местности.

## **1.2. Основные типы платформ в робототехнике**

Существует множество схем движения, но мы решили остановиться именно на природных. Они существовали на Земле задолго до появления человека и показали свою эффективность за миллионы лет эволюции.

Прикладная наука о применении в технических устройствах и системах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы – это бионика. Одним из важнейших направлений в бионике является поиск оптимальных схем движения[8].

Основные условия для движущихся объектов: свойства и рельефа поверхности, действие внешних сил, скоростные показатели. За основу могут быть взяты самые разные платформы: колесные и гусеничные роботы; шагающие роботы; гибридные (колеса и конечности); специализированные (летающие, ползающие, плавающие).

Рассмотрим подробнее два наиболее распространенных вида роботов:

Первая группа - колесные и гусеничные роботы. Первый вид использует в качестве средства перемещения колесо. Данный способ позволяет достигать очень хороших скоростных показателей и легкое изменение траектории движения на ровных поверхностях. Недостатком колесной конструкции является сложность или невозможность преодоления препятствий с резким перепадом высоты, пробуксовка вследствие недостаточного сцепления колес с поверхностью или провал колеса при перепаде высот. Гусеничные конструкции не так легко изменяют траекторию при движении, но получают возможность поворота на месте. Также гусеницы решают некоторые проблемы колесной конструкции – провал колеса при небольшом, но резком перепаде высот поверхности. Тем не менее, если перепад высот резкий (угол наклона более  $45^\circ$ ) и высота преграды

превышает около трети диаметра колеса, то преодолеть преграду будет затруднительно. Особенностью средств перемещения, построенных на колесной базе, является наличие трека (колеи), на протяжении которого робот оказывает давление на поверхность[5].

Вторая группа - шагающие роботы. Их отличительной особенностью является то, что при проектировании конструкции используется биологический подход. Конструкция и алгоритм ходьбы строится на основе материалов наблюдений за живым существом. Под шагающим механизмом понимается механизм, оставляющий в процессе передвижения прерывный след. Основная задача шагающего робота – это передвижение по поверхностям со сложным рельефом, значит, этот робот при своем передвижении приспосабливается к изменяющейся форме поверхности и представляет собой систему, которая может приспосабливаться к изменениям внутренних и внешних условий[1].

Различие вариантов конструкций обусловлено разнообразием используемых примеров из живой природы, но при этом можно выделить общие черты, и как следствие преимущества и недостатки.

Таким образом, исходя из оценки возможностей роботов двух видов понятно, что шагающие машины лучше приспособлены для преодоления препятствий и движения по неровному покрытию. Движение по относительно ровной поверхности не является технически сложной задачей. Движение по неровной, с заранее неизвестным рельефом поверхности требует разработки алгоритмов передвижения и конструктивных приспособлений.

Хотя колесные транспортные средства в настоящее время явно преобладают, известно, что при ходьбе по неподготовленной поверхности существенные преимущества имеют шагающие системы передвижения. Шагающий аппарат при движении использует для опоры лишь некоторые точки на поверхности в отличие от колесных и гусеничных машин, имеющих непрерывную колею[6]. Кроме того, шагающий аппарат существенно меньше повреждает почвенный покров, что может оказаться важным для некоторых районов. Однако преимущества шагающего аппарата определяют его высокую сложность, ведь он требует

сложной компоновки, разработки высокоэффективных приводов, специальной организации стоп, рассеивающих энергию удара и т.д.

## **2. Сравнительный анализ шагающих платформ и разработка роботизированной платформы-антропода**

Проект учебно-исследовательский, с элементами инженерного, краткосрочный (октябрь – декабрь 2021). Программа реализации проекта и смета расходов представлены в приложении 2.

### **2.1. Сравнительный анализ шагающих роботизированных платформ**

Для наземных систем чаще всего используются три вида схем: антропод - человекоподобная платформа, использующая опорно-двигательный аппарат, состоящий из 2-х конечностей; квадропад (рободог) - платформа, использующая опорно-двигательный аппарат, состоящий из 4-х конечностей; гексапод - платформа, использующая опорно-двигательный аппарат, состоящий из 6-х конечностей.

Рассмотрим эти платформы с таких позиций как: схема движения, скорость, манёвренность, проходимость, энергопотребление, допустимость пересечённости рельефа, строение опоры, стоимость создания.

#### **1. Анализ платформ по схеме движения**

Любая из платформ требует контроля положения центра тяжести в режиме передвижения шагом, так, чтобы он постоянно находился над многоугольником описанным конечностями, стоящими в данный момент на поверхности, а для двуногой платформы точно над стопой единственной опорной конечности. Момент инерции для неспешного перемещения шагом будет не столь велик, чтобы оказывать серьезное воздействие на устойчивость платформы, но в режиме бега момент инерции оказывает на порядок большее воздействие, и уже должен учитываться при движении. Наиболее устойчивыми по схеме движения будут платформы гексоподы, т.к. они обладают достаточным количеством точек опоры, для обеспечения постоянного контакта с поверхностью 3-х или более ног, без особого ущерба, как для скорости движения, так и для маневренности.

Квадроподы также могут использовать схему с постоянным контактом 3-мя конечностями, но это сильно замедлит движение. Для квадроподов также как и для антроподов, применяются схемы движения с динамической устойчивостью, такие как схема с ожидаемым заваливанием на переносимую конечность для квадроподов, либо схемы, основанные на компенсации момента инерции (обратный маятник)[9]. Для режима бега этих платформ всегда будет применяться схема динамической устойчивости учитывающая инерцию, по сути, во многом повторяя упрощенный вариант бега антропода, где отсутствует необходимость бокового смещения центра тяжести при опоре на правую или левую ногу [3].

## 2. Анализ платформ по скорости

Скорость платформ-антроподов сильно ограничена алгоритмом обеспечения динамической устойчивости, т.к. потеря устойчивости и стабильности, может привести к падению или перевороту платформы.

Платформы-гексаподы не имеют недостатка в устойчивости, однако их скорость ограничена небольшими шагами, которые обусловлены строением конструкции и плотным расположением конечностей относительно друг друга, что хорошо видно из анализа мертвых зон перемещения конечностей и разнонаправленной ориентацией разворота колен конечностей. Такая конструкция позволяет быстро менять направление движения, но существенно снижает полезное действие разгибания конечности.

Самую большую скорость могут развивать платформы квадроподы. Их строение позволяет наиболее устойчиво двигаться в выбранном направлении с большой скоростью, т.к. направление усилия разгибания конечности у них максимально приближенно к нормальному направлению движения. В тоже время, за счет того, что передние конечности у них разнесены несколько шире, чем ширина стопы двуногого робота с той же высотой центра тяжести, то вероятность бокового заваливания при быстром движении существенно ниже и проявляется только на моментах изменения направления движения робота.

## 3. Анализ платформ по маневренности

Антроподу для поворота требуется провести больше действий, связанных с обеспечением собственной устойчивости[10], чем квадроподу и гексоподу. Конструкция квадропода позволяет ему маневрировать легче, чем антропоиду, т.к. для этого ему необходимо совершить меньше действий. Лучшую манёвренность могут показать гексаподы, т.к. они могут свободно двигаться в любом направлении. Ни одна классическая платформа не имеет такую свободу движения платформы в целом в любом направлении как гексапод. Но в местах адаптированных людьми «под себя» выиграют антроподы, при условии разработки адекватного алгоритма движения[2].

#### 4. Анализ проходимости

Классические платформы имеют сравнительно небольшую проходимость и уступают по этому параметру всем природным платформам.

Прогодимость антропоида обуславливается положением его «коленного сустава» и динамической устойчивостью. Чем выше расположение «колена», и чем выше стабильность платформы в движении, тем больше проходимость платформы. Антроподы могут преодолевать объекты, не превышающие по высоте их «коленный сустав».

Квадропод имеет проходимость, зависящую от конструкции его конечностей (от угла поворота всей конечности). Большинство квадроподов может подниматься на объекты, не превышающие по высоте их корпус.

Самую большую проходимость имеют гексаподы. При определённом виде конструкции (гибкого тела робота и больших конечностях) они могут подниматься на объекты, превосходящие роботов по размеру.

#### 5. Анализ допустимой пересечённости местности

Для робота-антропоида пересечённость местности должна быть минимальной. Препятствия не должны превышать по высоте его «колена», а по длине не больше его конечности.

Квадроподы не требуют очень ровных поверхностей, однако в рельефе не должно быть барьеров, которые будут выше корпуса платформы.



Гексапод может передвигаться почти по любым поверхностям. При наличии гибкой конструкции робот преодолевать препятствия, превосходящие его корпус по длине и высоте.

#### б. Анализ стоимости изготовления

Самой дорогой в производстве платформой будет антропод, т.к. для её создания требуется больше всего моторов на одну конечность, а также специализированная система стабилизации в корпусе, состоящая из дополнительных приводов и гироскопических датчиков. Следующим по цене роботом будет гексапод, его цена будет зависеть от количества сервоприводов в одной конечности (от 3 до 5). Самым дешёвым в производстве будет квадропод. Итоговые результаты анализа шагающих платформ представлены в таблицах (см. приложение 3).

Таким образом, проведя многосторонний анализ, мы не можем выделить лучшую платформу, т.к. требуемые параметры платформ будут диктоваться целевой средой применения. В природных системах наиболее устойчивой является шестиногая модель, наиболее быстрой – четырехногая, а наиболее маневренной – двухногая модель. Антропод, имея ряд недостатков связанных со сложностью поддержания устойчивости и управления передвижением, является востребованным с точки зрения схожести своей конструкции с человеком, что позволяет ему функционировать в среде, приспособленной для людей[4]. Он является самой эффективной моделью для замены человека в экстремальных условиях, как сверхсильный и выносливый помощник, а также для разработки бионических имплантов конечностей.

Интуитивно понятно, что сложность расчетов устойчивости робота при движении будет напрямую зависеть от числа конечностей, хотя также интуитивно понятно, что большее число конечностей дает более устойчивую схему движения. Исходя из этой предпосылки, выполним расчет устойчивости двуногого робота. Найдем закон, описывающий устойчивое положение робота, исходя из взаимного расположения частей робота (конечностей и центра массы робота).

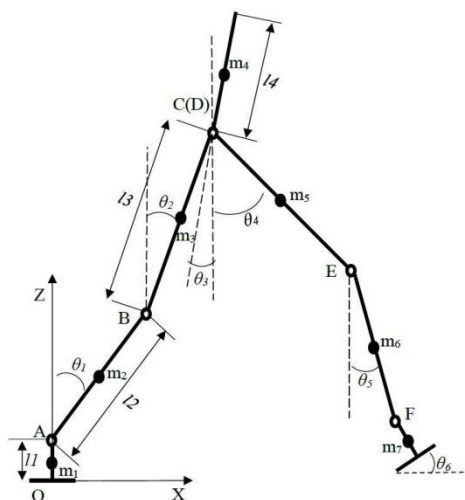
## 2.2. Кинематика движения робота-антропода и создание управляемой модели

Кинематика робота – это аналитическая функция времени, описывающая относительное движение робота в выбранной системе координат. Физическая модель робота преобразуется в математическую модель в заданной системе координат. Движение робота в пространстве - функция от времени. Она определяется относительным положением звеньев робота и углами между ними независимо от сил и моментов, возникающих в результате этих движений. Звенья робота - это непрерывная часть, расположенная между двумя суставами[7]. Для упрощения расчетов, все звенья робота, расположенные выше тазобедренных суставов мы будем считать единым звеном.

Для расчета алгоритма движения робота, мы связываем его тело с системой координат, как правило, с центом массы робота, либо с модулем гироскопов и акселерометров, а направление движения вперед, принимается за ось X.

Можно получить выражения для координат каждого звена, используя геометрические характеристики звеньев и обобщенную координату  $\theta$ , т.е. угол между осью звена и вертикалью. Этот метод моделирования не только интуитивно понятен, но и значительно сокращает объем расчетов. В результате для планирования походки в этой модели, через обобщенные углы  $\theta$  каждого сустава как функции времени  $t$ , можно получить углы поворота звеньев в каждом суставе.

Рис. 11 Модель робота из семи звеньев



Для моделирования прямой кинематики двуногого робота упрощаем модель до семи звеньев (см. рис.11). Движение рук мы не рассматриваем.

Введем глобальную систему координат OXYZ. Начало системы координат находится в центре опорных стоп робота в начале его движения,

направление оси  $Z$  противоположно направлению силы тяжести, а ось  $X$  перпендикулярна оси  $Z$ , лежит в плоскости симметрии робота и направлена в сторону его движения вперед.

Цель решения задачи прямой кинематики состоит в описании положения тазобедренных и голеностопных суставов в системе координат через геометрические размеры звеньев  $l_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) и обобщенные координаты  $\theta_i$  ( $i=1,2,\dots,6$ ) каждого звена.

Значения координат каждого сустава в декартовой системе координат:

$$\begin{cases} X_F = X_l = 0 \\ Z_F = Z_l - l_1 \\ X_A = X_A + l_2 \sin \theta_1 \\ Z_b = Z_A + l_2 \cos \theta_1 \\ X_C = X_D = X_h = X_A + l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 \\ Z_C = Z_D = Z_h = Z_A + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 \\ X_E = X_A + l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_4 \\ Z_e = Z_A + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_4 \\ X_F = X_r = X_A + l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_4 + l_2 \sin \theta_5 \\ Z_f = Z_r = Z_A + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_4 - l_2 \cos \theta_5 \end{cases}$$

Координаты центра масс каждого звена:

$$\begin{cases} x_{c1} = 0 \\ z_{c1} = l_1/2 \\ \begin{cases} x_{c2} = d_1 \sin \theta_1 \\ z_{c2} = l_1 + d_1 \cos \theta_1 \end{cases} \\ \begin{cases} x_{c3} = l_2 \sin \theta_1 + d_2 \sin \theta_2 \\ z_{c3} = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + d_2 \cos \theta_2 \end{cases} \\ \begin{cases} x_{c4} = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + d_3 \sin \theta_3 \\ z_{c4} = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 + d_3 \cos \theta_3 \end{cases} \\ \begin{cases} x_{c5} = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + d_2 \sin \theta_4 \\ z_{c5} = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 - d_2 \cos \theta_4 \end{cases} \\ \begin{cases} x_{c6} = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_4 - d_1 \sin \theta_5 \\ z_{c6} = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_4 - d_1 \cos \theta_5 \end{cases} \\ \begin{cases} x_{c7} = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_4 - l_2 \sin \theta_5 - l_1 \sin \theta_6/2 \\ z_{c7} = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 - l_3 \cos \theta_4 - l_2 \cos \theta_5 - l_1 \cos \theta_6/2 \end{cases} \end{cases}$$

Координаты центра масс двуногого робота:

$$\begin{cases} cg_x = \frac{m_1x_{c1}+m_2x_{c2}+m_3x_{c3}+m_4x_{c4}+m_5x_{c5}+m_6x_{c6}+m_7x_{c7}}{m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7} \\ cg_z = \frac{m_1z_{c1}+m_2z_{c2}+m_3z_{c3}+m_4z_{c4}+m_5z_{c5}+m_6z_{c6}+m_7z_{c7}}{m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6+m_7} \end{cases}$$

где  $m_i$  масса каждого из звеньев, а  $x$  и  $z$  координаты его центра масс.

Таким образом, мы вывели базовые зависимости, отвечающие за устойчивость шагающих роботизированных платформ, и привели формулы, которые позволяют производить динамическое планирование перемещения робота с сохранением устойчивости, исходя из индивидуальных параметров платформы, таких как масса составных звеньев робота и длины этих звеньев.

Конструирование ноги антропода мы проводили на платформе Arduino Uno, а программу управления движением (скетч) создали в приложении Arduino IDE (см. приложение 4).

### **Заключение**

Мы рассмотрели три бионические модели движения: антропод, квадропод и гексапод. Каждая из этих моделей имеет свою специфику и оптимальный диапазон работ. Так, бионическая модель движения гексапод подходит для работы при сильном ветре, когда центр тяжести нельзя выносить высоко, хорошо перемещается при пересеченном рельефе и болотистой местности, а также по наклонной поверхности. Квадроподы быстро и устойчиво перемещаются на открытых пространствах. Антроподы могут имитировать движения человека и заменять его работу в экстремальных условиях в среде, адаптированной под человека. Однако у каждой исследуемой модели имеются свои ограничения.

В данной работе была разработана упрощенная многозвенная модель двуногого антропоморфного робота, предназначенная для решения задач прямой кинематики с использованием обобщенных координат. Мы вывели базовые зависимости, отвечающие за устойчивость шагающих роботизированных платформ. В пункте 2.2 приведены формулы, позволяющие производить динамическое планирование перемещения робота с сохранением устойчивости,

исходя из индивидуальных параметров платформы, таких как масса составных звеньев робота и длины этих звеньев.

Далее, мы разработали роботизированную платформу на основе бионической конечности антропода. Подобные платформы можно использовать в различных направлениях – от создания сверхсильных и выносливых антропоидных роботов до разработки бионических имплантов (например, биологический имплант - нога).

Двуногие шагающие роботизированные платформы могут применяться в различных ситуациях: использование в работах, применяемых для замены человека в труднодоступных местах и опасных условиях; в экзоскелетах, использующихся для помощи людям, утратившим функции самостоятельной ходьбы; в экзоскелетах, используемых в экстремальных условиях для увеличения физических возможностей человека; в развлекательных аттракционах.

В настоящее время исследования человекоподобных роботов проводятся во многих странах мира. Люди рассматриваются как бионические прототипы роботов, ведь роль двуногой ходьбы в эволюции человека очень важна. Антропоморфные роботы имеют форму и кинематику близкую к человеку, что позволяет использовать их в среде человеческой деятельности. Для того, чтобы расширить сферу применения таких роботов, необходимо добиться стабильной ходьбы двуногих роботов по сложной местности, в частности по наклонным и подвижным поверхностям. Хотя исследования роботов-антропоидов ведутся давно, применение их в человеческой жизни все еще очень ограничено из-за низкой приспособляемости робота к сложной среде человеческой деятельности, поэтому совершенствование подобных платформ неизбежно и необходимо для улучшения характеристик.

В дальнейшем мы планируем продолжить наши исследования двуногих роботизированных платформ и изучить алгоритмы их движения (алгоритмы с заранее сконфигурированными параметрами и адаптивные алгоритмы).

## Список использованных источников:

1. Афанасьев О.А., Гендель В.С., Зимин А.В. Шагающие машины Теория Механизмов и Машин. - 2005. - №1. - Том 3 – 263с.
2. Ван Ц., Деваев В. М. Метод управления ходьбой малого антропоморфного робота по подвижной поверхности. // «Вестник КНИТУ-КАИ». 2020г. - № 3.
3. Ковальчук А. К., Кулаков Д. Б., Семёнов С. Е. Управление движением двуногого шагающего робота по программной траектории //Машиностроение и компьютерные технологии. – 2011. – №. 5.
4. Лазарев М. С., Львов А. Ю., Фадеев А. Ю. Перспективы применения антропоморфных роботов в образовательном процессе//XVIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых исследователей образования. – 2019. – 465с.
5. Макаров И. М., Топчеев Ю. И. Робототехника: История и перспективы. — М.: Наука; Изд-во МАИ, 2003. — 349 с.
6. Охоцимский Д. Е., Платонов А. Н. Алгоритмы управления шагающим аппаратом, способным преодолевать препятствия //Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1973. – №. 5. – 184с.
7. Павлюк Н. А., Ронжин А. Л. Конструктивные решения нижних конечностей для антропоморфного робота Антарес //Экстремальная робототехника. – 2016. –Т. 1. – №. 1. – С. 422-427.
8. Спиркин, А. Н. Бионические методы управления роботизированным механизмом / А. Н. Спиркин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 84–91.
9. Формальский А. М. и др. Управление двуногими роботами. – Российский фонд фундаментальных исследований, 1996. – №. 96-01-01443.
10. Формальский А. М. Перемещение антропоморфных механизмов. – Formalskii Alexander, 1982 - с.149.

Механика движения в природе

**Антроподы**

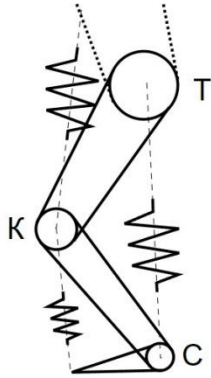


Рис. 1 Нога прямоходящего млекопитающего

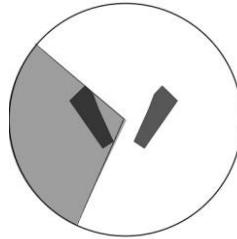


Рис. 2 Мертвая зона для перемещения ноги с короткой стопой

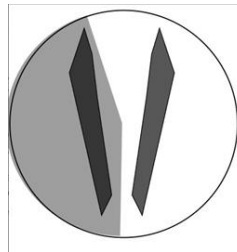


Рис.3 Мертвая зона для перемещения ноги с длинной стопой

**Квадроподы**

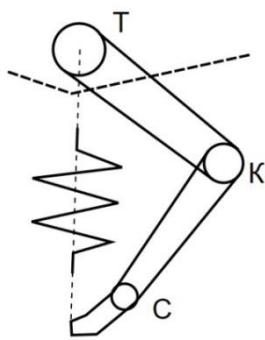


Рис.4 Передняя нога четырехногого млекопитающего

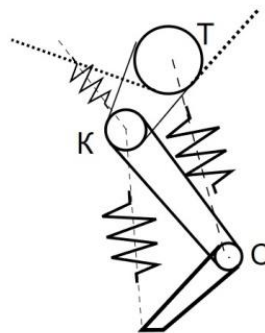


Рис.5 Задняя нога четырехногого млекопитающего

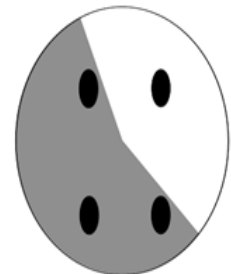
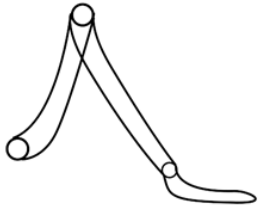
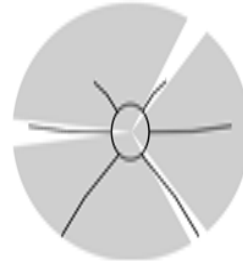


Рис.6 Мертвая зона шага четырехногого млекопитающего

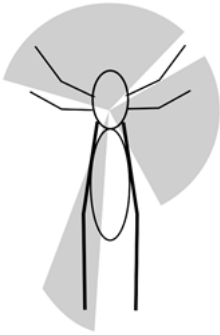
## Гексаподы



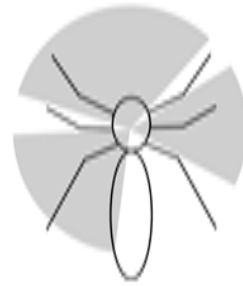
*Рис. 7 Нога насекомого*



*Рис. 8 Свобода перемещения ног водомерки*



*Рис.9 Свобода перемещения ног кузнечика*



*Рисунок 10 Свобода перемещения ног жука*



## Программа реализации проекта

№ №	Наименование этапа	Сроки реализации
1 этап - подготовительный		
1.	Определение цели, задач проекта и реализации проекта	Октябрь 2021
2.	Изучение тематической литературы по механике движения в природе	Октябрь 2021
3.	Обзор существующих типов платформ в робототехнике	Октябрь 2021
4.	Разработка плана практической реализации проекта	Октябрь 2021
5.	Составление сметы расходов на реализацию проекта	Октябрь 2021
6.	Приобретение материалов для изготовления роботизированной конечности антропода	Октябрь 2021
2 этап - основной		
7.	Сравнительный анализ шагающих роботизированных платформ	Ноябрь 2021
8.	Расчет кинематики движения робота-антропода	Ноябрь 2021
9.	Создание роботизированной платформы конечности антропода и программу управления движением	Ноябрь 2021
3 этап - заключительный		
10.	Оформление презентации проекта	Декабрь 2021
11.	Представление опыта работы на НПК школьников на уровне образовательного учреждения.	Декабрь 2021

Таблица 2

## Смета расходов

№№	Статья расходов	Количество	Цена (руб.)	Сумма (руб.)
1.	Макетная плата с проводами	1 комплект	159,79	159,79
2.	Джойстик двухосевой	2 шт.	49.48	98.96
3.	Скользкий потенциометр 10КОм	1 шт.	70.57	70.57
4.	Микроконтроллер Arduino Nano	1 шт.	327.30	327.30
5.	Сервопривод MG90s	5 шт.	166.28	831.4
	<b>Итого</b>			1532.99

Сравнительный анализ шагающих роботизированных платформ

Таблица 3

Сравнение шагающих робоплатформ между собой

	схема	скорость	маневренность	проходимость	Пересечённость местности	цена
<b>Антропод</b>	3	2	3	3	3	3
<b>Квадропод</b>	2	1	2	2	2	1
<b>Гексопод</b>	1	3	1	1	1	2

Таблица 4

Сравнение шагающих роботов с традиционными (колесными и гусеничными)

В сравнении с традиционным и платформами	схем	скорост	маневренность	проходимость	Пересечённость местности	строени	цена
<b>Антропод</b>	-	-	+	+/-	+/-	-	-
<b>Квадропод</b>	+	+	+	+	+	+/-	+/-
<b>Гексопод</b>	+	-	+	+	+	-	+/-

## Программа управления робоногой в приложении Arduino IDE

```

#include <Servo.h>

/** \сдфыы */
class Feet {
public:
    enum FeetPosition {LeftFeet, RightFeet};

    /** \brief Конструктор класса ноги
    * \param pos позиция ноги (правая/левая)
    * \param hip_step номер вывода ШИМ шага в бедре
    * \param hip_deviation номер вывода ШИМ бокового отклонения бедра
    * \param hip_turn номер вывода ШИМ поворота бедра (право-лево)
    * \param knee номер вывода ШИМ шага в колене
    * \param foot_step номер вывода ШИМ продольного отклонения стопы
    (носок-пятка)
    * \param foot_roll номер вывода ШИМ поперечного крена стопы */
    Feet (FeetPosition pos, int hip_step, int hip_deviation, int
hip_turn, int knee, int foot_step, int foot_roll);

    /** \brief Задать поворот бедра
    * \param degr поворот бедра (считается от нормального положения
наружу относительно корпуса) */
    void hip_turn(int degr);

    /** \brief Текущий разворот бедра */
    int hip_turn();

    /** \brief Задать отклониене бедра наружу / вовнутрь
    * \param degr угол отклонения бедра - положительный угол
соответствует отклонению наружу */
    void hip_deviation(int degr);

    /** \brief Текущий угол отклонения бедра */
    int hip_deviation();

    /** \brief Задать угол шага в бедре
    * \param degr угол шага в градусах - подъем бедра соответствует
положительному значению */
    void hip_step(int degr);

```

```

/** \brief текущий угол подема бедра */
int hip_step();

/** \brief Задать угол шага в колене
 * \param degr угол шага в градусах - сгибание колена соответствует
положительному значению */
void knee_step(int degr);

/** \brief Текущий угол шага в колене */
int knee_step();

/** \brief Задать угол шага стопы
 * \param degr угол шага стопы в градусах, положительные значения
соответствуют вытянутому носку, отрицательные - носок задран вверх*/
void foot_step(int degr);

/** \brief Текущий угол шага стопы */
int foot_step();

/** \brief Задать угол крена стопы */
void foot_roll(int degr);
int foot_roll();

private:
    Servo servo_hip_step;
    Servo servo_hip_deviation;
    Servo servo_hip_turn;
    Servo servo_knee;
    Servo servo_foot_step;
    Servo servo_foot_roll;
    FeetPosition position;
};

class Control {
public:
    Control(int hip_step, int hip_deviation, int hip_turn, int knee,
int foot_step, int foot_roll);
    void setFeetPosition();
private:
    int m_hip_step;
    int m_hip_deviation;

```

```

int m_hip_turn;
int m_knee;
int m_foot_step;
int m_foot_roll;
};

Feet* left_feet = NULL;
Control* ctrl = NULL;

Feet::Feet(FeetPosition pos,int hip_step, int hip_deviation, int
hip_turn, int knee, int foot_step, int foot_roll) {
    position = pos;
    // Задаем соединения с сервоприводами ноги
    servo_hip_step.attach(hip_step, map(-30, -90, 90, 544, 2400),
map(120, -90, 90, 544, 2400));
    servo_hip_deviation.attach(hip_deviation, map(-30, -90, 90, 544,
2400), map(90, -90, 90, 544, 2400));
    servo_hip_turn.attach(hip_turn, map(-30, -90, 90, 544, 2400), map(90,
-90, 90, 544, 2400));
    servo_knee.attach(knee, 544, map(120, -90, 90, 544, 2400));
    servo_foot_step.attach(foot_step, map(-30, -90, 90, 544, 2400),
map(60, -90, 90, 544, 2400));
    servo_foot_roll.attach(foot_roll, map(-30, -90, 90, 544, 2400),
map(30, -90, 90, 544, 2400));
    // Выпрямляем ногу в нормальное состояние
    this->hip_turn(0);
    this->hip_deviation(0);
    this->hip_step(0);
    this->knee_step(0);
    this->foot_step(0);
    this->foot_roll(0);
}

void Feet::hip_turn(int degr) {
    servo_hip_turn.write(degr + 90);
}

int Feet::hip_turn() {
    return servo_hip_turn.read() - 90;
}

void Feet::hip_deviation(int degr) {

```

```

servo_hip_deviation.write(degr + 90);
}

int Feet::hip_deviation() {
    return servo_hip_deviation.read() - 90;
}

void Feet::hip_step(int degr) {
    servo_hip_step.write(degr + 90);
}

int Feet::hip_step() {
    return servo_hip_step.read() - 90;
}

void Feet::knee_step(int degr) {
    servo_knee.write(degr);
}

int Feet::knee_step() {
    servo_knee.read();
}

void Feet::foot_step(int degr) {
    servo_foot_step.write(degr + 90);
}

int Feet::foot_step() {
    return servo_foot_step.read() - 90;
}

void Feet::foot_roll(int degr) {
    servo_foot_roll.write(degr + 84);
    Serial.print(" FootRoll:");
    Serial.print(degr + 84);
}

int Feet::foot_roll() {
    return servo_foot_roll.read() - 84;
}

Control::Control(int hip_step, int hip_deviation, int hip_turn, int

```

```
knee, int foot_step, int foot_roll) {  
    m_hip_deviation = hip_deviation;  
    m_hip_step = hip_step;  
    m_hip_turn = hip_turn;  
    m_knee = knee;  
    m_foot_step = foot_step;  
    m_foot_roll = foot_roll;  
}
```

```
void Control::setFeetPosition() {  
    left_feet->hip_deviation(map(analogRead(m_hip_deviation), 0, 1023,  
-30, 90));  
    left_feet->hip_turn(map(analogRead(m_hip_turn), 0, 1023, -30, 90));  
    left_feet->hip_step(map(analogRead(m_hip_step), 0, 1023, -30, 120));  
    left_feet->knee_step(map(analogRead(m_knee), 0, 1023, 0, 90));  
    left_feet->foot_step(map(analogRead(m_foot_step), 0, 1023, -30, 90));  
    left_feet->foot_roll(map(analogRead(m_foot_roll), 0, 1023, -30, 30));  
  
}
```

```
void setup() {  
    Serial.begin(9600);  
    while (!Serial);  
  
    left_feet = new Feet(Feet::LeftFeet, 2, 3, 4, 5, 6, 7);  
  
    //Control(int hip_step, int hip_deviation, int hip_turn, int knee,  
int foot_step, int foot_roll);  
    ctrl = new Control(A0, A1, A2, A3, A4, A5);  
  
    // Даем время развернутья всем приводам  
    delay(1000);  
}
```

```
void loop() {  
    // put your main code here, to run repeatedly:  
    delay(150);  
    ctrl->setFeetPosition();  
    Serial.println();  
}
```

## Паспорт проекта

№	Наименование пункта	Описание
9.	Название проекта	От бионических моделей движения к роботизированным платформам
10.	Автор проекта	Горбачев Илья, 9 класс
11.	Аннотация проекта	<p>С начала развития робототехники, появился интерес к области применения, требующий от роботизированной системы повышенной мобильности в условиях реального мира. Зачастую требуется применение роботов, использующих шагающее движение, вместо колесного.</p> <p>В данной работе изучена механика передвижения живых организмов, проведен анализ шагающих роботизированных платформ с конечностями, имитирующими, движение животных, для выявления наиболее эффективной модели при замене человека в экстремальных условиях.</p> <p>Вывели базовые зависимости, отвечающие за устойчивость шагающих роботизированных платформ, и привели формулы, которые позволяют производить динамическое планирование перемещения робота с сохранением устойчивости, исходя из индивидуальных параметров платформы, таких как масса составных звеньев робота и длины этих звеньев. Создали управляемую модель конечности робота-антропода и программу управления движения к ней.</p>
12.	Проблема, на решение которой направлен проект	<p>В современном мире используется большое количество различных роботизированных платформ в самых различных целях, однако большинство из них традиционно являются колёсными или гусеничными, что обусловлено простотой управления. Это значит, что все они имеют схожие недостатки. В тоже время, природа в ходе эволюции разработала совершенные системы передвижения, изучив которые возможно улучшить характеристики создаваемых платформ.</p>
13.	Цель проекта	<p>Рассмотреть механизмы движения различных бионических моделей, выявить их ограничения и преимущества. Разработать роботизированную «платформу-конечность» антропода.</p>
14.	Задача проекта	<p>6. Рассмотреть механизмы движения бионических моделей гексапода, квадропода и антропода.</p> <p>7. Выявить их ограничения и преимущества для различных областей применения.</p> <p>8. Определить самую эффективную модель для</p>



		<p>замены человека в экстремальных условиях.</p> <p>9. Рассчитать кинематику движения роботизированной платформы антропода.</p> <p>10. Построить роботизированную платформу-конечность антропода.</p>
15.	Сроки реализации проекта	<p>Подготовительный – октябрь 2021</p> <p>Основной – ноябрь 2021</p> <p>Заключительный – декабрь 2021</p>
16.	Ожидаемые результаты проекта	<p>В ходе проекта мы изучим природную механику движения животных с разным количеством конечностей. Сравним классические роботизированные платформы с шагающими. Проведем сравнительный анализ шагающих платформ и выберем наиболее подходящую платформу для работы в экстремальных условиях. Исследуем кинематику движения двухногого шагающего робота и изготовим управляемую модель конечности робота-антропода.</p>