

# Принципы и методика проектирования прыгающих, перегруппирующихся и парящих балансирующих мобильных роботов

В.А. Жмудь<sup>1, 2, 3, 4</sup>, Д. Мяхор<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, Россия

<sup>2</sup> Институт лазерной физики СО РАН, Россия

<sup>3</sup> Сибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизической службы СО РАН

<sup>4</sup> АО «Новосибирский институт программных систем»

*Аннотация.* В настоящее время создание новых принципов действия и передвижения мобильных роботов, робототехники является фундаментальной задачей, крайне важной и актуальной, связанной с роботизацией и цифровизацией на принципиально новом уровне, соответствующем понятию «Индустрии 4.0». Частной подзадачей этого направления является также разработка методик использования различных датчиков для самоопределения роботом своего положения и ориентации на местности, а также разработка эффективных контроллеров (регуляторов) для высокоточного управления движением этих роботов. Кроме того, эти два направления имеют самостоятельную ценность, поскольку методика решения этих задач и полученные результаты могут распространяться (масштабироваться) на многие аналогичные задачи, где управление осуществляется не только и не обязательно механическими величинами. При этом эффективное развитие робототехники без решения этих подзадач невозможно, поскольку высокая точность управления и стабилизации в этих задачах является ключевым свойством создаваемых роботов: без эффективной стабилизации их равновесия (баланса) предлагаемые принципы действия не могут быть применены; без достаточно эффективного использования датчиков различной природы (оптических датчиков и датчиков равновесия, а также ультразвуковых датчиков для определения расположения ближайших препятствий и иных предметов) движение не будет отвечать поставленным задачам. Статья предлагает проект дальнейшего развития исследований в этой области, которое могло бы иметь значительное влияние на технические возможности транспортной робототехники.

*Ключевые слова:* робототехника, балансирующий робот, прыгающий робот, автоматика, управление, транспортная техника, бионика

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время создание новых принципов действия и передвижения мобильных роботов, робототехники является фундаментальной задачей, крайне важной и актуальной, связанной с роботизацией и цифровизацией на принципиально новом уровне, соответствующем понятию «Индустрии 4.0». Частной подзадачей этого направления является также разработка методик использования различных датчиков для самоопределения роботом своего положения и ориентации на местности, а также разработка эффективных контроллеров (регуляторов) для высокоточного управления движением этих роботов. Кроме того, эти два направления имеют самостоятельную ценность, поскольку методика решения этих задач и полученные результаты могут распространяться (масштабироваться) на многие аналогичные задачи, где управление осуществляется не только и не обязательно механическими величинами. При этом эффективное развитие робототехники без решения этих подзадач невозможно, поскольку высокая точность управления и стабилизации в этих задачах является ключевым свойством создаваемых роботов: без эффективной стабилизации их равновесия (баланса) предлагаемые принципы действия не могут быть применены;

без достаточно эффективного использования датчиков различной природы (оптических датчиков и датчиков равновесия, а также ультразвуковых датчиков для определения расположения ближайших препятствий и иных предметов) движение не будет отвечать поставленным задачам.

Предлагаемый комплекс научно-технических решений направлен на создание прыгающих и парящих балансирующих роботов, которые будут сочетать один из наиболее эффективных способов передвижения по наиболее пересеченной местности, используемый насекомыми (кобылки, цикады, саранча, некоторые виды пауков, блохи и т.п.), рептилиями (плащеносная ящерица, вараны, змеи, в частности ботропс, гадюки), земноводными (лягушки), млекопитающими (тушканчики, кенгуру, лемуры, белки и т.п., а также все кошачьи), птицами (пингвины, дрозды, воробьи, попугаи). Прыжки могут оказаться наиболее эффективным способом передвижения по лунной поверхности и поверхностям других планет и астероидов. Развитие в этом направлении предполагает наиболее точное и эффективное соединение датчиков для восприятия окружающей среды, исполнительных манипуляторов и движителей как средство взаимодействия роботов с окружающей средой

и микропроцессорных контроллеров как средство согласования датчиков и манипуляторов для обеспечения высшей точности управления движением.

Прорывное развитие отечественной робототехники требует, во-первых, существенного пополнения кадровых ресурсов мотивированными высококвалифицированными специалистами, во-вторых, создания наборов типовых решений по датчикам, микроконтроллерам, исполнительным устройствам, комплексному проектированию таких систем и обеспечению их надежности и иных важнейших функциональных характеристик.

В текущем состоянии отечественной науки и техники наблюдается нарастающее отставание в области робототехники. Прогрессирующее отставание по элементной базе является, возможно, не столь критическим, поскольку многие задачи могут быть решены путем приобретения готовых комплектующих, таких, как датчики, исполнительные устройства, микроконтроллеры, стандартизованные элементы корпусов и т.п. Так, например, собрать из покупных изделий некоторое подобие мало-мощного робота не представляет никаких сложностей, поскольку имеется обилие производителей, прилагающих по доступным ценам все необходимые элементы, и даже размещающие на сайтах инструкции по сбору типовых роботов – шагающих, балансирующих на колесах и т.п. Большинство технических университетов приобретают подобные наборы, собирают из них механические подобию роботов, выставляемых на различного рода выставках и презентациях в качестве образцов передового творчества научных коллективов. При этом темпы быстрогодействия таких изделий соизмеримы с темпами восприятия человека, а погрешность их движений также соизмерима с

уровнем внешнего восприятия, а именно: переходные процессы длятся не менее чем 20-40 секунд, погрешность составляет 1-2 % и более.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Строго говоря, такие изделия, которые описаны во введении, не выходят за рамки демонстрационных игрушек по своим характеристикам. Это достаточно для привлечения абитуриентов в университеты, демонстрации рекламных роликов на телевидении, получения призов на выставках и конкурсах, но это не продвигает отечественную науку и технологию, поскольку собираемые образцы обладают именно теми характеристиками, которые в них заложены производителями этих конструкторских наборов, то есть именно быстродействием и точностью даже худшим, чем возможности человека по их восприятию.

Реально современная робототехника вследствие высокого быстродействия и достаточной точности фактически доступных механических элементов, датчиков и микроконтроллеров, способна на несколько порядков работать быстрее и точнее, чем это может делать человек и двигаться даже с превышением его возможностей восприятия всех деталей этого движения. То есть эффективный робот может перемещаться столь быстро, что человек не сможет уследить за его действиями во всех деталях, и столь точно, что даже наиболее ловкое животное не смогло бы повторить эти движения. Отметим, что электромеханическое самодвижущее устройство, движущееся по командам, передаваемым извне, не является роботом, оно должно быть классифицировано как дистанционно управляемый манипулятор, причем, не автоматический, а автоматизированный (см. Рис. 1).

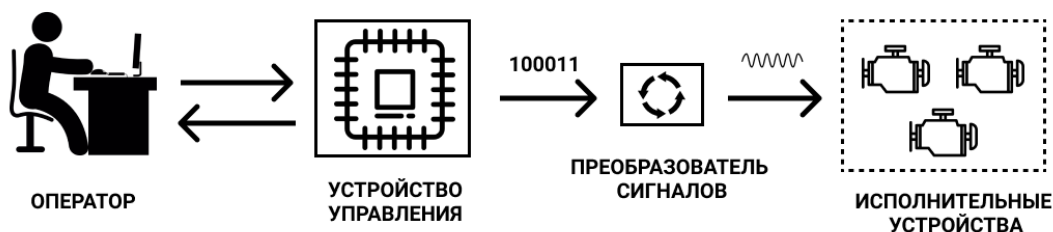


Рис. 1. Схема работы дистанционно управляемого автоматизированного манипулятора

Принципиальное отличие роботов в полном смысле этого термина от подобных устройств состоит в том, что эти устройства должны обладать собственной системой принятия решения (которую принято называть компьютерным интеллектом, но этот термин явно обгоняет фактическое состояние дела, это не интеллект, а всего лишь продвинутое решающее устройство). Робот должен не только обладать

датчиками и исполнительными устройствами, но еще и устройством автономного формирования команд управления движением на основе только информации об окружающей среде и о собственном состоянии, и о требуемых выполняемых функциях, заданных не в виде набора отдельных команд по управлению движением, а в виде глобальной макрокоманды, например, убрать снег с площадки, собрать груз

в грузовые камеры, уничтожить препятствие, преодолеть препятствие и так далее. Датчики, собирающие информацию об окружающей среде, должны использоваться не для того, чтобы оператор уточнил команды для управления движением, а для того, чтобы само решающее устройство уточняло эти команды по мере необходимости для решения глобальной поставленной задачи. Вся поставленная задача создания таких устройств разделяется на задачи создания электромеханического устройства (собственно робота), в том числе соединение в единое целое датчиков (всех типов), исполнительных устройств (двигателей, двигателей, манипуляторов), электронной части, преобразующей сигналы от датчиков в

программные коды, и программные коды в сигналы управления манипуляторами и двигателями, а также интеллектуальное устройство, т.е. микроконтроллер, со всеми необходимыми программными средствами в нем, создающими то, что принято называть интеллектом робота (см. Рис. 2).

Все, что касается создания и соединения в правильном порядке аппаратной части, легко решается техническими специалистами, недостатка в которых в настоящее время не ощущается. Что касается программной части роботов, ее можно разделить на макрокоманды и микрокоманды (см. Рис. 3).

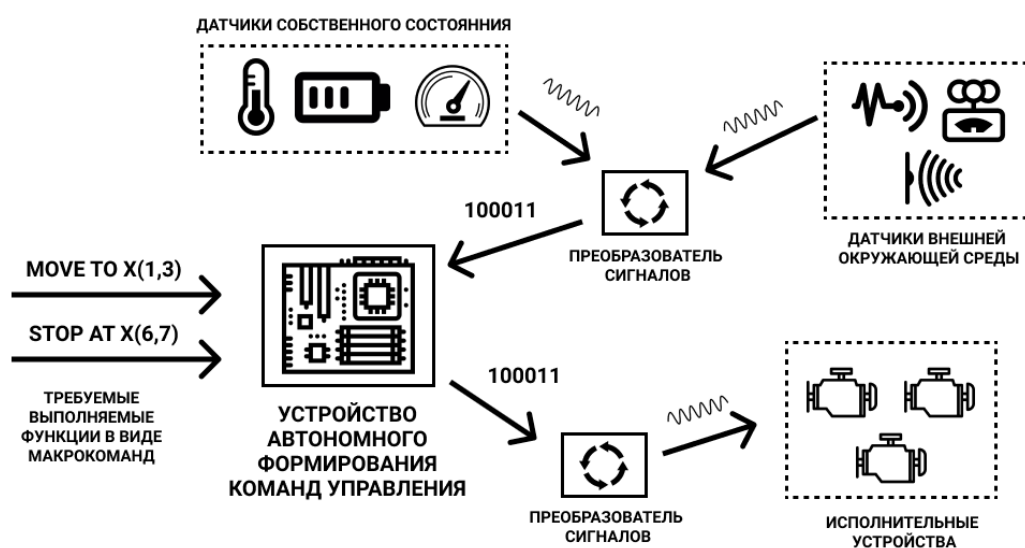


Рис. 2. Схема работы робота с собственной системой принятия решений

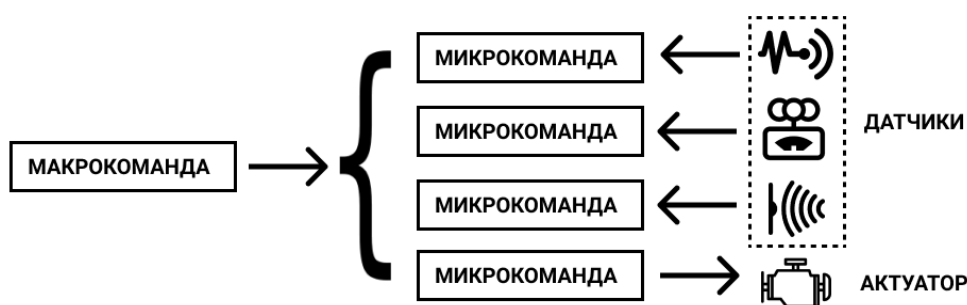


Рис. 3. Концепция микрокоманд и макрокоманд

Макрокоманды ставят задачи движения в целом, например, развернуться на 32 градуса, увеличить скорость на 16% и так далее. Микрокоманды управляют отдельными элементами с целью реализации макрокоманд. Также программные средства нужны для обработки сигналов каждого датчика для формирования набора полных сведений о состоянии самого робота и обо всех элементах окружающей среды, которые могут повлиять на форми-

рование макрокоманд. Во всем объеме этих задач, на взгляд авторов проекта, формированию микрокоманд в мировой литературе уделяется наименьшее внимание. Обеспечению точного в динамике и статике движения всех управляемых элементов сложной системы в отечественном приборостроении посвящено очень мало публикаций. Большинство наблюдаемых на выставках и презентациях роботоподобных механических устройств

характеризуются резкостью движения, колебанием около состояния равновесия, потерей устойчивости при излишне быстром маневрировании. В особенности не просматривается никаких адаптивных свойств таких систем, т. е. если система без нагрузки еще может демонстрировать достаточно высокую статическую и динамическую точность, то при изменении нагрузки качество ее функционирования резко ухудшается.

Одной из причин такой ситуации авторам проекта видится недостаточное использование существующих методов и средств проектирования регуляторов для механических систем, в особенности, когда речь заходит о системах с запаздыванием, нелинейных системах, системах со многими входами и выходами, и, в особенности, о нестационарных системах. По этой причине имеет смысл обратить внимание на ту ситуацию, которая имеет место в области теории автоматического управления и ее практического применения.

К наиболее эффективным методам решения задачи расчета регуляторов большинство публикаций относят так называемые табличные методы – это метод Циглера-Никольса (Зиглера-Никольса), Коэна-Куна, метод затухающих колебаний, метод незатухающих колебаний, и так далее.

Также имеется достаточно много публикаций, отмечающих как наиболее эффективные методы метод применения упредителя Смитта (который может быть применен только к линейным одноканальным системам с чистым запаздыванием, т. е. практически никогда).

Имеется большой класс публикаций, опирающихся на метод скользящих режимов, что является слишком большим упрощением и дает всегда только систему с автоколебаниями, то есть недостаточно точную систему, которая никогда не находится в покое, даже если достигла цели управления. Также имеется достаточно большой класс публикаций с использованием различных видов линеаризации модели объекта, от гармонической линеаризации до линеаризации нелинейной модели, содержащей, например, степенную или корневую зависимость. Если объект имеет нелинейность типа гистерезис, то расчет может быть осуществлен только с помощью гармонической линеаризации, т.е. может быть лишь приблизительно определена амплитуда и частота автоколебаний, что опять-таки не отвечает поставленной задаче управления. Кроме того, никакая линеаризация не позволяет управлять нестационарным объектом. Наконец, известны методы приближенной замены звена чистого запаздывания некоторой совокупностью минимально-фазовых звеньев, т.е. фильтром. Все указанные методы неточны, неэффективны и сложны в применении. Также известен метод локализации, которые даже

попал в Википедию, который все же при более пристальном изучении оказался недостаточен для эффективной стабилизации, хотя он и может несколько улучшить переходный процесс в среднем при решении задачи управления, если возмущающее воздействие не слишком велико (что случается крайне редко).

Между тем, давно известен метод численной оптимизации регулятора, который в связи с появлением соответствующих программных средств, решает все указанные проблемы наилучшим образом. Он при правильном его использовании позволяет преодолеть все указанные сложности, справляется с задачей управления многоканальными нестационарными нелинейными объектами с запаздыванием, даже если они склонны к колебаниям. Этот метод одинаково эффективен и для стабилизации, и для управления, вне зависимости от уровня возмущения и его соотношения с заданием (разумеется, при условии достаточного ресурса управления, который в принципе должен позволять преодолеть влияние возмущения). Однако этот метод требует использования ряда обязательных приемов и методик, которые недостаточно широко популяризованы, хотя уже разработаны с участием авторов проекта достаточно хорошо и апробированы на многих конкретных робототехнических изделиях.

Развитие методов проектирования регуляторов в настоящее время осуществляется не с целью решения конкретных задач современности, а с целью получения дальнейшего финансирования той или иной научной школы, для получения средств на поддержание высоких заработных плат руководителей этой школы, также для создания дополнительного потока публикаций в этой области и для подготовки большого количества кандидатских и докторских диссертаций в этой области. При этом публикуемые работы, а также выставляемые на защиту диссертации чаще всего характеризуются игнорированием существования и большей эффективности альтернативных методов проектирования регулятора. Представители каждой школы, преимущественно ссылаются на труды 40-60-летней давности, а также на труды своего научного руководителя, игнорируя все остальные наработки. Каждое достижение, хотя бы на йоту превышающее предыдущее достижение данного руководителя или его учеников выдается как достижение мирового уровня, на основании чего пишутся статьи и диссертации.

Формально требуемый обзор по теме исследований заполняется ссылками на статьи, имеющие слабое отношение к теме исследования, либо на статьи научного руководителя и его учеников. Поэтому формально создается видимость новизны и видимость осведомленности автора в теме исследования и в основ-



ных достижениях по этой теме. Единственно возможный поиск истины лежит на путях беспристрастного эксперимента в наиболее сложных областях данной тематики. Полигоном для беспристрастного соревнования методов синтеза управления может стать наиболее сложное электромеханическое устройство, управление которым представляет собой известную трудность. К таким устройствам можно отнести все виды балансирующих роботов, прежде всего – одноколесный беспилотный робот и такие новые направления, как прыгающий балансирующий робот и прыгающий перегруппировывающийся робот, а также прыгающий парящий робот. При этом балансирующий двухколесный робот должен обеспечивать равновесие относительно одной степени свободы, балансирующий одноколесный робот – это устройство намного сложнее, поскольку в нем имеется две независимые степени свободы, и равновесие следует обеспечивать по этим двум координатам одновременно, а кроме того, необходимо управлять направлением движения и скоростью. Данная задача в настоящее время решается многими исследовательскими коллективами с различной степенью успеха, сообщений о решении этой задачи в беспилотном варианте на момент написания заявки неизвестно, во всяком случае, описания методик решения этой задачи (достаточного для повторения) нет и едва ли появятся в ближайшее время. В прыгающем балансирующем роботе задач, подлежащих решению, намного больше. Робот должен не только поддерживать равновесие, но и дозировать импульс (скорость и усилие воздействия на опору), чтобы прыжок был направлен в нужную сторону, и чтобы он обеспечил движение именно на заданное расстояние, не больше и не меньше. Во время полета робот должен перегруппировать свои компоненты подобно тому, как перегруппируется в полете кошка, чтобы приземлиться исключительно на конечности, что в варианте с роботом означает, что он должен приземлиться одновременно на те две или четыре манипулятора, имитирующие конечности, которые, во-первых, воспримут энергию удара, обеспечив амортизацию и при этом накопление энергии, преобразование полученной кинетической энергии сближения в потенциальную, которая затем снова должна высвободиться для нового прыжка в виде кинетической энергии, во-вторых, конечности должны работать так, чтобы за время между приземлением до очередного прыжка, которые должны следовать чаще всего без задержки, должна быть осуществлена такая перегруппировка, чтобы новый прыжок был направлен к новой заранее определенной и рассчитанной цели. То есть пружины или их аналог сжимается от энергии, получаемой при амортизации прыжка со

стороны приходящего движения, а разжимаются для нового прыжка в направлении распространения движения, усилие передается в практически на диаметрально противоположном направлении по отношению к тому, откуда оно пришло. Следовательно, во время приземления должны быть решены задачи амортизации, накопления энергии и новая ориентация энергии прыгающего механизма к новой цели. Дополнительно целесообразно применить возможности парения для создания дополнительной возможности уточнения места очередного приземления робота.

Эти возможности, конечно, не будут эффективными при работе в безвоздушном пространстве (например, на поверхности Луны), и в такой опции они не нужны, но при работе в земных условиях это дает дополнительный спектр возможностей наиболее эффективного движения. Такими способностями коррекции направления прыжка-полета обладают многие парящие животные: белки-летяги, плащеносные ящерицы, некоторые змеи, также парение или использование редуцированных крыльев для управления полетом в прыжке используют саранча, кобылки (кузнечики) и многие другие животные и насекомые. Парение позволяет превратить мешающий фактор в полезный, поскольку прыжки без возможностей парения ухудшают точность, а в условиях порывистого ветра разрушают ее, место приземления невозможно предугадать, тогда как при возможности парения сопротивление воздуха и ветер можно использовать для дополнительного увеличения длины прыжка и для улучшения точности приземления.

В зарубежной печати имеются сообщения о единственном аналоге, роботе «Кенгуру» (Рис. 4), с излишней достоверностью воспроизводящем не только принцип движения, но и внешний облик этого животного [1].

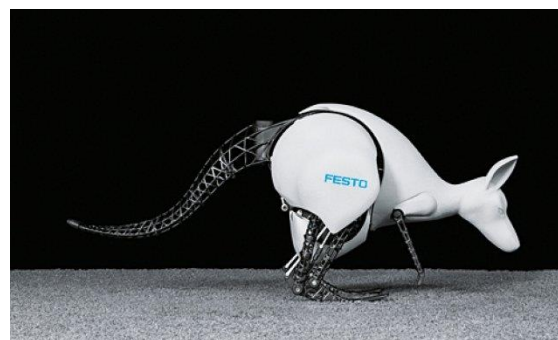


Рис. 4. Робот-кенгуру от компании Festo [1]

Также имеются сведения о роботе-тушканчике (см. Рис. 5) [2]. Имеются другие сообщения об этих же роботах или о менее продвинутых их функциональных аналогах.

Все указанные роботы реализуют идентичное движение обеих конечностей, что исключает управление выбором направления прыжка. При сохранении синхронности действия конечностей они должны действовать не совсем идентично, разница усилий отталкивания и разница ориентации должна позволить управлять направлением и дальностью прыжка, чего в рассмотренных аналогах нет. Решения задачи в той постановке, которая дана в данном проекте, таким образом, в настоящее время в мире нет.

В проекте не ставится задача создания массивного прототипа, целью является создание относительно легкого, малогабаритного и по возможности не дорогого (по компонентам) изделия, основные преимущества которого будут содержаться в выработке технических решений по максимально точному управлению движением, по решению задачи движения в комплексе.

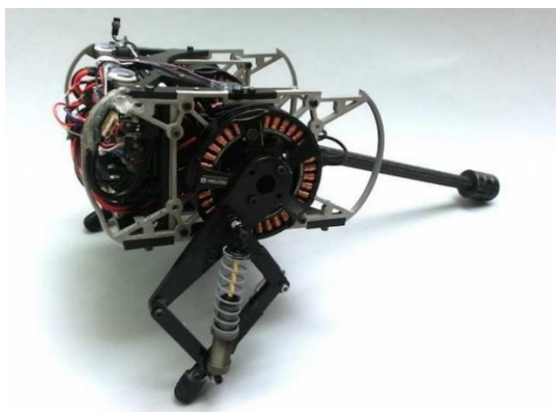


Рис. 5. Конструкция робота-тушканчика [2]

Задача управления полетом в парении может решаться в развитии предлагаемого проекта. Первую часть проекта можно условно назвать проект «Ирбис», поскольку запланировано решение только задачи направления прыжка, баланс до начала, во время прыжка и на стадии приземления и нового прыжка, а вторую часть проекта можно условно назвать проект «Грифон», поскольку на этом этапе проекта предполагается добавление крыльев для парения с целью содействия перегруппировке, удлинению прыжка и выбору места посадки. Решение поставленной задачи принципиально важно для развития робототехники, решения сопутствующих задач позволит получить новые результаты также в области теории автоматического управления как апробацию наиболее современных и эффективных методов проектирования регуляторов для нелинейных нестационарных объектов (нестационарные свойства порождаются изменением распределения массы робота вследствие перегруппировки). Мешающим воздействием (помехой) является ошибка движения относительно

выбранной траектории, коррекции положения робота будут осуществляться перемещением конечностей-манипуляторов и маховика (аналог хвоста Ирбиса).

Результаты, которые могут быть получены в результате предлагаемого проекта, могут иметь фундаментальное значение для инженерных наук, они могут быть применены в транспортных системах, а также внедрены в учебный процесс.

#### ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПУТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Эскизный проект предлагаемого робота разработан достаточно тщательно, подробное изложение предлагаемой разработки изложено в прилагаемом файле со всеми необходимыми иллюстрациями, включающими в себя внешний вид во всех проекциях (сверху, снизу, сбоку), структуру, детализировку, отдельные детали, поясняющие принципы работы. Технология производства деталей – печать на 3D-принтере.

Проект направлен на разработку и уточнение научных принципов проектирования высокоточных высокоскоростных робототехнических систем. Проект находится на стадии эскизного проектирования, все иллюстрации, представленные в прилагаемом файле во второй части, поясняющей суть проекта, являются оригинальной и новой разработкой авторского коллектива при работе над данным проектом, ранее нигде не опубликованы, они относятся только к данному проекту. Результатом проекта должна быть научно обоснованная методика проектирования таких систем на примере прыгающего балансирующего перегруппирующегося робота «Ирбис» (в результате первого года проекта) и прыгающего балансирующего парящего робота «Грифон» (в результате второго года проекта). Ключевой особенностью таких роботов должно стать устойчивое движение в беспилотном исполнении по заданной траектории по чрезвычайно пересеченной местности, включая неустойчиво лежащие камни, гравий, песок, грязь, поверхность с невысокой растительностью, включая резко меняющийся наклон местности в любом направлении относительно направления движения, включая возможные не фатальные осыпи во время контакта с роботом. Устойчивость достигается дополнительными средствами балансировки, основанными на встроенных высокоскоростных маховиках пониженной массы. Проект включает теоретические исследования, практическую реализацию программно-аппаратных роботов, экспериментальное исследование и модификации полученных действующих устройств.

## ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ПРОЕКТА

Актуальность исследований является следствием, во-первых, необходимости выполнения этих исследований как можно быстрее, во-вторых, возникшей возможностью их выполнения именно сейчас. Необходимость исследований вытекает из нарастающего отставания отечественной техники в области мобильных балансирующих роботов, в особенности беспилотных, и в особой степени роботов, использующих не колесный, не гусеничный и не вертолетный принцип движения. Предлагаемые устройства будут обладать многими преимуществами, они могут применяться для доставки срочных малогабаритных грузов в самые труднодоступные точки, даже туда, куда невозможно направить колесный или гусеничный робот, а также нельзя использовать воздушный дрон в силу определенных характеристик демаскирования, законодательных и иных ограничений на движение воздушных дронов, либо технические ограничения (такие как грузоподъемность и энерго-эффективность при доставке на большие расстояния относительно больших грузов). В исполнении «Ирбис» предлагаемый робот является наиболее эффективным для перемещения в крайне пересеченной местности в условиях безвоздушного пространства, например, на поверхности Луны или астероида, где использование воздушного дрона невозможно вследствие отсутствия атмосферы, а использование колесного или гусеничного дрона затруднено наличием чрезвычайно больших слоев пыли, неустойчиво лежащих камней, гравия, песка и т.п.

Конкурировать с коллективами в области изготовления крупногабаритных и достаточно мощных образцов невозможно и нецелесообразно. Малогабаритные образцы, от которых на данном этапе не требуется длительного ресурса работы батарей, большой мощности, герметичности и прочих важных характеристик, которые все же достигаются достаточно просто с помощью грамотных конструкторских решений, отечественные коллективы вполне могут составить ощутимую конкуренцию. В сотрудничестве с зарубежным партнером, перед которым стоят сходные задачи, и у которого доля решенных подзадач приблизительно соизмерима, но она не тождественна, а дополняет долю решенных задач в отечественном коллективе, такая постановка задачи более чем оправдана, что позволяет с уверенностью ожидать успеха.

Малогабаритные образцы представляют большую проблему с позиции эффективного управления, поскольку их быстродействие в несколько раз выше, следовательно, и управление должно быть в несколько раз более быстрым, что ставит более высокие требования

к быстродействию датчиков, микроконтроллера, исполнительных устройств и к качеству синтеза математической модели регулятора. Эти проблемы в коллективе исполнителей применительно к балансирующим двухколесным роботам уже успешно решены, о чем имеются соответствующие публикации, требуется лишь масштабирование этих методов для новой задачи. Развитие методов проектирования регуляторов (контроллеров) в коллективе заявителя достигло такого уровня, что становится относительно трудно отыскать задачу, которую было бы сложно решить методом численной оптимизации. Полигоном для исследования и улучшения методов синтеза регуляторов может стать наиболее сложное электромеханическое устройство, управление которым представляет собой известную трудность. К таким устройствам можно отнести все виды балансирующих беспилотных роботов. Устройства этого класса принципиально отличаются от пилотируемых роботов, которые в виде одноколесных и двухколесных сегвеев уже достаточно широко известно и выпускаются серийно. В отличие от пилотируемого балансирующего робота, беспилотный балансирующий робот не имеет человека, который мог бы дополнительно поддерживать равновесие во всех направлениях. По аналогии можно сравнить циркового акробата, поддерживающего равновесие на одноколесном велосипеде – в таком устройстве вообще нет системы автоматического поддержания равновесия, и все же оно может оставаться в равновесии за счет искусства пилота. В беспилотном балансирующем роботе человеческий фактор устраняется целиком. Кроме того, подобная система может быть различным образом нагружена как неживым грузом (например, гирей), так и живым грузом (например, клеткой с животным), или его аналогом (механическим маховиком со смещенным центром тяжести), что позволяет испытать систему наиболее эффективно, объективно и всесторонне. В отличие от балансирования на колесе или на двух колесах, предлагаемый робот должен балансировать на двух конечностях, действующих по такому же принципу, как действуют ноги кенгуру, тушканчика, лемуру,двигающихся по земле исключительно прыжками. Без равновесия на двух ногах невозможно сделать первый прыжок, но этого недостаточно: во-первых, во время полета следует так перегруппироваться, чтобы приземлиться вновь на эти конечности, во-вторых, следует поглотить энергию приземления временно, чтобы затем же ее высвободить для следующего прыжка, в-третьих, для направления следующего прыжка следует сформировать разницу в воздействиях каждой конечности по-отдельности, например, для прыжка несколько влево, следует сильнее оттолкнуться правой ногой, для прыжка вправо,



следует сильнее оттолкнуться левой ногой. Иными словами, следует таким образом обеспечить траекторию, по которой распрямляются конечности, относительно центра масс робота, чтобы прыгнуть именно в требуемом направлении и именно на требуемую длину полета, а за время полета вновь следует осуществить необходимую перегруппировку. Это требует детальных исследований механики прыжка.

Задачей проекта является создание беспилотного балансирующего прыгающего и перегруппирующегося в прыжке робота, а также в качестве развития этой идеи, обеспечение возможностей руления во время полета за счет парения. Для решения данной задачи робот должен обладать существенно секционированным корпусом (гибкостью кошачьих) и (или) внешним балансирующим противовесом (как у кенгуру), проектом предполагается использование обеих этих возможностей в создаваемом макете, т.е. робот должен обладать и корпусом, способным влиять на положение центра тяжести, и достаточно увесистым противовесом (аналогом хвоста).

В наибольшей степени эти свойства совмещает животное, известное как ирбис (см. Рис. 6) [3], однако, это животное приземляется на четыре лапы, а кенгуру или тушканчик использует лишь две лапы для прыжков. В проекте будут исследованы обе возможности и выбрана наилучшая. Поскольку перегруппировка во время полета является существенным отличием предлагаемого проекта, название «Ирбис» видится более адекватное, чем название «Кенгуру» или «Тушканчик». При добавлении функции парения за счет крыльев проект на второй год реализации предполагает создание усовершенствованной модели «Грифон», условно фиксирующий соединение «Ирбиса» с крыльями.



Рис. 6. Наглядная иллюстрация модели перемещения ирбиса [3]

Решение данной задачи принципиально важно для развития теории автоматического управления как апробацию наиболее современных и эффективных методов проектирования регуляторов для нелинейных нестационарных объектов (нестационарные свойства

порождаются изменением положения отдельных компонент корпуса, а также, возможно, вследствие дополнения массы груза, которая входит в математическую модель объекта). Мешающим воздействием (помехой) является движение маховика по случайному закону, не известному системе автоматической стабилизации. Результаты будут иметь фундаментальное значение для инженерных наук, они могут быть применены в транспортных системах, а также внедрены в учебный процесс.

#### ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ЧЕРТЫ ПРОЕКТА

В зарубежной печати имеются сообщения о единственном аналоге, роботе «Кенгуру», с излишней достоверностью воспроизводящем не только принцип движения, но и внешний облик этого животного [1], другие публикации об этом же устройстве: [4], [5], [6], [7]. При относительно высокой внешней схожести, робот не достигает той функциональной идентичности, которая требуется: робот прыгает лишь вперед, баланс хвостом чисто символический, фактически это – игрушка, повторяющая движения животного-прототипа лишь на демонстрационном принципе, тогда как реальный робот должен, прежде всего, формировать цель движения и достигать ее наиболее быстро, эффективно с энергетической точки зрения, с коррекцией шагов в случае помех движению и так далее, чего, разумеется, нет. Также в англоязычном поиске имеются публикации об этом же самом устройстве: [8], [9], [10]. Также имеются сведения о роботе-тушканчике [11], и другие источники об этом же роботе: [12], [13]. Этот робот не в такой степени похож внешне на биологический прототип, имитируется лишь принцип движения. Недостатки этого робота идентичны: он просто движется вперед с определенной энергией прыжка, не решалась задача достижения поставленной цели, не решались подзадачи коррекции воздействия с целью направленного движения к цели очередного прыжка, просто реализуется спусковой механизм, приводящий к всего лишь прыжку или прыжкам в случайном направлении, зависящем от начальной ориентации и от многих случайных факторов поверхности. Все указанные роботы реализуют идентичное движение обеих конечностей, что исключает управление выбором направления прыжка. При сохранении синхронности действия конечностей они должны действовать не совсем идентично, разница усилий отталкивания и разница ориентации должна позволить управлять направлением и дальностью прыжка, чего в рассмотренных аналогах нет. Решения задачи в той постановке, которая дана в данном проекте, таким образом, в настоящее время в мире нет.

Предлагаемый проект обладает принципиальным отличием, которое состоит в том, что будет обеспечено управление направлением



движения вследствие прыжка по заданной траектории за счет дополнительной ориентации корпуса робота и его конечностей, формирующих резкое отталкивающее усилие для прыжка, в полете будет использоваться для балансировки маховик типа «хвост» и изменение расположения отдельных элементов корпуса друг относительно друга с целью гарантии приземления на конечности, формирующие прыжок. Все факторы, нарушающие равновесие, будут отслеживаться, и их влияние будет подавляться работой систем автоматической балансировки робота. Также будет решена задача изменения направления прыжка в требуемую сторону и управления длиной прыжка. Во второй итерации робота (за второй год проекта) будет решена дополнительно задача парения для уточнения направления и результата полета в прыжке.

В предлагаемом проекте постановка задачи осуществляется в комплексе: наряду с обеспечением механизма прыжков робота должна быть решена задача управления направлением и дальностью этих прыжков, кроме того, речь идет о передвижении за счет серии прыжков без алгоритмического ограничения на их количество, кроме энергетических естественных ограничений. Задача не ограничивается простым формированием движений, порождающих прыжок, а требует решения в комплексе: равновесие робота до начала прыжка, в момент подготовки, во время его совершения, подготавливание равновесия при приземлении, равновесие во время приземления и после него, и так в цикле. Равновесие осуществляется действием двух совместных способов его поддержания: внешний маховик (аналог хвоста) и перемещение от дельных элементов корпуса и верхних конечностей (аналог кошачьего изгиба). Сохранение равновесия крайне важно для формирования серии устойчивых целенаправленных скачков. Также равновесие на этапе от приземления до следующего прыжка обеспечивает отскакивание не по законам механики для сферического упругого предмета (когда угол падения равен углу отражения), а отскакивание в нужном направлении даже в том случае, когда приземление приходится не на строго горизонтальную плоскость, с плоскость с наклоном до 30 и более градусов в любом направлении. С этой целью необходимо использование распознавание поверхности и подготовительное расположение конечностей, предназначенных для прыжка, или (и) обеспечение нужной ориентации робота при приземлении и при отталкивании. Данный принцип движения в настоящее время в робототехнике не используется в совокупности всех предлагаемых технических решений, по этой причине не демонстрируется совокупности требуемых возможностей. Известны лишь отдельные технические решения, имитирующие

в самом примитивном виде движение лап кенгуру, осуществляемое синхронно и с одинаковыми усилиями и иными динамическими характеристиками. В этом случае отскакивание, например, от наклонной плоскости, формирует движение в направлении, задаваемом плоскостью, проходящей через перпендикуляр к опоре, проведенный в точке соприкосновения робота с опорой. Введение управления с целью обеспечения движения после прыжка в заданном направлении, с подавлением влияния наклона плоскости, подобно тому, как движется в природе реальные живые прототипы – кенгуру, тушканчики, лемуры, делает постановку задачи уникальной, подобных результатов в мире в настоящее время нет.

Проект не ставит целью создавать робота, механика и внешний вид которого были бы по возможности наиболее близки к какому-то определенному животному. Отказ от копирования творчества живой природы не является единственно возможным подходом, альтернативный подход (максимальная механическая идентичность) также заслуживает рассмотрения, однако, по мнению авторов проекта, во многих случаях целесообразно идти дальше этого подхода. Полностью копировать кенгуру или тушканчика не целесообразно, и это слишком примитивно по сравнению с потенциальными возможностями. Но желательно заимствовать технологию прыжка, размещение груза в сумке, что облегчает достижение устойчивости в вертикальном положении, также эффективным решением является использование массивного хвоста для обеспечения равновесия. Однако излишний вес хвоста можно сократить, данная структура эффективна на открытой местности, но проигрывает в лесу, в кустарниках, также, как и в лабиринте городской обстановки или в некоторых полевых условиях. Полностью копировать кошачьих излишне сложно и недостаточно функционально, поскольку кошачьи не носят сумки или рюкзаки, «кошка с грузом» – это уже не кошка, а если бы имели, функционал терялся бы. В идеале робот из всех животных будет наиболее похож на гибрид кенгуру, ирбиса и белки-летяги. От кенгуру заимствуется принцип прыжка с максимальным повторным использованием кинетической энергии приземления для формирования нового толчка, также заимствуется принцип баланса хвостом, однако, ставится задача основную тяжесть задачи балансировки перенести в перспективе не на внешние маховики, не имеющие иных функций кроме баланса, а на перегруппировку полезных элементов конструкции. От ирбиса и кошачьих в целом заимствуется перегруппировка в полете с целью приземления на требуемые конечности, на первом году проекта внешний балансирующий элемент существует, как у ирбиса с отно-

сительно массивным хвостом, в перспективе от этого «хвоста» необходимо уйти, подобно рыси, у которой хвост отсутствует, но это не мешает обеспечивать баланса в прыжке и при приземлении. Таким образом, предполагается создание робота, который мог бы быть назван «Кенгу-Рысь», что было бы более адекватно проекту, либо «Кошачий Лемур» (прыжки кошачьего лемура наиболее близко отвечают поставленной задаче, поскольку они осуществляются на двух конечностях, а для целей баланса используется весь организм, см, например,), но такое название могло бы быть воспринято недостаточно серьезно, поэтому авторы остановились на названии «Ирбис» – «Изделие Робототехническое Бионическое Составное». Главное в поставленной задаче – комплексное решение, которое состоит не только в имитации действия конечностей, обеспечивающих движения, а в разработке и реализации действия всего корпуса устройства в целом, поскольку только при таком решении прыжки дают существенное преимущество перед другими способами передвижения в конкретных условиях сильно пересеченной местности. Все необходимые элементы конструкции могут быть однократно изготовлены методом объемной печати на имеющихся 3D-принтерах. Эти элементы будут сделаны из пластмассы, опыт такого изготовления и использования уникальных элементов робототехники имеется, и он достаточен для выполнения данного проекта. Детальная проработка конструкции на основании изучения механики скелетов животных прототипов (вскрытия животных не требуется, поскольку в сетях Интернет имеется достаточно сведений о механизме таких движений и о строении скелетов), составляет одну из частей проекта [14]. На основе макетов, отображающих основные особенности механики проектируемого робота, будет сделана предварительная конструкция, содержащая приводы и датчики. Ограничение направления видения одним фиксированным углом обзора как у большинства животных также видится не обязательным. Запланировано обеспечение полного кругового обзора за счет достаточного количества видеокамер (четырех). Формирование в корпусе такого элемента как «голова» видится не обязательным, однако, следует признать эффективным стабилизацию ориентации камер в пространстве, подобно тому, как это в природе осуществлено на примере гепарда: несмотря на то, что животное находится в движении всем организмом, голова движется по предельно плавной траектории, в которой отсутствуют резкие движения вверх-вниз, практически исключены повороты влево-вправо и вверх-вниз относительно центра масс, система стабилизации положения (в данном случае мышечная) обеспечивает как бы

независимое движение, более плавное и стабилизированное, по сравнению с остальной частью корпуса. Этот принцип предполагается заимствовать и воспроизвести. Эта стабилизация оптической головки (аналога головы животного) может быть осуществлена только на основе положительного опыта стабилизации балансирующего робота, который у команды исполнителей проекта имеется (разработаны и успешно испытаны программно-аппаратные действующие прототипы). Дополнительно должна быть использована имеющаяся техника стабилизации изображения (приобретены соответствующие камеры), разработка этого изделия не требуется, поскольку оно доступно на рынке, оно будет использовано как комплектующие компоненты.

В ходе реализации проекта должны быть использованы методы теоретического исследования, литературного поиска, методы численного моделирования и оптимизации сложных мехатронных объектов, методы практической реализации, тестовые и доводочные испытания, разработка и модификация программных средств. Должны применяться робастные методы проектирования. Особое внимание будет уделено адаптивным систем и адаптивному управлению точных мехатронных систем. В основе исследований лежат разработанные методы, разработанные программно-аппаратные средства, включая разработанные зарегистрированные программы и алгоритмы управления. Также обязательно должна быть решена задача автоматического подъема робота из любого положения за счет специальных средств балансировки, преимущественно без применения техники отталкивания от поверхности. Эти свойства являются крайне важным показателем живучести и способности к выполнению задачи даже вследствие неудачного падения и вследствие попадания в такое положение, из которого невозможно сделать очередной прыжок. Предлагается последовательно создать две модификации принципиально новых видов робота: «Ирбис» (прыгающий перегруппирующийся балансирующий робот) и «Грифон» (прыгающий перегруппирующийся парящий балансирующий робот). Робот «Ирбис» должен демонстрировать и раскрывать основные принципы перемещения, оптимального с позиции скорости, проходимости и энергозатрат для движения в безвоздушном пространстве (на поверхности Луны). Робот «Грифон» должен демонстрировать и раскрывать основные принципы перемещения, оптимального с позиции скорости, проходимости и энергозатрат для движения в пространстве с атмосферой (в земных условиях и в условиях других планет). Работа над прецизионными мехатронными робототехническими изделиями «Ирбис» и «Грифон» позволит приумножить имеющийся

практический опыт, необходимый для разработки и совершенствования принципов и методики проектирования сложных робототехнических систем и устройств.

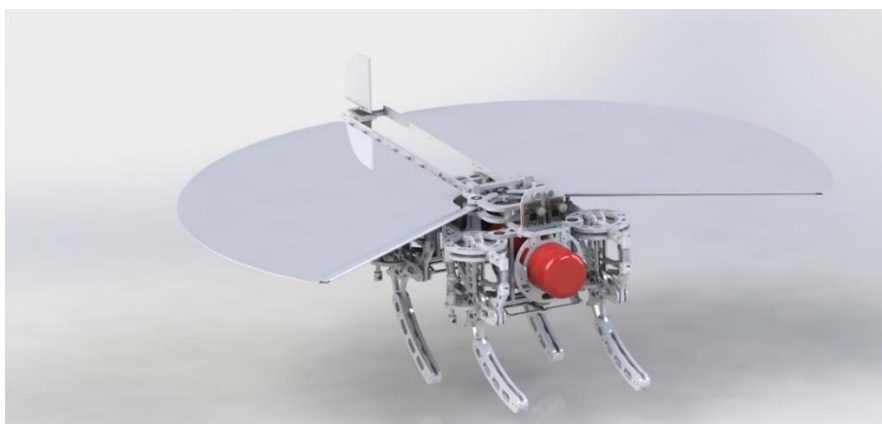
#### ВАРИАНТ МЕХАНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПЕРВОЙ СТАДИИ ПРОЕКТА

Авторы проекта подготовили эскизный проект робота с гибридным перемещением: направленное отталкивание от поверхности плюс воздушное планирование.

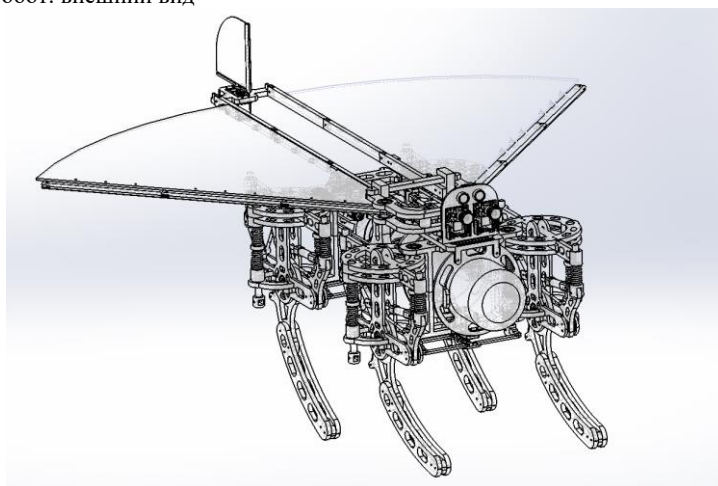
В предлагаемом проекте использованы результаты, полученные в ходе скрупулезной проработки всех основных вопросов реализации, выполненной в течение предшествующего года. Все используемые в роботе узлы

можно за адекватную сумму (которая включена в смету по расходным материалам) найти на AliExpress'e, а корпусные детали рассчитаны на производство из ABS-пластика, и их габаритные размеры не выходят за пределы средних ограничений области печати любительских 3D-принтеров (200 × 200 × 200 мм). Таким образом, полностью подтверждена возможность реализовать весь проект в условиях лаборатории, имеющейся на кафедре. Все необходимое для сборки, отладки и тестирования робота оборудование имеется.

Внешний вид предлагаемого робота показан на *Рис. 7–13* (расположение видео камеры показаны только на *Рис. 7* и *Рис. 8*, на остальных иллюстрациях они не показаны, другие сенсоры также пока не показаны).



*Рис. 7.* Предлагаемый робот: внешний вид



*Рис. 8.* Предлагаемый робот: чертеж внешнего вида

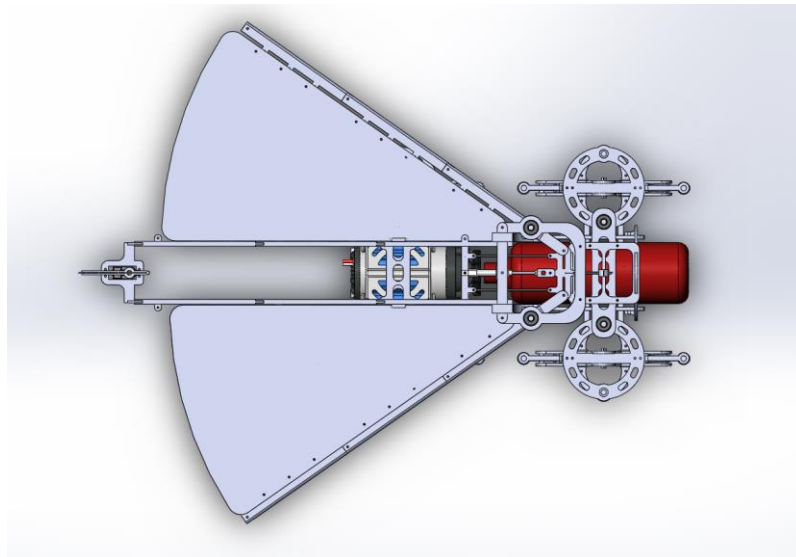


Рис. 9. Предлагаемый робот: вид сверху

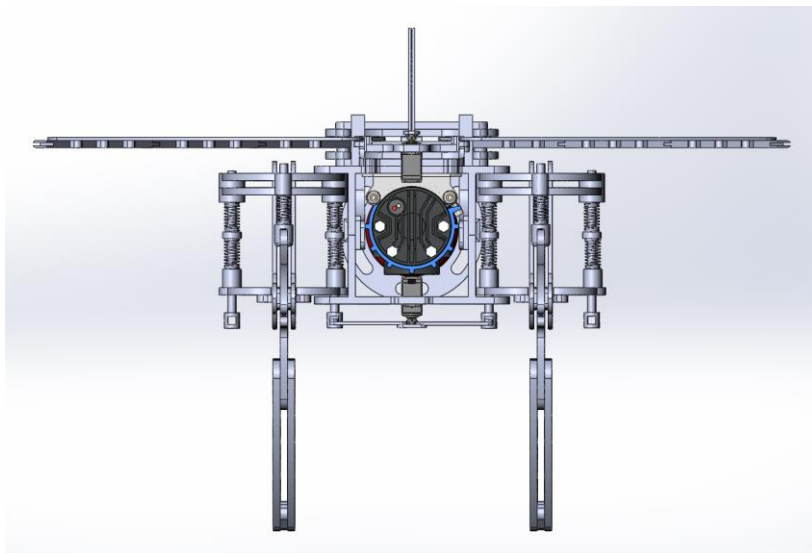


Рис. 10. Предлагаемый робот: вид сзади

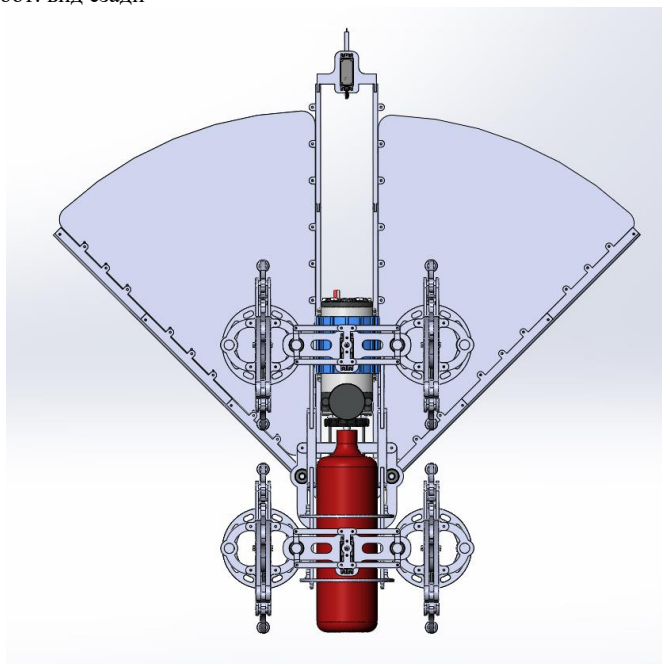


Рис. 11. Предлагаемый робот: вид снизу



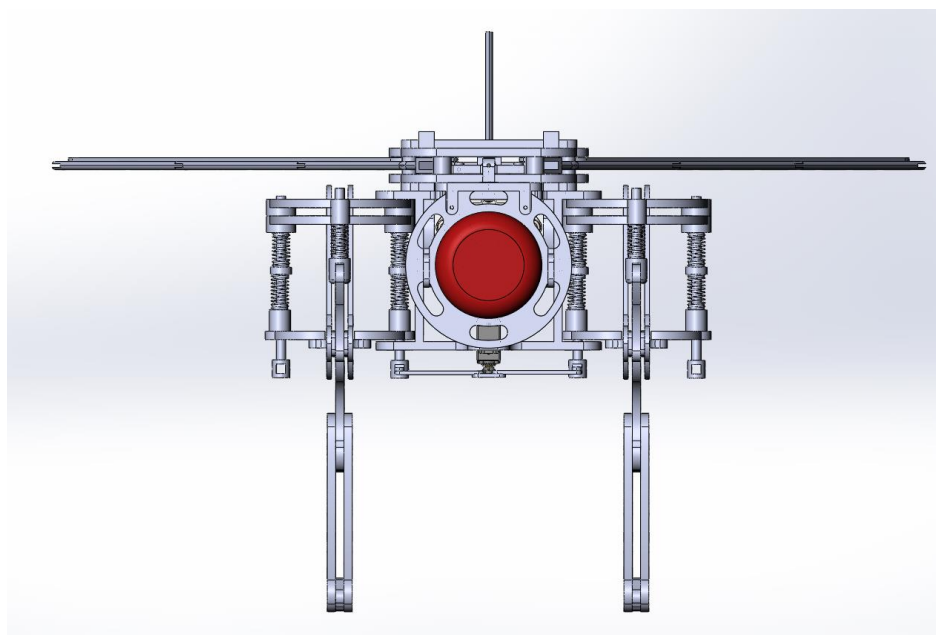


Рис. 12. Предлагаемый робот: вид спереди

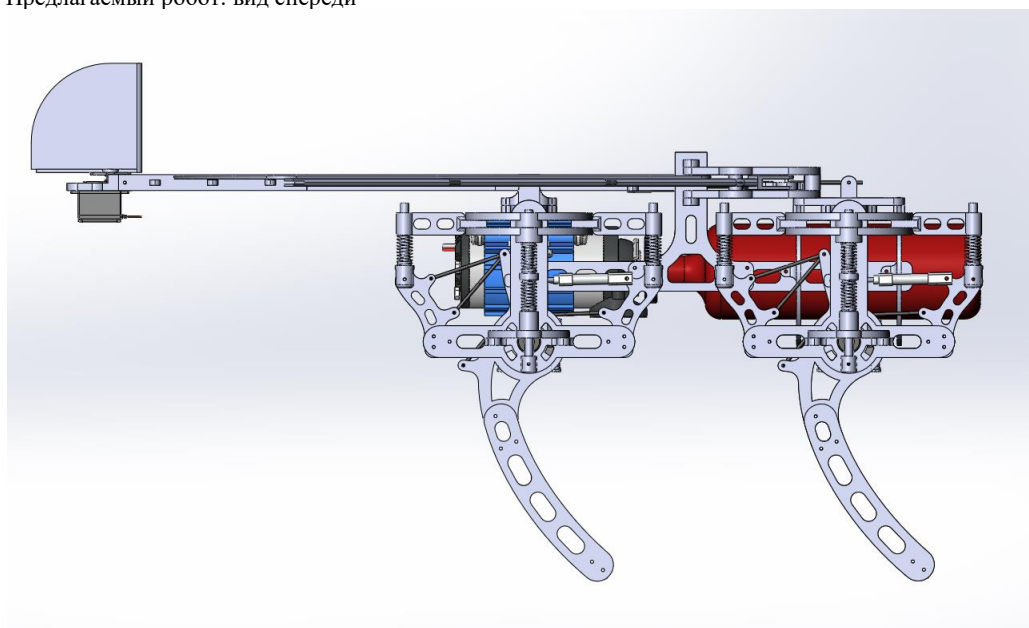


Рис. 13. Предлагаемый робот: вид справа

#### ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Предлагается реализовать две версии:

а) без крыльев и без пневматических узлов – для использования в безвоздушном пространстве,

б) с крыльями для парения в условиях атмосферы, с использованием принципов движения белки-летяги и, возможно, с использованием принципов полета саранчи.

Предлагаемый к рассмотрению вариант является первым шагом, не окончательным, требуются исследования для обеспечения баланса, обеспечения прыжков только на двух конечностях, поскольку именно такие прыжки дают

преимущество в скорости (кенгуру, тушканчик). В первой модели используются четыре конечности для сокращения времени до начала исследования процесса формирования прыжка, накопления и преобразования энергии, для решения других фундаментальных вопросов, включая непрерывную последовательность прыжка при сохранении ориентации движения к поставленной цели, непрерывное получение информации о местоположении за счет используемых видео камер и так далее. Все эти вопросы не имеют пока окончательного решения, в этом состоит их фундаментальность для инженерно-технических наук, в частности робототехники.

При проектировании робота изучено большое количество разнообразных конструкций конкурентов. В плане механизма отталкивания от поверхности (грунта) встречаются два популярных решения:

1) либо разработки подражают животным, используя сгибаемые конечности,

2) либо толчок происходит за счёт раскручиваемой спиралеподобной ноги. Второй вариант видится более перспективным по надёжности и простоте конструкции. Установить такую ногу непосредственно на вал двигателя нельзя: у соответствующего задаче по массогабаритным параметрам привода не будет достаточного стартового крутящего момента, чтобы достичь требуемого импульса при толчке. Использование редукторов или иных ухищрений в плане механики сделает конструкцию неоправданно сложной и ненадёжной. Коллективно принято наиболее лаконичное и перспективное решение: передавать усилие ноге через пневмопоршень CDJ2D [15].

В начальный момент поршень с нагнетённым воздухом держит конечность в сжатом положении, попутно натягивая упругую резинку. Как только мы открываем электрический нормальнозакрытый соленоидный клапан (информация о клапане: [16]), сдерживающий сжатый воздух, нога начинает вращаться, создавая «эффект катапульты» для робота.

Все детали предлагаемой толкательной конечности показаны на *Рис. 14*.

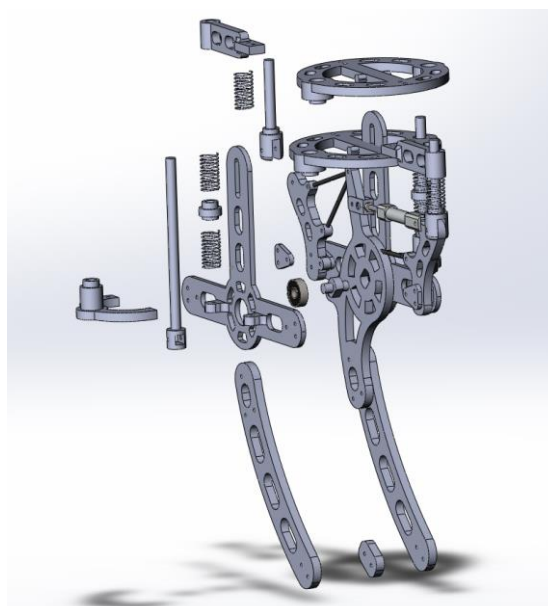
В сборе этот узел толкательной конечности показан на *Рис. 15* (прозрачный чертеж), а внешний вид приведен на *Рис. 16* (непрозрачный чертеж).

Для большего равновесия и силы отталкивания, а также возможности выбора направления толчка используются четыре конечности, соединённые попарно с сервоприводами MG996R (см., например, информацию о приводе: [17]), с помощью которых можно задавать не только тангаж, но и рысканье.

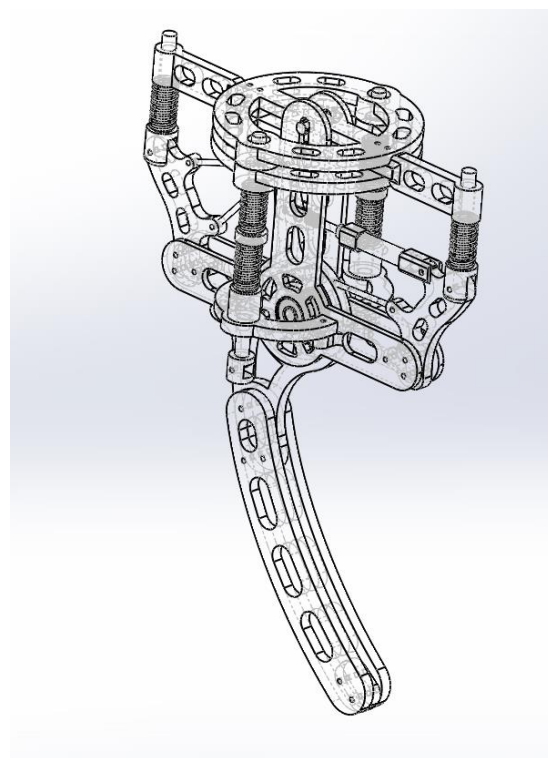
Строение механизма поворота конечностей показано на *Рис. 16*.

Амортизаторы для смягчения приземления и запасания кинетической энергии показаны на *Рис. 17*.

Строение механизма раскрытия крыльев показано на *Рис. 18*.



*Рис. 13.* Отдельные элементы толкательной конечности предлагаемого робота



*Рис. 14.* Схема сборки элементов толкательной конечности предлагаемого робота

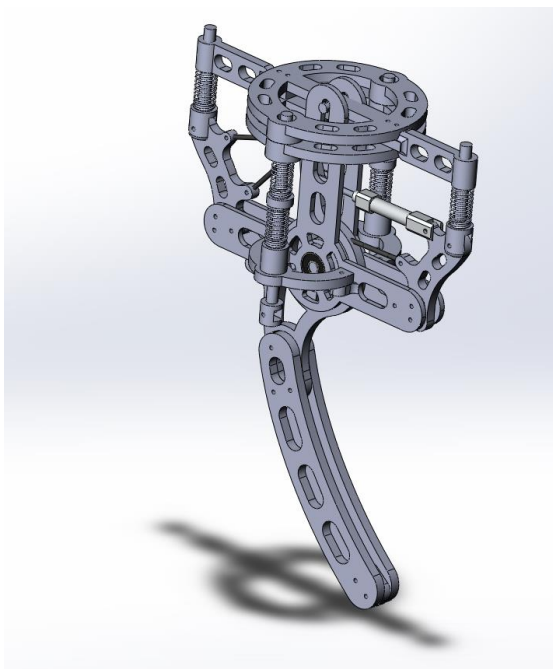


Рис. 15. Внешний вид собранной толкательной конечности предлагаемого робота

Так как мы используем сжатый воздух, нам понадобится автомобильный компрессор [18]. Судя по документации, он способен создавать

давление в 20 бар. Даже если фактического давления будет вдвое меньше, его должно хватить для работы. Чтобы экономить энергию на компрессор, а также отключать его в процессе полёта для уменьшения нежелательных вибраций, на роботе установлен воздушный ресивер из огнетушителя ОП-1, который будет запасать сжатый воздух, в источнике приведена информация о том, как огнетушитель можно переделать в ресивер: [19].

Поскольку отдельных ресиверов в продаже не найдено, можно будет демонтировать его с доступного в продаже огнетушителя.

Чтобы смягчить приземление, ноги робота оснащены амортизаторами (см. Рис. 17). Наличие пружин является принципиальным, они эквивалентны по принципу действия сухожилиям прыгающих животных, которые преобразуют кинетическую энергию от приземления в потенциальную энергию сжатия-растяжения, а затем обратно в кинетическую, поэтому при большой серии прыжков расходуется минимум энергии, основная энергия расходуется только при первом прыжке, далее она нужна лишь для коррекции направления прыжка и для восполнения потери энергии.

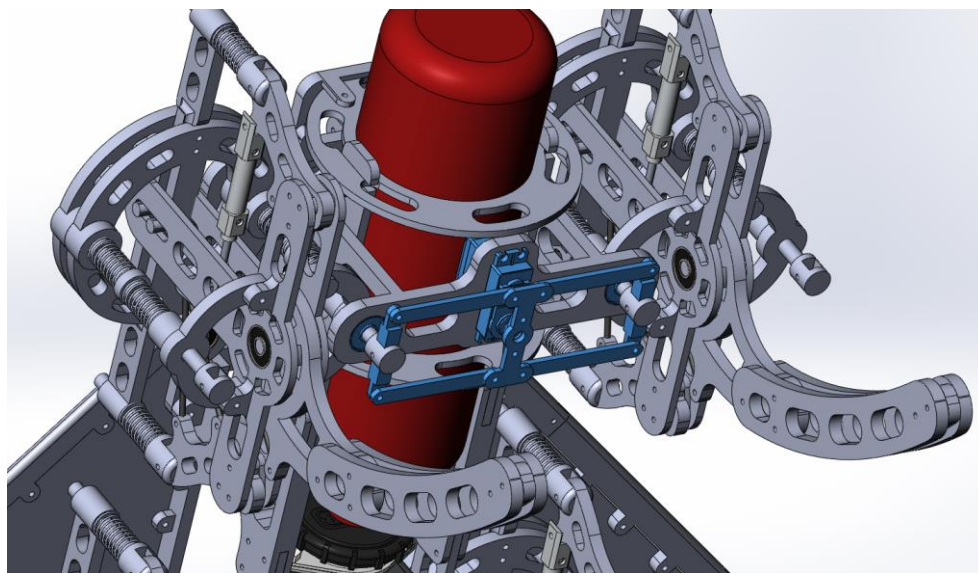


Рис. 16. Строение механизма поворота конечностей

В части реализации полёта выбрана аэродинамическая схема «бесхвостка», фактически используемую самолётами «Конкорд». В предлагаемом проекте сочетаются технические решения, используемые в воздушном змее и в парашюте. Крылья обладают изменяемым углом раскрытия. Это необходимо для того, чтобы в момент толчка робота вверх избежать ненужного эффекта парусности.

В последующих версиях конечности обязательно будут иметь суставы аналогично задним лапам кенгуру или тушканчика, передние конечности планируется использовать только в крайнем случае (для подъема при неудачном приземлении), в варианте без крыльев добавится один или два балансирующих средства (аналог хвоста тушканчика или кенгуру). Первый вариант модели является



базовым для отработки отдельных стадий прыжка и парения. Окончательная модель будет более близка по внешнему виду к кенгуру, но не тождественна ей, а также не тождественна

имеющимся игрушкам, подражающим кенгуру по внешнему виду. В нашем проекте важно использовать преимущества способа передвижения, а не воссоздание внешнего вида.

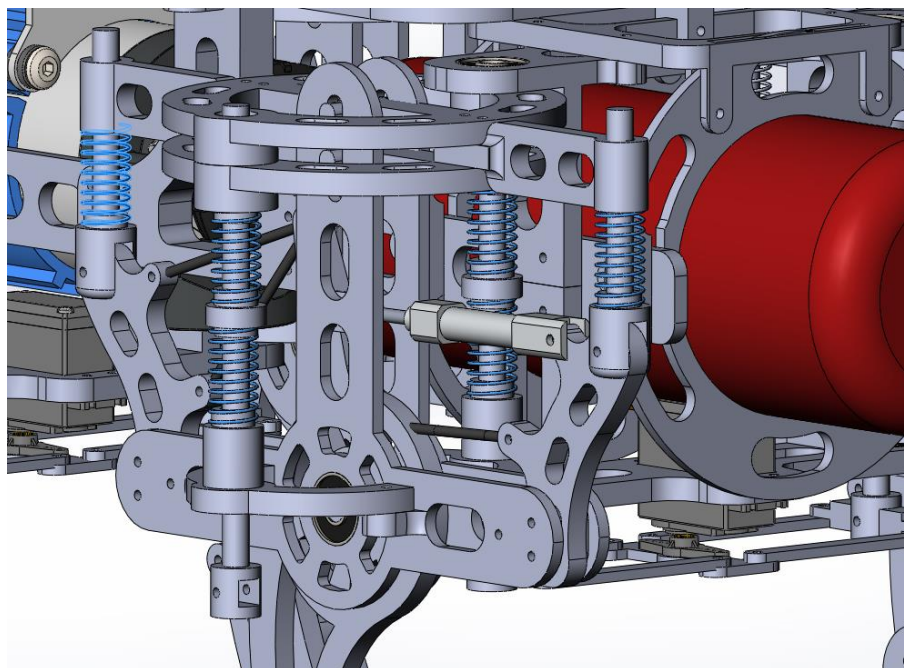


Рис. 17. Амортизаторы для смягчения приземления и запасаения кинетической энергии с его преобразованием в потенциальную (энергия сжатой пружины) с последующим обратным преобразованием в кинетическую (для следующего прыжка)

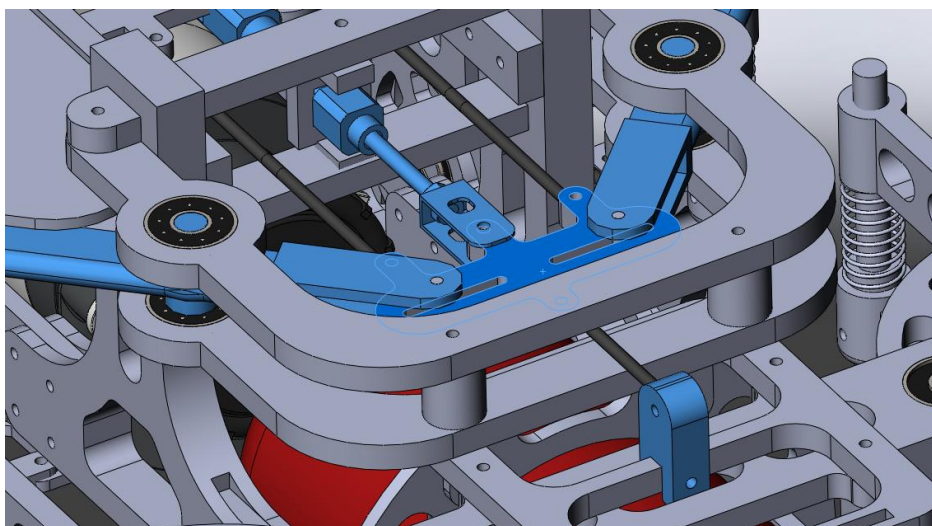


Рис. 18. Строение механизма раскрытия крыльев

Чтобы более наглядно представить процесс перемещения, рассмотрим последовательно стадии прыжка и парения, см. Рис. 19.

Крылья состоят из плотного материала (пластика) и будут раскрываться по принципу веера (на 3D-модели не показаны складки или сегменты). Данное раскрытие будет происходить за счёт пневмопоршня. Конструкция системы наглядно изображена на Рис. 18, где черным изображены резинки.

В хвосте робота установлен киль с сервоприводом, за счёт которого можно управлять роботом в полёте.

Все подвижные элементы конструкции соединены с корпусом через подшипники 608-2RS [20]. На 3D-модели они изображены чёрными дисками. В корпусных деталях предусмотрены технологические вырезы для уменьшения массы. Все соединения осуществляются парами винт-гайка с нейлоновым уплотнителем с метрической резьбой и



диаметром 3 мм. Сами метизы на модели не прорисованы из соображений большей нагляд-

ности и меньшей информационной загрузки изображения.

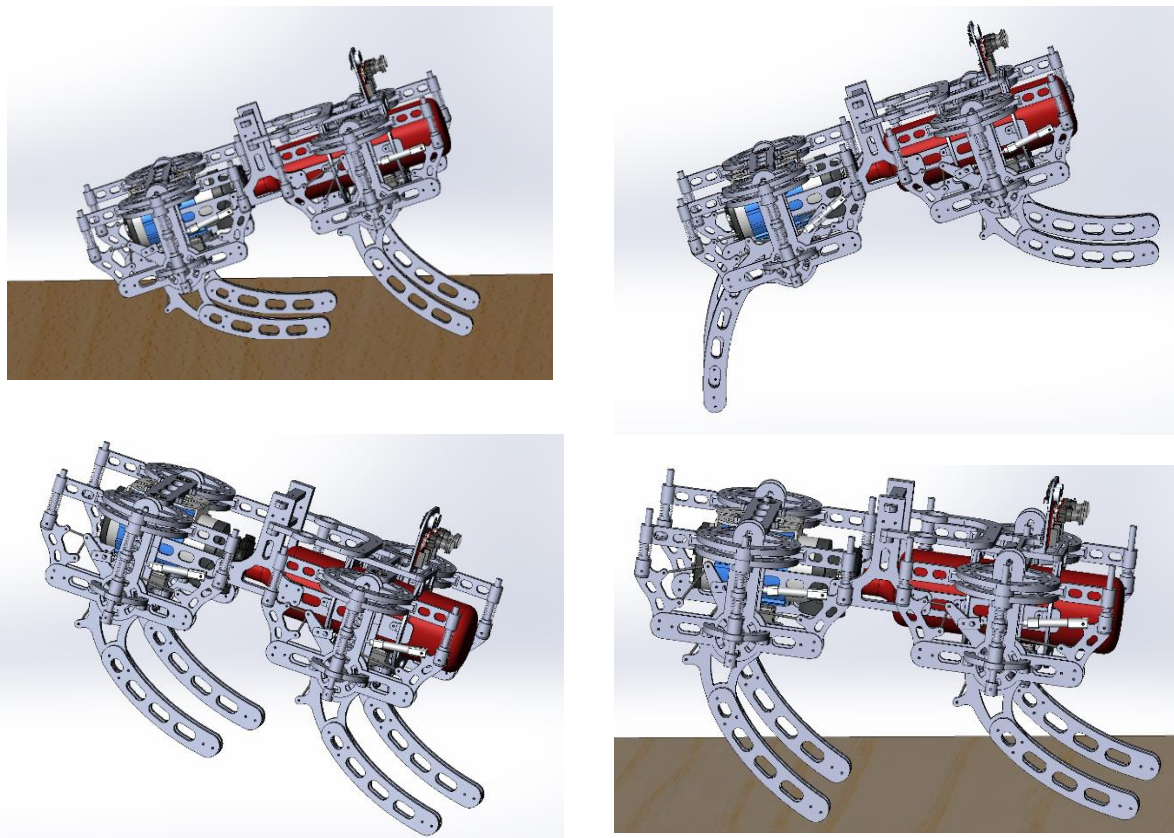


Рис. 19. Прыжок робота Ирбис по стадиям (эскизный проект первой версии) в окончательном виде изделие будет более изящным после отработки всех подзадач

Ожидаемая дальность полета при прыжке превышает длину робота в 15-25 раз, при парении она по ожиданиям превышает длину робота в 20-60 раз. Именно эти показатели будут обрабатываться на первой модели. Другим важным показателем является экономия энергии, то есть использование энергии приземления для нового прыжка путем накопления ее в пружинах, но ориентация пружин при приземлении будет иной, чем при взлете, что позволяет перенаправлять эту энергию для корректировки курса.

Также фундаментальной задачей является разделение усилий по левой и правой конечностям, это необходимо для управления направлением прыжка.

Также обязательно будет решена задача автоматического подъема робота из любого положения за счет специальных средств балансировки, преимущественно без примене-

ния техники отталкивания от поверхности. Эти свойства являются крайне важным показателем живучести и способности к выполнению задачи даже вследствие неудачного падения и вследствие попадания в такое положение, из которого невозможно сделать очередной прыжок.

Безусловно, эскизный проект не может предусмотреть всех будущих проблем при его реализации.

Проект мог бы быть реализован кафедрой автоматки НГТУ в случае получения соответствующего финансирования, например, из фонда РФ.

К сожалению, эксперты РФ сочли проект не актуальным. Возможно, найдется спонсор, заинтересованный в реализации данного проекта, или возможно, к реализации подобного проекта приступит другой научно-исследовательский коллектив.

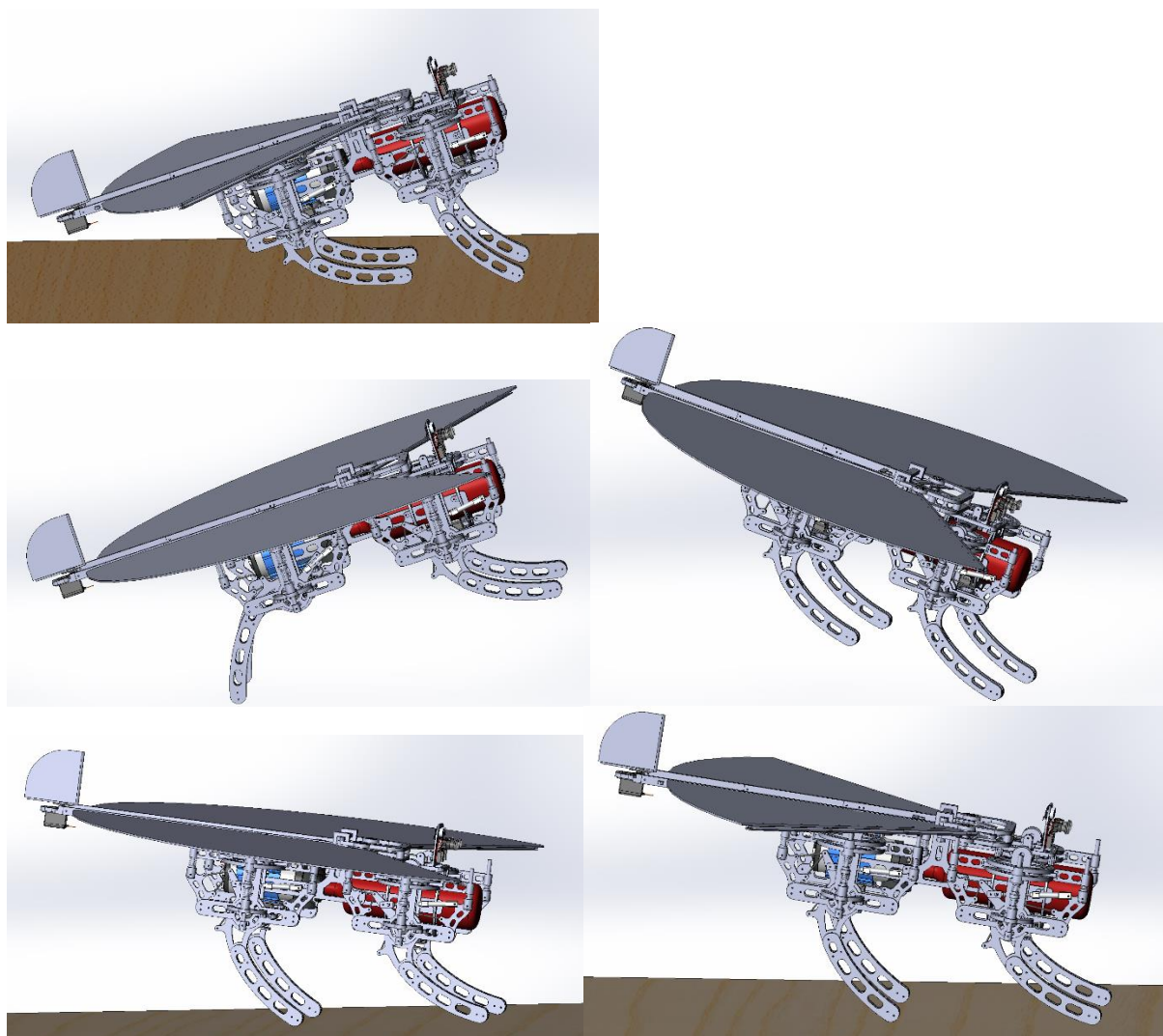


Рис. 20. Последовательные стадии прыжка, полета и приземления разрабатываемого робота Грифон (эскизный проект)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время практически любой проект можно отклонить по следующим соображениям: а) такое уже сделано (даже если не такое, то подобное; даже если не подобное, то аналогичное; даже если не аналогичное, то примерно что-то в этом духе, но гораздо лучше, и т. п.); б) авторы проекта не указали, как можно коммерциализовать данное изделие (если даже они такое видят, то они не доказали, что их предложение коммерциализации окупит затраты на исследование, и т. п.); в) в точности такого исследования авторы проекта не выполняли, поэтому сомнительно, что они способны выполнить это исследование; г) авторы уже выполнили приблизительно подобное исследование, поэтому сомнительно, что предлагаемый проект содержит достаточно новую новизну.

Разумеется, предложенная конструкция очень далека от модели барса или грифона. Это лишь первые шаги студенческого конструкторского бюро. Китайцы говорят: «Кто лежит в

постели, тот не споткнется», у нас есть аналогичная поговорка: «Не ошибается тот, кто ничего не делает». Подобным подходом можно разрушить не только науку, но и образование полностью, окончательно.

Зачем обучать студентов электронной технике, если сейчас любое электронное изделие можно купить? Зачем обучать студентов автоматике, если можно заказать автоматизацию в одной из множества существующих фирм? Зачем студентам знать, как работает транзисторный каскад, как работают элементарные цифровые логические элементы, как устроен двоичный счетчик, как устроен микропроцессор и так далее? Такая позиция напоминает позицию героев комедии Фонвизина «Недоросль»: зачем Митрофанушке знать географию, если у него кучер есть? Кучеру надо только сказать, куда надо доставить, кучер и доставит, куда надо. Сейчас, получается, не надо изучать арифметику, ведь есть калькуляторы, не надо изучать математику, ведь есть компьютеры и очень эффективные

математические программы, которые любую задачу решат: и интеграл возьму, и производную вычислят, и систему уравнений решат и что угодно, или, во всяком случае, очень многое из того, на что раньше уходили часы размышлений и вычислений.

Для чего заниматься разработкой балансирующих роботов, если уже продаются в магазинах сигвеи, которые и есть не что иное, как балансирующий робот?

Для человека-потребителя, по-видимому, действительно, нет необходимости разбираться хотя бы в чем-нибудь. Если у него есть деньги, то всё, что ему нужно, он может купить, а то, что купить не нужно, не надо и желать иметь, так как если это не продаётся, это всё равно недоступно. Хотя всё больше и больше того, что раньше не продавалось, теперь продаётся и доступно. Были бы деньги. Если проблему можно решить с помощью денег, то это не проблема, а расходы, не более того.

Но скажите, как можно стать специалистом хотя бы в чем-то, если не делать самому хотя бы что-то? И если вы или ваши студенты будут делать то, что уже сейчас есть, доступно, примитивно, не содержит никакой научной новизны – это тоже способ научиться чему-то, получить достаточную квалификацию, чтобы делать уже то, что содержит новизну. Но если сразу начинать делать то, что содержит новизну, тогда что ж вам ещё надо, о чём же ещё мечтать? Ведь это – идеальное высшее техническое образование.

Роботы, которые выполняют движения в виде прыжков, имеются. Но роботы, которые оптимально пересекают сложную поверхность с помощью серии прыжков, пока ещё отсутствуют.

Парящие беспилотные модели самолётов уже имеются. Но роботы, которые парят после прыжка, пока ещё отсутствуют.

Природа показала на примерах кенгуру, тушканчиков, лемуру, кузнечиков, цикад и многих других живых существ, насколько эффективен прыжок, причем, серия прыжков с изменяющимся направлением – это идеал, пример наиболее эффективного движения по предельно пересеченной местности. Природа показала, что парение является весьма эффективным способом движения при наличии воздушной среды.

Бионика – это подход, в котором наилучшие изобретения природы воплощаются в технических устройствах. В этом направлении можно и должно двигаться. Возможно, предлагаемые конструкции не слишком убедительно доказывают, что они позволят освоить метод движения серий прыжков или прыжками с парением, но это какое-то начало. Начало не обязано быть совершенным. Данный проект может объединить не только задачи создания движителей, но и задачи распознавания образов

окружающей среды, ориентации в этой обстановке и коррекции движения. Все эти вопросы можно решать быстро при наличии достаточного финансирования и необходимого коллектива, или решать по мере возможностей, двигаясь от простого к сложному, при этом попутно подготавливая кадры высшей квалификации.

А можно гарантированно не споткаться, и не падать, и не ошибаться, просто ничего не делая.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.festo.com/group/ru/cms/10219.htm>
- [2] <https://vido.com.ua/article/11868/miru-priedstavlien-robot-tushkanchik/>.
- [3] <https://w-dog.ru/wallpaper/snezhnvi-bars-irbis-pryzhok-skaly-priroda/id/260302/>
- [4] <https://prohitech.ru/robot-kenguru-kontroliruemyj-zhestami-umeet-prygat-kak-ee-zhivoj-sobrat/>
- [5] <http://robocraft.ru/blog/news/3067.html>.
- [6] <http://dosoaftor.ru/2017/02/03/robot-kenguru-ot-festo/>
- [7] <https://www.dailytechinfo.org/robots/5778-noveyshiy-robot-kompanii-festo-prygayuschiy-bionicheskiy-kenguru-bionickangaroo.html>
- [8] Tadayoshi Saito, Junzo Kawakami, Susumu Takahashi, Testuo Suehiro, Hiroshi Matsumoto, Kouji Tachibana. Pid controller system. US Patent. US4903192A.  
<https://patents.google.com/patent/US4903192A/en>
- [9] <https://patents.google.com/?q=G05B13%2F0275>
- [10] <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/festo-newest-robot-is-a-hopping-bionic-kangaroo>, <https://interestingengineering.com/robotic-kangaroo-based-on-the-principles-of-nature>,
- [11] <https://www.theverge.com/2014/4/6/5587564/festo-robotic-kangaroo-is-inspired-by-nature>.
- [12] <https://vido.com.ua/article/11868/miru-priedstavlien-robot-tushkanchik/>,
- [13] <https://www.dailytechinfo.org/robots/6930-sozdan-robot-tushkanchik-vesma-zabavno-podrazhayuschiy-svoemu-zhivomu-prototipu.html>,  
<https://www.htbook.ru/publ/tehnologii/robot-tushkanchik>
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=-a0VRmSsM8>
- [15] <https://aliexpress.ru/item/32966867182.html>
- [16] <https://aliexpress.ru/item/4000148834833.html>
- [17] <https://aliexpress.ru/item/4000417528570.html>
- [18] <https://aliexpress.ru/item/4000154733340.html>
- [19] <https://sdelaysam-svoimirukami.ru/4924-kak-iz-ognetushitelja-sdelat-resiver-dlja-kompressora-12-v.html>
- [20] <https://aliexpress.ru/item/4000548026185.html>



**Вадим Жмудь** - заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.

E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)

630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20





**Дмитрий Александрович Мяхор** – аспирант НГТУ, каф. Автоматики. Область научных интересов: шагающие роботы, роботы-баланси- ровщики, колесные роботы, веб-разработка, 3D-дизайн в Solid Works, радиотехника.  
**E-mail:**  
[mydial2009@gmail.com](mailto:mydial2009@gmail.com)

Статья поступила 20.03.2021 г.

## Principles and Methodology for the Design of Jumping, Regrouping and Hovering Balancing Mobile Robots

V.A. Zhmud<sup>1,2,3,4</sup>, D. Myahor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, Russia

<sup>2</sup> Institute of Laser Physics SB RAS, Russia

<sup>3</sup> Siberian Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Geophysical Service of the SB RAS

<sup>4</sup> Novosibirsk Institute of Software Systems

*Abstract.* Currently, the creation of new principles of action and movement of mobile robots, robotics is a fundamental task, extremely important and relevant, related to robotization and digitalization at a fundamentally new level, corresponding to the concept of "Industry 4.0". A particular subtask of this direction is also the development of methods for using various sensors for the robot to self-determine its position and orientation on the ground, as well as the development of effective controllers (regulators) for high-precision motion control of these robots. In addition, these two directions are of independent value, since the methodology for solving these problems and the results obtained can be extended (scaled) to many similar problems, where control is carried out not only and not necessarily by mechanical quantities. At the same time, the effective development of robotics without solving these subtasks is impossible, since the high accuracy of control and stabilization in these tasks is a key property of the robots being created: without effective stabilization of their equilibrium (balance), the proposed principles of action cannot be applied; without a sufficiently effective use of sensors of various nature (optical and balance sensors, as well as ultrasonic sensors to determine the location of nearby obstacles and other objects), the movement will not meet the assigned tasks. The article proposes a project for the further development of research in this area, which could have a significant impact on the technical capabilities of transport robotics.

*Key words:* robotics, balancing robot, jumping robot, automation, control, transport technology, bionics

### REFERENCES

- [1] <https://www.festo.com/group/ru/cms/10219.htm>
- [2] <https://vido.com.ua/article/11868/miru-priedstavlien-robot-tushkanchik/>.
- [3] <https://w-dog.ru/wallpaper/snezhnij-bars-irbis-pryzhok-skaly-priroda/id/260302/>
- [4] <https://prohitech.ru/robot-kenguru-kontroliruemyi-zhestami-umeet-prygat-kak-ee-zhivoj-sobrat/>
- [5] <http://robocraft.ru/blog/news/3067.html>,
- [6] <http://dosoafter.ru/2017/02/03/robot-kenguru-ot-festo/>
- [7] <https://www.dailytechinfo.org/robots/5778-noveyshiy-robot-kompanii-festo-prygayuschiy-bionicheskiy-kenguru-bionickangaroo.html>
- [8] Tadayoshi Saito, Junzo Kawakami, Susumu Takahashi, Testuo Suehiro, Hiroshi Matsumoto, Kouji Tachibana. Pid controller system. US Patent. US4903192A.  
<https://patents.google.com/patent/US4903192A/en>
- [9] <https://patents.google.com/?q=G05B13%2f0275>
- [10] <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/festo-newest-robot-is-a-hopping-bionic-kangaroo>, <https://interestingengineering.com/robotic-kangaroo-based-on-the-principles-of-nature>,
- [11] <https://www.theverge.com/2014/4/6/5587564/festo-robotic-kangaroo-is-inspired-by-nature>.
- [12] <https://vido.com.ua/article/11868/miru-priedstavlien-robot-tushkanchik/>,
- [13] <https://www.dailytechinfo.org/robots/6930-sozdan-robot-tushkanchik-vesma-zabavno-podrazhayuschiy-svoemu-zhivomu-prototipu.html>,  
<https://www.htbook.ru/publ/tekhnologii/robot-tushkanchik>
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=-a0VRmSsM8>
- [15] <https://aliexpress.ru/item/32966867182.html>
- [16] <https://aliexpress.ru/item/4000148834833.html>
- [17] <https://aliexpress.ru/item/4000417528570.html>
- [18] <https://aliexpress.ru/item/4000154733340.html>
- [19] <https://sdelaysam-svoimirukami.ru/4924-kak-iz-ognetushitelja-sdelat-resiver-dlja-kompressora-12-v.html>  
<https://aliexpress.ru/item/4000548026185.html>



**Vadim Zhmud** – Head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences.  
E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)  
630073, Novosibirsk,  
str. Prosp. K. Marksa, h. 20





**Dmitry Myakhor** is a post-graduate student of the 2nd year of study at Novosibirsk state technical University. Research interests: walking robots, balancing robots, wheeled robots, web development, 3D design in Solid Works, radio engineering.  
E-mail: [mydial2009@gmail.com](mailto:mydial2009@gmail.com)  
630073, Novosibirsk,  
str. Prosp. K. Marksa, h. 20

The paper has been received on 20/03/.2021.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Анализ с точки зрения механики позволяет усомниться в некоторых выводах палеонтологов.

В частности, ранее предполагалось, что тираннозавр Рекс крайне быстро бегал. Недавно появилась заметка, что этот динозавр мог передвигаться не быстрее, чем со скоростью 4,6 км / час, т. е., например, человек мог бы сравнительно легко убежать от такого хищника<sup>2</sup>. Если внимательно посмотреть на всю фигуру этого животного, можно обнаружить удивительное сходство строения его тела с телом кенгуру, см. *рис. П.1* и *рис. П.2*.

Следует обратить внимание на следующие параметры сходства:

1. Оба животных обладают массивным длинным хвостом.
2. Оба животных обладают массивными сильными задними конечностями.
3. Передние конечности обоих животных настолько малы, что не могут участвовать в процессе движения животного по поверхности.
4. Большая часть тела обоих животных находится, если судить визуально, впереди по отношению к задним конечностям.



*Рис. П.1.* Внешний вид тираннозавра Рекса, реконструкция<sup>3</sup>



*Рис. П.2.* Внешний вид кенгуру<sup>4</sup>

Отметим также следующее.

В позиции, в которой изображен тираннозавр Рекс, он не мог бы сохранять равновесие, он неминуемо упал бы головой вперед. Точно также не мог бы в такой позиции стоять и современный кенгуру. Кенгуру, находящийся не в движении, располагает своё тело вертикально, т.е. стоит или сидит вертикально.

Добавьте к этому, что кенгуру нуждается в быстром перемещении, чтобы спастись от хищников, а тираннозавр Рекс нуждался в быстром перемещении, чтобы настичь жертву.

Добавьте к этому, что человек перемещается крайне медленно в сравнении почти с любым современным животным аналогичных размеров. Поэтому если предположить, что тираннозавр Рекс перемещался медленным шагом и не мог бы даже догнать современного человека, возникает вопрос о том, чем или кем питалось это животное? Строение зубов явно указывает, что это был не падальщик, а активный хищник, он должен был настичь и убивать жертву. И каким же образом такое грузное животное могло настичь жертву, перемещаясь с трудом, со скоростью не более 4,6 км / час? Добавьте к этому, что данный хищник был успешным и существовал достаточно длительное время без изменений, срок его существования как вид, населяющий планету, оценивается приблизительно в 10 миллионов лет. Если бы его форма тела не была эффективной, если бы его существование не было обеспечено великолепной организацией тела, соответствием анатомии его физиологии, его функционированию в среде, тогда это существо не могло бы столь длительно успешно существовать. Если предположить, что это существо передвигалось прыжками и нападало на жертву также в прыжке, все вопросы получают убедительное объяснение. Подобное существо могло бы

<sup>2</sup> [https://hi-tech.mail.ru/news/53795-uchenye-vossozdali-pohodku-tirannozavra-na-kompyutere-i-udivilis/?fbclid=IwAR0XcE1pzsZ3BT5uGHxXE4y8HIII-TgADwHoNLTxdvFdvAH3C534EW6\\_sYw](https://hi-tech.mail.ru/news/53795-uchenye-vossozdali-pohodku-tirannozavra-na-kompyutere-i-udivilis/?fbclid=IwAR0XcE1pzsZ3BT5uGHxXE4y8HIII-TgADwHoNLTxdvFdvAH3C534EW6_sYw)

<sup>3</sup> [https://onevikiapan.fandom.com/ru/wiki/Тираннозавр\\_Рекс](https://onevikiapan.fandom.com/ru/wiki/Тираннозавр_Рекс)

<sup>4</sup> <https://www.vokrugsveta.ru/quiz/265181/>

одним прыжком настигнуть жертву, а при такой пасти даже один укус мог бы вполне дать достаточно пищи для поддержания жизни на текущий день или даже на большой срок. Это существо не было падальщиком не только потому, что пасть и зубы указывают на охотника, а не на поедателя трупов, но также и потому, что это существо не могло сильно набивать утробу, поскольку в этом случае оно приобретало бы большие проблемы для дальнейшего передвижения, так как положение равновесия существенно бы изменялось. Поэтому можно вполне предположить, что насыщение происходило после нескольких укусов, пища заглатывалась без пережевывания, на что указывает огромная мускулистая шея. Конечно, нельзя исключать бег на двух задних ногах, как это делают страусы и казуары, но версия прыжков представляется более убедительной.

Аналогично современные палеонтологи не сошлись во мнении о том, каким образом передвигался самый крупный из птерозавров, известный как кетцалькоатль<sup>5</sup>. Ученым не понятно, как такое огромное существо (совпадающее по размерам с жирафом) могло взлетать, как оно могло перемещаться по поверхности. Форма и строение тела, казалось бы, не приспособлены ни для взлёта, ни для перемещения по земле, ни для плавания (см. Рис. П.3); тем не менее это существо было хищником, т. е. оно должно было двигаться быстрее, чем его жертва. При этом ученые допускают возможность парения в полёте этого существа, но не понятно, как оно оказывалось в воздухе. Гипотеза о том, что каждый раз для взлёта этому существу необходимо было прыгать с края отвесной скалы, не выдерживает критики, поскольку найденные останки таких существ свидетельствуют об их широком распространении отнюдь не только вблизи крутых обрывов. Кроме того, если взлететь с обрыва ещё как-то можно, то надо ведь каким-то образом и вернуться на исходное место, хотя бы для того, чтобы продолжить род.

Утверждение «Кетцалькоатль предпочитал вести полуназемный образ жизни, летали они редко. Крылья ящеров не подходили для активного полета, поэтому эти летающие ящеры ловили восходящие потоки теплого воздуха и планировали»<sup>6</sup> кажется весьма сомнительным. Такого восходящего потока, который бы смог поднять столь большое и массивное существо (оценка веса расходитя от 140 кг до 250 кг), можно было дожидаться всю жизнь и так и не дожидаться.

Предлагаем обратить внимание на строение передних конечностей этого существа (рис. П.4)



Рис. П.3. Кетцалькоатль<sup>7</sup>



Скелетная реконструкция из Хьюстонского музея естественных наук (штат Техас, США)

Рис. П.4. Скелетная реконструкция кетцалькоатля<sup>8</sup>

<sup>5</sup> <https://4lapki.com/2019/07/ketcalcoatl>

<sup>6</sup> <https://paleonews.ru/dino/xishhniki/ketcalcoatl>

<sup>7</sup> <https://4lapki.com/2019/07/ketcalcoatl>

<sup>8</sup> <https://paleonews.ru/dino/xishhniki/ketcalcoatl>

Передняя конечность состоит из двух отчетливо разделяющихся частей: первую составляют две кости, вторую – кость, аналогичная пальцу, но по размерам этот «палец» соизмерим с первыми двумя костями.

По этому «пальцу» проходило сухожилие, которое также шло далее на всю длину следующей кости. Это сухожилие могло, по-видимому, пружинить. Мы усматриваем здесь механизм очень быстрого распрямления этого пальца таким образом, чтобы все три кости становились в одну линию. Этот механизм был бы очень удобен для совершения прыжка.

О роли сухожилий в прыжках в высоту можно узнать из публикации<sup>9</sup>.

На рис. П.4 кажется, что все суставы крыла кетцалькоатля сгибаются в одну сторону. Это не так. Из рис. П.5 видно, что один из суставов работает в противоположном направлении. Такое строение конечности наиболее эффективно не только для полета, но и для прыжка. Подобное просматривается и на рис. П.3. Можно предположить, что эта конечность использовалась для прыжка с последующим парением.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

В природе каждое животное (в особенности такое, которое существовало на протяжении миллионов или десятков миллионов лет) было весьма эффективно приспособлено для всех выполняемых ими функций.

Каждый успешный хищник в природе был наиболее эффективно приспособлен к охоте.

Охота чаще всего требовала стремительного нападения на жертву со скоростью, намного большей, чем скорость ускользания жертвы. Во всяком случае, преимущества быстрого (хотя бы даже и не длительного) перемещения давало хищникам наилучшие шансы для выживания, что могло быть причиной длительного существования без изменения. Примеры этому дают крокодилы и змеи, способные совершать стремительный бросок на добычу, и просуществовавшие без изменений по этой причине очень долго.



Рис. П.5. Скелет кетцалькоатля<sup>10</sup>

Преимущества быстрого движения даёт прыжок. По этой причине, вероятно, не следует исключать, что тираннозавр Рекс и кетцалькоатль использовали прыжок для нападения на добычу, причем, кетцалькоатль, вероятно, использовал прыжок с последующим парением, после чего нападал на добычу сверху (гребень на голове, вероятно, содействовал маневренности при парении).

Это лишний раз доказывает (или, как минимум, демонстрирует) эффективность прыжка.

<sup>9</sup> [http://www.frosfo.ru/1/vestnicIIAF/vestnik\\_2012\\_3.pdf](http://www.frosfo.ru/1/vestnicIIAF/vestnik_2012_3.pdf)

<sup>10</sup> <https://paleonews.ru/dino/xishhnik/ketcalcoatl>