



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 101 за 2013 г.



Павловский В.Е.

О разработках шагающих
машин

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Павловский В.Е. О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 101. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук

В.Е.Павловский

О РАЗРАБОТКАХ ШАГАЮЩИХ МАШИН

Москва, 2013 г.

УДК 531.1

В.Е.Павловский

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

О РАЗРАБОТКАХ ШАГАЮЩИХ МАШИН

АННОТАЦИЯ

Представлены примеры разработок шагающих машин и аппаратов, от древних времен до настоящего времени. Рассматриваются технические данные и особенности шагающих роботов. Цель – показать типичные элементы конструкций шагающих аппаратов и основные этапы синтеза шагающей машины как интегрального робота.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 10-07-00409, 10-01-00160.

Ключевые слова и выражения: *многоногий шагающий аппарат*

V.E.Pavlovsky

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS

FOR ELABORATION OF WALKING MACHINES

ABSTRACT

Examples of development of walking machines and devices, from ancient times till present times are presented so far. The specifications and features of walking robots are considered. The purpose – to show typical elements of designs of walking devices and the main stages of synthesis of the walking car as the integrated robot.

The work is partially supported by the RFBR grants 10-07-00409, 10-01-00160.

Key words and phrases: *multilegged walking machine*

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Введение	3
2. Предтечи. От 2000 лет назад	4
3. Машина П.Л.Чебышева. 130 лет назад	8
4. Первые пионерские проекты в СССР	8
5. От истории к современным перспективам	11
5.1. Зарубежные результаты	11
5.2. Колесно-шагающие роботы	21
5.3. Мини-роботы-гексаподы	22
5.4. Современные шагающие машины России	23
6. Этапы создания шагающей машины	25
7. Заключение	26
8. Литература	28

1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи изучения и синтеза шагающего перемещения – это прежде всего задачи создания машин и устройств, способных перемещаться в естественных условиях, по бездорожью, либо вообще использующих нетрадиционные движители.

В таких задачах шагающие машины важны и актуальны, особенно как средство решения проблемы передвижения по бездорожью (или по местности со сложным рельефом). Объясняется это следующими обстоятельствами. Колесо лишь частично решает проблему передвижения, т.к. для его эффективного использования нужна гладкая опорная поверхность, притом непрерывная. Шагающее устройство в состоянии само выбирать точки контакта ноги с поверхностью и учитывать ее неровности. При наличии гладкой твердой дорожной поверхности колесо, безусловно, служит основой наиболее эффективных средств передвижения. Когда же дело касается естественной земной поверхности, которая содержит неровности, колесо во многих случаях оказывается бесполезным и здесь может оказаться применимым шагающее устройство.

Отметим, что, как указывается в ряде источников ([1,2]), в настоящее время создано множество простых устройств, которые на первый взгляд кажутся шагающими, но на самом деле переставляют ноги чисто механически, не используя потенциальных возможностей регулируемого взаимодействия с опорной поверхностью. Чтобы шагать "по-настоящему", нужно располагать подробными данными о среде передвижения. Машины, способные шагать именно в таком смысле, появились лишь после того, как для проведения множества необходимых измерений и процедур принятия соответствующих решений стали использоваться компьютеры, связанные с мобильной машиной, вначале проводными связями, или, позднее, когда системы управления реализовывались на основе радиосвязи робота с управляющим компьютером, - беспроводными. А затем появились бортовые системы, сделавшие шагающие аппараты автономными.

Для дальнейшего важно сформулировать определение шагающей машины. Из многих существующих возьмем следующее, основанное на основном свойстве такой машины оставлять дискретный след.

Шагающая машина, это машина, которая оставляет дискретный след на поверхности перемещения. Шагающая машина должна быть способна упорядоченным образом выбирать места для постановки опор (ног) на поверхность.

Рассмотрим далее моменты истории и дадим попытку краткого обзора создания многоногих шагающих аппаратов. Цель этого обзора – наглядно представить типичные элементы конструкций шагающих аппаратов и основные этапы синтеза шагающей машины как интегрального робота.

2. Предтечи. От 2000 лет назад

В различных источниках имеются указания, что одна из наиболее древних разработок датирована 230 ВС (230 год до Рождества Христова) – это деревянная лошадь с повозкой, автор Лю Бань, Китай. Современные ее "римейки" показаны на рис.1.



Рис.1. Деревянная лошадь. 230 ВС.

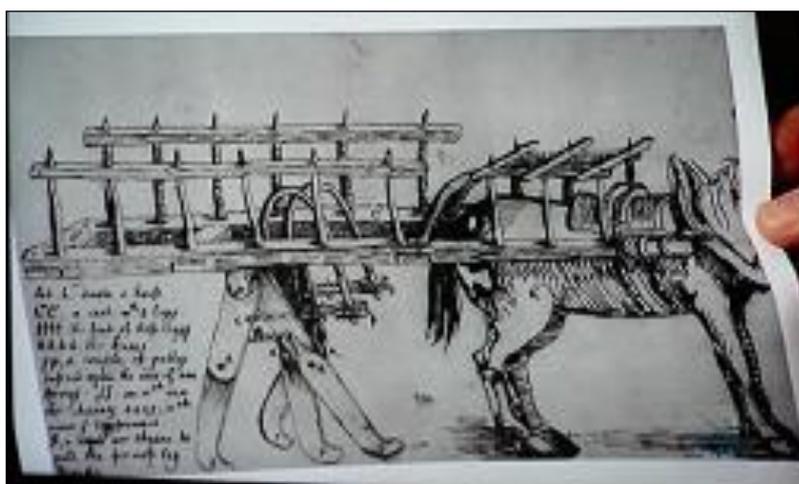


Рис.2. 1663 г. – шагающая повозка, Francis Potter/Robert Hooke, Англия.

Самые первые аппараты имели вид механических лошадей или повозок (рис.1 - 5). На рис.2 показана шагающая повозка, схемы которой обнаружены английской экспедицией в Африке.

Как видно, эти аппараты копировали движения животных с помощью жесткой механической рычажной конструкции. Пример такой конструкции приведен на патенте США на рис.3. И хотя существенно позднее внешний вид таких машин стал намного "изысканнее" (рис.4), принцип решения задач шагания с помощью рычажных устройств остался.

Конечно, эти машины не обладали адаптацией к поверхности передвижения, а только лишь имитировали шагание как способ движения. Зачастую они служили рекламным целям.

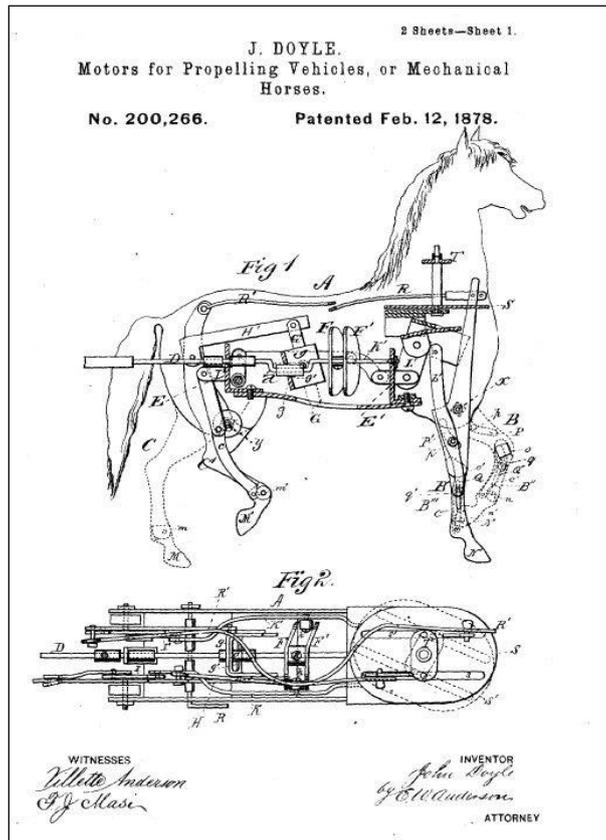


Рис.3. 1877-78, патент США №200.266, механическая лошадь, John Doyle.



Рис.4. 1951 г. , электрическая лошадь, Vogart, США.

Нужно отметить, что подобные аппараты появлялись не только в Америке. На рис.5 показан экспонат из Франции, причем, что интересно, эта машина уже имела двигатель, которым служила паровая машина.

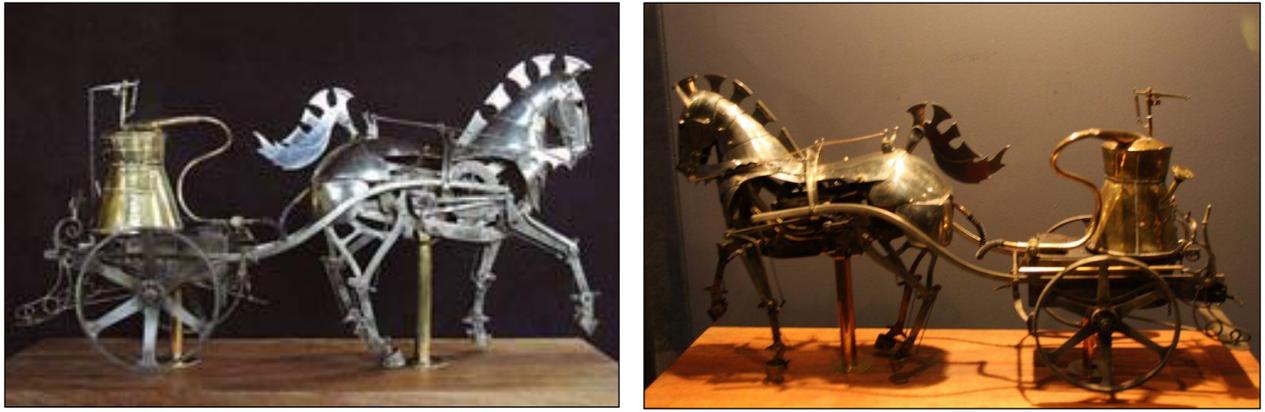


Рис. 5. около 1875, паровая лошадь, Франция.

Национальный музей миниатюр в Лионе.

Отдельный класс кинематически похожих аппаратов составляют "механические слоны". Эти аппараты появились в ранний период XX века и служили, в основном, для ярмарочных увеселений и представлений. Их кинематическая схема также была жесткой (аппараты переставляли ноги по жестким циклам), и представляла собой (зачастую сложную) механическую рычажную конструкцию (рис.6-8). Привод был гидравлическим. Наиболее продвинутой конструкцией среди показанных ниже был электромеханический слон "Electrofant" Фрэнка Стюарта, инженера из Англии (рис.8). Аппарат Стюарта был продемонстрирован на выставках по всему миру, от Англии до США и Австралии. А на рис.9 показана машина, которая уже вплотную "приблизилась" по конструкции к современным аппаратам.

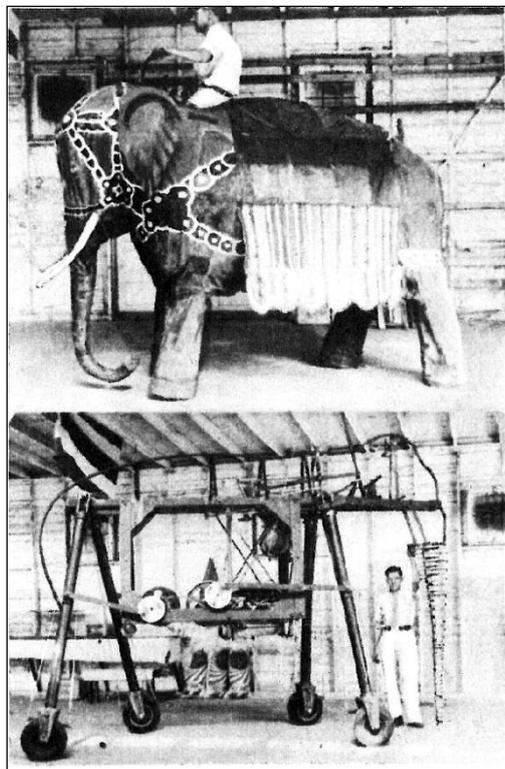


Рис.6. 1937, J.G. and George W. Shrum, США.



Рис.7. 1937-38, George/Gordon Hutton.

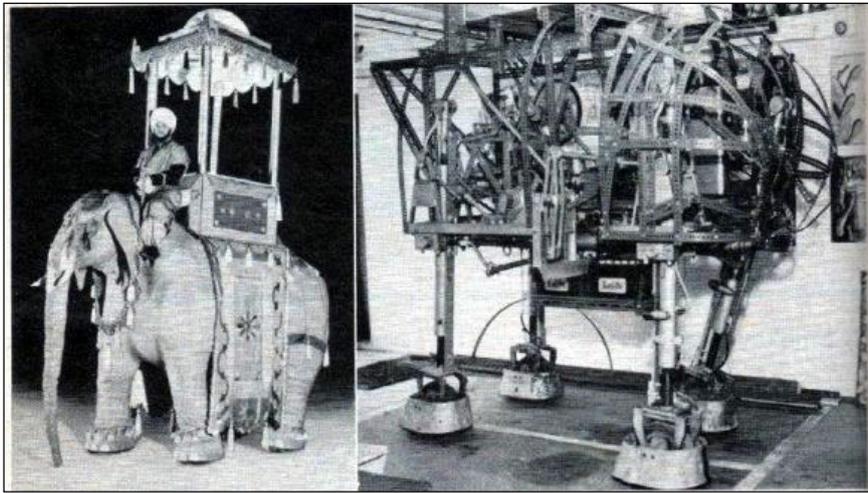


Рис.8. 1965 – "Electrofant", электромеханический слон, Frank Stuart, Англия.

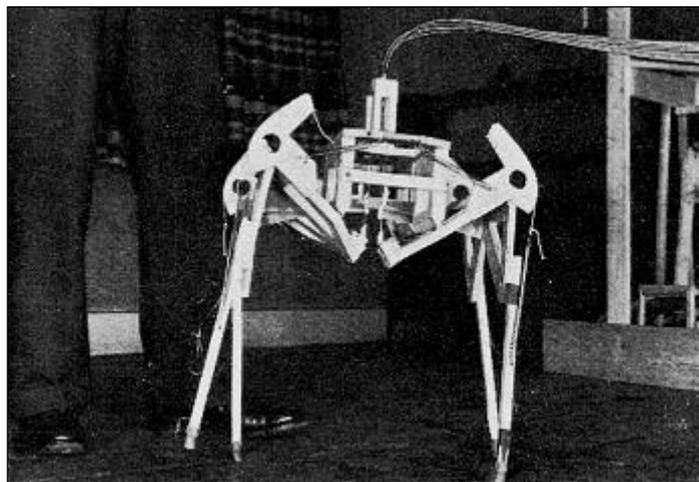


Рис.9. 1940 – фирма W. H. Allen & Company.
A. C. Hutchinson and F. S. Smith, Англия

Шагающие машины в дальнейшем получили богатейшую историю.

3. Машина П.Л.Чебышева. 130 лет назад

Одним из первых научных задач анализа перемещения стопоходящих животных и устройств занялся известный русский математик и механик П.Л.Чебышев. Он в 1878 г. разработал образец так называемой стопоходящей машины, ее схема показана на рис.10. Ее натурный образец имеется в Политехническом музее в Москве.

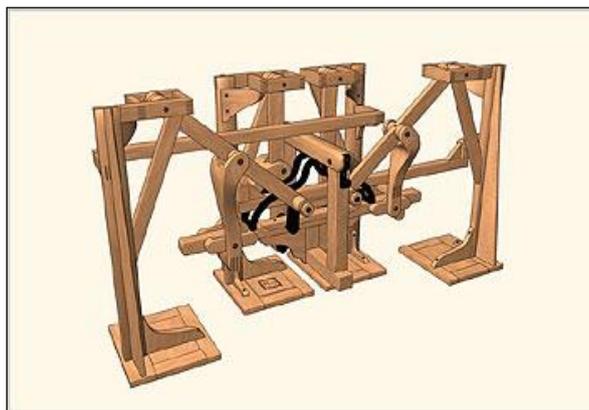


Рис.10. Стопоходящая машина П.Л.Чебышева.

Машина была построена на лямбда-механизмах Чебышева и была чисто механическим устройством - примером его выдающихся работ по теории механизмов.

Машина Чебышева показала принципиальную осуществимость шагающего устройства. Однако, в современном мире подобные устройства реализуются как роботы, в которых значительная часть или все функции управления реализуются бортовой автоматической (компьютерной) системой. При этом уже не требуются механические связи движущихся ног и других частей аппарата, их заменяет логическая связь этих элементов в программе управления. Примеры можно найти в [1-12] и в *Избранной библиографии*.

4. Первые пионерские проекты в СССР

Исследования по созданию шагающих роботов имеют в современной России давнюю историю, насчитывающую более 40 лет. В СССР эксперименты по шагающим машинам начались на рубеже 70-х годов XX века. Это были приоритетные пионерские работы, в тот период шли аналогичные исследования только в США, но отечественные исследования опережали аналогичные зарубежные работы. Организатором и вдохновителем этих работ в СССР был академик (тогда еще член-корреспондент АН СССР) Д.Е.Охоцимский.

Примерно в одно и то же время - в период 1972-1975 гг. - были созданы макеты-прототипы многоногих шагающих машин-роботов в Институте прикладной математики Академии Наук (руководитель – академик Д.Е.Охоцимский), в МГУ в Институте механики (руководитель профессор Е.А.Девянин) а несколько ранее шагающая машина была создана в Институте машиноведения Академии Наук (руководители – академик И.И.Артоболевский, профессора А.П.Бессонов и Н.В.Умнов).

На рис.11 показан макет шагающей машины, разработанный в Институте машиноведения Академии наук СССР.

В этой машине был использован оригинальный принцип организации ходьбы. Машина имеет 4 ноги с так называемыми ортогональными приводами. Их преимущества состоят в более простых расчетных схемах синтеза движения ног и корпуса аппарата.

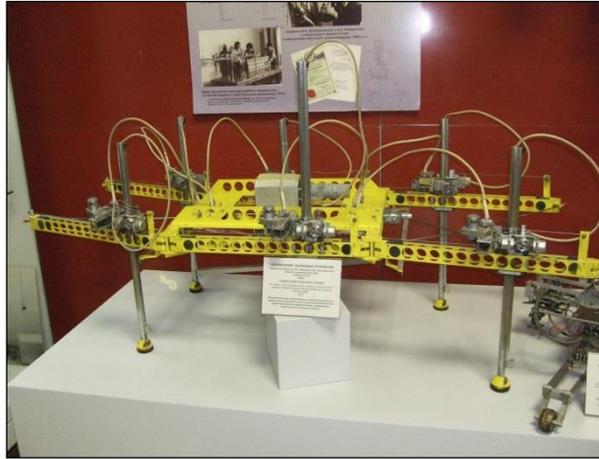


Рис.11. Шагающая машина ИМАШ РАН. Политехнический музей, Москва.

Ниже на рис.12 показаны макеты шестиногих шагающих машин, созданные в Институте прикладной математики АН СССР. Слева показан первый образец, созданный в содружестве ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР и Ленинградского механического института (ЛМИ), справа - второй образец, созданный несколько позднее при сотрудничестве ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР и Ленинградского института ВНИИТРАНСМАШ.

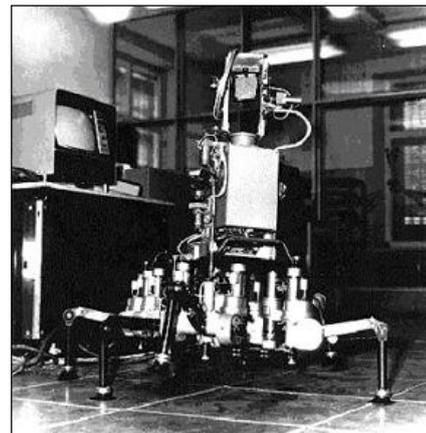
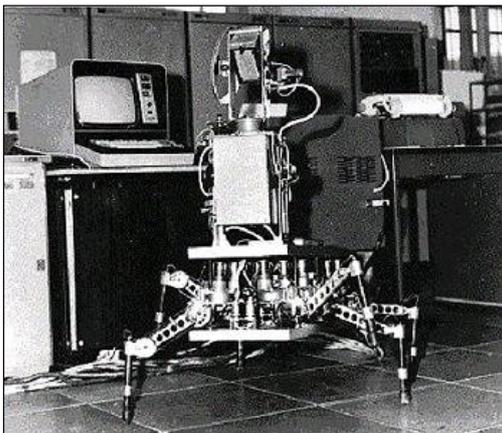


Рис.12. Шагающие роботы ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР.
Фотографии 1975 г.

Отметим, что эти аппараты имели так называемые инсектоморфные ноги, каждая из которых имела по три степени подвижности (три степени свободы). На рис.12 оба аппарата показаны в варианте с оснащением лазерным дальномерным устройством - Лазерным Измерителем Расстояний ЛИР. С помощью ЛИР роботы осматривали поверхность передвижения и затем управляющая роботами мини-ЭВМ принимала решения о движении. Наличие

шести ног позволяло решить принципиальную задачу устойчивости движения робота - робот мог передвигаться статически устойчивой походкой, если в каждый момент времени в опоре находилось не менее трех ног. Именно это обстоятельство определило интерес к многоногим машинам.

Позднее на базе этих разработок совместно ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР и ВНИИТРАНСМАШ в 1975 г. был создан большой натурный макет шестиногой машины НМША (Натурный Макет Шагающего Аппарата), которая была способна нести человека-оператора. Масса машины 750 кг. Скорость движения 0,7 км/ч, грузоподъемность 50 кг, дорожный просвет 1,5 м. Машина показана на фотографиях на рис.13.

История всех этих работ дополнительно отражена в подразделе "Избранная библиография" в списке литературы.

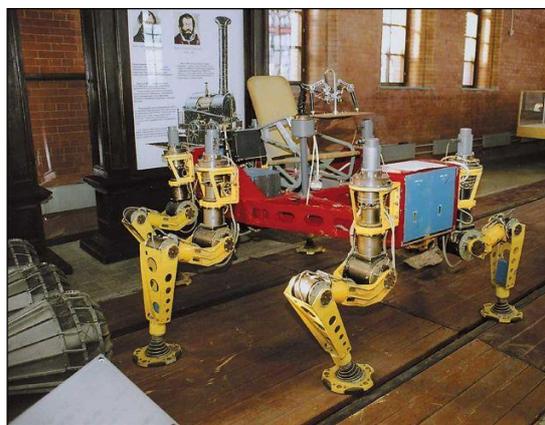
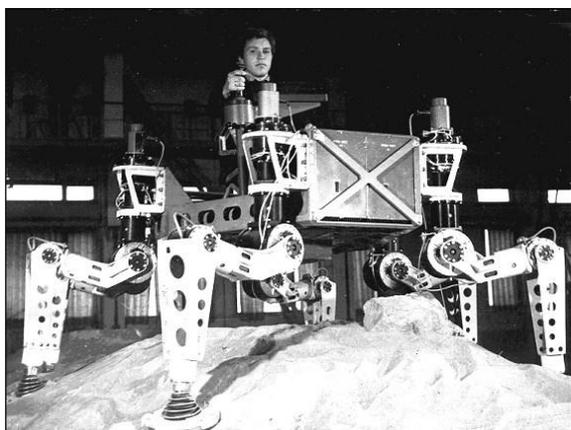


Рис. 13. Аппарат НМША.

Указанные исследования продолжают в настоящее время, на рис.14 показан третий макет робота, создаваемый как модификация предыдущих в ИПМ им.М.В.Келдыша РАН. На роботе реализована оригинальная бортовая микропроцессорная система управления, построенная как бортовая компьютерная управляющая сеть. Робот оснащен необходимым набором сенсоров.



Рис.14. Шагающий робот ИПМ им.М.В.Келдыша РАН.
Современная версия. Фотографии 2009 г.

Работы по исследованию шестиногих аппаратов проводились и продолжают в Институте Механики МГУ. Они ведутся на основе

модернизации самого первого проекта этого института, в котором создавался робот МАША (МАшина ШАгающая).

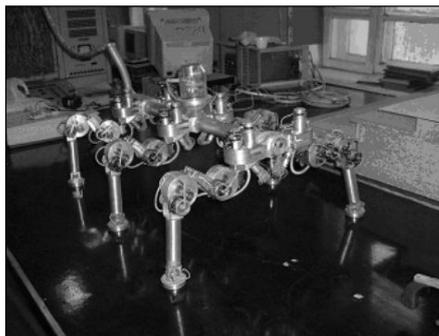


Рис.15. Робот Института Механики МГУ. Первая (1975 г.) и современная версии.

На рис.15 показана первая (слева) и современная (справа) версии робота МАША, на второй фотографии аппарат показан на переднем плане. Робот также имеет шесть инсектоморфных ног и снабжен необходимыми сенсорами.

5. От истории к современным перспективам

Далее нужно отметить, что проекты шагающих машин были выполнены практически во всех технологически развитых странах, - США, Японии, Англии, Финляндии, Бельгии, Германии, Испании, и других. Перечислим некоторые примеры.

5.1 Зарубежные результаты

На рис.16 приведена одна из первых разработок в США. Авторы – профессора Frank и McGhee. Разработка была хорошо известна и получила в научно-популярной прессе шуточные прозвища Phoney-Poney и "Калифорнийская лошадь".

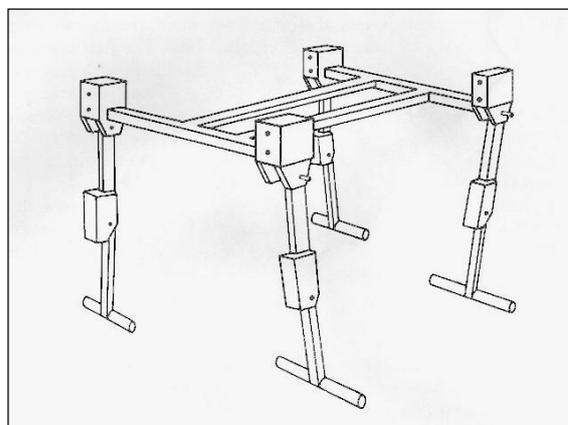
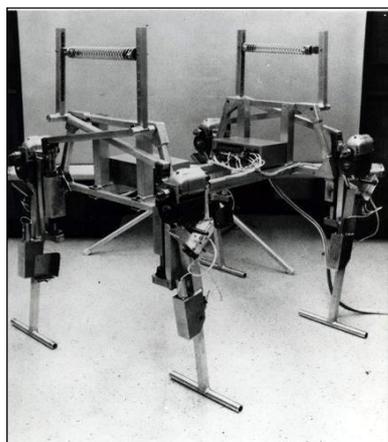


Рис.16. 1968 г. Phoney-Poney. Калифорнийская лошадь.

На рис.17 - тяжелая шагающая машина General Electric, США, 1969 г. Управление ею было построено по копирующей схеме, но человек, ведущий ее

и руками и ногами, выдерживал всего порядка десяти минут. Такой сложной была система управления, требующая огромного напряжения внимания и сил. По этим результатам был сделан однозначный вывод: управление аппаратом необходимо переложить на компьютер. Все последующие аппараты строились как роботы с компьютерным управлением, реализующим больший или меньший объем функций управления в супервизорном или автономном режимах.

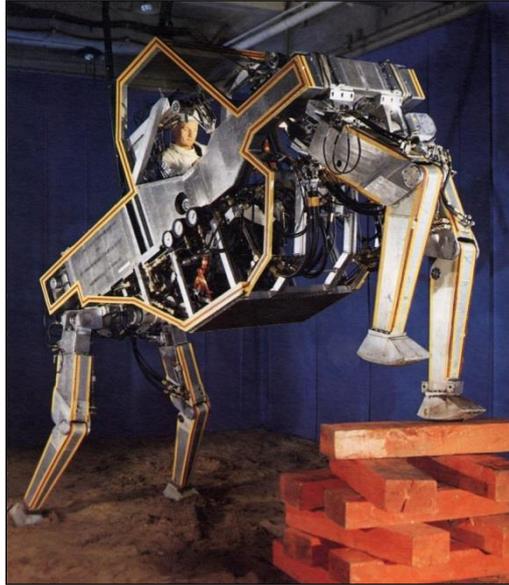


Рис.17. 1969 г. GE Walking Truck. Ralph Mosher. США.

На последующих фотографиях на рис.18 - 44 разработки семидесятых годов XX века и более поздние и современные аппараты западных лабораторий. Их только перечислим, т.к. каждый заслуживал бы отдельного описания.

США.

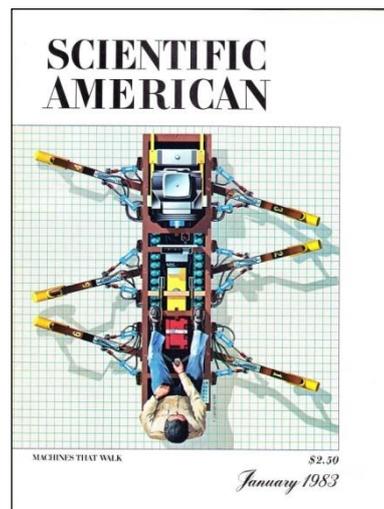
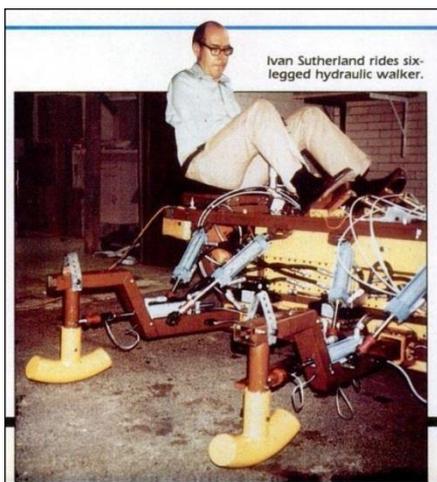


Рис.18. 1983 г. Гидравлическая шагающая машина И.Сазерленда. США.
(из журналов *Popular Mechanics* и *Scientific American*)

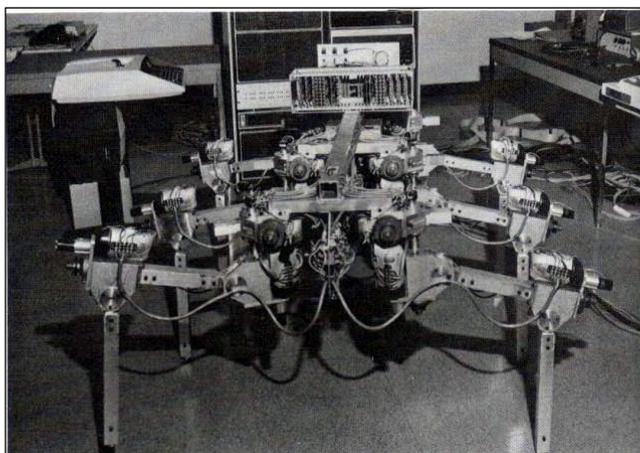


Рис.19. 1976 г. Средний шестиногий робот. Университет Огайо. США.
Руководитель разработки профессор McGhee.



Рис.20. 1984 – 1991 гг. Тяжелый шагающий аппарат ASV с водителем.
Университет Огайо. Стенфордский университет. США.
Руководитель разработки профессор K.J.Waldron



Рис.21. ODEX24. Odetics. США. Первый коммерческий шагающий робот.

Бельгия.

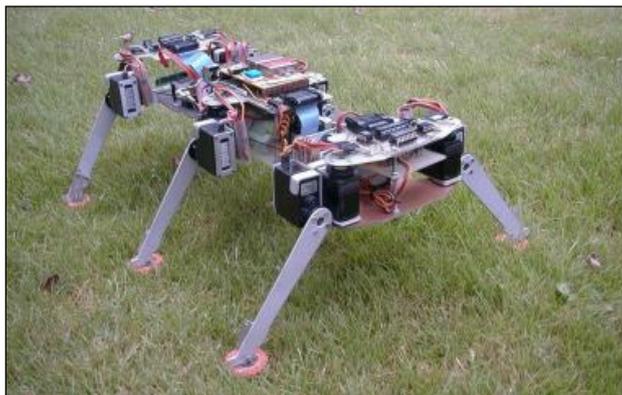


Рис.22. 1990 г. IOAN. Вес 1.2 кг. Свободный Университет Брюсселя.
Профессор А.Preumont. Робот имеет "ломающийся" корпус.

Финляндия.

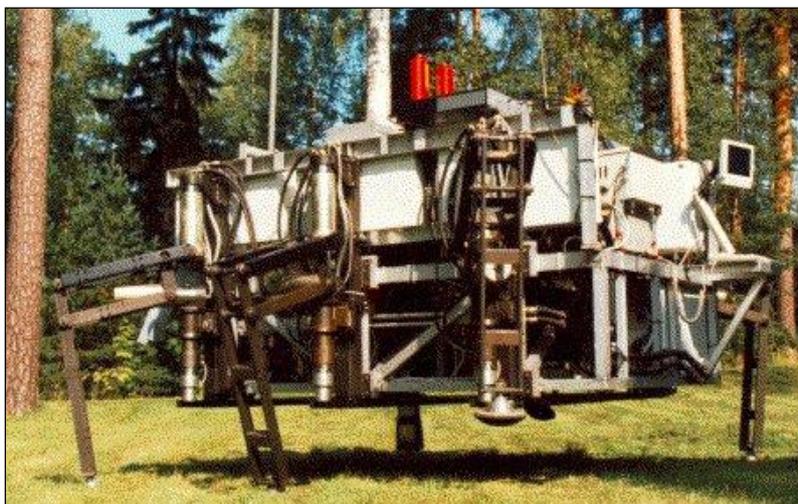


Рис.23. 1990 г. MECANT. 1100 кг. Университет Aalto, Хельсинки.



Рис.24. Plustech Oy. Финляндия.

На рис.24 показана концепт-машина, созданная в Финляндии в фирме Plustech Oy Ltd. Машина предназначена для работы в лесу на лесоразработках, в условиях труднопроходимой местности, где не проходит тяжелая колесная и гусеничная техника.

Япония.

Далее – японские разработки, роботы семейства Titan вплоть до тяжелого (масса 7 т) аппарата Titan 11. Все разработки выполнены в лаборатории профессора Шигео Хироэ (Hirose Fukushima Robotics Lab.).

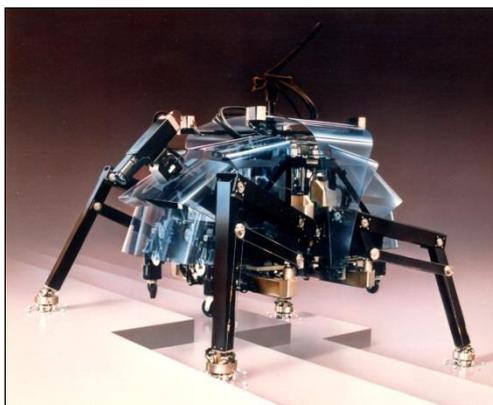


Рис. 25. Titan 4. Япония.

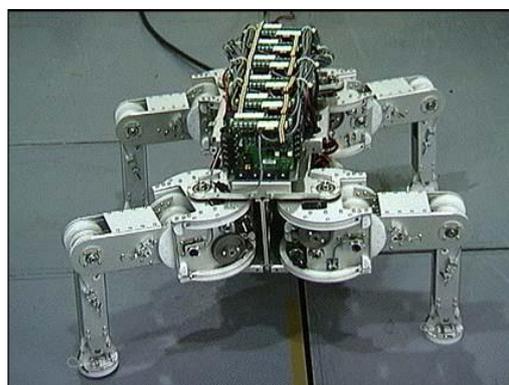


Рис.26. Titan 8. Япония.



Рис.27. Titan 11. Япония.

Германия.

На рис.28 - 32 разработки Германии от TUM Walker и семейства средних роботов Lauro до тяжелого колесно-шагающего робота Alduro.

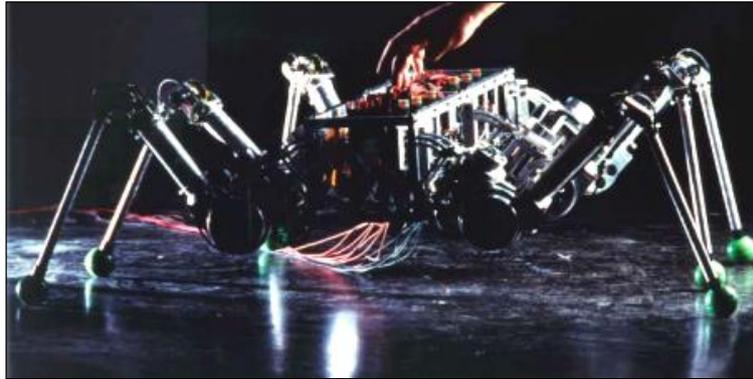


Рис. 28. TUM Walker - Шестиногий робот Технического университета Мюнхена. Германия.

Руководитель разработки профессор F. Pfeiffer.



Рис.29. Lauro 3, Lauro 4. Университет Карлсруэ. Германия.



Рис.30. BISAM. Университет Карлсруэ. Германия.



Рис.31. Katharina. Магдебург. Германия.



Рис.32. 2001-2005 гг. ALDURO. Университет Дуйсбург - Эссен. Германия.
вес машины 1.7 т, мощность бензинового двигателя 40 KW

Испания.

Средние шагающие роботы Silo 4 и Silo 6. Одно из возможных применений – гуманитарное разминирование (Silo 6 показан с миноискателем).

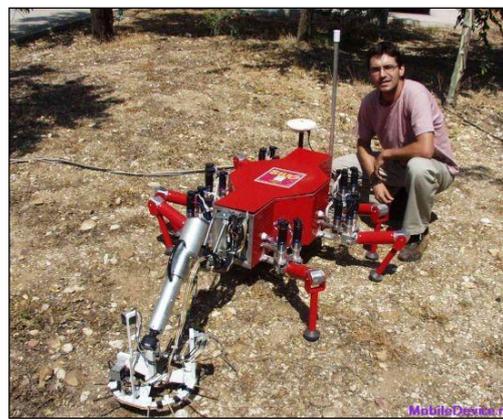


Рис.33. Silo 4 (четырёхногий) и Silo 6 (шестиногий).

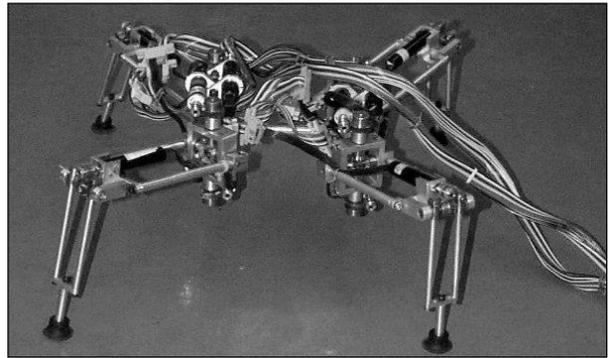
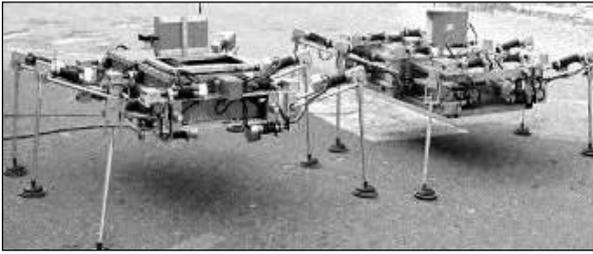
Сингапур – Польша.

Рис.34. 2000 – 2007 гг. Роботы GROVEN, LAVA.
Разработчики профессора G.Seet (Сингапур), T.Zielinska (Польша).



Рис.35. Робот MENTOR. Сингапур - Польша.
Разработчики профессора G.Seet (Сингапур), T.Zielinska (Польша).

Англия.

На рис.36 мини-роботы семейства Melanie (в настоящее время сайт проекта закрыт). На рис.37 модульный аппарат Robug 3, университет Портсмута, и тяжелый аппарат MANTIS (2012 г.).



Рис.36. 2004, 2005 гг. Melanie 2, Melanie 3. 3 кг. Англия.

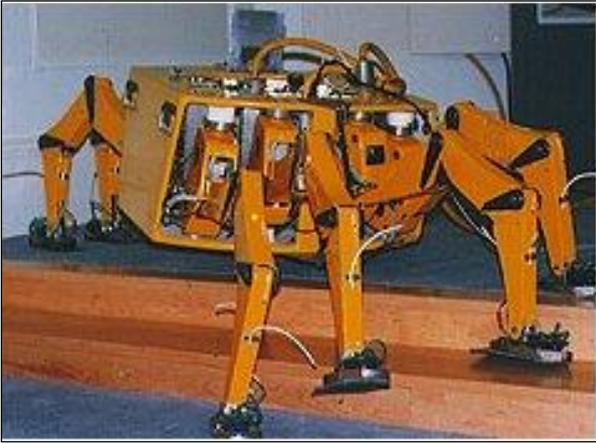


Рис.37. Модульный аппарат Robug. Портсмут. Аппарат MANTIS. Англия

США, современные.

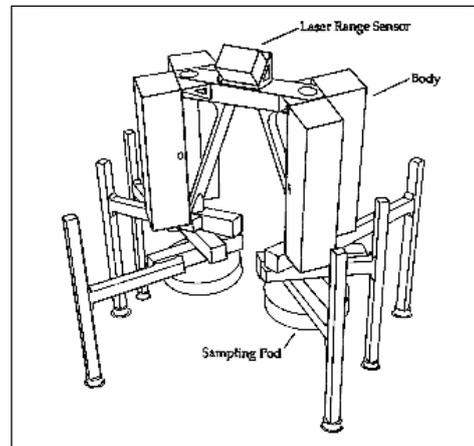


Рис.38. 1989 – 1990. Ambler. Университет Carnegie-Mellon.



Рис.39. 1992 Dante 1, 1994 Dante 2. Университет Carnegie-Mellon.

Наконец, на рис.40 и далее – хорошо известные современные разработки фирмы Boston Dynamics, США, роботы Big Dog, Alpha Dog и другие аппараты.



Рис.40. 2005, 2008 гг. Big Dog. Boston Dynamics. США.



Рис.41. 2011 г. Alpha Dog. Boston Dynamics. США.



Рис.42. 2005-2008 гг. Little Dog. Boston Dynamics. США.



Рис.43. Rhex. Boston Dynamics. США.
аппарат проходит 5 корпусов в 1 сек., имеет 1 привод на ногу

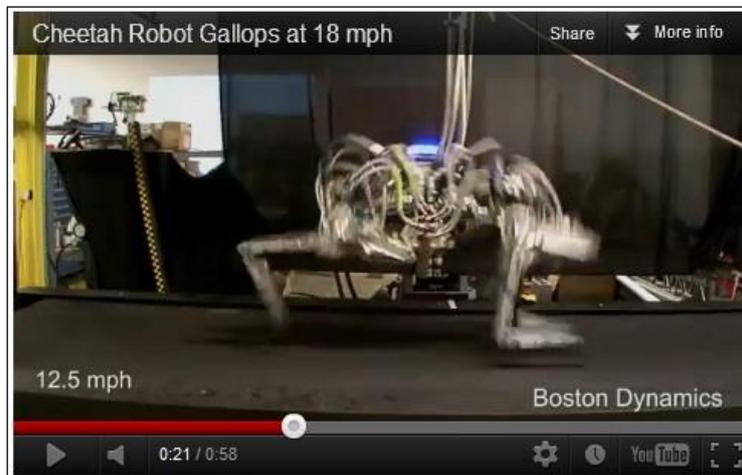


Рис.44. Cheetah. Аппарат достиг скорости 18 миль/час (более 30 км/час).

5.2. Колесно-шагающие роботы

Среди шагающих машин имеются также разработки колесно-шагающих аппаратов. При этом схемы использования колесного шагания разные.

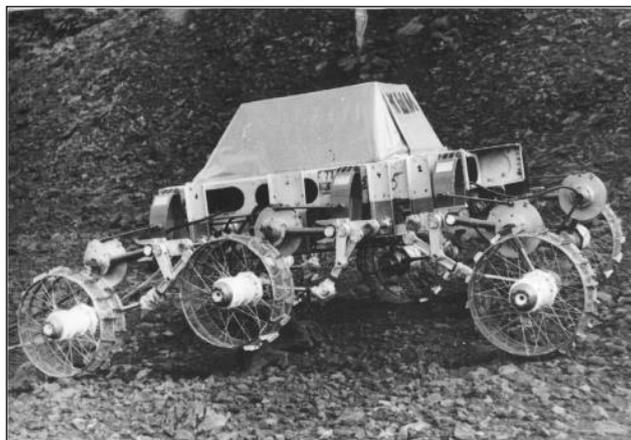


Рис.45. Колесно-шагающий аппарат ВНИИТМ.

На рис.45 показан один из макетов колесно-шагающих аппаратов разработки ВНИИТМ, Ленинград (созданы под руководством д.т.н. М.И.Маленкова) [3]. В этих аппаратах реализована возможность перемещения осей вращения передних, средних и задних колес практически параллельно основной строительной плоскости корпуса. Эта функция могла включаться и отключаться поочередно для разных осей. Она увеличивала проходимость аппарата, в особенности по сыпучим грунтам.



Рис.46. Колесно-шагающий робот ATHLETE. США.

На рис.46 – современная разработка фирмы JPL, Калифорния. США, робот ATHLETE. Этот аппарат имеет ангулярные конечности, а блок, укрепленный в конце ноги, имеет ряд инструментов, которые могут включаться и использоваться по программам от центральной системы управления – колесо, бур, захваты для манипулирования грузом. Этот аппарат разрабатывался как мобильное шасси для марсианского "дома астронавтов" (жилого отсека), как показано на правом рисунке 46.

Помимо указанных имеются разработки в Японии, во Франции в Институте LAAS CNRS, в Италии в Лаборатории Роботики и Мехатроники Университета Кассино (LARM Cassino), в целом ряде коммерческих фирм [4].

5.3. Мини-роботы-гексаподы.

Отдельное направление – мини-гексаподы (мини-шестиноги). Их примеры - на рис.47 – 48. Все показанные роботы построены на сервоприводах.

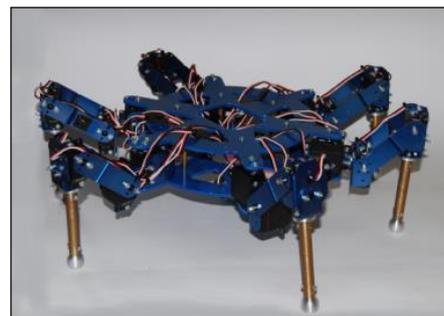
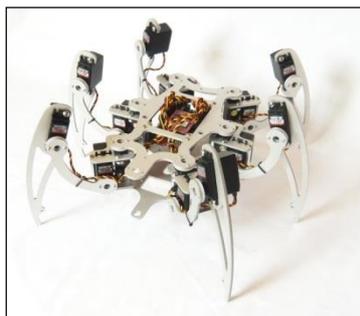
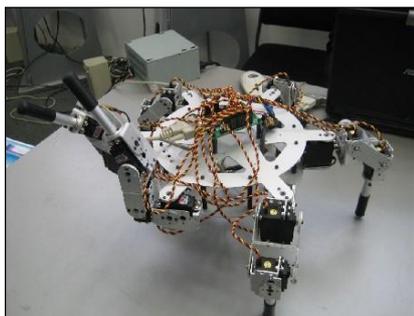


Рис.47. Гексаподы для лабораторных исследований Lynxmotion (США, слева), MSR-H01-01 (Matt Denton, автор аппарата MANTIS, Англия, в центре), HexMINI (ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, справа).

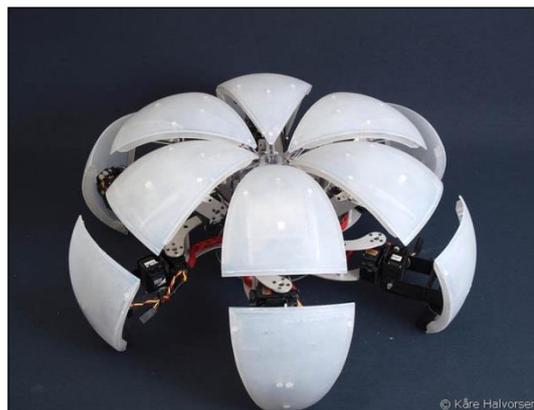
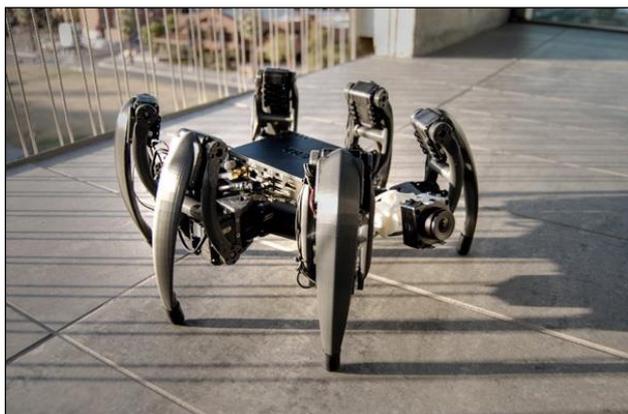


Рис.48. HEXAPOD-SMART (университет Аризоны, США, слева) и трансформер MORPHEX (справа).

Заслуживает внимания робот-трансформер MORPHEX (Kåre Halvorsen, Норвегия), который способен "сворачиваться" в шар и катиться, если поверхность ровная.

5.4. Современные шагающие машины России

Существенно иное направление имеют работы по многоногим шагающим роботам в России в Волгоградском государственном техническом университете (ВолгГТУ, проф. Е.С.Брискин и проф.В.В.Жога). Здесь создаются машины с так называемыми цикловыми механизмами шагания и машины с оригинальными ортогональными приводами движителей. Примером таких разработок может служить шагающая машина "Восьминог", показанная на рис.49. В этой разработке механизмы шагания также построены на идее лямбда-механизмов Чебышева, поэтому цикл шагания фактически создается механическим устройством ноги. Возможно, это несколько ограничивает адаптационные возможности машины, но ее бесспорным преимуществом является значительная простота системы управления и весьма высокая опорная проходимость машины. Машина способна двигаться и работать на очень слабых грунтах, как показывает правый рисунок на рис.49.



Рис.49. Машина "Восьминог" ВолгГТУ. Волгоград.

Еще одно направление работ ВолгГТУ – машины с ортогональными шагающими двигателями



Рис.50. Робот с ортогонально-поворотным двигателем. ВолгГТУ. Волгоград.

На рис.50 показан малый макет восьминогого робота с ортогональными приводами (характерный размер машины – 1 м). Двигатель организован как два субмодуля с четырьмя опорами каждый и для реализации поворота машины эти субмодули могут поворачиваться друг относительно друга. Система управления для этой машины разрабатывается в ИПМ им.М.В.Келдыша РАН.

Как развитие этих исследований в ВолгГТУ выполняется проект по созданию большой шагающей машины общим весом 2 т и грузоподъемностью до 1 т с 4-мя спаренными ортогонально-поворотными двигателями (рис.51, научный руководитель профессор Е.С.Брискин). В настоящее время завершено изготовление машины, начаты интенсивные работы по программированию ее системы управления [8-9].



Рис.51. Шагающая машина "Ортоног". Волгоград. 2011-2013 гг.

6. Этапы создания шагающей машины

Одним из первых этапов в проектировании шагающего робота является выбор конструкции и кинематики ноги и определение числа ног машины. Оптимальное количество ног (и их конструкция) определяются назначением шагающей машины (ШМ) и средой ее применения.

Число ног, равное *шести*, является *оптимальным* с точки зрения наибольшей свободы и скорости передвижения в рамках статической устойчивости.

Четырехногая ШМ обычно имеет меньшие габариты, вес и более простую конструкцию, она также может двигаться в рамках статической устойчивости. Но ее профильная и опорная проходимость меньше, чем у шестиногой, скорость движения также меньше при прочих равных условиях. Справедливости ради отметим, что машины фирмы Boston Dynamics демонстрируют весьма высокую проходимость и устойчивость на сложных грунтах и поверхностях.

Двуногая машина может иметь самые малые размеры, но ее движение возможно только в рамках динамической устойчивости, организация такого движения весьма сложна.

Многоногие машины имеют большую грузоподъемность при заданных ограничениях давления на грунт и размерах стоп.

Говоря о кинематике ноги, укажем основные биологические прототипы. Они показаны на рис. 52. Среди всего разнообразия в живой природе наибольший интерес как основные прототипы представляют конечности насекомых и рептилий (первый рисунок на рис. 52), млекопитающих (средний рисунок), птиц (правый рисунок).



Рис.52. Ноги биологических существ-прототипов.

Важно следующее: приведенный выше обзор показывает, что история и примеры развития шагающих машин таковы, что наибольший интерес у разработчиков вызывала и вызывает первая схема – так называемые инсектоморфные (насекомоподобные) ноги. Этот вариант реализовывался в

подавляющем большинстве конструкций. На рис.53 показана типичная схема и конструкция такой ноги с 5-ю степенями подвижности.

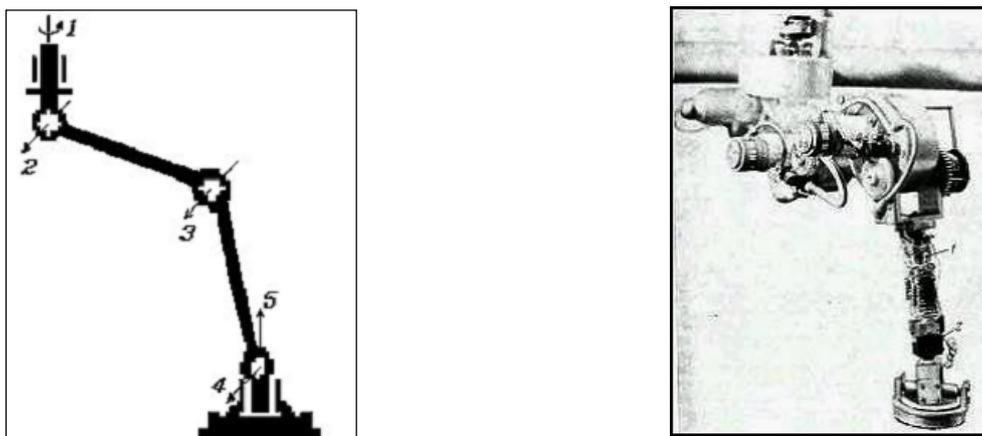


Рис.53. Инсектоморфная конечность. Схема и макет.

После выбора схемы шагающего движителя возникают общие вопросы выбора компоновки, системы управления, сенсорики, программного обеспечения робота. Общая схема этапов проектирования ШМ приведена ниже на рис.54 [6].

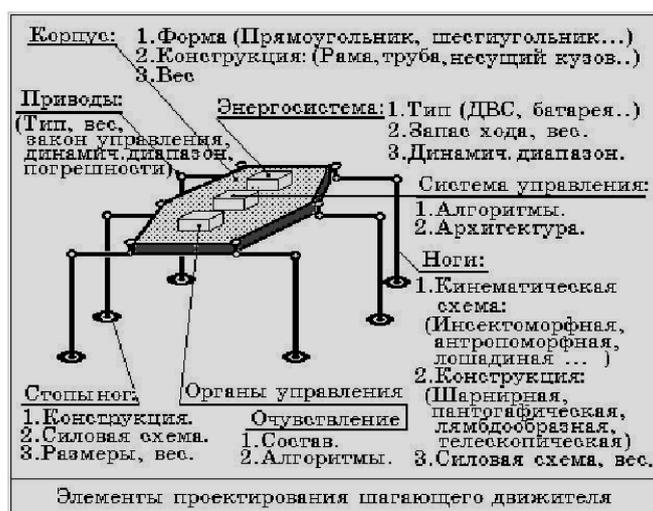


Рис.54. Этапы проекта шагающей машины

Укажем, что одним из центральных этапов является создание программного обеспечения шагающей машины. В связи с весьма значительным числом внутренних и внешних сенсоров на ШМ, ее программное обеспечение должно с очевидностью включать элементы систем искусственного интеллекта.

7. Заключение

В заключение следуя [1-12] сделаем следующее резюме. Шагающий способ представляет основной интерес для движения по заранее неподготовленной местности с препятствиями. Традиционные колесные и гусеничные транспортные машины оставляют за собой непрерывную колею, тратя на это значительно большую энергию, чем в случае передвижения шагами, когда взаимодействие с грунтом происходит только в местах упора стоп ног. Помимо этого шагающий способ передвижения обладает и большей

проходимостью на пересеченной местности вплоть до возможности передвигаться прыжками, преодолевать препятствия и т. п. При шагающем способе меньше разрушается грунт, что, например, важно в тундре. При движении же по достаточно гладким и подготовленным поверхностям этот способ уступает колесному в экономичности, скорости передвижения и простоте управления. Здесь важным решением может быть гибридный колесно-шагающий способ движения.

Говоря о проблемах, решение которых не завершено, укажем следующие. Одной из проблем, которой уделяется существенное внимание при проектировании мобильных шагающих аппаратов, является уменьшение необходимой мощности источников питания и сокращение затрат энергии. Другими словами, необходимо повысить к.п.д. многоногих механизмов, т.е. уменьшить потребляемую мощность и повысить развиваемую мощность. В самом деле, если учесть, что в общем случае каждая из конечностей имеет две-три степени подвижности и управление каждой из степеней сопряжено с определенными затратами энергии, то очевидно, что сравнение шагающих и колесных транспортных средств по к.п.д. будет не в пользу первых. В связи с этим, по-видимому, главная цель, к достижению которой необходимо стремиться сегодня, заключается в создании экспериментальных шагающих аппаратов, способных на практике продемонстрировать сочетание высоких функциональных возможностей с достаточно большой развиваемой мощностью при сниженных затратах энергии.

Потребности в мобильных роботах специального назначения, например в роботах для обслуживания ядерных реакторов, на стройках, или для тушения пожаров и выполнения технических работ на пожарах, будут возрастать. Важным перспективным направлением является создание машин для северных регионов.

Отдельное важнейшее направление – создание новых перспективных планетных роверов. Следует добавить, что, по всей вероятности, эти потребности будут удовлетворяться, прежде всего, за счет шагающих аппаратов с шестью конечностями.

Благодарность

Автор искренне благодарит своих коллег, с которыми были проведены многочисленные исследования шагающих машин и роботов и плодотворные дискуссии по данному предмету: профессора А.К.Платонова, профессора Ю.Ф.Голубева, профессора В.В.Лапшина, профессора Е.И.Кугушева, д.ф.-м.н. Г.К.Боровина, д.ф.-м.н. Ю.М.Лазутина, к.ф.-м.н. В.С.Ярошевского, д.т.н. В.Е.Пряничникова, к.ф.-м.н. А.А.Кирильченко, к.ф.-м.н. Д.В.Шишканова, к.ф.-м.н. А.П.Алисейчика, к.ф.-м.н. И.А.Орлова, а также коллег из других организаций и городов профессора Е.С.Брискина (Волгоград), профессора В.В.Жогу (Волгоград), д.т.н. М.И.Маленкова (Санкт-Петербург), профессора Е.И.Юревича (Санкт-Петербург). Все постановки задач, как теоретических, так и практических, были сделаны академиком Д.Е.Охоцимским, а многие из упомянутых выше коллег, включая автора, - его ученики, продолжающие его дело.

8. Литература

а) Цитированная литература

1. Юревич Е.И. Основы робототехники. Учебник для ВТУЗов. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985. 3-е издание 2010 г. 359 с.
2. Электронный ресурс: [http://en.wikipedia.org/wiki/Walker_\(machine\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Walker_(machine))
3. Электронный ресурс: <http://www.enlight.ru/ib/tech/vtm/vniitm.pdf>
4. Павловский В.Е., Шишканов Д.В. Исследование динамики и синтез управления колесными аппаратами с избыточной подвижностью // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. 2006. № 12. 28 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2006-12>
5. Алисейчик А.П., Павловский В.Е. Методика исследования динамической комфортабельности движения многоколесного мобильного робота // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. 2010. № 84. 27 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2006-12>
6. Платонов А.К. Этапы синтеза шагающей машины. Устное сообщение.
7. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. // М.: Наука, 1984, 312 с.
8. Брискин Е.С., Жога В.В., Чернышев В.В., Малолетов А.В. Основы расчета и проектирования шагающих машин с цикловыми двигателями. М.: ООО ""Изд-во Машиностроение-1", 2006. 164 с.
9. Электронный ресурс: <http://www.sdellanounas.ru/blogs/41484/>
10. Лапшин В.В. Механика и управление движением шагающих машин. // М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2012 г., 200 с.
11. Электронный ресурс: <http://www.clawar.org/> Труды Международных конференций CLAWAR – CLimbing And Walking Robots, 1998 – наст.время.
12. Австралия, архив данных о роботах: <http://cyberneticzoo.com>

б) Избранная библиография - публикации авторов ИПМ АН СССР - ИПМ им.М.В.Келдыша РАН по шагающим роботам (нумерация в разделе собственная).

1. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Боровин Г.К., Карпов И.И. Моделирование на ЦВМ движения шагающего аппарата. // Известия АН СССР, Техническая кибернетика, 1972, №3, с.47-59.
2. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Ярошевский В.С., Павловский В.Е. Алгоритм управления движением шагающего аппарата // Препринты ИПМ АН СССР, 1972, № 63, 73 с.
3. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К. Алгоритмы управления шагающим аппаратом, способным преодолевать препятствия // Известия АН СССР, Техническая кибернетика, 1973, №5, с.3-10.
4. Охоцимский Д.Е., Павловский В.Е. Взаимодействие уровней системы управления движением шагающего аппарата при преодолении препятствий класса "щель". // В сб. Бионика-1973, Тр. IV Всес. конф. по бионике, т. VI. М.: АН СССР, 1973, с.170-175.
5. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Боровин Г.К., Карпов И.И., Кугушев Е.И., Павловский В.Е., Ярошевский В.С. Координация движений шагающего аппарата // В сб. Бионика-1973, Тр. IV Всес. конф. по бионике, т. VI. - М.: АН СССР, 1973, с.176-181.
6. Самсонов В.А., Жихарев Д.Н., Лавровский Э.К., Павловский В.Е. Экспериментальное исследование перемещений насекомых по поверхности. // В сб. Бионика-1973, Тр. IV Всес. конф. по бионике, т. VI. М.: АН СССР, 1973, 3 с.

7. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Лазутин Ю.М., Боровин Г.К., Павловский В.Е. Локомоционная система с элементами искусственного интеллекта. // Тр. II Четаевской конф., Казань, 1973. 0.1 п.л.
8. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Боровин Г.К., Карпов И.И., Павловский В.Е. Управление интегральным локомоционным роботом. // Тр. VI Всес. совещ. по проблемам управления, Москва, 1974. М., 1974. 0.1 п.л.
9. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Боровин Г.К., Карпов И.И., Лазутин Ю.М., Кугушев Е.И., Ярошевский В.С., Павловский В.Е. Управление интегральным локомоционным роботом. // Известия АН СССР, Техническая кибернетика, №6, 1974, с. 56-64 // Тр. VI Симп. ИФАК, Ереван, 1974. 15 с. // Тр. II Ленинградского симп. "Теория адаптивных систем", 1974. 0.1 п.л. // Препринты ИПМ АН СССР, 1974, № 50, 18 с.
10. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Боровин Г.К., Пряничников В.Е., Ярошевский В.С., Кугушев Е.И., Павловский В.Е. Интегральный локомоционный робот - сложная механическая управляемая система. // Тр. Всес. конф. по оптимальному управлению в механических системах, М., 1974. - 0.1 п.л.
11. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Алексеева Л.А. Управление динамической моделью шагающего аппарата. // Препринты ИПМ АН СССР, 1974, № 2. 56 с.
12. Платонов А.К., Карпов И.И. Синтез и моделирование на ЦВМ информационной системы шагающего аппарата // Препринты ИПМ АН СССР, 1974, № 66, 50 с.
13. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Кугушев Е.И., Лазутин Ю.М., Ярошевский В.С. Проблемы построения и моделирования движения управляемого оператором шагающего аппарата // Препринты ИПМ АН СССР, 1974, № 125, 38 с.
14. Кугушев Е.И., Ярошевский В.С. Исследование методов организации походки шагающего аппарата. // В кн. Биомеханика. Труды Рижского научно-исследовательского института травматологии и ортопедии. Вып. XIII, Рига, 1975, с.501-594.
15. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К. Проблемы создания шагающих аппаратов в биомеханике. // В кн. Биомеханика. Труды Рижского научно-исследовательского института травматологии и ортопедии. Вып. XIII. Рига, 1975, с.594-599.
16. Платонов А.К., Павловский В.Е. Система определения положения локомоционного робота в пространстве. // Тр. I Всес. конф. по биомеханике, Рига, 1975. с. 599-604.
17. Барбашова Т.Ф., Боровин Г.К., Павловский В.Е. Моделирование системы управления шагающего аппарата, оснащенного механическим дальномером. // Тр. I Всес. конф. по биомеханике, Рига, 1975. 3 с.
18. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К. Перцептивный робот, перемещающийся в трёхмерной среде. / Труды IV Международной объединённой конференции по искусственному интеллекту (Тбилиси -1975). - М.: ВИНТИ, 1975, т.9, с.117-124.
19. Алексеева Л.А., Голубев Ю.Ф. Модель динамики шагающего аппарата. // Известия АН СССР, Техническая кибернетика. - 1975. - № 3, - с. 72-80.
20. Белецкий В.В. Динамика двуногой ходьбы. I, II // Известия АН СССР, МТТ. - 1975 - № 3, 4. - с. 3-14, 3-13.

21. Белецкий В.В., Кирсанова Т.С. Плоские линейные модели двуногой ходьбы. // Известия АН СССР, МТТ - 1976. - № 4. - с. 51–62.
22. Алексеева Л.А., Голубев Ю.Ф. Адаптивный алгоритм стабилизации движения автоматического шагающего аппарата. // Известия АН СССР, Техническая кибернетика. - 1976. - № 5. - с. 56–64.
23. Барбашова Т.Ф., Боровин Г.К., Павловский В.Е., Ленский А.В., Жихарев Д.Н., Штильман Л.Г. Макетирование и моделирование шагающего аппарата. // Тр. VI Всес. симп. по теории и принципам устройства роботов и манипуляторов, Тольятти, 1976, т. II. 3 с.
24. Платонов А.К., Боровин Г.К., Павловский В.Е., Глухов В.И., Плотников А.М. Моделирование работы системы приводов шагающего аппарата. // Тр. VI Всес. симп. по теории и принципам устройства роботов и манипуляторов, Тольятти, 1976, т. II. с. 26-28.
25. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Кугушев Е.И., Ярошевский В.С. Система построения движений шагающего аппарата "Модель ТЗ" // Препринты ИПМ АН СССР, 1977, № 7.
26. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Барбашова Т.Ф., Боровин Г.К., Павловский В.Е. Алгоритмы управления и моделирования шагающего аппарата с механическим дальномером // Препринты ИПМ АН СССР, 1978, № 56, 55 с.
27. Кугушев Е.И., Ярошевский В.С., Павловский В.Е. Проблемы реализации походок шагающего аппарата. // В кн.: Динамика управляемых систем, Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1979, с.175-182.
28. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Кугушев Е.И., Ярошевский В.С., Павловский В.Е. Мини-ЭВМ в контуре управления шагающим аппаратом. // В кн.: Динамика управляемых систем, Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1979, с.209-216.
29. Голубев Ю.Ф., Пряничников В.Е., Павловский В.Е. Динамика шагающего робота, управляемого оператором. // В кн.: Исследование робототехнических систем. М.: Наука, 1982, с.78-86.
30. Охоцимский Д.Е., Ефимов В.А., Кудрявцев М.В., Лапшин В.В., Платонов А.К., Ярошевский В.С. Математическое моделирование динамики движения электромеханического шагающего аппарата // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, 1982, № 96, 28 с.
31. Охоцимский Д.Е., Павловский В.Е., Голубев Ю.Ф., Платонов А.К. Синтез движения шагающего робота при преодолении изолированных препятствий. // Информационные и управляющие системы роботов. Сборник научных трудов. М.: ИПМ - МГУ, 1982 - с. 186-200.
32. Охоцимский Д.Е., Веселов В.А., Гурфинкель В.С., Девянин Е.А., Платонов А.К. Разработка алгоритмов и средств управления движением шагающих роботов. // В кн. Управление робототехническими системами и их очувствление. - М.: Наука, 1983, с.110-116.
33. Белецкий В.В. Двуногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. // М.: Наука, 1984. - 288 с.
34. Лапшин В.В. Управление движением четырехногого аппарата // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, 1984, № 83.
35. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К. Математическое моделирование динамики движения шагающего аппарата // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР 1984, № 96, 28 с.

36. Лапшин В.В. Управление движением четырехногого аппарата, перемещающегося рысью, иноходью и галопом // Известия АН СССР, МТТ. №5 – 1985 – с.28-34.
37. Лапшин В.В., Охоцимский Д.Е., Платонов А.К. Об одном способе рекуперации энергии при движении шагающего аппарата. // Известия АН СССР, МТТ. № 5, 1986 - с.67-71.
38. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Кирильченко А.А., Лапшин В.В. Шагающие машины. // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, 1989, 36 с.
39. Богомоллов Н.Е., Лазутин Ю.М., Старостин Е.Л., Ярошевский В.С. Программное обеспечение многомашинной системы управления шагающим роботом. // В сб. Механика и управление движением шагающих машин. Волгоград, ВПИ, 1990.
40. Кирильченко А.А. Обоснование алгоритмов выбора пути в условиях неопределенности // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1991, № 108, - 25 с.
41. Лапшин В.В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата. // Известия РАН, МТТ. № 1, 1993 - с. 65-74.
42. Медведь В.В., Платонов А.К. Система для сравнения кинематических и динамических характеристик двух конструкций ноги шестиногого шагающего робота. // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, 1995, № 12.
43. Боровин Г.К., Буданов В.М., Девянин Е.А., Лапшин В.В., Мирный В.М., Охоцимский Д.Е., Платонов А.К. Основные проблемы и особенности проектирования многоцелевого гидравлического шагающего шасси // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, 1995, № 72.
44. Боровин Г.К. Математическое моделирование гидравлической системы управления шагающей машины. Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, 1995, №106, 28 с.
45. Охоцимский Д.Е., Девянин Е.А., Платонов А.К. и др. Опыт проектирования многоцелевого гидравлического шагающего шасси. // Механика и управление движением шагающих машин. - Волгоград, 1995. №2. - с.103-111.
46. Девянин Е.А., Платонов А.К. Разработка комплекса средств шагающего робота // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, 1996, № 39.
47. Голубев Ю. Ф. , Погорелов Д. Ю. Компьютерное моделирование шагающих роботов. // Фундамент. и прикл. матем., 4:2 (1998), 525–534.
48. D.E.Okhotsimsky, A.K.Platonov, V.E.Pavlovsky, A.V.Lensky, A.A. Kiril'chenko, V.S.Yaroshevsky. Concept, Design and Control of Six-Legged Walking Robot. // Proc.of 1-st Int. Symp. on Climbing and Walking Robots CLAWAR'98. Brussels, Belgium, Nov. 26-28,1998. 6 p.
49. D.E.Okhotsimsky, A.K.Platonov, A.V.Lensky, V.E.Pavlovsky, P.Blazevic, A.Iles. Development of Multi-Legged Walking Robot with Articulated Body. Proc.of 2-nd Int. Symp. on Climbing and Walking Robots CLAWAR'99. Portsmouth, UK, September, 13-15, 1999, pp.205-212.
50. A.K.Platonov, V.E.Pavlovsky. Cross-Country Capabilities of a Walking Robot: Geometrical, Kinematic and Dynamic Investigation. // Proc. of the XIII CISM-IFTOMM Int. Symp. RoManSy'2000, Zakopane, Poland, 1-7.07.2000, CISM Courses and Lectures No.422, Springer-Verlag, pp.131-138.
51. D.E.Okhotsimsky, A.K.Platonov, V.E.Pavlovsky, A.Yu.Serov, A.I.Mishkin. Study of Neural Control Algorithms for Walking Machine: Localisation and Leg Motion Control. // Proc.of 3-rd Int. Conf. on Climbing and Walking Robots CLAWAR'2000.

- Madrid, Spain, 2-4.10.2000, pp.355-362.
52. D.E.Okhotsimsky, V.E.Pavlovsky, L.de S. Martins- Filho. Proprioceptive localization and attitude estimation for legged robots - comparing two methods. // Proc.of 4-th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots CLAWAR'2001. Karlsruhe, Germany, 24-26.09.2001, pp.719-725.
 53. V.E.Pavlovsky, D.V.Shishkanov, A.D.Alexeev, S.V.Amelin, Yu.N.Podoykin. Concept and Modeling of Legged-Wheeled Modular Chassis for Climbing and High-Adaptive Rover. // Proc.of 5-th Int. Conf. on Walking Robots CLAWAR'2002. Paris, France, 25-27.09.2002, pp.307-314.
 54. Павловский В.Е., Платонов А.К., Серов А.Ю. Проприоцептивная навигация в системе управления шагающего робота. // Интеллектуальные многопроцессорные системы. Тр. Международной конференции. Таганрог -- Донецк, 2002. - с. 249-252.
 55. Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Построение движений инсектоморфного робота, преодолевающего комбинацию препятствий с помощью сил кулоновского трения. // Известия РАН, Теория и системы управления № 3, 2005. С. 143-155.
 56. Павловский В.Е., Панченко А.В. Модели и алгоритм управления движением малого шестиногого робота. // Мехатроника. Автоматизация. Управление. ISSN 1684-6427. №11, 2012 г. с.23-28.
 57. Брискин Е.С., Павловский В.Е., Шурыгин В.А., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Серов В.А. Проблемы разработки шагающих машин. // Тр. Конференции "Экстремальная робототехника – 2012". Санкт-Петербург, 25-26.09.2012, ЦНИИ РТК. СПб.: Изд-во ЦНИИ РТК, 2012, . CD. с.43-50.
 58. Yu.F.Golubev, V.V.Korianov, V.E.Pavlovsky, A.V.Panchenko. Maneuvering Six-Legged Robot: Model and Prototype. // Тр. III-го российско-тайваньского Симпозиума "Современные проблемы интеллектуальной мехатроники, механики и управления". 7-11.11.2012, МГУ. / Под ред. Ю.М.Окунева. – М.: Изд-во МГУ, 2012. CD. с.69-81.
 59. Павловский В.Е. Нейросетевая система проприоцептивной локализации для шестиногого шагающего робота. // Тр. VII-ой Международной научно-практической конференции "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". 20-22.05.2013, Россия, Коломна, т.2, секция 6 "Интеллектуальные роботы" с.785-792.
 60. Алисейчик А.П., Орлов И.А., Павловский В.Е. Колесно-шагающий робот с пневматическим приводом. // Тр. Международной конференции "Экстремальная робототехника – 2013" (ЭР-2013) / Proc. 7th International Workshop IARP RISE –ER'2013, С.-Петербург, 2-3.10. 2013, СПб: Изд. ЦНИИ РТК. с. 107-111.
A.P.Aliseichik, I.A.Orlov, V.E.Pavlovsky. Wheel-walking robot with pneumatic drives. // Тр. Международной конференции "Экстремальная робототехника – 2013" (ЭР-2013) / Proc. 7th International Workshop IARP RISE –ER'2013, С.-Петербург, 2-3.10. 2013, СПб: Изд. ЦНИИ РТК. p. 111-115 (*in english*).
 61. Yury F. Golubev, Victor V. Korianov, Vladimir E. Pavlovsky, Alexey V. Panchenko. Motion control for the 6-legged robot in extreme conditions. // Proc. of the 16th Int. Conf. CLAWAR-2013. 14-17 July 2013, Sydney, Australia. pp.427-434.
 62. V.E.Pavlovsky. Biologically inspired neural-network navigation systems for walking robots. // Abstracts of the Int. Conf. "Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA-2013)". 13-15.09.2013. Киев, Украина.