

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДРЕВОВИДНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ШЕСТИНОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

Е.Е. Акылбеков

e10bmstu@rambler.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрены существующие модели шестиногих шагающих роботов и кинематическая схема исполнительного механизма таких роботов, параметры Денавита—Хартенберга, матрицы достижимости. Установлено, что проблемы обеспечения статической устойчивости движущихся шестиногих аппаратов решаются просто относительно других конструкций

### Ключевые слова

Шестиногие шагающие роботы, синтез кинематической структуры, модифицированные системы координат Денавита—Хартенберга, матрица достижимости

Поступила в редакцию 28.11.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

---

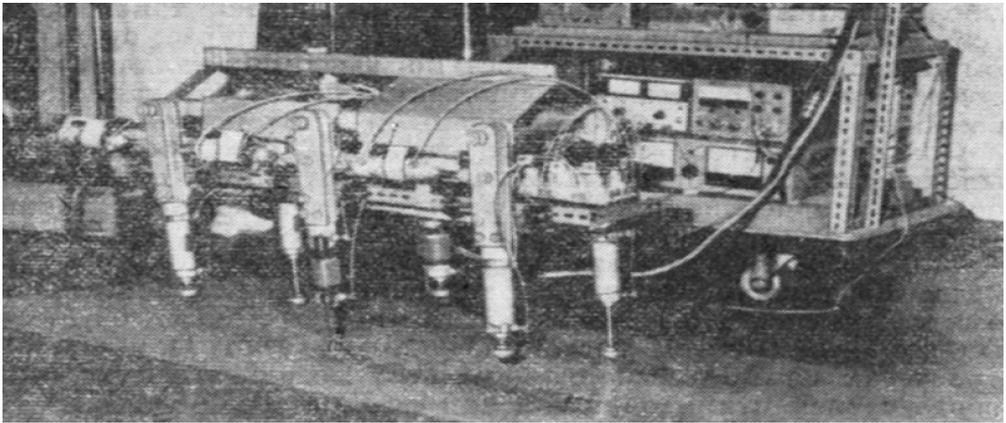
**Введение.** Шестиногие шагающие роботы являются одной из самых многочисленных категорий механизмов, способных перемещаться с помощью искусственных ног. Шагающие роботы представляют собой класс роботов, имитирующих движения животных или насекомых. Как правило, для передвижения они используют механические ноги. Интересен тот факт, что передвижение с помощью ног насчитывает миллионы лет истории. А вот, например, история передвижения с помощью колеса началась всего около 7–10 тыс. лет назад. Колесное передвижение достаточно эффективно, но требует наличия относительно ровных дорог.

Шагающие машины являются сложными механическими системами с большим количеством управляемых степеней свободы. Каждая нога должна иметь минимум три привода, чтобы обеспечить возможность поместить стопу в произвольную точку в трехмерном пространстве в пределах некоторой рабочей зоны, определяемой конструкцией ноги. Таким образом, шестиногая шагающая машина должна иметь 18 приводов — степеней свободы. Исходя из этого, при проектировании многозвенных механизмов и систем управления большое значение имеют натурные макеты и модели, особенно в учебной среде, где применяют недорогие универсальные технологии создания подобного рода моделей и устройств. Наличие шести конечностей обеспечивает высокую устойчивость и грузоподъемность. Такие машины могут служить, к примеру, санитарями леса, вырубая сухие деревья и снижая риск возникновения лесных пожаров [1, 2].

Шагающие роботы могут быть дву-, четырех-, шести- и многоногими. В зависимости от назначения и решаемого класса задач, выделяют производственные и исследовательские шагающие роботы.

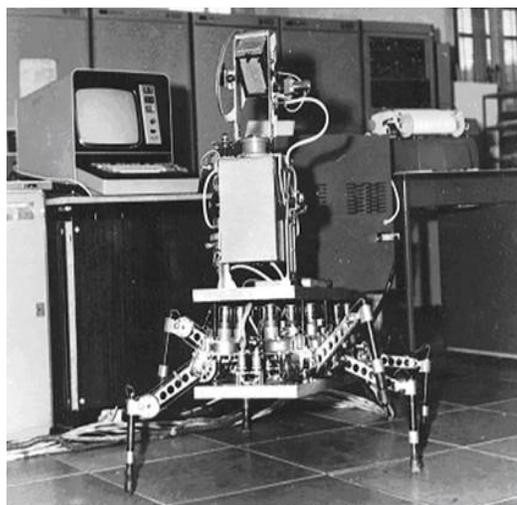
Производственные роботы предназначены для выполнения тяжелой, монотонной, вредной и опасной физической работы. Для таких роботов характерно наличие автоматических исполнительных устройств (манипуляторов, имитирующие движения рук человека, самоходные тележки с различными типами шасси и т. п.) [3]. Среди производственных роботов выделяют промышленные, строительные, сельскохозяйственные, транспортные, бытовые, боевые.

Общий вид мобильного робота с шестью конечностями, созданного под руководством д-ра Икэда и д-ра Носаки, представлен на рис. 1. Каждая из конечностей управляется от одного пневматического привода. Экспериментальные исследования этого привода показали, что в тех случаях, когда между «подшвами» робота и полом наблюдается проскальзывание, избежать его и обеспечить плавность перемещения корпуса удастся только с помощью специальных алгоритмов управления приводами конечностей.

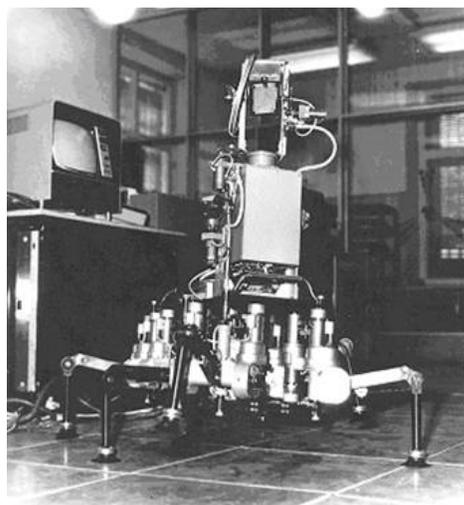


**Рис. 1.** Мобильный робот с шестью конечностями

На рис. 2 изображены макеты шестиногих шагающих машин, созданные в Институте прикладной математики (ИПМ) им. М.В. Келдыша АН СССР (в наст. время — ИПМ им. М.В. Келдыша РАН). На рис. 2, а представлен образец, разработанный совместно с Ленинградским механическим институтом (в наст. время — Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова), на рис. 2, б — образец, созданный несколько позднее при сотрудничестве с ВНИИТрансмаш (Санкт-Петербург). Отметим, что эти аппараты имели так называемые инсектоморфные ноги, каждая из которых — три степени подвижности (три степени свободы). На рисунке оба аппарата представлены с оснащением лазерным дальномерным устройством — лазерным измерителем расстояний (ЛИР). С помощью ЛИР роботы изучают поверхность передвижения, затем управляющая ими мини-ЭВМ принимает решение о движении. Наличие шести ног позволяет решить принципиальную задачу устойчивости движения робота. Он мог передвигаться статически устойчивой походкой, если в каждый момент времени в опоре находилось не менее трех ног. Это обстоятельство определило интерес к многоногим машинам. Позднее на базе этих разработок в ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР



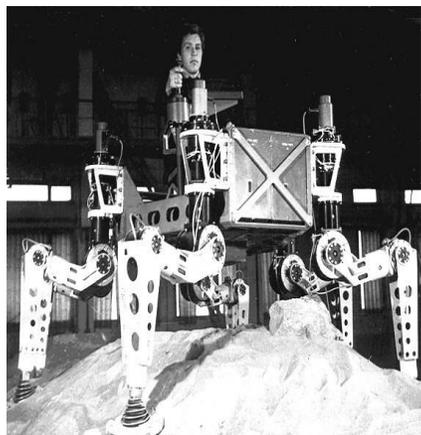
*а*



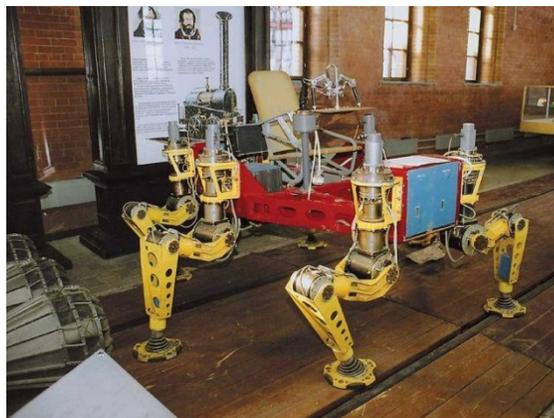
*б*

**Рис. 2.** Шагающие роботы. ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР. 1970-е годы

совместно с ВНИИТрансмаш в 1975 г. был создан большой натурный макет шестиногой машины (рис. 3), способной передвигаться вместе с оператором. Масса машин — 750 кг, скорость движения — 0,7 км/ч, грузоподъемность — 50 кг, дорожный просвет — 1,5 м [4].



*а*



*б*

**Рис. 3.** Натурный макет шестинового шагающего аппарата:  
с человеком на борту (*а*) и без человека (*б*)

Исследования в данной области продолжаются в настоящее время. На рис. 4 представлены современные модифицированные роботы, созданные в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН на базе двух предыдущих. На роботе установлена оригинальная микропроцессорная система управления, построенная как бортовая компьютерная управляющая сеть. Роботы оснащены необходимым набором сенсоров [5].



**Рис. 4.** Шагающие роботы: современные модификации.  
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2009 г.

На рис. 5 представлена концепт-машина, разработанная фирмой Plustech Oy Ltd (Финляндия). Машина предназначена для работы на лесоразработках, в условиях труднопроходимой местности, где не проходит тяжелая колесная и гусеничная техника[6].



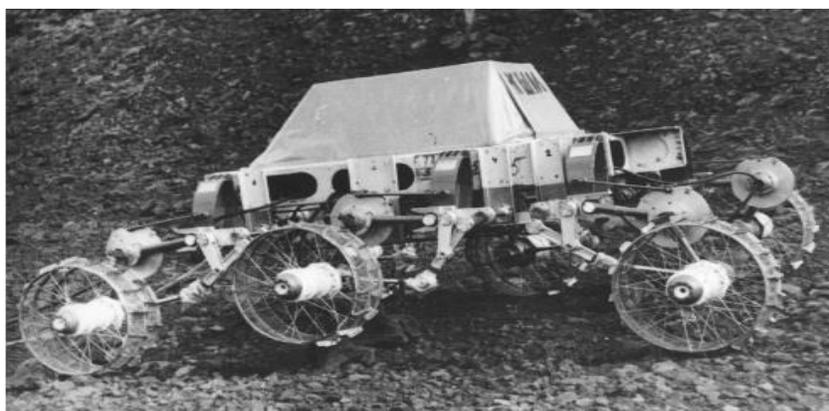
**Рис. 5.** Концепт-машина фирмы Plustech Oy Ltd (Финляндия)

Ниже, на рис. 6, изображена одна из самых удачных конструкций небольших шестиногих роботов — Rhex (США). Ее ноги не имеют суставов и представляют собой дугообразные пружины, которые вращаются вокруг своей оси так, что подвижность робота обеспечивают всего шесть актуаторов. Rhex умеет бегать со скоростью до 2,7 м/с, длина его тела составляет около 0,5 м, преодолевает почти 4 км по сильно пересеченной местности на одном заряде аккумуляторов, взбирается на горку с уклоном в 45 град, плавает и поднимается по ступенькам. Одно из последних достижений Rhex — прыжки. Аппарат проходит пять корпусов за секунду, имеет один привод на ногу [7].



**Рис. 6.** Rhex. Boston Dynamics (США)

На рис. 7 представлен один из макетов колесно-шагающего аппарата, разработанный во ВНИИТрансмаш под руководством д-ра техн. наук М.И. Маленкова. В таких аппаратах реализована возможность перемещения осей вращения передних, средних и задних колес практически параллельно основной строительной плоскости корпуса. Эту функцию можно включать и отключать поочередно для разных осей, что увеличивает проходимость аппарата, в особенности по сыпучим грунтам [8].



**Рис. 7.** Колесно-шагающий аппарат. ВНИИТрансмаш

Робот Athlete изображен на рис. 8. Он разработан фирмой JPL (Калифорния, США). Этот аппарат имеет ангулярные конечности, блок, закрепленный на ноге, оснащен инструментами (колесом, буром, захватами для манипулирования грузом), которые можно включить и использовать с помощью центральной системы управления. Этот аппарат разрабатывался как мобильное шасси для марсианского «дома астронавтов» (жилого отсека). Также заслуживает внимания разработка норвежской фирмы Kare Halvorsen — робот-трансформер Morphex, который способен «сворачиваться» в шар и катиться по ровной поверхности (рис. 9, б), и разработка американских ученых (Университет штата Аризона) — робот-трансформер Hexapod-Smart (рис. 9, а) [9].



Рис. 8. Колесно-шагающий робот Athlete (США) без отсека (а) и с жилым отсеком (б)

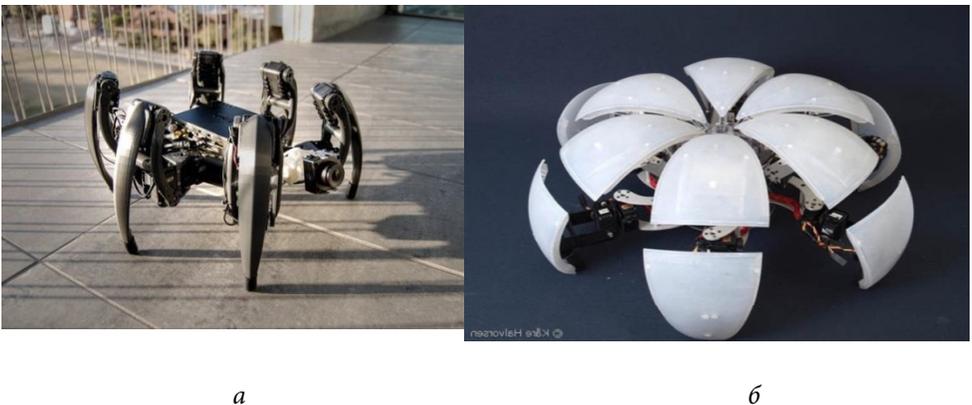


Рис. 9. Роботы-трансформеры: Hexapod-Smart, США (а) и Morphex, Норвегия (б)

Еще одна примечательная машина — шестиногий шагающий робот Mantis. Разработка MattDenton (рис. 10) [10]. Общий вес робота составляет 1900 кг, средняя скорость передвижения — 1 км/ч, величина полезной нагрузки — 120 кг. При этом он имеет внушительные габариты — 4,2×4,2×2,2 м и способен к движению благодаря турбо-дизельным двигателям Perkins (объемом 2,2 л). Для удобства управления разработано несколько сенсоров — клинометров, датчиков силы и поворота. Мощность конечностей обусловлена наличием 18 гидравлических приводов. Робот способен не просто преодолевать препятствия, но и убирать их со своего пути. Машина может удерживать равновесие, стоя на пяти конечностях, пока шестая отодвигает препятствие. Система управления позволяет управлять каждой ногой независимо. В настоящее время Mantis — единственная пилотируемая шестиногая машина с кабиной закрытого типа.

Представленный обзор существующих моделей шестиногих шагающих роботов подтверждает эффективность передвижения этих аппаратов по неподготовленной земной поверхности. Отсутствие единой методологии проектирова-

ния и исследований является одной из основных проблем, сдерживающих развитие данного вида транспортных робототехнических средств.



Рис. 10. Пилотируемая шестиногая машина с кабиной закрытого типа — робот Mantis

В Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана проводятся научные исследования, направленные на создание шестиногих шагающих роботов. При этом одной из первоочередных задач является проектирование исполнительных механизмов роботов с электрогидравлическим следящим приводом. На рис. 11 представлена кинематическая схема древовидного исполнительного механизма шестиногого шагающего робота. Каждая конечность обладает тремя степенями подвижности. В соответствии с правилами построения модифицированной системы координат Денавита—Хартенберга, получены численные значения параметров кинематической схемы для основных и вспомогательных систем координат, которые представлены в табл. 1 и 2 [11–14].

Определим параметры Денавита—Хартенберга для всех систем координат механизма. Параметр  $d_i$  равен расстоянию от начала  $(i-1)$ -й системы координат до точки пересечения оси  $Z_{i-1}$  с осью  $x_i$ , измеряемому в направлении оси  $Z_{i-1}$ . Если сочленение поступательное, то  $d_i$  совпадает с обобщенной координатой. Параметр  $a_i$  равен расстоянию от точки пересечения оси  $Z_{i-1}$  с осью  $x_i$  до начала  $i$ -й системы координат, измеряемому в направлении оси  $x_i$ . Параметр  $a_i$  является конструктивной постоянной механизма (зависит от геометрии конструкции).  $\theta_i$  представляет собой угол, на который необходимо повернуть ось  $x_{i-1}$  вокруг оси  $Z_{i-1}$  в положительном направлении до совмещения с осью  $x_i$ . Если сочленение вращательное, то параметр  $\theta_i$  совпадает с обобщенной координатой. Параметр  $\alpha_i$  представляет собой угол, на который необходимо повернуть ось  $Z_{i-1}$  вокруг оси  $x_i$  в положительном направлении до совмещения с

осью  $Z_i, f(i)$  — номер звена, являющегося предыдущим (вершиной-отцом) для звена  $i$ ,  $ns(i)$  определяет, каким по счету следующим из числа непосредственно присоединенных (звеном-сыном) является звено  $i$ .

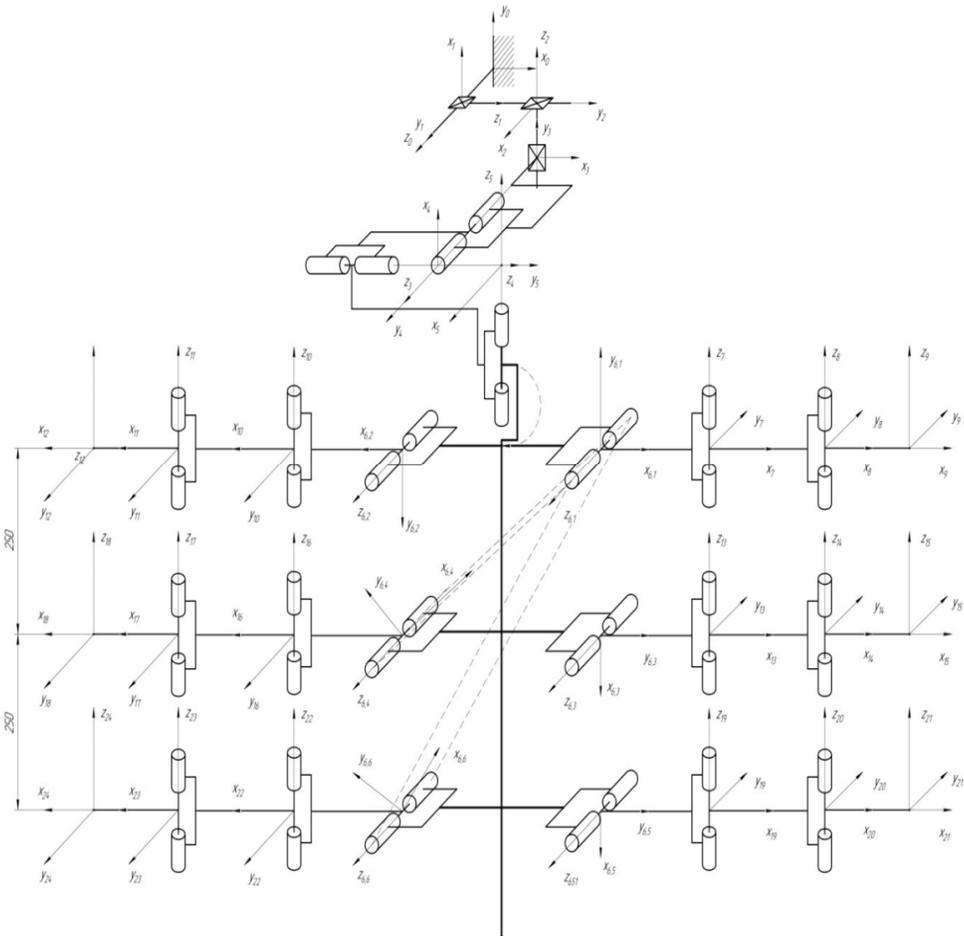


Рис.11. Кинематическая схема робота с системами координат Денавита—Хартенберга

Таблица 1

**Значения параметров Денавита—Хартенберга основных систем координат исполнительного механизма шестиногго шагающего робота**

№ системы координат	$\theta_i$ , рад	$d_i$ , м	$a_i$ , м	$\alpha_i$ , рад	$f(i)$	$ns(i)$
1	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$	0	1
2	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$	1	1
3	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$	2	1
4	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$	3	1
5	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$	4	1

№ системы координат	$\theta_i$ , рад	$d_i$ , м	$a_i$ , м	$\alpha_i$ , рад	$f(i)$	$ns(i)$
6	$\pi/2$	0	0,400	$\pi/2$	5	1
7	0	0	0	$-\pi/2$	6	1
8	0	0	0,600	0	7	1
9	0	0	1,100	0	8	1
10	0	0	0	$\pi/2$	6	2
11	0	0	0,600	0	10	1
12	0	0	1,100	0	11	1
13	$\pi/2$	0	0	$-\pi/2$	6	3
14	0	0	0,600	0	13	1
15	0	0	1,100	0	14	1
16	$(\pi/2-0,46)$	0	0	$\pi/2$	6	4
17	0	0	0,600	0	16	1
18	0	0	1,100	0	17	1
19	$\pi/2$	0	0	$-\pi/2$	6	5
20	0	0	0,600	0	19	1
21	0	0	1,100	0	20	1
22	$(\pi/2-0,78)$	0	0	$\pi/2$	6	6
23	0	0	0,600	0	22	1
24	0	0	1,100	0	23	1

Таблица 2

**Значения параметров Денавита—Хартенберга вспомогательных систем координат исполнительного механизма шестиногого шагающего робота**

№ системы координат	$\theta_i$ , рад	$d_i$ , м	$a_i$ , м	$\alpha_i$ , рад	$f(i)$	$ns(i)$
6,2	$\pi$	0	0,800	0	6	2
6,3	$-\pi/2$	0	0,400	0	6	3
6,4	0,46	0	-0,894	0	6	4
6,5	$-\pi/2$	0	0,800	0	6	5
6,6	0,78	0	-1,131	0	6	6

На рис. 12 изображен древовидный граф, представляющий кинематическую структуру исполнительного механизма робота.

Матрица достижимости для исполнительного механизма шестиногого шагающего робота, где каждый элемент  $d_{ij} = 1$ , если звено  $i$  достижимо из звена  $j$ , и  $d_{ij} = 0$ , если звено  $i$  не достижимо из звена  $j$ . Древовидная кинематическая структура также может быть описана с помощью матрицы достижимости  $D$ , определяющей порядок следования звеньев исполнительного механизма друг относительно друга. Общий вид матрицы  $D(24 \times 24)$  представлен в табл. 3.

Таблица 3

Матрица достижимости  $D$  (24×24)

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Вектор  $\vec{Z}$ , определяющий последовательность ортов осей  $Z$ , соответствующих сочленениям, соединяющим звенья исполнительного механизма робота с четырьмя звеньями-отцами, имеет следующий вид:

$$\vec{Z} = ({}^0Z_1, {}^0Z_2, {}^0Z_3, {}^0Z_4, {}^0Z_5, {}^0Z_6, {}^0Z_7, {}^0Z_8, {}^0Z_9, {}^0Z_{10}, {}^0Z_{11}, {}^0Z_{12}, {}^0Z_{13}, {}^0Z_{14}, {}^0Z_{15}, {}^0Z_{16}, {}^0Z_{17}, {}^0Z_{18}, {}^0Z_{19}, {}^0Z_{20}, {}^0Z_{21}, {}^0Z_{22}, {}^0Z_{23}, {}^0Z_{24})$$

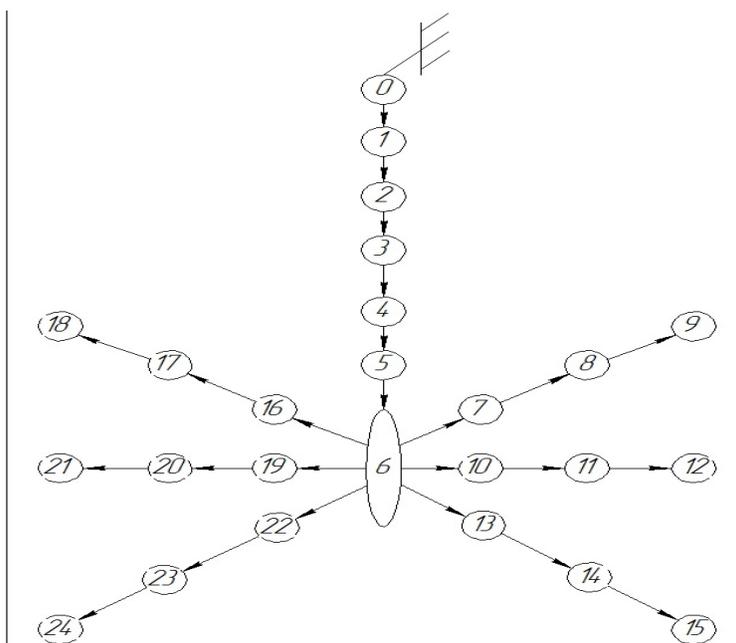


Рис.12. Древовидный граф достижимости звеньев кинематической структуры робота

Таким образом, определены все параметры, характеризующие древовидную кинематическую структуру исполнительного механизма шестиногого шагающего робота.

**Выводы.** Шестиногие шагающие роботы являются эффективным средством передвижения по неподготовленной земной поверхности. Предложенная кинематическая схема исполнительного механизма шагающего робота и вычисления параметров, характеризующих ее структуру, являются основой для проектирования его конструкции.

## Литература

1. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 624 с.
2. Шагающие роботы // Робототехника: Библиотека о робототехнике и кибернетике. URL: <http://roboticslib.ru/books/item/f00/s00/z0000016/st027.shtml> (дата обращения: 23.09.2016).
3. Голубев Ю.Ф., Охоцимский Д.Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. 312 с.
4. Morphing DIY robot looks like a Portal 'bot for real // Slash Gear: веб-сайт. URL: <http://www.slashgear.com/morphing-diy-robot-looks-like-a-portal-bot-for-real-18325731> (дата обращения: 24.09.2016).
5. Фокин В.Г., Шаныгин С.В. Обзор и перспективы развития мобильных шагающих робототехнических систем // Молодой ученый. 2015. № 18. С. 207–215. URL: <http://moluch.ru/archive/98/22115/>
6. Walking tractor timberjack by John Deere // The old robots: веб-сайт. URL: <http://www.theoldrobots.com/Walking-Robot2.html> (дата обращения: 23.09.2016).

7. *Rhex* — devours rough terrain // Boston Dynamics: веб-сайт компании.  
URL: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_rhex.html](http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html) (дата обращения: 24.09.2016).
8. *Шагающие* роботы // Telenir.net: Библиотека гуманитарной и технической литературы.  
[http://www.telenir.net/tehnicheskie\\_nauki/sozdaem\\_robota\\_androida\\_svoimi\\_rukami/p13.php](http://www.telenir.net/tehnicheskie_nauki/sozdaem_robota_androida_svoimi_rukami/p13.php)  
(дата обращения: 25.09.2016).
9. *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> (дата обращения: 25.09.2016).
10. *Mantis* шестиногий автомобиль // Земля — Хроники жизни: веб-сайт.  
URL: <http://yo-robot.ru/mantis-shestinogiy-avtomobily.html> (дата обращения: 25.09.2016).
11. *Denavit J., Hartenberg R.S.* Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices // J. Appl. Mech. 1955. No. 6. P. 215–221.
12. *Ковальчук А.К.* Модифицированная система координат Денавита—Хартенберга для исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11.  
URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/826673.html> DOI: 10.7463/1115.0826673
13. *Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В., Верейкин А.А., Кулаков Б.Б., Каргинов Л.А.* Метод проектирования пространственных древовидных исполнительных механизмов шагающих роботов // Инженерный вестник. Электрон. журн. 2014. № 7.  
URL: <http://engsi.ru/doc/736600.html>
14. *Каргинов Л.А.* Пример синтеза управляющих воздействий для шестиногого шагающего робота при передвижении по неровной поверхности // Молодежный научно-технический вестник. 2014. № 9. Электрон. журн. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/731009.html>

**Акылбеков Ербол Ергалиевич** — магистрант кафедры «Гидромеханика гидромашины и гидропневмоавтоматика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — А.К. Ковальчук, канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидромеханика гидромашины и гидропневмоавтоматика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

## KINEMATIC SCHEME DESIGNING OF HEXAPOD WALKING ROBOT TREE ACTUATOR

E.E. Akylbekov

e10bmstu@rambler.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

### Abstract

*The article focuses on the existing hexapod walking robots and kinematic scheme of their actuator. We examine Denavit—Hartenberg parameters and reachability matrix. The popularity of such robots is largely due to the fact that the problem of static stability of moving hexapod machines is solved simply compared to other structures*

### Keywords

*Hexapod walking robots, synthesis of kinematic structure, modified Denavit—Hartenberg coordinate system, reachability matrix*

© Bauman Moscow State Technical University, 2016

### References

- [1] Fu K.S., Gonzales R. C. Lee C.S.G. Robotics: control, sensing vision and intelligence. McGraw Hill Co. 1987. (Russ. ed.: Moscow, Mir Publ., 1989, 624 p.)
- [2] Shagayushchie roboty [Walking robots]. *Robototekhnika: Robotics and cybernetics library*. URL: <http://roboticslib.ru/books/item/f00/s00/z0000016/st027.shtml> (accessed 23.09.2016) (in Russ).
- [3] Golubev Yu.F., Okhotsimskiy D.E. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem avtomaticheskogo shagayushchego apparata* [Mechanics and control on automated walking machine]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 312 p. (in Russ).
- [4] Morphing DIY robot looks like a Portal 'bot for real. Slash Gear: website. URL: <http://www.slashgear.com/morphing-diy-robot-looks-like-a-portal-bot-for-real-18325731> (accessed 24.09.2016).
- [5] Fokin V.G., Shanygin S.V. Review and development prospects of mobile walking robotic systems. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2015, no. 18, pp. 207–215. URL: <http://moluch.ru/archive/98/22115/> (in Russ).
- [6] Walking tractor timberjack by John Deere. The old robots: website. URL: <http://www.theoldrobots.com/Walking-Robot2.html> (accessed 23.09.2016) (in Russ).
- [7] RHex — devours rough terrain. Boston Dynamics: company website. URL: [http://www.bostondynamics.com/robot\\_rhex.html](http://www.bostondynamics.com/robot_rhex.html) (accessed 24.09.2016).
- [8] Shagayushchie roboty [Walking robots]. *Telenir.net: Humane and technical literature library*. URL: [http://www.telenir.net/tehnicheskie\\_nauki/sozdaem\\_robota\\_androida\\_svoimi\\_rukami/p13.php](http://www.telenir.net/tehnicheskie_nauki/sozdaem_robota_androida_svoimi_rukami/p13.php) (accessed 25.09.2016) (in Russ).
- [9] Pavlovskiy V.E. O razrabotkakh shagayushchikh mashin [On walking machines development]. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* [Keldysh Institute of Applied Mathematics preprints]. 2013, no. 101, 32 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101> (accessed 25.09.2016) (in Russ).
- [10] Mantis shestinogiy avtomobil' [Six-feet auto Mantis]. *Zemlya — Khroniki zhizni*: website. URL: <http://yo-robot.ru/mantis-shestinogiy-avtomobily.html> (accessed 25.09.2016) (in Russ).
- [11] Denavit J., Hartenberg R.S. Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *J. Appl. Mech.*, 1955, no. 6, pp. 215–221.

- [12] Koval'chuk A.K. Modified Denavit—Hartenberg coordinate system for robot actuating mechanisms with tree-like kinematic structure. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2015, no. 11.  
URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/826673.html> (in Russ). DOI: 10.7463/1115.0826673
- [13] Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V., Vereykin A.A., Kulakov B.B., Karginov L.A. Designing method for spatial tree-form actuating mechanism. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2014, no. 7. URL: <http://engsi.ru/doc/736600.html> (in Russ).
- [14] Karginov L.A. Primer sinteza upravlyayushchikh vozdeystviy dlya shestinogogo shagayushchego robota pri peredvizhenii po nerovnoy poverkhnosti. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskyy vestnik* [Electronic Periodical Youth Scientific and Technical Bulletin], 2014, no. 9.  
URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/731009.html> (in Russ).

**Akylbekov E.E.** — Master's Degree student of Department of Hydromechanics, Hydromachines and Hydro-pneumatics Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — A.K. Kovalchuk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Department of Hydromechanics, Hydromachines and Hydro-pneumatics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.