

УДК 621.01  
МРНТИ 30.15.35

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ МЕХАНИЗМА НОГИ ДЛЯ ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ

С.М. ИБРАЕВ, Г.А. АЙДАШЕВА<sup>1</sup>, Н.К. ДЖАМАЛОВ, А.С. ИБРАЕВ<sup>1</sup>,  
Г.М. МУХАМБЕТКАЛИЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова КН МОН  
<sup>2</sup>Казахский Национальный университет им. аль-Фараби

**Аннотация:** Рассматривается задача оптимального синтеза механизма опорно-двигательного механизма шагающей машины на основе плоского рычажного механизма, чертящая точка которого (центр стопы) генерирует семейство горизонтальных прямых линий. Предложено аналитическое решение аппроксимационной задачи квадратического приближения, которое позволяет существенно уменьшить размерность численной оптимизации. Предложены две кинематические схемы опорно-двигательного механизма, соответствующие двум локальным минимумам задачи. Использование предлагаемых механизмов позволяет существенно упростить управление и снизить энергозатраты.

**Ключевые слова:** шагающая машина, регулируемый механизм, прямолинейно-направляющий механизм, аппроксимационный синтез, квадратическое приближение

## OPTIMAL SYNTHESIS OF LEG MECHANISM FOR WALKING VEHICLE

**Abstract:** The problem of the optimal synthesis of walking vehicle leg mechanism is considered based on planar linkage generating a family of parallel horizontal straight lines. The analytical solution is derived for least-square approximation problem that allows to reduce essentially the dimensionality of numerical optimization task. Two alternative designs have been proposed that correspond to two local minimums of the problem. The use of the proposed mechanisms can significantly simplify management and reduce energy costs.

**Keywords:** walking machine, adjustable mechanism, rectilinear-guiding mechanism, approximation synthesis, quadratic approximation

## АЯҚПЕН ЖҮРЕТІН МАШИНАНЫҢ АЯҚ МЕХАНИЗМІН ТИІМДІ СИНТЕЗДЕУ

**Аңдатпа:** Сызғыш нүктесі (табанның ортасы) көлденең түзу сызықтардың отбасын құрайтын жазық шінтіректі механизм негізінде аяқпен жүретін машинаның тірек-қимыл механизмiнiң оңтайлы синтезiнiң есебi қарастырылады. Квадраттық жақындаудың аппроксимациялық есебiнiң аналитикалық шешiмi ұсынылды, ол сандық оңтайландырудың өлшемiн айтарлықтай азайтуға мүмкiндiк бередi. Екi жергiлiктi минимумға сәйкес келетiн тірек-қимыл механизмiнiң екi кинематикалық схемасы көрсетiлдi. Аталған тетiктердi пайдалану басқаруды айтарлықтай жеңiлдетуге және энергия шығынын азайтуға жағдай тугызады.

**Түйiндi сөздер:** аяқпен жүретiн машина, реттелетiн механизм, түзу сызықты-бағыттаушы механизм, аппроксимациялық синтез, квадраттық жақындау

### Введение

Как известно, использование прямолинейно-направляющих механизмов позволяет существенно упростить привод ноги шагающих транспортных средств [1-9]. В работе

рассматривается задача оптимального синтеза механизма опорно-двигательного механизма шагающей машины на основе плоского рычажного механизма, чертящая точка которого (центр стопы) генерирует семейство горизонтальных прямых линий. Задача синтеза сформулирована как аппроксимационная задача квадратического приближения и предложено её аналитическое решение, которое позволяет существенно уменьшить размерность последующей численной оптимизации. Обсуждаются численные результаты. Предложены две кинематические схемы опорно-двигательного механизма, соответствующие двум локальным минимумам задачи.

#### **Использование прямолинейно-направляющих механизмов в движителях шагающих машин**

Традиционные мобильные роботы шагающего типа с активным согласованием движения двигателей имеют сложную иерархическую систему управления, работа двигателей в режимах интенсивного разгона-торможения обуславливает неоправданно низкий КПД [1-3, 8, 9]. Нерациональность структурного решения большинства шагающих роботов связана со структурной избыточностью и многократной статической неопределённостью: количество активных приводов в таких системах гораздо больше числа степеней свободы системы. Так, например в шагающих роботах типа Hexapod (в которой каждая нога приводится в движение тремя приводами) при походке «трёшкой» число степеней свободы равно шести, в то время как активных приводов – 9. (Это с учётом только «опорных» ног; если же все ноги находятся в фазе опоры, то число активных приводов – 18, а число степеней свободы системы – 6). Вследствие этого в двигателях возникают паразитные нагрузки (двигатели работают «друг против друга»), увеличиваются реакции в шарнирах, проскальзывание стоп и т.д. Альтернативным в отношении «биоморфных» конструкций является подход, основанный на отказе от универсальности в пользу оптимальных характеристик движения, повышения КПД и прос-

тоты управления путем разделения функций двигателей, когда каждый привод имеет конкретное функциональное назначение [2, 3, 6-9]. Так, например, использование опорно-двигательных механизмов ортогонального типа позволяет добиться кинематической развязки движения и разделения функций двигателей, когда основной двигатель отвечает за прямолинейно-поступательное движение корпуса, другая группа приводов – за адаптацию к неровностям пересеченной местности. Это позволяет минимизировать количество основных двигателей, участвующих в системе управления, так как система адаптации на неровности несущей поверхности работает независимо от основного блока управления, причём адаптация каждой ноги осуществляется индивидуально и координация их работы не требуется.

Кроме того, в копирующих или ортогональных движителях реализован принцип гравитационной независимости приводов, когда основное прямолинейное поступательное перемещение корпуса машины осуществляется основным двигателем, а весовая нагрузка со стороны корпуса ложится лишь на устройство запирания двигателя. Однако недостаток существующих движителей указанного типа состоит в использовании возвратно-поступательных приводов. Широко используются копирующие механизмы пантографного типа: шестиногий шагающий робот Adaptive Suspension Vehicle университета штата Огайо [9], шагающий аппарат профессора Шигео Хироэ (Технологический институт Токио), профессора Марко Чеккарелли и др. Преимуществами такой схемы являются достаточно простое решение для регулирования высоты траекторий, линейное передаточное отношение между обобщёнными координатами механизма и декартовыми координатами опорной точки. Однако к недостаткам таких конструкций относятся значительные силовые воздействия на задающие органы, использование поступательных пар, нагруженных поперечной нагрузкой. Этим обусловлен повышенный интерес к шарнирно-рычажным механизмам, генерирующим

прямолинейные траектории (точно или приближенно) [6,7]. Сама идея использования прямолинейно-направляющих механизмов не является новой [2,3], однако, несмотря на большое разнообразие таких прямил, требование адаптивности к неровностям пересеченной местности делает большинство из них непригодными для практического использования в движителях шагающих машин. Так, точные прямолинейно-направляющие механизмы инверсоров Поселье-Липкина, Гарта и других, более сложные, плохо поддаются регулировке.

Предлагаемый механизм ноги представляет собой регулируемый плоский четырёхзвенный шарнирно-рычажный механизм с изменяемой длиной входного звена: путём регулирования длины этого звена обеспечивается адаптация ноги к неровностям опорной поверхности и изменение высоты шасси (рис. 1). Использование таких механизмов позволяет разработать рациональную конструкцию шагающей машины с функционально независимыми приводами, существенно упростить управление и снизить энергозатраты.

Для синтеза механизмов на основе модульного принципа [2, 4, 5] вида структура механизма и его кинематические параметры рассматриваются как состоящие из двух частей: варьируемая кинематическая цепь  $EDP$  и аппроксимирующая цепь  $ABC$ . Если считать заданными на выходе не семейство кривых, а одну траекторию, то для синтеза механизма с одной степенью свободы задача сводится к синтезу бинарного (двухэлементного) звена  $AC$ . При заданных размерах  $Q = [\xi_E, \eta_E, l_{ED}, l_{DP}]^T$  звеньев  $ED$  и  $DP$  путём анализа положений двухповодковой цепи  $EDP$  можно легко определить положения звена  $DP$ . Тогда задача синтеза четырёхзвенного механизма будет сведена к поиску круговой квадратической точки  $C$  на плоскости звена  $DP$ . Параметрами синтеза являются локальные координаты радиус-вектора  $r_C^{(3)}$  центра шарнира  $C$  (круговой точки) на плоскости  $Px_3y_3$  (рис.2), жёстко связанной со звеном  $DP$ , координаты радиус-вектора шарнира  $A$  – центра отыскиваемой окружности на неподвижной плоскости  $O\xi\eta$ , а также радиус окружности  $R = l_{AC}$ .

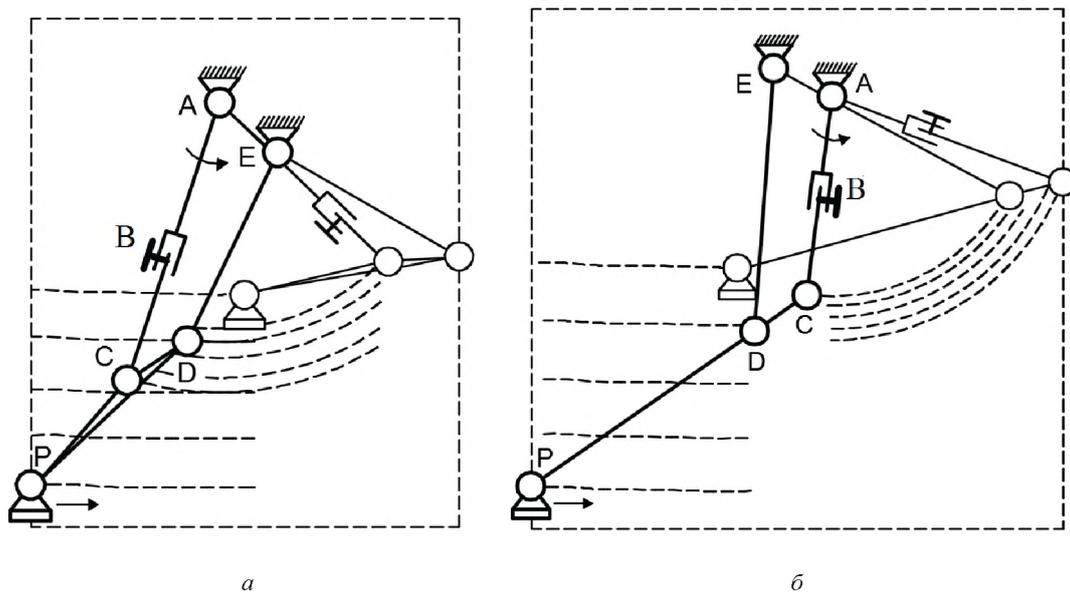


Рис. 1 – Механизмы ноги шагающей машины с регулируемой высотой шасси

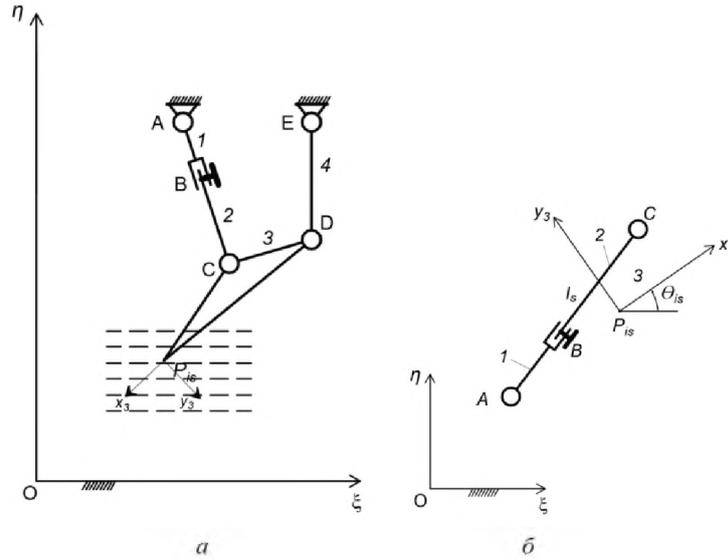


Рис. 2 – К синтезу регулируемого механизма на основе круговой точки

Но в случае задания не одного, а семейства программных траекторий, аналогом задачи поиска круговой квадратической точки будет задача синтеза RPR-модуля  $ABC$  ( $R$  обозначает вращательную,  $P$  – поступательную кинематическую пару), а переменный радиус круговой точки (переменная длина синтезируемого бинарного звена) выступит как параметр семейства. Пусть желаемое движение стопы  $P$  задано в виде семейства прямых  $t_s, s=1, \dots, S$ , параметром семейства выступает длина  $l_{AC} = l_s$ , которая постоянна на каждой  $s$ -ой траектории. Если на каждой из траекторий требуется воспроизвести  $N$  равноудалённых точек, тогда выходное движение задано  $N \cdot S$  точками  $P_{is}, i=1, \dots, N, s=1, \dots, S$ , т.е. считаем заданными координаты  $[\xi_{P_{is}}, \eta_{P_{is}}]$  относительно неподвижной системы координат  $O\xi\eta$  (рис.2). Положения плоскости  $Px_3y_3$  относительно  $O\xi\eta$  определяются  $S$  набором из  $N$  положений  $\{\xi_{P_{is}}, \eta_{P_{is}}, \theta_{is}\}, i=1, \dots, N, s=1, \dots, S$ .

Основное уравнение связи для кинематической цепи  $ABC$  вида RPR имеет вид:

Введём обозначения

$$p_s^{(1)} = 0,5 \cdot (R_A^2 - l_s^2), \quad p_s^{(2)} = 0,5 \cdot (r_C^2 - l_s^2), \quad s = 1, \dots, S$$

$$p_{S+1} = \xi_A, \quad p_{S+2} = \eta_A, \quad p_{S+3} = x_C^{(3)}, \quad p_{S+4} = y_C^{(3)}$$

Тогда последнее выражение записывается в виде

$$0,5 \cdot \Delta_{is}^{(k)} = p_s^{(k)} + a_{is}^{(k)} p_{S+1} + b_{is}^{(k)} p_{S+2} + c_{is}^{(k)} = 0, \quad i = 1, \dots, N; \quad s = 1, \dots, S$$

$$\Delta_{is} = (R_{P_{is}} + \Gamma(\theta)r_C^{(3)} - R_A)^2 - (l_{AC})_S^2 = 0 \quad (1)$$

Это означает, что точка  $C$  должна лежать на концентрических окружностях с радиусами  $l_s = (l_{AC})_s$ . Здесь  $\Gamma(\theta)$  – матрица вращения,  $\Delta$  – ошибка аппроксимации. При заданных  $\xi_{P_{is}}, \eta_{P_{is}}, \theta_{is}, i=1, \dots, N, s=1, \dots, S$ , задача синтеза состоит в определении параметров:  $\xi_A, \eta_A$  – абсолютных координат шарнира  $A$ ;  $x_C^{(3)}, y_C^{(3)}$  – локальных координат шарнира  $C$  в плоскости  $Px_3y_3$ ; и значений  $l_s, s=1, \dots, S$ , при которых приближенно удовлетворяются уравнения (1) для любых  $i = 1, \dots, N, s = 1, \dots, S$ .

Ошибка аппроксимации  $\Delta$  может быть выражена в виде

$$\Delta_{is}^{(1)} = -2R_{C_{is}}^T R_A + (R_A^2 - l_s^2) + R_{C_{is}}^2 \quad (2)$$

$$\Delta_{is}^{(2)} = -2r_{A_{is}}^T r_C + (r_C^2 - l_s^2) + r_{A_{is}}^2 \quad (3)$$

где  $R_{C_{is}} = R_{P_{is}} + \Gamma(\theta)r_C^{(3)}$ ,  
 $r_{A_{is}} = \Gamma^T(\theta_{is})(R_A - R_{P_{is}})$ .

где  $k=1$  или  $2$ . Выражения для  $\alpha_{is}^{(1)}, b_{is}^{(1)}, c_{is}^{(1)}$  через  $r_C, R_{P_{is}}, \theta_{is}$  и для  $\alpha_{is}^{(2)}, b_{is}^{(2)}, c_{is}^{(2)}$  через  $R_A, R_{P_{is}}, \theta_{is}$  можно легко вывести из (2) и (3) соответственно.

Таким образом, уравнения (1) приведены к линейным  $NS$  уравнениям по параметрам

$$P^{(1)} = [p_1^{(1)}, \dots, p_S^{(1)}, p_{S+1}, p_{S+2}]^T \text{ и } P^{(2)} = [p_1^{(2)}, \dots, p_S^{(2)}, p_{S+3}, p_{S+4}]^T \quad (5)$$

$$A^{(k)}P^{(k)} = -b^{(k)}, \quad k = 1, 2$$

Здесь

$$A^{(k)} = \left[ \left[ D_1^{(k)} \right] \left[ D_2^{(k)} \right] \dots \left[ D_S^{(k)} \right] \right]^T, \quad \dim A^{(k)} = NS \times (S+2), \quad \dim D_s^{(k)} = (S+2) \times N, \quad s=1, \dots, S;$$

Вектор  $e_s$  – это  $S$ -мерный единичный вектор с компонентами  $e_{\mu_s} = \delta_{\mu}^s, \mu=1, \dots, S$ . Вектор  $b^{(k)}$  – это  $NS$ -размерный вектор  $b^{(k)} = [b_1^{(k)T}, b_2^{(k)T}, \dots, b_S^{(k)T}]^T$ , причём  $b_s^{(k)} = [c_{1s}^{(k)}, c_{2s}^{(k)}, \dots, c_{Ns}^{(k)}]^T, s=1, \dots, S$ .

определяется как минимум Евклидовой нормы функции аппроксимации  $\Delta = AP + b$

$$f \equiv \|\Delta\|_2^2 = \Delta^T W^T W \Delta \quad (7)$$

Если  $S \geq 2$  и  $N \geq 3$  (заданы не менее 2 серии с не менее 3 положениями на каждой серии), то число уравнений  $NS$  в (5) больше, чем неизвестных  $(S+2)$  (для  $S(N-1) > 2$ ). Тогда получим приближенное решение в виде

### Заключение

Использование регулируемых прямолинейно-направляющих механизмов в приводе ноги шагающих машин позволяет разработать рациональную конструкцию шагающей машины с функционально независимыми приводами. Предлагаемый простой механизм адаптации ноги к неровностям опорной поверхности позволяет существенно упростить управление и координацию ног, а также снизить энергозатраты за счёт гравитационной независимости основного двигателя.

$$P^{(k)} = -A_p^{(k)-1} b^{(k)}, \quad (6)$$

где  $A_p^{-1} = [A^T W^T W A]^{-1} A^T W^T W$  «левая псевдо-инверсия матрицы  $A$ » [2],  $W$  – диагональная матрица  $\text{diag}\{w_1, w_2, \dots, w_{NS}\}$  весовых коэффициентов;  $\dim W = NS \times NS$ . Решение  $P_0$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Брискин Е.С., Шаронов Н.Г., Фоменко С.С. (2013) Реконфигурируемый транспортный комплекс со сдвоенными шагающими движителями. Известия Волгоградского государственного технического университета: Межвуз. сб. науч. ст. № 24(127). – С. 10-14.
2. Ибраев С.М. (2014) Аппроксимационный синтез рычажных механизмов: Методы и численная реализация. – Алматы. – 356 с.
3. Умнов Н.В. Особенности механизмов шагающего типа для использования их в нетрадиционном транспорте. – Энциклопедия машиностроения в сорока томах. – Часть 2. – Том 1. – Глава 11. – М.: Машиностроение, 1996.
4. Baigunchekov Zh., S. Ibrayev, M. Izmambetov. (2018). Synthesis of reconfigurable positioning parallel manipulator of a class RoboMech. 4th IEEE/IFToMM International conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, Delft University of Technology, The Netherlands.
5. Ibrayev S.M., Jamalov N. (2002) Approximate Synthesis of Planar Cartesian Manipulators with Parallel Structures.- Int. Journal Machine and Mechanism Theory, Elsevier, №37, 2002. p. 877-894
6. Kim, H., Choi, J. (2015), Optimal Design of Klann Based Walking Mechanism for Water-Running Robots. – Proceedings of the 14th IFToMM World Congress on TMM, Taipei, Taiwan, October 25 – 30.

7. Plecnik, Mark & McCarthy, J. (2016). Design of Stephenson linkages that guide a point along a specified trajectory. *Mechanism and Machine Theory*. 96. 38-51. 10.1016/j.mechmachtheory.2015.08.015.
8. Ryan, A.D., and Hunt, K.H. (1985). Adjustable Straight-Line Linkages – Possible Legged Vehicle Applications. *Transactions of ASME: Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*. Vol.107. 256 – 261.
9. Song, S.M., Waldron K.J. *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*. MIT-Press. Cambridge, Massachusetts, London, England, 1990.