

## Исследование областей, задающих множества разрешенных конфигураций при нахождении механизма мобильного манипулятора в близости от запретных зон

*Ф.Н. Притыкин, Д.И. Нефедов, А.В. Рингельман*

*Омский государственный технический университет, Омск*

**Аннотация:** Исследованы области пространства конфигураций, задающих совокупность достижимых точек рабочей зоны манипулятора с учетом положения запретных зон. Для аналитического задания областей использована теория множеств и совокупность поверхностей второго порядка.

**Ключевые слова:** синтез движений роботов, конфигурационное пространство, запретные зоны, интеллектуальные системы управления роботами.

Интеллектуальное управления робототехническими системами позволяет обеспечить их автономное функционирование в сложно организованных средах [1-3]. Одной из задач при этом является сокращение времени расчета, связанного с определением значения вектора приращений обобщенных координат на каждом шаге расчетов. Указанный вектор приращений вычисляют с учетом обеспечения заданного удаления исполнительного механизма манипулятора от запретных зон [4-6]. В работах [7,8] разработаны алгоритмы построения движений механизмов роботов основанные на использовании анализа точек конфигурационного пространства, задающих разрешенные конфигурации. Исследованию области  $\Lambda$  конфигурационного пространства  $Q$  задающей множество разрешенных конфигураций для исполнительного механизма манипулятора мобильного робота «Варан» посвящена работа [9]. Запретная зона при этом была задана горизонтальной плоскостью, располагающейся сверху механизма манипулятора мобильного робота (для случая, когда движение осуществляется внутри туннеля). Параметры, задающие форму одной из

---

областей  $\Omega_5$  (форму одного из эллиптических цилиндров, который используется для определения области  $\Lambda$ ) для этого случая определялись как функции от параметра высоты туннеля, в котором осуществляет движение мобильный робот [9]. В качестве указанных функций были использованы полиномы Лагранжа. Исследуем форму области  $\Lambda$ , когда запретная зона  $P$  ограничивается двумя плоскостями  $\Sigma$  и  $\Delta$  положения которых определяются параметрами  $x_{op}$  и  $z_{op}$  (см. рис. 1а). Длины звеньев механизма манипулятора равны следующим значениям  $O_1O_2 = 900$  мм,  $O_2O_3 = 700$  мм и  $O_3O_4 = 500$  мм. Минимальные и максимальные значения обобщенных координат, соответственно, равны  $q_i^{min}(-30^\circ, -120^\circ, -120^\circ)$  и  $q_i^{max}(120^\circ, 120^\circ, 120^\circ)$ , интервал сетки, задающей исследуемые точки в пространстве  $Q$ , был принят равным  $\Delta q_i = 15^\circ$ . На рисунке 1б изображено множество разрешенных конфигураций при наличии запретной зоны  $P$  при значении параметров  $x_{op} = 500$  мм и  $z_{op} = 500$  мм.

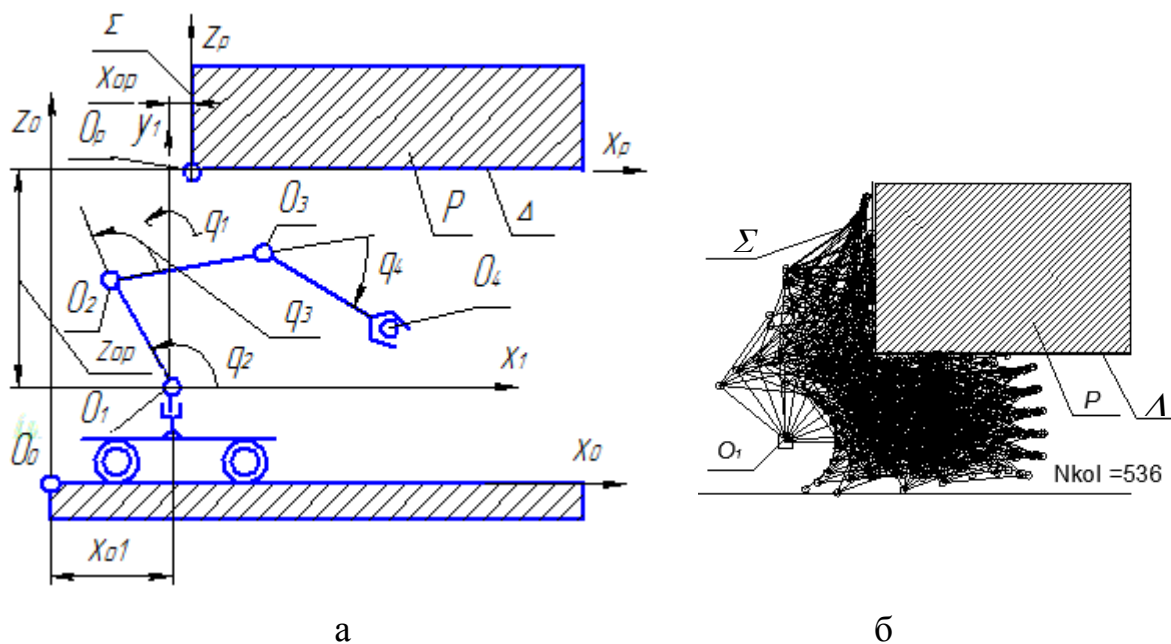


Рис. 1 – Механизм манипулятора мобильного робота «Варан»: а – взаимное положение манипулятора мобильного робота и запретной зоны  $P$ , б – множество разрешенных конфигураций

Параметр  $N_{kol}$  на рисунке 1б определяет количество указанных конфигураций. В таблице приведены сечения области  $\Lambda$  при  $q_1 = 0$  и различном расположении плоскостей  $\Delta$  и  $\Sigma$  заданных значениями  $x_{op} = 600\text{мм}$ ,  $z_{op} = 800\text{мм}$  и  $x_{op} = 1200\text{мм}$ ,  $z_{op} = 800\text{мм}$ . Сечения построены в системах координат  $O_q q_3 q_4$  при заданных фиксированных значениях обобщенной координаты  $q_2$  ( $-120^\circ, -105^\circ, \dots, 120^\circ$ ).

Таблица

Изображение сечений области  $\Lambda$  при различных положениях плоскостей  $\Delta$  и  $\Sigma$

	Изображения сечений при различных значениях $q_2$ (град)					
$x_{op} = 600\text{мм}, z_{op} = 800\text{мм};$ $Q_i^{\Omega 5-3} (0.0006, -0.081, 2.6, -13.14);$ $Q_i^{\Omega 5-4} (0.0044, -0.0016, -0.069, 1.41);$ $a^{\Omega 5} (-0.005, -0.47, 64.1, -951.7);$ $b^{\Omega 5} (0.0001, 0.002, -0.763, 22.47).$	$q_2 = -120^\circ$	$q_2 = -105^\circ$	$q_2 = -90^\circ$	$q_2 = -75^\circ$	$q_2 = -60^\circ$	
	$q_2 = -30^\circ$	$q_2 = 0$	$q_2 = 15^\circ$	$q_2 = 30^\circ$	$q_2 = 60^\circ$	
	$x_{op} = 1200\text{мм}, z_{op} = 800\text{мм};$ $Q_i^{\Omega 5-3} (-0.01, 1.179, -40.83, 403.9);$ $Q_i^{\Omega 5-4} ((-0.0001, 0.0066, 0.074, -1.5);$ $a^{\Omega 5} (-0.0002, 0.028, -0.64, 38.8);$ $b^{\Omega 5} (-0.0012, 0.149, -5.35, 58.9).$	$q_2 = -120^\circ$	$q_2 = -105^\circ$	$q_2 = -90^\circ$	$q_2 = -75^\circ$	$q_2 = -60^\circ$
		$q_2 = -30^\circ$	$q_2 = 0$	$q_2 = 15^\circ$	$q_2 = 30^\circ$	$q_2 = 60^\circ$

Анализ сечений области  $\Lambda$  показывает, что при задании запретной зоны  $P$  двумя плоскостями  $\Delta$  и  $\Sigma$  (см. рис. 1а, рис. 2) запрещенные конфигурации в сечениях области  $\Lambda$  задаются точками, располагающимися внутри областей по форме близких к форме областей заданных эллипсами. Начальные положения центров эллипсов и значения длин большой и малой полуосей при этом изменяются при изменении  $x_{op}$ ,  $z_{op}$  и  $q_2$ . На основе экспериментальных исследований вычислены координаты указанных центров эллипсов, заданных точками  $O_{эл}$  определяемых координатами  $Q_o^{\Omega 5-3}$  и  $Q_o^{\Omega 5-4}$  (см. рис. 2). Верхние индексы  $\Omega 5-3$  и  $\Omega 5-4$  определяют принадлежность параметров области  $\Omega 5$ . Начальные положения центров эллипсов задают функции  $Q_o^{\Omega 5-3} = f_1(x_{op}, z_{op})$ ,  $Q_o^{\Omega 5-4} = f_2(x_{op}, z_{op})$ , которые определены в результате построения множеств сечений области  $\Lambda$ . Графики этих функций представлены на рис. 3а,б.

Соответственно начальные численные значения большой и малой осей эллипсов определяют функции  $a_o^{\Omega 5} = f_3(x_{op}, z_{op})$  и  $b_o^{\Omega 5} = f_4(x_{op}, z_{op})$ . Угол наклона большой оси эллипса  $\varphi_{\Omega 5}$  по отношению к оси  $O_q q_3$  (эллипсы находятся в плоскостях параллельных плоскости  $O_q q_3 q_4$  конфигурационного пространства) для различных значений  $x_{op}$ ,  $z_{op}$  и  $q_2$  не изменяется и равен  $\varphi_{\Omega 5} \approx 110^\circ$  (см. рис. 2). Указанные зависимости представлены на рис.3в-г. Как видно из анализа рисунков представленных в таблице размеры большой  $a^{\Omega 5}$  и малой  $b^{\Omega 5}$  осей эллипсов в сечениях области  $\Lambda$  зависят от обобщенной координаты  $q_2$  и изменяются не линейно.

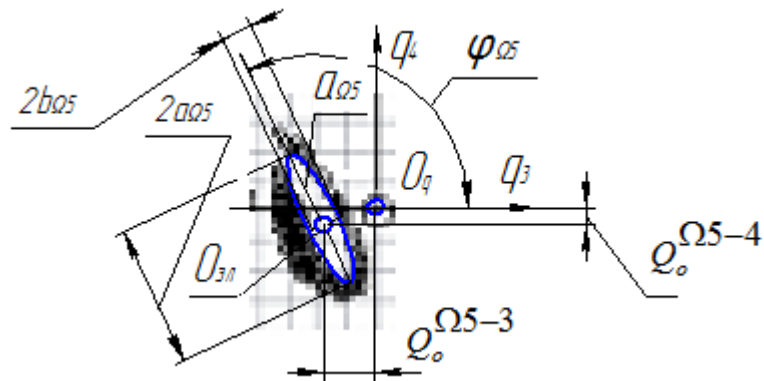


Рис. 2 – Параметры формы и положения эллипсов располагающихся в сечениях области  $\Lambda$

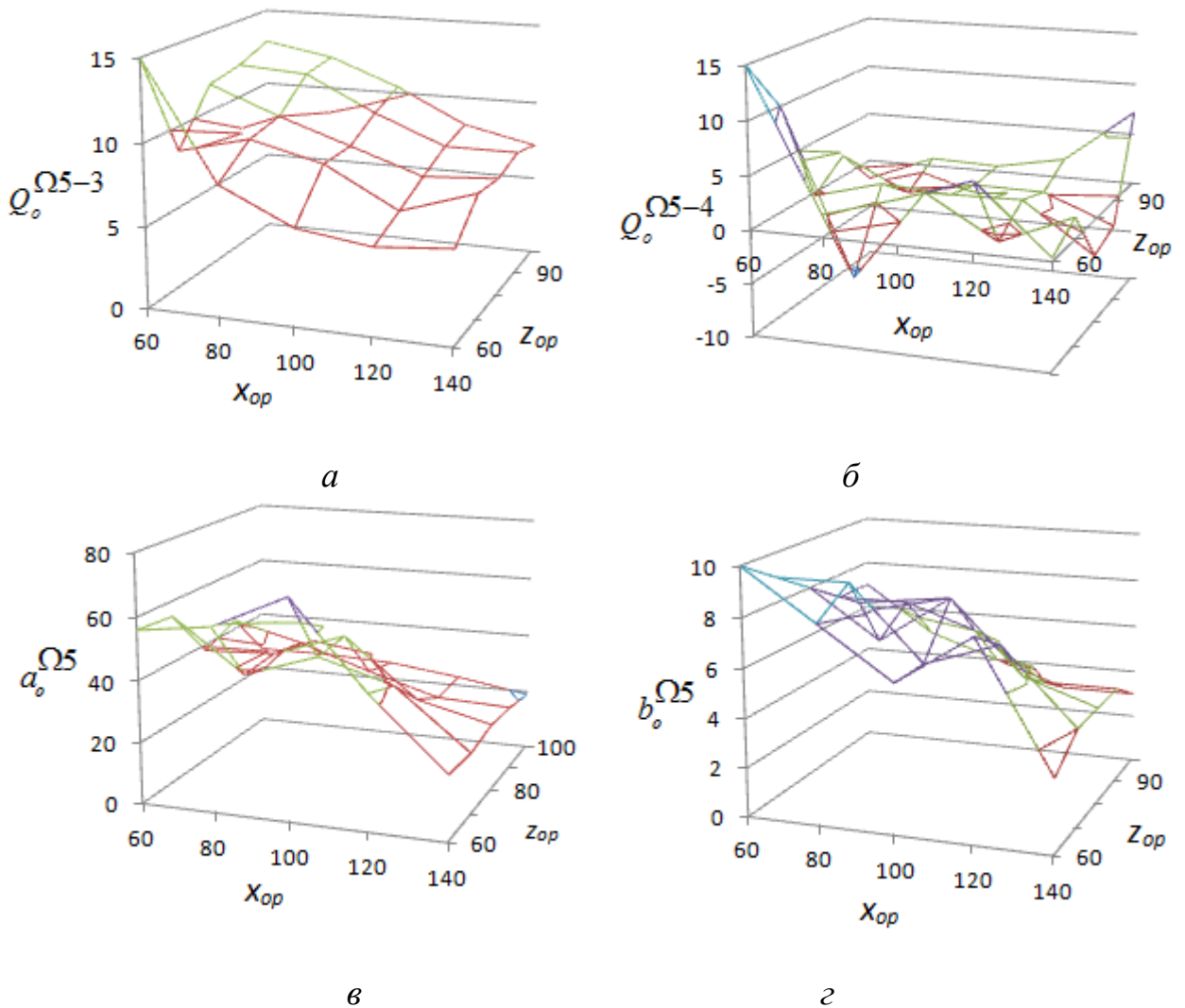


Рис. 3 – Графики-функции: а –  $Q_{\Omega 5-3} = f_1(x_{op}, z_{op})$ ;  
 б –  $Q_{\Omega 5-4} = f_2(x_{op}, z_{op})$ ; в –  $a_{\Omega 5} = f_3(x_{op}, z_{op})$ ; з –  $b_{\Omega 5} = f_4(x_{op}, z_{op})$

В связи с этим было принято значения параметров  $Q_o^{\Omega_5-3}$ ,  $Q_o^{\Omega_5-4}$ ,  $a^{\Omega_5}$  и  $b^{\Omega_5}$  задавать в виде полиномов третьей степени:

$$\begin{aligned}q^{\Omega_5-3} &= Q_3^{\Omega_5-3} q_2^3 + Q_2^{\Omega_5-3} q_2^2 + Q_1^{\Omega_5-3} q_2 + Q_o^{\Omega_5-3}; \\q^{\Omega_5-4} &= Q_3^{\Omega_5-4} q_2^3 + Q_2^{\Omega_5-4} q_2^2 + Q_1^{\Omega_5-4} q_2 + Q_o^{\Omega_5-4}; \\a^{\Omega_5} &= a_3^{\Omega_5} q_2^3 + a_2^{\Omega_5} q_2^2 + a_1^{\Omega_5} q_2 + a_o^{\Omega_5}; \\b^{\Omega_5} &= b_3^{\Omega_5} q_2^3 + b_2^{\Omega_5} q_2^2 + b_1^{\Omega_5} q_2 + b_o^{\Omega_5},\end{aligned}\tag{1}$$

где  $Q_3^{\Omega_5-3}$ ,  $Q_2^{\Omega_5-3}$ , ...,  $b_2^{\Omega_5}$ ,  $b_1^{\Omega_5}$ ,  $b_o^{\Omega_5}$  определяют коэффициенты полиномов (1), задающих область  $\Omega_5$ . Значения данных коэффициентов получены экспериментальным путем на основе получения множества сечений при различных значениях  $x_{op}$ ,  $z_{op}$  и  $q_2$ . Значения указанных коэффициентов для двух положений запретной зоны  $P$  заданы в первом столбце таблицы.

Неравенство, определяющее область  $\Omega_5$  пространства  $Q$  задающее запрещенные конфигурации имеет следующий вид [9]:

$$\begin{aligned}&\frac{\left(q_2 \sin \varphi^{\Omega_5} + q_3 \cos \varphi^{\Omega_5} + \left(Q_3^{\Omega_5-3} q_2^3 + Q_2^{\Omega_5-3} q_2^2 + Q_1^{\Omega_5-3} q_2 + Q_o^{\Omega_5-3}\right)\right)^2}{\left(a_3^{\Omega_5} q_2^3 + a_2^{\Omega_5} q_2^2 + a_1^{\Omega_5} q_2 + a_o^{\Omega_5}\right)^2} + \\&+ \frac{\left(q_2 \cos \varphi^{\Omega_5} + q_3 \sin \varphi^{\Omega_5} + \left(Q_3^{\Omega_5-4} q_2^3 + Q_2^{\Omega_5-4} q_2^2 + Q_1^{\Omega_5-4} q_2 + Q_o^{\Omega_5-4}\right)\right)^2}{\left(b_3^{\Omega_5} q_2^3 + b_2^{\Omega_5} q_2^2 + b_1^{\Omega_5} q_2 + b_o^{\Omega_5}\right)^2} - 1 \geq 0\end{aligned}\tag{2}$$

Неравенство (2) используется в зависимости [9,10]:

$$\Lambda \rightarrow ((((((\Omega \cup \Omega_1) \cup \Omega_2) \cup \Omega_3) \cup \Omega_4) \cup \Omega_5) \cup \Omega_6) \geq 0.\tag{3}$$

В данном неравенстве, область  $\Omega$  – определяет параллелепипед, заданный предельными значениями обобщенных координат,  $\Omega_1, \Omega_5$  – области, точки которых находятся снаружи эллиптических цилиндров [9]. Области  $\Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$  задают полупространства, определяемые плоскостями.  $\Omega_6$  – область, определяемая параболическим цилиндром [9]. Использование неравенства (3) позволяет вычислять в приближенном виде запрещенные конфигурации при нахождении механизма манипулятора мобильного робота в непосредственной близости от запретной зоны. На рис. 4 представлены графики  $t = f_1(k)$  и  $t_A = f_2(k)$  определяющие зависимость времени вычисления разрешенных конфигураций при использовании двух различных способов расчета. При проведении исследований использовался компьютер на базе процессора Dual Core Intel Core I3-540, оперативная память DDR3 4 Гб, видеоадаптер дискретный Zotac GeForce GTX 560 с объемом памяти 2Гб. Параметр  $k$  определяет число итераций при вычислении разрешенных конфигураций при синтезе движений по вектору скоростей.

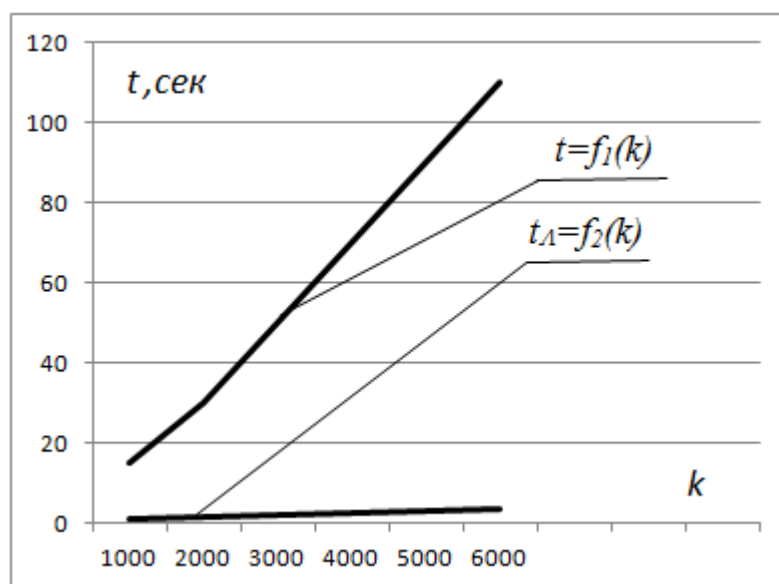


Рис. 4. – Графики-зависимости  $t_A = f_2(k)$  и  $t = f_1(k)$

Данный параметр используется при вычислении вектора обобщенных скоростей при наличии двигательной избыточности. Первый способ  $t_A = f_2(k)$  основан на использовании неравенств (2,3) определяющих область  $A$ . Вторым способом  $t = f_1(k)$  основан на определении пересечений трехмерных примитивов задающих звенья механизмов с запретной зоной. Как видно из графиков функций первый способ расчета разрешенных конфигураций требует на несколько порядков меньше времени вычислений, чем второй.

Разработанное программное обеспечение и полученные аналитические зависимости могут быть использованы как составная часть интеллектуальных систем управления, которые позволяют планировать траектории перемещения манипуляторов в заранее известном сложно организованном пространстве, с целью обеспечения автономного функционирования роботов.

### Литература

1. Ющенко, А. С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №3. – С. 5 – 18.
2. Макаров, И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Евстигнеев Д. В., Семенов А. В. Интеллектуальные робототехнические системы: принципы построения и примеры реализации. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. №11. – С. 14 – 23.
3. Егоров, А. С., Лопатин П.К. Использование алгоритма полиномиальной аппроксимации в задаче управления манипулятором в среде с неизвестными препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №3. – С. 24–29.
4. Притыкин, Ф. Н. Виртуальное моделирование движений роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей: монография; ОмГТУ





– Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 172 с.: ил.

5. Притыкин, Ф. Н., Осадчий А.Ю. Способ кодирования информации при задании геометрических моделей исполнительных механизмов роботов // Инженерный вестник Дона, 2014, № 2. URL: [ivdon.ru/magazine//archive/n2y2014/2363/](http://ivdon.ru/magazine//archive/n2y2014/2363/).

6. Ляшков, А.А., Завьялов А.М. Семейство поверхностей, заданное формулами преобразования координат, и его огибающая // «Инженерный вестник Дона», 2013, №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1512/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1512/).

7. Isto P. A parallel motion planner for systems with many degrees of freedom // Proc. of the 10th Intemat. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2001), August 22—25, 2001, Hotel Mercure Buda, Budapest, Hungary. pp. 339—344.

8. Lopatin P. K. Algorithm of a manipulator movement amidst unknown obstacles // Proc. of the 10th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2001). August 22—25. 2001. Hotel Mer- cure Buda, Budapest, Hungary. pp. 327—331.

9. Притыкин, Ф.Н., Осадчий А.Ю. Исследование областей пространства конфигураций, задающих совокупность достижимых точек рабочей зоны манипулятора с учетом положения запретных зон // Омский научный вестник. – 2014. – № 3 (133). – С. 70 – 74.

10. Рвачев, В. Л. Методы алгебры логики в математической физике – Киев; 1974. – 256 с.

### References

1. Yushchenko, A. S. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2005. №3. pp. 5 - 18.

2. Makarov, I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Evstigneev D. V., Semenov A. V. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2004. №11. pp. 14 - 23.



3. Egorov, A. S. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2013. №3. pp. 24 - 29.
4. Pritykin, F. N. Virtual'noe modelirovanie dvizheniy robotov, imeyushchikh razlichnuyu strukturu kinematicheskikh tsepey [Virtual modeling movements of robots with different structures kinematic chains]: monografiya. OmGTU. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2014. 172 p. : il.
5. F. N. Pritykin, A. Yu. Osadchiy. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, № 2  
[ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2363](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2363)
6. A.A. Lyashkov, A.M. Zav'yalov. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1  
[ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1512](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1512)
9. F. N. Pritykin, A.Yu. Osadchiy. Omskiy nauchnyy vestnik. 2014. № 3 (133). pp. 70 - 74.
10. Rvachev, V. L. Metody algebrы logiki v matematicheskoy fizike [Methods of algebra of logic in mathematical physics]. Kiev; 1974. 256 p.