

Выводы.

Угловые ускорения, развиваемые испытуемыми автомобилями Lada Priora (BA3–21703) и Toyota Corolla в плоскости дороги, подчиняются законам нормального распределения.

При выполнении маневра «double line change» можно выделить две группы законов распределения величин угловых ускорений автомобиля в плоскости дороги: I группа: автомобили J и M классов, $\varepsilon_{\max} =$ до 4 c^{-2} ; II группа: автомобили B, D и E классов, $\varepsilon_{\max} = 4 \dots 8 \text{ c}^{-2}$.

Максимальная неопределенность измерения угловых ускорений, развиваемых автомобилем в плоскости дороги не превышает $0,1121 \text{ c}^{-2}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Метод парциальных ускорений и его приложения в динамике мобильных машин / [Артемов Н. П., Лебедев А. Т., Клец Д. М. и др.]. – X. : Миськдрук, 2012. – 220 с.

УДК 681.532:69.002.5

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ МАНИПУЛЯТОРА

К.т.н. А.Г. Гурко, к.т.н. М.Н. Кравцов, А.В. Лебединский, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

На примере двухзвенного робота-манипулятора выполнена оценка энергетической эффективности траекторий, полученных наиболее распространенными методами. В качестве критерия эффективности принято количество работы, затраченной на реализацию траекторий.

На прикладі дволанкового робота-маніпулятора виконана оцінка енергетичної ефективності траєкторій, отриманих найбільш поширеними методами. Критерієм ефективності було прийнято кількість роботи, витраченої на реалізацію траєкторій.

Using two-arm manipulator as an example, energy efficiency assessment of trajectories has been completed with the help of the most common methods. As a criterion of efficiency, the amount of expended work for trajectory execution has been accepted.

Ключевые слова: манипулятор, планирование траектории, энергоэффективность, работа

Введение

Современная промышленность не может обходиться без качественных роботизированных систем и, в частности, промышленных роботов-манипуляторов (ПРМ). ПРМ являются неотъемлемой частью любого производства, начиная от лазерной резки и заканчивая сложными технологическими операциями при изготовлении автомобилей.

Высокое энергопотребление при работе ПРМ на сегодняшний день является весьма распространенной проблемой, которая снижает экономический эффект от их применения.

Одним из путей повышения энергетической эффективности использования ПРМ является планирование оптимальных с энергетической точки

2. Подригало М. А. Метрологічне забезпечення динамічних випробувань тягово-транспортних машин / М. А. Подригало, А. І. Коробко, Д. М. Клец [та ін.] // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Тракторна енергетика в рослинництві. – 2009. – Вип. 89. – С. 87–99.

3. Подригало М. А. Застосування методу паралельних спостережень при випробуваннях автомобілів / М. А. Подригало, О. С. Полянський, Д. М. Клец [та ін.] // Вісник ХНТУ. – 2011. – Т. 16. – № 1. – С. 57–62.

4. Гаврилов Э. В. Принципы работы мобильных вычислительных комплексов / Э. В. Гаврилов, О. П. Алексеев, О. П. Смирнов // Информационные технологии. – X., 1999. – С. 139–141.

5. Коробко А. І. Застосування акселерометрів при динамічних випробуваннях автомобілів / А. І. Коробко. // Праці ТДАТУ. – Т. 5. – Вип. 9. – Мелітополь, 2009. – С. 193–197.

6. Засоби транспортні дорожні. Стійкість. Методи вивчення основних параметрів випробуваннями : ДСТУ 3310–96. – [Чинний від 1997–01–01]. – К. : Держстандарт України, 1996. – 13 с. – (Національні стандарти України).

зрения траекторий его звеньев. Под планированием траекторий ПРМ подразумевается определение такой зависимости присоединённых координат от времени, которая бы обеспечила прохождение рабочего инструмента (схвата) за заданное время из начальной точки пространства в конечную через последовательность узловых точек, и удовлетворяла при этом заданным ограничениям [1].

Постановка цели и задач

Целью данной работы является повышение эффективности использования ПРМ за счёт реализации оптимальных с энергетической точки зрения траекторий присоединённых координат. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ наиболее распространённых методов планирования траекторий ПРМ;
- построение имитационной модели ПРМ;
- планирование траекторий различными методами и оценка их энергетической эффективности.

Анализ публикаций

Эффективное планирование траектории движения является ключевой проблемой при реализации робототехнических систем, в связи с чем разработано большое количество различных решений данной задачи [1–10]. Однако при этом, как правило, основное внимание уделяется точности прохождения схвата через контрольные точки и быстродействию ПРМ [1–8], в то время как вопросу энергоэффективности таких решений уделяется недостаточно внимания. К таким работам, относятся, в частности, [9, 10] в которых для построения оптимальных с энергетической точки зрения траекторий использованы, соответственно, методы динамического программирования и генетических алгоритмов. Эти

методы являются достаточно эффективными, но относительно ресурсоёмкими. В то же время на практике наиболее распространены методы, основанные на представлении траекторий в пространстве присоединённых координат многочленами некоторого порядка [1, 2, 11]. Это связано с относительной простотой процедуры планирования траекторий, и, следовательно, возможностью её выполнения в режиме реального времени.

Таким образом, практический интерес представляет определение энергетической эффективности траекторий, полученных наиболее распространёнными методами.

Основные методы планирования траекторий

К классическим методам планирования траекторий ПРМ в пространстве присоединённых координат являются метод кубических полиномов, метод полиномов пятой степени и метод линейных сегментов с параболическими сопряжениями (ЛСПС).

При использовании метода кубических полиномов участки между узловыми точками описываются полиномами третьей степени:

$$q(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3, \tag{1}$$

из которых также определяются скорости и ускорения звеньев:

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2, \tag{2}$$

$$\ddot{q}(t) = 2a_2 + 6a_3t \tag{3}$$

где $q(t)$ – присоединённые координаты (углы поворота или линейные перемещения), a_i – независимые коэффициенты, $t \in [0, t_k]$ – время, затрачиваемое на прохождение k -го участка траектории.

Для начальной и конечной точек траектории указываются ограничения:

$$q(0) = q_0, \tag{4}$$

$$q(t_f) = q_f \tag{5}$$

$$\dot{q}(0) = 0 \tag{6}$$

$$\dot{q}(t_f) = 0 \tag{7}$$

Кроме того, для каждой k -ой узловой точки предъявляются дополнительные условия непрерывности скорости и ускорения.

Решив уравнения (1)-(7), находят значения независимых коэффициентов a_i .

Метод полиномов пятого порядка (8) аналогичен предыдущему методу. В данном методе предполагается, что кроме координат начальной, конечной и промежуточных точек, и значений скоростей в этих точках, также известны и значения ускорений:

$$q(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5, \tag{8}$$

$$q(0) = q_0, \tag{9}$$

$$q(t_f) = q_f, \tag{10}$$

$$\dot{q}(0) = 0, \tag{11}$$

$$\dot{q}(t_f) = 0, \tag{12}$$

$$\ddot{q}(0) = 0, \tag{13}$$

$$\ddot{q}(t_f) = 0, \tag{14}$$

Метод ЛСПС заключается в том, что каждая из предполагаемых траекторий перемещения ПРМ разделяется на три участка. Первый участок начинается с момента t_0 до времени t_b и является квадратичной функцией. Это приводит к постепенному увеличению скорости. В момент времени t_b траектория меняется на линейную функцию. В момент $t_f - t_b$ траектория вновь меняется на квадратичную функцию:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 + 0,5\dot{q}t^2, & 0 \leq t \leq t_b \\ 0,5(q_0 + q_f - \dot{q}t_f) + \dot{q}t, & t_b < t \leq t_f - t_b \\ q_f - 0,5\dot{q}t_f^2 + \dot{q}t_f t - 0,5\dot{q}t^2, & t_f - t_b < t \leq t_f, \end{cases} \tag{15}$$

Построение модели ПРМ и планирование траекторий

Для оценки эффективности методов планирования траекторий в приложении Robotics Toolbox [11] пакета MATLAB построена модель (рис. 1) двухзвенного робот-манипулятор «Pelican» [12] (CICESE, Robotics lab.).

Параметры данного робота-манипулятора приведены в таблице 1.

При планировании траекторий (рис. 2) рассматривалось движение манипулятора из начальной точки с координатами $x_0 = 0,16$ м, $y_0 = 0,17$ м при $\mathbf{q}(t_0) = [\pi/6, \pi/6]^T$ (точка S на рис. 2) в точку F с координатами $x_f = 0,11$ м, $y_f = -0,21$ м при $\mathbf{q}(t_f) = [-\pi/4, \pi/6]^T$. Траектория должна пройти через промежуточную точку V с координатами $x_v = 0,24$ м, $y_v = 0,02$ м. Время прохода участков траектории: $t_1 = t_2 = 2,5$ с.

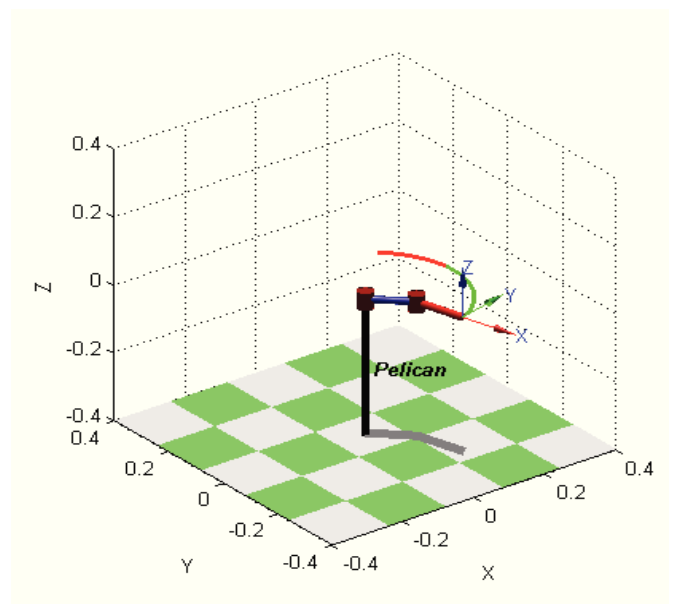


Рис. 1. Модель ПРМ «Pelican»

Таблица 1.

Параметры робота-манипулятора «Pelican»

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Длина 1го звена	l_1	0,115	м
Длина 2го звена	l_2	0,130	м
Расстояние до центра масс 1го звена	l_{c1}	0,0983	м
Расстояние до центра масс 2го звена	l_{c2}	0,0229	м
Масса 1го звена	m_1	2,74	кг
Масса 2го звена	m_2	2,01	кг
Момент инерции 1го звена относительно центра масс	I_1	0,1213	кг·м ²
Момент инерции 2го звена относительно центра масс	I_2	0,0116	кг·м ²

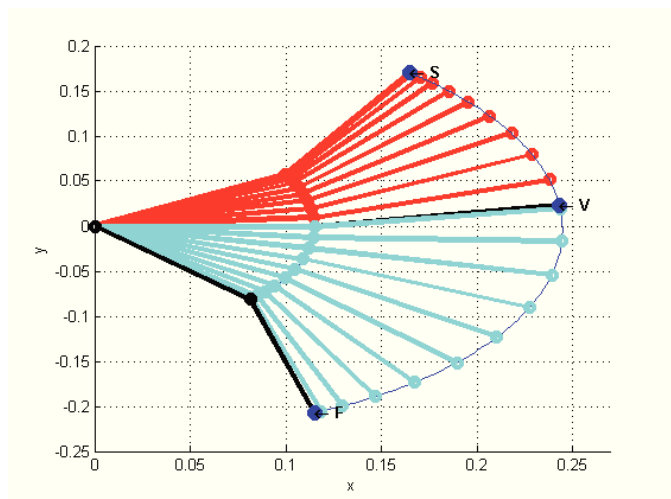


Рис. 2. Траектория перемещения звеньев манипулятора, полученная методом кубических полиномов

Законы изменения присоединенных координат, а также их скоростей и ускорений, полученных различными методами, представлены на рис. 3–5.

Как видно из этих рисунков, различные методы дают близкие законы изменения присоединенных координат $q(t)$ при различных законах изменения скоростей $\dot{q}(t)$.

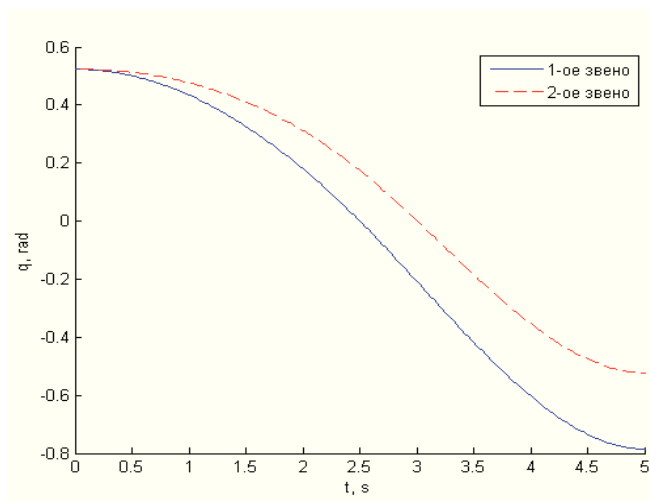
Далее приведена оценка энергетических затрат на реализацию каждой из траекторий.

Определение энергетической эффективности траекторий

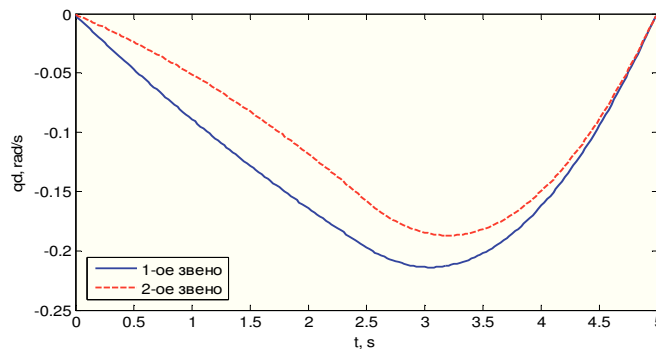
В качестве критерия энергетической эффективности принято количество работы A , которое необходимо затратить на реализацию той или иной траектории:

$$A = \sum_{i=1}^2 \int_{t_0}^{t_f} M_i(t) \dot{q}_i(t) dt, \quad (16)$$

где M_i – моменты, вырабатываемые исполнительными электродвигателями для перемещения i -го звена.

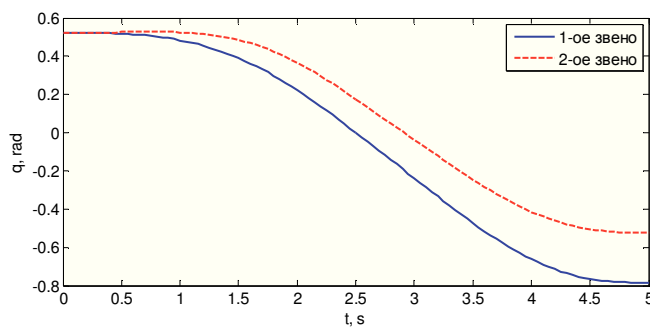


а)

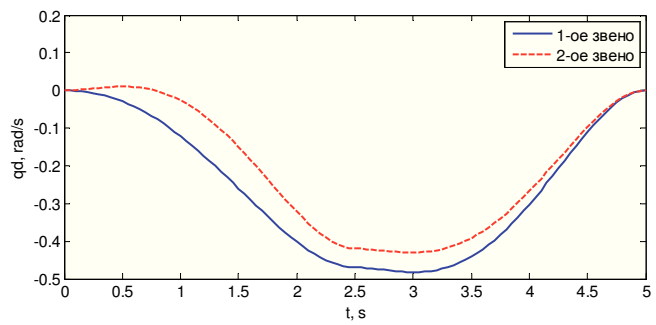


б)

Рис. 3. Траектории, полученные методом кубических полиномов: а – углы поворота $q(t)$; б – угловые скорости $\dot{q}(t)$



а)



б)

Рис. 4. Траектории, полученные использованием полиномов 5-го порядка: а – углы поворота $q(t)$; б – угловые скорости $\dot{q}(t)$

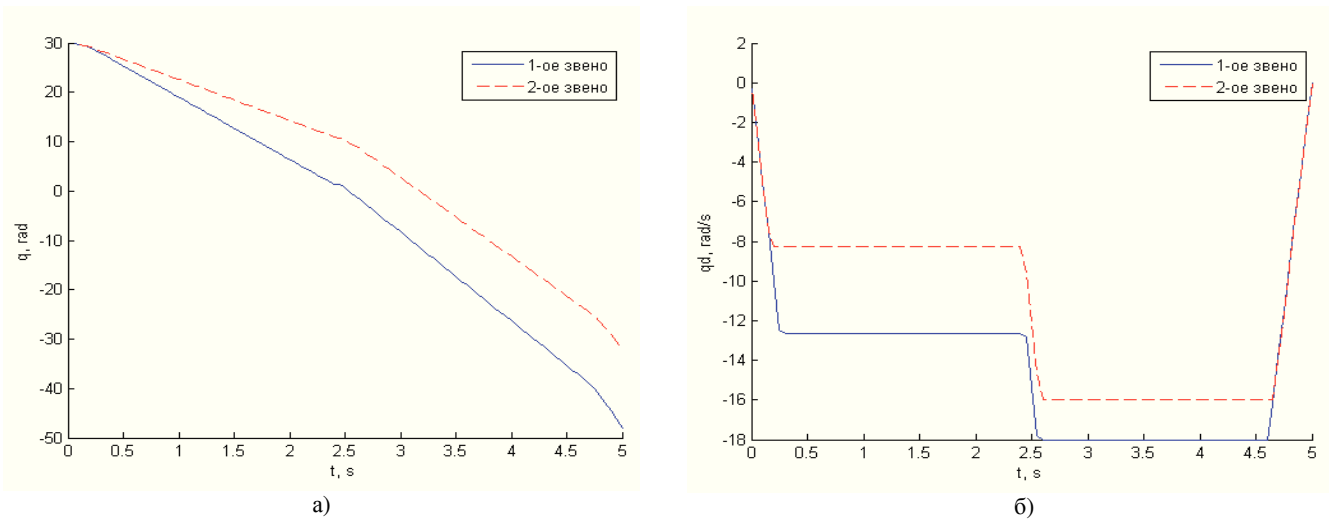


Рис. 5. Траектории, полученные использованием метода ЛСПС: а – углы поворота $q(t)$; б – угловые скорости $\dot{q}(t)$

Значения моментов определены из следующего матричного уравнения динамики ПРМ, полученного на основе уравнений Лагранжа 2го рода:

$$M = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (17)$$

где $D(q)$ – симметричная положительно-определённая 2×2 матрица инерции манипулятора;

$C(q, \dot{q})$ – 2×2 матрица, содержащая центробежные и кориолисовы члены;

$g(q)$ – вектор сил гравитации.

Результаты моделирования (рис. 6) показывают, что на прохождение траектории, полученной методом кубических полиномов, затрачивается работа в $A = 0,91$ Дж; в то время как на реализацию траекторий, определенных методом полиномов пятой степени требуется 0,95 Дж; а метода ЛСПС – 2,065 Дж. Использование метода кубических полиномов позволяет повысить энергоэффективность системы на 4% относительно метода полиномов пятой степени и на 56% относительно метода ЛСПС.

После проведенного анализа можно сказать, что самым энергозатратным методом при планировании траектории манипулятора является метод линейных сегментов с параболическими соединениями. Самым энергоэффективным методом является метод кубических полиномов.



Рис.6. Значения работы, необходимой на прохождение траекторий, полученных различными методами

Выводы

Повышенная энергозатратность при синтезе манипулятора является актуальной проблемой на сегодняшний день, которая может быть решена использованием более энергоэффективного метода планирования траектории. В данной статье было

установлено, что среди наиболее распространенных методов планирования траектории робота-манипулятора, самым энергоэффективным является метод кубических полиномов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Фу К. Робототехника/ К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли – М.: Мир, 1989. – 6с.
2. Craig J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Addison Wesley, Reading, MA, 1986. – 400 p.
3. Щербинин С. В. Планирование траекторий многокоординатного манипулятора / С.В. Щербинин, Д.А. Медведев и др. // Доклады ТУСУРа. – 2009. – Т. 20. – №. 2. – С. 122-125.
4. Лесков А.Г. Планирование, моделирование и экспериментальное исследование типовой манипуляционной операции / А.Г. Лесков, В.В. Илларионов и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2016. – № 4. – С. 57-70.
5. Гурко А.Г. Решение обратной задачи кинематики плоского шарнирного избыточного манипулятора. / А.Г. Гурко, И.В. Янчевский // Механіка та машинобудування. – 2014. – №1. – 136-147.
6. Rajan V. Minimum time trajectory planning / V. Rajan // Robotics and Automation. Proceedings of 1985 IEEE International Conference. – 1985. – Vol. 2. – P. 759-764.
7. Sahar G. Planning of minimum-time trajectories for robot arms / G. Sahar, J.M. Hollerbach // The International journal of robotics research. – 1986. – Vol. 5. – №. 3. – P. 90-100.
8. Pires E. J. S., de Moura Oliveira P. B., Machado J. A. T. Manipulator trajectory planning using a MOEA / E. J. S. Pires, P. B. de Moura Oliveira, J. A. T. Machado // Applied Soft Computing. – 2007. – Vol. 7. – №. 3. – P. 659-667.
9. Field G. Iterative dynamic programming: an approach to minimum energy trajectory planning for robotic manipulators / G. Field, Y. Stepanenko // Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on. – IEEE, 1996. – T. 3. – P. 2755-2760.
10. Chettibi T. Minimum cost trajectory planning for industrial robots / H. E. Lehtihet, M. Haddad, S. Hanchi // European Journal of Mechanics. – 2004. – Vol. 23. – №. 4. – P. 703-715.
11. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB / P. Corke. – Springer, 2011. – 570 p.
12. Kelly R. Control of Robot Manipulators in Joint Space / R. Kelly, V. Santibanez, A. Loria – Springer, 2005. – 452 p.