




**RS Global**  
Journals

**Scholarly Publisher**  
**RS Global Sp. z O.O.**  
ISNI: 0000 0004 8495 2390

Dolna 17, Warsaw, Poland 00-773  
Tel: +48 226 0 227 03  
Email: editorial\_office@rsglobal.pl

<b>JOURNAL</b>	World Science
<b>p-ISSN</b>	2413-1032
<b>e-ISSN</b>	2414-6404
<b>PUBLISHER</b>	RS Global Sp. z O.O., Poland
<b>ARTICLE TITLE</b>	ПРОГРАММНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АНТРОПОМОРФНОГО МАНИПУЛЯТОРА
<b>AUTHOR(S)</b>	Ащепкова Наталья Сергеевна
<b>ARTICLE INFO</b>	Ashchepkova Natalya. (2021) Software Method for Analysis of the Performance of Anthropomorphic Manipulator. World Science. 11(72). doi: 10.31435/rsglobal_ws/30122021/7722
<b>DOI</b>	<a href="https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30122021/7722">https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30122021/7722</a>
<b>RECEIVED</b>	18 October 2021
<b>ACCEPTED</b>	11 December 2021
<b>PUBLISHED</b>	17 December 2021
<b>LICENSE</b>	 This work is licensed under a <b>Creative Commons Attribution 4.0 International License</b> .

© The author(s) 2021. This publication is an open access article.

# ПРОГРАММНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АНТРОПОМОРФНОГО МАНИПУЛЯТОРА

Ащепкова Наталья Сергеевна,

к.т.н., доцент, доцент кафедры мехатроники, Днепровский национальный университет  
им. О. Гончара, Днепр, Украина, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1870-1062>

DOI: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws/30122021/7722](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30122021/7722)

## ARTICLE INFO

**Received:** 18 October 2021

**Accepted:** 11 December 2021

**Published:** 17 December 2021

## KEYWORDS

manipulator, trajectory, nodal points, speed, generalized coordinates.

## ABSTRACT

A universal anthropomorphic manipulator with six rotational degrees of mobility is considered. The nodal points  $S_0, \dots, S_6$  are selected on the trajectory of movement of the manipulator grip.

The kinematic analysis of the manipulator was carried out by the method of transforming the coordinates of Denavit - Hartenberg. The mathematical model of the manipulator is compiled by the Lagrange-Euler method. The problem of maximum performance for each generalized coordinate  $q_i(t)$  is solved using the Pontryagin maximum principle. Mathematical modeling was carried out in the Mathcad environment.

The software method for analyzing the speed of the manipulator allows us to consider for each nodal point of the trajectory  $S_0, \dots, S_6$  the set of admissible configurations of the manipulator, solve the problem of maximum speed for each generalized coordinate  $q_i(t)$  and estimate the minimum time for the implementation of the sequence of state vectors. When solving the problem of maximum speed, the switching time  $t_{i1}$  and the minimum turning time  $t_{ik}$  are calculated for each generalized coordinate  $q_i(t)$ . The minimum time for the configuration implementation can be found by summing the minimum rotation time  $t_{ik}$  over six generalized coordinates. Similar calculations are carried out for each nodal point  $S_0, \dots, S_6$  and the corresponding sets of permissible manipulator configurations.

The developed software makes it possible, on the basis of the data obtained, to synthesize a sequence of control commands for the manipulator drives.

The research results can be used at the design stage, implementation and modernization of robotic systems and manipulators.

**Citation:** Ashchepkova Natalya. (2021) Software Method for Analysis of the Performance of Anthropomorphic Manipulator. *World Science*. 11(72). doi: 10.31435/rsglobal\_ws/30122021/7722

**Copyright:** © 2021 Ashchepkova Natalya. This is an open-access article distributed under the terms of the **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

**Введение.** По данным Международной федерации по робототехнике (IFR) в 2018 году в мире было продано 420 тысяч промышленных, более 270 тысяч профессиональных обслуживающих и 16,3 млн. персональных и игровых роботов. Современные робототехнические комплексы (РТК) широко используются при работе в опасных и вредных для человека условиях. Сегодня в мире существует несколько модификаций роботов-сапёров («Т 7», «Sahar», «Уран - 6» и т.п.) для проведения визуальной разведки; выявления и распознавания взрывоопасных предметов; захвата, транспортировки и уничтожения подрывных устройств. Специализированные РТК («Moni-Robo», «Warrior», «MRS» и т.п.) эффективно работают в условиях повышенной радиации. Распространение COVID-19 обуславливает внедрение РТК социального и медицинского назначения. Различные модели роботов-медсестёр («Moxi», «Ro Bear», «Hospi», «Ангел» и т.п.) выполняют первичную диагностику, уход, автоматизированный контроль за процессами жизнедеятельности пациента, инвазивное введение назначенных препаратов по заданному алгоритму и т.д. В промышленности роботы традиционно применяются для технологических операций при повышенной концентрации вредных веществ (нанесение лаков и покрытий),

повышенном уровне шума (ковка, штамповка и т.п.) и для автоматизации погрузочно-разгрузочных работ. Кроме того, мобильные роботы и дистанционно управляемые манипуляторы могут участвовать в преодолении последствий техногенных и природных катастроф.

Сегодня в Украине не существует унифицированного универсального манипулятора, принятого на вооружение, способного работать в медицине и промышленности.

Разработка универсального манипулятора (УМ) в виде унифицированного модуля позволит расширить область его применения; снизить затраты на производство, обслуживание и ремонт; ускорит процесс внедрения РТК. Целесообразно создать УМ с конструкцией агрегатно-модульного типа, допускающей монтаж манипулятора на колесное или гусеничное шасси, на станину станка и т.п. Номенклатура специализированного навесного оборудования, инструментов и оснастки значительно расширит перечень технологических процессов, автоматизируемых с помощью УМ. Выполнение УМ технологических процессов с использованием специализированной навесной оснастки обуславливает для каждой операции различные требования к быстродействию, энергоэффективности, параметрам изменения обобщенных координат, пределам досягаемости схвата, точности позиционирования и т.п.

Следовательно, обеспечение максимального быстродействия УМ для различных технологических процессов является актуальной научно-прикладной задачей.

**Анализ литературы.** Наибольшее распространение получили роботы с антропоморфной конструкцией манипулятора [1, 2]. Для сохранения функциональности манипулятора при работе в ограниченной рабочей зоне, в априорно неопределенных или экстремальных условиях для каждой узловой точки траектории требуется наличие не менее трёх допустимых конфигураций манипулятора [2, 3]. Для выполнения этого требования следует выбирать кинематическую схему УМ с 6 и более степенями подвижности.

Манипулятор антропоморфного робота — это открытая кинематическая цепь, твердые звенья которой соединены ротационными кинематическими парами пятого класса [1, 2, 3]. Если кинематическая цепь не содержит внутренних замкнутых контуров, то число кинематических пар  $n$  определяет число степеней подвижности манипулятора [1-4]. Положение кинематической цепи манипулятора описывают с помощью обобщенных координат  $q_i(t)$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) - относительных перемещениях в кинематических парах [1-4].

В [1, 2, 5, 6] рассматривается два подхода к составлению уравнений динамики манипуляторов: метод Ньютона - Эйлера и метод Лагранжа - Эйлера. Для моделирования процессов динамики и управления манипулятора целесообразно применять математические пакеты Mathcad [3, 4, 7] или Matlab [8-10]. В [8] представлено псевдо символьное динамическое моделирование (PSDM) для создания упрощенных динамических моделей манипуляторов, конструкция которых содержит до 7 степеней подвижности. Предложенный алгоритм позволяет генерировать код в реальном времени, моделировать динамику и повышать эффективность модели за счет исключения минимально важных элементов. Кроме того, авторами [8] разработана реализация алгоритма в среде MATLAB, которая является общедоступной. Авторами [9] была разработана виртуальная модель кинематики и динамики манипулятора в MATLAB&SIMULINK. Представленная модель использует ПИД-регулятор, а уравнения динамики получены методом Лагранжа - Эйлера.

Для повышения эффективности использования УМ адаптивная система управления должна синтезировать управляющие команды с учетом технологического процесса, условий внешней среды и вектора состояния манипулятора. В настоящее время адаптивные системы управления, как правило, не учитывают особенности динамики манипулятора с нагрузкой (например, недиагональность и нестационарность тензора инерции в системе отсчета, связанной с основанием).

Максимальное быстродействие манипулятора является «классической» задачей оптимального управления. Однако для эффективной работы УМ при анализе вектора состояния манипулятора необходимо учитывать ограничения в кинематических парах и приводах. Мощности двигателей в кинематических парах ограничены, из-за чего ограничены обобщенные ускорения

$$|\ddot{q}_i(t)| \leq \varepsilon_{i \max} \quad (1)$$

и обобщенные скорости

$$|\dot{q}_i(t)| \leq \omega_{i \max} \quad (2)$$

Ограничения по обобщенным скоростям вызваны силами инерции и силами трения. Система неравенств (1) и (2) задаёт допустимую область параметров изменения обобщенных координат.

Если манипулятор действует в экстремальных условиях: при априорной неопределенности окружающей среды, при наличии подвижных препятствий, при частичной потере функциональности (заклинивание кинематических пар, прогиб звена, деформация конструкции и т.п.), то на допустимую область параметров изменения обобщенных координат накладываются дополнительные ограничения.

Для эффективной работы УМ модуль программной самоидентификации системы управления должен выявить существующие ограничения. В зависимости от заданного технологического процесса, результатов самоидентификации манипулятора, анализа текущего состояния рабочего пространства система управления УМ проводит синтез управляющих команд на приводы манипулятора для обеспечения максимального быстродействия.

**Постановка задачи.** Проведем анализ быстродействия для манипулятора с шестью вращательными степенями подвижности (рис.1) [7].

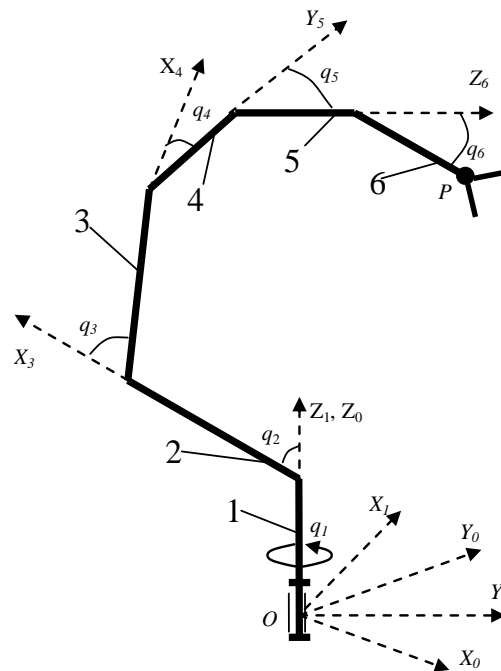


Рис.1. Кинематическая схема манипулятора. Системы координат

Необходимо переместить особую точку P (полюс) схвата манипулятора из начального положения S0 в конечное S6 (рис.2) [11] за минимальное время, с учетом ограничений (1) и (2) в приводах и кинематических парах. В начальном и конечном положениях скорости звеньев равны нулю.

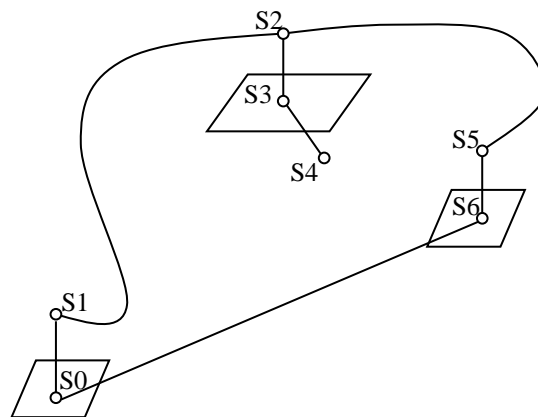


Рис.2. Траектория перемещения схвата манипулятора

Текущее состояние полюса  $P$  характеризуется вектором  $\vec{P}_s = [P_x \ P_y \ P_z \ P_\alpha \ P_\beta \ P_\gamma]^T$ , где  $P_x, P_y, P_z$  – декартовы координаты полюса схвата в системе координат, связанной с основанием манипулятора;  $P_\alpha, P_\beta, P_\gamma$  – угловые координаты, определяющие ориентацию схвата в той же системе координат. Узловым точкам траектории  $S_0, \dots, S_6$  соответствуют вектора  $\vec{P}_{s0}, \dots, \vec{P}_{s6}$  и соответствующие допустимые конфигурации манипулятора. Если приводы в кинематических парах манипулятора могут генерировать различные законы изменения обобщенных координат и скоростей  $q_i(t), \dot{q}_i(t)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) (рис. 3 а, б), то последовательная реализация  $\vec{P}_{s0}, \dots, \vec{P}_{s6}$  может быть обеспечена с разной энергоэффективностью и за разные промежутки времени.

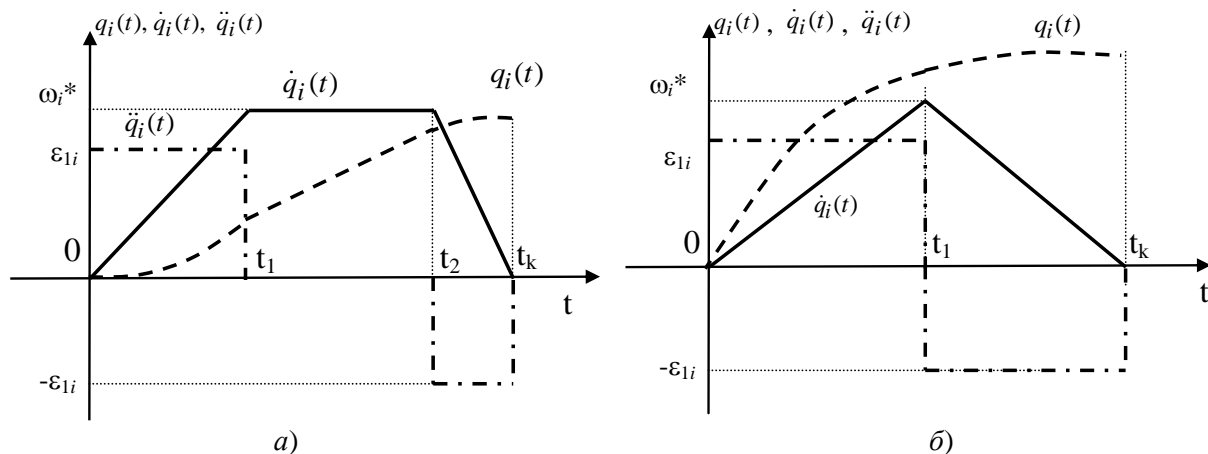


Рис.3. Законы изменения обобщенных координат, скоростей и ускорений манипулятора:

а) трапецевидный закон изменения скорости  $\dot{q}_i(t)$ , б) треугольный закон изменения скорости  $\dot{q}_i(t)$

**Материалы и методы исследования.** Целью исследования является повышение эффективности использования универсальных манипуляторов, а именно обеспечение максимального быстродействия при различных законах изменения обобщенных координат с учетом ограничений. Задача анализа быстродействия сводится к вычислению моментов времени последовательной реализации векторов состояния  $\vec{P}_{s0}, \dots, \vec{P}_{s6}$  в допустимой области параметров изменения обобщенных координат.

Кинематический анализ манипулятора проведен методом преобразования координат Денавита - Хартенберга [4]. Математическую модель манипулятора составляем методом Лагранжа-Эйлера [1, 2]. Задача максимального быстродействия решена с использованием принципа максимума Понтрягина. [12]. Математическое моделирование проводилось в среде Mathcad [13, 14].

Для достижения поставленной цели методом математического моделирования решаем следующие задачи:

1) планирование траектории представим как последовательность преобразований матриц  $4 \times 4$  для обобщенных координат манипулятора [1, 2, 4].

2) определим декартовы координаты точек  $S_0, \dots, S_6$  и угловые координаты требуемой ориентации схвата в этих точках [4, 11].

3) вычислим скорости и ускорения полюса схвата [4, 11], в узловых точках траектории  $S_0, \dots, S_6$ .

4) для каждой узловой точки  $S_0, \dots, S_6$  определим векторы состояния  $\vec{P}_{s0}, \dots, \vec{P}_{s6}$  и соответствующие множества допустимых конфигураций манипулятора  $M_{s0}, \dots, M_{s6}$ , решив обратную задачу о положении манипулятора [1, 2, 4].

5) в кинематических парах генерируются законы изменения обобщенных координат, которые позволяют переход  $\vec{P}_{s0} \rightarrow \vec{P}_{s1} \rightarrow \vec{P}_{s2} \rightarrow \vec{P}_{s3} \rightarrow \vec{P}_{s4} \rightarrow \vec{P}_{s5} \rightarrow \vec{P}_{s6}$ , реализуемый при допустимых конфигурациях манипулятора из множеств  $M_{s0}, \dots, M_{s6}$ .

б) рассчитываются моменты времени последовательной реализации  $\vec{P}_{s0}, \dots, \vec{P}_{s6}$  для различных законов изменения обобщенных координат  $q_i(t), (i=1, 2, \dots, n)$  в приводах манипулятора.

7) на основании полученных данных проводится синтез последовательности управляющих команд на приводы манипулятора, которые задают переход  $\vec{P}_{s0} \rightarrow \vec{P}_{s1} \rightarrow \vec{P}_{s2} \rightarrow \vec{P}_{s3} \rightarrow \vec{P}_{s4} \rightarrow \vec{P}_{s5} \rightarrow \vec{P}_{s6}$ , реализуемый при допустимых конфигурациях манипулятора из множеств  $M_{s0}, \dots, M_{s6}$ , и обеспечивают максимальное быстродействие.

**Результаты исследования.** Рассмотрим пример расчета для вращательной степени подвижности манипулятора  $q_i(t)$ . Примем, что узловой точке траектории  $S_n$  соответствует вектор состояния  $\vec{P}_{sn}$  и множество допустимых конфигураций  $M_{sn}$ . Для реализации первой допустимой конфигурации  $M_{sn}^1$  из заданного множества необходимо обеспечить поворот по обобщенной координате  $q_i(t)$  от начального значения  $q_i(t_{i0})=q_{i0}$  до конечного значения  $q_i(t_{ik})=q_{ik}$  за минимальное время  $t_{ik}$ . На интервале  $[t_{i0}, t_{ik}]$  при управляющем воздействии  $u(t)$

$$u(t) = \begin{cases} u_{\max}, & \text{при } t_0 \leq t \leq t_1, \\ -u_{\max}, & \text{при } t_1 \leq t \leq t_k; \end{cases}$$

привод в кинематической паре манипулятора (рис.3, б) генерирует законы изменения обобщенных ускорений

$$\ddot{q}_i(t) = \begin{cases} \varepsilon_i \cdot u_{\max}, & \text{при } t_{i0} \leq t < t_{i1}, \\ -\varepsilon_i \cdot u_{\max}, & \text{при } t_{i1} < t \leq t_{ik}; \end{cases}$$

скоростей

$$\dot{q}_i(t) = \begin{cases} \varepsilon_i \cdot u_{\max} \cdot t, & \text{при } t_{i0} \leq t < t_{i1}, \\ \varepsilon_i \cdot u_{\max} \cdot (t_{ik} - t), & \text{при } t_{i1} < t \leq t_{ik}; \end{cases}$$

и координат

$$q_i(t) = \begin{cases} 0.5\varepsilon_i \cdot u_{\max} \cdot t^2, & \text{при } t_{i0} \leq t < t_{i1}, \\ 0.5\varepsilon_i \cdot u_{\max} \cdot (t_{i1} - t)^2, & \text{при } t_{i1} < t \leq t_{ik}; \end{cases}$$

при выполнении ограничений (1) и (2).

Для определенности примем:  $t_{i0}=0$ ,  $q_i(0)=0$  рад,  $q_i(t_{ik})=\pi/3$  рад,  $\dot{q}_i(0)=0$  рад/с,  $\dot{q}_i(t_{ik})=0$  рад/с,  $u_{\max}=1$ ,  $|\varepsilon_i|=0,1$  рад/с<sup>2</sup>.

Используя принцип максимума Понтрягина, решим задачу о максимальном быстродействии и вычислим время переключения  $t_{i1}$  и минимальное время  $t_{ik}$  поворота по обобщенной координате  $q_i(t)$  при заданных начальных условиях:

$$t_{ik} = 2 \sqrt{\frac{q_i(t_{ik})}{\varepsilon_i \cdot u_{\max}}} \approx 6,47 \text{ с}, \quad t_{i1} = \frac{t_{ik}}{2} \approx 3,24 \text{ с}.$$

Аналогичные расчеты проводятся для всех приращений обобщенных координат, обеспечивающих допустимую конфигурацию  $M_{sn}^1$ . Минимальное время для реализации конфигурации  $M_{sn}^1$  можно найти, просуммировав минимальное время  $t_{ik}$  поворота по шести обобщенным координатам, по формуле:  $t_{sn}^1 = \sum_{i=1}^6 t_{ik}$ . Подобные расчеты проводятся для каждой узловой точки  $S_0, \dots, S_6$  и соответствующих множеств допустимых конфигураций манипулятора  $M_{s0}, \dots, M_{s6}$ .

На основании полученных данных проводится синтез последовательности управляющих команд на приводы манипулятора, которые задают переход  $\vec{P}_{s0} \rightarrow \vec{P}_{s1} \rightarrow \vec{P}_{s2} \rightarrow \vec{P}_{s3} \rightarrow \vec{P}_{s4} \rightarrow \vec{P}_{s5} \rightarrow \vec{P}_{s6}$ , реализуемый при допустимых конфигурациях манипулятора из множеств  $M_{s0}, \dots, M_{s6}$ , и обеспечивают максимальное быстродействие.



Для реализации предложенного метода анализа быстродействия антропоморфного манипулятора автором разработано программное обеспечение в среде Mathcad. Фрагмент программы для решения прямой задачи о положении схвата антропоморфного манипулятора с шестью вращательными степенями подвижности приведен на рис.4.

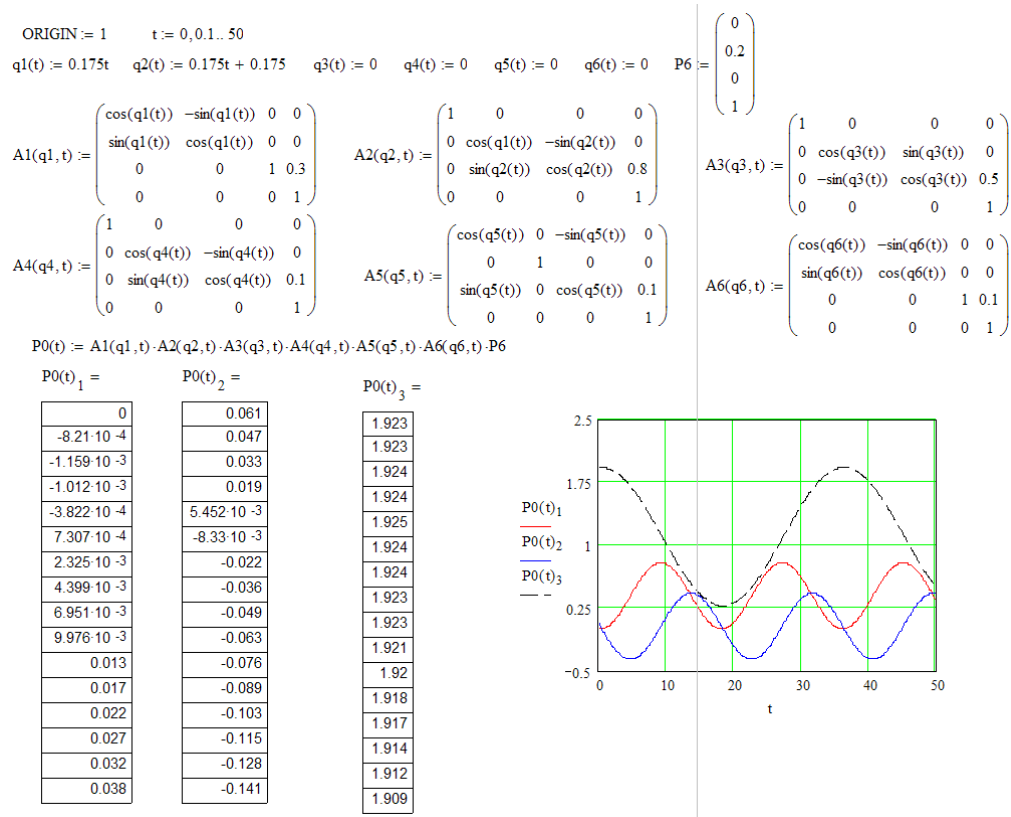


Рис. 4. Решение прямой задачи о положении манипулятора с использованием пакета прикладных программ Mathcad

На рис.5 представлено решение обратной задачи о положении манипулятора с использованием пакета прикладных программ Mathcad.

$$q6 := 0 \quad q5 := 0 \quad q4 := 0 \quad q3 := 0 \quad q2 := 0 \quad q1 := 0$$

$$Xp := -0.008385 \quad Yp := -0.001562 \quad Zp := -0.003057$$

Given

$$Xp = -\sin(q1) \cdot (0.8 \cdot \cos(q2) + 0.5 \cdot \cos(q2 + q3) + 0.3 \cdot \cos(q2 + q3 + q4))$$

$$Yp = \cos(q1) \cdot (0.8 \cdot \cos(q2) + 0.5 \cdot \cos(q2 + q3) + 0.3 \cdot \cos(q2 + q3 + q4))$$

$$Zp = 0.8 \cdot \sin(q2) + 0.5 \cdot \sin(q2 + q3) + 0.3 \cdot \sin(q2 + q3 + q4) + 0.3$$

$$Find(q1, q2, q3, q4) \rightarrow \begin{pmatrix} -49266154688334052028 & -49266154688334052028 & 2.6489311067064527182 \\ -85118058857113176150 & -24177686997757718794 & -85186048553686045836 \\ -2.2904120650186614770 & -2.8998157836122160505 & -2.2897321680529327801 \\ -1.4738129761406227538 & .38085551759191380433 & -1.4870498806529981561 \end{pmatrix}$$

Рис. 5. Решение обратной задачи о положении манипулятора с использованием пакета прикладных программ Mathcad

Предположим, что в системе отсчета  $O_0X_0Y_0Z_0$  (рис.1) заданы координаты узловых точек траектории  $S1(-0,202;0,404;0,002)$ ;  $S2(-0,0084;0,0016;-0,0031)$ . Результаты решения обратной

задачи о положении манипулятора в системе отсчета  $O_0X_0Y_0Z_0$  и наборы значений обобщенных координат  $q_i$ , задающие множества допустимых конфигураций  $M_{s1}^j$  и  $M_{s2}^j$  приведены в табл.1.

Таблица 1. Результаты решения обратной задачи о положении

Координаты узловых точек траектории (м)	Набор	Значения обобщенных координат (рад)				
		$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5 = q_6$
S1(-0,202;0,404;0,002)	$M_{s1}^1$	-0,464	1,529	1,613	2,406	0
	$M_{s1}^2$	-0,464	0,677	2,465	-0,200	0
	$M_{s1}^3$	2,678	2,854	0,288	-1,636	0
	$M_{s1}^4$	2,678	2,124	1,017	0,331	0
S2(-0,0084;0,0016;-0,0031)	$M_{s2}^1$	-0,493	-0,851	-2,290	-1,474	0
	$M_{s2}^2$	-0,493	-0,242	-2,899	0,381	0
	$M_{s2}^3$	2,649	-0,852	-2,289	-1,487	0
	$M_{s2}^4$	2,649	-0,235	-2,907	0,401	0
	$M_{s2}^5$	-0,493	-2,907	2,907	-0,401	0
	$M_{s2}^6$	-0,493	-2,289	2,289	1,487	0
	$M_{s2}^7$	2,649	-2,900	2,900	-0,381	0
	$M_{s2}^8$	2,649	-2,290	2,290	1,474	0

Для движения схвата манипулятора из точки S1 в точку S2 (табл.1) существует 576 последовательностей перемещений по обобщенным координатам. Вычисление момента переключения  $t_{il}$  и минимального времени  $t_{ik}$  поворота обобщенной координаты  $q_i(t)$  для последовательностей перемещений по обобщенным координатам проводились в программной среде Mathcad.

Фрагмент программы для анализа быстродействия манипулятора приведен на рис.6.

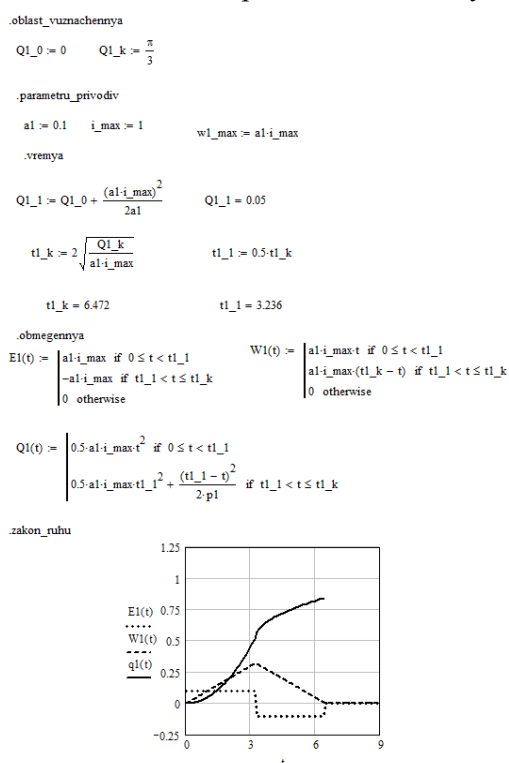


Рис. 6. Анализ быстродействия манипулятора с использованием пакета прикладных программ Mathcad



Программное обеспечение позволяет решить обратную задачу о положении манипулятора и определить множества допустимых конфигураций манипулятора  $M_{s0}, \dots, M_{s6}$  соответствующие векторам состояния  $\vec{P}_{s0}, \dots, \vec{P}_{s6}$ .

Математическое моделирование законов изменения обобщенных координат позволяет уточнить параметры приводов в кинематических парах для обеспечения перехода  $\vec{P}_{s0} \rightarrow \vec{P}_{s1} \rightarrow \vec{P}_{s2} \rightarrow \vec{P}_{s3} \rightarrow \vec{P}_{s4} \rightarrow \vec{P}_{s5} \rightarrow \vec{P}_{s6}$ , реализуемого при допустимых конфигурациях манипулятора из множеств  $M_{s0}, \dots, M_{s6}$ . Моменты времени последовательной реализации  $\vec{P}_{s0}, \dots, \vec{P}_{s6}$  для различных законов изменения обобщенных координат  $q_i(t)$ , ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) в приводах манипулятора рассчитываются с использованием циклов в алгоритме вычисления.

На основании полученных данных проводится синтез последовательности управляющих команд на приводы манипулятора, которые задают переход  $\vec{P}_{s0} \rightarrow \vec{P}_{s1} \rightarrow \vec{P}_{s2} \rightarrow \vec{P}_{s3} \rightarrow \vec{P}_{s4} \rightarrow \vec{P}_{s5} \rightarrow \vec{P}_{s6}$ , реализуемый при допустимых конфигурациях манипулятора из множеств  $M_{s0}, \dots, M_{s6}$ , и обеспечивают максимальное быстродействие.

**Выводы.** Программный метод анализа быстродействия манипулятора позволяет рассмотреть для каждой узловой точки траектории  $S_0, \dots, S_6$  множество допустимых конфигураций манипулятора  $M_{s0}, \dots, M_{s6}$ , решить задачу максимального быстродействия по каждой обобщенной координате  $q_i(t)$  и оценить минимальное время для реализации последовательности  $\vec{P}_{s0} \rightarrow \vec{P}_{s1} \rightarrow \vec{P}_{s2} \rightarrow \vec{P}_{s3} \rightarrow \vec{P}_{s4} \rightarrow \vec{P}_{s5} \rightarrow \vec{P}_{s6}$ .

Разработанное программное обеспечение позволяет на основании полученных данных провести синтез последовательности управляющих команд на приводы манипулятора.

Результаты исследования могут быть использованы на этапе проектирования, внедрения и модернизации робототехнических комплексов и манипуляторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Юревич Е. И. Основы робототехники: учеб. пособие. / Е. И. Юревич // – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 304 с. [Jurevich, E. (2017) Basis of robot, BHV - Petersburg, St. Petersburg, 304 p.]
2. Колубин С. А. Динамика робототехнических систем. Уч. пособие / С. А. Колубин // – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 117 с. [Kolyubin, S. (2017) Dynamics of the robots systems, Publishing house of ITMO University, St. Petersburg, 117 p.]
3. Ащепкова Н. С. Определение оптимальных конфигураций антропоморфного манипулятора с шестью степенями подвижности/ Н. С. Ащепкова // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2019. – № 28 (1353). – С. 94–107. [Ashchepkova, N. (2019) “Determination of optimal configurations of an anthropomorphic manipulator with six degrees of mobility”, Herald of the National Technical University “KhPI”. Subject issue: Information Science and Modelling. - Kharkov: NTU “KhPI”. - 2019. - № 28. - P. 94-107.]
4. Ащепкова Н. С. Метод кинематического и динамического анализа манипулятора с использованием Mathcad / Н. С. Ащепкова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – Харьков: – 2015. – № 5/7 (77). – С. 54–63. [Ashchepkova, N. (2015) “Mathcad in the kinematic and dynamic analysis of the manipulator”, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 5/7 (77). – pp. 54 – 63. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51105.]
5. Bai S., Zhou L., Wu G., Manipulator Dynamics// Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, pp. 1855-1872, Springer, 2015. [Bai, S., Zhou, L. and Wu, G. (2015) “Manipulator Dynamics”, in book: Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, Springer, – pp. 1855–1872.]
6. Orsag M., Korpela C., Oh P. Y., Bogdan S., Aerial Manipulator Dynamics// Aerial Manipulation, pp. 33-85, Springer, 2018. [Orsag, M., Korpela, C., Oh, P. Y. and Bogdan, S. (2018) “Aerial Manipulator Dynamics”, in book: Aerial Manipulation, Springer, – pp. 33 – 85.]
7. Ащепкова Н. С. Моделювання та аналіз точності позиціонування маніпулятора/ Н. С. Ащепкова // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2017. – № 19 (1241). – С. 34–42. [Ashchepkova, N. (2019) “Determination of optimal configurations of an antropomorphic manipulator with six degress of mobility”, Herald of the National Technical University “KhPI”. Series of: Informatics and Modeling. Vol. 28(1353), pp. 94 – 107, DOI: 10.20998/2411-0558.2019.28.01.]
8. Lloyd S., Irani R., Ahmadi M., A numeric derivation for fast regressive modeling of manipulator dynamics// Mechanism and Machine Theory, №156:104149, February 2021. [Lloyd, S., Irani, R. and Ahmad, M. (2021) “A numeric derivation for fast regressive modeling of manipulator dynamics”, Mechanism and Machine Theory, №156:104149, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104149.]

9. Khurpade J., Dhami S. S, Banwait s. S, A Virtual Model of 2D Planar Manipulator Dynamics// International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), December 2018. [Khurpade, J., Dhami, S. S. and Banwait, s. S. (2018) “A Virtual Model of 2D Planar Manipulator Dynamics”, International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT), DOI: 10.1109/ICSSIT.2018.8748674.]
10. Tian S. X., Wang S. Z, Dynamic Modeling and Simulation of a Manipulator with Joint Inertia//, International Symposium on Information and Automation, ISIA 2010: Information and Automation, pp. 10 – 16, 2010. [Tian, S. X. and Wang, S. Z. (2010) “Dynamic Modeling and Simulation of a Manipulator with Joint Inertia”, International Symposium on Information and Automation, ISIA 2010: Information and Automation, pp. 10–16.]
11. Ащепкова Н. С. Анализ удерживающих усилий схвата манипулятора / Н. С. Ащепкова // World science engineering sciences. № 7(35), Vol.5, November 2019. – P. 26 – 31. [Ashchepkova, N. (2019) “Analysis of the holding forces of the grip of the manipulator”, World science engineering sciences. № 7(35), Vol.5, November 2019. – P. 26 – 31.]
12. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: Підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук // – Київ: Либідь, 2007. – 656 с. [Porovych, M. and Kovalchuk, O. (2007) Theory of automatic control: Textbook – Kyiv, Lybid, 656 p.]
13. Fausett, L. V. (2002) Numerical methods using Mathcad, Prentice Hall, 702 p. [Fausett, L. V. (2002) Numerical methods using Mathcad, Prentice Hall, 702 p.]
14. Maxfield B. (2006). Engineering with Mathcad: using Mathcad to create and organize your engineering calculation, Butterworth-Heinemann, 512 p. [Maxfield, B. (2006) Engineering with Mathcad: using Mathcad to create and organize your engineering calculation, Butterworth-Heinemann, 512 p.]