

УДК 572.512.81

М.А. Полякова*Севастопольский национальный технический университет**E-mail: pu260@sevcom.net***СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА АНТРОПОМОРФНОГО МАНИПУЛЯТОРА**

Получены оптимальные траектории движения рабочего органа (базовой точки захватного устройства) плоского двухзвенного антропоморфного манипулятора в соответствии с синергетическим критерием качества. Показаны различия в результатах реализации критерия минимального изменения вращающих моментов и синергетического критерия.

В статье [1] обоснована и разработана методика планирования оптимальных траекторий движения рабочего органа плоского антропоморфного манипулятора в соответствии с критерием минимального изменения вращающих моментов в шарнирах, предложенным Y. Uno, M. Kawato и R. Suzuki [2]. Показано, что генерируемые при этом траектории обладают кинематической инвариантностью, свойственной свободным движениям руки человека в горизонтальной плоскости. Но динамическая инвариантность, также свойственная движениям руки, практически отсутствует.

По мнению многих исследователей, инвариантные свойства, наблюдаемые при свободных движениях, являются проявлением их оптимальности. В частности, динамическая инвариантность, называемая линейной синергией, состоит в приближенной линейной зависимости между вращающими моментами, возникающими в сочленениях элементов руки и, как отмечается в [3], может быть представлена выражением

$$\tau_1 = K_D \cdot \tau_2, \quad (1)$$

где $\tau_1 = \tau_s$, $\tau_2 = \tau_e$ – вращающие моменты при плоском движении в сочленении плеча (shoulder) с условно неподвижной лопаткой и плеча с предплечьем (elbow), соответственно; K_D – коэффициент пропорциональности, зависящий от направления движения базовой точки кисти к цели. В результате статистической обработки результатов экспериментов в [3] получена формула для определения оценок коэффициента пропорциональности K_D

$$K_D = 2,05 \frac{0,45\Delta\theta_2 + \Delta\theta_1 - 4,6}{\Delta\theta_2 + 0,18\Delta\theta_1 - 5,3}, \quad (2)$$

где символ Δ обозначает изменение соответствующего угла ($\theta_2 = \theta_e$ – угол поворота предплечья, $\theta_1 = \theta_s$ – угол поворота плеча) по отношению к начальному. Линейная синергия выявлена также и в экспериментах с различными по величине нагрузками и скоростями движения [4].

Наблюдаемые синергетические свойства позволяют предполагать, что при выполнении в общем случае пространственных движений на уровне центральной нервной системы происходит разделение имеющихся у руки степеней свободы на согласованно управляемые группы и число независимых параметров регулирования, меньше реального числа степеней свободы руки. Как отмечается в [5], группировка регулируемых параметров дает “один из весьма общих и эффективных способов управления сложными системами”.

Методы решения задач динамики и управления антропоморфными механизмами с использованием синергетических принципов уже находят достаточно широкое применение. В их основе лежит сформулированная Н.Бернштейном [6] проблема: как на уровне центральной нервной системы биологические объекты формируют выбор определенных двигательных команд из бесконечного числа возможных? Применительно к робототехнике эта проблема может быть сформулирована так: как найти единственное, из бесконечного числа возможных, решение обратной задачи кинематики механической системы с числом степеней свободы большим, чем это требуется для выполнения определенной двигательной задачи?

При решении проблемы Н.Бернштейна обычно на гипотетическом уровне вводятся специфические ограничения на управляемые переменные в виде линейных или нелинейных соотношений между ними или их производными, с помощью которых и устраняется избыточность (redundance) механической системы. Известны, например, методы: полуобратных заданных синергий [7], оптимизирующих синергий [8 и др.], распределенного позиционирования [9], обратных задач динамики в управлении [10 и др.], в котором синергетика используется неявно. Вследствие того, что природа синергетических механизмов практически не изучена, все они по существу основываются на эвристических подходах и в целом не позволяют получать решения, соответствующие реальным процессам. В связи с этим, дальнейшее изучение природы синергий и разработка обоснованных, не

противоречащих многочисленным экспериментам, принципов синергетического управления механическими объектами с избыточным числом степеней свободы остаются важными и актуальными задачами.

Целью работы является обоснование критерия качества планирования траекторий движения рабочего органа плоского антропоморфного манипулятора типа SCARA, позволяющего находить решения, характеризующиеся одновременно кинематической и динамической инвариантностью. Такой критерий качества может считаться синергетическим, так как позволяет получать единственные решения для механической системы с избыточным числом степеней свободы, т.е. решить задачу ее самоорганизации.

Результаты исследований, представленные в данной статье, основаны на использовании двух вариантов планируемых траекторий при движении базовой точки рабочего органа манипулятора: а) из центра рабочей области в 12 точек, равномерно расположенных на окружности радиуса R ; б) из периферийной точки рабочей области, расположенной на окружности радиуса R в 11 других, равномерно расположенных на этой же окружности (рисунок 1).

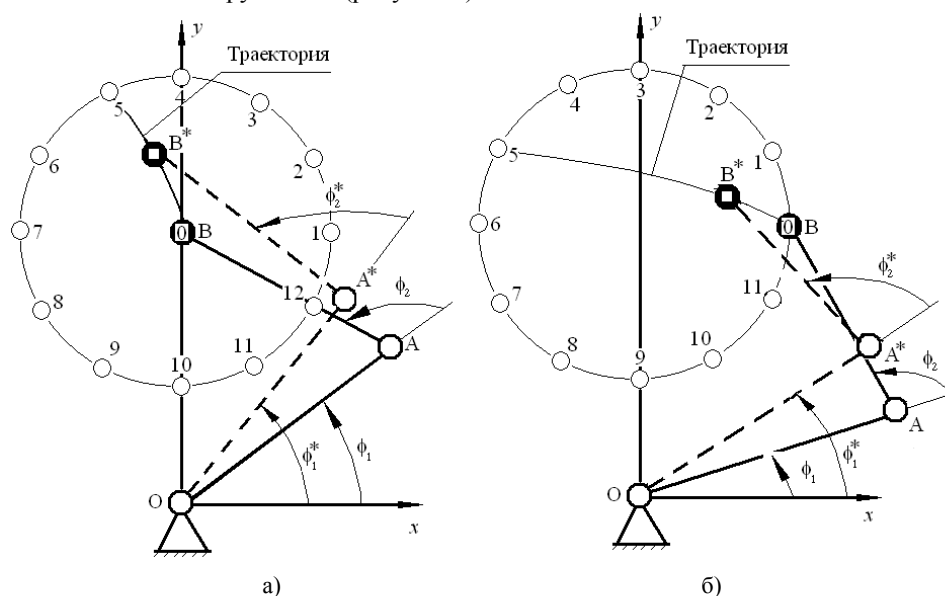


Рисунок 1 – Схемы генерируемых траекторий движения базовой точки рабочего органа манипулятора

Исследовались два варианта параметров звеньев модели манипулятора, представленные в таблице 1. В первом из них соотношения между параметрами соответствовали усредненным антропометрическим данным, полученным при измерениях параметров руки человека, во втором – выбраны, в общем, произвольно, путем изменения последовательности расположения звеньев в кинематической цепи.

В результате систематического исследования критерия минимального изменения вращающих моментов было установлено, что при его реализации формы траекторий движения базовой точки рабочего органа манипулятора зависят от значений параметров звеньев и соотношений между ними при различных направлениях движения к цели. В частности, траектории заметно искривляются в случаях, когда соотношения между параметрами звеньев существенно отличаются от принятых в варианте 1 или подобных им. В качестве иллюстраций траектории, полученные для двух вариантов параметров звеньев, изображены на рисунках 2 и 3.

Таблица 1 – Значения параметров модели

Параметр	Значение параметра			
	Звено 1 (плечо)		Звено 2 (предплечье)	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
m , кг (масса звена)	1,3	1,5	1,5	1,3
J , кг · м ² (момент инерции звена)	0,07	0,1	0,1	0,07
l , м (длина звена)	0,25	0,35	0,35	0,25
l_S , м (расстояние от центра шарнира до центра масс звена)	--	--	0,15	0,15
B , (Н · м · с)/рад (коэффициент сопротивления)	0,7	0,8	0,8	0,7
$B_{12} = B_{21}$, (Н · м · с)/рад (коэффициент сопротивления)	0,18	0,18	0,18	0,18

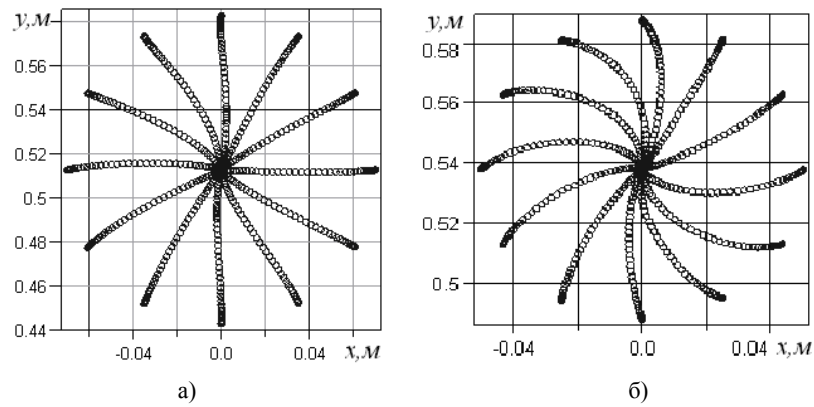


Рисунок 2 – Траектории движения базовой точки (B) рабочего органа манипулятора из центра рабочей области: а) первый вариант параметров звеньев; б) второй вариант параметров звеньев

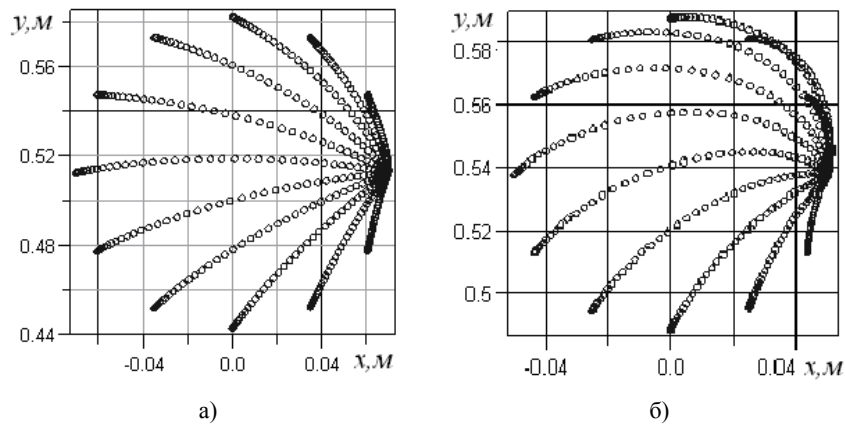


Рисунок 3 – Траектории движения базовой точки (B) рабочего органа манипулятора из периферийной точки рабочей области: а) первый вариант параметров звеньев; б) второй вариант параметров звеньев

Подобные траектории свойственны различным средним скоростям движения базовой точки. Следует также отметить, что при планировании траекторий в соответствии со схемами а) и б), изображенными на рисунке 1, графики тангенциальной скорости базовой точки имеют близкий к симметричному относительно оси времени колоколообразный профиль, свойственный свободным движениям кисти руки человека в горизонтальной плоскости. Но, во всех случаях, как отмечалось выше, зависимостей между вращающими моментами в шарнирах вида (1) или близких к ним не наблюдается.

Предполагая, что организация на уровне центральной нервной системы движений руки человека оптимальна и они приближенно обладают свойством линейной синергии будем считать, что подобная организация движений звеньев манипулятора, имеющего антропоморфную структуру (например, типа SCARA), также оптимальна и ей, в свою очередь, свойственны оптимальные, с этой точки зрения, траектории. В связи с этим, в соответствии с (1), введем функцию ошибки линейной синергии

$$E_S = \tau_1 - \alpha \tau_2 - \beta, \quad (3)$$

где α и β – некоторые константы; вращающие моменты в шарнирах определяются следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \tau_1 = & (J_1 + J_2 + 2m_2 l_1 l_{2S} \cos \varphi_2 + m_2 l_1^2) \ddot{\varphi}_1 + (J_2 + m_2 l_1 l_{2S} \cos \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 - \\ & - m_2 l_1 l_{2S} (2\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 + B_{11} \dot{\varphi}_1 + B_{12} \dot{\varphi}_2; \\ \tau_2 = & (J_2 + m_2 l_1 l_{2S} \cos \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 + J_2 \ddot{\varphi}_2 + m_2 l_1 l_{2S} \dot{\varphi}_1^2 \sin \varphi_2 + B_{21} \dot{\varphi}_1 + B_{22} \dot{\varphi}_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь m_1, m_2, J_1, J_2 – соответственно, массы и моменты инерции звеньев модели; l_1 – длина звена 1; l_{2S} – расстояние от центра сочленения звеньев 1 и 2 до центра масс звена 2; $\varphi_1, \varphi_2, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2$ – соответственно, обобщенные координаты (углы поворота звеньев), скорости и ускорения; $B_{11}, B_{22}, B_{12}, B_{21}$ – коэффициенты сопротивления, принятые постоянными.

Результаты многочисленных экспериментов свидетельствуют о том, что в действительности значения функции E_S (применительно к условиям свободного движения руки) при любых $t \in [t_0, t_k]$ (t_0

и t_k – времена начала и окончания движения, соответственно), в общем, отличны от нуля, так как движения элементов руки лишь приближенно характеризуются свойством линейной синергии, но все же относительно малы. Этот факт объясняется тем, что коэффициенты корреляции вращающих моментов, если их рассматривать как случайные величины, близкие к ± 1 и, следовательно, экспериментальные данные всегда могут быть достаточно точно представлены прямой $\tau_1 = \alpha \tau_2 + \beta$, получаемой в результате интерполяции зависимости $\tau_1 = f(\tau_2)$. Таким образом, при планировании траекторий, обладающих свойством линейной синергии, определенный интерес представляет не только функция (3), но и ее изменение, т.е.

$$\frac{dE_S}{dt} = \frac{d\tau_1}{dt} - \alpha \frac{d\tau_2}{dt}. \quad (5)$$

Потребуем, чтобы суммарное изменение модуля функции ошибки за весь период движения базовой точки рабочего органа из начальной точки траектории в конечную было бы минимальным, в результате чего придем к критерию качества планирования траектории, который можно считать синергетическим:

$$\Phi = \int_{t_0}^{t_k} \left(\frac{dE_S}{dt} \right)^2 dt \Rightarrow \min. \quad (6)$$

Необходимое условие экстремума функционала (6) с учетом соотношений (4) и (5) приводит к системе двух нелинейных дифференциальных уравнений Эйлера-Пуассона шестого порядка, зависящих от параметра α , значение которого в общем случае не определено. Решением этой системы с учетом двенадцати граничных условий является множество коротеж вида

$$B = \{ \langle \phi_{1i}(t, \alpha), \phi_{2i}(t, \alpha) \rangle, i \in N, \alpha \in [\alpha_1, \alpha_2] \}, \quad (7)$$

где α_1 и α_2 – граничные значения параметра α , которые могут быть выбраны, например, с использованием оценки (2) или каким-либо другим способом. Все коротежи множества (7) равноправны по отношению к критерию (6), но можно предположить, что некоторые из них оптимальны с точки зрения других критериев, соответствующих смыслу решаемой задачи. Например, при некоторых значениях α решения могут характеризоваться наибольшей корреляционной связью между вращающими моментами в шарнирах, при других – минимальной средней мощностью или минимальной суммарной работой и т.д. Задача выбора оптимального значения α является многокритериальной. В дальнейшем за критерий качества принята минимальная суммарная работа за время движения базовой точки из начального состояния в конечное

$$A = \int_{t_0}^{t_k} \left(\tau_1 \frac{d\phi_1}{dt} + \tau_2 \frac{d\phi_2}{dt} \right) dt \Rightarrow \min. \quad (8)$$

Решения задачи планирования траекторий в соответствии с критериями (6) и (8) получены с использованием методики, изложенной в [1] в форме ортогональных полиномов Якоби при двенадцати граничных условиях, задаваемых в начальных и конечных точках в соответствии со схемами рисунка 1 и значениями параметров звеньев, приведенных в таблице 1, при различных средних скоростях движения. Анализ решений показывает, что во всех случаях полученные траектории характеризуются кинематической инвариантностью, т.е. они по форме близки к прямым и имеют относительно небольшие кривизны, а колоколообразные формы профилей графиков тангенциальных скоростей базовой точки близки к симметричным относительно оси времени.

Корреляционная связь между вращающими моментами в шарнирах значительно выше, чем в решениях, получаемых в соответствии с критерием минимального изменения вращающих моментов. Следует отметить, что оптимальные, с точки зрения критериев (6) и (8), траектории реализуются при действии на звенья вращающих моментов, корреляционная связь между которыми изменяется при изменении направления движения базовой точки к цели и ее средней скорости.

На рисунках 4,5 и 6 в качестве примера приведены графики некоторых зависимостей, получаемых при планировании траектории движения базовой точки (согласно схеме а), рисунок 1) из центра рабочей области в положение 9 за время $t = 0,5$ с. Аналогичные зависимости получены и для других условий движения.

Анализ графиков свидетельствует об эволюции решений задачи планирования траекторий в зависимости от изменений параметра α . Кроме того, заметно увеличение корреляционной связи между вращающими моментами в случае использования синергетического критерия (6). В данном примере оптимальное решение (в соответствии с дополнительным критерием (8)) получено с коэффициентом корреляции $k = -0,9706$. Для сравнения, при использовании критерия минимального изменения

вращающих моментов $k = -0,8465$. Как правило, при других направлениях движения базовой точки к цели различие в корреляционной связи более существенно.

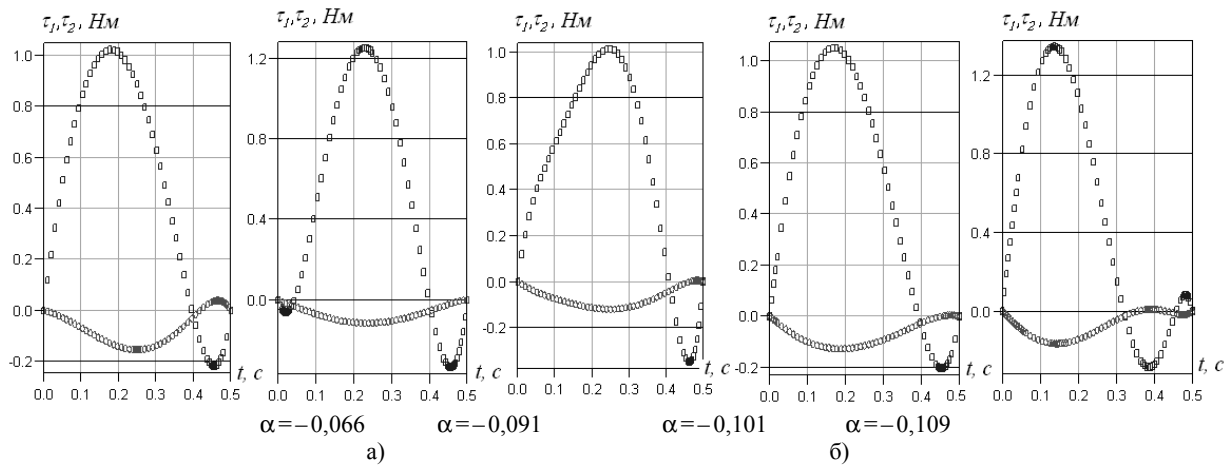


Рисунок 4 – Графики изменения вращающих моментов в шарнирах при реализации траекторий, полученных для различных критериев: а) критерий минимального изменения вращающих моментов; б) синергетический критерий (6)

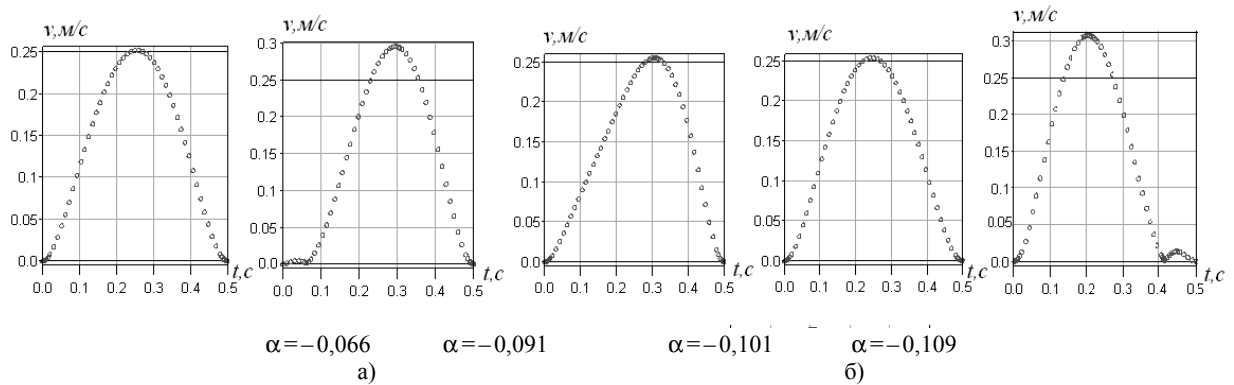


Рисунок 5 – Графики изменения тангенциальной скорости базовой точки при реализации траекторий, полученных с учетом различных критериев:

а) критерий минимального изменения вращающих моментов; б) синергетический критерий (6)

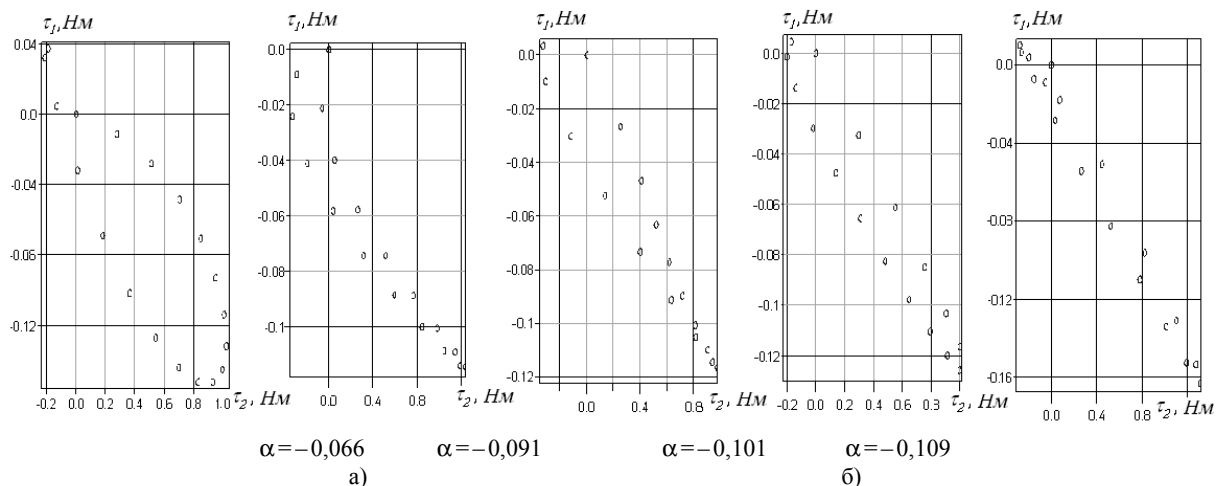


Рисунок 6 – Графики зависимостей вида $\tau_1 = f(\tau_2)$ при реализации траекторий, полученных с учетом различных критериев: а) критерий минимального изменения вращающих моментов; б) синергетический критерий (6)

Следует отметить, что оптимальные, в соответствии с критериями (6) и (8) траектории не всегда характеризуются наибольшим значением корреляционной связи между вращающими моментами. В рассматриваемом примере наибольшее значение $k = -0,9925$ получено при $\alpha = -0,110$ и, как показано на графиках, изображенных на рисунке 7 $\alpha < \alpha_{opt}$. Анализ множества полученных решений показывает, что

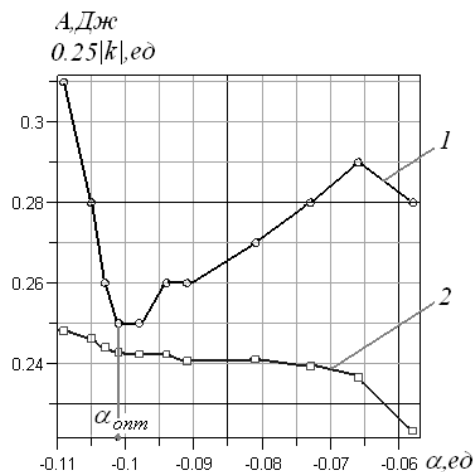


Рисунок 7 – Графики зависимостей:

$A = f(\alpha)$ – кривая 1;

$k = \text{abs}(g(\alpha))$ – кривая 2

направлениях движения базовой точки к цели, характерная при свободных движениях руки человека. Реализуемые траектории в целом характеризуются не только кинематической, но и динамической инвариантностью.

3. Изменение параметров звеньев и соотношений между ними приводит к изменению соотношений между вращающимися моментами для реализации оптимальных траекторий, но формы траекторий при этом практически не изменяются.

В дальнейших исследованиях планируется построение поверхностей, характеризующих изменение параметра α в зависимости от изменений углов поворота звеньев манипулятора для различных звеньев, которые могут быть использованы при синтезе нейросетевых или нейронечетких алгоритмов управления манипуляторами.

Библиографический список

1. Полякова М.А. Планирование оптимальных траекторий движения исполнительного органа антропоморфного манипулятора / М.А. Полякова // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2006. — № 75. — С. 22–32.
2. Uno Y. Formation and control of optimal trajectory in human arm movement – minimum torque-change model / Y. Uno, M. Kawato, R. Suzuki // Biological Cybernetics. — 1989. — Vol. 61. — P. 89–101.
3. Directional control of planar human arm movement / G.L. Gottlieb, Q. Song, G.L. Almeida, D. Hong, D. Corcos // Journal of Neurophysiology. — 1997. — Vol. 78. — № 6. — P. 2985–2998.
4. Coordinating two degrees of freedom during human arm movement: load and speed invariance of relative joint torques / G.L. Gottlieb, Q. Song, D.A. Hong, D.M. Corcos // Journal of Neurophysiology. — 1996. — Vol. 76. — № 5. — P. 3196–3206.
5. Фомин С.В. Некоторые математические проблемы биологии / С.В. Фомин // Биофизика. — 1970. — Т. XV. — Вып. 2. — С. 344–351.
6. Bernstein N.A. The Coordination and Regulation of Movements / N.A. Bernstein // Oxford Pergamon. — 1967. — № 6. — P. 77–92.
7. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы / М. Вукобратович. — М.: Мир, 1976. — 543 с.
8. Бербюк В.Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем / В.Е. Бербюк. — К.: Наук. думка, 1989. — 192 с.
9. Redundancy problem in writing: from human to anthropomorphic robot arm / V.Potkonjak, M.Popović, M.Lazarević, J.Sinanović // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics: part B: Cybernetics. — 1988. — V. 28. — № 6. — P. 790–805.
10. Крутько П.Д. Синтез алгоритмов управления движением роботов по методу обратных задач динамики. Координатная форма задания траектории / П.Д. Крутько, Н.А. Лакота // Техническая кибернетика. — 1982. — № 1. — С. 154–159.

Поступила в редакцию 20.11.2006 г.

при некоторых значениях α корреляционная связь достигает максимума, но в этих случаях во-первых, характер движения базовой точки перестает быть двухфазным (разгон – торможение), во-вторых, энергетика процесса существенно выше, чем при $\alpha = \alpha_{\text{opt}}$.

Отметим также, что с точки зрения критерия (8) оптимальные решения, получаемые в соответствии с двумя рассмотренными критериями качества, практически не отличаются.

Систематический анализ решений, полученных при совместной реализации критериев (6) и (8) позволяет сделать следующие выводы.

1. С энергетической точки зрения реализация траекторий, найденных в соответствии с синергетическим критерием, практически совпадают с получаемыми в соответствии с критерием минимального изменения вращающихся моментов.

2. Установлена связь между вращающимися моментами в шарнирах при различных средних скоростях и