

А. С. Прокопов¹, Е. С. Брискин²

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ
ДВУХСЕКЦИОННОГО РОБОТА***

¹ АО «ФНПЦ "Титан-Баррикады"»

² Волгоградский государственный технический университет

proas98@mail.ru

Рассматривается движение робота, состоящего из двух секций, шарнирно связанных между собой актуатором. Изучается квазипоступательное движение секций роботов, характеризующееся минимальным среднеквадратичным отклонением их геометрических центров от горизонтальной оси *ОХ*. Оптимальность оценивается критерием, состоящим из двух показателей: минимум затрачиваемой энергии на разгон каждой секции и минимум среднеквадратичных углов их поворота.

Ключевые слова: двухсекционные роботы, голономная связь, тормозные стойки, оптимальное движение.

© Прокопов А. С., Брискин Е. С., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00477, <https://rscf.ru/project/24-21-00477/>

A. S. Prokopov¹, E. S. Briskin²SELECTION OF THE OPTIMAL MODE OF MOTION
OF A TWO-SECTION ROBOT¹ JSC "Federal Research and Production Center "Titan-Barricades"² Volgograd State Technical University

We consider the movement of a robot consisting of two sections hingedly connected to each other by an actuator. The quasi-translational motion of robot sections is studied, characterized by the minimum standard deviation of their geometric centers from the horizontal OX axis. Optimality is assessed by a criterion consisting of two indicators: the minimum energy spent on accelerating each section and the minimum root-mean-square angles of their rotation.

Keywords: two-section robots, holonomic communication, brake struts, optimal movement.

Введение

Робот состоит из двух секций, на которых установлены тормозные стойки, обеспечивающие в определенный момент времени их надежный контакт с опорной поверхностью. На каждой из секций имеются шаровые опоры, находящиеся в постоянном контакте с горизонтальной поверхностью и обеспечивающие минимальность сил сопротивления движению. Секции связаны между собой актуатором, шарнирно закрепленным в геометрических центрах каждой из секций.

Движение робота осуществляется за счет

изменения длины актуатора (расстояния AB) и взаимодействия одной из тормозных стоек с опорной поверхностью на подвижной секции при полном торможении другой секции.

Подобные кинематические схемы роботов изучаются [1]; отличие их состоит в наличии горизонтальных стоек, обеспечивающих важное свойство – устойчивость движения [2–4].

Нумерация опор для каждой платформы двухсекционного робота начинается с левой задней опоры по часовой стрелке. Нумерация платформ идет слева направо (рис. 1).

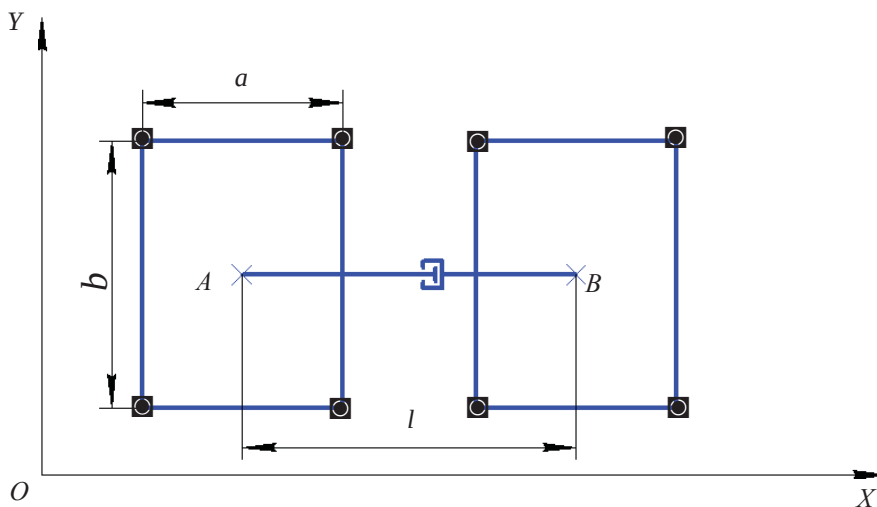


Рис. 1. Кинематическая схема и геометрические размеры двухсекционного робота

С целью упрощения все параметры приведены в безразмерных условных единицах. Основные геометрические соотношения: $a = 30$; $b = 40$; $AB = l = 50$.

1. Постановка задачи

Ставится задача оценки квазипоступательного режима движения по критерию оптимальности I

$$I = k_1 I_1 + k_2 I_2, \quad (1)$$

где k_1, k_2 – весовые коэффициенты показателей; I_1, I_2 – показатели критерия оптимальности, характеризующие энергозатраты на преодоление

расстояния S и величины среднеквадратичных амплитуд угловых колебаний секций робота соответственно.

Рассматривается режим движения с постоянной на каждом шаге величиной δl удлинения, а затем укорочения штока актуатора AB . Удлинение и укорочение длины актуатора происходит с одинаковым постоянным ускорением. Тогда расстояние, преодолеваемое каждой секцией S , осуществляется за $2n$ циклов. В каждом цикле любая из секций с равными массами приобретает кинетическую энергию

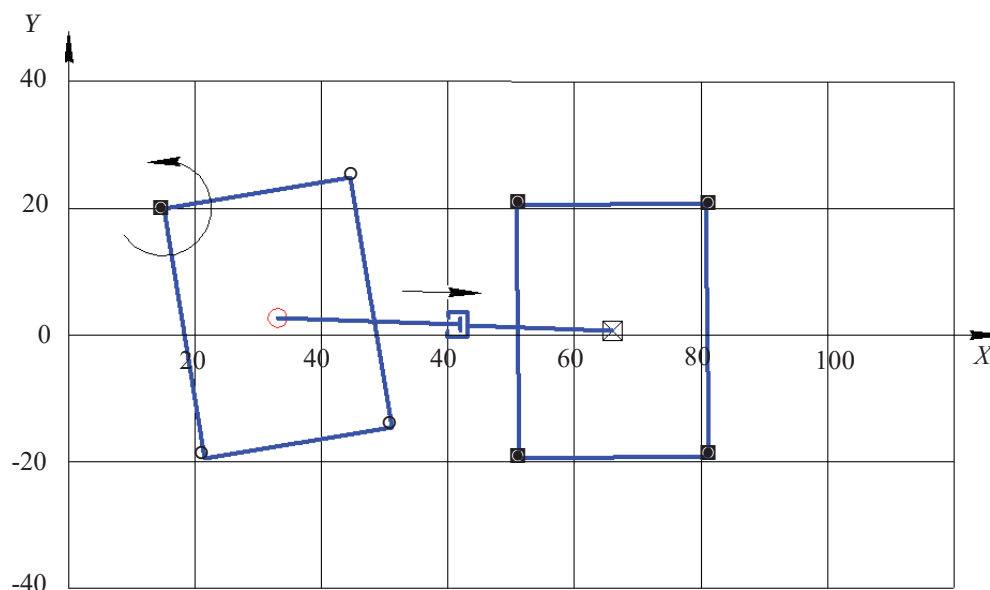


Рис. 4. Поворот первой секции вокруг первой тормозной стойки:

■ – заторможенные; ○ – свободные

3. Анализ режимов движения

Для оценки выбранного режима движения используется критерий эффективности, который определяется в соответствии с (1).

Для анализа выбраны пять вариантов, отличающихся величиной изменения длины актуатора.

В табл. 1 условно обозначены работающие

приводы, обеспечивающие движение: номер фиксированной платформы – I; номер фиксированной опоры на подвижной платформе – II; изменение длины актуатора от предыдущего положения – III, в условных единицах. В таблице представлен один цикл. Затем работа приводов повторяется. Варианты отличаются только выдвиганием штока актуатора.

Таблица 1

Варианты режимов движения робота

№ шага	Действия приводов и актуатора														
	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3			Вариант 4			Вариант 5		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	1	1	+1	1	1	+2	1	1	+3	1	1	+4	1	1	+5
2	1	4	+1	1	4	+2	1	4	+3	1	4	+4	1	4	+5
3	2	2	-1	2	2	-2	2	2	-3	2	2	-4	2	2	-5
4	2	3	-1	2	3	-2	2	3	-3	2	3	-4	2	3	-5
5	1	4	+1	1	4	+2	1	4	+3	1	4	+4	1	4	+5
6	1	1	+1	1	1	+2	1	1	+3	1	1	+4	1	1	+5
7	2	3	-1	2	3	-2	2	3	-3	2	3	-4	2	3	-5
8	2	2	-1	2	2	-2	2	2	-3	2	2	-4	2	2	-5

Примечание: $+k$ – удлинение; $-k$ – укорочение на k единиц.

4. Анализ результатов

Количественный анализ курсовых колебаний, возникающих при поступательном движении двухсекционного робота, для различных вариантов движения представлен в табл. 2. Приведены среднеквадратичные отклонения

геометрических центров в условных единицах продольных ΔX_{ci} , поперечных ΔY_{ci} и угловых $\Delta \varphi_{ci}$ перемещений при движении робота. Все варианты приведены с завершением движения в одном и том же положении.

Таблица 2

Среднеквадратичные отклонения в условных единицах

	Номер секции									
	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
ΔX_{ci}	1,01	0,99	2,01	1,98	3,06	3,04	4,11	4,09	5,19	5,18
ΔY_{ci}	0,53	0,53	1,09	1,08	1,67	1,67	2,32	2,32	3,04	3,03
$\Delta \varphi_{ci}$	2,03	2,03	4,07	4,07	6,13	6,14	8,24	8,24	10,38	10,38

Таблица 3

Результаты движения робота

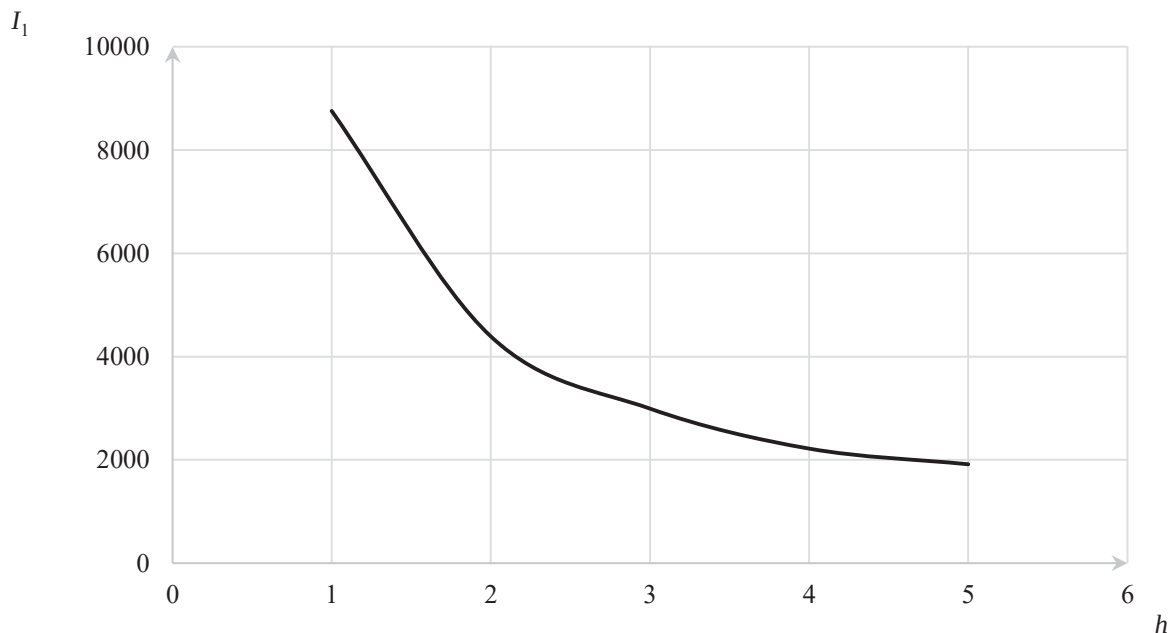
Вариант Критерий	1	2	3	4	5
I_1	8758	4390	2992	2217	1913
n	448	224	148	112	96

В табл. 3 представлена затрачиваемая работа, характеризующая параметром I_1 в относительных единицах в соответствии с (4), которая отражает потерю кинетической энергии и ко-

личество циклов работы актуатора n для достижения конечного положения робота при различных вариантах.

На графике (рис. 5) приведена зависимость показателя I_1 от безразмерной величины выдвигания штока актуатора h .

На графике (рис. 6) отражена зависимость среднеквадратичного углового отклонения, показателя I_2 , секции робота в условных единицах от безразмерной величины выдвигания штока актуатора h .

Рис. 5. Зависимость показателя I_1 от изменения длины штока актуатора

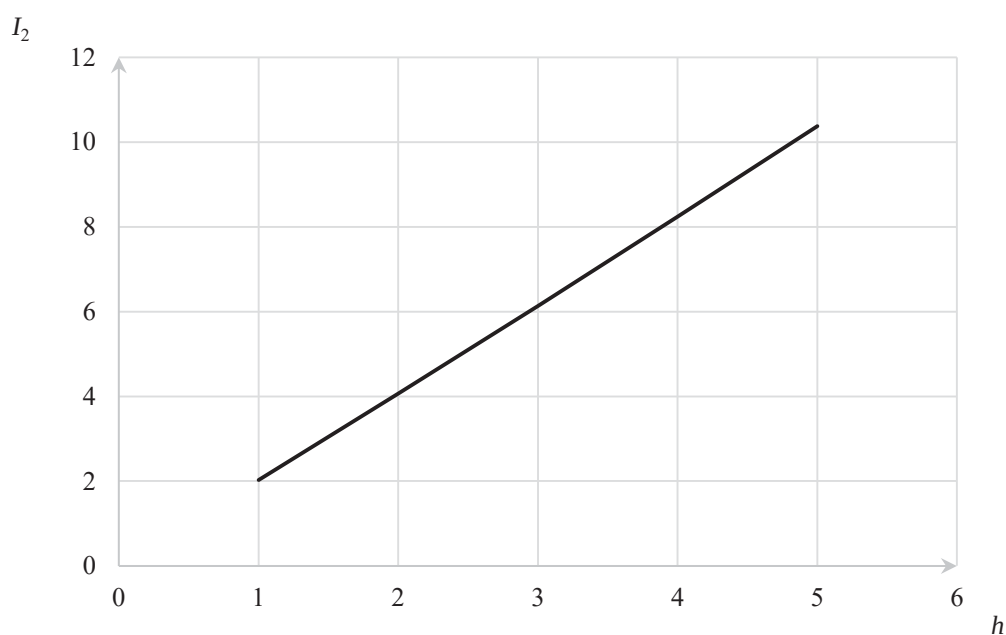


Рис. 6. Зависимость показателя I_2 от изменения длины штока актуатора

Для определения оптимального решения движения следует на основе полученных результатов (рис. 5, 6) установить зависимость $I_2 = I_2(I_1)$.

С другой стороны, на основе (1) получена следующая зависимость:

$$I_2 = \frac{I}{k_2} - \frac{k_1}{k_2} I_1. \quad (5)$$

На рис. 7 приведены графики соответствующих зависимостей (5) при различных соотношениях между k_1 и k_2 в зависимости $I_2 = I_2(I_1)$, полученной из сопоставления (4) зависимостей, представленных на рис. 5, 6.

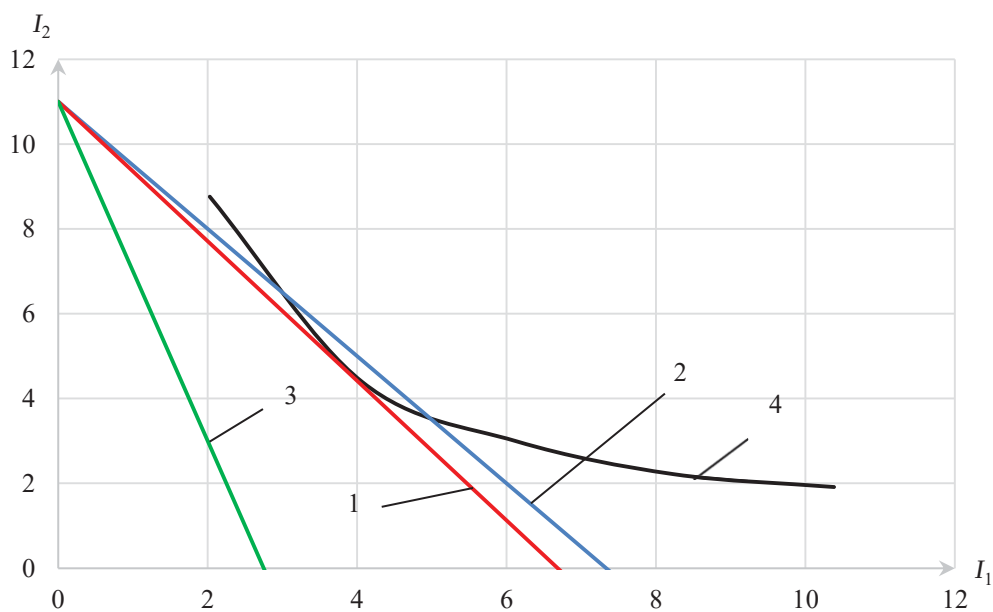


Рис. 7. График определения оптимального режима движения:
 1 – $k_1 = 0,6$ и $k_2 = 0,4$; 2 – $k_1 = 0,62$ и $k_2 = 0,38$; 3 – $k_1 = 0,8$ и $k_2 = 0,2$ для зависимости (5);
 4 – зависимость $I_2 = I_2(I_1)$, полученная из анализа уравнений движения

Выводы

Предложенный метод решения двухкритериальной однопараметрической задачи оптимизации для определения величины выдвижения штока актуатора показывает, что при заданных величинах критерия оптимальности и весовых коэффициентов возможно отсутствие решения, когда не имеет места пересечение прямой 3 с кривой 4; возможно существование одного решения в случае, когда прямая 1 касается кривой 4, и имеют место два решения, когда прямая 2 дважды пересекает кривую 4. В этом случае для получения однозначного решения необходимо ввести дополнительный показатель в критерий оптимальности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черноусько, Ф. Л. Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией / Ф. Л. Черноусько, Н. Н. Болотник. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2022. – 464 с.
2. Брискин, Е. С. Устойчивость поступательного движения шагающей машины с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, А. В. Леонард // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2013. – № 6. – С. 131.
3. Брискин, Е. С. Об устойчивости плоского движения мобильных роботов с шагающими движителями, работающими в «тянущем» режиме / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, К. С. Артемьев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22, № 1. – С. 28–34.
4. Об устойчивости плоского движения мобильных роботов / Е. С. Брискин, К. С. Артемьев, И. П. Вершинина, А. В. Малолетов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9(244) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 11–16.
5. Прокопов, А. С. О точности позиционирования двухсекционного робота / А. С. Прокопов, Е. С. Брискин // Известия Волгоградского ВолгГТУ : научный журнал № 4(287) / ВолгГТУ. – 2024. – С. 75–81.