

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-121-133

Волков А.Н., Шабанов Д.В., Брянский А.А., Гусейнов К.М., Романов П.И.Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого***E-mail: volkov-and-1@yandex.ru*

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АНГУЛЯРНОГО МАНИПУЛЯТОРА ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ РАБОЧЕГО ОРГАНА

Аннотация. Задача создания универсального подхода к анализу эффективности места размещения манипулятора рассмотрена на примере оптимизации размещения двухзвенного ангулярного манипулятора относительно заданного вектора перемещения рабочего органа по критериям энергопотребления и максимальной за цикл мощности.

Введено понятие области возможных размещений манипулятора, которое является основой для формирования матриц показателей оптимальности размещения манипулятора по различным критериям.

Для определения энергопотребления и максимальной мощности манипулятора, размещенного в конкретной точке, использованы уравнения Лагранжа второго рода. Каждый элемент матрицы, соответствующий определенным координатам размещения манипулятора, заполнен значением потребленной энергии или максимальной за цикл мощности. Полученные матрицы энергий и максимальных мощностей, позволяют определить оптимальное размещение манипулятора с точностью шага сетки.

Анализ полученных результатов показал значительность влияния места размещения манипулятора на его энергоэффективность. Также показано, что оптимальные места размещения манипулятора по критериям минимумов потребляемой энергии и мощности не совпадают, а функции, описывающие эти критерии, могут иметь несколько локальных экстремумов. В связи с этим предложено использовать предварительное определение оптимальных мест размещения по матрицам критериев оптимальности с последующим уточнением посредством применения алгоритмов поиска локальных минимумов.

Предложенный метод определения оптимального размещения манипулятора отличается универсальностью, так как может быть применен для оптимизации размещения по другим критериям (в том числе для многокритериальной оптимизации) и при наличии нескольких локальных минимумов критериальных функций. Представленные материалы являются основой для формирования системного подхода к исследованию эффективности оптимизации планировки роботизированного участка не только по критериям энергоэффективности, но также по критериям быстродействия, точности и грузоподъемности.

Ключевые слова: манипулятор, размещение манипулятора, область возможных размещений, энергопотребление, максимальная мощность, оптимизация.

Введение. Положение манипулятора относительно траектории рабочего органа определяет его энергопотребление, максимальную мощность, производительность, а также точность, и поэтому является актуальной задачей при разработке планировки роботизированной ячейки или алгоритма работы автономного мобильного робота с манипулятором. В последнее десятилетие вопросам оптимизации положения робота по критериям минимизации энергопотребления и мощности уделялось значительное внимание, а на практике проектировщики по-прежнему ориентируются на СНИП и обеспечение лишь необходимой ширины проходов для эвакуации и обслуживания оборудования.

Проблемам повышения эффективности использования роботов посвящено множество публикаций, которые целесообразно классифицировать по четырем группам.

Первая группа работ посвящена проблемам автоматизации проектирования рабочих траекторий роботов. В [1] авторы предложили шестьдесят способов обеспечения полного набора комбинаций обобщенных координат ангулярного робота для заданной ориентации рабочего органа. В [2, 3] разработаны алгоритмы разработки траектории с учетом ограничений подвижности кинематических пар, исключения сингулярности и коллизий, а также положения робота в производственной ячейке.

Вторая группа работ посвящена вопросам повышения быстродействия роботов, которое часто

определяет производительность производственной ячейки. В [4] предложен генетический алгоритм синтеза траекторий в сочетании с их кубической интерполяцией и учетом ориентаций, определяемых кватернионами. В [5] и [6] установлено, что оптимальное размещение конкретных моделей роботов относительно траекторий позволяет повысить производительность на 25% и 26% соответственно.

Третья группа работ посвящена проблемам минимизации объема движений в сочленениях звеньев робота при реализации заданной траектории. Объем движений является комплексной оценкой эффективности работы робота, так как он определяет его быстродействие и энергопотребление. В [7] представлены алгоритмы обеспечения минимизации объема движений путем оптимизации положения робота относительно траектории его исполнительного устройства применительно к автоматизации лазерной резки. В [8] авторы предложили для описания пространства поиска оптимального положения робота в виде направленного графа.

В четвертой группе публикаций исследуются проблемы повышения энергоэффективности применения роботов. В [9] и [10] показано, что существенное снижение энергопотребления роботов можно обеспечить путем выбора более эффективного закона движения рабочего органа или его синтеза. Способ снижения энергопотребления манипулятора путем замедления операций типа «захват и перенос объекта» [11] при действии инерционных, гравитационных и диссипативных потерь не всегда дает положительный результат. Методика расчета энергопотребления роботов на основе их структурной декомпозиции, учитывающей механизмы генерации траекторий и вычислительную сложность задачи на примере лазерной обработки детали разработана в [12]. В [13] продемонстрировано применение двурукого робота *duAgo* и настройки регуляторов с использованием метаэвристических алгоритмов дает наилучший результат. В работе [14] решается задача оптимизации положения аддитивных роботов на основе трехмерных карт энергопотребления и качества печати. Примененный подход позволил снизить энергозатраты на 39,96–56,99% и повысить точность печати на 9,09–23,8%. В [15] экспериментально установлено, что рабочие параметры робота существенно влияют на его энергетику и динамику. Проблемы адекватности упрощенных моделей приводных двигателей и инверторов рассмотрены на примере робота *KUKA KR 210* исследованы в [16]. Метод построения оптимальной по энергоэффективности траектории робота, аппроксимированной ку-

сочно-линейной функцией, в сферической области с препятствием рассмотрен в [17]. Оптимизация траектории также рассмотрена в работе [18]: предложенный метод позволил снизить энергозатраты на 13–44% за счет минимизации квадрата крутящего момента. В работе [19] проанализировано энергопотребление 6-осевых промышленных роботов *ABB*. Результаты показали, что при размещении робота на расстоянии 50% от максимального рабочего диапазона энергопотребление снижается на 30–40%. В [20] для оптимизации энергопотребления робота при отсутствии информации о его конструктивных характеристиках предложен метод на основе применения нейронной сети и адаптивного генетического алгоритма. Валидация соответствующей модели на примере робота *KUKA KR60-3* продемонстрировала снижение энергопотребления на 22 %, а ошибка метода составила менее 5%. Оптимальное размещение замкнутых прямоугольных траекторий робота относительно его основания по критерию минимума потребления энергии с учетом электромеханических характеристик приводов описано в [21]. В [22] представлен метод оптимизации компоновочного решения ячейки с тремя роботами по критерию минимума потребления энергии с использованием встроенных возможностей *Modelica/Dymola*. После формулировки задач для каждого робота по перемещению рабочего органа по множеству рабочих точек определялась оптимальная компоновка производственной ячейки с использованием соответствующих численных методов. Результаты оптимизации проиллюстрированы цветными картами уровней, которые отображают потребление энергии и время, потребное на выполнение задачи для различных положений робота в ячейке. В заключении в среде *Delmia Robotics* выполнено моделирование двух ячеек с целью оценки потенциала энергосбережения на заданных множествах точек. Установлено существование возможности экономии до 20% энергии по сравнению существующей производственной системой.

Принимая во внимание вышеизложенное, можно утверждать, что данное исследование актуально. В заключении анализа необходимо отметить ряд нерешенных проблем. Во-первых, даже для простейшего случая плоской зоны обслуживания робота отсутствует единый подход к формальному описанию области возможных положений робота, которая является необходимой основой для исследования оптимизации размещения робота. Одни авторы траекторию перемещают относительно робота, которая задается четырьмя линейными координатами или парой линейных и одной угловой координатами. Другие

перемещают робот относительно заданной траектории и его положение определяется только двумя линейными координатами, что конечно же предпочтительно. Как итог, в настоящее время отсутствует вразумительное определение и описание этой зоны. Во-вторых, рассмотренные работы посвящены решению достаточно сложных задач оптимизации, когда рассматриваются криволинейные траектории или позиционирование рабочего устройства в большом количестве точек. В результате установленный эффект оптимизации размещения робота является интегральным и справедлив только для рассмотренной задачи. В-третьих, даже для простейшего случая, прямолинейного перемещения центра рабочего органа между двумя точками, отсутствует методика определения зависимости энергозатрат от величины перемещения, которое при наличии весомых аргументов может учитываться при планировке роботизированной ячейки.

Целью представленной работы является создание универсальных математической модели и методики оптимизации размещения робота относительно заданного вектора перемещения по критерию минимумов потребленной за цикл энергии

и максимальной мощности, оценка их эффективности и реализуемости. Предложенные методика и модели должны иметь потенциал дальнейшего развития применительно, к другим критериями, такими как быстродействие, точность и грузоподъемность, а также многокритериальной оптимизации на их основе.

Методы исследования. Поставленная цель достигается путем аналитического и компьютерного моделирования работы манипулятора по критериям минимизации энергозатрат и максимальной потребляемой мощности. Модель основана на уравнении Лагранжа второго рода и законах теоретической механики. Моделирование выполнено в средах MathCad 15 и MatLAB 2019.

Постановка задачи. Рассматривается двухзвенный манипулятор ангулярного типа с вертикально ориентированными осями и работающий в горизонтальной плоскости. Суть технологической операции сводится к перемещению объекта манипулирования массой $m_3=2$ кг по прямолинейной траектории из точки А в точку В на расстояние s за время T (рисунок 2а). Основные технические параметры звеньев манипулятора представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры манипулятора

Параметр	Первое звено	Второе звено
Номинальная скорость вращения вала моторов, рад/с	$\omega=526$	
Номинальный момент моторов, Нм	$M_{ном}=0,084$	
Момент инерции якоря моторов, кг·м ²	$J_0=135\cdot 10^{-7}$	
Передаточное число редукторов	$i=150,286$	
Масса звена, кг	$m_1=4,65$	$m_2=3,56$
Длина звена, м	$l_1=0,522$	$l_2=0,4$
Расстояние от шарнира звена до его центра масс, м	$a_1=0,261$	$a_2=0,2$
Момент инерции звена, кг·м ²	$J_1=0,106$	$J_2=0,048$

Закон движения рабочего органа определяется технологической операцией. Для примера рассмотрен наиболее распространенный трапецеидальный закон движения, состоящий из равноускоренного разгона, равномерного движения и равнозамедленного торможения. Зависимости перемещения $l(t)$, скорости и ускорения центра захватного устройства от времени t при времени цикла T и временах разгона и торможения $\tau = T/3$ представлены в выражениях (1), (2) и (3). Графики этих функций приведены на рисунке 1.

Разгон (при $0 \leq t \leq \tau$):

$$l(t) = \frac{st^2}{2\tau(T-\tau)}; \quad \dot{l}(t) = \frac{st}{\tau(T-\tau)}; \quad \ddot{l}(t) = \frac{s}{\tau(T-\tau)} \quad (1)$$

Равномерное движение (при $\tau < t \leq T-\tau$):

$$l(t) = \frac{s(\tau-2t)}{2(\tau-T)}; \quad \dot{l}(t) = \frac{s}{T-\tau}; \quad \ddot{l}(t) = 0 \quad (2)$$

Торможение (при $T-\tau < t \leq T$):

$$l(t) = \frac{s(T-\tau)^2}{2\tau(T-\tau)} + s; \quad \dot{l}(t) = \frac{st}{\tau(T-\tau)}; \quad \ddot{l}(t) = \frac{s}{\tau(T-\tau)} \quad (3)$$

По результатам анализа необходимо установить зависимость энергозатрат и пиковой мощности от координат $[x, y]$ размещения манипулятора относительно траектории рабочего органа, а также определить оптимальное по этим критериям размещение манипулятора.

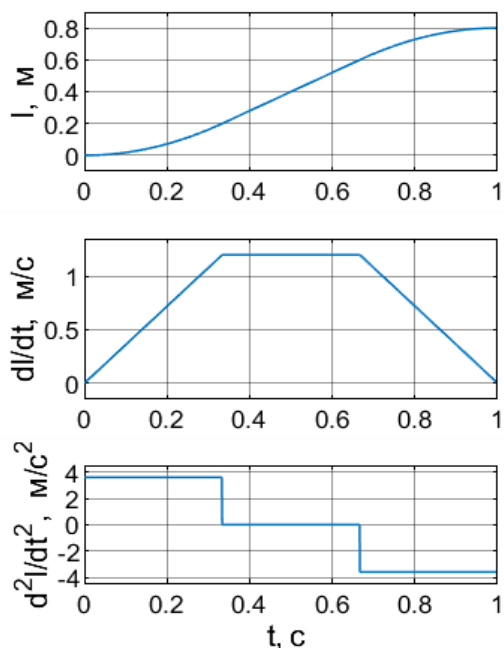


Рис. 1. График закона движения рабочего органа манипулятора ($s = 0,8\text{м}$, $T = 1\text{с}$, $\tau = 1/3T$)

Область возможных размещений манипулятора. Область возможных размещений манипулятора является новым понятием и отличается от зоны обслуживания. Область возможных раз-

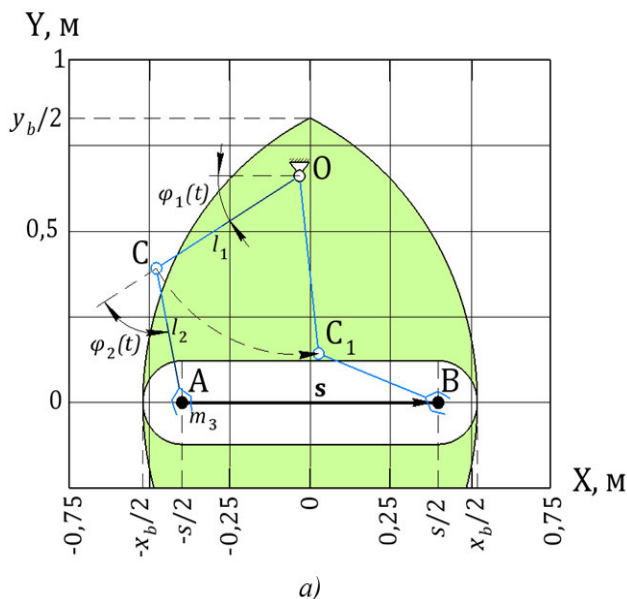


Figure 2b: Matrix representation of the possible placement area. The matrix is 11x11, with rows and columns indexed from 0 to 10. Cells containing '1' represent accessible positions, and cells containing '0' represent inaccessible positions.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
4	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 2. Область возможных размещений манипулятора: а – в графическом представлении; б – в матричном представлении

Габаритные размеры области возможных размещений манипулятора:

$$x_b = 2l_0 - s; y_b = \sqrt{l_0^2 - (0,5s)^2} \quad (5)$$

Прямоугольник, описывающий область возможных размещений, разбивается на $(n+1) \times (m+1)$ прямоугольников координатной сетки. После этого формируется матрица Z размерностью $m \times n$ с номерами строк $i = 0 \dots n$ и

столбцов $j = 0 \dots m$, которые соответствуют координатам центров прямоугольников сетки. Элементам матрицы, соответствующим координатам, доступным для размещения манипулятора, присваивается значение «1», а недоступным – «0» (рис. 2б). Аналогично будет выполнена запись значений в матрицы энергопотребления и пиковой мощности. Элемент матрицы с индексами i, j содержит значение, соответствующее расположению манипулятора в координатах x, y :

мещений манипулятора является областью допустимых значений координат размещения манипулятора, построенной относительно заданной траектории перемещения рабочего органа с учетом кинематики манипулятора. Область возможных размещений рассматриваемого манипулятора при $s=0,8$ показана на рисунке 2а.

Область возможных размещений манипулятора относительно вектора перемещения s определяется системой неравенств (4). Первые два неравенства определяют наружную границу области возможных размещений манипулятора, а последние три неравенства – внутреннюю границу, обусловленную соотношением длин звеньев:

$$\begin{cases} y^2 + (x+s/2)^2 \leq l_0^2 \\ y^2 + (x-s/2)^2 \leq l_0^2 \\ y^2 + (x+s/2)^2 \geq \Delta^2 \\ y^2 + (x-s/2)^2 \geq \Delta^2 \\ y \geq \Delta \text{ при } -s/2 \leq x \leq s/2 \end{cases}, \quad (4)$$

где $l_0 = l_1 + l_2$ и $\Delta l = l_1 - l_2$ - сумма и разница длин звеньев манипулятора соответственно.

Для анализа достаточно рассмотреть половину области возможных размещений, так как она симметрична относительно оси X.

$$x(j) = j \cdot \Delta j - x_b + \Delta j / 2; \quad y(i) = i \cdot \Delta i + \Delta i / 2, \quad (6)$$

где Δi и Δj - шаги координатной сетки по осям X и Y:

$$\Delta i = \frac{y_b}{n+1}; \quad \Delta j = \frac{x_b}{m+1} \quad (7)$$

Понятие “область возможных размещений манипулятора” относительно заданных траекторий перемещения рабочего органа и принцип заполнения матриц являются основой метода определения оптимального размещения манипулятора. Такое представление качественных характеристик размещения манипулятора позволит осуществить многокритериальный анализ путем суммирования матриц с заданными весовыми коэффициентами.

Вычисление показателей энергоэффективности манипулятора. На первом этапе исследования необходимо определить потребляемые мощность и энергию для заданного места размещения манипулятора. Метод вычисления этих показателей основан на материалах, представленных нашим коллективом в рамках конференции «Современное машиностроение: Наука и образование MMESE-2025».

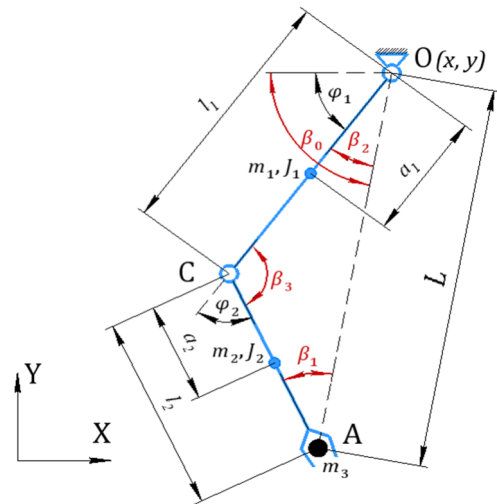


Рис. 3. Расчетная схема

Функции скорости, координаты и ускорения рабочего органа описаны выражениями (1), (2), (3). Расчетная схема для определения углов поворота звеньев, которые являются обобщенными координатами, приведена на рисунке 3. По расчетной схеме исходя из геометрических соотношений определены функции обобщённых координат $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ (10) через функции $L(t)$ (расстояние от шарнира O до центра захватного устройства) и $\beta_0(t)$ (угол между отрезком OA и осью X):

$$L(t) = \sqrt{(x + s/2 - l(t))^2 + y^2}; \quad \beta_0(t) = \arccos\left(\frac{x + s/2 - l(t)}{L(t)}\right); \quad (8)$$

$$\beta_1(t) = \arccos\left(\frac{L^2(t) + l_2^2 - l_1^2}{2l_2L(t)}\right); \quad \beta_2(t) = \arccos\left(\frac{L^2(t) + l_1^2 - l_2^2}{2l_1L(t)}\right); \quad \beta_3(t) = \arccos\left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - L^2(t)}{2l_1l_2}\right); \quad (9)$$

$$\varphi_1(t) = \beta_0(t) - \beta_2(t); \quad \varphi_2(t) = \pi - \beta_3(t) \quad (10)$$

Для записи уравнений Лагранжа второго рода применительно к двум звеньям манипулятора необходимо выразить кинетическую энергию через линейные скорости центров масс [23]. Скорость центра масс первого звена зависит исключительно от угловой скорости первой обобщенной координаты φ_1 и определяется выражением (11). Здесь и далее аргумент функций t не указан с целью упрощения записи формул.

$$V_1 = \dot{\varphi}_1 a_1 \quad (11)$$

Скорость центра масс второго звена зависит от угловых скоростей двух обобщенных координат φ_1 и φ_2 и определяется как векторная сумма горизонтальной и вертикальной составляющих линейной скорости V_2 :

$$V_2 = \sqrt{(\dot{\varphi}_1 \times l_1 + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \times a_2)^2} = \sqrt{l_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + a_2^2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + 2 \cos(\varphi_2) a_2 l_1 \dot{\varphi}_1 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)} \quad (12)$$

Линейная скорость центра масс захватного устройства определяется аналогично, но с заменой расстояния a_2 на длину второго звена l_2 :

$$V_3 = \sqrt{l_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + l_2^2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + 2 \cos(\varphi_2) l_2 l_1 \dot{\varphi}_1 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)} \quad (13)$$

Полная кинетическая энергия подвижных частей манипулятора может быть представлена в

следующем виде (14). После выражения линейных скоростей через угловые скорости (11), (12),

(13) и группировки слагаемых выражение для кинетической энергии может быть приведено к виду (15).

$$K = \frac{1}{2} (m_1 V_1^2 + J_1 \dot{\varphi}_1^2 + m_2 V_2^2 + J_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + m_3 V_3^2) \quad (14)$$

$$J_{\Sigma 1} = J_1 + J_2 + J_0 + J_0 i^2 + a_1^2 m_1 + (l_1^2 + 2l_1 a_2 \cos(\varphi_2) + a_2^2) m_2 + (l_1^2 + 2l_1 l_2 \cos(\varphi_2) + l_2^2) m_3 \quad (16)$$

$$J_{\Sigma 2} = J_2 + J_0 i^2 + a_2^2 m_2 + l_2^2 m_3 \quad (17)$$

$$J_{\Sigma 12} = J_2 + J_0 i + (a_2^2 + l_1 a_2 \cos(\varphi_2)) m_2 + (l_2^2 + l_1 l_2 \cos(\varphi_2)) m_3 \quad (18)$$

Следует уточнить, что массы моторов учтены в значениях m_1 и m_2 , а момент инерции ротора первого звена учитывается в виде слагаемого $J_0 i^2$ в выражении (16). При этом кинетическая энергия вращения ротора мотора второго

где $J_{\Sigma 1}$ и $J_{\Sigma 2}$ – приведенные моменты инерции первого и второго звена соответственно, определяемые выражениями:

звена содержит квадраты угловых обоих угловых скоростей и их произведение (19). В связи с этим, инерционность ротора второго мотора должна учитываться в выражениях (16), (17) и (18) в виде слагаемых J_0 , $J_0 i^2$ и $J_0 i$ соответственно.

$$K = \frac{1}{2} J_0 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 i)^2 = \frac{1}{2} J_0 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} J_0 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + \frac{1}{2} J_0 \dot{\varphi}_2^2 i^2 \quad (19)$$

Уравнения Лагранжа для рассматриваемого манипулятора при отсутствии преобразований

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{\varphi}_1} K - \frac{\partial}{\partial \varphi_1} K = M_1; \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{\varphi}_2} K - \frac{\partial}{\partial \varphi_2} K = M_2 \quad (20)$$

где M_1 и M_2 – движущие моменты приводов манипулятора.

После подстановки в (20) выражения кинетической энергии (15) с учетом скоростей (11),

$$J_{\Sigma 1} \ddot{\varphi}_1 + J_{\Sigma 12} \ddot{\varphi}_2 - l_1 \sin(\varphi_2) (a_2 m_2 + l_2 m_3) (2\dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_2^2) = M_1 \quad (21)$$

$$J_{\Sigma 12} \ddot{\varphi}_1 + J_{\Sigma 2} \ddot{\varphi}_2 + l_1 \sin(\varphi_2) (a_2 m_2 + l_2 m_3) \dot{\varphi}_1^2 = M_2 \quad (22)$$

Здесь обобщенные моменты и моменты инерции являются функциями обобщенных координат, которые, в свою очередь, являются функциями времени t , координат точки размещения шарнира первого звена манипулятора $O(x, y)$, величины перемещения захватного устройства s ,

потенциальной энергии (манипулятор работает в горизонтальной плоскости) имеют вид:

(12), (13) и соответствующих преобразований получены выражения для расчета моментов приводов манипулятора систему уравнений динамики для двух звеньев манипулятора:

длительности разгона (торможения) захватного устройства с полезным грузом τ и времени цикла движения T .

Механическая мощность получена путем умножения обобщенных моментов (21), (22) на угловые скорости звеньев:

$$N_1(t, x, y, s, \tau) = M_1(t, x, y, s, \tau) \cdot \dot{\varphi}_1(t, x, y, s, \tau); \quad N_2(t, x, y, s, \tau) = M_2(t, x, y, s, \tau) \cdot \dot{\varphi}_2(t, x, y, s, \tau) \quad (23)$$

В случае отсутствия системы рекуперации общая потребляемая механическая мощность N_0 определяется как сумма величин $N_{П1}$ и $N_{П2}$, являющихся положительными участками мощностей N_1 и N_2 :

$$N_{П1}(t, x, y, s, \tau) = \begin{cases} N_1(t, x, y, s, \tau); & N_1(t, x, y, s, \tau) > 0 \\ 0 & N_1(t, x, y, s, \tau) \leq 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$N_{П2}(t, x, y, s, \tau) = \begin{cases} N_2(t, x, y, s, \tau); & N_2(t, x, y, s, \tau) > 0 \\ 0 & N_2(t, x, y, s, \tau) \leq 0 \end{cases} \quad (25)$$

$$N_0(t, x, y, s, \tau) = N_{П1}(t, x, y, s, \tau) + N_{П2}(t, x, y, s, \tau) \quad (26)$$

Энергопотребление рассчитывается путем интегрирования суммарной мощности:

$$U(x, y, s, \tau, T) = \int_0^T N_0(t, x, y, s, \tau) dt \quad (27)$$

Как говорилось ранее, оптимизация размещения манипулятора выполняется по критериям максимальной за цикл мощности, потребляемой приводами – N_{\max} и энергии U , затрачиваемой на один цикл работы.

Анализ зависимости энергоэффективности манипулятора от его размещения. Для каждого возможного положения манипулятора в матрице, приведенной на рисунке 2б, значения «1» заменяются на значения N_{\max} или U , вычисленные для соответствующих положений шарнира $O[x; y]$. Значения «0» заменяются на значения, равные максимальным величинам N_{\max} и U ,

чтобы эти элементы матрицы не учитывались при поиске минимальных значений мощности и энергозатрат. Визуализации функций энергопотребления и максимальной за цикл мощности представлены на рисунке 4. Наиболее наглядным инструментом представления результатов исследования являются карты. Основными особенностями проиллюстрированных функций является отсутствие симметрии и наличие нескольких локальных минимумов. В связи с этим появляются ограничения в использовании методов оптимизации, основанных на поиске локального минимума.

Анализ матриц и графиков показывает, что произвольное размещение манипулятора в области возможных размещений может привести к увеличению потребляемой за цикл энергии на 500%, а максимальной мощности на 2150%. Такое увеличение затрат имеет место на границе области возможного размещения манипулятора. Если исключить точки размещения манипуля-

тора, лежащие в крайних элементах сетки разбиения области его возможных положений то приведенные показатели, снизятся до 200% и 821% соответственно.

По полученным матрицам определены приблизительные места нахождения локальных минимумов, которые впоследствии были уточнены функциями поиска локального минимума. Точки, соответствующие оптимальным размещениям по критериям энергопотребления и пиковой мощности, условно обозначены как U и N. Сравнение показателей энергоэффективности приведено в таблице 2. Размещение манипулятора в точке с минимальным энергопотреблением, приводит к увеличению максимальной за цикл мощности на 43% в сравнении с минимально достижимым значением, а перенос его в точку, обеспечивающую минимум пиковой мощности, сопровождается ростом энергопотребления на 21%. Этот результат получен для величины вектора перемещения 0,8 м при геометрически допустимой – 1,8 м.

Таблица 2

Показатели энергоэффективности в оптимальных местах размещения

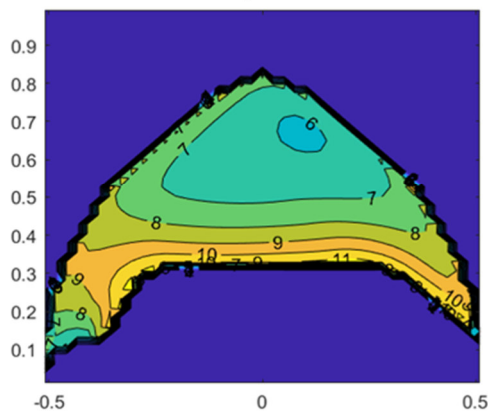
Точка	Координаты экстремумов, м	Энергия, затрачиваемая на цикл, Дж	Относительное увеличение затрачиваемой энергии, %	Пиковая потребляемая мощность, Вт	Относительное увеличение пиковой мощности, %
U	[0,11; 0,672]	5,45	0	19,66	43
N	[0,285; 0,51]	6,61	21	13,78	0

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	6	6	5	0	0	0	0
2	0	0	0	7	6	6	5	6	0	0	0
3	0	0	7	6	6	6	6	6	0	0	0
4	0	9	7	7	6	6	7	7	7	9	0
5	0	8	8	8	8	8	8	8	8	7	0
6	0	9	10	10	10	10	10	10	10	8	0
7	8	9	12	14	15	15	15	15	14	10	9
8	7	8	16	27	29	29	30	27	17	10	10
9	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

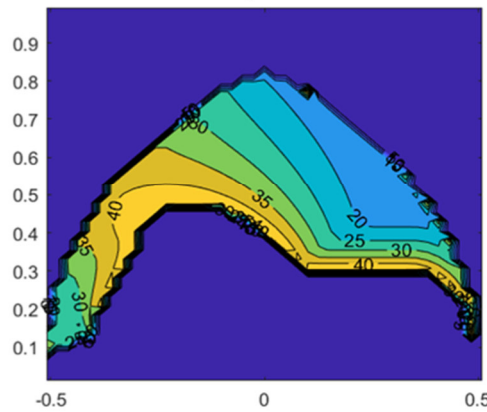
а)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	25	21	17	0	0	0	0
2	0	0	0	32	28	24	20	15	0	0	0
3	0	0	36	35	33	28	22	17	15	0	0
4	0	37	39	41	39	33	26	19	14	96	0
5	0	36	42	50	51	42	30	21	20	19	0
6	0	34	46	63	74	58	36	33	33	32	0
7	27	36	59	94	129	88	68	68	68	59	35
8	25	45	105	206	313	197	197	197	197	128	41
9	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

б)



в)



г)

Рис. 4. Эффективность оптимизации размещения манипулятора относительно вектора перемещения захватного устройства: а и б – матрицы энергий и максимальных за цикл мощностей; в и г – карты энергий и максимальных за цикл мощностей

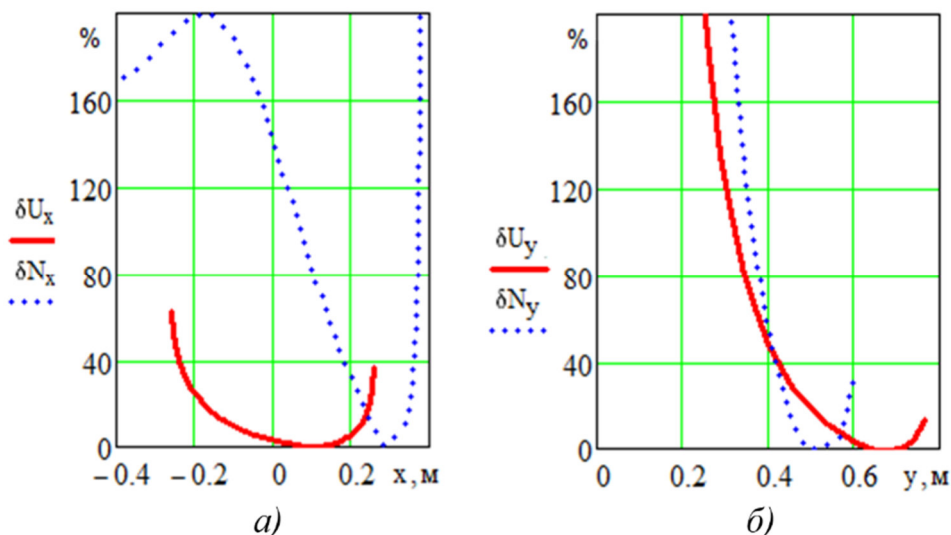


Рис. 5. Графики зависимости относительного приращения энергопотребления и максимальной потребляемой мощности: *a* – от координаты *x*; *б* – от координаты *y*

Для повышения наглядности двумерных функций энергии и мощности целесообразно перейти к относительным величинам δU и δN . Каждая из предложенных величин представляет собой приращение энергии или максимальной мощности в процентах для точки с координатами x, y в сравнении с минимально возможными значениями. На рисунке 5 представлены сечения двумерных графиков δU и δN , выполненные через точки абсолютных минимумов $U(0,11; 0,672)$ и $N(0,285; 0,51)$ параллельно осям X и Y . Анализ графиков позволяет утверждать следующее. Потребляемая энергия и максимальная мощность изменяются на десятки процентов при даже при

малых изменениях места размещения манипулятора.

На рисунке 6 приведены зависимости потребляемых приводами степеней подвижности мощностей N_1 и N_2 , а также суммарной потребляемой мощности N_0 от времени для оптимального размещения манипулятора. Видно, что в случае размещения манипулятора в точке N на участках разгона и равномерного движения пиковые мощности равны (рисунок 6б). При смещении манипулятора в какую-либо из сторон величина N_0 увеличится либо на этапе разгона, либо на этапе прямолинейного движения. Но при этом площадь под графиком N_0 может уменьшаться, что подтверждается графиком на рисунке 6а.

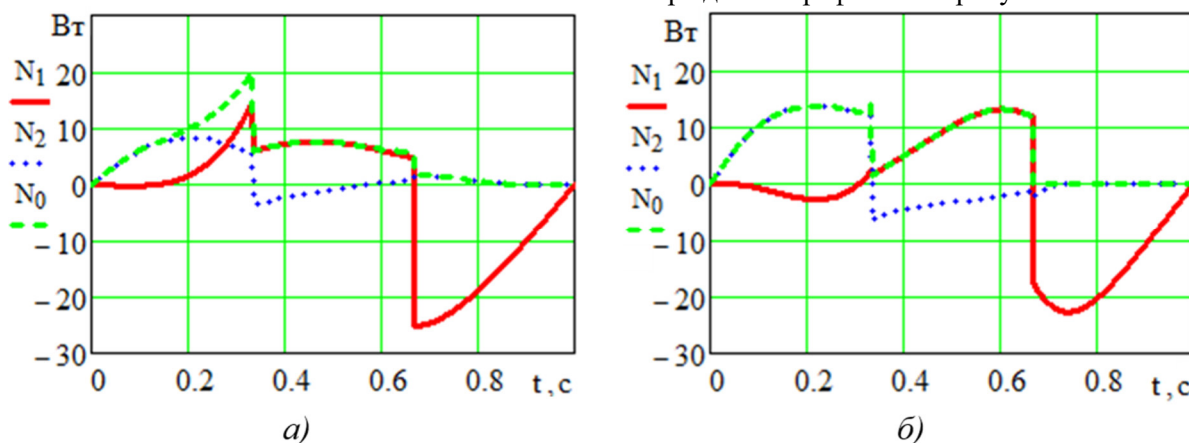


Рис. 6. Графики потребляемых мощностей N_1 и N_2 , а также суммарной потребляемой мощности N_0 : *a* – при размещении манипулятора в точке U ; *б* – при размещении манипулятора в точке N

Минимизация мощности или потребляемой энергии в итоге обеспечивается законами изменения во времени обобщенных координат и, следовательно, угловых скоростей и ускорений звеньев манипулятора. На рисунке 7 приведены зависимости углов поворота звеньев (обобщенных

координат) и их угловых скоростей от времени. Индексы «1» и «2» обозначают номер звена, «и» – размещение манипулятора, соответствующее минимальным энергозатратам цикла, «п» - размещение манипулятора, соответствующее минимальной за цикл потребляемой мощности.

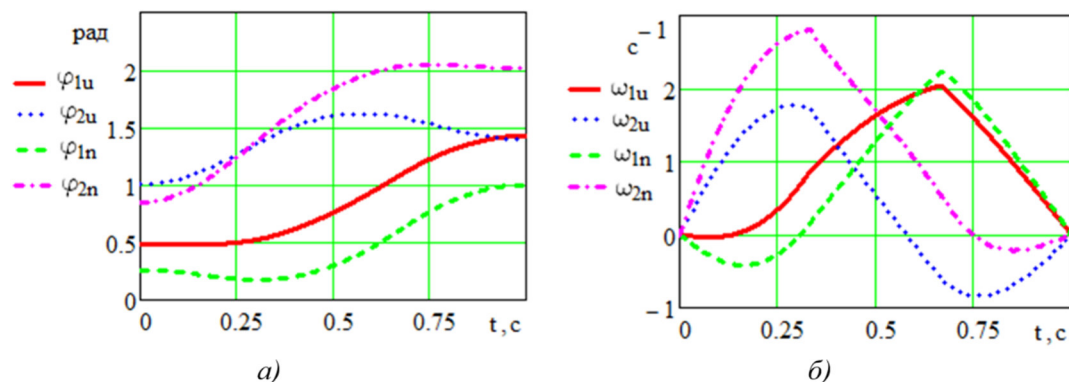


Рис. 7. Графики движения манипулятора, расположенного в оптимальных точках: *а* – графики изменения углов поворота звеньев; *б* – графики изменения угловых скоростей

Полученные графики свидетельствуют о том, что закон движения рабочего органа при размещении манипулятора в выбранных точках, является реализуемым: на графиках отсутствуют разрывы функций, а значения угловых скоростей укладываются в допустимый диапазон. Кроме того, характер функций обобщенных координат отличается незначительно при изменении места размещения манипулятора.

Таким образом, метод оптимизации размещения манипулятора состоит из следующих этапов:

- формирование математической модели, позволяющей рассчитать критерии оптимальности для заданных координат размещения манипулятора;

- определение области возможных размещений манипулятора и выбор шага сетки, соизмеримого с возможной точностью установки манипулятора при монтаже;

- формирование бинарной матрицы, соответствующей области возможных размещений, с количеством элементов, соответствующим выбранному шагу сетки;

- заполнение элементов матриц значениями критериев оптимальности и замена “нулевых” элементов матрицы максимальными величинами;

- построение трехмерных графиков и карт на основе полученных матриц для приблизительного определения мест расположения локальных минимумов критериальных функций (либо автоматическое определение приблизительных мест расположения локальных минимумов путем перебора элементов матриц);

- уточнение положения локальных минимумов и определение глобального минимума;

- построение графиков изменения критериев оптимальности в сечениях, проходящих через точки локальных минимумов, для оценки допустимых отклонений координат размещения манипулятора и возможных потерь эффективности;

- построение графиков изменения углов и угловых скоростей звеньев манипулятора для проверки реализуемости закона движения в выбранном месте размещения.

Заключение

В работе предложено понятие “область возможных размещений манипулятора” относительно его рабочих траекторий, которое является основой для решения задач оптимизации размещения манипулятора.

Предложен метод оптимизации размещения работа относительно заданного вектора перемещения. Анализ результатов его применения позволяет утверждать следующее. Взаимное расположение манипулятора и вектора перемещения рабочего органа значительно влияет на потребляемую энергию и максимальную за цикл мощность. Оптимальные места размещения манипулятора относительно вектора перемещения центра рабочего органа по критериям минимумов потребляемой энергии и мощности не совпадают. Показано, что функции энергопотребления и максимальной потребляемой мощности имеют несколько локальных минимумов.

Полезный эффект от оптимального размещения манипулятора относительно вектора перемещения зависит от его конструкции, закона движения рабочего органа, расстояний перемещения, количества точек позиционирования, а также от типа управления (позиционное и контурное). Оценка влияния перечисленных факторов на энергоэффективность требует отдельного анализа.

Примененный в работе подход может быть использован для оптимизации размещения манипулятора по другим критериям, таким как быстродействие, точность и грузоподъемность, а также для многокритериальной оптимизации на их основе. Представленные материалы являются основой для формирования системного подхода к оптимизации планировки роботизированного участка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хомченко В.Г., Колтышкин А.В. Оптимизация расположения манипулятора робота относительно реализуемой траектории в ртк на базе обрезающего пресса // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии : Материалы X Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых, Омск, 19–20 мая 2020 года. Омск: Омский государственный технический университет, 2020. С. 59–63.
2. Zeghloul S., Pamanes-Garcia J.A. Multi-criteria optimal placement of robots in constrained environments // *Robotica*. 1993. Vol. 11. No. 2. Pp. 105–110. DOI: 10.1017/S0263574700019202
3. Doan N.C.N., Lin W. Optimal robot placement with consideration of redundancy problem for wrist-partitioned 6R articulated robots // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017. Vol. 48. Pp. 233–242. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.04.007
4. Valsamos H., Nektarios T., Aspragathos N.A. Optimal placement of path following robot task using genetic algorithms // *IFAC Proceedings Volumes*. 2006. Vol. 39. No. 15. Pp. 132–137. DOI: 10.3182/20060906-3-IT-2910.00024
5. Feddema J.T. Kinematically optimal robot placement for minimum time coordinated motion // *proceedings of IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE. 1996. Vol. 4. Pp. 3395–3400. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.509229
6. Spensieri D., Carlson J.S., Bohlin R., Kressin J., Shi J. Optimal robot placement for tasks execution // *Procedia Cirp*. 2016. Vol. 44. Pp. 395–400. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.105
7. Чумаков О.А. Оптимизация расположения антропоморфного манипулятора // Информационные технологии в образовании, науке и производстве [Электронный ресурс] : материалы XI международной научно-технической конференции, Минск, 21-22 ноября 2023 г. / сост. М. Г. Карасёва. – Минск : БНТУ, 2024. С. 106–112.
8. Кожевников М.М., Чумаков О.А., Илюшин И.Э., Юркина А.А. Методика оптимизации положения робота-манипулятора в технологическом процессе лазерной резки // *Доклады БГУИР*. 2021. Т. 19. №. 3. С. 49–57.
9. Макин М.К., Волков А.Н., Кочнева О.В. Зависимость максимальной мощности и энергопотребления циклового и позиционного электропривода роботов и мехатронных модулей от закона движения и его параметров // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2024. №6. С. 93–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-93-105
10. Volkov A., Kornilova A., Matsko O., Mosalova A. Optimization of the robot motion law by the criterion of minimizing maximum instantaneous power and electric motor size // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020. Vol. 539. No. 1. 012122. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012122
11. Pellicciari M., Berselli G., Leali F., Vergnano A. A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots // *Mechatronics*. 2013. Vol. 23. No. 3. Pp. 326–334 DOI: 10.1016/j.mechatronics.2013.01.013.
12. Zhou J., Yi H., Cao H., Jiang P., Zhang C., Ge W. Structural decomposition-based energy consumption modeling of robot laser processing systems and energy-efficient analysis // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 76. 102327. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102327
13. Nonoyama K., Liu Z., Fujiwara T., Alam M.M., Nishi T. Energy-efficient robot configuration and motion planning using genetic algorithm and particle swarm optimization // *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 6. 2074. DOI: 10.3390/en15062074
14. Ghungrad S., Haghghi A. Three-dimensional spatial energy-quality map construction for optimal robot placement in multi-robot additive manufacturing // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 88. 102735. DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102735
15. Brossog M., Kohl J., Merhof J., Spreng S., Franke J. Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system // *Procedia Cirp*. 2014. Vol. 23. Pp. 131–136. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.091
16. Eggers K., Ziaukas Z., Kotlarski J., Ortmaier T. On the Relationship of Travel Time and Energy Efficiency of Industrial Robots // *2018 International Conference on Industrial Enterprise and System Engineering (ICoIESE 2018)*. Atlantis Press. 2019. Pp. 115–121. DOI: 10.2991/icoiese-18.2019.21
17. Антонов В.О., Гурчинский М.М., Петренко В.И., Тебуева Ф.Б. Метод планирования оптимальной траектории движения трехзвенного манипулятора в объемном пространстве с препятствием // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2018. Т. 45. №. 1. С. 98–112.
18. Li Y., Wang Z., Yang H., Zhang H., Wei Y. Energy-Optimal Planning of Robot Trajectory Based on Dynamics // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2023. Vol. 48. Pp. 3523–3536. DOI: 10.1007/s13369-022-07185-7
19. Ruzarovsky R., Horak T., Bocak R. Evaluating Energy Efficiency and Optimal Positioning of Industrial Robots in Sustainable Manufacturing // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024. Vol. 8. P. 276. DOI: 10.3390/jmmp8060276
20. Jiang P., Wang Z., Li X., Wang X.V., Yang B., Zheng J. Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM //

Journal of Manufacturing Systems. 2023. Vol. 70. Pp. 137–148. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.07.009

21. Ur-Rehman R., Caro S., Chablat D., Wenger P. Path placement optimization of manipulators based on energy consumption: application to the orthoglide 3-axis // Transactions of the canadian society for mechanical engineering. 2009. Vol. 33. No. 3. Pp. 523–541. DOI: 10.1139/tcsme-2009-0035

22. Gadaleta M., Berselli G., Pellicciari M. Energy-optimal layout design of robotic work cells: Potential assessment on an industrial case study // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017. Vol. 47. Pp. 102–111. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.10.002

23. Хомченко В.Г. Робототехнические системы. Учебное пособие. Омск, 2016. 195 с.

Информация об авторах

Волков Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: volkov-and-1@yandex.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 Б.

Шабанов Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 Б.

Брянский Андрей Александрович, аспирант «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: andrebrianskiy@gmail.com. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 Б.

Гусейнов Канан Мурсал оглу, аспирант «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: kanan.guseinov@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 Б.

Романов Павел Иванович, доктор технических наук, профессор «Высшей Школы Машиностроения». E-mail: romanov_pi@spbstu.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 Б.

Поступила 24.05.2025 г.

© Волков А.Н., Шабанов Д.В., Брянский А.А., Гусейнов К.М., Романов П.И., 2025

***Volkov A.N., Shabanov D.V., Brianskii A.A., Huseynov K.M., Romanov P.I.**

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

**E-mail: volkov-and-1@yandex.ru*

OPTIMIZATION OF THE ANGULAR MANIPULATOR'S PLACEMENT RELATIVE TO THE END EFFECTOR'S STRAIGHT-LINE TRAJECTORY

Abstract. *The problem of creating a universal approach to analyzing the efficiency of the manipulator placement location is considered using the example of the problem of optimizing the placement of a two-link angular manipulator relative to a given vector of movement of the working element according to the criteria of energy consumption and maximum power per cycle.*

The concept of the possible manipulator placements area is introduced, which is the basis for forming matrices of indicators of the optimality of the manipulator placement based on various criteria.

The Lagrange equations of the second kind are used to determine the energy consumption and maximum power of a manipulator placed at a specific point. Each element of the matrix corresponding to specific coordinates of the manipulator placement is filled with the value of consumed energy or maximum power per cycle. The resulting matrices of energies and maximum powers allow determining the optimal placement of the manipulator with an accuracy of the grid step.

The analysis of the obtained results showed the significant impact of the manipulator placement on its energy efficiency. It is shown that the optimal locations for placing the manipulator according to the criteria of minimum energy and power consumption do not coincide, and the functions describing these criteria have several local extrema. In this regard, it is proposed to use a preliminary determination of the optimal placement according to the criteria matrices with subsequent refinement by local minima search algorithms.

The proposed method for determining the optimal placement of the manipulator is universal, since it can also be used to optimize placement according to other criteria (including multi-criteria optimization) and in

the presence of several local minima of the criterion functions. The described materials are the basis for the formation of a systematic approach to the study of the effectiveness of optimizing the layout of a robotic cell, not only according to the criteria of energy efficiency, but also according to the criteria of speed, accuracy and payload.

Key words: manipulator, manipulator placement, possible placement area, energy consumption, maximum power, optimization.

REFERENCES

1. Khomchenko V.G., Koltyshekin A.V. Optimization of the robot manipulator placement relative to the implemented trajectory in the robotic complex based on the trimming press [Optimizaciya raspolozheniya manipulyatora robota odnositel'no realizuemoj traektorii v rtk na baze obreznogo pressa]. Avtomatizaciya, mekhatronika, informacionnye tekhnologii : Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskij internet-konferencii molodyh uchenyh, Omsk, 19–20 maya 2020 goda. Omsk: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. 2020. Pp. 59–63 (rus)
2. Zeghloul S., Pamanes-Garcia J.A. Multi-criteria optimal placement of robots in constrained environments. *Robotica*. 1993. Vol. 11. No. 2. Pp. 105–110. DOI: 10.1017/S0263574700019202
3. Doan N.C.N., Lin W. Optimal robot placement with consideration of redundancy problem for wrist-partitioned 6R articulated robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017. Vol. 48. Pp. 233–242. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.04.007
4. Valsamos H., Nektarios T., Aspragathos N.A. Optimal placement of path following robot task using genetic algorithms. *IFAC Proceedings Volumes*. 2006. Vol. 39. No. 15. Pp. 132–137. DOI: 10.3182/20060906-3-IT-2910.00024
5. Feddema J.T. Kinematically optimal robot placement for minimum time coordinated motion. *Proceedings of IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE. 1996. Vol. 4. Pp. 3395–3400. DOI: 10.1109/ROBOT.1996.509229
6. Spensieri D., Carlson J.S., Bohlin R., Kressin J., Shi J. Optimal robot placement for tasks execution. *Procedia Cirp*. 2016. Vol. 44. Pp. 395–400 DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.105
7. Chumakov O.A. Optimization of the anthropomorphic manipulator placement [Optimizaciya raspolozheniya antropomorfno go manipulyatora], *Informacionnye tekhnologii v obrazovanii, nauke i proizvodstve [Elektronnyj resurs] : materialy XI mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskij konferencii, Minsk, 21-22 noyabrya 2023 g. / sost. M. G. Karasyova. Minsk : BNTU, 2024. Pp. 106–112 (rus)*
8. Kozhevnikov M.M., Chumakov O.A., Il'yushin I.E., Yurkina A.A. Methodology for optimizing the placement of a robotic manipulator in the technological process of laser cutting [Metodika optimizacii polozheniya robota-manipulyatora v tekhnologicheskom processe lazernoj rezki], *Doklady BGUIR*. Vol. 19. No. 3. Pp. 49–57 (rus)
9. Makin M.K., Volkov A.N., Kochneva O.V. Dependence of the maximum power and energy consumption of the cycle electric drive of robots and mechatronic modules on the motion law and its parameters. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 6. Pp. 93–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-6-93-105
10. Volkov A., Kornilova A., Matsko O., Mosalova A. Optimization of the robot motion law by the criterion of minimizing maximum instantaneous power and electric motor size. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020. Vol. 539. No. 1. 012122. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012122
11. Pellicciari M., Berselli G., Leali F., Vergnano A. A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots. *Mechatronics*. 2013. Vol. 23. No. 3. Pp. 326–334 DOI: 10.1016/j.mechatronics.2013.01.013
12. Zhou J., Yi H., Cao H., Jiang P., Zhang C., Ge W. Structural decomposition-based energy consumption modeling of robot laser processing systems and energy-efficient analysis. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 76. 102327. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102327
13. Nonoyama K., Liu Z., Fujiwara T., Alam M.M., Nishi T. Energy-efficient robot configuration and motion planning using genetic algorithm and particle swarm optimization. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 6. 2074. DOI: 10.3390/en15062074
14. Ghungrad S., Haghighi A. Three-dimensional spatial energy-quality map construction for optimal robot placement in multi-robot additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 88. 102735. DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102735
15. Brossog M., Kohl J., Merhof J., Spreng S., Franke J. Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system. *Procedia Cirp*. 2014. Vol. 23. Pp. 131–136. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.091
16. Eggers K., Ziaukas Z., Kotlarski J., Ortmaier T. On the Relationship of Travel Time and Energy Efficiency of Industrial Robots. *2018 International Conference on Industrial Enterprise and System Engineering (ICoIESE 2018)*. Atlantis Press. 2019. Pp. 115–121. DOI: 10.2991/icoiese-18.2019.21

17. Antonov V.O., Gurchinskij M.M., Petrenko V.I., Tebueva F.B. Method for planning the optimal trajectory of a three-link manipulator in a volumetric space with an obstacle [Metod planirovaniya optimal'noj traektorii dvizheniya trekhzvennogo manipulyatora v ob'emnom prostranstve s prepyatstviem], Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2018. Vol. 45. No. 1. Pp. 98–112 (rus)

18. Li Y., Wang Z., Yang H., Zhang H., Wei Y. Energy-Optimal Planning of Robot Trajectory Based on Dynamics. Arabian Journal for Science and Engineering. 2023. Vol. 48. Pp. 3523–3536. DOI: 10.1007/s13369-022-07185-7

19. Ruzarovskiy R., Horak T., Bocak R. Evaluating Energy Efficiency and Optimal Positioning of Industrial Robots in Sustainable Manufacturing. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2024. Vol. 8. 276. DOI: 10.3390/jmmp8060276

20. Jiang P., Wang Z., Li X., Wang X.V., Yang B., Zheng J. Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM. Journal of Manufacturing Systems. 2023. Vol. 70. Pp. 137–148. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.07.009

21. Ur-Rehman R., Caro S., Chablat D., Wenger P. Path placement optimization of manipulators based on energy consumption: application to the orthoglide 3-axis. Transactions of the canadian society for mechanical engineering. 2009. Vol. 33. No. 3. Pp. 523–541. DOI: 10.1139/tcsme-2009-0035

22. Gadaleta M., Berselli G., Pellicciari M. Energy-optimal layout design of robotic work cells: Potential assessment on an industrial case study. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017. Vol. 47. Pp. 102–111. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.10.002

23. Khomchenko V.G. Robotic systems. Training manual [Robototekhnicheskie sistemy. Uchebnoe posobie] Omsk, 2016. 195 p. (rus)

Information about the authors

Volkov, Andrey N. DSc, Professor. E-mail: volkov-and-1@yandex.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29 B.

Shabanov, Dmitrii V. PhD, Associate Professor. E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29 B.

Brianskii, Andrei A. Postgraduate student. E-mail: andrebriyanskiy@gmail.com. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29 B.

Huseynov, Kanan M. Postgraduate student. E-mail: kanan.guseynov@mail.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29 B.

Romanov Pavel I. DSc, Professor. E-mail: romanov_pi@spbstu.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29 B.

Received 24.05.2025

Для цитирования:

Волков А.Н., Шабанов Д.В., Брянский А.А., Гусейнов К.М., Романов П.И. Оптимизация размещения ангулярного манипулятора относительно прямолинейной траектории рабочего органа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 121–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-121-133

For citation:

Volkov A.N., Shabanov D.V., Brianskii A.A., Huseynov K.M., Romanov P.I. Optimization of the angular manipulator's placement relative to the end effector's straight-line trajectory. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 121–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-121-133