

**Горькавый М. А., Мельниченко М. А., Соловьев В. А., Горькавый А. И.
M. A. Gorkavyu, M. A. Melnichenko, V. A. Solovyev, A. I. Gorkavyu**

**АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДАХ КОЛЛАБОРАТИВНОГО
РОБОТА**

**ALGORITHM FOR SEARCHING OPTIMAL MOTION PARAMETERS DURING
RECTILINEAR TECHNOLOGICAL TRANSITIONS OF A COLLABORATIVE ROBOT**

Горькавый Михаил Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

Mikhail A. Gorkavyu – PhD in Engineering, Head of Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

Мельниченко Маркел Андреевич – аспирант, старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: markel.96dk@mail.com.

Markel A. Melnichenko – Postgraduate Student, Senior Lecturer, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: markel.96dk@mail.com.

Соловьев Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Vyacheslav A. Solovyev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Горькавый Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gorkavyu_ai51@mail.ru.

Aleksandr I. Gorkavyu – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gorkavyu_ai51@mail.ru.

Аннотация. В работе представлен алгоритм расчёта энергетических затрат и времени исполнения наиболее простой технологической операции, выполняемой коллаборативным роботом – линейного перемещения центральной точки инструмента (ТСП) в зависимости от выбора профиля графика изменения линейной скорости. Предложенный алгоритм синтезирован с целью исследования потенциала энергосбережения и повышения производительности как наиболее важных показателей эффективности функционирования коллаборативного робота (помимо безопасности). Для демонстрации результативности предложенных практических решений в работе представлен пример моделирования реализации коллаборативным роботом KUKA LBR iiwa 7 R800 прямолинейного перемещения ТСП из одной точки в другую в среде MATLAB. Результаты исследования показали наличие потенциала энергосбережения и увеличения производительности как для избранного ряда конфигураций робота, так и в пространстве всех возможных конфигураций применительно к технологическим перемещениям типа LIN внутри коллаборативного процесса.

Summary. The article presents an algorithm for calculating the energy costs and execution time of the simplest technological operation performed by a collaborative robot - linear movement of the tool center point (TCP) depending on the choice of the linear speed profile change graph. The proposed algorithm is synthesized with the aim of studying the potential for energy saving and increasing productivity, as the most important indicators of the collaborative robot effectiveness (in addition to safety). To demonstrate the effectiveness of the proposed practical

solutions, the work presents an example of modeling the implementation by a KUKA LBR iiwa 7 R800 collaborative robot of TCP rectilinear movement from one point to another in the MATLAB environment. The results of the study showed the potential for energy savings and increased productivity, both for a selected range of robot configurations and in the space of all possible configurations in relation to LIN-type technological movements within a collaborative process.

Ключевые слова: автоматизация, коллаборативный робот, производительность, энергетическая эффективность, линейное перемещение, оптимизация траекторных перемещений.

Key words: automation, collaborative robot, productivity, energy efficiency, linear motion, trajectory optimization.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №22-71-10093 <https://rscf.ru/project/22-71-10093/>).

УДК 004.896

Введение. В задачах оптимизации траекторных перемещений роботов в рамках коллаборативных производственных (технологических) процессов, согласно [1–5], ключевыми показателями, оказывающими влияние на качество процесса, являются: быстродействие (производительность), безопасность, энергоэффективность, эргономичность, надёжность, универсальность и др. Часть этих параметров статичны и не поддаются оптимизации, например, определяются конкретным экземпляром робота (т. е. свойствами его мехатронных узлов и модулей) [6], конкретной конфигурацией рабочего пространства технологического участка, используемыми локальными системами координат, степенью вовлечённости человека в коллаборативный процесс и т. д. [7; 8]. Данные параметры не могут быть изменены без вмешательства в конфигурацию или организацию технологического процесса. В свою очередь, группа таких показателей, как производительность (количество операций в единицу времени), энергоэффективность и безопасность (например, отражённой вероятностью возникновения коллизий), поддаётся оптимизации на всех уровнях планирования и организации комплекса движений: стратегическом, тактическом и оперативном [9; 10].

Процесс оптимизации интегральных параметров производительности, энергетической эффективности и безопасности ($Prod + EE + Sf$), несмотря на детерминированность мехатронной части (робот, инструмент, дополнительные оси и т. д.) [11; 12], усложняется неопределённым и неизвестным заранее заданием коллаборативной системы, оригинальным захватом, например, как в [13; 14], заранее неизвестным статическим моментом [15] и определяется многовариантной алгоритмической составляющей стратегии и тактики планирования движений как реакций на задающие и возмущающие воздействия.

Не вдаваясь в подробности процедур планирования стратегии и тактики движений, описанных, например, в [16], так или иначе робот должен будет реализовать траекторию, спланированную или в пространстве задач (с определённой точностью аппроксимации [9]), или в пространстве суставов [10]. Первый тип характерен для технологических переходов, у которых при $\forall P_i \in P_1 \dots P_n$ (где $P_1 \dots P_n$ – траектория в пространстве XYZ) определены точки P_{i-1} и P_{i+1} ($i = 2 : n - 1$) (т. е. жёстко определены ΔX_i , ΔY_i , ΔZ_i , ΔA_i , ΔB_i и ΔC_i) – приращение координат в декартовой системе и приращение углов вращения вокруг осей декартовой системы координат для позиции и ориентации рабочего органа робота, оснащённого инструментом. В частности, для роботов KUKA этот тип перемещений реализуется командами LIN (linear), CIRC (circular) и их комбинациями. Второй тип характерен для технологических и вспомогательных переходов $P_1 \rightarrow P_n$, для которых не устанавливается жёстких ограничений для позиции и ориентации рабочего органа робота в промежуточных точках. У роботов KUKA этот тип перемещений реализуется командой RTP (point-to-point).

Подходы к оптимизации параметров ($Prod + EE + Sf$) для двух представленных типов движений кардинально различны. Не преуменьшая актуальность научных исследований в поисках

путей оптимизации (Prod + EE + Sf) для движений второго типа в работе рассматривается ряд научных результатов для движений первого типа.

В связи с ограничениями технологической и физической природы движений первого типа задача обеспечения безопасности (отсутствия столкновений типа «рабочий орган – объект в динамически изменяющейся рабочей среде») может быть решена только за счёт прерывания технологической операции (аварийный останов), что может привести к негативным последствиям при реализации технологической операции. В силу тривиальности решения она не рассматривается. Задача обеспечения безопасности «робот – объект в изменяющейся среде» представлена в [17] и не входит в объём данного исследования.

Таким образом, целями работы являются исследование потенциала и разработка алгоритмов оптимизации параметров Prod + EE применительно к прямолинейным технологическим переходам с сохранением заданной ориентации инструмента.

В качестве входных аргументов оптимизационной задачи Prod + EE выступают параметры спланированной траектории перемещения инструмента в пространстве задачи: $Pos(t), v(t), a(t)$ – положение, скорость и ускорение. Также в качестве дополнительного входного аргумента использована постоянная составляющая мощности (P_{tool}), потребляемой нагрузкой инструмента (например, термического ножа или паяльника) при его наличии на фланце робота.

Методология. Предложенные в работе алгоритмы и результаты исследований базируются на физически адекватных математических моделях. При этом кинематическая модель манипулятора отражает промышленного коллаборативного робота KUKA LBR iiwa 7 R800, т. е. его массогабаритные и инерционные показатели. Кинематическая модель рассматриваемого коллаборативного робота построена на базе ДН-метода [18]. Решение обратной задачи кинематики (ОЗК) [19] выполняется посредством решателя ОЗК пакета RST MATLAB, базирующегося на методах BFGS GradientProjection [20] и LevenbergMarquardt [21]. Планирование траектории движения центральной точки инструмента (TCP) осуществлялось в соответствии с типовыми требованиями технологических режимов, характерных для прямолинейного фрезерования, шлифования, сварки, трёхмерной роботизированной печати [22] и т. п., в общем, выражающихся в необходимости поддержания скорости перемещения TCP в пределах трапецеидального профиля. В рамках стратегии планирования траектории в пространстве задач использовалась функция trapveltraj [23]. Планирование траектории в пространстве суставов (Joint Space) по результатам решения ОЗК для промежуточных точек осуществлялось посредством метода Piecewise Cubic Hermite Interpolation Polynomial [24] одноимённой функцией rchip (Interpolation/MATLAB). Реализуемость поз робота в соответствии со спроектированными конфигурациями проверялась программными функциями поиска коллизий RST MATLAB и посредством инструментов Inverse Kinematic Designer. Динамическая модель представлена в виде дифференциального уравнения [25], алгоритмы расчёта динамики представлены в работе [26]. Для объединения процедур и объектов использовался смешанный стиль программирования на высокоуровневом языке, в частности MATLAB.

Разработка алгоритма поиска оптимальных параметров линейного перемещения. В отличие от технологического процесса на базе промышленных роботов, где операция линейного перемещения полностью детерминирована, а программа исполнения разработана заранее, неизменна и не корректируется, в коллаборативном процессе часть параметров перемещения определяется в реальном времени. Как правило, заранее неизвестны координаты начальной и конечной точек (например, они могут быть указаны оператором с помощью маркеров и других средств непосредственно в процессе работы), что, в свою очередь, приводит к неопределённости ориентации TCP в глобальной системе координат. Соответственно, неизвестны как начальная и конечная точки конфигурации робота, так и промежуточные. То есть процедура планирования траектории, включая итерационное решение ОЗК, должна в таком случае выполняться в реальном времени. Кроме этого, результат должен быть получен в условиях технологических ограничений операции, для успешного исполнения которой требуется линейное перемещение, а также технических огра-

ничений, определяемых конструктивными характеристиками робота (линейное максимальное ускорение (a_{\max}), линейная максимальная скорость (v_{\max}), а также угловые координаты).

Поскольку конфигурации робота заранее неизвестны и есть коридор ограничений скорости и ускорения подачи ТСР, то представляется возможным выполнить ряд действий для расчёта и выбора оптимального профиля линейной скорости ТСР, позволяющего максимизировать либо производительность операции, либо её энергоэффективность, либо совокупность взвешенных значений $P + EE$.

Исходными данными для задачи оптимизации являются:

1. $v_{\text{lim}} = [v_{\text{Lim}_{\min}}, v_{\text{Lim}_{\max}}]$ – вектор ограничений максимальной скорости v на участке равномерного движения ТСР в рамках трапецеидального профиля скорости;

2. $\vec{P_1P_2}$ – вектор перемещения, при этом обе точки определены для робота в пространстве задач, т. е. известны

$$P_1 = \{x_1, y_1, z_1, A_1, B_1, C_1\}, P_2 = \{x_2, y_2, z_2, A_2, B_2, C_2\},$$

где $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$ – координаты точек в декартовой системе; $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ – углы поворота вокруг осей XYZ соответственно.

Актуальный для решаемой задачи профиль скорости перемещения ТСР представлен на рис. 1.

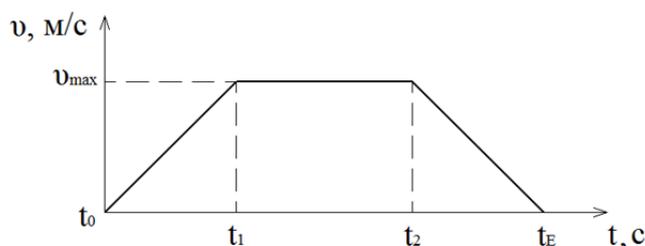


Рис. 1. Трапецеидальный профиль скорости

С учётом трапецеидального профиля скорости (см. рис. 1) уравнение движения описывается как

$$S = \int_{t_0}^{t_1} \frac{v_{\max}}{t_1 - t_0} \cdot t dt + v_{\max} (t_2 - t_1) + \int_{t_2}^{t_E} \left(-\frac{v_{\max}}{t_E - t_2} \cdot t + \frac{v_{\max}}{t_E - t_2} t_2 + v_{\max} \right) dt$$

и, если $t_0 = 0$, $t_1 = t_E/d$; $t_2 = t_E - t_E/d$ и $S = \left| \vec{P_1P_2} \right|$, формула зависимости $t_E(v_{\max}, d)$ имеет вид

$$t_E = \frac{\left| \vec{P_1P_2} \right|}{v_{\max} \cdot \left(1 - \frac{1}{d} \right)}. \quad (1)$$

Учитывая (1) для $\forall v_{\max} v \in [v_{\text{Lim}_{\min}}, v_{\text{Lim}_{\max}}]$ и $\forall d \in (2; \infty)$, представляем возможным вычислить t_E , принимая во внимание ограничения линейного ускорения робота

$$\max \left(\left(\frac{dv(t)}{dt} \right) \right)_0^{t_E} < a_{\max},$$

определить достижимость t_E с исходными параметрами. Тогда задача максимизации производительности будет записываться как

$$t_E(v, d) = \frac{\left| \overset{\rightarrow}{P_1 P_2} \right|}{v \left(1 - \frac{1}{d} \right)} \rightarrow \min$$

при v_{\max} ограничениях $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$, $2 < d < \infty$; $\max \left| \left(\frac{dv(t)}{dt} \right) \right| < a_{\max}$ при $0 \leq t \leq t_E$.

Если учесть факт заранее неопределённой конфигурации робота в точках P_1 и P_2 , необходимо для всех достижимых параметров t_{Eij} , $v_{\max ij}$, d_{ij} найти соответствующее значение энергии (E).

Динамика линейного перемещения робота для каждой пары v_{ij} и d_{ij} (а также сопряжённой с ними t_{Eij}) определяется с заданным шагом дискретизации, например, функцией `trapveltraj` пакета RST MATLAB, позволяющей определить вместе с проекциями $v_{ij}(t)$ также проекции $a_{ij}(t)$ и $S_{ij}(t)$ на оси Ox , Oy и Oz глобальной системы координат робота. При этом происходит расчёт значений времени $t = 0 : t_k : t_{Eij}$.

Далее выполняется решение ОЗК для полученных $S_{ij}(t)$, $v_{ij}(t)$ и $a_{ij}(t)$ при $t = 0 : t_k : t_{Eij}$ методом BFGS при $A, B, C \rightarrow \text{const}$, т. е. осуществление перехода в пространство суставов с последующей интерполяцией значений по методу Piecewise Cubic Hermite Interpolation Polynomial (PCHIP).

Результатом расчёта являются угловые переменные $q_{ij}^r(t)$; $\omega_{ij}^r(t)$; $\frac{d\omega_i^r}{dt}t$ (положение, угловая скорость и угловое ускорение), характерные для выбранного профиля линейного перемещения (для текущих значений v_{ij} и d_{ij}).

На следующем шаге осуществляется проверка выхода из ограничений по угловым скоростям, ускорениям и углам осей робота. В случае успешного прохождения проверки производится решение обратной задачи динамики согласно формуле

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega \\ M(q)^{-1} (-C(q, \omega) \cdot \omega - G(q) - J(q)^T F_{Ext} + \tau) \end{bmatrix},$$

которая может быть также записана в виде

$$M(q) \frac{d\omega}{dt} = -C(q, \omega) \frac{d\omega}{dt} - G(q) - J(q)^T F_{Ext} + \tau,$$

где $M(q)$ – матрица значений масс в пространстве суставов, определённых по текущей конфигурации робота, расчёт данной матрицы возможен с использованием функции `massMatrix`; $C(q, \omega)$ – термы Кориолиса, которые умножаются на ω для вычисления произведения скорости, вычисление произведения скорости, реализовано с помощью функции объекта `velocityProduct`; $G(q)$ – гравитационные моменты и силы, необходимые для того, чтобы все суставы сохраняли своё положение в условиях удельного веса, расчёт моментов сил тяжести реализован с использованием функции объекта `gravityTorque`; $J(q)$ – геометрический Якобиан для указанной конфигурации суставов, вычисление геометрического Якобиана возможно с помощью объектной функции `geometricJacobian`; F_{Ext} – матрица внешних сил, приложенных к телу, генерация матрицы внешних сил возможна с помощью функции объекта `externalForce`; τ – вектор моментов осей и усилий, приложенных к каждой оси; $q, \omega, \frac{d\omega}{dt}$ – соответственно положения осей (рад), скорости осей (рад/с) и ускорения осей (рад/с²), задаваемые отдельными векторами.

После расчёта динамических характеристик представляется возможным определение момента $\tau_{ij}^r(t)$, который также необходимо проверить на ограничения.

Четвёртым шагом является определение значения механической энергии по формуле

$$E_{ij} = \sum_{r=1}^7 \sum_{k=0}^{t_{Eij}} \tau_{ijk}^r(t) \cdot \omega_{ijk}^r(t),$$

т. е. работы механизма, совершённой в рамках трапецеидального профиля линейного движения $v_{maxij}, t_{Eij}, d_{ij}$.

Определяя E_{ij} возможно найти минимальное значение энергии, требуемое для выполнения роботом прямолинейного движения P_1P_2 с профилем скорости v_{ij}, t_{Eij}, d_{ij} при определённых на этапе решения ОЗК конфигурациях робота в P_1 и P_2 .

Представленная процедура может быть описана в виде блок-схемы алгоритма оптимизации траектории перемещения коллаборативного робота в пространстве задач по взвешенной сумме критериев максимизации производительности и энергоэффективности (см. рис. 2).

Пример работы алгоритма оптимизации прямолинейного технологического перехода.

Для демонстрации представленного решения ниже приведён пример моделирования реализации коллаборативным роботом прямолинейного перемещения TCP из точки P_1 в точку P_2 в двух вариантах, связанных с неоднозначностью решения ОЗК методом BFGS. Общие исходные данные для двух вариантов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Наименование переменной	Значение
Позиция TCP в точке P_1 в мировой системе координат	[0.3 0.4 0.4] (X Y Z), м
Ориентация TCP в точке P_1 в мировой системе координат	[- π 0 - π] (X Y Z), рад
Позиция TCP в точке P_2 в мировой системе координат	[0.35 0.05 0.5] (X Y Z), м
Ориентация TCP в точке P_2 в мировой системе координат	[- π 0 - π] (X Y Z), рад
Ограничения максимальной линейной скорости TCP	[0.1 0.6], м/с
Ограничения абсолютного максимального линейного ускорения TCP	[1], м/с ²
Ограничения угловых скоростей осей робота	[98 98 100 130 140 180 180], град.
Ограничения моментов осей робота	[176 176 110 110 110 40 40], Н·м
Ограничение интервала равноускоренного движения	[2.1 5.1]

Конфигурация робота в точке P_1 для двух вариантов была представлена согласно векторам $conf1_v1 = [0.2765 \ 0.5070 \ -2.2752 \ 1.6816 \ -0.4175 \ -1.1491 \ -1.8360]$ и $conf1_v2 = [0.0358 \ 0.8099 \ -1.7783 \ 1.6816 \ -0.8143 \ -1.3442 \ -1.5977]$.

Итоговая конфигурация робота в точке P_2 для робота в варианте 1 была рассчитана как $conf2_v1 = [-0.4722 \ -0.0912 \ -2.5657 \ 1.9325 \ 0.0518 \ -1.2861 \ -3.0543]$, в варианте 2 – как $conf2_v2 = [-1.1537 \ 0.8659 \ -1.1419 \ 1.9325 \ -0.7673 \ -1.6378 \ -2.1744]$.

Результаты моделирования для двух вариантов пар конфигураций представлены группой графиков (см. рис. 3-7).

При этом записям data 1...7 соответствуют указанные на графике переменные для каждой из семи осей робота.

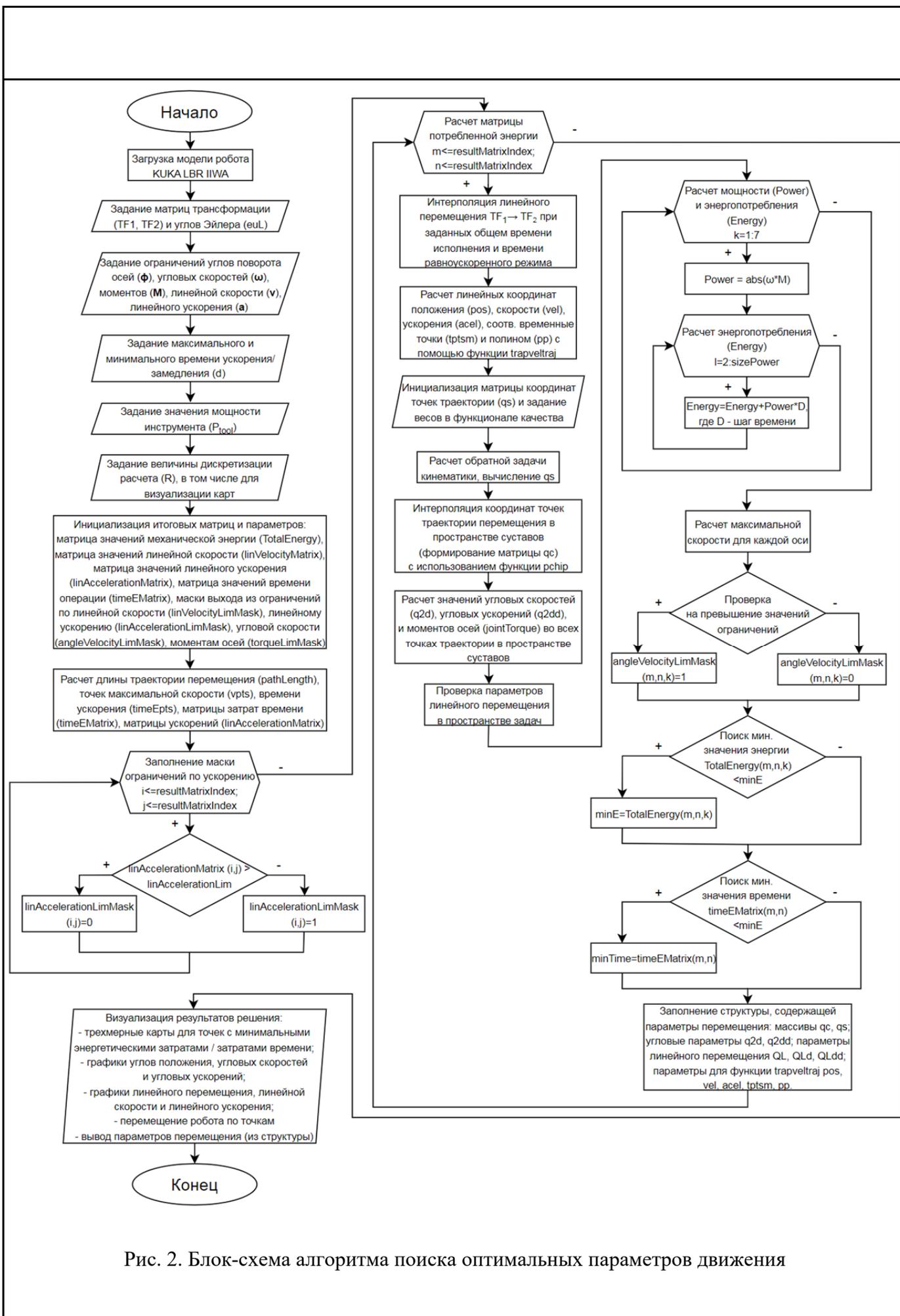


Рис. 2. Блок-схема алгоритма поиска оптимальных параметров движения

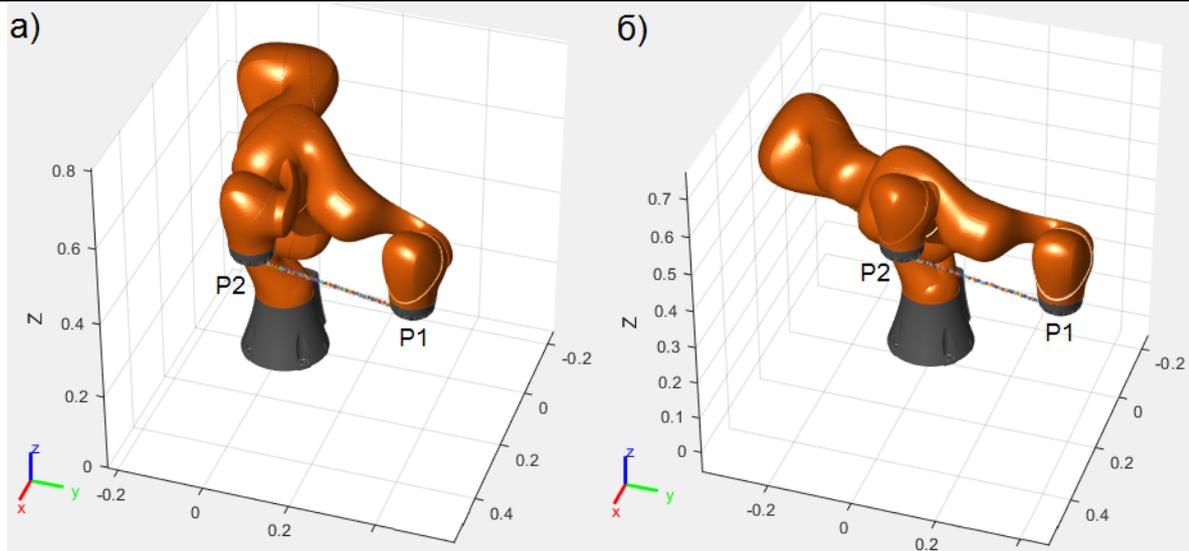


Рис. 3. Конфигурация манипулятора в точках P_1 и P_2 : вариант 1 (а), вариант 2 (б)

С целью учёта влияния мощности, потребляемой инструментом, на общие показатели энергопотребления при выполнении прямолинейного технологического перехода проведены исследования зависимостей (см. рис. 7) при наличии на фланце робота энергозатратного инструмента. В результате получена серия графиков (см. рис. 8), иллюстрирующая суммарные энергетические затраты инструмента и робота при реализации прямолинейного технологического перехода, согласно варианту конфигураций 2.

Таким образом, по графикам (см. рис. 7, 8) можно сделать вывод о том, что при отсутствии потребления электрической энергии оснащающим инструментом ($P_{tool} = 0$ Вт) (к примеру, разметочный карандаш, пневматический захват и т. д.) целесообразно выбирать низкие значения скорости и ускорения при формировании прямолинейного технологического перехода. В том случае, если инструмент также является потребителем электрической энергии, необходимо выбрать оптимальные значения скорости и ускорения по карте энергопотребления (см. рис. 8).

Согласно расчётам и визуализации (см. рис. 6, 7 и 8) в табл. 2 представлены искомые интегральные показатели движения LIN P_1P_2 в двух вариантах.

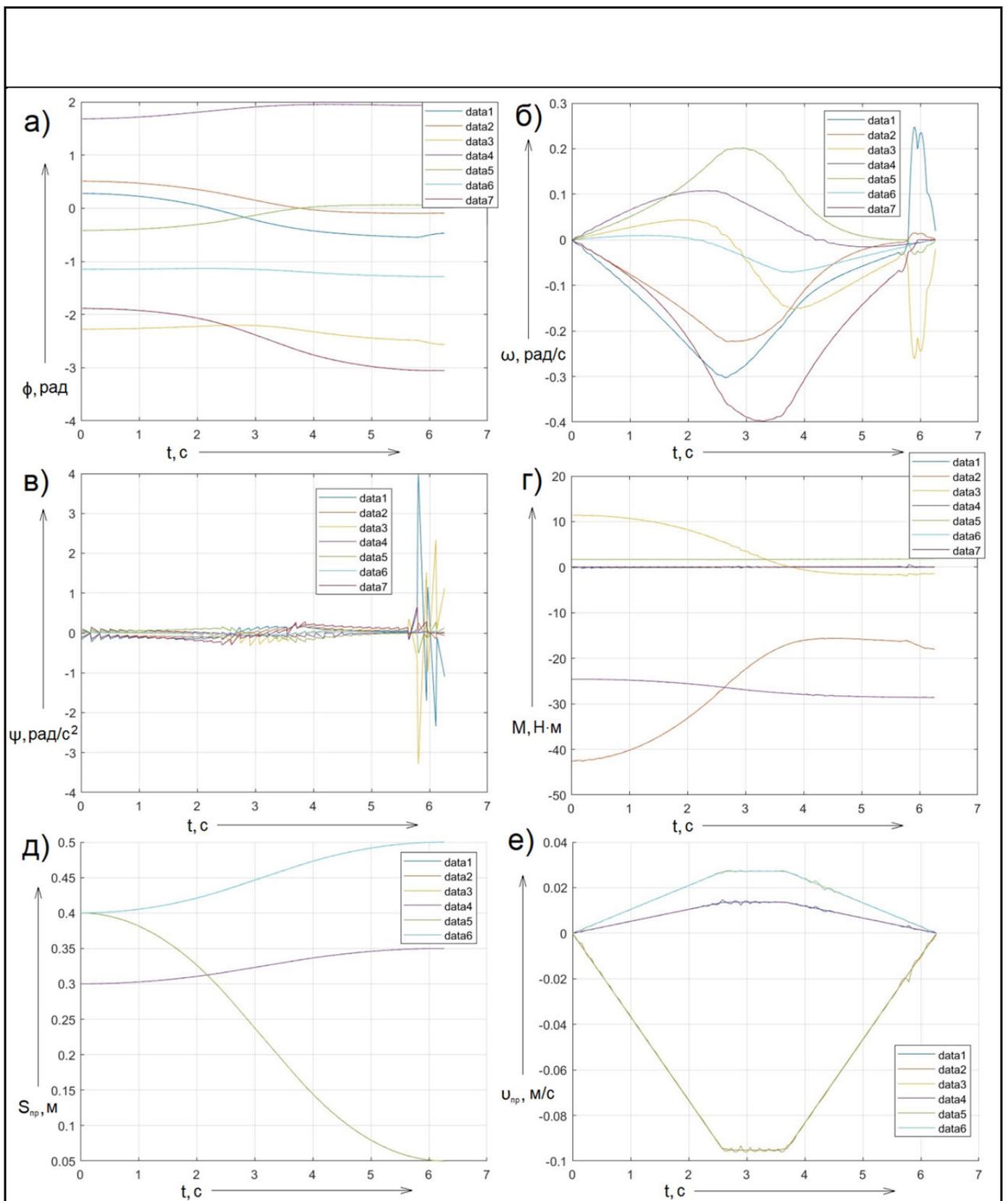


Рис. 4. Графики изменения ключевых переменных при переходе из точки P_1 в P_2 (вариант 1): а – углов положения осей; б – угловых скоростей осей; в – угловых ускорений осей; г – моментов осей; д – проекций линейного перемещения; е – проекций линейных скоростей перемещения

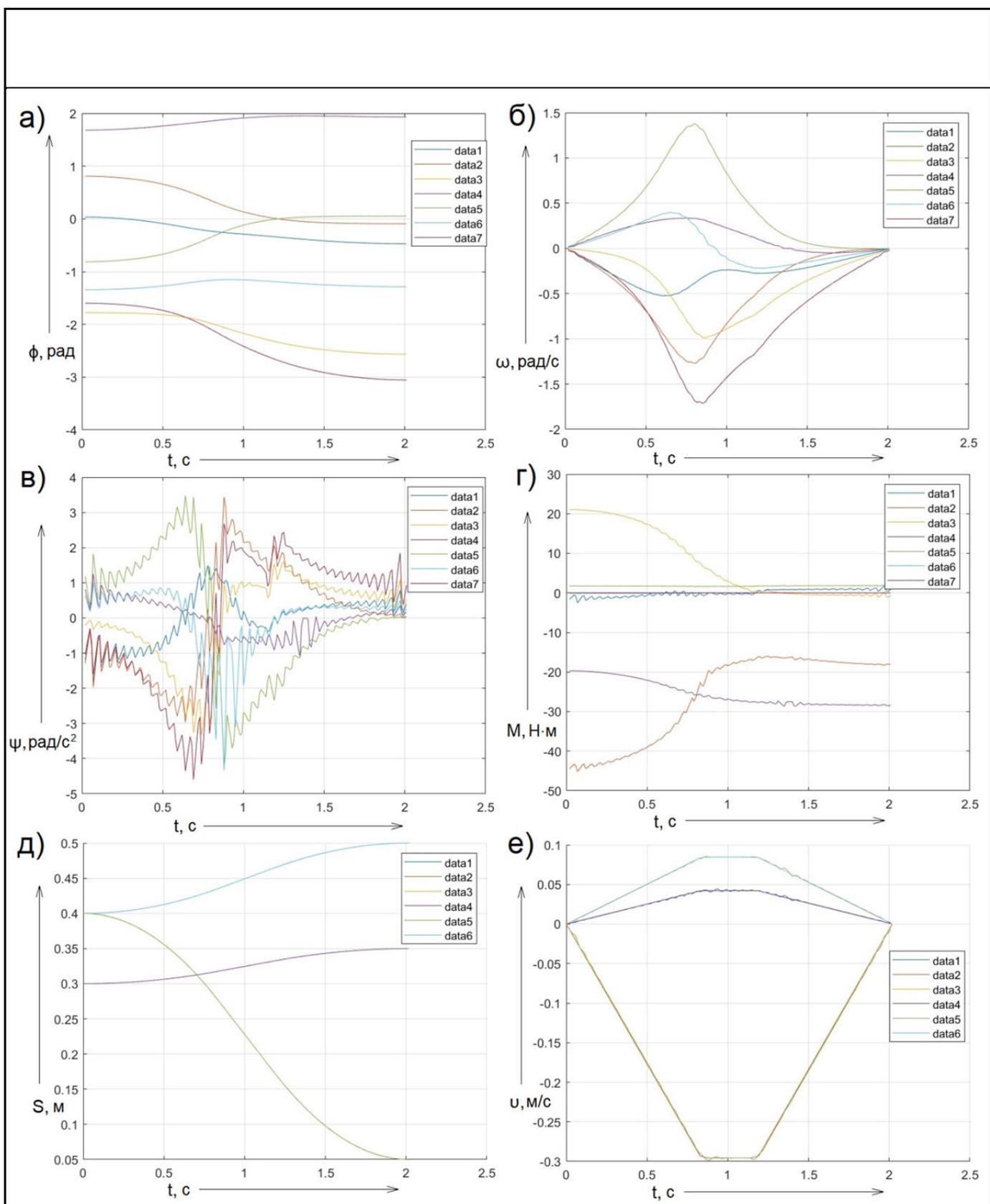


Рис. 5. Графики изменения ключевых переменных при переходе из точки P_1 в P_2 (вариант 2): а – углов положения осей; б – угловых скоростей осей; в – угловых ускорений осей; г – моментов осей; д – проекций линейного перемещения; е – проекций линейных скоростей перемещения

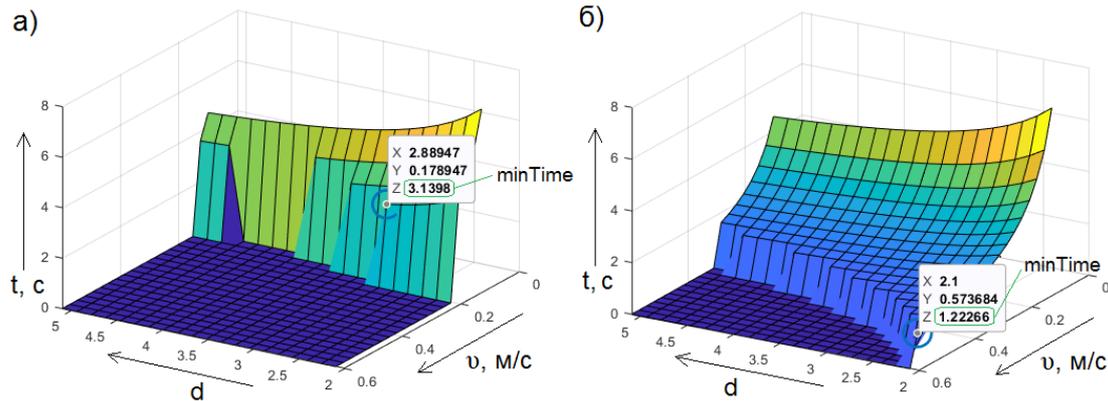


Рис. 6. Трёхмерные графики функций зависимости $t_E(v_{\max}, d)$ с учётом ограничений:
а – вариант 1; б – вариант 2

Согласно табл. 2 был рассчитан потенциал энергосбережения в разрезе двух вариантов (двух итоговых конфигураций), а также соответствующий диапазон изменения производительности в процентах. Результаты расчётов представлены в табл. 3.

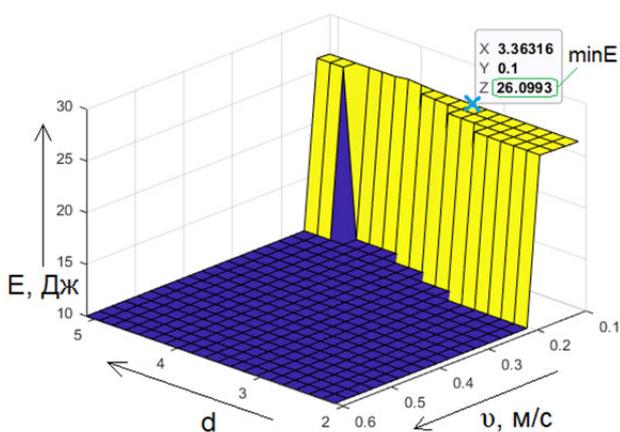


Рис. 7. Трёхмерный график функции зависимости $E(v_{\max}, d)$ с учётом ограничений (вариант 1)

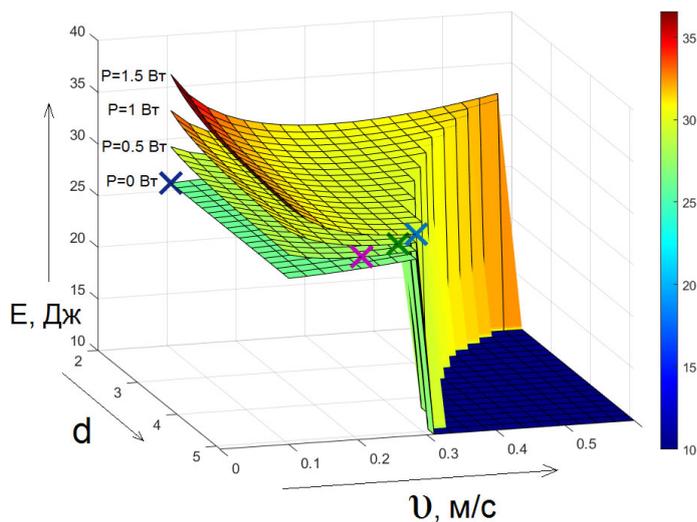


Рис. 8. Трёхмерный график функции зависимости $E(v_{\max}, d)$ при различных значениях мощности (P_{tool}) инструмента (вариант 2)

В табл. 2 и 3 продемонстрирован имеющийся потенциал оптимизации показателей Δt_E и ΔE как в рамках одной конфигурации робота в точках P_1 и P_2 , так и в пространстве всех возможных (в текущем примере двух произвольных) пар конфигураций в точках P_1 и P_2 , ведущих к прямолинейному перемещению ТСП по вектору $\vec{P_1P_2}$ при различных значениях мощности оснащающего инструмента.

Как следует из полученных результатов, достижение высоких показателей производительности и энергоэффективности возможно за счёт:

1. выбора наиболее подходящих конфигураций манипулятора в точках P_1 и P_2 при проектировании прямолинейного перемещения;
2. выбора оптимальных значений скорости и ускорения для реализации прямолинейного перемещения.

Таблица 2

Интегральные показатели движения LIN P_1P_2

Мощность, потребляемая инструментом, Вт	Наименование величины	Вариант 1		Вариант 2	
		$t_{E \rightarrow \min}$	$E \rightarrow \min$	$t_e \rightarrow \min$	$E \rightarrow \min$
0	$t_E, \text{с}$	3.1398	5.2288	1.2227	7.0142
0	$E, \text{Дж}$	26.2808	26.0993	30.6588	26.0517
0.5	$t_E, \text{с}$	3.1398	3.1398	1.2227	2.2265
0.5	$E, \text{Дж}$	27.8507	27.8507	31.2701	27.6618
1	$t_E, \text{с}$	3.1398	3.1398	1.2227	1.7721
1	$E, \text{Дж}$	29.4206	29.4206	31.8814	28.6615
1.5	$t_E, \text{с}$	3.1398	3.1398	1.2227	1.6080
1.5	$E, \text{Дж}$	30.9905	30.9905	32.4927	29.4918

Таблица 3

Оценка потенциала энергосбережения для выбранного прямолинейного траекторного перемещения при заданном критерии оптимизации ($E \rightarrow \min, t \rightarrow \min$)

Мощность потребляемая инструментом, Вт	Потенциал	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1 (E_{\min}) vs. вариант 2 (E_{\min})
0	Δt_E	66.53 %	82.57 %	25.45 %
0	ΔE	0.695 %	15.03 %	0.18 %
0.5	Δt_E	0 %	45.08 %	41.02 %
0.5	ΔE	0 %	11.54 %	0.68 %
1	Δt_E	0 %	31 %	43.56 %
1	ΔE	0 %	10.1 %	2.58 %
1.5	Δt_E	0 %	23.96 %	48.79 %
1.5	ΔE	0 %	9.24 %	4.84 %

Стоит отметить, что для проведения численного эксперимента были выбраны только 2 возможные конфигурации манипулятора, полученные в результате автоматизированного решения обратной задачи кинематики. Как следствие, дальнейшие исследования авторов будут направлены на разработку алгоритмов выбора конфигураций манипулятора с целью достижения оптимумов по производительности/энергопотреблению.

Заключение. В ходе проведённых исследований был предложен оригинальный подход к оптимизации энергопотребления и затрат времени коллаборативного робота при выполнении прямолинейного технологического перехода с учётом существующих ограничений линейной скорости и линейного ускорения.

Согласно представленному подходу разработан алгоритм расчёта времени выполнения технологической операции при прямолинейном перемещении ТСП, а также сопряжённых с движением затрат механической энергии в зависимости от выбора профиля графика изменения линейной скорости. Выявленные зависимости $t_E(v_{\max}, d)$ и $E(v_{\max}, d)$ позволили детерминировать задачи максимизации производительности и минимизации энергопотребления в рамках одной пары конфигураций робота при реализации перемещения типа LIN P_1P_2 , а также задачу оптимизации при функционале качества $F(t_E, E) \rightarrow \text{opt}$.

Работоспособность предложенного подхода подтверждена результатами численного эксперимента на имитационной модели коллаборативного робота в программной среде MATLAB. Продемонстрирован имеющийся потенциал энергосбережения и увеличения производительности как в рамках одной пары конфигураций робота, так и в пространстве всех возможных конфигураций применительно к технологическим перемещениям типа LIN внутри коллаборативного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gorkavyu, M. A., Ivanov, Y. S., Grabar, D. M., Solovev, D. B. (2023). Hybrid model process design of joint operator-robot interaction within a synergistic system. In: AIP Conference Proceedings, 2910(1), 020150.
2. Лямин, М. А. Система совместного управления электроприводами мотор-колесо робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов / М. А. Лямин, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 66-73.
3. Gorkavyu, M. A., Gorkavyu, A. I., Egorova V. P., Melnichenko, M. A. (2023). Automated method based on a neural network model for searching energy-efficient complex movement trajectories of industrial robot in a differentiated technological process. In: Frontiers in Energy Research, vol 11, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1129311>.
4. Pei Jiang, Zuoxue Wang, Xiaobin Li, Xi Vincent Wang, Bodong Yang, Jiajun Zheng. (2023). Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM. In: Journal of Manufacturing System, vol 70, 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.07.009>.
5. Gümbel, P., Xiao He, Dröder, K. (2022). Precision optimized pose and trajectory planning for vertically articulated robot arms. In: Procedia CIRP, vol 106, 185-190. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.176>.
6. Soori, M., Arezoo, B., Dastres, R. (2023). Optimization of energy consumption in industrial robots, a review. In: Cognitive Robotics, vol 3, 142-157. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.05.003>.
7. Преобразование компоновок механизмов параллельной структуры в процессе реконfigurирования / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, Д. А. Буравицын // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 93-98.
8. Грабарь, Д. М. Исследование методов и алгоритмов распознавания образов на изображениях / Д. М. Грабарь, Ю. С. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № VII (71). – С. 20-27.
9. J. Kim, M. Jin, S. H. Park, S. Y. Chung, M. J. Hwang (2020). Task Space Trajectory Planning for Robot Manipulators to Follow 3-D Curved Contours. In: Electronics, vol 9, 1424, <https://doi.org/10.3390/electronics9091424>.
10. Gyawali, P., Vamoriya, S., Dwivedy, S. K. (2018). Joint Space Trajectory Tracking of 5R Manipulator using Open Source Hardware. In: International Conference on Mechanical Engineering (INCOM-2018).
11. Gorkavyu, A. I., Gorkavyu, M. A., Melnichenko, M. A., Kuznetsov, A. A. (2023). Hybrid approach to synthesis of electromechanical block control system of mechatronic module. In: AIP Conference Proceedings 2700, 040010. <https://doi.org/10.1063/5.0124875>.
12. Стельмашук, С. В. Система подчинённого управления электроприводом постоянного тока с последовательным возбуждением / Стельмашук С. В., Черепанов Н. И. // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I (57). – С. 35-45.
13. Рабочий элемент мягкого захватного устройства / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, В. А. Карпенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V (53). – С. 70-78.
14. Мягкие роботы / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I (49). – С. 83-91.
15. Стельмашук, С. В. Электропривод с компенсацией статического момента / С. В. Стельмашук, К. С. Аминов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (43). – С. 73-80.
16. B. T. Gibson, P. Mhatre, M. C. Borish, C. E. Atkins, J. T. Potter, J. E. Vaughan, L. J. Love, (2023). Controls and process planning strategies for 5-axis laser directed energy deposition of Ti-6Al-4V using an 8-axis industrial robot and rotary motion. In: Additive Manufacturing, vol. 58, 103048. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103048>.
17. D. Popov, A. Pashkevich, A. Klimchik (2023). Adaptive technique for physical human-robot interaction handling using proprioceptive sensors. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 126, part D, 107141. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107141>.
18. Раин, Т. Разработка программного модуля для моделирования кинематики и динамики манипулятора / Т. Раин // Прикладная математика & Физика. – 2023. – Т. 55. – № 1. – С. 70-83.
19. M. Dupac (2023). Mathematical modeling and simulation of the inverse kinematic of a redundant robotic manipulator using azimuthal angles and spherical polar piecewise interpolation, in Mathematics and Computers in Simulation, vol. 209, pp. 282-298. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2023.02.010>.

20. S. Nahavandi, R. Alizadehsani, D. Nahavandi, Chee Peng Lim, K. Kelly, F. Bello (2024). Machine learning meets advanced robotic manipulation. In: Information Fusion, vol. 105, 2024, 102221. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102221>.
21. T. Sugihara (2011). Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics by the Levenberg–Marquardt Method. In: IEEE Transactions on Robotics, vol. 27, pp. 984-991. <https://doi.org/10.1109/tro.2011.2148230>.
22. Лепехина, С. Ю. Комплекс алгоритмов работы системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати / С. Ю. Лепехина, С. И. Сухоруков, Ю. А. Давыдов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 68-75.
23. K. M. Lynch, F. C. Park (2017). Modern Robotics: Mechanics, Planning and Control. In: Cambridge: Cambridge University Press.
24. F. N. Fritsch, R. E. Carlson (1980). Monotone Piecewise Cubic Interpolation. In: SIAM Journal on Numerical Analysis. vol. 17, pp. 238-246.
25. R. Featherstone (2008). Rigid Body Dynamics Algorithms. In: Springer US, <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7560-7>.
26. M. N. Vu, F. Beck, M. Schwegel, C. Hartl-Nesic, A. Nguyen, A. Kugi (2023). Machine learning-based framework for optimally solving the analytical in-verse kinematics for redundant manipulators. In: Mechatronics, vol. 91, 102970. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2023.102970>.