

**Горькавый М. А., Горькавый А. И., Мельниченко М. А., Егорова В. П.
M. A. Gorkavyu, A. I. Gorkavyu, M. A. Melnichenko, V. P. Egorova**

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЁТА КИНЕМАТИКИ ШЕСТИОСЕВОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕГО ТРАЕКТОРНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

AUTOMATION OF THE CALCULATION OF THE SIX-AXIS INDUSTRIAL ROBOT KINEMATICS AND MODELING OF ITS TRAJECTORY MOVEMENTS

Горькавый Михаил Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

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

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, Electro Drive Engineering and Industrial Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gorkavyu_ai51@mail.ru.

Мельниченко Маркел Андреевич – аспирант, преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: markel.96dk@mail.com.

Markel A. Melnichenko – Postgraduate Student, Teacher, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: markel.96dk@mail.com.

Егорова Валерия Павловна – аспирант, старший преподаватель кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Ler4ik_007_94@mail.ru.

Valeria P. Egorova – Postgraduate Student, Senior Teacher, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Ler4ik_007_94@mail.ru.

Аннотация. Для передовых промышленных предприятий, использующих роботизированные технологические комплексы (РТК) для повышения производительности и качества выпускаемой продукции, наиболее важными критериями при реализации роботизированных технологических процессов (ТП) являются быстродействие и энергетическая эффективность. Механизмы обеспечения выполнения критериев эффективности базируются на комплексных моделях роботизированных процессов. В работе представлено решение прямой задачи кинематики (ПЗК) типового промышленного робота средней грузоподъемности с целью формирования его кинематической модели, используемой при синтезе интеллектуальных методов, алгоритмов и систем управления РТК. Был сформирован ряд кинематических моделей, обеспечивающих расчёт инерционных сил и графическую визуализацию процессов перемещения манипуляционного механизма. Разработанные модели агрегированы в единую структуру расчёта динамических параметров промышленного робота-манипулятора.

Summary. For advanced industrial enterprises using robotic technological complexes (RTCs) to increase productivity and product quality, the most important criteria for the implementation of robotic technological processes are speed and energy efficiency. Mechanisms for ensuring the fulfillment of efficiency criteria are based on complex models of robotic processes. The paper presents a solution to the direct kinematics problem (MPC) of a typical industrial medium-duty robot in order to form its kinematic model used in the synthesis of intelligent methods, algorithms and control systems of RTC. A number of kinematic models were formed that provide the calculation of inertial forces and graphical visualization of the processes of movement of the manipulation mechanism. The de-

veloped models are aggregated into a single structure for calculating the dynamic parameters of an industrial robot manipulator.

Ключевые слова: роботизированный технологический комплекс, цифровизация, кинематическая модель, пространственная конфигурация, промышленный робот-манипулятор, пространственные перемещения, энергоэффективность, оптимизация технологических процессов.

Key words: robotic technological complex, digitalization, kinematic model, spatial configuration, industrial robot manipulator, spatial displacement, energy efficiency, optimization of technological processes.

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

УДК 004.896

Введение. Экономический рост России и промышленных предприятий невозможен без развития научно-технического прогресса во всех сферах производства [1; 2]. Для совершенствования производственных и технологических процессов необходим широкий наукоёмкий инструментарий, с помощью которого возможно получение наиболее высоких показателей эффективности производства [3; 4]. Устойчивое развитие технологических процессов предприятия возможно за счёт применения автоматизированных или роботизированных технологических комплексов (РТК), оснащённых интеллектуальными системами управления [5; 6]. В связи с этим разработки в области интеллектуализации РТК являются актуальными и должны быть направлены на оптимизацию наиболее важных интегральных показателей роботизированного комплекса, таких как быстродействие и энергетическая эффективность [7–10].

Достижение высоких показателей энергетической эффективности РТК возможно за счёт применения имитационных моделей управления, оснащённых интеллектуальными алгоритмами [11–13; 23].

Такие модели позволяют обеспечить определение оптимальных по критерию энергопотребления комплексов траекторий перемещения конечного эффектора промышленного робота (ПР) в оперативном режиме, а также поддержку принятия решения оператором РТК при отладке управляющих программ. Более того, комплексная имитационная модель, включающая в себя модули расчёта параметров механической, электрической и программной части, а также оснащённая интеллектуальными алгоритмами, например, на базе нечётких и нейронных систем, является элементом цифрового двойника [12] и может быть интегрирована в общую цифровую инфраструктуру производства для формирования рекомендаций системам управления вышестоящих уровней.

При наличии готового инструментария, т. е. подобных «открытых» имитационных моделей, архитектор технологических процессов имеет возможность быстро и качественно синтезировать модули цифрового двойника РТК, используя минимум временных, финансовых и интеллектуальных затрат [14–16].

Целью данной работы является синтез автоматизированной системы расчёта кинематики шестиосевого промышленного робота-манипулятора в среде MATLAB с учётом специфики программного пакета Simscape Multibody и возможностью интеграции расчёта прямой задачи кинематики (ПЗК) с графическими моделями для определения динамических параметров и визуализации траекторных перемещений промышленного робота.

Для достижения представленной цели авторами поставлены следующие задачи исследования:

- решение ПЗК промышленного робота-манипулятора в общем виде;
- формирование кинематической модели механизма промышленного робота на базе примитивов в программной среде;
- создание графически адекватной трёхмерной модели механизма манипулятора для обеспечения визуализации перемещения звеньев.

Решение поставленного ряда задач позволит синтезировать качественную кинематическую модель ПР для разработки алгоритмов формирования оптимальных траекторий перемещения, в частности по критерию минимизации энергопотребления, с визуализацией динамики изменения параметров.

Методология. Прямой задачей кинематики является определение декартовых координат в пространстве по обобщённым координатам, т. е. по углам поворота каждой оси ПР. Для пространственных механизмов наиболее эффективным способом решения этой задачи является векторный метод и метод преобразования координат [17].

Для проведения исследований выбран типовой промышленный робот средней грузоподъёмности KUKA KR10 R1100 sixx [18], входящий в состав Научно-образовательного центра «Промышленная робототехника и передовые промышленные технологии» (НОЦ ПриППТ) при ФГБОУ ВО «КнАГУ», поскольку данный ПР имеет классическую шестиосевую конструкцию. Кроме того, благодаря небольшой массе механизма и большим значениям коэффициентов передач редукторов инерционные силы не оказывают существенного влияния на динамику системы и могут не учитываться при формировании модели энергопотребления.

Математическая модель кинематики шестизвенного ПР представлена в части решения ПЗК и визуализации геометрии звеньев робота в пространстве.

Решение прямой задачи кинематики промышленного робота-манипулятора. При решении прямой задачи о положении звеньев, как правило, используют метод преобразования координат. Из различных методов преобразования координат, отличающихся друг от друга правилами выбора осей локальных систем координат, наиболее простым и распространённым является метод Денавита – Хартенберга [19; 20].

Согласно методу Денавита – Хартенберга, решение ПЗК включает в себя:

- привязку систем координат к звеньям;
- определение параметров Денавита – Хартенберга;
- построение матриц однородного преобразования;
- расчёт углов Эйлера по итоговой матрице вращения.

Благодаря методу Денавита – Хантерберга появляется возможность сократить количество координат, определяющих систему координат в пространстве, с четырёх до трёх, известных как параметры Денавита – Хантерберга.

На рис. 1, а представлен общий вид промышленного робота-манипулятора KUKA KR10 R1100 sixx. На рис. 1, б представлена схема привязки систем координат звеньев.

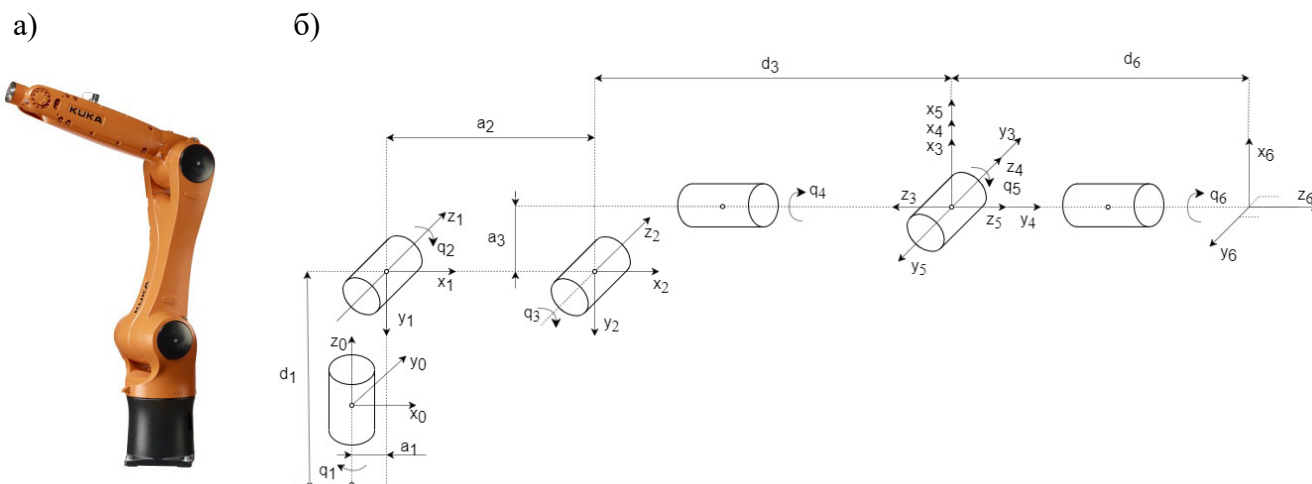


Рис. 1. Общий вид промышленного робота-манипулятора KUKA KR-10 R1100 sixx (а) и схема привязки систем координат звеньев (б)

Схема привязки систем координат (см. рис. 1, б) выполнена в соответствии со следующими правилами:

1. Ось Z всегда совпадает с осью вращения.
2. Ось x_i перпендикулярна оси Z_{i-1} и пересекает её.
3. Ось Y выбирается так, чтобы тройка XYZ была правой.

Параметры $a_1 a_2 a_3 \dots d_1 d_3 d_6 \dots$ получены согласно технической документации [1].

В соответствии с полученной кинематической схемой матрица Денавита – Хантерберга имеет следующий вид:

$$DH = \begin{bmatrix} -\frac{\pi}{2} & \alpha_1 & d_1 & \theta_1 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & \theta_2 \\ \frac{\pi}{2} & \alpha_3 & d_3 & -\frac{\pi}{2} + \theta_3 \\ -\frac{\pi}{2} & 0 & 0 & \theta_4 \\ -\frac{\pi}{2} & 0 & 0 & \theta_5 \\ 0 & 0 & d_6 & \theta_6 \end{bmatrix}.$$

Согласно формуле

$$\begin{aligned} T_i &= T_{z,\theta_i} T_{z,d_i} T_{x,\alpha_i} T_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} R_{z,\theta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & \rho_{d_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & \rho_{a_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{x,\alpha_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} c_{\alpha_i} & s_{\theta_i} c_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i} c_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где R_{z,θ_i} и R_{x,α_i} – базовые матрицы вращения, равные

$$\begin{aligned} R_{z,\theta_i} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ R_{x,\alpha_i} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

ρ_{d_i} и ρ_{a_i} – векторы с ненулевыми компонентами $p_z = d_i$ и $p_x = a_i$.

Следовательно,

$$\rho_{d_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_i \end{bmatrix}, \quad \rho_{a_i} = \begin{bmatrix} a_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае матрицы однородного преобразования будут иметь вид

$$\begin{aligned} T_1^0 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_3^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & d_3 \\ -1 & 0 & 0 & -a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ T_4^3 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_5^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_6^5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

Итоговую матрицу, связывающую все системы координат, как и в случае с матрицами вращения, можно получить последовательным перемножением:

$$T_n^0(q) = T_1(q)T_2(q) \dots T_n(q) = \begin{bmatrix} R_n^0(q) & \rho_n^0(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда для рассматриваемой конфигурации манипулятора итоговая матрица однородного преобразования Денавита – Хантерберга, связывающая все системы координат, будет иметь вид

$$T_6^0 = T_1^0 \times T_2^1 \times T_3^2 \times T_4^3 \times T_5^4 \times T_6^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & a_1 + a_2 + d_3 + d_6 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & a_3 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Полученная итоговая матрица однородного преобразования Денавита – Хантерберга содержит матрицу вращения и вектор смещения. Поскольку матрица вращения в общем случае имеет вид

$$\begin{aligned} R_{zyz} &= R_{z,\varphi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c_\varphi & -s_\varphi & 0 \\ s_\varphi & c_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} c_\varphi c_\theta c_\psi - s_\varphi s_\psi & -c_\varphi c_\theta s_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi s_\theta \\ s_\varphi c_\theta c_\psi + c_\varphi s_\psi & -s_\varphi c_\theta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix}, \\ R_n^0(q) &= \begin{bmatrix} C_\varphi \times C_\theta \times C_\psi - S_\varphi \times S_\psi & -C_\varphi \times C_\theta \times S_\psi - S_\varphi \times C_\psi & C_\varphi \times S_\theta \\ S_\varphi \times C_\theta \times C_\psi + C_\varphi \times S_\psi & -S_\varphi \times C_\theta \times S_\psi + C_\varphi \times C_\psi & S_\varphi \times S_\theta \\ -S_\theta \times C_\psi & S_\theta \times S_\psi & C_\theta \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Углы Эйлера могут быть найдены из соотношений:

$$\begin{cases} \cos \theta = 0 \\ \cos \varphi \times \sin \theta = 1. \\ \sin \theta \times \cos \varphi = 0 \end{cases}$$

Формирование кинематической модели промышленного робота-манипулятора. Согласно схеме, представленной на рис. 1, б, построена кинематическая модель промышленного робота-манипулятора KUKA KR10 R1100 sixx в программном продукте MATLAB (пакет Simscape Multibody) (см. рис. 2).

Массогабаритные характеристики звеньев манипулятора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Массогабаритные характеристики звеньев исследуемого ПР

Наименование звена ПР	Длина звена, м	Приближённый радиус звена, м	Масса звена, кг
1. Base	0.215	0.1146	16
2. Rotating column	0.185	0.0955	7
3. Link arm	0.560	0.0637	15.5
4. Arm	0.105	0.0764	6
5. In-line wrist	0.410...0.150	0.0573	8
6. Wrist	0.08	0.0446	2
7. Flange	0.005	0.0318	0.5

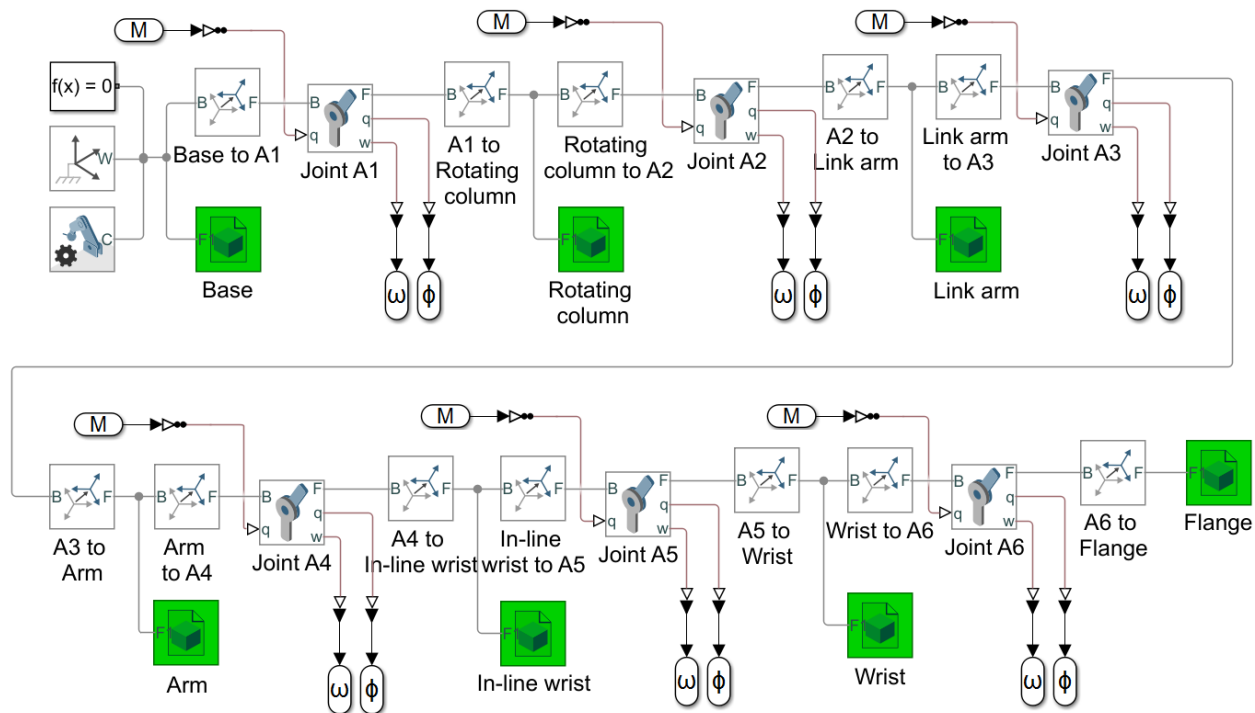


Рис. 2. Кинематическая модель исследуемого промышленного робота-манипулятора в среде MATLAB

Для формирования кинематической модели исследуемого промышленного робота-манипулятора в представленной схеме (см. рис. 2) необходимо произвести задание массогабаритных характеристик в блоках, имитирующих твёрдые тела (звенья), а также матриц однородного преобразования (1) в блоках преобразования систем координат.

На рис. 3 представлены полученные 3D-модели: графическая модель на базе примитивов для последующего подключения физических моделей и расчёта энергопотребления; графически адекватная модель для визуализации внутреннего интерфейса цифрового двойника промышленного робота.

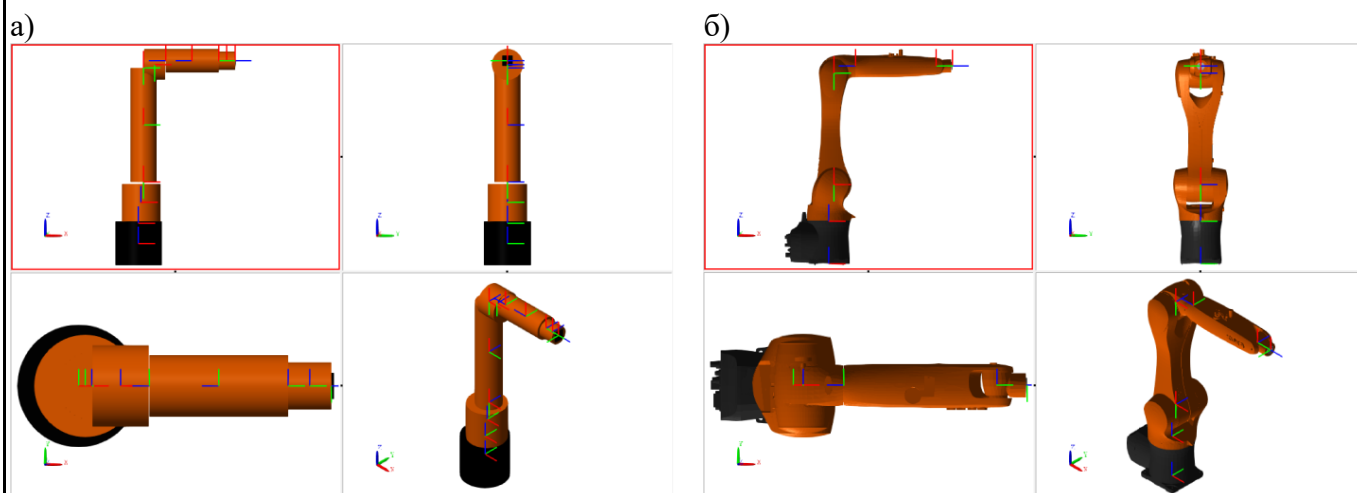


Рис. 3. Графическая модель на базе примитивов (а) и адекватная графическая модель (б)

При разработке графически адекватной модели использованы трёхмерные модели в формате STEP.

При построении кинематической модели в среде MATLAB (пакет Simscape Multibody) осуществляется координатное представление текущего состояния механизма в целом, изменения положения, скорости и ускорения механизма промышленного робота по всем шести независимым координатам.

Модель на базе примитивов (см. рис. 3, а) позволяет быстро рассчитать и учесть моменты инерции, возникающие в процессе перемещения ПР, а также в случае моделирования коллаборативных роботизированных процессов упростить и ускорить расчёт коллизий. Графически адекватная модель (см. рис. 3, б) необходима для интерактивной визуализации всех подвижных звеньев при реализации траекторного перемещения промышленным роботом-манипулятором [21; 22; 24].

Укрупнённая структурная схема аппроксимированной модели расчёта динамических параметров ПР, включающая блок автоматического решения ПЗК, представлена на рис. 4.

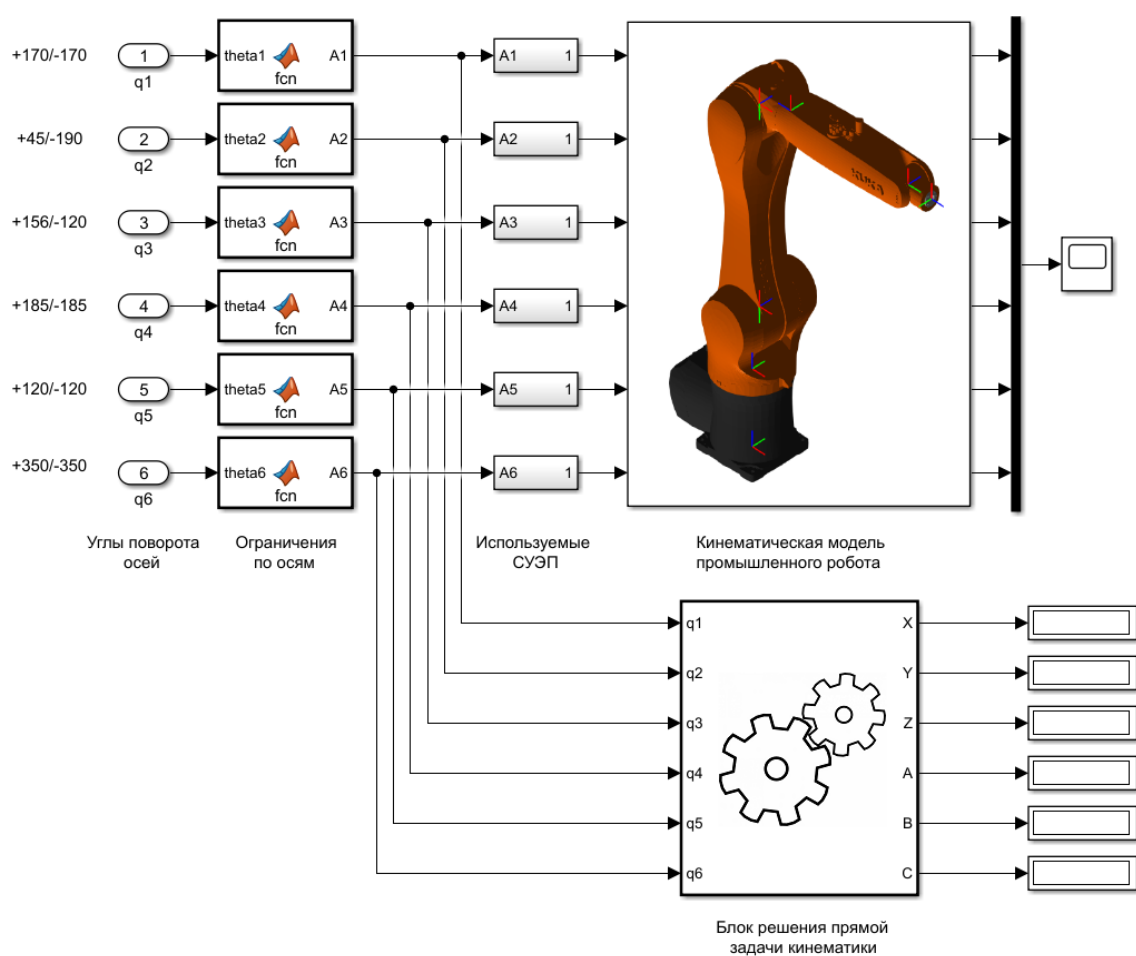


Рис. 4. Структурная схема расчёта динамических параметров ПР

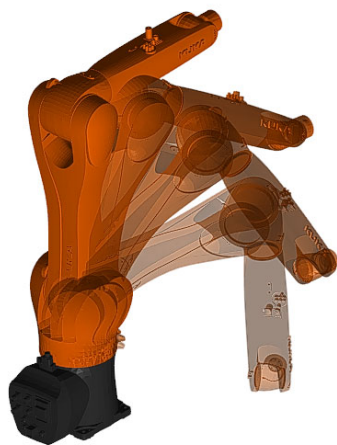
Работа с представленной схемой осуществляется в следующей последовательности:

1. задание желаемых углов поворота шести осей ПР;
2. моделирование системы;
3. анализ переходных процессов перемещения механизма ПР.

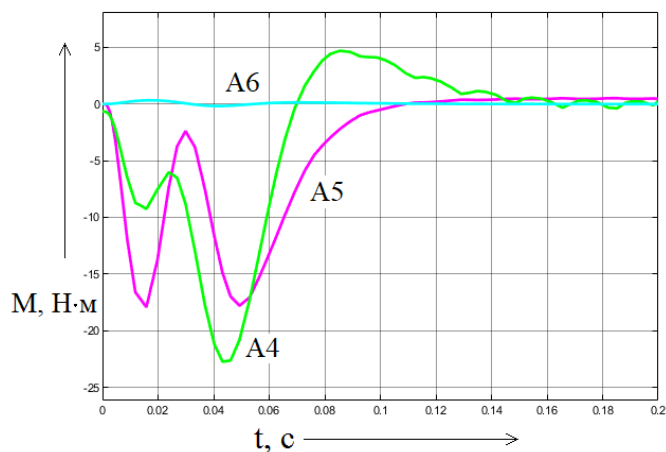
Результаты моделирования перемещения механизма манипулятора согласно сигналам угла поворота ($q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$) с систем управления электрическим приводом представлены на рис. 5.

Представленные графики (см. рис. 5, в, г) демонстрируют изменение переменных на выходе модели (положение, скорость). Также для рассматриваемого траекторного перемещения в качестве примера приведены графики изменения входных переменных (механических моментов (см. рис. 5, б) осей A4-A6, поскольку эти оси являются ориентирующими и обладают малой инерционностью.

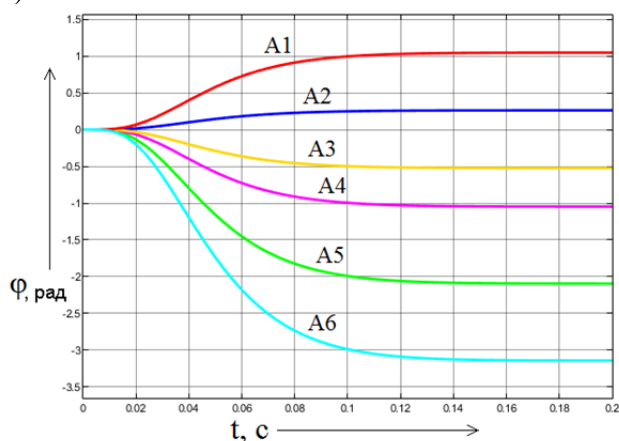
а)



б)



в)



г)

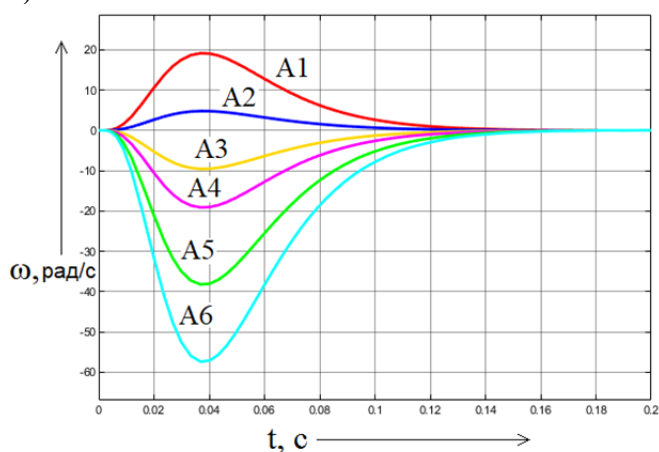


Рис. 5. Результат моделирования перемещения механизма манипулятора (а), графики изменения механических моментов осей A3-A6 (б), графики изменения углов поворота осей ПР (в) и графики изменения скоростей поворота осей ПР (г)

По представленным графикам (см. рис. 5, б, в, г) можно сделать вывод о том, что качественные характеристики разработанных моделей являются адекватными, поскольку характер переходных процессов по положению соответствует классической биномиальной форме [25], на которую в большинстве случаев производится настройка систем управления электрическими приводами (СУЭП) промышленного робота.

Таким образом, представленные модели реализуют требуемый функционал расчёта инерционных сил и графическую визуализацию изменения динамических параметров промышленного робота-манипулятора (положение, скорость, ускорение по всем шести обобщённым координатам), что обеспечивает оператора РТК данными, необходимыми для проведения оптимизационных процедур, а благодаря реализации предложенных решений в специализированном программном продукте MATLAB (Simscape Multibody) разработанная комплексная модель расчёта динамических параметров ПР (см. рис. 5) может быть интегрирована в общую цифровую среду производства и

использоваться в качестве универсальной платформы для моделирования кинематических структур промышленных роботов-манипуляторов.

Заключение. Прямая задача кинематики является важным этапом разработки и настройки роботизированного оборудования. Решение ПЗК роботизированного оборудования включает в себя математические и геометрические вычисления, которые позволяют определить точное положение рабочего органа. В общем случае моделирование и визуализация результата позволяют проверить правильность проектирования и настройки робота.

В рамках данной статьи произведено решение ПЗК манипуляционного механизма промышленного робота KUKA KR10 R1100 sixx для формирования его кинематической модели в среде MATLAB с целью разработки перспективных интеллектуальных алгоритмов и систем управления промышленным роботом в составе РТК.

В качестве ключевых результатов предложенных решений необходимо отметить:

1. Решение ПЗК в общем виде для промышленного робота KUKA KR10 R1100 sixx методом Денавита – Хантерберга.

2. Формирование кинематической модели механической части исследуемого ПР в специализированном программном продукте MATLAB.

3. Предложение гибкого подхода к использованию синтезированной кинематической модели промышленного робота, которая представлена в двух вариантах: модель на базе примитивов (для обеспечения высоких показателей быстродействия при расчёте инерционных сил); графически адекватная модель (с целью обеспечения высокого качества визуализации).

Стоит отметить, что разработанные модели способны работать автономно, что существенно расширяет функционал решения и его применимость для узких задач, таких как разработка моделей энергопотребления специализированных робототехнических комплексов, в том числе коллаборативных, где крайне востребована высокая скорость работы модели для контроля и визуализации процесса, а также прогнозирования сценариев его развития с целью проведения ТП в рамках принятой системы критериев (минимум энергопотребления, максимум безопасности, минимум брака и т. д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухарев, О. С. Технологическая независимость России: способы обеспечения / О. С. Сухарев // Россия: общество, политика, история. – 2023. – № 1 (6). – С. 24-39.
2. Nikonorova, A., Perskaya, V., Itao, T., Morkovkin, D., Shmanev, S., Kerimov, V. (2023). Assessment of the Impact of Technological Trends on Business Activities in the Context of Digital Transformation of Industry. In: Gibadullin, A. (eds) Digital and Information Technologies in Economics and Management. DITEM 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 683. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30926-7_16.
3. Никонова, А. А. Ориентиры изменения модели научно-технологического развития России и выхода из кризиса, по академику Д. С. Львову / А. А. Никонова // Russian Journal of Economics and Law. – 2023. – № 17 (2). – С. 289-306.
4. Жаров, М. В. Обзор программных средств имитационного моделирования для исследования технологий и производств машиностроения / М. В. Жаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 85-92.
5. Petrova, D., Vlahova, B., Lengerov, A., Zlateva-Petkova, T. (2023). Improvement of Constructive-Technological Approaches Reducing Innovative Obsolescence of Industrial Technologies in the Context of Industry 4.0. Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference. Volume 1, 180-186. <https://doi.org/10.17770/etr2023vol1.7238>.
6. Alakwe, K. (2023). Human Dignity in the Era of Artificial Intelligence and Robotics: Issues and Prospects. Journal of Humanities and Social Sciences Studies, 5(6), 87–97. <https://doi.org/10.32996/jhsss.2023.5.6.10>.
7. Zhang, L. (2022). Electric Automation Control Simulation System Based on Intelligent Technology. In: Xu, Z., Alrabaei, S., Loyola-González, O., Zhang, X., Cahyani, N. D. W., Ab Rahman, N. H. (eds) Cyber Security Intelligence and Analytics. CSIA 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol. 125. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97874-7_98.

8. Dahl, M.; Bengtsson, K.; Falkman, P. Application of the Sequence Planner Control Framework to an Intelligent Automation System with a Focus on Error Handling. *Machines* 2021, 9, 59. <https://doi.org/10.3390/machines9030059>.
9. Caiazzo, C., Nestić, S., Savković, M. (2023). A Systematic Classification of Key Performance Indicators in Human-Robot Collaboration. In: Mihić, M., Jednak, S., Savić, G. (eds) Sustainable Business Management and Digital Transformation: Challenges and Opportunities in the Post-COVID Era. *SymOrg 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 562. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18645-5_30.
10. R. Omar, «AI And Energy Efficiency», 2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C), L'Aquila, Italy, 2023, pp. 141-144, doi: 10.1109/ICSA-C57050.2023.00040.
11. Dahl, M.; Erős, E.; Bengtsson, K.; Fabian, M.; Falkman, P. Sequence Planner: A Framework for Control of Intelligent Automation Systems. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5433. <https://doi.org/10.3390/app12115433>.
12. Li, W., Wang, Z., Mai, R. et al. Modular design automation of the morphologies, controllers, and vision systems for intelligent robots: a survey. *Vis. Intell.* 1, 2 (2023). <https://doi.org/10.1007/s44267-023-00006-x>.
13. Abuzar Yaqoob Mulla, Gauri Ansurkar, «AI and Robotics: Designing Intelligent and Adaptive Robots for Industrial Automation», *International Journal of Scientific Research in Science and Technology (IJSRST)*, Online ISSN : 2395-602X, Print ISSN : 2395- 6011, Volume 10 Issue 2, pp. 817-824, March-April 2023. Available at doi: <https://doi.org/10.32628/IJSRST523102126>.
14. Головцова, И. Г. Цифровой двойник как инструмент повышения эффективности и качества бизнес-процессов / И. Г. Головцова, А. А. Ким // *Экономика и бизнес: теория и практика*. – 2022. – № 11-1 (93). – С. 85-94.
15. Фролов, Е. Б. Цифровой двойник производственной системы на основе программного обеспечения категории MES / Е. Б. Фролов, А. С. Климов, М. М. Зин Мин // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2018. – № 12 (73). – С. 66-73.
16. Кубриков, М. В. Цифровой двойник в системе внешнего адаптивного управления роботами-манипуляторами / М. В. Кубриков // *Инновации космической отрасли*. – 2023. – Т. 7. – № 2 (44). – С. 171-176.
17. Лавров, В. Ю. Введение в теорию механизмов и машин: учеб. пособие / В. Ю. Лавров. – СПб.: БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2016. – 143 с.
18. KUKA system software 8.3 rus: инструкция по эксплуатации и программированию для конечного пользователя // *robotforum.ru*, сайт. – URL: http://robotforum.ru/assets/files/Kuka/KUKA_KR_AGILUS_sixx.pdf (дата обращения: 02.11.2023). – Текст: электронный.
19. Раин, Т. Разработка программного модуля для моделирования кинематики и динамики манипулятора / Т. Раин // *Прикладная математика & Физика*. – 2023. – Т. 55. – № 1. – С. 70-83.
20. Раин, Т. Описание программного комплекса для моделирования робота-манипулятора / Т. Раин // *Вестник российских университетов. Математика*. – 2023. – Т. 28. – № 141. – С. 90-96.
21. Горитов А. Н. Построение трёхмерной модели рабочего пространства промышленного робота / А. Н. Горитов // *Доклады ТУСУР*. – 2017. – Т. 20. – № 4. – С. 117-121.
22. Ashhepkova, N. (2021). Devising a method to analyze the current state of the manipulator workspace. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7 (109), 63–74. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225121>.
23. Концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки / С. И. Сухоруков, С. П. Черный, А. С. Мешков, Д. А. Киба // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2020. – № VII (47). – С. 26-33.
24. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2021. – № III (51). – С. 29-38.
25. Мирошник, И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы / И. В. Мирошник. – СПб.: Питер, 2005. – 336 с.