

## Компьютерное моделирование движения робота для точечной контактной сварки

*Романов Роман Романович*  
*НИУ “МЭИ”*  
*Магистрант*

### Аннотация

Исследуется робот-манипулятор, предназначенный для выполнения задач точечной контактной сварки. В рамках системы автоматизированного проектирования SolidWorks 2016 построена 3D-модель сварочного робота. Решена задача построения программного движения робота, что на этапе прохождения рабочего органа вдоль сварного шва требовало многократного решения обратной задачи геометрии движения; расчёты велись при помощи системы компьютерной математики Maple. В среде SolidWorks проведено моделирование программного движения робота.

**Ключевые слова:** точечная контактная сварка, многозвенный манипулятор, сварочный робот, программное движение, Maple, SolidWorks, компьютерное моделирование

## Computer simulation of the motion of the spot welding robot

*Romanov Roman Romanovich*  
*NRU “MЭИ”*  
*Graduate*

### Abstract

A robot manipulator designed to perform spot welding tasks is being investigated. Within the framework of the CAD system of SolidWorks 2016, a 3D model of the welding robot is built. The problem of constructing the program motion of the robot was solved, that at the stage of passage of the end effector along the welded seam it required multiple solution of the inverse problem of the geometry of motion; the calculations were carried out using the computer mathematic system Maple. The simulation of the program motion is performed in the SolidWorks environment.

**Keywords:** spot welding, multi-link manipulator, welding robot, program motion, Maple, SolidWorks, computer simulation

В различных сферах современного промышленного производства потребности в роботизации сварки возникают всё чаще, поскольку применение промышленных сварочных роботов, как правило, приводит к повышению производительности, повышению качества продукции, а также снижению вредного влияния производства на здоровье персонала. Точечная

контактная сварка представляет собой сварочный процесс, при котором детали соединяются в нескольких отдельных точках, а процессы перемещения сварочного инструмента и собственно сварки не совмещены во времени. Такая сварка – наиболее обширная область применения роботов в промышленности; доля роботов для точечной контактной сварки составляет примерно 30 % от общего парка промышленных роботов [1,2].

Заметим также, что именно контактная точечная сварка стала первой областью, в которой стали широко применяться промышленные роботы [2]. Уже в 1969 году компания General Motors установила 26 роботов Unimate на автоматизированной линии для контактной точечной сварки автомобильных кузовов [3]. Со временем сварочные роботы заняли прочные позиции среди используемого для такой сварки оборудования [4].

Исследованию задач управления манипуляционными роботами (в частности, роботами для точечной контактной сварки), планированию траекторий для них и компьютерному моделированию функционирования промышленных роботов посвящён ряд публикаций, среди которых отметим следующие работы.

В статье [5] предложено решение задачи планирования траекторий робота для точечной контактной сварки, учитывающее наличие препятствий в рабочем пространстве и технологические ограничения на ориентацию сварочных клещей. В последовавшей затем работе [1] были также представлены новые алгоритмы генерации программных траекторий таких роботов и проведена проверка эффективности этих алгоритмов при тестировании в экспериментальной среде моделирования роботов.

В статье [6] для сварочного робота, выполняющего многопроходную сварку сложных соединений, предложен алгоритм адаптивного планирования траекторий рабочего органа с поэтапной оптимизацией закона движения по критерию минимального перемещения звеньев. В работе [7] решались задачи оптимизации (в плане энергетических затрат) программного движения робота для точечной контактной сварки.

Кинематика шестизвенного манипулятора для выполнения погрузочно-складских работ анализировалась в статье [8] на примере модельной задачи о построении программного движения робота-бармена; предложенное при этом решение последней предусматривало многократное решение обратной задачи о скоростях и численное интегрирование уравнений кинематики робота. В учебном пособии [9] рассмотрен ряд аспектов планирования траекторий рабочего органа манипулятора и описана реализованная на языке Си типовая программа, предназначенная для решения упомянутой модельной задачи.

По той же схеме, что и в [9] (но при более сложном законе движения рабочего органа), в статье [10] была решена аналогичная задача для робота, выполняющего операцию дуговой сварки, после чего было проведено также компьютерное моделирование движения этого робота в САПР SolidWorks.

В статье [11] были рассмотрены вопросы планирования траекторий и разработки адаптивной системы управления для промышленного робота

KUKA KR 500 при выполнении им операций фрезерования металлических заготовок; исследование включало нахождение жесткостных характеристик робота в отдельных участках его рабочего пространства. Работа [12] посвящена задаче планирования траекторий манипуляционного робота при выполнении в автоматическом режиме типовой операции манипулирования объектом (речь шла о том, чтобы робот открыл пальцем схвата сумку с клапаном на магнитном замке).

Обратная задача кинематики была рассмотрена в работах [13,14] для мобильного манипулятора KUKA youBot; в статье [15] для него же была поставлена и решена задача идентификации параметров его математической модели. Математическая модель для мобильного манипулятора другой конструкции построена и исследована в работе [16].

В настоящей работе задача построения программного движения решается для четырёхзвенного робота, выполняющего типовую операцию точечной контактной сварки. Прототипом рассматриваемого робота стал шестизвенный манипулятор UR3 датской компании Universal Robots (см. страницу «Настольный коллаборативный манипулятор UR3» на сайте этой компании, URL: <https://www.universal-robots.com/ru/продукция/робот-ur3/>). Данный манипулятор по размерам невелик (радиус действия 500 мм) и может быть установлен в тесных местах.

В системе автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks 2016 была реализована 3D-модель исследуемого сварочного робота. Заметим, что указанная версия системы отличается от предшествующих её версий (описанных в [17,18]) наличием многочисленных усовершенствований и дополнений [19].

SolidWorks – это программный комплекс САПР, предназначенный для автоматизации работ предприятий и организаций на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Данный комплекс поддерживает все этапы конструирования – от построения начального эскиза изделия до выпуска документации [18].

Моделируемый здесь робот является четырёхзвенным; в его состав входят неподвижное звено 0 (стойка) и четыре подвижных звена с номерами 1,2,3,4 (последнее из них – это рабочий орган сварочного робота с электродом на конце). Звенья соединены вращательными шарнирами; углы между ними обозначим так:  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ . Процесс создания 3D-модели робота начался с построения в графической среде SolidWorks моделей для пяти деталей, соответствующих звеньям. Затем была осуществлена сборка, т.е. объединение звеньев в единый механизм.

Не будем описывать здесь отдельные шаги этого процесса (всё делается по той же схеме, что и в статье [10]); полученная в итоге 3D-модель сварочного робота представлена на рис.1.

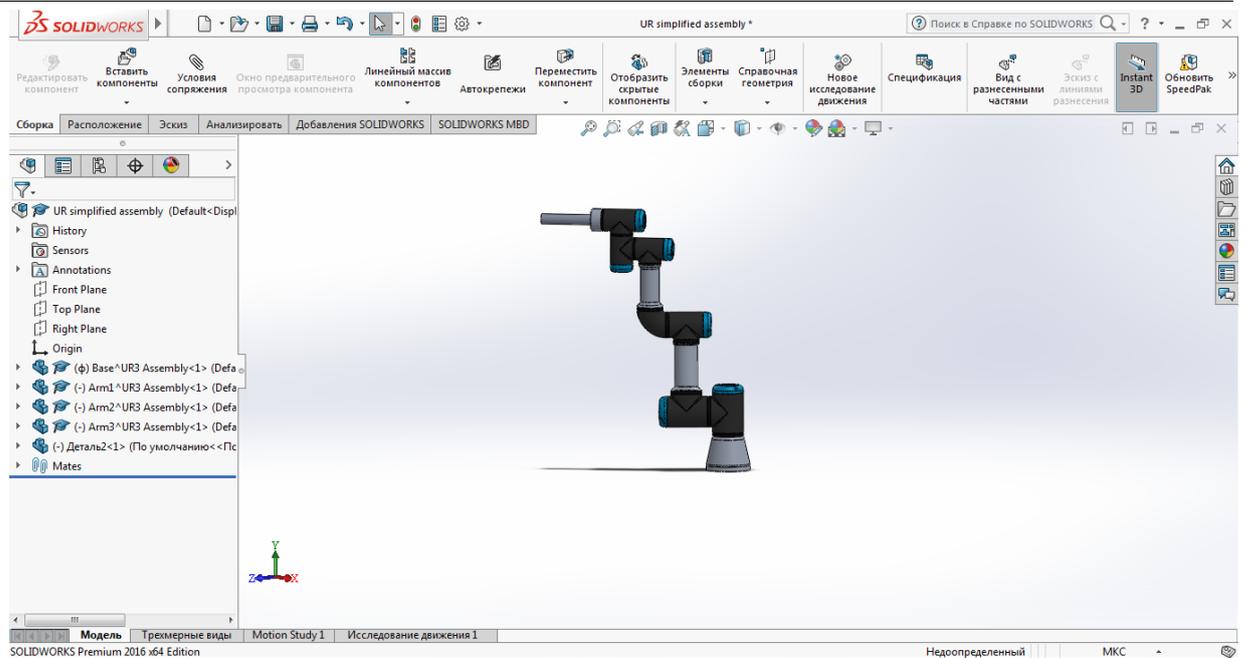


Рисунок 1 - 3D-модель сварочного робота

Рассмотрим теперь построение программного движения сварочного робота при выполнении им типовой операции точечной контактной сварки. Обозначим через  $E$  текущее положение конца электрода и выберем точки на реализуемом сварном шве, в которых будет производиться сварка (понятие сварного шва при точечной сварке является несколько условным, и мы понимаем под ним траекторию конца электрода в процессе сварки). Предполагаем, что точки сварки лежат на одном отрезке прямой, находясь на одинаковом расстоянии друг от друга, а их число равно 4; эти точки обозначим  $E_1, E_2, E_3, E_4$ .

Предполагаем, далее, что перед началом операции робот находится в некоторой заданной исходной конфигурации (она определяется начальными значениями углов  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ ). Предварительный этап операции состоит в выведении конца электрода к точке  $E_1$  за заданное время  $T_0$ . Далее робот за время  $\tau_0$  выполняет сварку в этой точке, оставаясь неподвижным, а затем за время  $\tau_1$  перемещает конец электрода к точке  $E_2$  (при этом точка  $E$  движется вдоль отрезка  $E_1E_2$ ); эти действия повторяются для оставшихся точек сварки.

Выясним, как связаны углы в сочленениях и координаты точки  $E$ . Для этого свяжем с каждым звеном систему отсчёта (роль условно неподвижной системы отсчёта играет система, связанная со стойкой) и введём во всех этих системах отсчёта декартовы системы координат. Будем последовательно применять основную формулу геометрии движения, имеющую такой вид [9]:

$$r_B = \Gamma r_{AB} + r_A. \quad (1)$$

Здесь:  $\Gamma$  – матрица направляющих косинусов абсолютно твёрдого тела, т.е. матрица его оператора ориентации (последний выполняет отнесение векторов из связанной с телом системы отсчёта к условно неподвижной

системе отсчёта);  $r_{AB}$  – постоянный столбец компонент радиус-вектора произвольной телесной точки  $B^*$  (т.е. точки связанной системы отсчёта) относительно точки  $A^*$ , выбранной в этой системе за полюс;  $r_A$  – столбец компонент радиус-вектора текущего положения  $A$  полюса;  $r_B$  – столбец компонент радиус-вектора текущего положения  $B$  точки  $B^*$ .

Поскольку оператор ориентации каждого звена представим в виде произведения оператора ориентации предыдущего звена на относительный оператор ориентации этого звена относительно предыдущего [9], то для расчёта соответствующих матриц направляющих косинусов справедливо рекуррентное соотношение

$$\Gamma_j = \Gamma_{j-1} \Gamma_{j-1,j}. \quad (2)$$

Обозначим через  $O$  начало неподвижной системы координат, а полюсы в связанных с подвижными звеньями сварочного робота системах отсчёта выберем на осях сочленений и обозначим так:  $A^*$ ,  $B^*$ ,  $C^*$ ,  $D^*$ . Расчёты выполняем в системе компьютерной математики Maple [20,21]. В Maple-программе запишем вытекающие из соотношения (2) формулы для расчёта матриц  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$ ,  $\Gamma_4$  (матрицы  $\Gamma_{01}$ ,  $\Gamma_{12}$ ,  $\Gamma_{23}$ ,  $\Gamma_{34}$  – это матрицы вращения вокруг соответствующих координатных осей на углы  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$ ), а также расчётные формулы

$$r_B = \Gamma_1 r_{OB}, \quad r_C = \Gamma_2 r_{BC} + r_B, \quad r_D = \Gamma_3 r_{CD} + r_C, \quad r_E = \Gamma_4 r_{DE} + r_D \quad (3)$$

(учтено, что положения полюсов в предыдущих системах отсчёта неизменны, а текущим положением полюса  $A^*$  является точка  $O$ ).

Не решая задачу предварительного подвода в её общей постановке, ограничимся случаем, когда в процессе подвода углы  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  остаются постоянными, а изменяется лишь угол  $\varphi_4$ . Для отрезка времени  $[0, T_0]$  с постоянным по времени  $t$  небольшим шагом вычисляем значение последнего угла по формуле

$$\varphi_4(t) = \varphi_4^{\text{нач}} + (\varphi_4^{\text{кон}} - \varphi_4^{\text{нач}}) (3s^2 - 2s^3), \quad (4)$$

где  $s = t/T_0$  (учтено, что при изменении  $s$  от нуля до единицы значение последнего множителя также изменяется от 0 до 1, а его первая производная в начальный и конечный моменты времени обращается в нуль; тем самым вращение звена 4 относительно звена 3 происходит с переменной угловой скоростью, которая в начале и конце этапа подвода принимает нулевые значения). При этом по формулам (2),(3) рассчитываем текущее положение конца электрода; тем самым на отрезке  $[0, T_0]$  мы решаем для сварочного робота прямую задачу геометрии движения.

Исходная конфигурация робота была выбрана так, чтобы в конце этапа подвода точка  $E$  совпала с точкой  $E_1$ . Далее для расчёта прохождения робота вдоль шва будем многократно решать обратную задачу геометрии движения, задавая всё время текущее положение конца электрода и находя значения углов в сочленениях робота.

Ограничимся случаем, когда во время реализации сварного шва угол  $\varphi_1$  не меняется, а изменяться могут лишь углы  $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ . Закон движения точки  $E$  на этапе перемещения от предыдущей точки сварки к последующей задаём формулой

$$r_E(t) = r_E^{\text{нач}} + (r_E^{\text{кон}} - r_E^{\text{нач}}) (3s^2 - 2s^3), \quad (5)$$

где через  $s$  обозначено уже отношение разности  $t$  и начального момента этапа к его длительности  $\tau_1$ .

Приравнивая выражение в правой части (5) выражению для  $r_E$ , полученному по формулам (2),(3), получаем систему трёх нелинейных уравнений относительно  $\varphi_2, \varphi_3$  и  $\varphi_4$ , которую решаем численно.

Заметим, что при изменении  $t$  с небольшим шагом каждый раз мы имеем для данных углов хорошие начальные приближения: их значения для предыдущего момента времени. Поэтому для решения системы разумно использовать метод Ньютона, характеризующийся быстрой сходимостью, но требующий наличия хорошего начального приближения [22].

В случаях, когда манипулятор находится близко к границе своей рабочей зоны, его конфигурация близка к особенной, и в этой ситуации требования, налагаемые условиями сходимости метода Ньютона на качество начального приближения, могут оказаться слишком жёсткими. С целью увеличить область сходимости метода Ньютона применяют различные его модификации (они предусматривают контроль нормы текущей невязки и дробление полного шага, если на текущей итерации эта норма возрастает или же убывает, но недостаточно быстро). Мы предусмотрели в нашей Maple-программе применение описанной в статье [23] конкретной реализации одного из вариантов модификации метода Ньютона, предложенных в 1980 году О.П. Бурдаковым [24].

Таким образом, при помощи рассмотренной Maple-программы было построено программное движение сварочного робота и найдены зависимости координат в его сочленениях от времени  $t$ . Найденные зависимости имеют гладкость класса  $C^1$ , обеспечивая достаточную плавность движения робота. Вычисленные значения углов  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  были выведены во внешние файлы для дальнейшего импорта их в среду SolidWorks (в этой системе есть возможность задавать движение сборки, указывая значения координат в сочленениях механизма в заданные дискретные моменты времени; это требует лишь надлежащей настройки «двигателей», связанных с данными сочленениями).

Компьютерное моделирование программного движения сварочного робота в системе SolidWorks с сопутствующей визуализацией показало, что программное движение было построено правильно и отвечает требованиям, предъявляемым к нему применительно к рассматриваемой типовой операции точечной контактной сварки.

Приведём изображения конфигураций робота в конце этапа подвода (рис.2) и после достижения рабочим органом конечной точки сварного шва (рис.3).

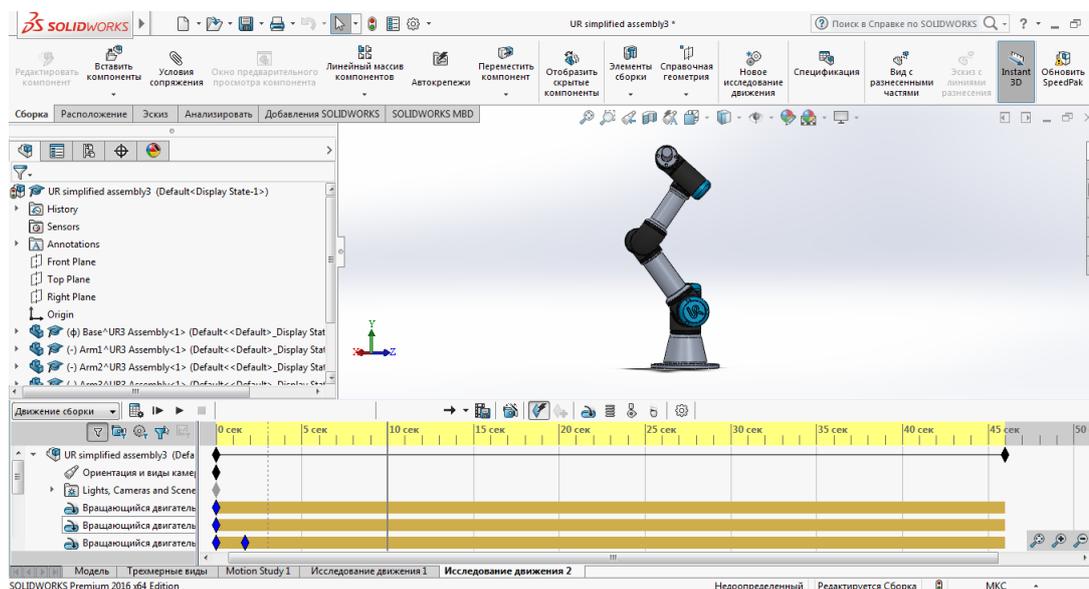


Рисунок 2 - Конфигурация робота в конце этапа подвода

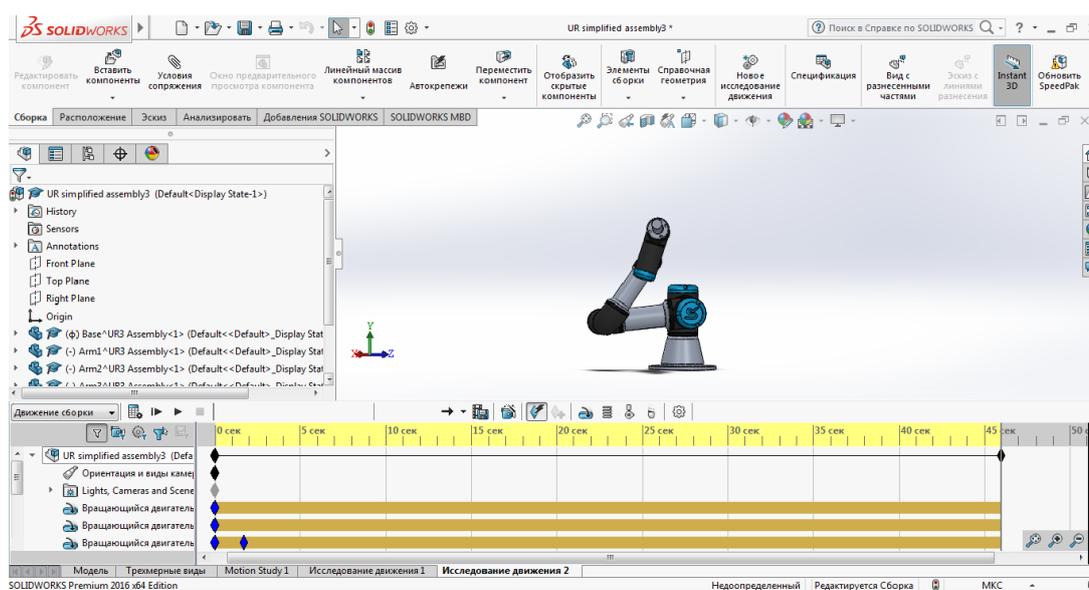


Рисунок 3 - Конфигурация робота по завершении сварки

## Библиографический список

1. Кожевников М.М., Чумаков О.А., Илюшин И.Э., Господ А.В. Генерация программных траекторий для роботов-манипуляторов точечной контактной сварки в среде с препятствиями // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2017. № 7 (109). С. 32–39.
2. Олейников Н.А., Федотов А.Н., Прокуратов И.И. Повышение быстродействия промышленного робота для контактной точечной сварки

- за счёт совершенствования электроприводов // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: Машиностроение. 2014. № 51. С. 60–66.
3. Handbook of Industrial Robotics. Vol. 1 / Ed. by S.Y. Nof. New York: John Wiley & Sons, 1999. xxii + 1348 p. ISBN 0-471-17783-0.
  4. Шолохов М.А. Траекторные задачи при автоматической и роботизированной сварке. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 168 с. ISBN 978-5-7038-4325-3.
  5. Кожевников М.М., Илюшин И.Э., Старовойтов А.В., Косырев В.Н. Планирование траекторий роботов-манипуляторов в технологическом процессе точечной контактной сварки // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2016. Т. 1, № 2 (65). С. 3–10.
  6. Fang Hongchao, Ong Soh Khim, Nee A.Y.-C. Adaptive pass planning and optimization for robotic welding of complex joints // Advances in Manufacturing. 2017. Vol. 5, no. 2. P. 93–104. doi: 10.1007/s40436-017-0181-x
  7. Trnka K., Božek P. Optimal motion planning of spot welding robot applications // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 248. P. 589–593. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.248.589
  8. Корецкий А.В., Осадченко Н.В. Метод винтов и решение на ЭВМ задач кинематического анализа манипуляционных роботов // Тезисы докладов международной конференции “Информационные средства и технологии” (Москва, 22–24 октября 1996 г.), т. 2. М.: Изд-во “Станкин”, 1996. С. 48–53.
  9. Корецкий А.В., Осадченко Н.В. Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 48 с.
  10. Кощеев А.А. Построение программного движения робота для дуговой сварки // Постулат. 2018. № 6. С. 47. URL: <http://e-postulat.ru/index.php/Postulat/article/view/1639/1673>
  11. Швандт А., Ющенко А.С. Исследование возможностей промышленного манипуляционного робота при выполнении сложных технологических операций // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1 (1). С. 18–21.
  12. Лесков А.Г., Илларионов В.В., Калеватых И.А., Морошкин С.Д., Бажинова К.В., Селивёрстова Е.В. Планирование, моделирование и экспериментальное исследование типовой манипуляционной операции // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 4 (109). С. 57–70. doi: 10.18698/0236-3941-2016-4-57-70
  13. Капустина О.М. Описание множества точных решений обратной задачи кинематики робота KUKA youBot с помощью обобщённых координат его платформы // Естественные и технические науки. 2016. № 12. С. 176–180.
  14. Капустина О.М. Аналитическое решение обратной задачи кинематики KUKA youBot, параметризованное обобщёнными координатами его платформы // Экстремальная робототехника. 2017. № 1. С. 42–52.

15. Адамов Б.И., Кобрин А.И. Идентификация параметров математической модели мобильной роботизированной платформы всенаправленного движения KUKA youBot // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 4. С. 251–258. doi: 10.17587/mau.19.251-258
16. Орлов И.В. Построение математической модели мобильного манипулятора и оценка энергетических затрат при его движении // Вестник МЭИ. 2017. № 1. С. 79–83. doi: 10.24160/1993-6982-2017-1-79-83
17. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарёв Н.Б. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
18. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. SolidWorks 2009 на примерах. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 544 с.
19. Гузненков В.Н., Журбенко П.А., Бондарева Т.П. SolidWorks 2016. Трёхмерное моделирование деталей и выполнение электронных чертежей. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 128 с.
20. Кирсанов М.Н. Практика программирования в системе Maple. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 208 с.
21. Кирсанов М.Н. Maple и MapleT. Решения задач механики. СПб.: Лань, 2012. 512 с. ISBN 978-5-8114-1271-6.
22. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копчёнова Н.В. Вычислительные методы. 3-е изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 672 с. ISBN 978-5-383-00302-2.
23. Осадченко Н.В. Монотонная сплайн-интерполяция класса  $C^2$  на основе однопараметрических групп диффеоморфизмов // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2017. № 3. С. 12–27.
24. Бурдаков О.П. Некоторые глобально сходящиеся модификации метода Ньютона для решения систем нелинейных уравнений // Доклады АН СССР. 1980. Т. 254, № 3. С. 521–523.