

## Построение программного движения робота для дуговой сварки

*Кощеев Артём Александрович*

*НИУ “МЭИ”*

*Магистрант*

### **Аннотация**

Объектом исследования является робот-манипулятор, предназначенный для выполнения задач дуговой сварки. Реализована 3D-модель сварочного робота в системе автоматизированного проектирования SolidWorks. При помощи написанной на языке Си программы проведён кинематический анализ робота при выполнении им типовой технологической операции и построено его программное движение. В ходе кинематического анализа был использован аппарат теории винтов. Выполнено моделирование программного движения робота в среде SolidWorks с вычислением управляющих моментов в сочленениях, требующихся для реализации такого движения.

**Ключевые слова:** дуговая сварка, многосвязный манипулятор, сварочный робот, программное движение, теория винтов, SolidWorks, компьютерное моделирование

## Calculation of the deflection of a flat, statically determinate continuous truss with two spans

*Koshheev Artyom Aleksandrovich*

*NRU “МЭИ”*

*Graduate*

### **Abstract**

The object of the study is a robot manipulator designed to perform arc welding tasks. A 3D model of the welding robot in the CAD system of SolidWorks was implemented. With the help of a program written in C language, the kinematic analysis of the robot is carried out when performing a typical technological operation, and its program motion is constructed. In the course of the kinematic analysis, the apparatus of the theory of screws was used. Simulation of the program motion of the robot in SolidWorks was performed with the calculation of the control moments at the joints required to realize such motion.

**Keywords:** arc welding, multi-link manipulator, welding robot, program motion, theory of screws, SolidWorks, computer simulation

Роботизация сварки – перспективное и устойчиво развивающееся направление в автоматизации сварочного производства. Применение роботов при сварочных работах даёт возможность вести производство на меньшей

площади, причём оно не требует значительных затрат на мероприятия по охране труда, неизбежные при ручной сварке, и оплату труда сварщиков-профессионалов. Стоимость сварочных роботов относительно высока, но вложения окупаются достаточно быстро [1].

В современных сварочных роботах применяются различные виды сварки, но наиболее широкое применение нашла дуговая сварка в связи со своей универсальностью и относительной простотой процесса (хотя его автоматизацию осложняет большое число оказывающих на него влияние факторов) [2]. Применительно к дуговой сварке роботизация позволяет улучшить качество сварных швов, повысить точность выполнения однотипных операций и одновременно снизить затраты времени на их осуществление [3]. Заметим, однако, что степень эффективности роботизированной дуговой сварки, особенно для крупногабаритных и нежёстких конструкций с большим числом коротких швов, во многом зависит от рациональной организации процесса проектирования роботизированных технологических комплексов [4].

Вопросам выбора конструкции и математического моделирования функционирования промышленных сварочных роботов посвящено немало научных публикаций. В них рассмотрены проблемы планирования траекторий рабочего органа робота при наличии препятствий в рабочей среде [5,6] и движении по траекториям с многочисленными контрольными точками [7], идентификации математической модели робота [8], управления процессом автоматической сварки [9–11], прогнозированию качества сварного шва [12] и его отслеживанию в реальном времени [13,14].

Поскольку настоящая работа посвящена построению программного движения сварочного робота, заслуживают упоминания и некоторые работы, в которые указанная задача решалась для манипуляторов иного назначения.

Так, в работах [15,16] рассматривалась кинематика шестизвенного манипулятора для выполнения погрузочно-складских работ. Применительно к модельной задаче о роботе-бармене было построено программное движение схвата, реализованное в виде последовательности элементарных транспортных операций, и получены законы изменения координат в сочленениях робота, что потребовало многократного решения обратной задачи о скоростях. В учебном пособии [17] описана типовая программа **kin\_31.c**, предназначенная для решения этой модельной задачи в рамках лабораторного практикума по курсу вычислительной механики.

В статье [18] исследовались вопросы планирования траекторий и управления движением промышленного робота KUKA KR 500 в ходе выполнения операций фрезерования металлических заготовок. Ряд задач кинематики (прямая, обратная, задача позиционирования рабочего органа) для покрасочного робота-манипулятора был рассмотрен в статье [19]. Задачи планирования, моделирования и выполнения в автоматическом режиме типовой операции манипулирования объектом изучались в работе [20]. Получение аналитического и численного решений обратной задачи

кинематики с нахождением координат в сочленениях для трёхзвенного робота-манипулятора DELTA представлены в статье [21].

Решение обратной задачи кинематики было исследовано в работах [22,23] для мобильного манипулятора KUKA youBot – управляемой платформы, несущей пятизвенный манипулятор со схватом. В этих работах удалось получить точное аналитическое решение задачи (ранее такое решение было для данного робота получено в статье [24], но без учёта мобильности платформы). В работе [25] для этого манипулятора решена задача идентификации параметров его математической модели. Для мобильных манипуляторов иной конструкции построение математической модели с численным моделированием их программного движения было рассмотрено также в работах [26,27].

В настоящей работе решается задача построения программного движения шестизвенного манипуляционного робота для дуговой сварки. Прототипом его послужил робот KUKA модели KR 6-2. Данный робот характеризуют грузоподъёмность в 6 кг и радиус действия 1600 мм, он имеет малый контур помех; предназначен для выполнения стандартных задач дуговой сварки в среде защитных газов (см. страницу «Отчёт о применении продукции KUKA: компактная сварочная ячейка в ENKO Staudinger» на сайте компании KUKA, URL: <https://www.kuka.com/ru-ru/отрасли/база-данных-решений/2016/07/solution-robotics-enko-staudinger/>).

Для создания 3D-модели исследуемого робота был использован пакет трёхмерного моделирования SolidWorks 2016 [28]. Он представляет собой систему автоматизированного проектирования (САПР), поддерживающую создание изделий разной степени сложности и назначения и охватывающую все этапы конструирования – от построения начального эскиза до выпуска конструкторской и технологической документации. Система SolidWorks, первая версия которой была выпущена ещё в 1995 году, быстро заняла позицию одного из лидеров среди САПР среднего класса [29,30].

В версию SolidWorks 2016 по сравнению с предыдущими версиями было внесено более двух с половиной сотен изменений. Много процедурных усовершенствований было сделано в разделах Эскиз и Сборка, серьёзной переработке подвергся пользовательский интерфейс [28].

Для создания сборки манипулятора был использован подход «снизу вверх»: это означает, что сначала были независимо смоделированы отдельные детали. Поскольку моделируемый робот является шестизвенным (так что у него имеются шесть подвижных звеньев и одно неподвижное – стойка), в графической среде SolidWorks были построены модели для 7 деталей, представляющих собой звенья робота. Для каждой детали был сначала создан эскиз с заданием необходимых размеров, затем из эскиза была создана объёмная фигура, после чего эта фигура была подвергнута окончательной обработке с созданием отверстий и скруглением граней.

На рис.1 представлен окончательный вид 3D-модели стойки, на рис.2 – вид 3D-модели 6-го звена, т.е. рабочего органа манипулятора.

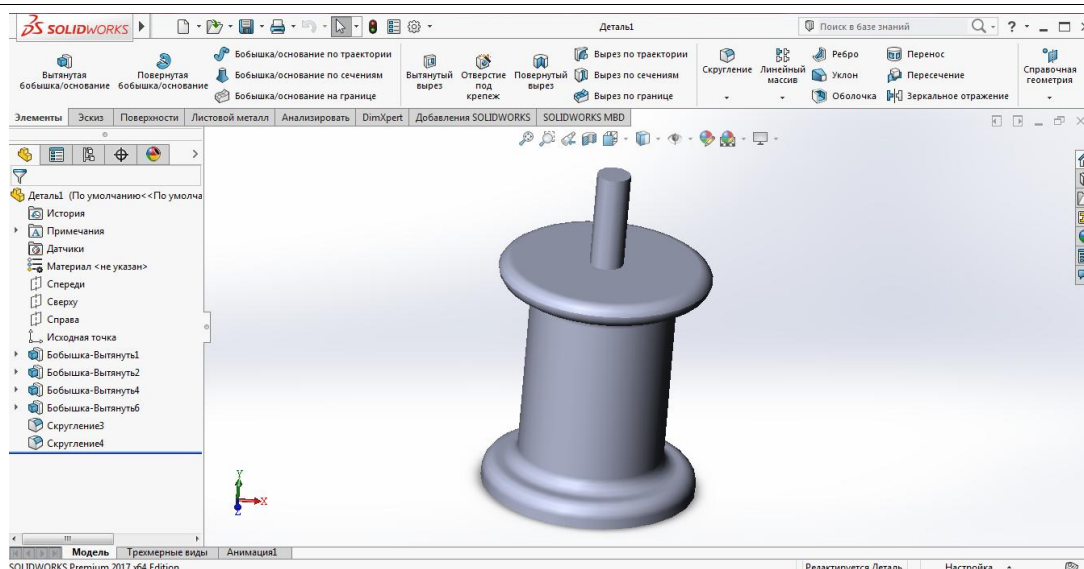


Рисунок 1 — Стойка сварочного робота

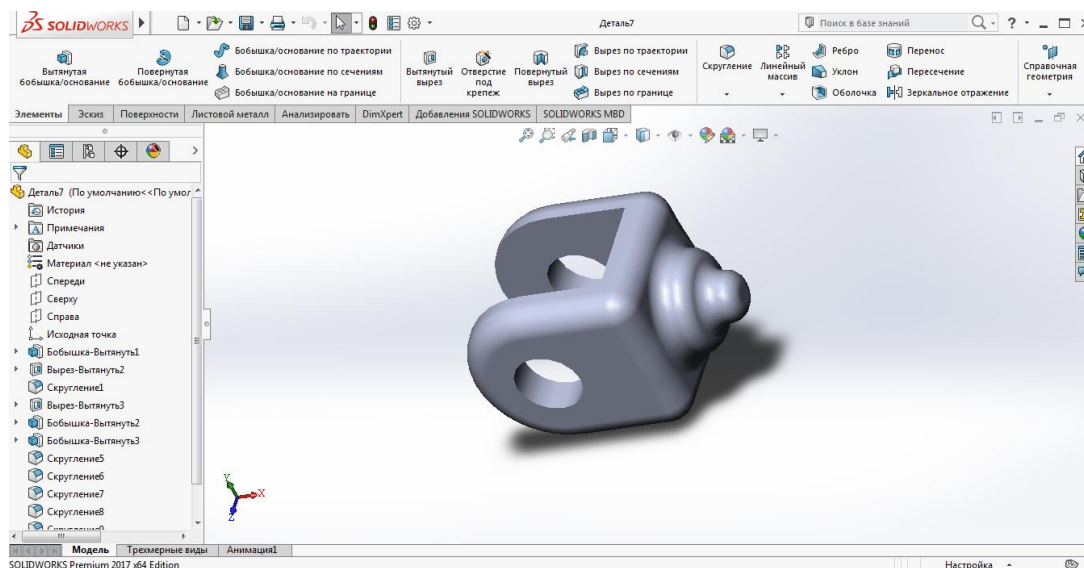


Рисунок 2 — Рабочий орган сварочного робота

После этого был выполнен процесс сборки: созданные звенья были объединены в единый механизм. Процесс начался с создания файла сборки, после чего использовался механизм *Сопряжение* (сопряжения служат для задания геометрических взаимосвязей между компонентами сборки). Окончательная 3D-модель сварочного робота представлена на рис.3.

Переходим к построению программного движения сварочного робота. При этом мы будем следовать подходу, предложенному в работах [15,17]. Он предусматривает численное интегрирование уравнений кинематики робота с многократным решением обратной задачи о скоростях. Предполагается, что на некотором отрезке времени задано движение 6-го звена (фактически – угловая скорость этого звена и скорости точки  $C$  – конца рабочего органа). В ходе решения обратной задачи о скоростях осуществляется вычисление скоростей в сочленениях  $\dot{q}_j$ .

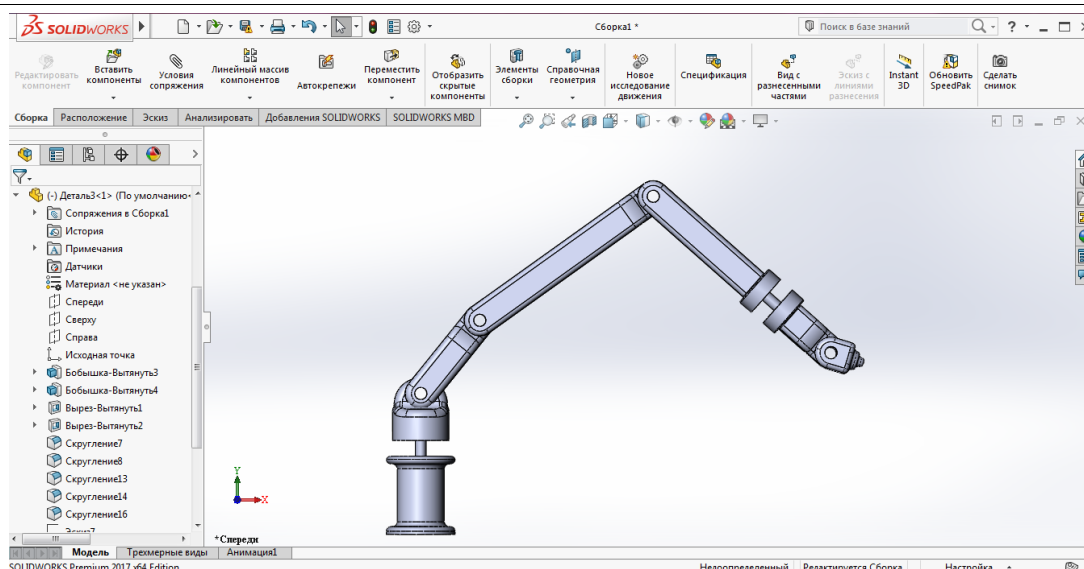


Рисунок 3 — Окончательная 3D-модель манипуляционного робота

Для задачи о роботе-бармене все эти вычисления осуществляла типовая программа **kin\_31.c**, написанная на языке Си. Применительно к моделируемому здесь сварочному роботу программное движение рабочего органа задаётся более сложным образом. Предполагается, что манипулятор должен сначала из произвольно заданной начальной конфигурации вывести точку *C* к начальной точке сварного шва, а вектор подхода рабочего органа должен оказаться направленным вертикально вниз. Затем манипулятор должен, поступательно перемещая свой рабочий орган, провести точку *C* вдоль всего шва.

Мы предполагаем, что шов имеет Г-образную форму, т.е. состоит из двух отрезков, соприкасающихся под прямым углом. Описанное движение рабочего органа требует использования большого числа элементарных транспортных операций, чем в задаче о роботе-бармене.

Поэтому на основе программы **kin\_31.c** для решения обсуждаемой здесь задачи была создана программа **КАА.c**. Эта программа также написана на языке Си и работает под управлением DOS. Сделанные при её написании модификации включали также добавление операторов, с помощью которых производится вывод вычисленных программой значений координат в сочленениях робота во внешние файлы с целью дальнейшего импорта их в среду SolidWorks.

Сами кинематические уравнения имеют тот же вид, что и в задаче о роботе-бармене, и получаются при помощи теории винтов. Они имеют следующий вид:

$$\dot{q} = U_6 \setminus A_K. \quad (1)$$

Здесь  $U_6$  – столбец из компонент кинематического винта 6-го звена,  $A_K$  – квадратная матрица 6-го порядка, столбцы которой (после того, как векторы всех подвижных звеньев робота предварительно найдены по известным рекуррентным формулам геометрии движения [17]) вычисляются

как линейные комбинации некоторых столбцов матриц этих верзоров,  $q$  – столбец из координат в сочленениях, а обратная дробная черта обозначает операцию левого деления столбца на матрицу (т.е. операцию решения системы линейных алгебраических уравнений).

Обсуждаемый здесь подход предполагает, что со всеми звеньями робота связаны системы координат – так, как это принято в формализме Денавита – Хартенберга. При этом в нашей задаче для каждого сочленения координата в нём совпадает с углом в сочленении, а остальные три параметра Денавита – Хартенберга остаются постоянными.

Данные, полученные при построении с помощью программы KAA.c программного движения робота, были импортированы в систему SolidWorks (последняя предусматривает возможность задания движения сборки путём указания значений координат в сочленениях в заданные дискретные моменты времени и чтения этих значений из внешних файлов; такое задание требует соответствующей настройки «двигателей», связанных с сочленениями).

Компьютерная визуализация движения сварочного робота подтвердила, что программное движение построено правильно: рабочий орган был выведен из исходной конфигурации к начальной точке сварного шва, после чего проследовал вдоль него. На рис.4 показана исходная конфигурация сварочного робота, на рис.5 – его конфигурация после выхода к начальной точке шва, а на рис.6 – конфигурация при достижении конечной точки.

Для найденного программного MBD движения при помощи SolidWorks была также решена обратная задача динамики: произведён расчёт тех управляющих моментов в сочленениях, которые требуются для реализации программного движения.

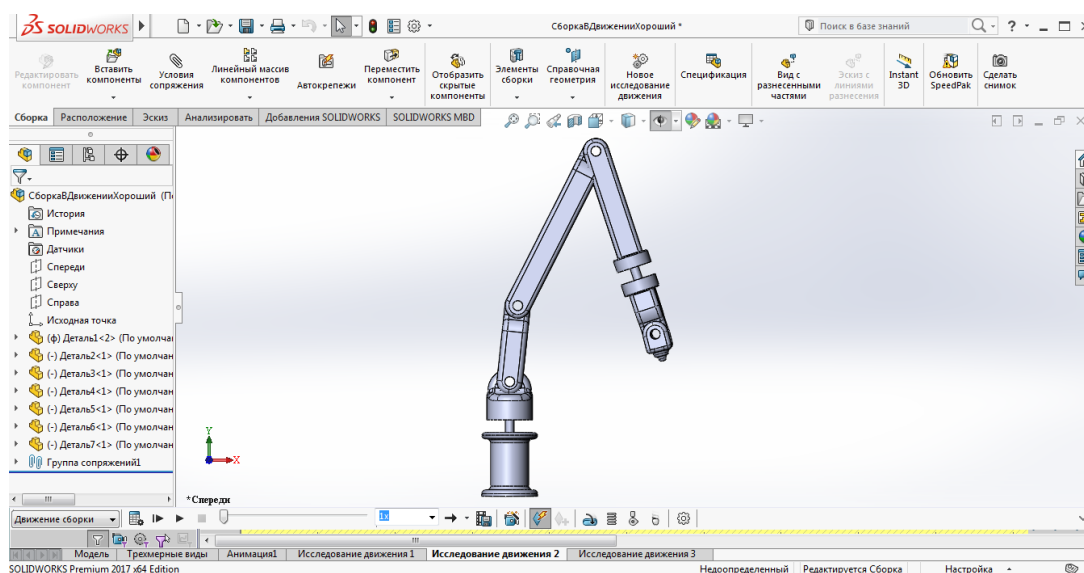


Рисунок 4 — Сварочный робот в исходной конфигурации

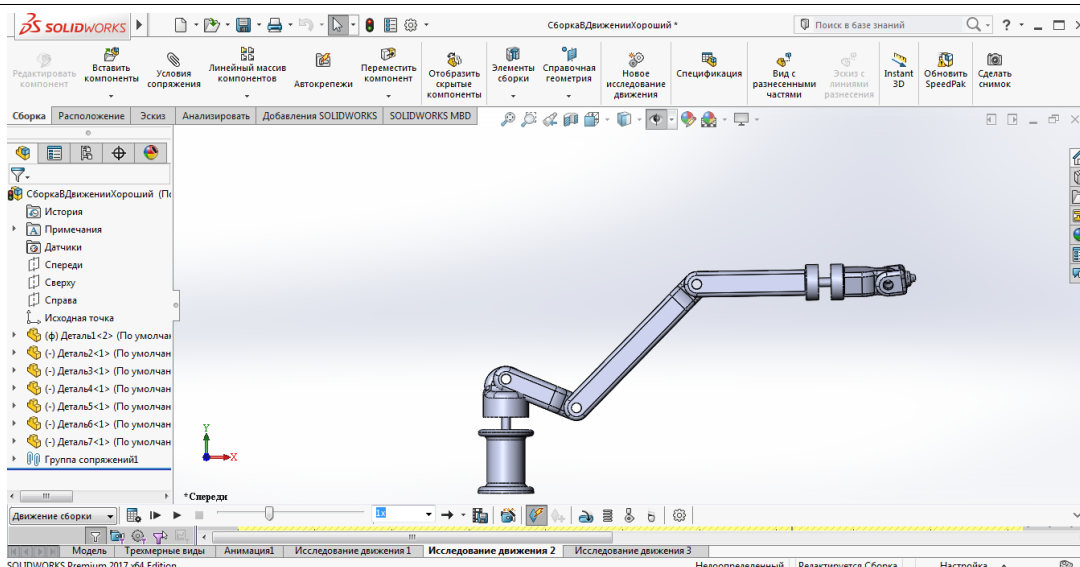


Рисунок 5 — Робот выведен к начальной точке сварного шва

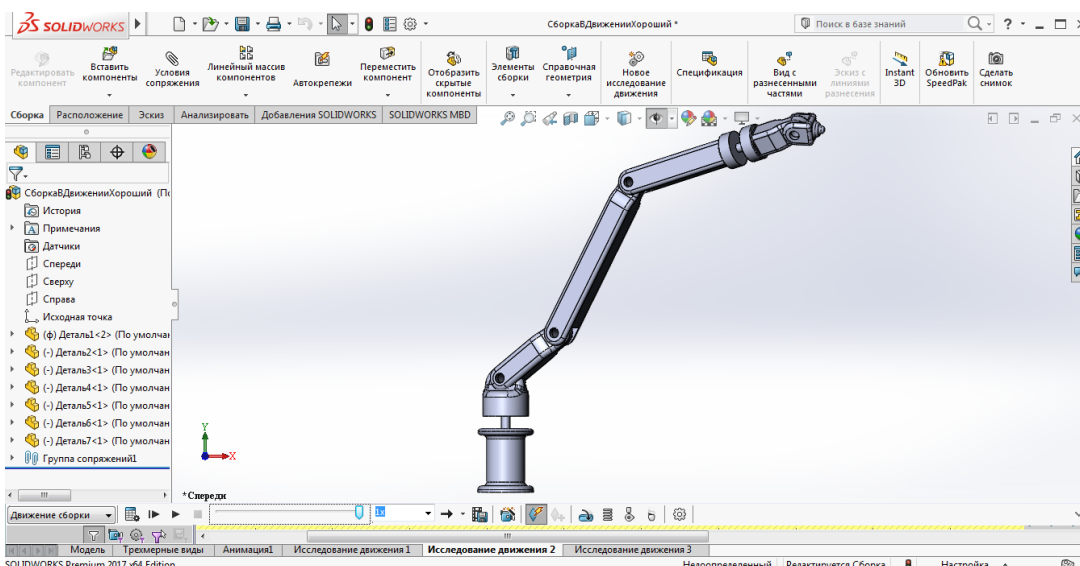


Рисунок 6 — Робот завершил прохождение сварного шва

Просмотр полученных графиков показал, что для двигателей № 2, № 3 и № 4 управляющие моменты велики, причём максимальные значения они принимают на начальном этапе выполняемого сварочным роботом движения. Связано это с тем, что при переходе робота из исходной конфигурации к начальной точке первого шва перемещения велики, а поэтому велики и соответствующие ускорения в сочленениях. Помимо этого, звенья, приводимые в движение этими двигателями, имеют большие значения инерционных характеристик.

Двигатели № 5 и № 6, в свою очередь, перемещают меньшие по габаритам звенья, поэтому управляющие моменты здесь невысоки. Двигатель №1 отвечает за поворот относительно вертикальной оси всего робота, но диапазон изменения координаты в 1-м сочленении невелик, так что и ускорение в этом сочленении оказывается небольшим. Во всех этих случаях

максимальные значения управляющие моменты также принимают на начальном этапе выполняемого сварочным роботом движения.

### Библиографический список

1. Ленчик И.В., Родионова И.Н., Горохов А.А. Проблемы и перспективы развития сварочного производства в России // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2016. № 11-12. С. 69–72.
2. 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.
3. Gholipour A., Eghtesad M., Haghbabah S.A., Khoogar A., Bazargan-Lari Y., Ghahramani A. Tracking Control of a Scara Gas Metal Arc Welding Robot in Circular Path via Adaptive Neural Network Method // Trends in Applied Sciences Research. 2014. Vol. 9, no. 4. P. 187–199. doi: 10.3923/tasr.2014.187.199
4. Людмирский Ю.Г., Солтовец М.В., Грицына А.Н. Принципы организационно-технологического проектирования роботизированных сварочных комплексов // Вестник Донского государственного технического университета. 2007. Т. 7. № 1. С. 47–53.
5. Кожевников М.М., Илюшин И.Э., Старовойтов А.В., Косырев В.Н. Синтез траекторий сборочно-сварочных роботов в рабочей среде с препятствиями // Исследования наукограда. 2015. № 3 (13). С. 36–42.
6. Кожевников М.М., Илюшин И.Э., Старовойтов А.В. Планирование траекторий роботов-манипуляторов в технологическом процессе точечной контактной сварки // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2016. № 2. С. 3–10.
7. Zhu Wen-liang, Ni Fu-sheng, Hong Cao-gen. An Algorithm for the Welding Torch Weaving Control of Arc Welding Robot // Elektronika ir Elektrotechnika. 2014. Vol. 21, no. 2. P. 3–9. doi: 10.5755/j01.eee.21.2.5919
8. Лимаренко Д.П. Идентификация математической модели промышленного робота дуговой сварки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 2. С. 96–100.
9. Сёмкин К.И. Оптимальное управление манипулятором изделия при сварке группированных швов // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2005. № 3. С. 93–97.
10. Дементьев Ю.Н., Князьков А.Ф., Князьков С.А. Система геометрической адаптации специализированного сварочного робота // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 4. С. 117–119.
11. Шварц М.В., Малолетков А.В., Перковский Р.А. Применение лазерной системы слежения для управления процессом автоматической MIG/MAG сварки // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 9. С. 1–12.
12. Людмирский Ю.Г., Лукьянов В.Ф., Жак С.В. Имитационная модель прогнозирования качества сварных соединений при их выполнении



- неадаптивными роботами // Вестник Донского государственного технического университета. 2006. Т. 6. № 4. С. 301–310.
13. Shen Hongyuan, Lin Tao, Chen Shanben, Li Laiping. Real-Time Seam Tracking Technology of Welding Robot with Visual Sensing // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2010. Vol. 59, no. 3-4. P. 283–298. doi: 10.1007/s10846-010-9403-1
14. Поезжаева Е.В., Сергеев А.А., Мисюрлов М.Н. Адаптивная интеллектуальная система отслеживания шва в реальном времени при роботизации сварки // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 6 (2). С. 582–584.
15. 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.
16. Корецкий А.В., Осадченко Н.В., Погорелов Д.Ю. Практика моделирования робототехнических систем средствами программного комплекса “Универсальный механизм” // Тезисы докладов международной конференции “Информационные средства и технологии” (Москва, 22–24 октября 1996 г.), т. 2. М.: Изд-во “Станкин”, 1996. С. 54–59.
17. Корецкий А.В., Осадченко Н.В. Компьютерное моделирование кинематики манипуляционных роботов. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 48 с.
18. 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.
19. Шабном М., Внуков А.А. Математическое обеспечение программных реализаций алгоритмов кинематики манипулятора для моделей покраски поверхности тел // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2014. № 3. С. 38–46.
20. 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
21. Колтыгин Д.С., Седельников И.А., Петухов Н.В. Аналитический и численные методы решения обратной задачи кинематики для робота DELTA // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 5. С. 87–96. doi: 10.21285/1814-3520-2017-5-87-96
22. 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.
23. Капустина О.М. Аналитическое решение обратной задачи кинематики

- KUKA youBot, параметризованное обобщёнными координатами его платформы // Экстремальная робототехника. 2017. № 1. С. 42–52.
24. Brandstätter M., Angerer A., Hofbauer M. An Analytical Solution of Inverse Kinematics Problem of Industrial Serial Manipulators with an Ortho-parallel Basis and a Spherical Wrist // Proceedings of the Austrian Robotics Workshop 2014 (Linz, 22–23 May) / Ed. by H. Gattringer, K. Springer. Linz: Johannes Kepler University, 2014. P. 7–11.
25. 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
26. Адамов Б.И., Орлов И.В. Управление мобильным манипулятором, работающим в цилиндрической системе координат // Вестник МЭИ. 2012. № 1. С. 28–35.
27. 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
28. Малов М.В. SolidWorks 2016: жизнь в новом свете // САПР и графика. 2015. № 9 (227). С. 40–44.
29. 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.
30. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. SolidWorks 2011 на примерах. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 496 с. ISBN 978-5-9775-0690-8.