

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И
ПРОИЗВОДСТВАМИ/AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND
PRODUCTION**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83>

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ЭЛЕКТРОННОЙ ЧАСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО
ДЕЛЬТА-РОБОТА НА ПРИВОДАХ ABB**

Научная статья

Зозулин Д.В.^{1,*}, Толстель О.В.², Тарачков М.В.³, Егурнов С.В.⁴

^{1, 2, 3, 4} Балтийский Федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (don-dimos[at]ya.ru)

Аннотация

В данной работе описывается процесс разработки программного обеспечения промышленного дельта-робота для выполнения специализированных операций, оснащенного приводами ABB и управляемого контроллером SIEMENS, а также модулем расширения X20 компании B&R. Основное внимание уделяется подбору компонентов, интеграции системы и программированию для достижения высокой точности и эффективности работы. Результатом разработки является робот, оптимизированный под задачи укладки продукции на пищевом производстве весом до 1кг, демонстрирующий улучшенные характеристики скорости, точности и надежности. Оригинальность работы подтверждена экспериментальными данными и сравнением с существующими аналогами, а также простотой создания из общедоступных промышленных комплектующих.

Ключевые слова: промышленный дельта-робот, ABB приводы, Siemens контроллер, модуль расширения x20 B&R, робот с параллельной кинематикой интеграция приводов и контроллера, разработка робототехнической системы, промышленная автоматизация.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE AND ELECTRONIC PART OF INDUSTRIAL DELTA ROBOT ON ABB DRIVES

Research article

Zozulin D.V.^{1,*}, Tolstel O.V.², Tarachkov M.V.³, Yegurnov S.V.⁴

^{1, 2, 3, 4} Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

* Corresponding author (don-dimos[at]ya.ru)

Abstract

This work describes the software development process of an industrial delta robot for specialized operations, equipped with ABB drives and controlled by a SIEMENS controller and B&R's X20 expansion module. The focus is on component selection, system integration and programming to achieve high precision and efficiency. The result is a robot optimized for the task of stacking products in a food processing plant weighing up to 1kg, showing improved speed, accuracy and reliability. The originality of the work is confirmed by experimental data and comparison with existing analogues, as well as the ease of construction from commonly available industrial components.

Keywords: industrial delta robot, ABB drives, Siemens controller, x20 B&R expansion module, robot with parallel kinematics integration of drives and controller, robot system development, industrial automation.

Введение

Дельта-робот [1] – это манипулятор, придуманный Рэймондом Клавэлем, директором лаборатории в Федеральной политехнической школе Лозанны (EPFL, Швейцария) в конце прошлого столетия. Фотография одного из первых дельта-роботов представлена ниже, на рисунке 1. Его выходное звено имеет три поступательные степени свободы. Он относится к механизмам параллельной структуры. Обычные механизмы (не параллельные) представляют собой последовательность звеньев (шарнирный робот, порталый манипулятор). В отличие от них, рабочее звено дельта-робота соединено с неподвижным основанием тремя независимыми кинематическими цепями, а сам механизм воспринимает нагрузку, как пространственная структура.

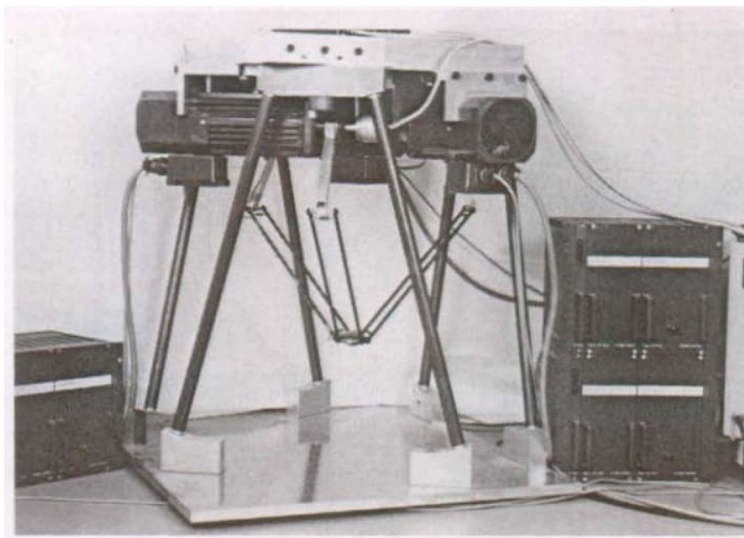


Рисунок 1 - Прототип одного из первых роботов DELTA 580
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.1>

При создании специализированного промышленного дельта-робота, оптимизированного под выполнение конкретных задач, выбор компонентов, проектирование и сборка системы являются ключевыми этапами, влияющими на итоговую производительность и надежность оборудования.

Задача создания дельта-робота для корректировки укладки продукции на пищевом предприятии появилась из необходимости заменить ручной труд. Не всегда продукт на линии правильно паковался в тару в силу ряда причин, таких как пересортировка при укладке вала, остановки оборудования в процессе упаковки и прочие причины. В связи с этим предприятием в сотрудничестве с БФУ им. И. Канта была поставлена задача решить данную проблему. После разработки, изготовления и проведения ресурсных испытаний, созданный дельта-робот, представленный на рисунке 2, был передан в производство, для проведения этапа стыковочных испытаний и внедрения в производственный процесс.



Рисунок 2 - Общий вид дельта робота
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.2>

В ходе этого этапа стало понятно, что необходимы не только мелкие корректировки аппаратной и программной части, а полная модернизация основных узлов. Это было обусловлено необходимостью приведения узлов робота к высоким технологическим нагрузкам и использующимся на предприятии моделям контроллеров и соответствующему им программному обеспечению.

В процессе модернизации аппаратной части была произведена замена редукторов электродвигателей на имеющиеся в наличии на предприятии и использующиеся в похожем производственном оборудовании. Затем была произведена установка и настройка приводов путем подключения сигналов, и выставление задержек момента, тока, задание типа управления. Все это не составило больших затруднений, так как похожие параметры настроек часто производятся в процессе эксплуатации упаковочных машин. После этого был сделан монтаж трансформатора для питания всех узлов автоматики, так как для силовой части использовалось питание 110 В на одну фазу вместо обычно подаваемых 220 В. Затем был произведен монтаж блока питания и установка контроллера. В конце произведена установка и подключение остальных электронных управляющих компонентов, в виде кнопок, датчиков

позиционирования. Далее, было произведено программирование контроллера SIEMENS и настройка связи в специализированной для данных контроллеров среде TIA Portal. После механической сборки и подключения электроники было разработано и загружено программное обеспечение для управления тягами через электродвигатели. В целом движение рабочего органа сводится к математической задаче обратной кинематики. Это требует математического преобразования координат в углы поворота валов электродвигателей.

Ниже приведен пример программных вычислений модели обратной кинематики:

```
// вспомогательная функция, расчет угла theta1 (в плоскости YZ)
int delta_calcAngleYZ(float x0, float y0, float z0, float &theta) {
float y1 = -0.5 * 0.57735 * f; // f/2 * tg 30
y0 -= 0.5 * 0.57735 * e; // сдвигаем центр к краю
// z = a + b*y
float a = (x0*x0 + y0*y0 + z0*z0 + rf*rf - re*re - y1*y1)/(2*z0);
float b = (y1-y0)/z0;
// дискриминант
float d = -(a+b*y1)*(a+b*y1)+rf*(b*b*rf+rf);
if (d < 0) return -1; // несуществующая точка
float yj = (y1 - a*b - sqrt(d))/(b*b + 1); // выбираем внешнюю точку
float zj = a + b*yj;
theta = 180.0*atan(-zj/(y1 - yj))/pi + ((yj>y1)?180.0:0.0);
return 0;
}
// обратная кинематика: (x0, y0, z0) -> (theta1, theta2, theta3)
// возвращаемый статус: 0=OK, -1=несуществующая позиция
int delta_calcInverse(float x0, float y0, float z0, float &theta1, float &theta2, float &theta3) {
theta1 = theta2 = theta3 = 0;
int status = delta_calcAngleYZ(x0, y0, z0, theta1);
if (status == 0) status = delta_calcAngleYZ(x0*cos120 + y0*sin120, y0*cos120-x0*sin120, z0, theta2); //
rotate coords to +120 deg
if (status == 0) status = delta_calcAngleYZ(x0*cos120 - y0*sin120, y0*cos120+x0*sin120, z0, theta3); //
rotate coords to -120 deg
return status;
}
```

Алгоритм работы робота сводится к позиционированию двигателей в начале запуска робота по датчикам нулевого положения двигателей и движению в точку с целевой координатой. Затем происходит сработка рабочего органа по сигналу с контроллера.

Выбор компонентов

Выбор компонентов был обусловлен имеющимися в наличии компонентами, а также надежностью данных компонентов, точностью данных и низкой степенью простоты интеграции. Таким образом, были выбраны приводы ABB BSD 1500. А также сервоприводы той же марки, в основном из-за малого времени отклика и высокой точности позиционирования. Модель приводов – BSM 1500CN01. Указанное оборудование представлено ниже, на рисунке 3.



Рисунок 3 - Приводы и двигатели от компании ABB
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.3>

Интеграция системы управления обеспечивает взаимодействие всех компонентов робота, включая сервоприводы, сенсоры и исполнительные механизмы. Ключевыми аспектами завершения создания системы робота стало программирование и подключение контроллера Siemens s7-300 [2] и модуля X20 B&R [3], представленных ниже на рисунке 4.



Рисунок 4 - Контроллер Siemens s7-300 (а) и модуль X20 B&R (б)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.4>

После установки и подключения электронных компонентов, включая сервоприводы, датчики и систему управления, было реализовано управление через блок питания на 24 В 5А, с подключением энкодеров приводов через модуль расширения X20 [4].

Разработка программного обеспечения

В основу разработки был положен алгоритм по перемещению рабочего органа в пространстве.

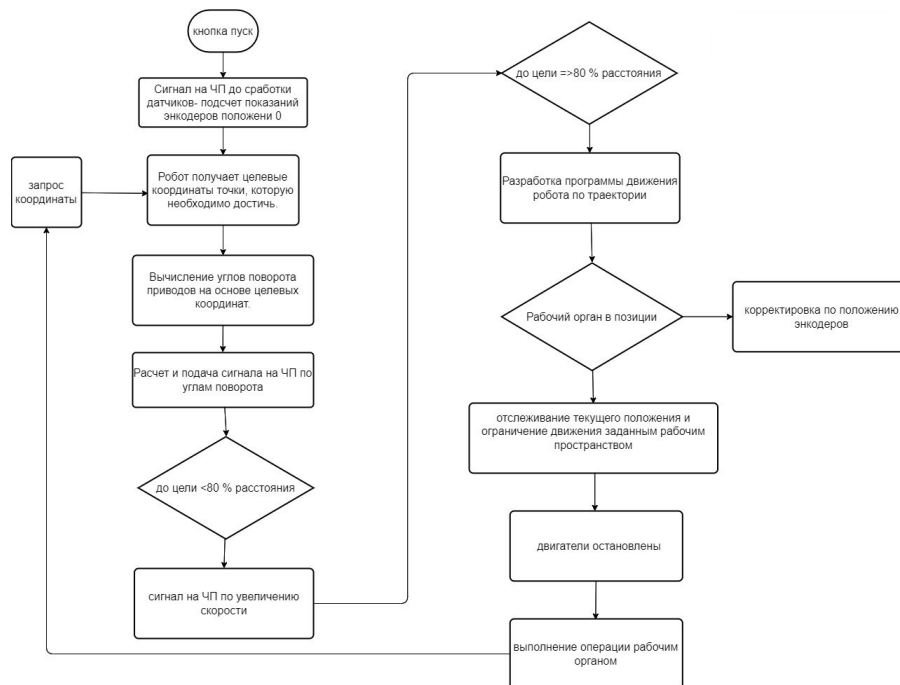


Рисунок 5 - Алгоритм перемещения рабочего органа в целевую координату
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.5>

Было произведено конфигурирование контроллера и модуля расширения в среде TIA Portal (см. рисунок 6):

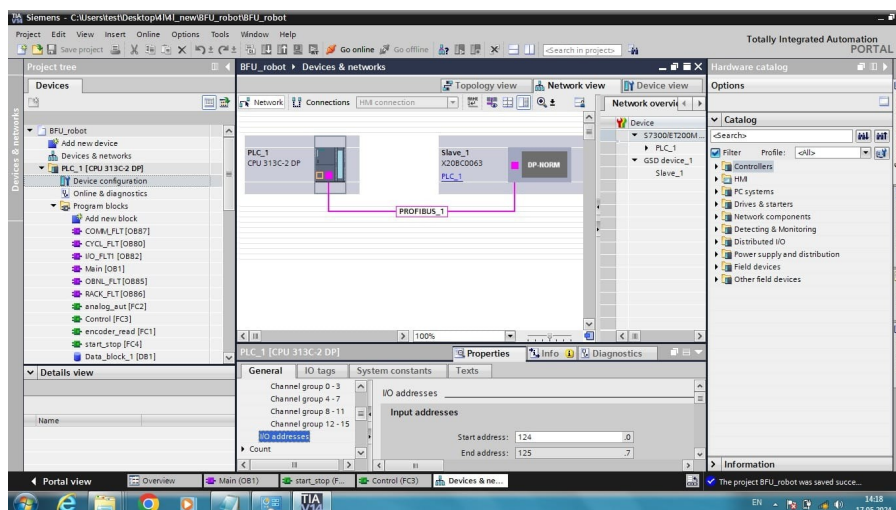


Рисунок 6 - Конфигурирование контроллера и модуля расширения в среде TIA Portal
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.6>

При разработке программы в основном использовались языки программирования, поддерживаемые средой TIA Portal, такие как Ladder Diagram (LD) и, в редких случаях – Structured Text (ST). Ниже, на рисунке 7, на примере главной ветки программы показан фрагмент программного обеспечения.

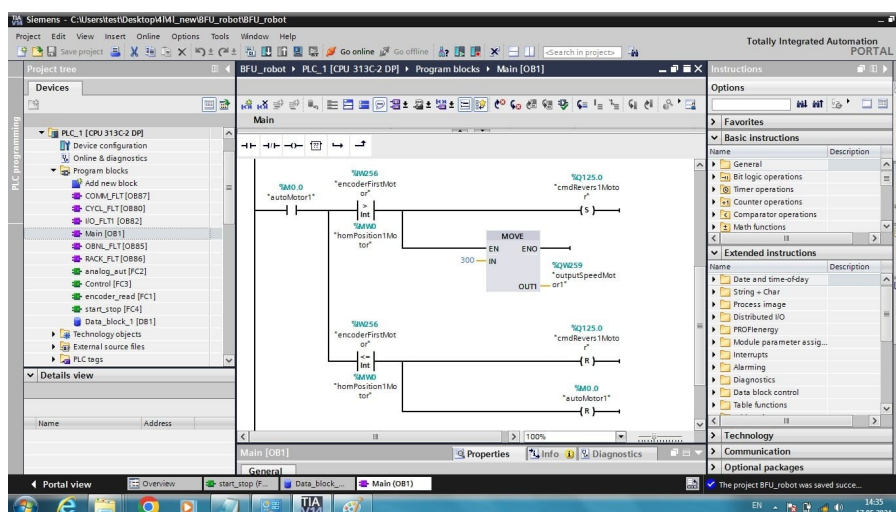


Рисунок 7 - Пример главной ветки программы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.7>

Настройка связи с приводами BSM модуля X20 была выполнена через промышленный коммуникационный интерфейс ProfiBus [5], для обеспечения высокоскоростного обмена данными и командами в реальном времени [6]. Ниже, на рисунке 8 показана коммутация контроллера, блока питания и модуля расширения.



Рисунок 8 - Коммутация котроллера, блока питания и модуля расширения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.8>

Примечание: справа налево

Процесс написания программы включал создание переменных обработки положений энкодера двигателя, передающихся через частотные преобразователи [7]. Далее, значения масштабировались, путем увеличения количества точек положения вала двигателя через модуль расширения и передавались в контроллер. Также использовались дискретные переменные: подачи управляющего сигнала на частотные преобразователи, положения начальной позиции двигателей энкодеров, направления вращения моторов. Окно программы, содержащее используемые переменные, представлено ниже на рисунке 9:

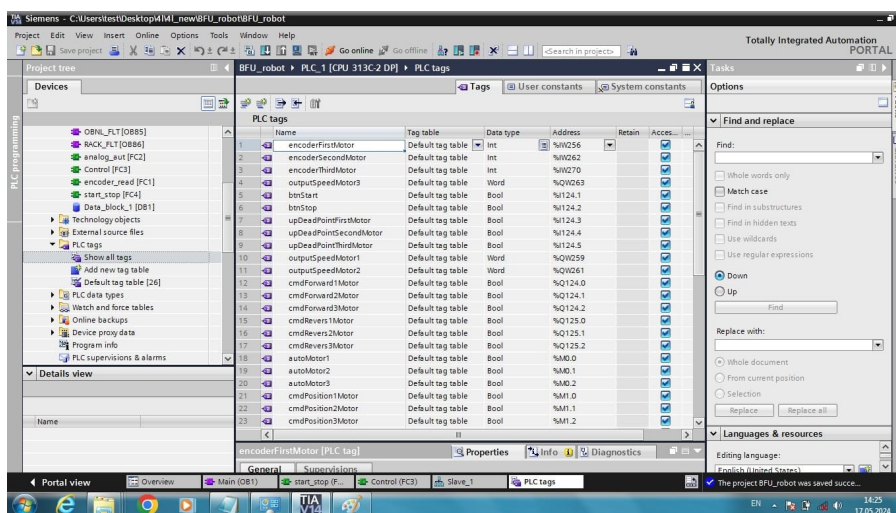


Рисунок 9 - Программные переменные в среде TIA Portal
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.9>

Также, для управления рабочим органом робота и обработки значений энкодера, использовались блоки данных, представленные на рисунке 10:

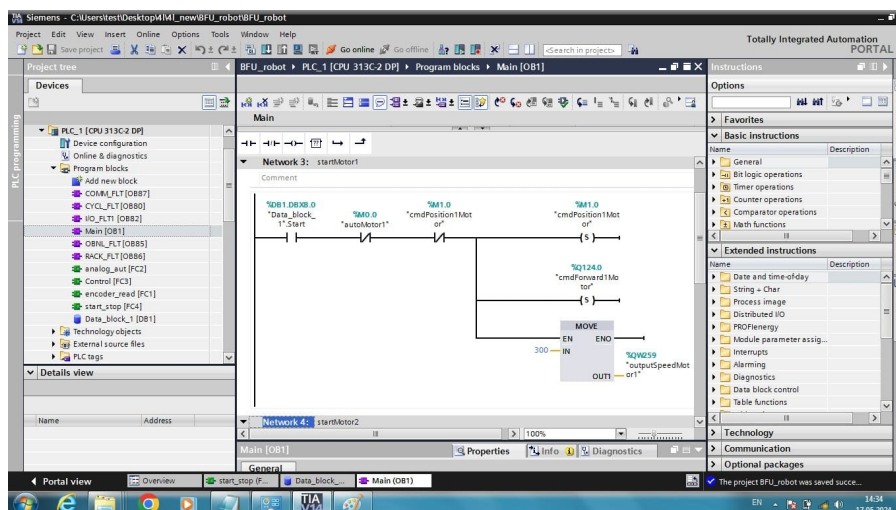


Рисунок 10 - Пример обработки значений энкодера в среде TIA Portal
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.10>

В целях соблюдения тайны коммерческой информации не представлен полный текст программного обеспечения данного робота, а приведены лишь избранные моменты. Это касается и схем электрических подключений узлов, а также фото щита управления.

Тестирование

В процессе тестирования и отладки были проведены испытания для проверки движения в начале калибровки нуля по датчикам положения нулевой точки энкодера, затем выход на позицию [8]. Во время отладки программного обеспечения были применены корректировки конвертации углов поворотов энкодеров путем задания коэффициента-делителя в координаты рабочего органа робота.

Подход к разработке и интеграции промышленного дельта-робота потребовал взаимодействия между специалистами разных специализаций. К решению задач были привлечены механики, инженеры-электроники, программист АСУТП.

Перспективы улучшений

На базе полученного опыта и собранных данных планируется дальнейшая оптимизация работы дельта-робота, в частности разработка дополнительных модулей компьютерного зрения для расширения функционала робота, а также новые типы конечных эффекторов для работы с различными видами пищевой продукции.

Оптимизация работы дельта-робота путем внедрения компьютерного зрения является важным шагом для улучшения его функциональности, точности и эффективности. Этапами внедрения компьютерного зрения может быть установка и калибровка камеры, разработка алгоритмов обработки изображений для анализа визуальных данных, выделения объектов, распознавания образов и позиционирования в рабочем пространстве, интеграция с системой управления для принятия решений на основе полученных визуальных данных. Для более сложных задач компьютерного зрения можно использовать программирование и обучение нейронных сетей для распознавания образов, классификации объектов и принятия решений.

Использование компьютерного зрения позволило бы значительно расширить возможности и функциональность дельта-робота, сделать его более адаптивным к изменяющимся условиям и задачам, а также повысить производительность и точность его работы.

Заключение

В заключении разработки и интеграции специализированного промышленного дельта-робота на основе приводов ABB, контроллера Siemens и модуля X20 от B&R можно подчеркнуть несколько ключевых аспектов, которые стали основой для успешной реализации проекта [9]. Выбор высококачественных компонентов от ведущих производителей, таких как ABB для сервоприводов и B&R, Siemens для контроллера, обеспечил не только высокую эффективность работы робота, но и его долговечность [10]. Такие решения способствуют минимизации простоев и снижению эксплуатационных затрат. В статью не включена часть по разработке программного обеспечения панели оператора робота, так как размер статьи не позволяет представить необходимые пояснения. Описание решения этой части может быть изложена в следующей публикации.

В итоге данный проект подчеркивает значимость междисциплинарной работы и инновационного мышления в разработке современных промышленных решений. Он показывает успешное сочетание теоретических знаний и практического опыта, направленных на решение сложных инженерных задач.

Надеемся, что этот материал инициирует сотрудников различных предприятий на деятельность в сфере разработки производственного оборудования.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Гибадуллин Р.Ф., Казанский национальный
исследовательский технический университет им. А.Н.
Туполева – КАИ, Казань Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.11>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Gibadullin R.F., Kazan National Research Technical
University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan Russian
Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.83.11>

Список литературы / References

1. Тарачков М.В. Разработка робота-манипулятора ДР-1 / М.В. Тарачков, А.В. Каленик // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы. Материалы V Всероссийской Пospelовской конференции с международным участием / Под ред. А.В. Колесникова. — 2020. — С. 482-489.
2. Петров И.И. Проектирование и разработка промышленных дельта-роботов с использованием приводов АBB / И.И. Петров, А.А. Сидоров // Робототехника и автоматизация. — 2022. — С. 3
3. Смирнов П.П. Сравнительный анализ контроллеров Siemens для робототехнических систем / П.П. Смирнов, Н.Н. Иванов // Международная конференция по робототехнике (ICRA). — 2023. — С. 5
4. Ким Ч.Х. Использование модуля расширения x20 в робототехнике: особенности и преимущества / Ч.Х. Ким // Инженерные решения. — 2020. — С. 5
5. Ли М.Г. Применение модуля B&R для расширения функциональности дельта-роботов в промышленности / М.Г. Ли, Д.Х. Сунг // Конференция по автоматизации производства. — 2021. — С. 6
6. Блум Б. Программирование приводов АBB для промышленных роботов: практическое руководство / Б. Блум, Дж. Райт. — Технофорум, 2019. — С. 7.
7. Groover M.P. Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications / M.P. Groover, M. Weiss, R.N. Nagel. — Hill College, 1986. — 546 p.
8. Siciliano B. Robotics: Modelling, Planning and Control / B. Siciliano, O. Khatib. — Springer, 2009 — 660 p.
9. Colestock H. Industrial Robot Specifications and Application / H. Colestock. — McGraw-Hill, 2005. — 212 p.
10. Lee C.S.G. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence / C.S.G. Lee, K.S. Fu. — McGraw-Hill, 1987 — 580 p.
11. Mason M.T. Mechanics of Robotic Manipulation (Intelligent Robotics and Autonomous Agents) / M.T. Mason. — Bradford Books, 2001 — 272 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Tarachkov M.V. Razrabotka robota-manipuljatora DR-1 [Development of robot-manipulator DR-1] / M.V. Tarachkov, A.V. Kalenik // Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy. Materialy V Vserossijskoj Pospelovskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Hybrid and Synergetic Intelligent Systems. Proceedings of the V All-Russian Pospel Conference with international participation] / Ed. by A.V. Kolesnikov. — 2020. — P. 482-489. [in Russian]
2. Petrov I.I. Proektirovanie i razrabotka promyshlennyh del'ta-robotov s ispol'zovaniem privodov ABB [Design and development of industrial delta robots using ABB drives] / I.I. Petrov, A.A. Sidorov // Robototekhnika i avtomatizacija [Robotics and Automation]. — 2022. — P. 3 [in Russian]
3. Smirnov P.P. Sravnitel'nyj analiz kontrollerov Siemens dlja robototekhnicheskikh sistem [Comparative analysis of Siemens controllers for robotic systems] / P.P. Smirnov, N.N. Ivanov // Mezhdunarodnaja konferencija po robototekhnike (ICRA) [International Conference on Robotics and Automation (ICRA)]. — 2023. — P. 5 [in Russian]
4. Kim Ch.H. Ispol'zovanie modulja rasshirenija x20 v robototekhnike: osobennosti i preimushhestva [Using the x20 expansion module in robotics: features and advantages] / Ch.H. Kim // Inzhenernye reshenija [Engineering solutions]. — 2020. — P. 5 [in Russian]
5. Li M.G. Primenenie modulja B&R dlja rasshirenija funkcional'nosti del'ta-robotov v promyshlennosti [Application of B&R module to extend the functionality of delta robots in industry] / M.G. Li, D.H. Sung // Konferencija po avtomatizacii proizvodstva [Conference on Factory Automation]. — 2021. — P. 6 [in Russian]
6. Blum B. Programmirovanie privodov ABB dlja promyshlennyh robotov: prakticheskoe rukovodstvo [Programming ABB actuators for industrial robots: a practical guide] / B. Bloom, J. Wright. — Technoforum, 2019. — P. 7. [in Russian]
7. Groover M.P. Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications / M.P. Groover, M. Weiss, R.N. Nagel. — Hill College, 1986. — 546 p.
8. Siciliano B. Robotics: Modelling, Planning and Control / B. Siciliano, O. Khatib. — Springer, 2009 — 660 p.
9. Colestock H. Industrial Robot Specifications and Application / H. Colestock. — McGraw-Hill, 2005. — 212 p.
10. Lee C.S.G. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence / C.S.G. Lee, K.S. Fu. — McGraw-Hill, 1987 — 580 p.
11. Mason M.T. Mechanics of Robotic Manipulation (Intelligent Robotics and Autonomous Agents) / M.T. Mason. — Bradford Books, 2001 — 272 p.