

**РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ / ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143>

**ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ**

Научная статья

**Исмаилов В.Р.<sup>1</sup>, Тарачков М.В.<sup>2,\*</sup>, Попова Л.А.<sup>3</sup>, Протасевич М.Н.<sup>4</sup>, Савкин Д.А.<sup>5</sup>**

<sup>4</sup>ORCID : 0000-0003-1755-1223;

<sup>1,2,3,4,5</sup> Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (mishklgpmi[at]mail.ru)

**Аннотация**

Развитие аддитивных технологий производства позволяет использовать новые материалы для изготовления конструкций взамен, например, токарной и фрезерной обработки металла. В частности, изделия, напечатанные из пластика на 3D-принтере, способны заменить вышедшие из строя детали станков и механизмов. Также технология позволяет создавать изделия нестандартной формы.

В данной публикации рассматривается процесс изготовления, сборки и отладки робота-манипулятора, конструкция которого напечатана с использованием 3D-принтера. Приведены результаты испытаний робота-манипулятора. Обобщен опыт решения проблем при отладке, связанных с конструктивными особенностями.

Также рассказывается об электронной и программной части робота-манипулятора.

**Ключевые слова:** робот-манипулятор, 3D-печать, шаговые электродвигатели, испытания робототехнических систем, аддитивные технологии.

**EXPERIENCE IN MANUFACTURING AND ASSEMBLING A ROBOT MANIPULATOR USING 3D PRINTING TECHNOLOGY**

Research article

**Ismailov V.R.<sup>1</sup>, Tarachkov M.V.<sup>2,\*</sup>, Popova L.A.<sup>3</sup>, Protasevich M.N.<sup>4</sup>, Savkin D.A.<sup>5</sup>**

<sup>4</sup>ORCID : 0000-0003-1755-1223;

<sup>1,2,3,4,5</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation

\* Corresponding author (mishklgpmi[at]mail.ru)

**Abstract**

The development of additive manufacturing technologies makes it possible to use new materials to manufacture structures instead of, for example, turning and milling metal. In particular, products printed from plastics on a 3D printer can replace broken parts of machines and mechanisms. The technology also makes it possible to create products with non-standard shapes.

This publication examines the process of manufacturing, assembly and debugging of a robot manipulator, the design of which is printed using a 3D printer. The results of the robot manipulator tests are presented. The experience of solving problems in debugging related to design features is summarized.

The electronic and software part of the robot manipulator is also described.

**Keywords:** robot manipulator, 3D printing, stepper motors, testing of robotic systems, additive technologies.

**Введение**

Роботы-манипуляторы широко используются при выполнении различных задач на производстве [1]. Материалом конструкции таких роботов является сталь или алюминий, поэтому для их изготовления необходимы станки для обработки металла, а сам процесс является дорогостоящим. В то же время одной из компонент Четвертой промышленной революции является аддитивное производство [2], [3], и встает вопрос в том, насколько возможно его применить для создания конструкции робота-манипулятора. В публикации [4] приводится новая методика изготовления роботов с применением 3D-принтеров, рассказано о создании SCARA-робота, однако, недостаточно данных об испытаниях разработанного изделия. В [5] авторы выдвигают гипотезу об использовании напечатанных на 3D-принтере деталей в роботе, который планируется использовать на лунной поверхности, что подтверждает способность напечатанных конструктивных элементов выдерживать значительные нагрузки. В [6] приведен анализ концепции самовоспроизводящихся роботов с использованием 3D-принтера, что делает 3D-печать не только способом создания роботов, но и расширяет границы их применимости.

Ввиду вышеуказанного, тематику данной статьи следует считать актуальной для развития технологий аддитивного производства.

Целью исследования является получение и обобщение экспериментальных данных о поведении конструктивных элементов робота-манипулятора, которые изготовлены с применением технологии 3D-печати.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Выбрать проект робота-манипулятора;
2. Изготовить детали конструкции и осуществить сборку;
3. Собрать электронную схему управления и осуществить программирование микроконтроллера;
4. Провести испытания робота-манипулятора.

### Обзор открытых конструкций роботов-манипуляторов

Ввиду того, что в сети Интернет можно найти открытые проект роботов-манипуляторов и из-за отсутствия опыта проектирования подобных конструкций, решено использовать одну из них. Ряд открытых проектов, например Nigyo [7] и Thor [8], предлагают CAD модели и использование шаговых электродвигателей для перемещения узлов. Проект Nigyo содержит ряд негативных отзывов и более скудную документацию по сравнению с проектом Thor. Также существуют проекты роботов-манипуляторов, в которых для перемещения узлов используются сервоприводы. Данные проекты не рассматриваются, потому что хотя сервоприводом проще управлять, он обладает меньшей точностью позиционирования по сравнению с шаговыми электродвигателями.

В проекте Thor помимо расширенной документации существует сообщество людей, которые реализовывали данный проект, благодаря этому есть возможность получить консультацию.

У робота Thor (рисунок 1) 6 степеней свободы (DoF), для вращения узлов используются шаговые электродвигатели. Рабочий орган представлен параллельным захватом (gripper), который управляется сервоприводом. Радиус рабочей области робота составляет 0.6 м, максимальная грузоподъемность – 0.75 кг.

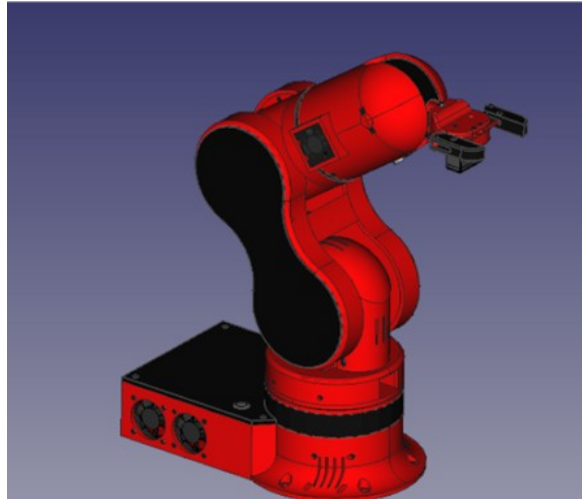


Рисунок 1 - 3D-модель робота Thor  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.1>

### Изготовление деталей конструкции и сборка

Детали робота были распечатаны на 3D-принтере (рисунок 2) пластиком ABS. В зависимости от назначения детали использовались 100% (для шестерней) и 40% (для элементов корпуса) заполнения. Детали невозможно напечатать абсолютно гладкими, так как печатающая головка перемещается по слоям. Ввиду этого, детали дополнительно обрабатывались с помощью наждачной бумаги, дремеля и ацетона. Узкие отверстия было необходимо избавить от остатков пластика.



Рисунок 2 - Комплект распечатанных на 3D-принтере деталей робота  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.2>

Поскольку размеры части деталей превышали размеры рабочей области 3D-принтера (пример детали приведен на рисунке 3), детали разделяли на части, а затем были склеены при помощи эпоксидной смолы (результат на рисунке 4).

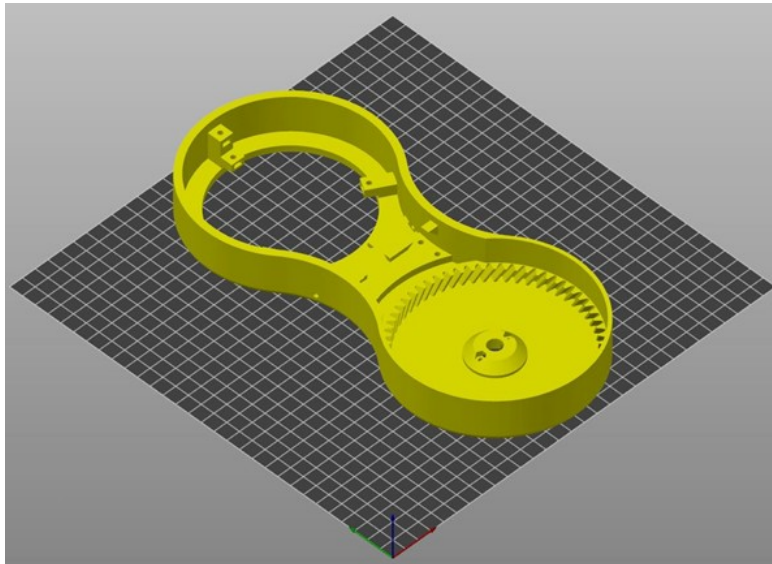


Рисунок 3 - Деталь механизма наклона робота, которая была разделена пополам  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.3>



Рисунок 4 - Результат склеивания разделенной детали  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.4>

Особое внимание было уделено сборке передаточных механизмов, в которых использовались пластиковые шестерни. Они были тщательно обработаны от остатков пластика и обильно смазаны солидолом.

В ходе испытаний выяснилось, что часть пластиковых деталей в основании робота плохо держат нагрузку, в результате чего передаточный механизм проскальзывает. Для усиления конструкции были добавлены элементы из алюминия (рисунок 5).



Рисунок 5 - Усиление конструкции робота алюминиевыми вставками  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.5>

Еще одной сложностью было ненадежное крепление шестерен (рисунок 6) на валах шаговых двигателей. Винты М3 недостаточно удерживали шестерню и при больших нагрузках (робот поднимался из горизонтального положения в вертикальное) шестерни прокручивались на валу. Данная проблема была решена путем увеличения диаметра винта до М4.

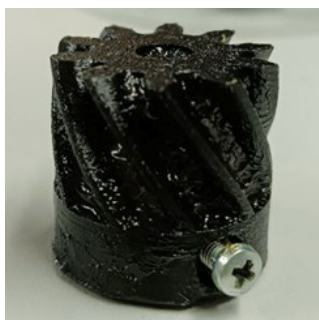


Рисунок 6 - Шестерня с винтом М3  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.6>

В начале все детали печатались белым пластиком, однако, ответная часть оптических концевых переключателей (рисунок 7) плохо перекрывала свет от излучателя до приемника. Детали были покрашены в черный цвет.



Рисунок 7 - Ответная часть концевого переключателя  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.7>

Кроме того, данные детали достаточно хрупкие, одна из них была заменена на участок пластиковой карточки. Напечатанный подшипник дает люфт, поэтому его в дальнейшем стоит заменить на подшипник заводского

изготовления. Часть узлов робота сложны в сборке и в обслуживании. В результате произведенных работ робот был собран (рисунок 8).



Рисунок 8 - Собранный робот  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.8>

### Электронная схема управления

Для вращения узлов робота с манипулятором используются шаговые электрические двигатели. Выставление электродвигателей в нулевое положение происходит по метке, которая определяется при помощи оптических и механических концевых выключателей. Сигнал от механического концевого переключателя может быть измерен дискретным вводом микроконтроллера (МК) (рисунок 9).

Шаговый двигатель управляется последовательностью импульсов, которые в определенном порядке подаются на его обмотки. Для генерирования импульсов используется устройства связи с объектом (УСО), в англоязычной литературе, драйвер, А4988. Используется режим микрошага с соотношением 1/16. Управление УСО и считывание сигналом от концевых переключателей возложено на микроконтроллер AtMega2560.

Для обеспечения рабочей температуры шаговых двигателей и УСО в корпусе робота предусмотрены 6 вентиляторов, которые включаются в момент включения питания робота и не регулируются.

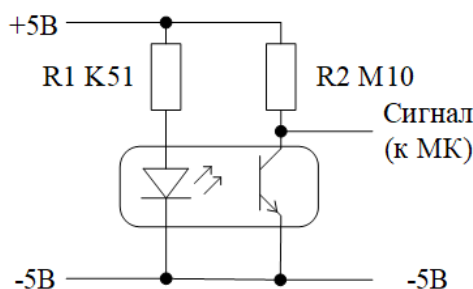


Рисунок 9 - Схема обработки сигнала от оптического концевого переключателя  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.9>

Электрическая часть робота также содержит блок, обеспечивающий питание основных компонентов. Микроконтроллер AtMega2560 взаимодействует с семьей УСО А4988 через интерфейс STEP/DIR/ENABLE, считывает сигналы от пяти концевых переключателей, обменивается данными с компьютером через последовательный порт (протокол Modbus RTU [9]). Структурная схема взаимодействия приведена на рисунок 10.

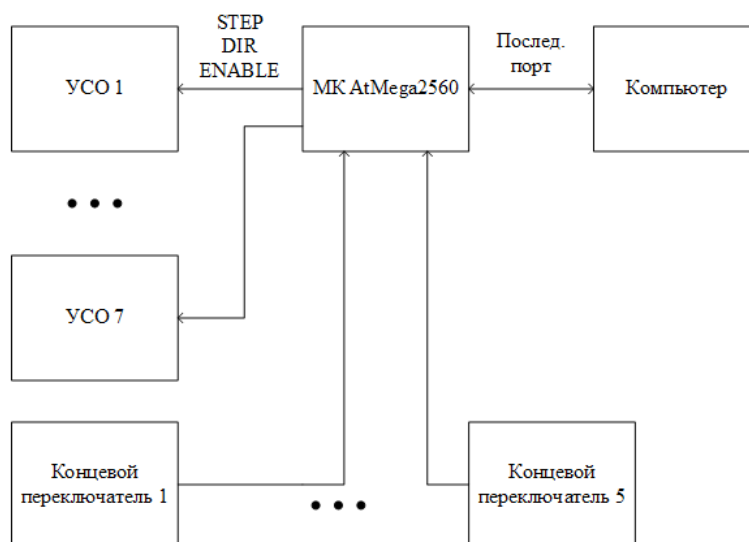


Рисунок 10 - Структурная схема взаимодействия микроконтроллера с УСО, концевыми переключателями и компьютером

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.10>

### Алгоритмы работы робота-манипулятора

Перед выполнением операций с роботом, необходимо выполнить калибровку каждого узла. Поскольку при пропадании питания шаговые двигатели не сохраняют своего положения, каждый раз их требуется устанавливать в нулевую точку. Кроме того, при отключении питания шаговые двигатели не могут удерживать узлы робота в неподвижном состоянии. Поэтому существует необходимость при завершении работы устанавливать робот в заранее определенное положение (обозначим его Dock). Если робот был отключен аварийно, то его следует установить в положение Dock вручную. Положение Dock может быть выбрано произвольно, но с учетом того, что рабочий орган должен быть направлен вниз для обеспечения вытекания остатков эпоксидной смолы.

Из положения Dock с использованием параметров ШД по умолчанию робот перемещается в положение Calibration (см. рис. 8). Причем в процессе данного перемещения считываются сигналы с концевых датчиков. При получении сигнала от конкретного датчика, соответствующий ему узел робота останавливается. Текущее положение данного узла устанавливается в 0. Для этого узла нулевая точка найдена. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут найдены нулевые точки всех узлов. Блок-схема алгоритма калибровки приведена на рисунке 11.

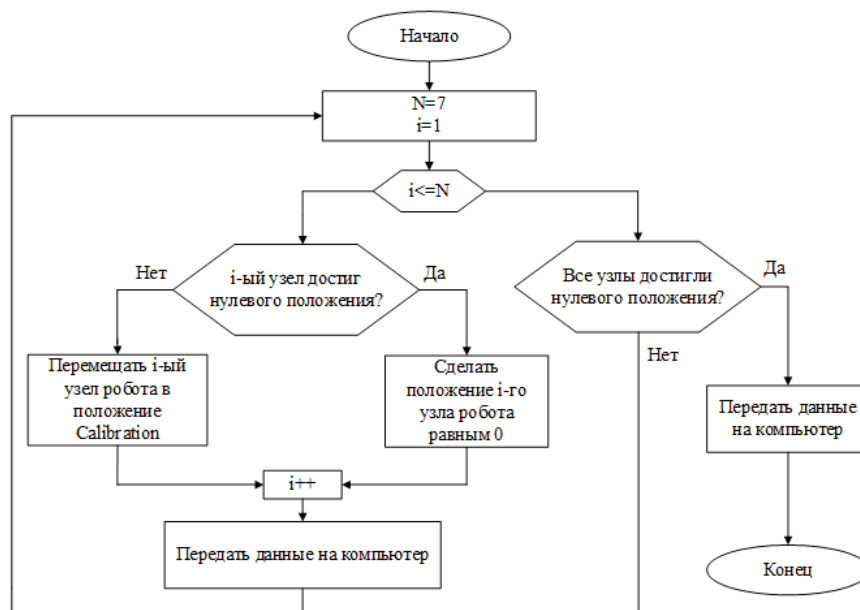


Рисунок 11 - Блок-схема алгоритма калибровки робота

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.11>

После калибровки робот исполняет команды, полученные от компьютера. Каждая команда заключается в перемещении узла робота в заданное положение. При этом на компьютер передается текущее положение каждого из узлов.

При движении к заданной позиции частота сигнала STEP составляет 1МГц. Реализован алгоритм плавного пуска и торможения [10].

## Испытания робота-манипулятора

### 6.1. Испытание нагрузочной способности

Собранный робот необходимо проверить на грузоподъемность. Для этого робот был переведен положение, когда всего его узлы были параллельно поверхности основания (рисунок 12). Данное положение является худшим случаем, поскольку расстояние от основания до нагрузки, расположенной в рабочем органе, наибольшее. Запускалась команда на перемещение робота в вертикальное положение.

Испытания показали, что конструкция требует усиления, так как пластик плохо держал нагрузку, и происходило проскальзывание шестерен. Была осуществлена доработка при помощи алюминиевых направляющих. В результате доработки робот успешно переместился из вертикального положения в горизонтальное.



Рисунок 12 - Робот, расположенный параллельно поверхности основания  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.12>

Для измерения грузоподъемности робота на рабочий орган последовательно довешивались грузики известной массы. Испытание считалось выполненным, если робот мог переместиться из полностью горизонтального положения в вертикальное.

Таким образом, было выяснено, что грузоподъемность робота составляет примерно 0.8 кг.

### 6.2. Испытание точности позиционирования

Для испытания точности позиционирования к рабочему органу робота был закреплен маркер (рисунок 13). Перед роботом был закреплен лист белой бумаги, на котором была расчерчена система координат. Роботу предстояло написать точками букву «П» таким образом, чтобы точки располагались в пересечениях клетки на расстоянии 1 см друг от друга. В результате испытания расхождение предполагаемой точки касания и реально составляет не более 1 см. Подобный эксперимент был проведен еще 2 раза, ошибка составила не более 1 см.



Рисунок 13 - Робот с закрепленным маркером  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.13>

### 6.3. Испытание на ресурс

Для проведения ресурсных испытаний на рабочий орган робота-манипулятора была закреплена максимальная нагрузка 0.8 кг. Осуществлялось перемещение робота-манипулятора из горизонтального (рис. 12) в вертикальное положение и обратно. Эксперимент проводился 100 раз. В ходе эксперимента шаговые температура электродвигателей достигла 90 гр. Цельсия и потребовалось дополнительное охлаждение.

После проведения испытания на ресурс повторно было проведено испытание точности позиционирования. Результаты совпали, что говорит об отсутствии износа элементов конструкции.

### Заключение

В результате проведенного исследования изготовлен, собран и испытан робот-манипулятор, детали конструкции которого напечатаны на 3D-принтере.

Следует отметить высокую трудоемкость обработки деталей после печати. Также сами настройки печати требуют подбора для того, чтобы усилить детали, на которые приходится максимальная нагрузка. Выяснено, что напечатанные на 3D-принтере детали надежно склеиваются эпоксидной смолой, что позволяет использовать принтеры с небольшой рабочей областью.

Для повышения точности позиционирования следует заменить напечатанные шестерни, поскольку присутствует люфт. Тем не менее напечатанные шестерни следует признать надежными.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Бикмуллина И.И., доцент кафедры АСОИУ, КНИТУ-КАИ, Казань, Российская Федерация  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.14>

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

Bikmullina I.I., associate of professor, KNRTU-KAI, Kazan, Russian Federation  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.146.143.14>

### Список литературы / References

1. Бахман В. А. Обзор видов и анализ современного состояния рынка промышленных роботов-манипуляторов / В. А. Бахман, А. Н. Королева, Е. Л. Царегородцев // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — № 2 (128). — с. 26.
2. Абрамов И. В. Проблемы и перспективы цифровизации промышленных предприятий с использованием аддитивных технологий / И. В. Абрамов // Вестник евразийской науки. — 2023. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/69ECVN223.pdf> (дата обращения: 01.07.2024)
3. Афанасьев А. А. Индустрия 4.0: к вопросу о перспективах цифровой трансформации промышленности в России / А. А. Афанасьев // Вопросы инновационной экономики. — 2023. — № 3. — с. 1427-1446.
4. Мансуров Э. Р. Аддитивные технологии при создании роботов манипуляторов / Э. Р. Мансуров, Д. Р. Стахин // Научное обозрение. Педагогические науки. — 2019. — № 2-3. — с. 53-56.
5. Каленик А. В.. Исследование технических решений, обеспечивающих ремонтпригодность космических напланетных роботов, на примере робота-манипулятора ДР-1 / А. В. Каленик, О. А. Сапрыкин // Фундаментальные и прикладные исследования в области высоких технологий; — Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2023. — с. 96-105.
6. Eshmukhametov A. N.. Analysis of the concept of self-reproduction of a robot based on 3D printing / A. N. Eshmukhametov, E. E. Velikodnaya; — Issue 94. — Tallinn: Uhing Teadus juhatus, 2021. — p. 616-622.



7. Materials for the Niryo robot manipulator // Niryo Download Center. — URL: <https://niryo.com/download-center> (accessed: 28.06.2024)
8. Open Source and printable robot arm with 6 DOF // Thor's official website. — URL: <http://thor.angel-lm.com/> (accessed: 28.06.2024)
9. Берестин А. А. Подключение преобразователя частоты OMRON MX2 к микроконтроллеру Raspberry PI 3 по протоколу MODBUS RTU / А. А. Берестин, А. З. Кулганатов // Информационно-вычислительные технологии и их приложения; — Пенза: Издательство Пензенского государственного аграрного университета, 2020. — с. 19-23.
10. Либерман Я. Л. Системы шагового перемещения и плавного разгона-торможения конвейерных приводов / Я. Л. Либерман, К. Ю. Летнев, Л. Н. Горбунова // Вестник машиностроения. — 2015. — № 3. — с. 11-15.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Bahman V. A. Obzor vidov i analiz sovremennogo sostojanija rynka promyshlennyh robotov-manipuljatorov [Review of types and analysis of the current state of the market for industrial robotic manipulators] / V. A. Bahman, A. N. Koroleva, E. L. Tsaregorodtsev // International Scientific Research Journal. — 2023. — № 2 (128). — p. 26. [in Russian]
2. Abramov I. V. Problemy i perspektivy tsifrovizatsii promyshlennyh predpriyatij s ispol'zovaniem additivnyh tehnologij [Problems and prospects for digitalization of industrial enterprises using additive technologies] / I. V. Abramov // Bulletin of Eurasian Science. — 2023. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/69ECVN223.pdf> (accessed: 01.07.2024) [in Russian]
3. Afanas'ev A. A. Industrija 4.0: k voprosu o perspektivah tsifrovoj transformatsii promyshlennosti v Rossii [Industry 4.0: on the prospects for digital transformation of industry in Russia] / A. A. Afanas'ev // Issues of innovative economics. — 2023. — № 3. — p. 1427-1446. [in Russian]
4. Mansurov E. R. Additivnye tehnologii pri sozdanii robotov manipuljatorov [Additive technologies in the creation of robotic manipulators] / E. R. Mansurov, D. R. Stahin // Scientific review. Pedagogical Sciences. — 2019. — № 2-3. — p. 53-56. [in Russian]
5. Kalenik A. V. Issledovanie tehniceskikh reshenij, obespechivajuschih remontoprigradnost' kosmicheskikh naplanetnyh robotov, na primere robota-manipuljatora DR-1 [Study of technical solutions that ensure the maintainability of space-on-planetary robots, using the example of the DR-1 robotic manipulator] / A. V. Kalenik, O. A. Saprykin // Fundamental and applied research in the field of high technology; — Kaliningrad: Izdatel'stvo BFU im. I. Kanta, 2023. — p. 96-105. [in Russian]
6. Eshmukhametov A. N.. Analysis of the concept of self-reproduction of a robot based on 3D printing / A. N. Eshmukhametov, E. E. Velikodnaya; — Issue 94. — Tallinn: Uhingu Teadus juhatus, 2021. — p. 616-622.
7. Materials for the Niryo robot manipulator // Niryo Download Center. — URL: <https://niryo.com/download-center> (accessed: 28.06.2024)
8. Open Source and printable robot arm with 6 DOF // Thor's official website. — URL: <http://thor.angel-lm.com/> (accessed: 28.06.2024)
9. Berestinov A. A.. Podkljuchenie preobrazovatelja chastoty OMRON MX2 k mikrokontrolleru Raspberry PI 3 po protokolu MODBUS RTU [Connecting the OMRON MX2 frequency converter to the Raspberry PI 3 microcontroller via the MODBUS RTU protocol] / A. A. Berestinov, A. Z. Kulganatov // Information and computing technologies and their applications; — Пенза: Penza State Agrarian University Publishing House, 2020. — p. 19-23. [in Russian]
10. Liberman Ja. L. Sistemy shagovogo peremeschenija i plavnogo razgona-tormozhenija konvejnnyh privodov [Systems of step movement and smooth acceleration and braking of conveyor drives] / Ja. L. Liberman, K. Ju. Letnev, L. N. Gorbunova // Mechanical Engineering Bulletin. — 2015. — № 3. — p. 11-15. [in Russian]