

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

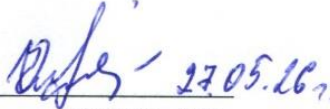
Кафедра радиотехники и электродинамики

**Разработка модульного робота-манипулятора с архитектурой  
горячей замены функциональных блоков**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4071 группы  
направления 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»  
института физики  
Платцева Семёна Павловича

Научный руководитель  
доцент кафедры радиотехники  
и электродинамики, к.ф.-м.н.

  
подпись, дата

О.А. Черкасова

Заведующая кафедрой  
радиотехники и электродинамики  
д.ф.-м.н., профессор

  
подпись, дата

О.Е. Глухова

Саратов 2026 г.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Современный этап автоматизации производственных процессов характеризуется острой необходимостью внедрения доступных роботизированных платформ на малых и средних предприятиях. Традиционные промышленные манипуляторы обеспечивают высокую точность пространственного позиционирования, однако их стоимость крайне высока. Точность классических роботов достигается исключительно за счет избыточной массы станин, использования дорогого чугунного литья и прецизионных механических узлов с допусками сборки на уровне микронных значений. Внедрение подобного оборудования требует привлечения высокооплачиваемых профильных специалистов, а перенастройка комплекса под новую технологическую задачу сопровождается длительным простоем производства. Существующие любительские проекты с открытым исходным кодом решают проблему себестоимости за счет применения технологий трехмерной печати полимерами, однако обратной стороной становится критическое падение жесткости звеньев. Из-за отсутствия обратной связи и недостатка вычислительной мощности управляющей электроники такие платформы непригодны для точной работы в условиях реального производства.

В настоящей работе предложен принципиально иной подход к проектированию: перенос ответственности за точность с дорогой механической базы на сверхбыстрые вычислительные алгоритмы. Если упругую полимерную конструкцию невозможно сделать жесткой физически, возникающие колебания и люфты компенсируются программно за счет экстремально высокой частоты работы контура обратной связи. Манипулятор собирается с использованием доступных в обычных строительных магазинах материалов и инструментов, но благодаря развитой программно-аппаратной платформе превосходит существующие открытые аналоги по точности и энергоэффективности.

**Цель и задачи выполняемой ВКР.** Целью работы является проектирование и сборка доступного модульного робота-манипулятора с возможностью быстрой аппаратной смены специализации и алгоритмической компенсацией упругих деформаций звеньев.

**Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Спроектировать модульную полимерную конструкцию манипулятора, адаптированную под печать на доступном бытовом 3D-принтере.
2. Произвести балансный циклоидный редуктор собственной разработки с учетом его изготовления из полимерных материалов методом трехмерной печати.
3. Разработать схемотехнику силового одноосного драйвера, выполнить моделирование его узлов и трассировку печатной платы с подготовкой файлов для отправки на контрактное производство.
4. Разработать распределенную архитектуру системы управления на базе связки ПЛИС и микроконтроллера для реализации высокоскоростных алгоритмов векторного управления током.
5. Реализовать прошивку логической матрицы и управляющего микроконтроллера, собрать прототип и провести серию экспериментов для оценки применимости и эффективности разработанных решений.

**Краткая характеристика материалов исследования.** В качестве конструкционных материалов механики использован пластик ПЭТГ, стальные штоки диаметром 10 мм и стандартные элементы трубопроводов. Набор инструментов для сборки ограничен шуруповертом, 3D-принтером и УШМ. Электронная часть спроектирована на базе микроконтроллеров семейства STM32 и программируемой логической интегральной схемы компании Lattice, которая в прототипе заменена на TANG NANO от компании GOWIN. Программная часть реализована на языках C/C++ и SystemVerilog.

Моделирование и трассировка плат проводились в средах LTspice и Altium Designer.

**Описание структуры ВКР.** Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка из 35 наименований и трех приложений. Полный текст работы иллюстрирован графиками и таблицами. Первая глава посвящена анализу промышленных и любительских манипуляторов, а также существующих систем управления сервоприводами. Во второй главе приводится описание разработанной архитектуры системы, математический аппарат векторного управления и расчеты механических узлов. Третья глава содержит методику и результаты экспериментальных исследований на испытательном стенде.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### **Обзор существующих решений и обоснование выбранного подхода.**

В первой главе проведен критический анализ конструкций современных манипуляторов. Показано, что промышленные роботы жестко привязаны к проприетарной экосистеме производителя, а логика пространственного перемещения в них неразрывно связана с логикой работы рабочего инструмента. Из-за этого замена фрезерной головки на сварочный аппарат требует полной перенастройки управляющей программы. Открытые любительские проекты используют шаговые двигатели в разомкнутом контуре, что приводит к неконтролируемой потере шагов при появлении малейшего сопротивления на рабочем органе.

Рассмотрены программно-аппаратные реализации векторного управления, такие как ODrive и VESC. Сделан вывод, что чисто программная реализация регулирования токов на базе одного универсального микроконтроллера при увеличении числа осей приводит к лавинообразному росту нагрузки на процессор и возникновению временного джиттера. Обоснована целесообразность перехода к гибридной схеме, в которой все низкоуровневые параллельные операции, а именно переносятся на аппаратный уровень ПЛИС, высвобождая ресурсы микроконтроллера для математических расчетов.

**Архитектурное деление системы и концепция модуля технолога.** Во второй главе описана аппаратная структура манипулятора. Система включает четыре функционально независимых блока: плату входного питания, материнскую плату, сменные силовые драйверы осей и модуль технолога. Физическое сопряжение модулей реализовано через стандартные краевые слоты PCIe Express x8. Данные разъемы выпускаются огромными тиражами, благодаря чему они дешевы и механически надежны. Компьютерный протокол PCIe Express при этом не используется — все 98 контактов переназначены под

аналоговые сигналы, силовые линии питания, шины обмена данными и выводы датчиков положения.

Для обеспечения многозадачности робота предложена концепция модуля технолога. Манипулятор спроектирован исключительно как универсальное координатное периферийное устройство. В его базовый контроллер не закладывается информация о характере выполняемой им работы. Вся технологическая логика конкретного процесса, к примеру: вращение шпинделя, контроль температуры сварочной дуги, подача защитного газа - вынесена в модуль технолога, который устанавливается в выделенный разъем на материнской плате. Модуль имеет собственный микроконтроллер и выдает манипулятору только абстрактные высокоуровневые координаты движения и параметры скорости. Физическая замена модуля технолога позволяет перепрофилировать робота под новую задачу за несколько секунд без вмешательства в базовую прошивку приводов.

#### **Математическое описание алгоритмов векторного управления.**

Контур регулирования тока на материнской плате функционирует под управлением алгоритма полевого ориентированного управления. Измеренные фазные токи преобразуются по методу Кларк, переводящему трехфазную систему в неподвижную двухфазную систему координат альфа-бета. Затем прямое преобразование Парка проецирует эти составляющие на вращающиеся оси ротора  $d$  и  $q$  с использованием электрического угла. Электрический угол рассчитывается на основе показаний энкодера с учетом числа пар полюсов двигателя. Полученные токи регулируются двумя независимыми быстрыми пропорционально-интегральными регуляторами.

Рассчитанные регуляторами напряжения переводятся обратно в неподвижную систему координат обратным преобразованием Парка. На основе полученных напряжений формируются сигналы управления затворами транзисторов. Для этого применен метод инъекции минимума-максимума, который эквивалентен классической пространственно-векторной модуляции,

но не требует ресурсоемких расчетов секторов и вычисления активных векторов. Метод рассчитывает компенсирующее смещение как полусумму максимального и минимального напряжений и добавляет его к фазным скажностям, что увеличивает использование напряжения силовой шины на 15%.

**Проектирование механической части и циклоидного редуктора.** С целью максимального снижения себестоимости несущие звенья робота спроектированы под печать пластиком ПЭТГ со стопроцентным заполнением на бытовом 3D-принтере. Для компенсации недостаточной жесткости пластика плечевой модуль выполнен в виде ферменной оболочки, внутри которой соосно проложены четыре стальные шпильки диаметром десять миллиметров. Оценочный расчет жесткости показал, что такая композитная конструкция обеспечивает изгибную жесткость порядка  $57 \text{ Нм}^2$ , что в 3-4 раза превышает жесткость дюралюминиевой трубы сопоставимых габаритов.

Передаточное отношение разработанного циклоидного редуктора составляет 100:1. Для устранения вибраций на один эксцентриковый вал установлены два диска со сдвигом на 180 градусов. В ходе проектирования обнаружено, что классическое уравнение расчета зазоров для независимых дисков, где диаметр отверстий равен сумме диаметра пальца и двойного эксцентриситета, неприменимо для жестко связанных балансных дисков. Из-за взаимного ограничения степеней свободы дисков максимальное отклонение центра отверстия удваивается. Предложена и практически верифицирована уточненная формула, по которой диаметр отверстий в диске равен сумме диаметра пальца и четырехкратного эксцентриситета. Использование классической формулы приводило к моментальному заклиниванию редуктора при сборке, в то время как детали, изготовленные по уточненной формуле, обеспечивают плавный ход при любых положениях вала.

**Схемотехника, трассировка и сборка силового модуля.** Разработан силовой блейд, представляющий собой автономный одноосный драйвер

бесколлекторного двигателя. В его состав входят шесть N-канальных полевых транзисторов, токоизмерительные шунты с прецизионными усилителями и выделенный микроконтроллер STM32G431. Интеграция микроконтроллера непосредственно на плате блейда позволила реализовать высокоскоростную оцифровку фазных токов встроенным аналого-цифровым преобразователем и их передачу в ПЛИС материнской платы по шине SPI всего за 400 наносекунд. Это составляет менее двух процентов от периода 20 мкс контура управления, обеспечивая практически мгновенную доступность данных. Пользователю предоставляются полностью готовые для отправки на завод файлы Gerber для промышленного изготовления четырехслойных плат силового драйвера.

**Экспериментальная проверка и верификация.** В третьей главе приведены результаты испытаний разработанных узлов на физическом стенде. Логика ПЛИС, написанная на языке SystemVerilog, обкатывалась с использованием отладочной платы Tang Nano 9K. Подтверждена корректность работы аппаратного декодера квадратурных энкодеров Omron, генератора ШИМ и схемы вставки мертвого времени, исключаяющей возникновение сквозных токов в полумостах.

Запуск двигателя проводился в 4 режимах при напряжении питания 12 В:

- В разомкнутом контуре зафиксировано высокое потребление тока от 1.4 до 1.9А, выраженный акустический шум и резкий шаговый характер движения.
- После программной коррекции фазных задержек в разомкнутом контуре потребление тока снизилось до значений от 1.2 до 1.4 А, а вращение стало более плавным.
- Запуск замкнутого контура обратной связи и алгоритма векторного управления на частоте 10 кГц снизил потребление тока более чем вдвое — до 0.6 А.

- Дальнейшая оптимизация таймингов обмена по шине SPI позволила поднять частоту работы контура FOC до целевых 20 кГц. Ток холостого хода в режиме удержания позиции снизился до 0.35 А. При этом полностью исчезли акустический шум и пульсации момента на валу привода.

В процессе тестирования изготовленного в сборе силового блейда была успешно верифицирована работа всех источников питания и обнаружен дефект трассировки — короткое замыкание под защитным диодом в третьем полумосте. Благодаря модульной архитектуре неисправность была оперативно устранена механическим путем, что практически подтвердило заложенную в проект концепцию ремонтпригодности и быстрой замены блоков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы успешно решена комплексная научно-техническая задача разработки доступного модульного робота-манипулятора с оригинальной архитектурой горячей замены функциональных блоков. Все поставленные во введении цели достигнуты в полном объеме, а полученные результаты подтверждают практическую ценность и экономическую эффективность предложенной распределенной платформы.

**Основные выводы по результатам работы.** Во-первых, спроектирована и изготовлена полимерная механическая конструкция манипулятора. Разработанная схема соосного армирования деталей из пластика ПЭТГ стальными штоками позволила полностью компенсировать недостаток жесткости полимера и достичь высокой изгибной жесткости, соизмеримой с металлическими трубами аналогичных габаритов. Это доказывает применимость дешевой трехмерной печати для создания несущих рам. Во-вторых, предложена и практически верифицирована уточненная формула расчета зазоров для балансных дисков циклоидного редуктора. Данная формула предотвращает заклинивание механизма при противофазном движении, обеспечивая плавный и тихий ход редуктора, изготовленного на бытовом принтере. В-третьих, разработана схемотехника и топология печатной платы одноосного силового блейда на базе микроконтроллера STM32 и транзисторов. Проведенное моделирование в среде LTспайс и трассировка в Альтиум Дизайнер позволили подготовить файлы промышленного производства, а интеграция быстродействующего АЦП обеспечила трансляцию фазных токов в логическую матрицу за рекордные 400 наносекунд. В-четвертых, создана гибридная управляющая платформа на базе микроконтроллера STM32H7 и ПЛИС. Аппаратный перенос низкоуровневых операций в логическую матрицу позволил полностью освободить

процессорное ядро для математических расчетов векторного регулирования. В-пятых, экспериментально подтверждена высокая эффективность выбранных алгоритмов на собранном прототипе системы управления. Переход к векторному управлению на частоте контура 20 килогерц с использованием 256-битного SPI-кадра снизил ток удержания бесколлекторного привода до 0.35 ампера, что более чем в четыре раза ниже показателей разомкнутого контура. При этом полностью устранены вибрации и акустические шумы двигателя. В-шестых, практически подтверждена работоспособность оригинальной концепции «модуля технолога», которая физически разделяет логику движения манипулятора и управление конкретным инструментом. Это решение превращает робот в универсальное координатное периферийное устройство и обеспечивает мгновенную смену специализации робота без перепрограммирования его приводов и изменения калибровочных данных.

Перспективы дальнейшего развития проекта напрямую связаны со сборкой полной механической конструкции разработанного трехосевого прототипа, последующей реализацией внешних контуров регулирования положения и скорости поверх токового контура, а также интеграцией специализированных модулей технолога для решения конкретных прикладных задач в автоматизации мелкосерийного производства.