

На правах рукописи

Голубин Сергей Александрович

**ЦИФРОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МИНИСТИКИ НА ОСНОВЕ
УПРУГОДЕФОРМИРУЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Голубин".

Рыбинск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технологический университет им. П. А. Соловьева».

Научный руководитель:

Ломанов Алексей Николаевич

кандидат технических наук, доцент, декан факультета радиоэлектроники и информатики РГАТУ им. П. А. Соловьева

Официальные оппоненты:

Видовский Леонид Адольфович

доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой информационных систем и программирования Кубанского государственного технологического университета

Крамарь Вадим Александрович

доктор технических наук, профессор, доцент кафедры боевых средств флота Черноморского высшего военно-морского ордена Красной звезды училища им. П. С. Нахимова

Ведущая организация:

АО «Рыбинский завод приборостроения»

(г. Рыбинск Ярославской области)

Защита состоится «26» сентября 2017 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском Государственном Техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д. 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высыпать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Муратов И. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современная робототехника и беспилотные транспортные средства чрезвычайно быстро совершаются и усложняются. Для управления ими уже недостаточно возможностей традиционных устройств ввода – тумблеров, переключателей, регуляторов и даже обычных джойстиков. Они обладают недостаточной функциональностью, содержат большое количество деталей, обладают избыточной материалоемкостью. Сенсорные экраны и панели (тачпады) усложняют управление вслепую и неприменимы в условиях перегрузок и вибраций.

Одним из подходов к решению проблемы управления является применение министиков (микроджойстиков). Министик представляет собой небольшой двухкоординатный джойстик, который управляется не кистью руки, а отдельным ее пальцем. Малый размер позволяет размещать несколько министиков на панели или ручке управления. Скорость и точность движения пальцев в 5-7 раз быстрее, чем кисти руки, это позволяет намного быстрее и точнее формировать управляющие воздействия.

Разработкой и выпуском министиков занимаются российские и зарубежные организации, среди них Austria Microsystems AG, Eaton Electric, Sony, ООО «МИР», ООО «ГидраПак» и др. Известные министики, построенные на резистивном принципе, эффекте Холла и т.д., обладают рядом недостатков, среди которых относительно высокая стоимость, конструктивная сложность, большое количество деталей и т. д. Существующие министики, обладая отдельными высокими показателями, в то же время имеют серьезные недостатки, затрудняющие их широкое использование: невысокий ресурс, низкое качество и нестабильность выходного сигнала, большие габариты и вес, сложность в производстве или высокую стоимость. В связи с этим актуальна разработка министиков на новых принципах работы, сочетающая в себе преимущества существующих устройств и свободная от их основных недостатков.

В РГАТУ им. П. А. Соловьева совместно с ООО «НПП «Тензосенсор» проводились исследования возможности создания министиков на основе упругодеформируемых полимерных элементов, которые сочетали бы высокую точность и чувствительность с высокой надежностью, технологичностью в массовом производстве и низкой стоимостью. Большой вклад в развитие данного направления внесли Э. И. Семенов, В. М. Комаров, В. С. Никитин, А. Н. Ломанов. В. С. Никитиным была предложена концепция оптического министика на основе упругодеформируемого полимерного элемента, отраженная в патентах РФ на изобретения № 2594992 и №2596576. В настоящей диссертации рассмотрены вопросы создания работоспособных и эффективных министиков, использующих данный принцип работы.

Объектом исследования являются цифровые оптические министики на основе упругодеформируемого полимерного элемента для систем управления и средств вычислительной техники.

Предметом исследования являются оптическая схема, конструкция и алгоритмы обработки данных министика, а также методы исследования эксплуатационных характеристик оптических министиков.

Цель работы – создание оптических министиков, превосходящих существующие министики по основным эксплуатационным характеристикам, путем теоретиче-

ских и экспериментальных исследований различных конструктивных схем министиков, разработки конструкций и алгоритмов обработки данных министиков.

Для достижения поставленных целей были **решены следующие задачи:**

1. Исследование принципа действия министика, разработка его математической модели и исследование его работы в зависимости от конструктивных параметров министика.

2. Разработка структуры и алгоритмов функционирования министиков и их техническая реализация.

3. Разработка методов, алгоритмов и параметров качества для исследования основных эксплуатационных характеристик министиков, техническая реализация методов с помощью специально разработанного оборудования.

4. Экспериментальное исследование характеристик оптических министиков, анализ полученных результатов и проверка модели на адекватность.

5. Внедрение оптических министиков в средства управления.

При выполнении работы использованы следующие **методы исследования:** математическое моделирование, численное интегрирование, регрессионный анализ, статистический анализ.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена корректно полученными данными теоретических расчетов и экспериментальных исследований оптических министиков, которые показали адекватность разработанной модели и работоспособность созданных министиков.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель двухкоординатного оптического министика на основе упругодеформируемого полимерного элемента;
- предложен метод измерения функции преобразования министика – зависимости полезного сигнала министика от величины отклонения управляющей рукоятки министика;
- предложен метод исследования эксплуатационного ресурса оптического министика путем циклического воздействия эксплуатационной нагрузкой;
- предложены усовершенствованные схемы оптических министиков на основе упругодеформируемого полимерного элемента.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в следующем:

- разработана программа для моделирования оптического министика на основе упругодеформируемого полимерного элемента;
- разработаны программно-аппаратные средства для исследования функции преобразования оптического министика;
- разработаны программно-аппаратные средства для исследования эксплуатационного ресурса оптических министиков путем циклического воздействия эксплуатационной нагрузкой;
- разработан оптический министик усовершенствованной конструкции на основе упругодеформируемого элемента;
- разработаны полиджойстики на основе усовершенствованных оптических министиков, предназначенные для управления различной техникой.

Реализация результатов. Научные и практические результаты работы использованы в ООО «НПП «Тензосенсор», в Рыбинском государственном авиационном техническом университете им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск), ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, ООО «Оптико-Электронные Системы». Оптические министики в составе полиджойстиков используются в управлении вооружением новейшего боевого робототехнического комплекса «Вихрь», разработанном в 2016 году в АО «Научно-технический центр «Импульс-2» (г. Севастополь).

Прикладные научные исследования и экспериментальные разработки, представленные в диссертации, были использованы при выполнении работ по программе Минобрнауки России (уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок RFMEFI57914X0087).

Апробация работы. Основные результаты работы представлялись на IX Международной научно-практической конференции «Wschodnie Partnerstwo – 2015» (Przemysl, 2015 г.), на Первой Военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации» (г. Кубинка Московской области, 2016 г.), на Третьем Всероссийском конкурсе научно-технических проектов «Инновационная радиоэлектроника», приуроченном к XV Отраслевой научно-технической конференции радиоэлектронной отрасли «Перспективные рынки – взгляд в будущее» (г. Саратов, 2016 г.), на научном семинаре кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, 2017 г.). Оптические министики демонстрировались на выставках Startup Village 2015-2016 гг., Иннопром-2016.

По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ общим объемом 1,5 печатных листа, из которых 6 статей в научных журналах перечня ВАК, 3 статьи в научных журналах, цитируемых Web of Science, 2 доклада в сборниках материалов конференций, поданы две заявки на патент РФ на изобретение.

На защиту выносятся:

- математическая модель оптического министика на основе упругодеформируемого полимерного элемента, позволяющая определять конструктивные параметры министика путем моделирования его работы;
- усовершенствованная схема оптического министика на основе упругодеформируемого полимерного элемента, обеспечивающая лучшие характеристики разработанных министиков по сравнению с существующими;
- принципы построения и алгоритмы работы средств контроля эксплуатационных параметров оптических министиков на основе упругодеформируемого полимерного элемента, которые позволяют исследовать существующие и разрабатываемые министики и определять их применимость для управления объектами.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, приложений на 163 страницах, содержит 77 рисунков, 10 таблиц, список использованных источников из 116 наименований.

Диссертация выполнена на кафедре вычислительных систем Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьева совместно с ООО «Научно-производственное предприятие «Тензосенсор».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены объект и предмет исследования, сформулирована цель исследования, перечислены методы исследования, обозначены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе произведен анализ принципов построения существующих джойстиков (в т. ч. министиков), их чувствительных элементов, определены преимущества и недостатки существующих микроджойстиков, на основании которых сформулированы задачи исследования.

В главе была произведена классификация существующих джойстиков по основным параметрам (Рисунок 1).

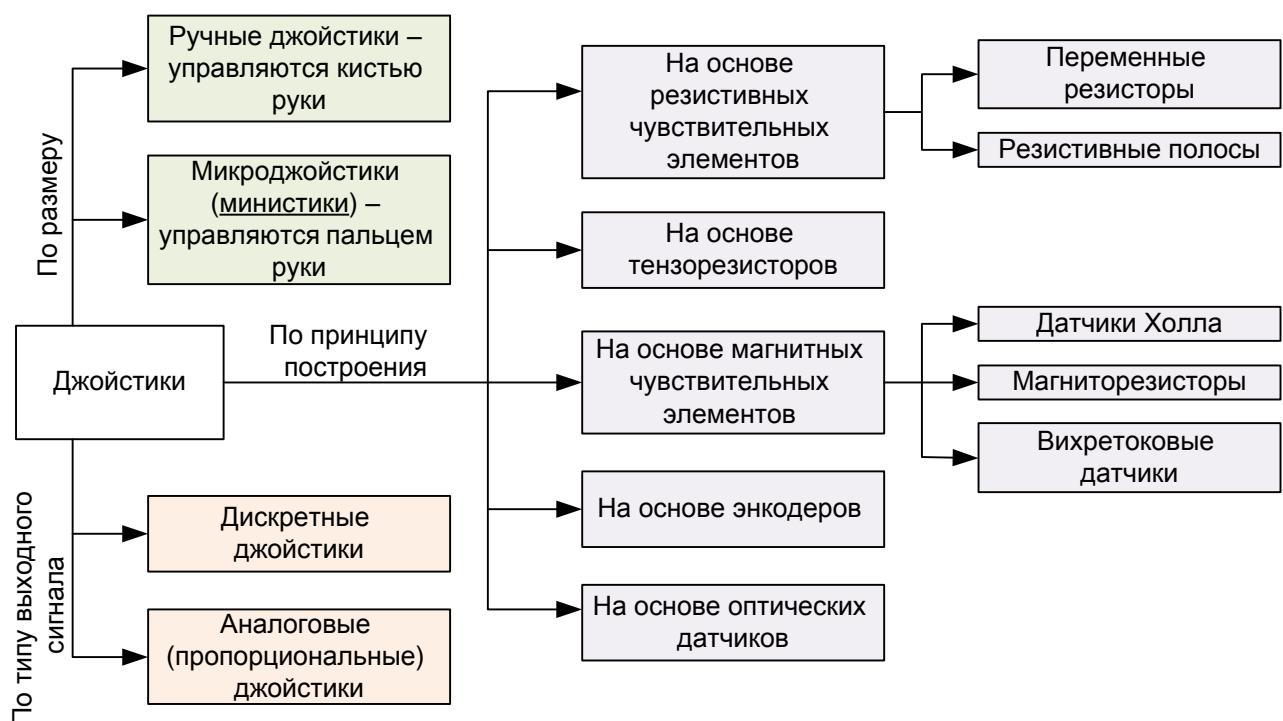


Рисунок 1. Классификация джойстиков

На основании анализа существующих микроджойстиков, их преимуществ и недостатков сформулированы основные требования, которым должен удовлетворять цифровой оптический министик. Они приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Требования к цифровому оптическому министику

| Параметр | Значение |
|--------------------------------|-------------|
| Габаритные размеры, не более | 20×20×20 мм |
| Масса, не более | 5 г |
| Рабочий ход рукоятки, не менее | -5..+5 мм |
| Чувствительность, не менее | 0,1 мм |

Таблица 1 (окончание).

Требования к цифровому оптическому министику

| | |
|------------------------------------------------------|----------------|
| Разрешение, не менее | 40 знач/мм |
| Нелинейность, не более | 10% |
| Погрешность определения положения рукоятки, не более | 3% |
| Ресурс, не менее | 2 млн. нажатий |
| Число деталей | не более 10 |

В конце главы сформулированы задачи исследования, заключающиеся в разработке математической модели оптических министиков, проверке модели на адекватность, определении оптимальных параметров конструкции оптических министиков, технической реализации оптических министиков, разработке методов и оборудования для исследования эксплуатационных характеристик оптических министиков – функции преобразования и эксплуатационного ресурса, экспериментальном исследовании эксплуатационных характеристик и доработке конструкции с целью их повышения, разработке рекомендаций по проектированию оптических министиков различного назначения и их внедрению.

Во второй главе исследован принцип действия министика и разработана математическая модель оптического министика.

Устройство оптического министика представлено на Рисунке 2. Существует две разновидности оптических схем министиков: с общим излучателем и с общим приемником.

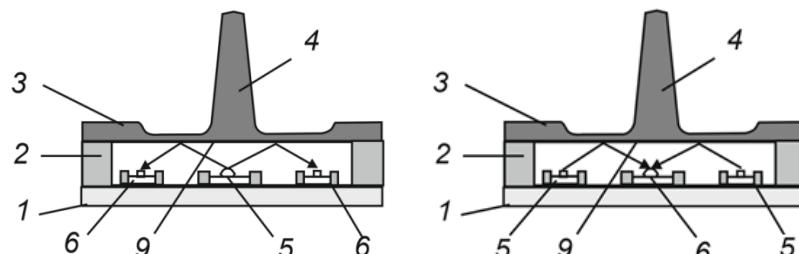


Рисунок 2. Оптическая схема министиков с общим излучателем света (слева) и общим приемником света (справа): 1 - печатная плата; 2 - корпус; 3 - упругодеформируемый элемент; 4 - управляющая рукоятка; 5 - источник света; 6 - фотоэлектрический преобразователь; 9 - светоотражающая поверхность

Для исследования была разработана однокоординатная модель оптического министика. Для изучения функционирования министика его упругодеформируемый элемент был разрезан, а затем исследован на специальном стенде и сфотографирован (Рисунок 3). На основании этого были сформулированы допущения для математической модели.

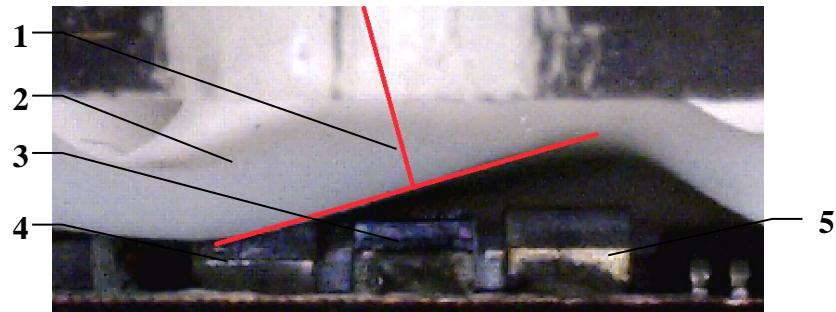


Рисунок 3. Оптический министик в разрезе: 1 – светоотражающая поверхность, 2 – упругодеформируемый элемент, 3 – общий излучатель, 4, 5 – фотоприемники

Математическая модель основана на следующих допущениях:

- рукоятка министика жесткая и не деформируется при нажатии;
- рукоятка министика отклоняется в плоскости расположения фотоприемников;
- рукоятка министика соединена со светоотражающей поверхностью (СОП) под углом 90° и качается на мнимой оси так, что луч света перемещается от одного фотоприемника к другому;
- распространение света в системе линейное;
- источник света точечный;
- отраженный от СОП свет образует световое пятно с центром в точке падения отраженного луча;
- интенсивность освещенности пятна распределена по нормальному закону.

Схема прохождения светового луча представлена на Рисунке 4.

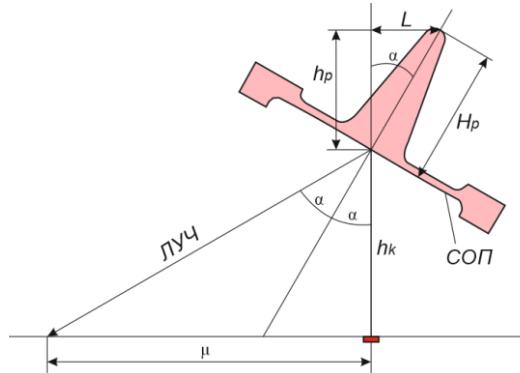


Рисунок 4. Схема прохождения светового луча

Координата центра пятна относительно центра министика может быть определена выражением

$$\mu = h_k \cdot \operatorname{tg} \left(2 \cdot \arcsin \left(\frac{L}{H_p} \right) \right) \quad (1)$$

где: μ – расстояние между центрами излучателя и светового пятна, h_k – расстояние от излучателя до светоотражающей поверхности, H_p – длина рукоятки, L - величина отклонения рукоятки.

Согласно допущению, интенсивность освещенности светового пятна распределена по нормальному закону:

$$f_E(r) = k \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(r - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2)$$

где: $f_E(r)$ – функция распределения интенсивности света в пятне, σ – дисперсия светового пятна, k – коэффициент пропорциональности, r – расстояние от фотоприемника до излучателя.

Следовательно, освещенность фотоприемника может быть определена как:

$$E_{e,\text{апертуры}} = \int_{r_0 - r_{\Phi D}}^{r_0 + r_{\Phi D}} f_E(r) dr = E_{e,\text{полная}} \int_{r_0 - r_{\Phi D}}^{r_0 + r_{\Phi D}} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(r - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dr. \quad (3)$$

где: $E_{e,\text{апертуры}}$ – освещенность фотоприёмника, $E_{e,\text{полная}}$ – полная освещенность светового пятна, r_0 – расстояние от фотоприемника до излучателя, $r_{\Phi D}$ – размер фотоприемника.

На основе однокоординатной модели министика была разработана трехмерная двухкоординатная модель оптического министика. Схема приведена на Рисунке 5.

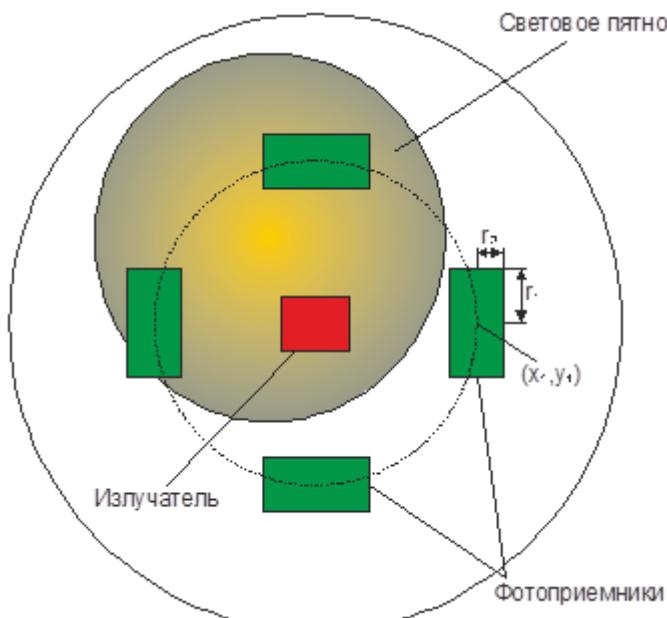


Рисунок 5. Схема двухкоординатного министика

Согласно допущению, интенсивность света в пятне распределена по нормальному закону:

$$f_E(x, y) = k \frac{1}{\sigma_1 \sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(y - \mu_y)^2}{2\sigma_2^2}\right), \quad (4)$$

где: $f_E(x, y)$ – функция распределения интенсивности света в пятне, k – коэффициент пропорциональности, σ_1, σ_2 – дисперсия светового пятна, x, y – расстояние от фотоприемника до излучателя, μ_x, μ_y – расстояние между центрами излучателя и светового пятна.

Следовательно, освещенность фотоприемника может быть определена как:

$$E_{\text{апертуры ФД}} = E_{e,\text{полная}} \int_{x_1-r_2}^{x_1+r_2} \int_{y_1-r_1}^{y_1+r_1} f_E(x, y) dx dy \quad (5)$$

где: $E_{\text{апертуры ФД}}$ – освещенность фотоприёмника, $E_{e,\text{полная}}$ – полная освещенность светового пятна, x_1, y_1 – расстояние от фотоприемника до излучателя, r_1, r_2 – размеры фотоприемника, $f_E(x, y)$ – функция распределения интенсивности света в пятне.

В реальном министике рукоятка и светоотражающая поверхность немного деформируются. Для исследования влияния деформации было проведено моделирование накладки в системе SolidWorks (Рисунок 6).

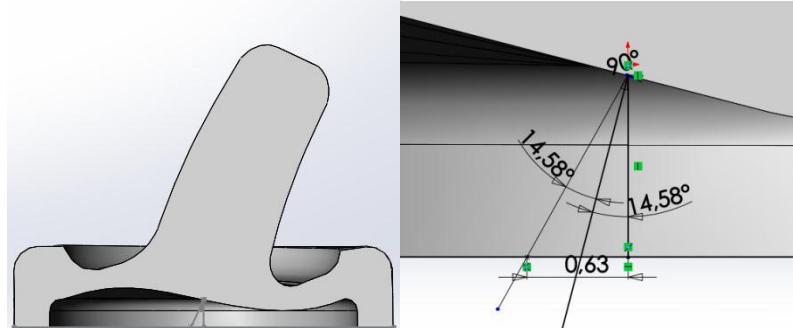


Рисунок 6. Деформация упругодеформируемого элемента

Результаты моделирования показали, что деформация накладки вносит экспоненциальные изменения: угол наклона светоотражающей поверхности министика и смещение пятна меньше, чем в случае с жесткой накладкой.

$$\mu = \frac{1}{e^{K_x}} \cdot (h_k + \Delta h_k) \cdot \operatorname{tg} \left(2 \cdot \arcsin \left(\frac{H_x}{H_p} \right) \right) \quad (6)$$

где: μ – расстояние между центрами излучателя и светового пятна, K_x – коэффициент деформации, h_k – расстояние от излучателя до светоотражающей поверхности, H_p – длина рукоятки, L - величина отклонения рукоятки.

Моделирование работы министиков было проведено в специально разработанной программе MinistickMatModel3D (Рисунок 7).

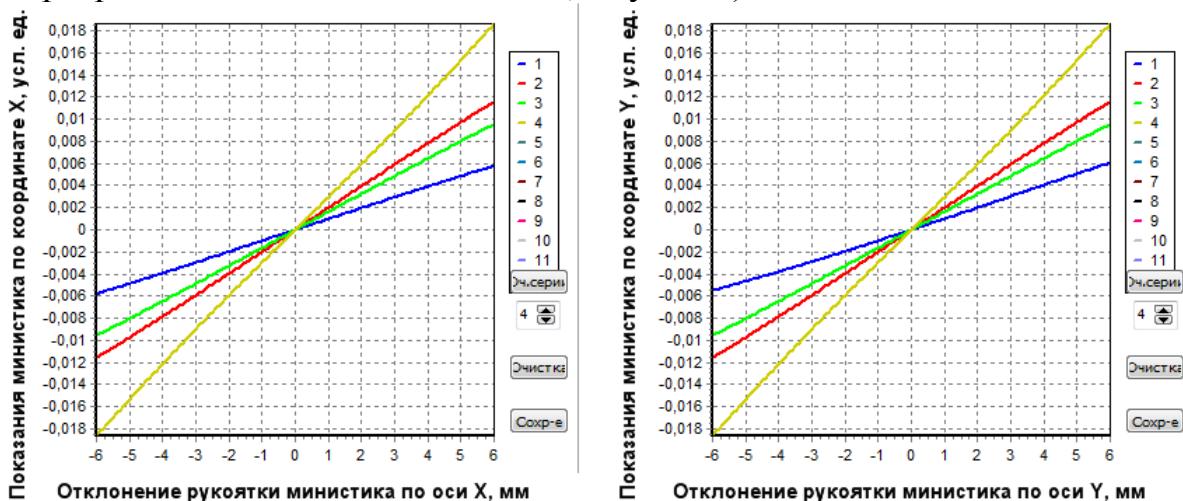


Рисунок 7. Скриншот программы MinistickMatModel3D

В третьей главе разработана структурная схема цифровых оптических министиков и алгоритмов их функционирования, а также выполнена разработка методов и алгоритмов экспериментального исследования характеристик оптических министиков.

Общая структурная схема цифровых министиков представлена на Рисунке 8.

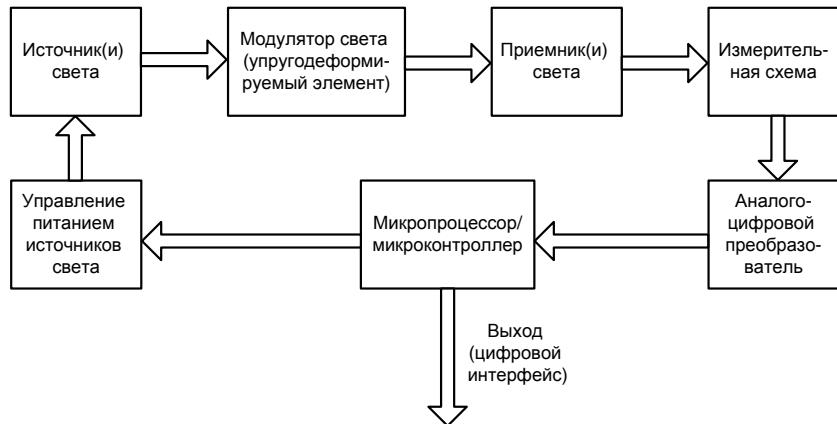


Рисунок 8. Общая структурная схема цифровых оптических министиков

Алгоритм функционирования цифровых оптических министиков представлен на Рисунке 9.

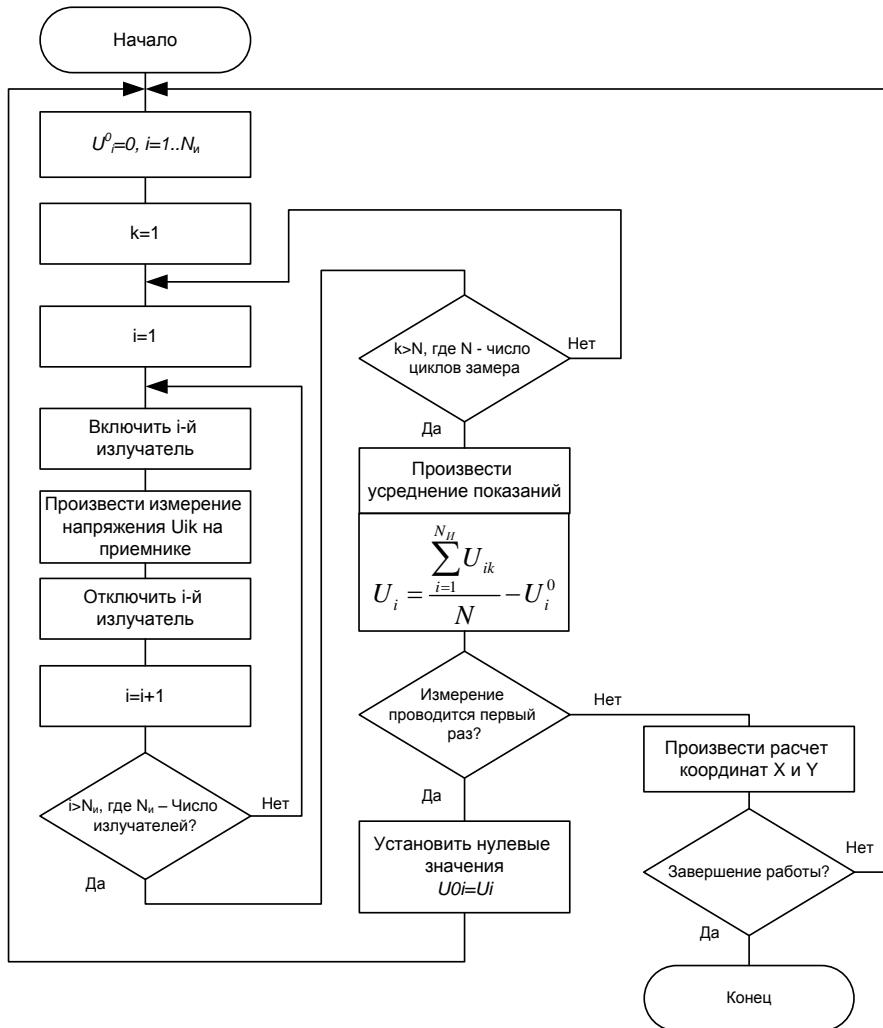


Рисунок 9. Алгоритм работы оптических министиков

Расчет координат X и Y для министиков производится по формулам:

- для министиков с 3 каналами измерения

$$X = (U_3 - U_2) \times \sin(60^\circ) \quad Y = (U_3 + U_2) \times \sin(30^\circ) - U_1 \quad (7)$$

- для министиков с 4 каналами измерения

$$X = U_3 - U_1 \quad Y = U_4 + U_2 \quad (8)$$

- для министиков с 6 каналами измерения

$$X = (U_6 + U_5 - U_3 - U_2) \times \sin(60^\circ) \quad Y = U_4 - U_1 + (U_3 - U_2 + U_5 - U_6) \times \sin(30^\circ) \quad (9)$$

где U_i – напряжение на i -м измерительном канале.

Далее были разработаны алгоритмы работы цифрового оптического министика в качестве полиморфного переключателя. Полиморфный переключатель способен заменять различные коммутационные устройства, а его функциональность может быть изменена программно в реальном времени. Были разработаны алгоритмы функционирования министика в качестве аналогового (пропорционального) джойстика, движкового регулятора, кнопок с фиксацией и без фиксации.

В главе были разработаны методы и алгоритмы исследования эксплуатационных характеристик министиков, определены контрольные параметры.

Основной рабочей характеристикой министика является его функция преобразования – зависимость полезного сигнала министика от величины отклонения рукоятки министика. Методом исследования функции преобразования является регистрация показаний министика в точках с заданным отклонением рукоятки министика по осям X и Y . Отклонение рукоятки задается величиной отклонения от центра L и углом отклонения φ . Для определения качества функции преобразования министика определены параметры: амплитуда, разрешение, точность, нелинейность, гистерезис.

Второй исследуемой характеристикой министика является эксплуатационный ресурс, выражющийся в количестве нажатий рукоятки министика до его отказа. Для исследования ресурса применяется метод многократного циклического ускоренного воздействия на министик нагрузкой, имитирующей нажатие пальцем. Отказом министика считается разрушение его конструкции или изменение функции преобразования, делающее невозможным дальнейшее использование министика для управления объектом. Зависимость показаний министика от количества нажатий может быть оценена через коэффициент изменения показаний K_i , определяющий расхождение показаний министика до испытаний и после.

В четвертой главе рассматриваются вопросы технической реализации оптических министиков, разрабатывается оборудование для исследования эксплуатационных характеристик оптических министиков, проводится экспериментальное исследование разработанных оптических министиков и проверка математической модели на адекватность, рассматриваются применения оптических министиков в устройствах управления робототехникой.

На основе общей структуры оптического министика, разработанной в главе 3, требований к министику, сформулированных в главе 1, и с учетом требований ПНИЭР RFMEFI57914X0087, была произведена техническая реализация оптических министиков. Принципиальная схема и фотография министика представлена на Рисунке 10.

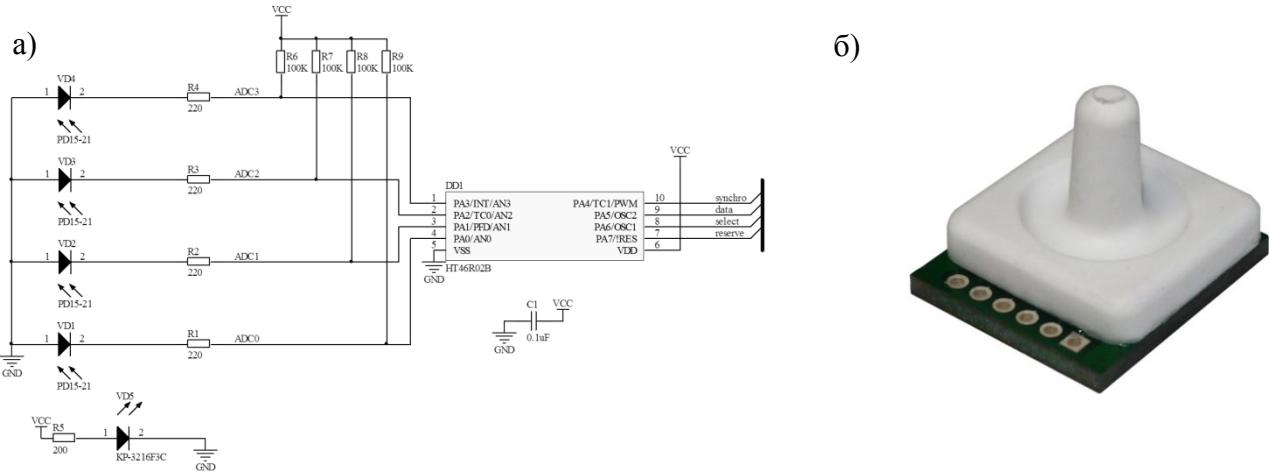


Рисунок 10. Техническая реализация оптических министиков: а) принципиальная схема, б) внешний вид

Для исследования функции преобразования министика был разработан испытательный стенд. Стенд 1 содержит поворотное основание 4, на котором закрепляется исследуемый министик 3, и отклоняющий элемент 2, позволяющий задавать величину отклонения рукоятки министика. Для обеспечения точности позиционирования вращение основания и отклоняющего элемента осуществляются шаговыми двигателями с обратной связью на основе абсолютных энкодеров. Схема и внешний вид стенда представлены на рисунке 11.

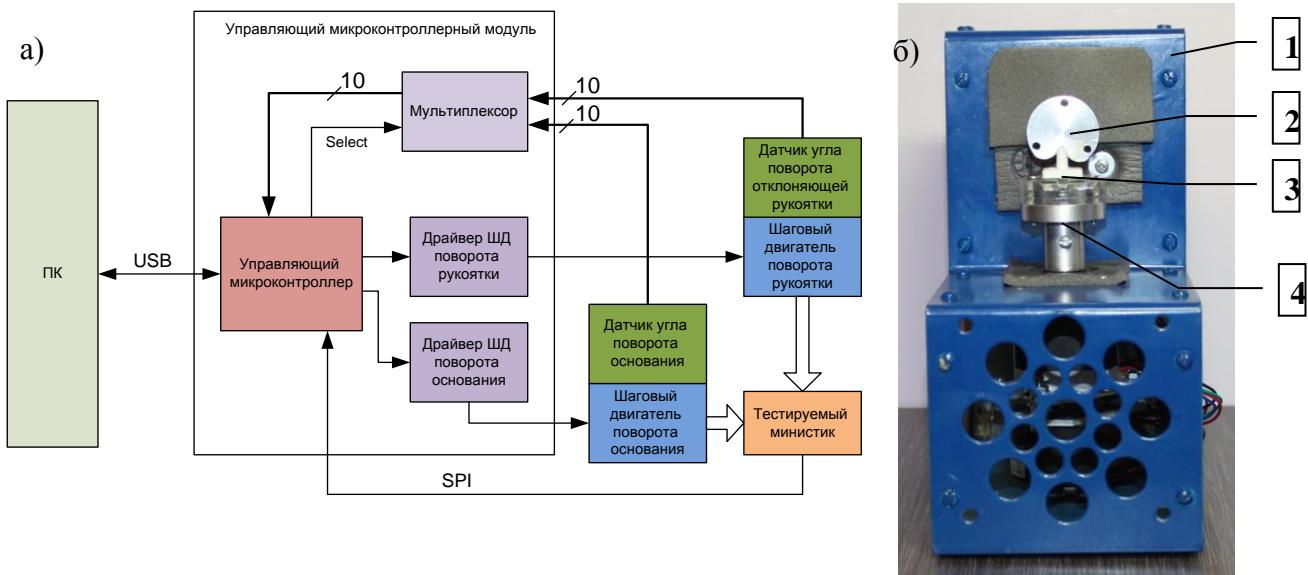


Рисунок 11. Испытательный стенд: а) структурная схема, б) внешний вид

Для исследования эксплуатационного ресурса министиков был разработан специализированный испытательный стенд для исследования ресурса, способный обеспечивать многократные циклические воздействия на министик, имитирующие эксплуатационную нагрузку (нажатие пальцем). Схема и внешний вид стенда представлены на Рисунке 12.

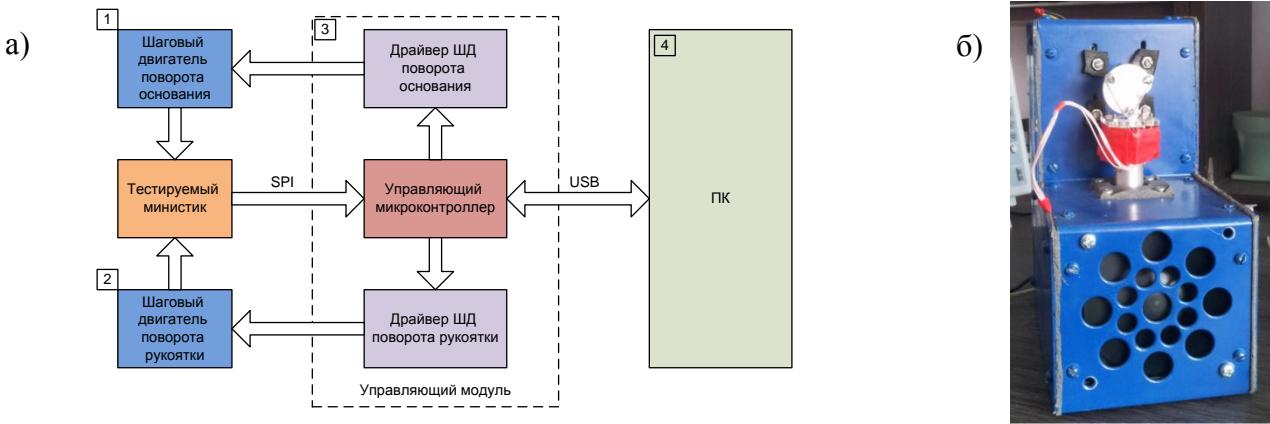


Рисунок 12. Стенд для исследования эксплуатационного ресурса: а) структурная схема, б) внешний вид

Для исследования функции преобразования министиков были изготовлены несколько экспериментальных образцов (ЭО) министиков с различными оптическими схемами. Функции преобразования ЭО министиков были получены экспериментально с помощью универсального стенда. Далее были произведены оценка качества сигнала министика и проверка модели на адекватность.

Оценка адекватности модели производилась по максимальному значению относительных отклонений расчетных и экспериментальных значений. Для министиков с 3 и 6 светодиодами расхождение модели и эксперимента составило не более 12%. Для министиков с 4 светодиодами расхождение составило около 50%. Причинами расхождения расчетных и экспериментальных данных для министика с 4 светодиодами являются: закрывание упругодеформируемой накладкой крайних оптических элементов, изменение деформации из-за наложения на микроконтроллер. Министики с усовершенствованной схемой продемонстрировали высокое качество выходного сигнала (Таблица 2).

Таблица 2.

Основные показатели качества выходного сигнала министика

| Параметр | Первоначальные министики | Усовершенствованные министики |
|----------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Число изм. каналов | 4 | 4 |
| Амплитуда сигнала | 400-420 знач. | 700-800 знач. |
| Чувствительность | 0,2-0,05 мм | не менее 0,02 мм |
| Разрешение | 5-40 знач/мм | 70-80 знач/мм |
| Нелинейность сигнала | 13-15% | 2-5% |
| Гистерезис | 4-5% | 1-2% |

Графики функций преобразования министиков с первоначальными и с усовершенствованной схемой приведены на Рисунке 13.

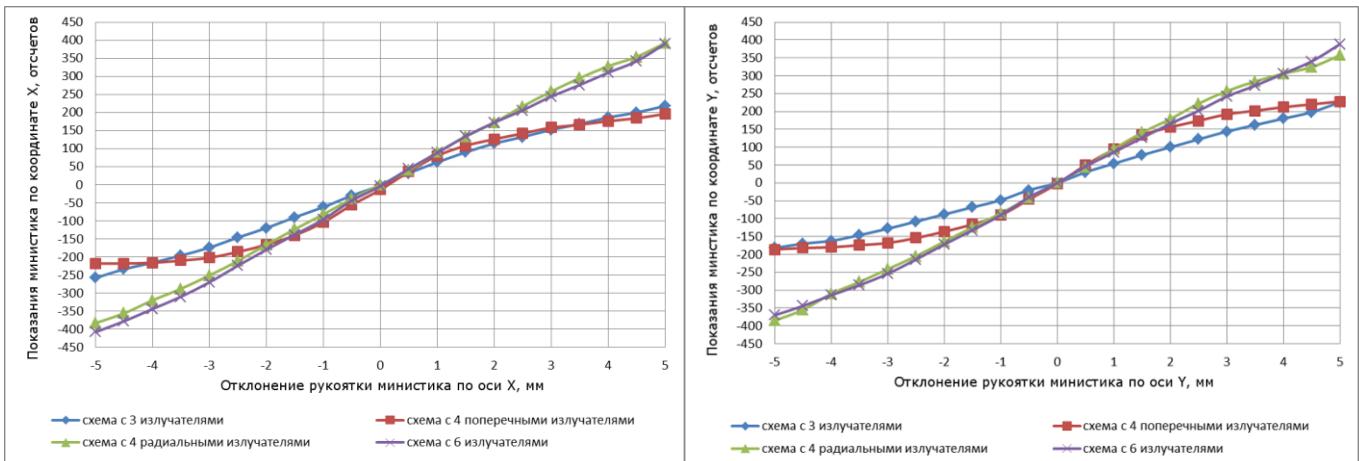


Рисунок 13. Графики функций преобразования министиков

Разработанные оптические министики были подвергнуты непрерывному воздействию на испытательном стенде для исследования ресурса, которое продолжалось 34 суток и составляло 1 млн. циклов (4 млн. нажатий) для каждого министика. После завершения испытаний визуальный осмотр показал отсутствие видимых повреждений конструкции и упругодеформируемого элемента. Сравнение экспериментально полученных функций преобразования министиков до и после испытаний показало, что изменение показаний K_i составило не более 2%.

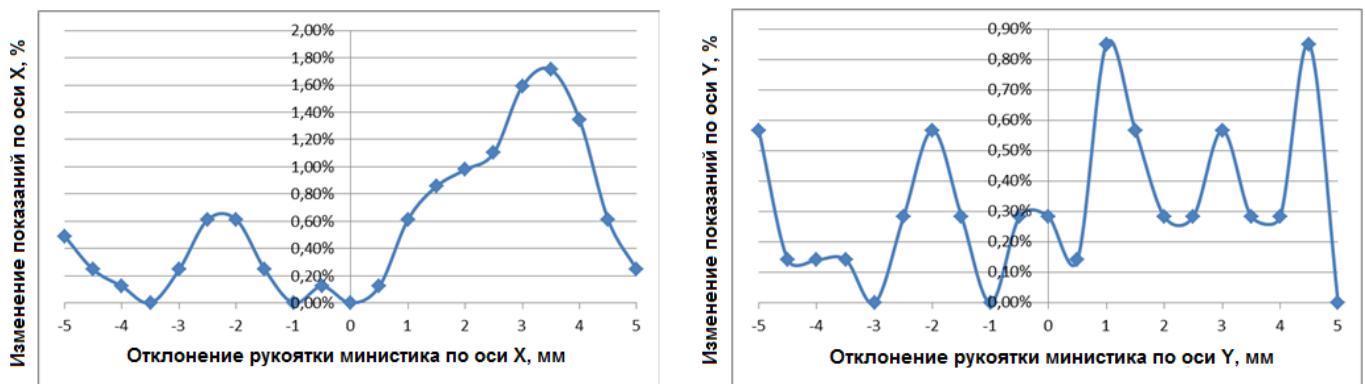


Рисунок 14. Результаты ресурсных испытаний министиков

На основе оптических министиков было разработано устройство управления и ввода информации – полиджойстики. Полиджойстики представляют собой 2 неподвижные ручки, которые содержат по 5 оптических министиков, позволяющих управлять объектом, содержащим до 20 степеней свободы. Преимуществами полиджойстиков являются: повышенная скорость и точность формирования управляющих воздействий; управление без отрыва рук от устройства ввода, всплескую, в условиях перегрузок, тряски, толчков, качки, вибраций; малый вес и габариты. Структурная схема и внешний вид полиджойстиков представлены на Рисунке 15.

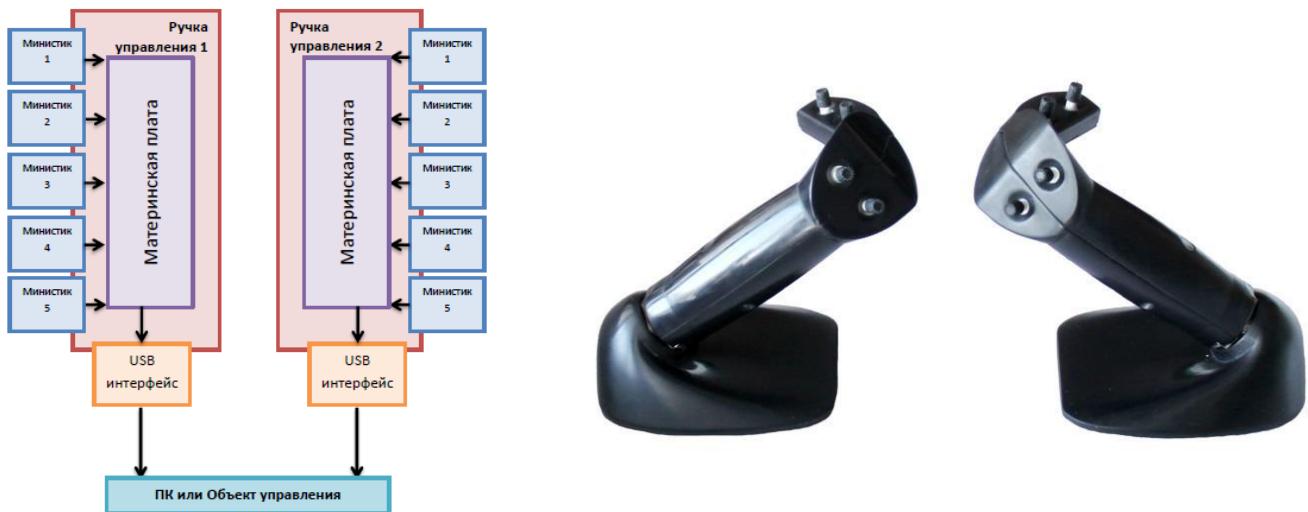


Рисунок 15. Структурная схема и внешний вид полиджойстиков

На основе разработанных в главе 3 алгоритмов работы полиморфного переключателя было разработано программное обеспечение, позволяющее сопрягать полиджойстики с ПК в качестве стандартных устройств ввода (джойстик, мышь, клавиатура).

В заключении приведены следующие **основные результаты работы**.

1. Проведен анализ существующих микроджойстиков и их чувствительных элементов, определены их недостатки. По результатам анализа было принято решение о работе над новыми устройствами – цифровыми оптическими министиками – и сформулированы требования к ним.

2. Разработана и исследована математическая модель оптической системы двухкоординатного министика. Разработаны программные средства для моделирования оптического министика, проведены исследование оптического министика и проверка модели на адекватность.

3. Разработана структура оптического министика и алгоритмы его функционирования. Проведен анализ преимуществ и недостатков различных структурных схем построения министиков и определены наиболее оптимальные варианты.

4. Разработаны алгоритмы работы цифрового оптического министика в качестве полиморфного переключателя, функциональность которого может изменяться в реальном времени.

5. Предложен метод исследования функции преобразования оптического министика, разработан алгоритм исследования, определены параметры качества сигнала и выражения для их расчета, разработан испытательный стенд

6. Предложен метод исследования эксплуатационного ресурса оптического министика, разработан алгоритм исследования, определены параметры качества сигнала, разработан испытательный стенд.

7. Технически реализованы оптические министики на основе разных оптических схем. Проведено экспериментальное исследование их функции преобразования при помощи испытательного стенда. Полученные результаты эксперимента проанализированы и на их основе выработаны рекомендации по изменению конструкции оптического министика.

8. Разработан и запущен в производство цифровой оптический министик усовершенствованной конструкции с высоким качеством выходного сигнала. Министик обеспечивает разрешение до 50 знач/мм, чувствительность до 0,02 мм, нелинейность выходного сигнала не более 5%, гистерезис не более 2%.

9. Проведено экспериментальное исследование эксплуатационного ресурса оптического министика с использованием испытательного стенда. По результатам исследований достигнут эксплуатационный ресурс в 4 млн. нажатий, что превосходит показатели существующих аналогов в 2-8 раз. Изменение характеристик выходного сигнала составило не более 2%.

10. Разработаны варианты применения оптических министиков в устройствах ввода, в том числе в полиджойстиках, позволяющих создать унифицированный интерфейс управления робототехникой. Разработано ПО для подключения полиджойстиков к ПК в качестве стандартных устройств ввода.

Результаты диссертационной работы внедрены в продукцию НПП «Тензосенсор» и ряда других предприятий, организовано опытное производство министиков и устройств ввода на их основе.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях общим объемом 1,5 печатных листа.

1. Экспериментальное исследование характеристик оптических министиков с общим излучателем / Голубин С. А [и др.] // Вестник РГАТУ им. П. А. Соловьева. 2015. № 1(32). С. 65-70 (0,75 п. л. / 0,15 п. л.)

2. Экспериментальное исследование характеристик оптических министиков / Голубин С. А [и др.] // Светотехника. 2015. №6. С. 17-20 (0,75 п. л. / 0,15 п. л.)

3. Голубин С. А., Никитин В. С., Белов Р. Б. Цифровые оптические министики для управления робототехническими комплексами // Электросвязь. 2015. №11 С. 68-69 (0,25 п. л. / 0,08 п. л.)

4. Никитин В. С., Белов Р. Б., Голубин С. А. Оптические министики на основе VCSEL-лазеров – новое средство управления робототехническими комплексами // Электросвязь. 2016. №10. С. 22-24 (0,44 п. л. / 0,14 п. л.)

5. Исследование влияния светотехнической схемы оптических министиков на их характеристики/ Голубин С. А [и др.] // Светотехника. 2016. №6 С. 34-38 (0,7 п. л. / 0,14 п. л.)

6. Исследование характеристик оптического министика с VCSEL-лазером/ Голубин С. А [и др.] // Светотехника. 2017. №1. С. 24-27 (0,6 п. л. / 0,12 п. л.)

7. Experimental research on the performance of optical ministicks with a common receiver/ Sergei A. Golubin [et al.] // Lights&Engineering. 2015. Volume 23, Number 4, pp. 81-87 (0,75 п. л. / 0,18 п. л.)

8. Experimental study of how lighting patterns affect optical ministiks characteristics / Sergei A. Golubin [et al.] // Lights&Engineering. 2016. Volume 24, Number 4, pp. 105-110 (0,7 п. л. / 0,14 п. л.)

9. Study of Characteristics of VCSEL-based Optical Ministicks / Sergei A. Golubin [et al.] // Lights&Engineering. 2016. Volume 24, Number 4, pp. 111-116 (0,6 п. л. / 0,12 п. л.)

10. Оптический министик защищенный: заявка на изобретение РФ / Никитин В. С., Голубин С. А. № 2015116978 от 05.05.2015 г.

11. Оптический министик специальный: заявка на изобретение РФ / Никитин В. С., Голубин С. А. № 2016102602 от 26.01.2016 г.

12. Голубин С. А., Ломанов А. Н., Никитин В. С. Новые оптические министики для управления робототехническими комплексами и летательными аппаратами // Materiały IX Miedzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «Wschodnie Partnerstwo – 2015» – Przemysl, Nauka I studia, 2015, Volume 4, C. 71-83 (0,75 п. л. / 0,25 п. л.)

13. Преимущества унификации систем управления робототехническими комплексами на основе инновационных человеко-машинных интерфейсов с использованием полиджойстиков / Голубин С. А. [и др.] // Труды первой военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации» – Москва: ФГБУ «ГНИИЦ РТ», 2016, С. 419-423 (0,4 п. л. / 0,08 п. л.)