

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ЗАХВАТОВ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТОВ

Самарский национальный исследовательский университет, кафедра Автоматизированные системы энергетических установок,

г. Самара, Московское шоссе, 34, Самара, 443068,

д.т.н., профессор Матюнин С.А., e-mail: S.A.Matyunin@yandex.ru

Аннотация

В настоящее время в технологически развитых странах ведутся интенсивные исследования в области разработки новых типов датчиков, особенно для робототехники. Особый интерес представляют волоконно-оптические датчики (ВОД) с закрытым оптическим каналом как нечувствительные к электромагнитным наводкам, работающие от криогенных (минус 200 °С) до высоких температур (+400 °С) и в принципиально взрывобезопасном исполнении [1-6].

В Самарском университете разработаны положения теории, а в докладе рассмотрены особенности реализации ВОД тактильного усилия (ВОД-ТУ) и углового положения (ВОД-УП) фаланг захватов антропоморфного робота, основанных на макроизгибах оптического волокна [6-10].

Проведены экспериментальные исследования опытных образцов (при участии ОА «Андроидная техника» г. Москва) ВОД тактильного усилия и углового положения фаланг захватов и достигнуты следующие характеристики [10]:

- контролируемое тактильное усилие не менее 0...10 Н;
- контролируемые угловые положения фаланг 0...60 град.;
- основная погрешность контроля тактильного усилия не хуже 1,0 %;
- основная погрешность контроля углового положения не хуже 0,5 %;
- размеры пятна контакта тактильного усилия не менее 3х3 мм;
- разрешающая способность электронного трансивера не менее 10 бит;
- температура эксплуатации от минус 80 до плюс 80 °С;
- относительная влажность воздуха до 100 %;
- напряжение питания электронного трансивера, 22-32 В, 0,1 А.

Ключевые слова: захват антропоморфного робота, волоконно-оптический датчик тактильного усилия, волоконно-оптический датчик углового положения, электронный трансивер, математическая модель, экспериментальные исследования.

Введение

Современные системы сбора и передачи измерительной и управляющей информации на основе волоконно-оптических датчиков являются наиболее рациональными элементами приемо-передающих трактов благодаря высокой устойчивости к электромагнитным помехам, разрушающим факторам (химическим, радиационным, температурным и др.), а также в связи с возможностью сверхскоростной передачи результатов измерений и команд управления. По многочисленным оценкам [1-6] в ближайшие 10-15 лет такие ВОД на 80...90% покроют потребности робототехники, а также будут активно внедряться таких в сферах как атомная энергетика, опасные химические и нефтегазоперерабатывающие производства, аэрокосмическое приборостроение и т.д.

В настоящей работе приводятся результаты разработки и исследования чувствительных элементов (ЧЭ) ВОД-УП и ВОД-ТУ, реализованных на эффекте изменения оптических потерь в оптическом волокне при его макроизгибах.

Датчики тактильного усилия на макро изгибных потерях в оптическом волокне

Рассматривались следующие варианты реализации ЧЭ ВОД-ТУ, отличающиеся способами обеспечения необходимого значения тактильного усилия (наибольшее измеряемое тактильное усилие 10Н) [7, 11]:

- ВОД-ТУ с плоской изогнутой пружиной;
- ВОД-ТУ с плоской прямой пружиной;
- ВОД-ТУ с винтовой пружиной.

ЧЭ ВОД-ТУ с плоской пружиной проектировался в двух вариантах - с плоской изогнутой пружиной (по радиусу) и плоской прямой пружиной. Моделирование и расчет упругого элемента осуществлялись в конечно-элементном программном комплексе ANSYS-14. Первый вариант ЧЭ, благодаря изгибу пружины, позволял сформировать компактное пространство для хода толкателя за счет деформации пружины. Благодаря этому геометрические размеры, в частности высота, ЧЭ значительно уменьшались. Однако такая конструкция имеет свои недостатки, которые выявились по результатам испытаний. На

рисунках 1 а) и б) представлены схемы компоновки конструкций ЧЭ датчика тактильного усилия с плоской прямой и изогнутой пружинами соответственно.

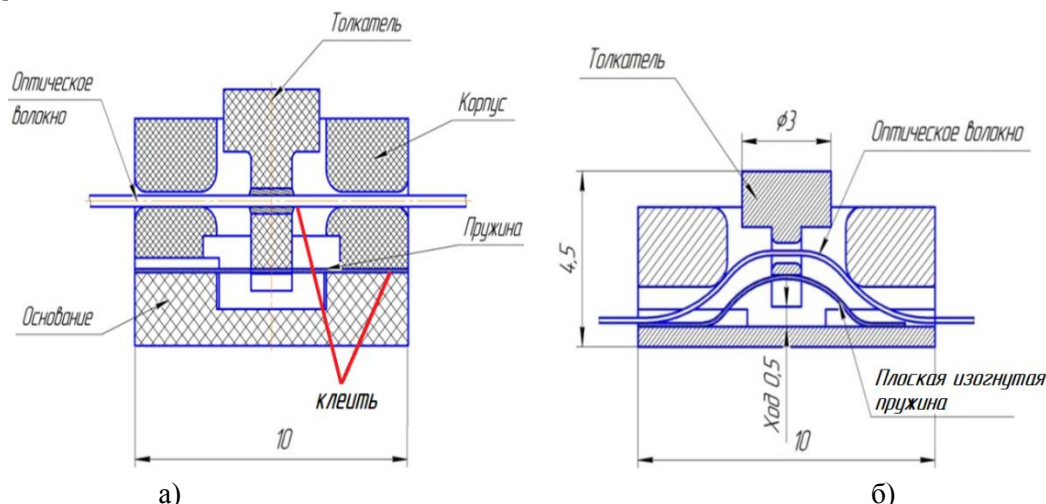


Рисунок 1 - Схемы компоновки ЧЭ ВОД-ТУ с плоской прямой и изогнутой пружинами

Проведенные экспериментальные исследования показали, что ЧЭ с прямой и изогнутой пружинами обладают низкой начальной чувствительностью и начинают работать со значения усилия 4-5Н, что объясняется отсутствием начального изгиба оптического волокна.

Увеличение чувствительности ВОД-ТУ на начальном участке функции преобразования возможно за счет создание консольной петли, вершина которой будет зафиксирована в толкателе. В процессе сборки таких чувствительных элементов было замечено, что волокно при изгибе, под действием внутренних упругих сил поворачивается вокруг своей оси на определенный угол. При этом, даже при небольшом усилии воздействия на подобный элемент вызывали существенное изменение оптического сигнала. Было решено "искусственно" создать дополнительный наклон петли на угол 30-45°. Для этого был спроектирован вариант ЧЭ, в котором заложены канавки для оптического волокна под необходимым углом, с сохранением изгиба волокна радиусом 5-6 мм. Схема создания изгиба оптического волокна под углом представлена на рисунке 2.

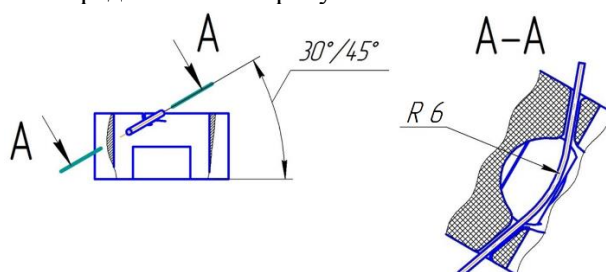


Рисунок 2 - Схема создания изгиба оптического волокна под углом

Результаты испытаний вариантов ЧЭ с углом наклона волокна 30° и 45° показали, что их функции преобразования (рисунок 3) практически идентичны. Из полученных результатов можно сделать вывод, что опытный образец ЧЭ ВОД-ТУ с плоской изогнутой пружиной и изогнутым и наклоненным на угол 45 ° оптическим волокном является наиболее приемлемым для использования.

ЧЭ ВОД-ТУ с винтовой (спиральной) цилиндрической пружиной характеризуются значительно увеличенным вертикальным размером (более чем в 2,5 раза) и поэтому в дальнейшем не рассматриваются.

Датчик углового положения на макро изгибных потерях в оптическом волокне

Эскиз монтажа ЧЭ ВОД-УП на флангах захвата приведен на рисунке 4. Здесь конструкция ЧЭ ВОД-УП выполнена в виде петель оптического волокна радиусом 5-7 мм, формируемых вокруг оси поворота фланги захвата. В состав элементов ЧЭ ВОД-УП входят специальные опоры оптического волокна с фиксацией 1 и свободных ходом 2 оптического волокна.

Схема монтажа ВОД-УП на третий поворотный узел захвата приведена на рисунке 5, а результаты испытаний ЧЭ ВОД-УП - на рисунке 6. Как видно из результатов эксперимента, характеристика функции передачи ЧЭ имеет три участка неопределенности (углы 20, 30 и 45 град.). Подобная картина объясняется тем, что волокно под действием внутренних упругих сил, возникающих при его деформации, начинает дополнительно изменять свою кривизну в местах крепления в неподвижных

опорах, что приводит к перераспределению модового состава оптического излучения и к соответствующему изменению оптического сигнала.

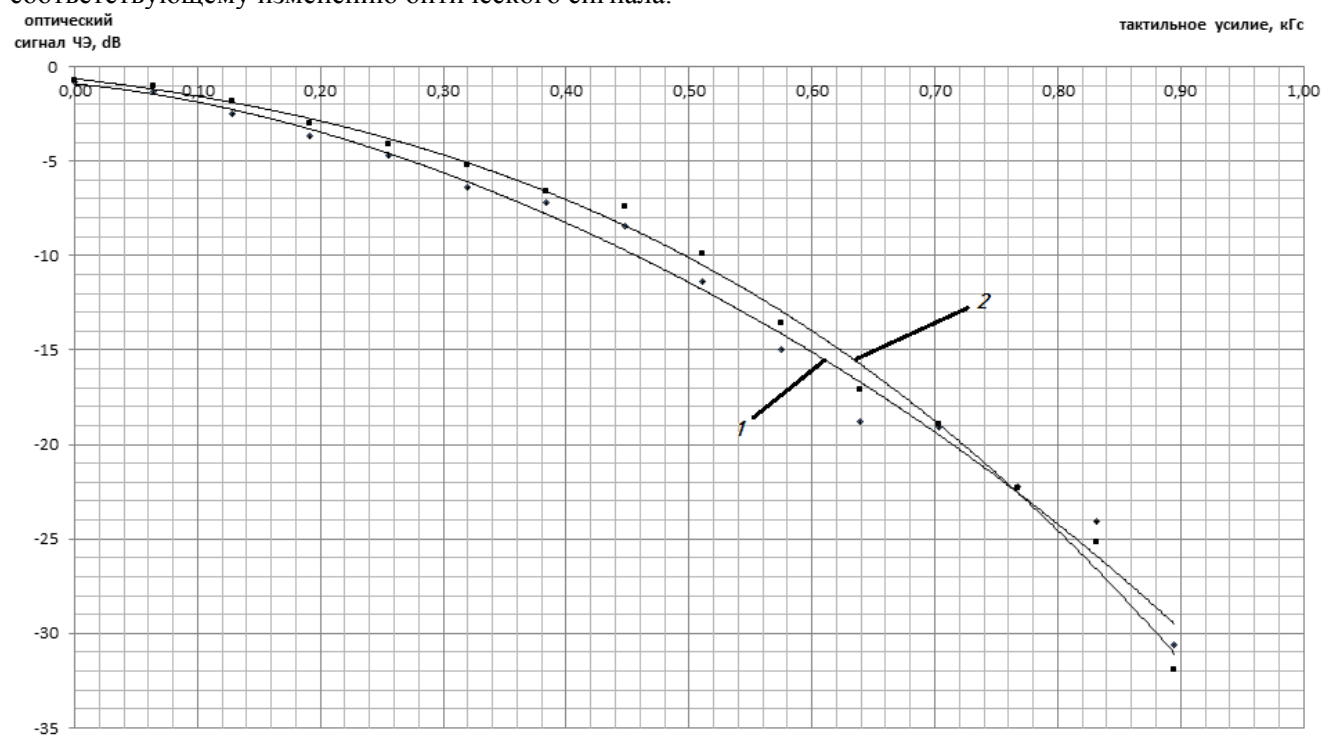


Рисунок 3 - Функция преобразования для ЧЭ ВОД-ТУ с углами наклона волокна 30° (1) и 45° (2)

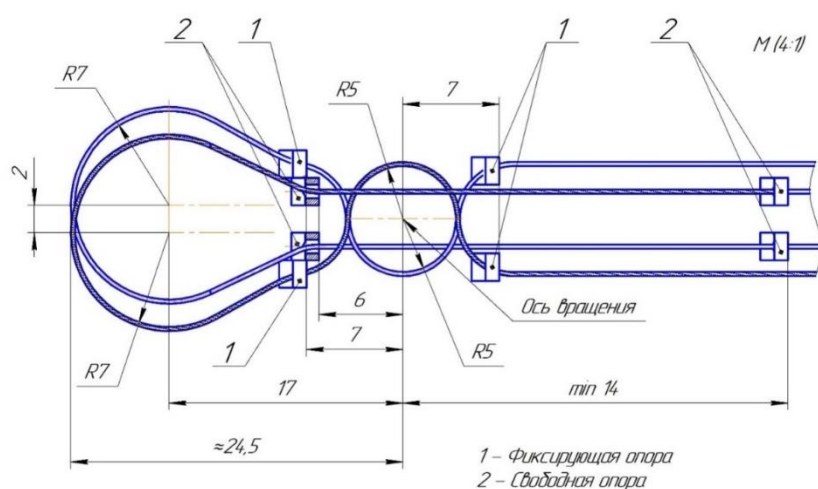


Рисунок 4 - Эскиз монтажа ЧЭ ВОД-УП на фалангах захвата

Один из вариантов устранения такого эффекта рассмотрен и реализован в виде заявки на изобретение «Волоконно-оптический датчик угла поворота» (номер государственного учета РИД АААА-Г18-618101890006-4). Здесь ЧЭ и измерительная система угла поворота фаланг пальца захвата робота на его основе состоят из электронного трансивера, волоконно-оптических ЧЭ и волоконно-оптических линий связи, соединяющих ЧЭ с электронным трансивером. При этом ЧЭ выполнен в виде двух отрезков оптического волокна, свернутых в кольца разного радиуса. Причем концы колец неподвижно закреплены на фалангах пальцев, а кольца расположены таким образом, что радиусы колец синхронно увеличиваются/уменьшаются при угловом повороте фаланги. В процессе работы электронным трансивером измеряются оптические сигналы обоих колец оптического волокна ЧЭ и по величине этих сигналов учитывается результат измерения только того отрезка оптического волокна (кольца), функция преобразования которого не имеет неоднозначности на данном участке характеристики.

В некоторых вариантах конструкций захватов нет возможности использования волоконно-оптических чувствительных элементов в виде полных колец из-за их сравнительно больших габаритов. В таких захватах кольцеобразные отрезки оптических волокон могут быть выполнены в виде полуколец.

Это позволит устранить одновременно возможное изменение положения плоскости кольца, происходящее в процессе его изгиба.

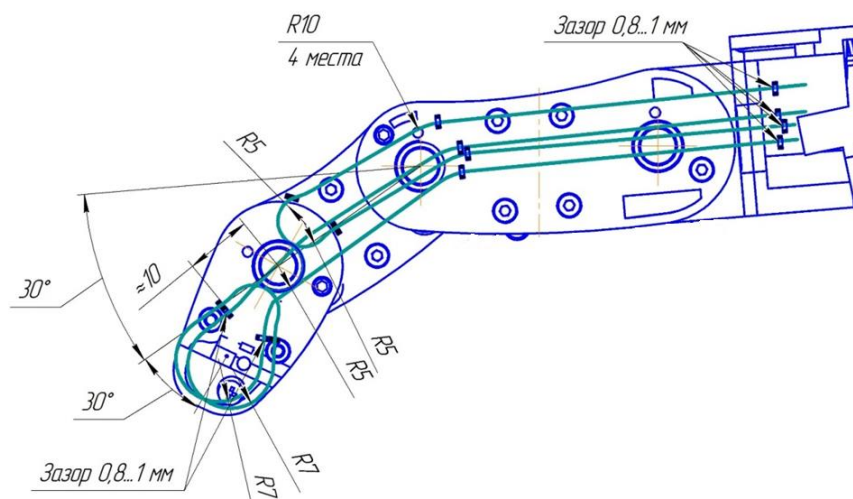


Рисунок 5 - Схема монтажа ВОД-УП на третий поворотный узел захвата

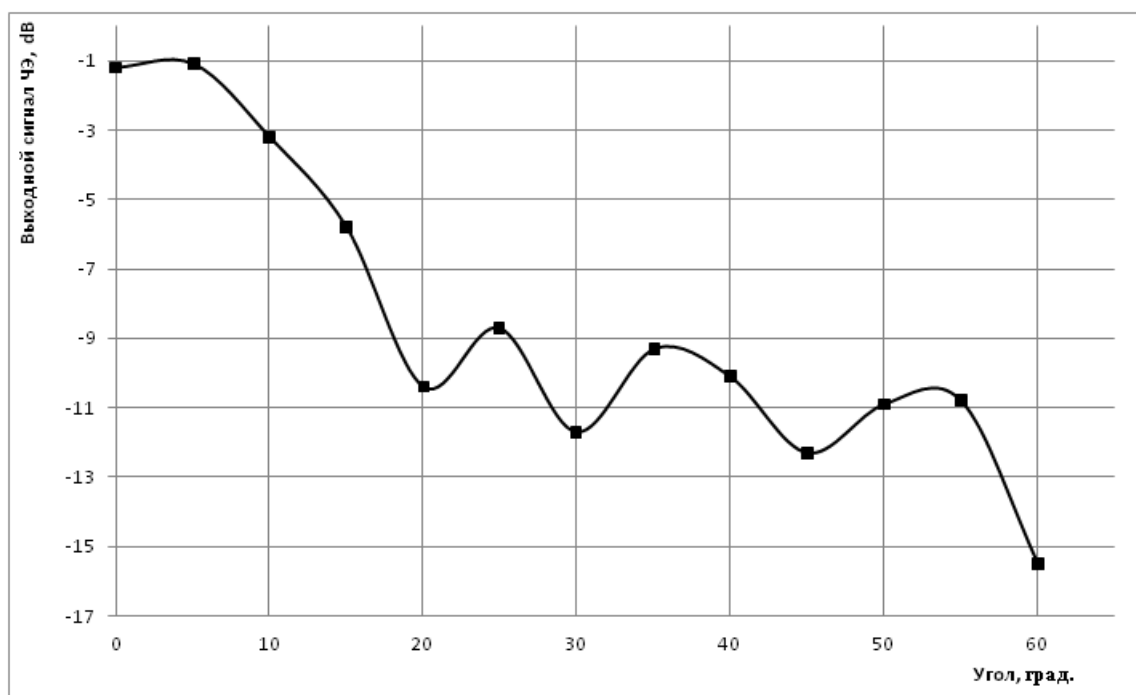


Рисунок 6 - Функция преобразования для ЧЭ ВОД-УП

Оба представленных варианта могут быть применены в качестве датчиков угла поворота фаланг антропоморфного захвата. Однако при дальнейшей проработке вариантов чувствительных элементов выявлен вариант конструкции, использующий тот же физический принцип, но отличающийся меньшими габаритами, отсутствием необходимости предварительной настройки, отсутствием зон неоднозначности и большей стабильностью характеристик при эксплуатации. В данном варианте создавался искусственный натяг оптического волокна во время поворота фаланги. Поскольку при этом при повороте фаланги происходит изменение длины оптического волокна, то использование жесткой фиксации, в данном случае невозможно. На рисунке 7 изображен график функции преобразования ЧЭ ВОД-УП на макроизгибах, лишенной участков неоднозначности функции преобразования.

Анализ взаимного влияния поворота фаланг захвата на соседние ЧЭ ВОД-УП

На рисунках 8 а) ... 8 г) показано расположение ЧЭ ВОД-УП, установленных в фаланги пальцев захвата антропоморфного робота. Здесь 1-3 - фаланги пальцев; 4 - элемент предплечья; 5, 6, 7 - чувствительные элементы ВОД-УП, установленные в фаланги 1, 2, 3 соответственно; 8, 9, 10 - положение тех же ЧЭ при изгибах фаланг. Из рисунка 8 видно, что на ЧЭ 7 влияет только поворот фаланги 3, повороты фаланг 1, 2 влияния на него не оказывают. На ЧЭ 6 влияет поворот фаланги 3 и

фаланги 2, поворот фаланги 1 влияния на него не оказывает. На ЧЭ 5 оказывают влияние повороты всех трех фаланг.

Из рисунка 8 так же видно, что радиусы изгиба чувствительного оптического волокна в местах установки ЧЭ и в местах «транзитного» прохождения оптического волокна через другие фаланги существенно отличаются - радиусы изгиба «транзитного» оптического волокна существенно больше радиусов изгиба оптического волокна ЧЭ.

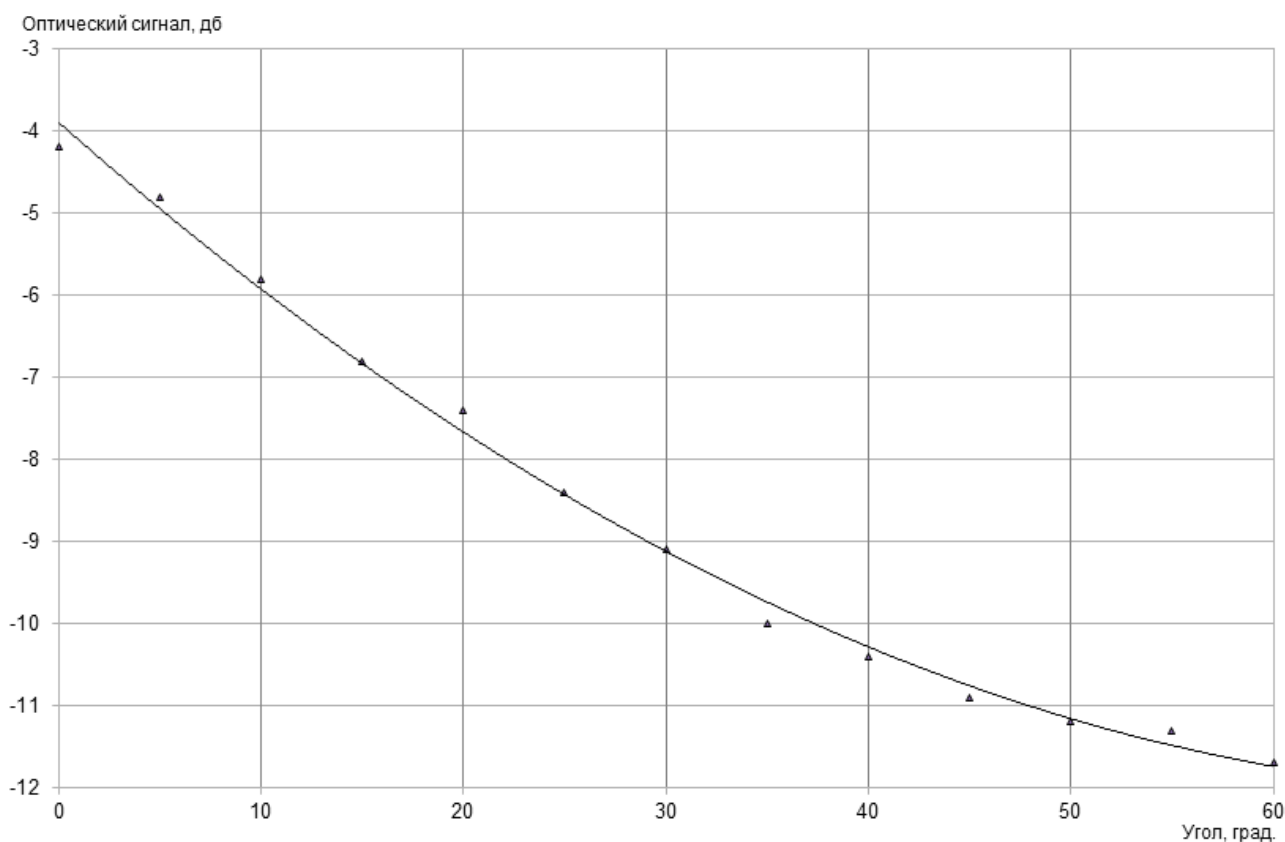


Рисунок 7 – Функция преобразования ЧЭ ВОД-УП на макроизгибах

На рисунке 9 приведена экспериментальная характеристика функции преобразования ЧЭ в зависимости от радиуса изгиба оптического волокна: кривая а) - коэффициент передачи, выраженный в дБ; кривая б) - коэффициент передачи, выраженный в относительных единицах. Как видно из рисунка, зависимость функции преобразования, выраженная в относительных единицах, практически линейная, что позволяет аппроксимировать ее линейной функцией.

На рисунке 10 приведена зависимость функции преобразования ЧЭ от начального диаметра изгиба оптического волокна. Эта зависимость хорошо аппроксимируется полиномом второй степени.

На рисунке 11 а) изображена схема изменения радиуса изгиба оптического волокна от угла поворота фаланги. Величину радиуса изгиба оптического волокна можно определить из выражения:

$$R(\varphi) \approx \frac{\pi}{\pi + \varphi} R_0 \quad (1)$$

где $R(\varphi)$, R_0 - текущий и начальный радиусы изгиба оптического волокна соответственно; φ - угол поворота; $\pi = 3,14156$.

Радиус начального изгиба определяется особенностями фиксации оптического волокна в фалангах и для случая, изображенного на рисунке 11 а) определяется из выражения:

$$R_0 \approx \frac{H}{4} \quad (2)$$

где H – расстояние между опорами оптического волокна.

В частности, при $H = 40$ мм, $R_0 = 10$ мм, $\varphi = 1,047$ рад. (60 град.) получим $R(\varphi) = 7,5$ мм, что соответствует диаметру $D(\varphi) = 15$ мм. В соответствии с графиком рисунка 11 коэффициент передачи ЧЭ изменяется при этом в 1,3 раза.

Для оптического волокна, проходящего через фаланги «транзитом», при $H = 40$ мм, $\varphi = 1,047$ рад. (60 град.) получим $R(\varphi) = 38,2$ мм. В соответствии с графиком рисунка 11 функция преобразования ЧЭ изменяется при этом всего на 0,5%.

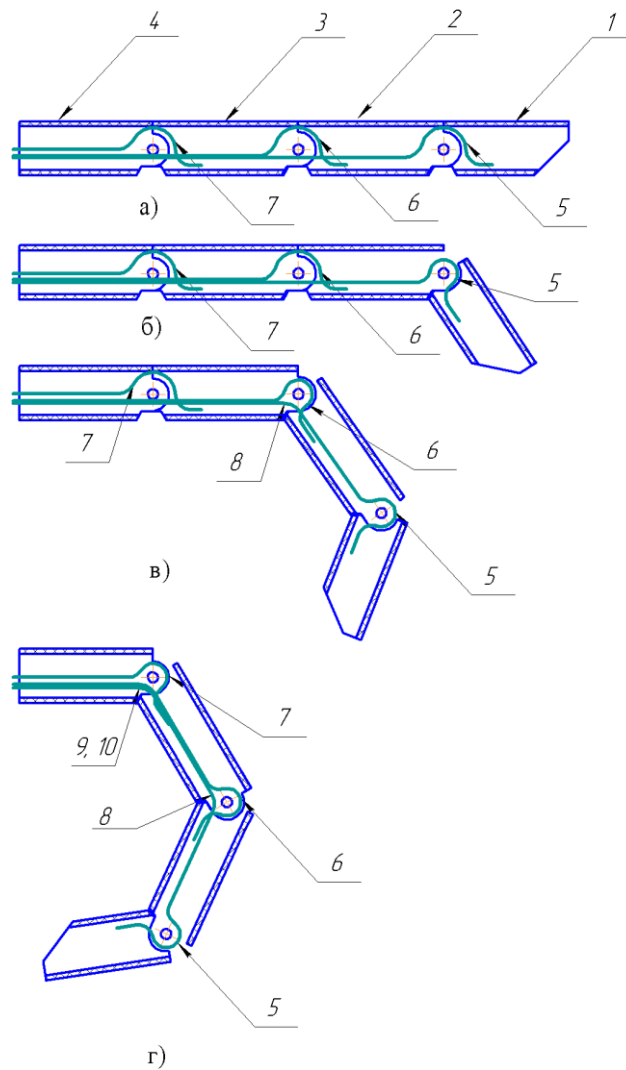


Рисунок 8 - Расположение и влияние поворота фланг на ЧЭ ВОД-УП

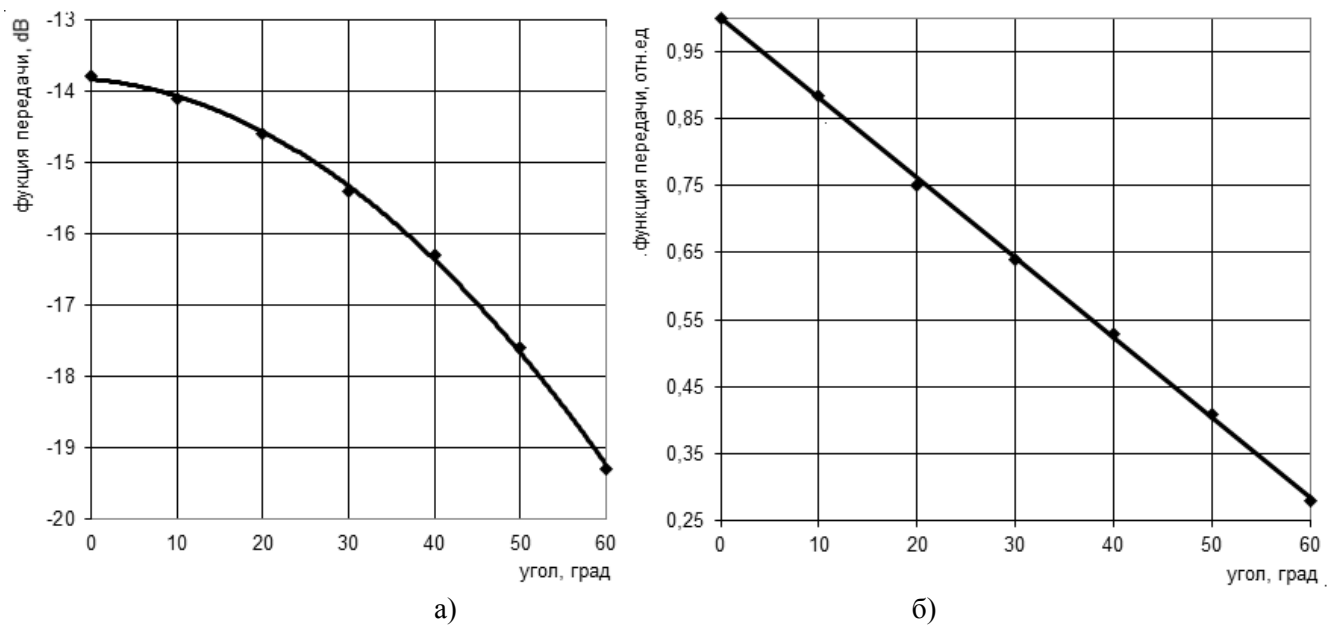


Рисунок 9 - Экспериментальная зависимость функции передачи ЧЭ ВОД-УП от угла поворота фланги

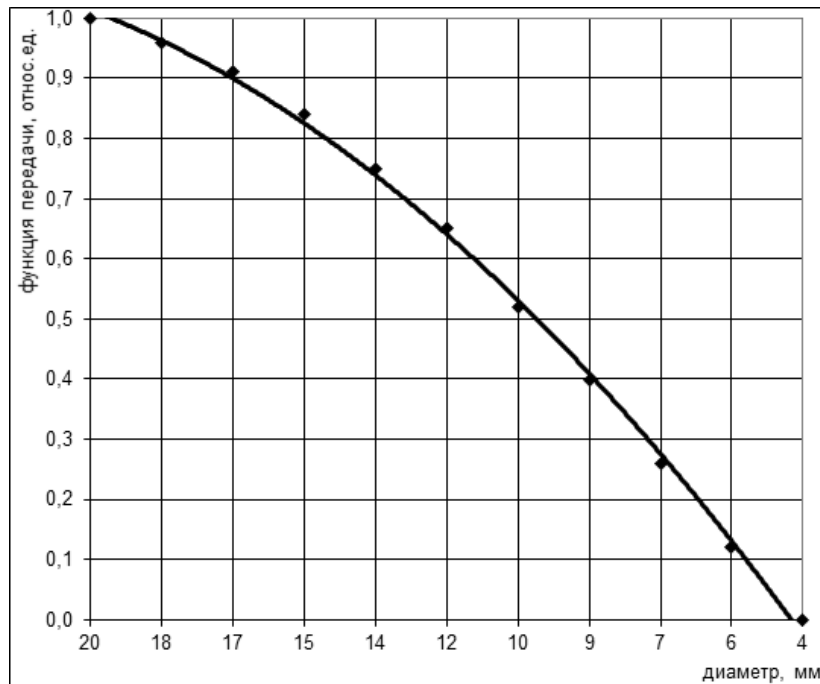


Рисунок 10 - Экспериментальная зависимость функции передачи ЧЭ ВОД-УП от начального диаметра изгиба оптического волокна

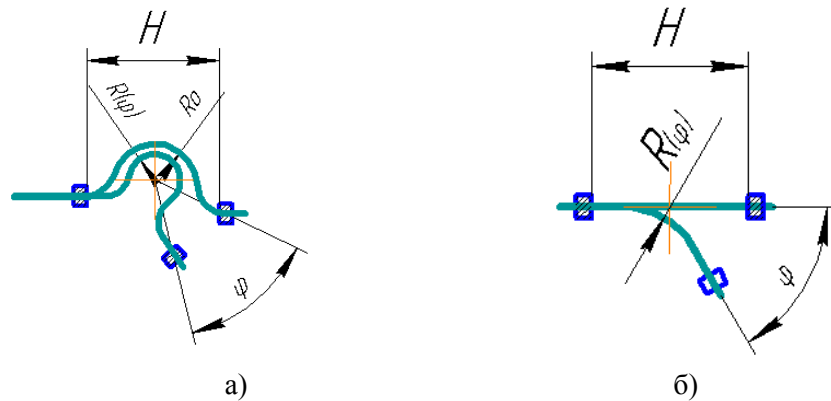


Рисунок 11 - Изменение радиуса изгиба оптического волокна от угла поворота фланги

Учитывая выше сказанное оптические сигналы $Y(\varphi_5), Y(\varphi_6), Y(\varphi_7)$ ЧЭ фаланг 1, 2, 3 можно записать в виде:

$$\begin{aligned} Y(\varphi_5) &= a_5 \varphi_5 (1 - b_7 \varphi_7) (1 - b_6 \varphi_6) \\ Y(\varphi_6) &= a_6 \varphi_6 (1 - b_7 \varphi_7) \\ Y(\varphi_7) &= a_7 \varphi_7 \end{aligned} \quad (3)$$

где: $\varphi_5, \varphi_6, \varphi_7$ — текущий угол поворота соответствующих фаланг 1, 2, 3; a_5, a_6, a_7 — чувствительность ЧЭ соответствующих фаланг к изгибу; b_6, b_7 — влияние на функцию преобразования (чувствительность) изгиба соседних фаланг.

При этом:

$$\begin{aligned} \varphi_5 &= \Delta\varphi_5 + \varphi_5^H \\ \varphi_6 &= \Delta\varphi_6 + \varphi_6^H \\ \varphi_7 &= \Delta\varphi_7 + \varphi_7^H \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varphi_5^H, \varphi_6^H, \varphi_7^H$ — углы начальной установки ЧЭ; $\Delta\varphi_5, \Delta\varphi_6, \Delta\varphi_7$ — величина отклонения соответствующего угла от начальной установки при изгибе фаланги.

В соответствии с выражениями (3-4) методика компенсации влияния поворота соседних фаланг на сигналы ЧЭ ВОД-УП может быть следующая:

- 1) измерить величину сигнала третьей фаланги $Y(\varphi_7)$;
- 2) из выражений (3-4) определить величину угла поворота фаланги 3:

$$\Delta\varphi_7 = \frac{Y(\varphi_7)}{a_7} - \varphi_7^H \quad (5)$$

- 3) измерить величину сигнала второй фаланги $Y(\varphi_6)$;
 4) из выражений (3-4) с учетом выражения (5) определить величину угла поворота фаланги 2, компенсируя тем самым влияние изгиба фаланги 2 на результат измерений:

$$\Delta\varphi_6 = \frac{Y(\varphi_6)}{a_6 \left[1 - b_7 \left(\frac{Y(\varphi_7)}{a_7} - \varphi_7^H \right) \right]} - \varphi_6^H \quad (6)$$

- 5) измерить величину оптического сигнала третьей фаланги $Y(\varphi_5)$;
 6) из выражений (3-4) определить величину угла поворота фаланги 1, компенсируя тем самым влияние изгиба фаланг 1, 2 на результаты измерений:

$$\varphi_5 = \frac{Y(\varphi_5)}{a_5 \left[1 - b_7 \left(\frac{Y(\varphi_7)}{a_7} - \varphi_7^H \right) \right] \left[1 - b_6 \left(\frac{Y(\varphi_6)}{a_6 \left[1 - b_7 \left(\frac{Y(\varphi_7)}{a_7} - \varphi_7^H \right) \right]} + \varphi_6^H \right) \right]} - \varphi_5^H \quad (7)$$

Поскольку зависимость изменения сигнала ЧЭ ВОД-ТУ в первом приближении также носит линейный характер (рисунок 12), то методика компенсации влияния поворота соседних фаланг на величину измеряемого тактильного усилия аналогична методике компенсации изменения величины измеряемого углового положения.

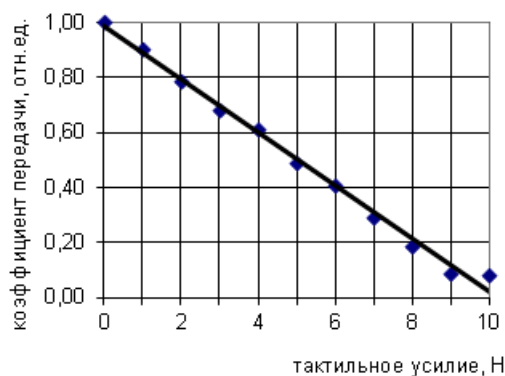
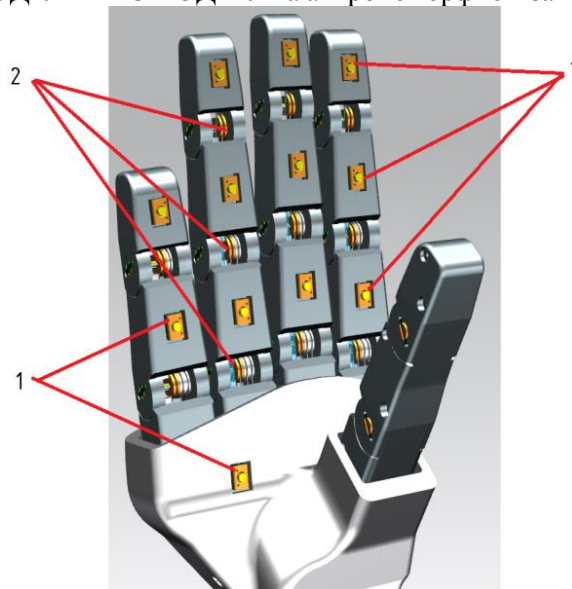


Рисунок 12 - Экспериментальная характеристика функции преобразования ЧЭ ВОД-ТУ

Схема компоновки ЧЭ ВОД-УП и ЧЭ ВОД-ТУ на антропоморфном захвате приведена на рисунке 13.



1 - ЧЭ ВОД-ТУ, 2 - ЧЭ ВОД-УП

Рисунок 13 - Схема компоновки ЧЭ ВОД-УП и ЧЭ ВОД-ТУ на антропоморфном захвате

Электронный трансивер

Структурные схемы электронных трансиверов ВОД-УП и ВОД-ТУ идентичны. Проводилось моделирование и экспериментальное исследование нескольких вариантов ЭТ.

На рисунке 14 изображена структурная схема одноканального варианта ЭТ с локальной цепью стабилизации излучения лазерного диода (ЛД).

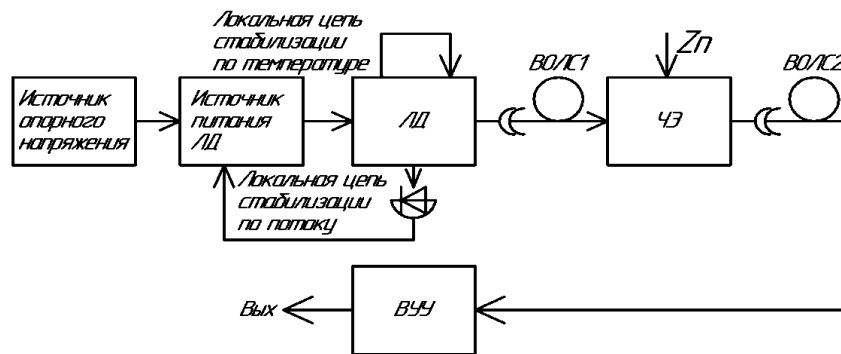


Рисунок 14 – Структурная схема одноканального ВОД с локальной цепью стабилизации излучения ЛД

Стабилизация оптического излучения ЛД в этом варианте осуществляется локальными цепями стабилизации, встроенными в корпус ЛД – цепью обратной связи по оптическому потоку и цепью обратной связи по температуре кристалла ЛД. Выходной сигнал ЧЭ детектируется фотоприемником и после усиления (блок вычислитель-управляющего устройства ВУУ) поступает на выход ЭТ. Такой вариант реализации ЭТ, несмотря на его простоту, обеспечивает высокую стабильность светового потока на выходе ЛД. Однако такой вариант не позволяет компенсировать изменения, в т.ч. температурные, происходящие в волоконно-оптической линии связи (ВОЛС 1, ВОЛС 2) и в ЧЭ ВОД.

Для уменьшения аддитивной и мультипликативной погрешностей выходной сигнал ЭТ формируется в ВУУ из сигнала Y_1 ЧЭ датчика, например ВОД-УП (для угла поворота фланги 1), согласно выражению:

$$Y_H(\varphi) = 4096 \left(\frac{Y_1(\varphi_5) - Y_{\min}(\varphi_5)}{Y_{\max}(\varphi_5) - Y_{\min}(\varphi_5)} \right), \quad (8)$$

где $Y_{\max}(\varphi_5)$, $Y_{\min}(\varphi_5)$ - максимальное и минимальное значения функции преобразования ЧЭ.

Поскольку температурный коэффициент мощности излучения ЛД, не охваченного локальной цепью стабилизации, составляет 2,5...4 %/°C, то при введении локальной цепи стабилизации по оптическому каналу, температурный коэффициент ЛД определяется температурным коэффициентом цепи обратной связи, т.е. фотодиодом, и составляет величину 0,2...0,3 %/°C. При поддержании температуры ЛД локальной цепью стабилизации ЛД – терморезистор - элемент Пельтье удастся стабилизировать температуру ЛД с погрешностью ± 1 °C. Тогда дополнительная температурная нестабильность излучения ЛД составит величину $\pm 0,2...0,3$ %.

Поскольку остальные элементы ВОД (ВОЛС-ЧЭ-ВОЛС-ВУУ) не охвачены обратной связью, то итоговая дополнительная температурная погрешность ВОД составит величину порядка 105% в диапазоне температур минус 80 ... +80 °C. Как видно дополнительные температурные погрешности датчиков на макроизгибах (недифференциальный вариант включения) достигают значительных величин. Поэтому с целью уменьшения величины дополнительной температурной погрешности исследовались дифференциальные схемы включения.

На рисунке 15 изображена структурная схема дифференциального варианта ЭТ с локальным каналом стабилизации излучения ЛД.

Здесь используются два «идентичных» канала измерения. Стабилизация оптического излучения ЛД в этом варианте осуществляется локальными цепями стабилизации, встроенными в корпус - цепью обратной связи по оптическому потоку и цепью обратной связи по температуре кристалла ЛД.

Выходной сигнал ЭТ формируется в ВУУ из сигналов Y_1 , Y_2 двух каналов датчика, например, ВОД-УП для угла поворота фланги 1, согласно выражению:

$$Y(\varphi_5) = 2048 \left(\frac{Y_1(\varphi_5) - Y_2(\varphi_5)}{Y_1(\varphi_5) + Y_2(\varphi_5)} + 1 \right) \quad (9)$$

При реализации ВУУ выражения (9) осуществляется компенсация как аддитивной погрешности измерений, так и мультипликативной. При этом для ввода/вывода излучения в/из ЧЭ необходима ВОЛС из четырех оптических волокон.

Этот вариант позволяет компенсировать изменения, в т.ч. температурные, происходящие в оптическом канале связи (ВОЛС 1, ВОЛС 2, ВОЛС 3, ВОЛС 4) и в ЧЭ1, ЧЭ2 только в случае идентичности этих каналов и условий их эксплуатации. Кроме того, как отмечалось в [8-9] использование выражений (8-9) эффективно только в случае, когда $Y_1 + Y_2 \approx \text{const}$. При больших

изменениях Y_1 , Y_2 условие не выполняется и эффективность стабилизации резко снижается. Кроме того, наблюдается резкое увеличение нелинейности функции преобразования. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают выше приведенные выводы.

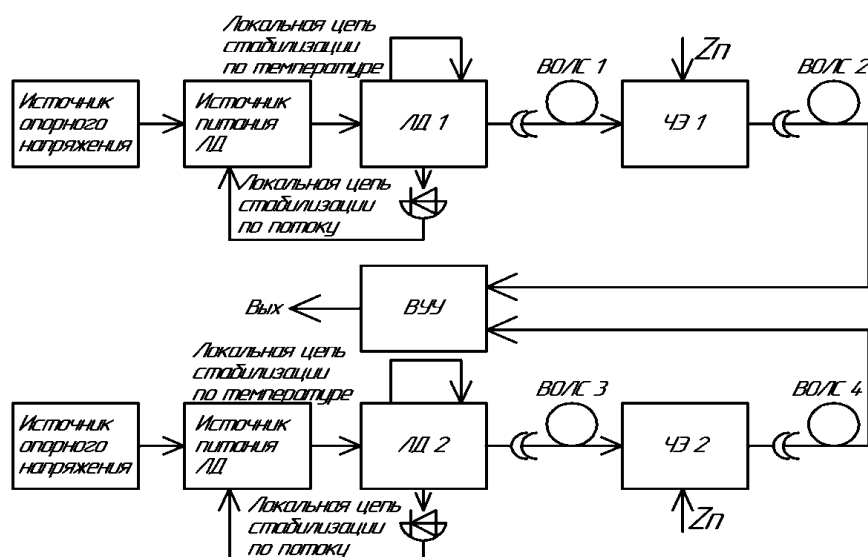


Рисунок 15 – Структурная схема дифференциального ВОД с локальными каналами Стабилизации

Так же как и в предыдущем варианте при введении локальной цепи стабилизации по оптическому каналу, температурный коэффициент ЛД определяется температурным коэффициентом цепи обратной связи, т.е. фотодиодом, и составляет величину $0,2 \dots 0,3 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Так же как и в предыдущем варианте при поддержании температуры ЛД локальной цепью стабилизации ЛД-терморезистор-элемент Пельтье удастся стабилизировать температуру ЛД с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Тогда дополнительная температурная нестабильность излучения ЛД составит величину $\pm 0,2 \dots 0,3 \text{ \%}$. Экспериментально получены следующие значения дополнительной температурной погрешности для 15 экземпляров ЧЭ датчиков (без температурной компенсации): экземпляры 1-3 – $13,7 \text{ \%}$; экземпляры 4-6 – $16,2 \text{ \%}$; экземпляры 6-9 – $10,7 \text{ \%}$; экземпляры 9-12 – $20,1 \text{ \%}$; экземпляры 12-15 – $10,3 \text{ \%}$.

Т.е. для рассматриваемой дифференциальной структуры итоговая дополнительная температурная погрешность ВОД составит величину порядка $20,1 \text{ \%}$ в диапазоне температур минус $80 \dots +80^\circ\text{C}$.

На рисунке 16 изображена структурная схема дифференциального ВОД с общим каналом стабилизации по цепи ВУУ, лишенная указанных недостатков. Оптический сигнал ЛД с помощью делителя оптического излучения делится на две части, которые через идентичные ВОЛС1-1, ВОЛС2-1 поступают каждый на свой ЧЭ: ЧЭ1, ЧЭ2, совмещенные в одной конструкции. Выходные оптические сигналы ЧЭ через идентичные ВОЛС1-2, ВОЛС2-2 поступают в ВВУ, которое вычисляет корректирующее воздействие и управляет работой ЛД. При этом для ввода/вывода излучения в/из ЧЭ необходима ВОЛС из четырех оптических волокон. Стабилизация параметров ЛД в этом варианте осуществляется с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) общей цепью стабилизации, охватывающей ЧЭ1, ЧЭ2, ВОЛС1-1, ВОЛС1-2, ВОЛС2-1, ВОЛС2-2, ЛД, делитель оптического излучения. Такой вариант достаточно эффективно обеспечивает высокую стабильность оптического излучения на выходе ЛД и коэффициентов передачи ЧЭ1, ЧЭ2, ВОЛС1-1, ВОЛС1-2, ВОЛС2-1, ВОЛС2-2, делителя оптического излучения, однако требует идентичности каналов деления оптического излучения.

Анализ структуры ЭТ (рисунок 16) позволил определить коэффициенты чувствительности основных элементов ВОД-ТУ (ЛД, фотодиода - ФД, операционного усилителя - ОУ, оптического делителя - ОД, ВОЛС, АЦП и ЦАП) к температуре, дополнительную температурную погрешность измерения тактильного усилия (таблица 1).

В таблице 2 приведены экспериментальные результаты дополнительной температурной погрешности измерения углового положения фланг дифференциальной конструкции ВОД-УП для нескольких угловых положений ЧЭ.

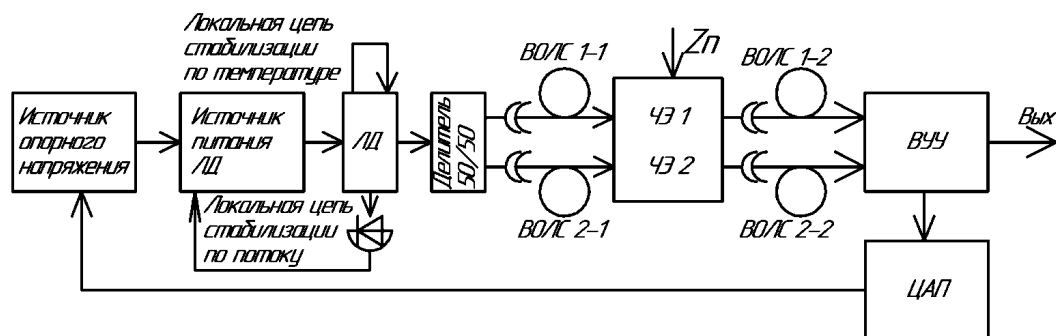


Рисунок 16 – Структурная схема дифференциального ВОД с локальными и общим каналами стабилизации

Таблица 1. Оценка составляющих основной и дополнительной приведенных погрешностей ВОД-ТУ

Элемент ВОД-ТУ	Коэффициент передачи	Составляющие основной погрешности	Составляющие дополнительной погрешности		
		Отклонение от номинала	Температурный коэффициент, %/°C	Диапазон изменения температур, °C	Отклонение от номинала
ЛД	5 мВт/мА	±2,5 мВт	-2,5	±1	-2,5 мВ
ФД	0,2 мА/мВт	$1 \cdot 10^{-4}$ мА	-0,2	±1	-0,2 мА
ОУ	200 отн. ед.	2	$1 \cdot 10^{-4}$	-40...+80	0,12 %
ОД	0,5 отн. ед.	0,025	0,01	-40...+80	-1,2 %
ВОЛС	0,85 отн. ед.	0,02	-	-80...+80	-
АЦП	248 бит/В	0,001 бит/В	-	-40...+80	0,01 %
ЦАП	0,00488В/бит	$4,9 \cdot 10^{-6}$ В/бит	-	-40...+80	0,005 %
Основная приведенная погрешность измерения тактильного усилия					0,86 %
Дополнительная приведенная погрешность измерения тактильного усилия					0,54 %

Таблица 2. Дополнительная температурная погрешность дифференциального ВОД-УП

Температура, °C	Дополнительная температурная погрешность, %		
	0 град	30 град	60 град
-80	0,233	0,139	0,085
+80	0,291	0,233	0,022

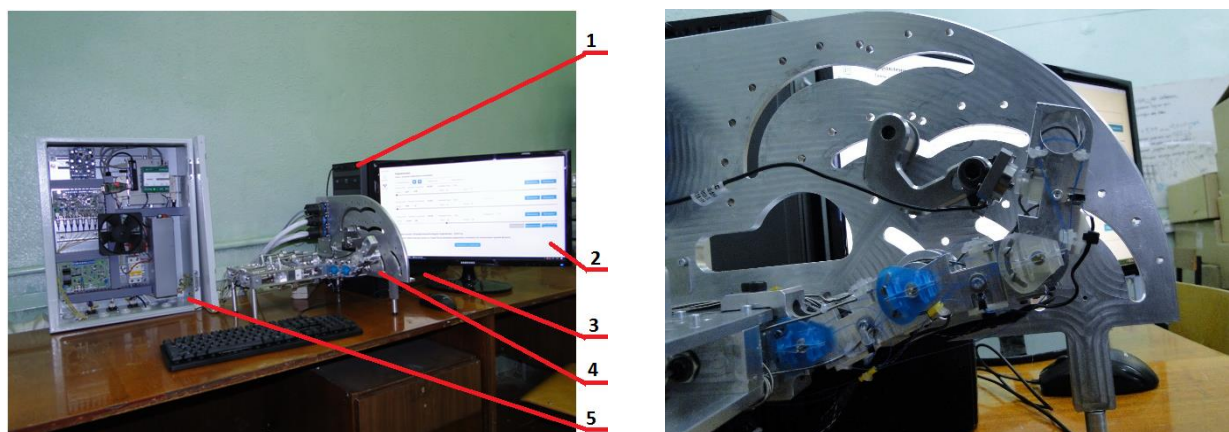
Исследовательский стенд для экспериментальных исследований

На рисунке 17 приведена фотография специализированного стенда для исследования функции преобразования ВОД-УП и ВОД-ТУ, а на рисунке 18 – фотография его электромеханического блока с установленным захватом и датчиками. Стенд (рисунок 17) состоит из персональной ЭВМ 1 и монитора 2, блока бесперебойного питания 3; электромеханического блока с исполнительной группой звеньев (ИГЗ) 4, блока контроля и управления 5. ИГЗ представляет собой антропоморфный палец, состоящий из трех фаланг, каждая из которых имеет свой независимый привод, расположенный в электромеханическом блоке. ЭВМ содержит управляющую программу, в которой задаются настройки перемещения ИГЗ: угол наклона каждой фаланги в пределах 0...60 градусов, величина тактильного усилия, развиваемого каждой фалангой. Программа ЭВМ формирует протокол испытаний, в котором в табличном виде представлена экспериментальная зависимость выходных сигналов ВОД-УП и ВОД-ТУ от последовательно задаваемых угловых перемещений и тактильных нагрузок. Монитор отображает настройки программы и полученные экспериментальные данные. Блок контроля и управления формирует управляющие электрические сигналы для электромеханического блока в соответствии с заданными настройками и принимает сигналы от контрольных (прецизионных) датчиков, отслеживающих положение каждой фаланги и развиваемое тактильное усилие.

Основные технические характеристики исследовательского стенда приведены в таблице 3. ИС снабжен контрольными датчиками углового положения, тактильного усилия и температуры.

Внешний вид антропоморфного робота АР-600 производства ПАО «Андроидная техника» с модифицированным вариантом захвата, в который установлены чувствительные элементы волоконно-

оптических датчиков положения фаланг захватов (15 штук) и чувствительные элементы волоконно-оптических датчиков тактильного усилия фаланг захватов (16 штук) приведен на рисунке 19.



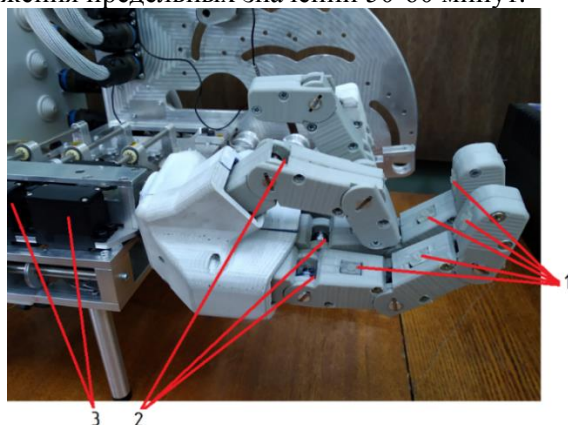
а)

б)

а) 1 – ЭВМ; 2- монитор; 3 – блок бесперебойного питания; 4 - блок электромеханический с исполнительной группой захвата; 5 – блок контроля и управления. б) исполнительная группа захвата в увеличенном масштабе

Рисунок 17 – Фотография исследовательского стенда

Для проведения исследований влияния температуры на позиционные и тактильные характеристики ВОД использовалась камера тепла-холода КТХВ-64-М со следующими характеристиками: диапазон поддержания температур от минус 80 до +80°C, равномерность распределения температуры по объему камеры $\pm 0,2$ °C, время достижения предельных значений 50-60 минут.



1 – датчики тактильного усилия (16 штук); 2 – датчики углового положения (15 штук); 3 – электропривод захвата

Рисунок 18 – Фотография электромеханического блока с установленным захватом

Таблица 3. Основные технические характеристики исследовательского стенда

Параметр	Величина
Количество пальцев захвата, шт	1
Количество фаланг пальца захвата, шт	3
Диапазон угловых положений фаланг пальцев, град	0-60
Способ задания угловых положений фаланг	независимое
Основная погрешность позиционирования по углу, %	0,025
Диапазон задания тактильных усилий, Н	10
Основная погрешность задания тактильного усилия, %	0,2
Размеры пятна контакта, на которое задается тактильное усилие, мм	3x3
Диапазон измеряемых температур фаланг пальца, °C	-80...+80
Основная погрешность измерения температуры, °C	0,2
Температура эксплуатации блока электроники ИС, °C	лабораторная
Температура эксплуатации блока электромеханического, °C	-40...+80



Рисунок 19 – Фотография антропоморфного робота AP-600 с датчиками ВОД-УП и ВОД-ТУ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор: Прикладные исследования и экспериментальные работы RFMEF157816X0209.

1. Koyama, Yu. Multi-channel measurement for hetero-core optical fiber sensor by using CMOS camera [Текст] / Yuya Koyama, Michiko Nishiyama, Kazuhiro Watanabe // Proc. of SPIE, Fifth Asia-Pacific Optical Sensors Conference, 2015. – Vol. 9655. – № 965525-4.
2. Silva, A.S. Design and characterization of a wearable macrobending fiber optic sensor for human joint angle determination [Текст] / Ana S. Silva, André Catarino, Miguel V. Correia, Orlando Frazão // SPIE, Optical Engineering, 2013. – 52(12), № 126106.
3. Martellucci, S. Optical Sensors and Microsystems [Текст] / S. Martellucci, A.N. Chester, A.G. Mignan // Boston: Kluwer academic publishers, 2002. -318 pp.
4. Гармаш, В.Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении [Текст] / В.Б. Гармаш, Ф.А. Егоров, Л.Н. Коломиец, А.П. Неугольников, В.И. Поспелов // Спецвыпуск «Фотон-Экспресс», 2005. – №6. – С. 128 – 140.
5. Хлыбов, А.В. Волоконно-оптические поляризметрические датчики физических величин. [Текст]: диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н.: 01.04.03 / А.В. Хлыбов. – СПб., Петербург, 2004. – 215 с.
6. Сосредоточенные и распределенные (тактильные) датчики на основе явления механолюминесценции для приборов регистрации и измерения импульсных давлений [Текст]: отчет о НИОКР, Государственный контракт № 3 от 11 ноября 2009 / К.В. Татмышевский, Н.Ю. Макарова, Д.Д. Павлов. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Владимирский государственный университет", 07.10.2011. – Инв. № 01200965317.
7. Matyunin, S.A., Babaev, O.G. Fiber-optic Sensor of Tactile Force for Anthropomorphic Robot Grips. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 302(1),012040
8. Babaev, O.G., Matyunin, S.A., Pararin, V.D. Linearization of Positional Response Curve of a Fiber-optic Displacement Sensor. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 302(1),012051
9. Matyunin, S.A., Stepanov, M.V., Babaev, O.G. Simulation of the Characteristics of a Magneto-Optical Displacement Transducer. Measurement Techniques 59(8), с. 832-837 DOI: 10.1007/s11018-016-1053-7
10. Matyunin, S.A. Research on Characteristics of Fiber Optic Sensors for Anthropomorphous Robots. Procedia Engineering 176, с. 128-136 DOI:10.1016/j.proeng.2017.02.280