

Раздел IV. Приводная техника и медицинская робототехника

УДК 681.2.084, 681.518.3

С.А. Матюнин

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ФАЛАНГ ПАЛЬЦЕВ РУКИ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА

Волоконно-оптическая система основана на использовании изгибных волоконно-оптических датчиков угловых перемещений. Рассматриваются теоретические положения используемых эффектов, экспериментальные характеристики чувствительных элементов, а также принцип компенсации взаимного влияния соседних каналов измерения. Выявлена связь между периодом поляризационных биений в оптическом волокне и величиной его деформации. Приводится алгоритм линеаризации позиционной характеристики чувствительного элемента. Использование алгоритмов компенсации взаимного влияния и линеаризации позиционной характеристики чувствительного элемента позволило снизить нелинейность позиционной характеристики до 1 % и уменьшить взаимное влияние каналов измерений до минус 20 дБ, что подтверждается экспериментальными исследованиями опытных образцов. Проведена оценка быстродействия системы с учетом вычислительных возможностей электронного трансивера. Результаты экспериментальных исследований показали, что даже без применения специальных методов температурной коррекции, используемые чувствительные элементы обладают достаточно высокой стабильностью. Их приведенный температурный коэффициент не превышает 0,08 %/°C. Приводятся технические характеристики опытных образцов чувствительных элементов и электронного трансивера волоконно-оптической системы.

Волоконно-оптическая система измерения угловых перемещений фаланг пальцев антропоморфного робота; компенсация взаимного влияния чувствительных элементов разных каналов измерений; алгоритм линеаризации позиционной характеристики; температурная стабильность; связь между периодом поляризационных биений в оптическом волокне и величиной его деформации; быстродействие; структура электронного трансивера.

S.A. Matyunin

FIBER-OPTIC MEASUREMENT SYSTEM FOR ANGULAR MOVEMENTS OF PHALANGES OF ANTHROPOMORPHIC ROBOT HANDS

Fiber-optic system based on bending fiber-optic sensors of angular displacements. Consider the theoretical principles of used effects, experimental characteristics of the sensing element, and the principle of the mutual influence compensation for closely-spaced measurement channels. Correlation between the period of polarization beating in optical fiber and its deformation magnitude are observed. The algorithm of the positional characteristics linearization for the sensing element, the technical characteristics of experimental samples are given. Algorithms usage of the mutual influence compensation and positional characteristic linearization for sensitive element reduced the non-linearity of positional characteristics down to 1 % and reduce the mutual influence of measurement channels down to minus 20 dB, this is confirmed by experimental studies of the prototype systems. The evaluation of the system performance taking into account the computational capabilities of the electronic transceiver are carried out. The experimental results showed that the sensing elements even without the special temperature correction methods have a high

stability. Their reduced temperature coefficient does not exceed 0,08 %/°C. The technical features of sensing element and electronic transceiver prototypes of fiber-optic system are given.

Fiber-optic measurement system for angular movements of phalanges of anthropomorphic robot hands; the mutual influence compensation for sensing elements of different measurement channels; the algorithm of the positional characteristics linearization; temperature stability; positional characteristics hysteresis; the relationship between the period of polarization beating in optical fiber and its deformation magnitude; the structure of an electronic transceiver.

Общая характеристика и основные проблемы создания датчиков антропоморфных роботов. В современных роботизированных платформах наземного, воздушного и космического базирования, в т.ч. и в антропоморфных роботах, применяются, в основном, измерительные «электрические» преобразователи (датчики) с выходным электрическим сигналом в цифровой и аналоговой форме [1–3].

Такие датчики обладают высокими метрологическими характеристиками, позволяют достаточно простыми средствами объединять их на общую линию связи с центральным процессором.

С другой стороны особенностью «электрических» датчиков являются их сравнительно большие габариты и высокая чувствительность к внешним электромагнитным полям, а так же, зачастую, создание ими собственного электромагнитного поля, увеличивающего электромагнитную заметность робототехнических комплексов, что особенно актуально для автономных беспилотных летательных аппаратов и антропоморфных роботов специального назначения. Высокая чувствительность к внешним электромагнитным полям, создание датчиками собственного электромагнитного поля накладывает ограничения на их использование для нужд МО и МЧС. А незащищенность датчиков и линий связи с центральным процессором от ионизирующего излучения создает определенные проблемы при их использовании, например в роботах для ремонта космических станций и спутников в условиях околоземного пространства. Особенно это ярко проявляется при разработке датчиков манипуляторов и искусственной кожи антропоморфных роботов.

В тоже время, реализация датчиков пространственного положения манипуляторов, захватов и тактильных датчиков антропоморфных роботов на принципах построения волоконно-оптических измерительных систем [4–13], позволяет в 3–5 раз сократить габариты чувствительных элементов датчиков, вынести электронные трансиверы датчиков в удаленный специально защищенный корпус, в котором так же может быть размещен и центральный процессор робота, соединив их по оптическому волокну, не чувствительному к электромагнитному импульсу и ионизирующему излучению. Габаритные размеры, при этом, как самого чувствительного элемента датчика, так и волоконно-оптической линии связи, определяются, в основном, габаритами оптического волокна (диаметр 0,3–0,9 мм).

Создание перспективных образцов подвижных роботизированных платформ также требует решения целого комплекса научно-технических проблем, в том числе разработки высокопроизводительных, энергоэффективных, малогабаритных, устойчивых к дестабилизирующим факторам и надежных сенсорных сетей при решении задач многопараметрического контроля, измерения и управления. Эти проблемы так же достаточно эффективно решаются при использовании волоконно-оптических распределенных сетей [6–7].

Особый интерес представляют волоконно-оптические датчики (ВОД) с открытым оптическим каналом, как принципиально "безэлектрические" и не подверженные загрязнению оптического канала. По многочисленным оценкам в ближайшие 10–15 лет такие ВОД на 80...90 % покроют потребности атомной энергетики, опасных химических и нефтегазо-перерабатывающих производств, а также будут активно внедряться в аэрокосмической отрасли, в вооружении и специальной военной технике [6, 11–16].

Преимущества волоконно-оптических информационно-измерительных систем на базе ВОД с закрытым оптическим каналом:

- ◆ пожаровзрывобезопасность;
- ◆ защищенность от внешнего загрязнения оптической части чувствительного элемента (ЧЭ);
- ◆ защищенность от воздействия электромагнитных полей, электроизоляционная прочность;
- ◆ широкий динамический диапазон измерений, высокая чувствительность;
- ◆ значительное расстояние до места проведения измерений;
- ◆ высокая коррозионная стойкость;
- ◆ высокая радиационная стойкость;
- ◆ возможность мультиплексирования ЧЭ на одну волоконно-оптическую линию связи;
- ◆ малые габариты и вес;
- ◆ надежность.

Для автономных роботов, а также управляемых оператором манипуляторов и экзоскелетов важнейшей проблемой является получение достоверной информации о состоянии (положении) силовых исполнительных органов и о силомоментных ощущениях, передаваемых оператору. Подобные системы измерения могут быть так же реализованы на волоконно-оптических датчиках положения (перемещения) [6, 12–13].

К настоящему времени разработано множество волоконно-оптических датчиков перемещений, основанных на преобразовании в амплитудную и фазовую модуляцию излучения, в сдвиг спектральной характеристики оптического излучения и др. [4–19].

Первым типом датчиков являются мембранные, изменяющие расстояние между излучающим торцом волокна и отражающей поверхностью. Деформация мембраны изменяет либо интенсивность либо спектр отраженного в волокно излучения. Достоинством датчиков является условно закрытый оптический канал, позволяющий использовать их в пожаро- и взрывоопасных средах. К недостаткам следует отнести высокую сложность установки рабочей точки. Такие датчики разрабатываются в Brno University of Technology (Чехия), FISO (Канада), Applied Research Associates, Inc. (США) и др.

К датчикам второго типа можно отнести датчики на основе волоконных решеток Брэгга. Перемещение подвижного элемента передается на решетку Брэгга в виде сжимающей/растягивающей нагрузки, что приводит к смещению спектрального пика отражения до десятых долей нанометра. Достоинством таких датчиков является закрытый оптический канал и возможность применения во взрывоопасных средах. К недостаткам следует отнести необходимость серьезной термокомпенсации, значительную нелинейность нагрузочной характеристики, вплоть до появления горизонтальных участков нечувствительности, существенную стоимость вторичного преобразователя (спектрометра). В настоящее время наблюдается активное развитие этого класса датчиков. Подобные датчики разрабатываются Ibsen Photonics (Дания), FISO (Канада) и др.

Датчики третьего типа (амплитудные) с открытым оптическим каналом содержат, например, кодирующие линейные и круговые маски, преобразующие перемещения в двоичный код, в т.ч. код Грея. Особое значение имеют датчики с кодирующей маской в виде дифракционной решетки, перемещение которой вызыва-

ет изменение спектра принимаемого излучения. Достоинством датчиков является высокая точность, обусловленная субмикронным размером элементов кодирующей шкалы. К недостаткам относятся необходимость использования прецизионных механических элементов, сложность герметизации и сохранения надежности датчика в агрессивных и взрывоопасных средах. Это не позволяет использовать их в полной мере на всем спектре технологических объектов, хотя в настоящее время наблюдается активное развитие этого класса датчиков, особенно для датчиков с закрытым оптическим каналом. Основными производителями являются SICK AG (Германия), Siemens (Германия).

К четвертому типу относятся датчики на основе функциональных материалов, например, магнито- и электрооптических. Здесь подвижный элемент выполнен в виде магнитного или токонесущего стрежня, приближаемого к чувствительному элементу. Такая конструкция содержит закрытый оптический канал и позволяет создавать унифицированные, конструктивно схожие датчики перемещений, электрически и магнитных полей, веса и давления. Развитие этого класса датчиков на данный момент сдерживается невысокой чувствительностью функциональных материалов.

В тоже время, несмотря на всю перспективность использования ВОД, не наблюдается их повсеместного распространения. Это связано как с высокой стоимостью оборудования (например, стоимость многоканального волоконно-оптического спектрометра порядка 500...950 тыс. руб., стоимость ВОД разного типа колеблется от 5 до 80 тыс. руб. – в ценах 2014 года), отсутствием унификации, так и небольшим ассортиментом выпускаемых ВОД.

Таким образом, актуальность работ по созданию новых ВОД определяется их основными преимуществами перед «электрическими» датчиками и незавершенностью исследований в области создания специализированных ВОД различных физических величин под конкретные задачи управления роботизированными подвижными платформами.

Цель исследований. Разработка и исследование волоконно-оптической системы измерения угловых перемещений (ВОСУП) фаланг пальцев руки антропоморфного робота на основе ВОД с закрытым оптическим каналом.

Принцип действия ВОСУП. Разработанная в СГАУ волоконно-оптическая система измерения угловых перемещений фаланг пальцев руки антропоморфного робота основана на использовании модуляции изгибных потерь в оптическом волкне при его деформации.

ВОСУП (рис. 1) состоит из удаленного электронного трансивера (ЭТ), волоконно-оптических чувствительных элементов (ЧЭ₁-ЧЭ₃) и волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), соединяющей ЧЭ₁-ЧЭ₃ с ЭТ.

В состав ЭТ входят: лазерный диод (ЛД), подключенный к источнику питания с цепью стабилизации оптического излучения ЛД, оптический разветвитель (ОР) с количеством выходных каналов по числу фаланг пальцев робота и распределяющий оптическое излучение ЛД по ЧЭ₁-ЧЭ₃, обратные оптические разветвители (ООР₁-ООР₃), например выполненные в виде циркуляторов, отделяющие сигналы ЧЭ₁-ЧЭ₃ от сигналов ЛД.

ЧЭ₁-ЧЭ₃ располагаются в шарнирах фаланг пальцев робота. Оптические сигналы ЧЭ₁-ЧЭ₃ через соответствующие ООР₁-ООР₃ поступают на фотоприемные устройства (ФД₁-ФД₃), которые затем оцифровываются и преобразуются в микропроцессорном вычислительном устройстве (МПВУ).

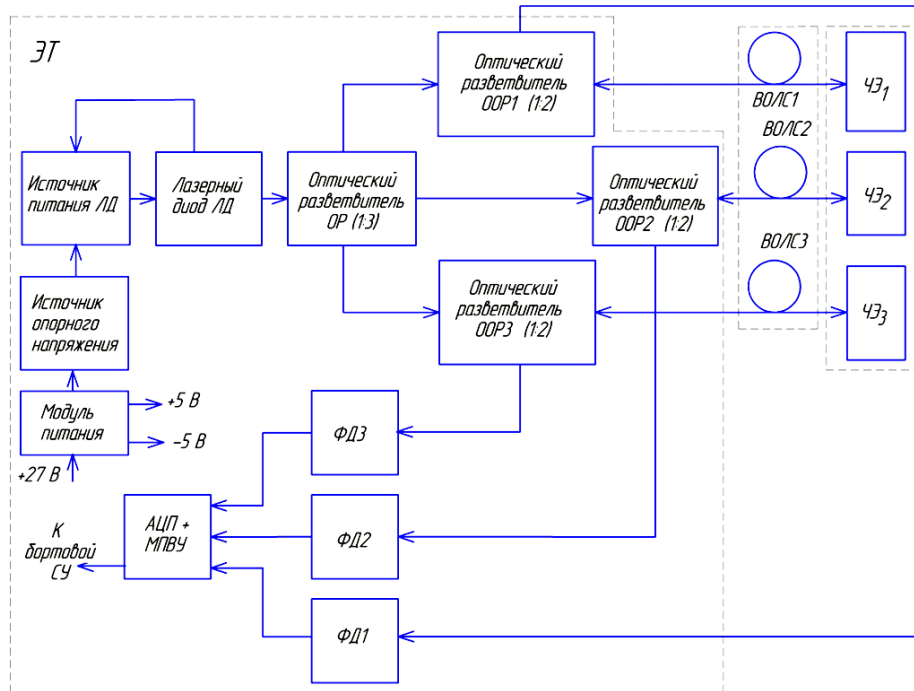


Рис. 1. Структурная схема ВОСУП

Схема прокладки чувствительного оптоволокна в одном из пальцев робота приведена на рис. 2.

Собственно чувствительные элементы ЧЭ₁-ЧЭ₃ представляют собой отрезки оптического волокна с многослойным, в т.ч. металлизированным, покрытием в полимерной оболочке диаметром 0,3–0,9 мм.

При изгибе фаланг пальцев робота происходит деформация (изгиб) соответствующих отрезков чувствительного оптического волокна и, как следствие, часть оптического излучения выводится в оболочку оптического волокна и поглощается ее, изменяя тем самым пропускание оптического излучения.

Расчет чувствительности датчика сводится к расчету потерь излучения, вызванных изгибом оптического волокна.

Однако, при этом, необходимо разделять как «информационно-полезную» модуляцию оптического излучения, так и «информационно-мешающую» модуляцию. Например, на сигнал ЧЭ₁ (рис. 2) не оказывает влияние деформация оптического волокна фаланг 2-3 (но на сигнал ЧЭ₁ оказывает влияние деформация его оптического волокна в сочленении кисть-фаланга 1. На рис. 2 не показано). На сигнал ЧЭ₂ оказывает влияние деформация его оптического волокна в сочленении фаланга 1 – кисть. На сигнал ЧЭ₃ оказывает влияние деформация его оптического волокна в сочленениях фаланга 1 – кисть, фаланга 1 – фаланга 2. На все ЧЭ₁-ЧЭ₃ оказывает влияние изгиб оптического волокна в кисти.

Деформация волокна характеризуется радиусами локальных изгибов волокна в пределах его прокладки по кисти робота. Поскольку свет распространяется вдоль волокна в виде его собственных мод, то затухание каждой из этих мод существенно зависит от радиуса изгиба волокна [14–15, 19–20].

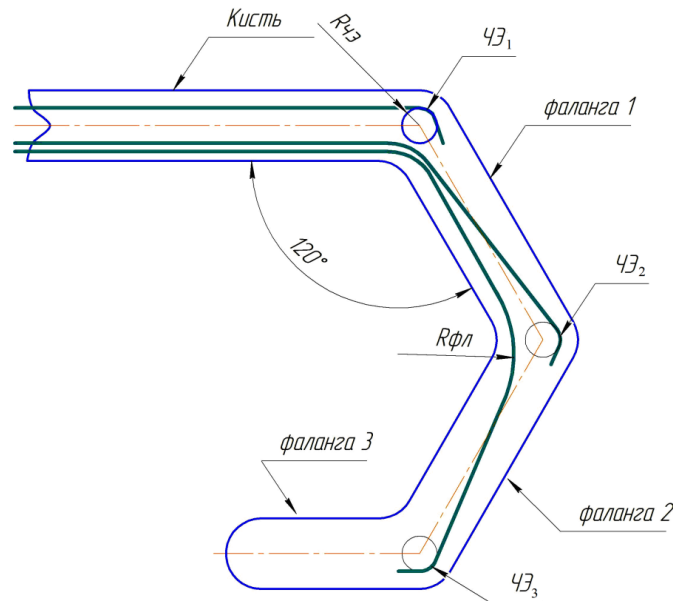


Рис. 2. Схема прокладки чувствительного оптоволокну

В рассматриваемом датчике форма кривой изгиба оптоволокну в ЧЭ₁-ЧЭ₃ определяется способом его крепления на фалангах пальцев робота (рис. 3).

Вариант 1. Неподвижная фиксация оптоволокну на оси (шкиву) фаланги пальца (точка *b* рис. 3) при подвижной фиксации в точках *a*, *c* фаланг пальцев;

Вариант 2. Неподвижная фиксация оптоволокну в точках *a*, *c* фаланг пальцев при подвижной фиксации в точке *b*.

Первый вариант крепления приводит к тому, что при повороте фаланг пальца оптоволокну проскальзывает в точках крепления *a*, *c* в следствии удлинение/укорачивания оптоволокну. Кроме того, при повороте фаланги пальца на угол ϕ в районе точки *b* наблюдается двойной «излом оптоволокну». Очевидно, что во избежание излома оптоволокну его излишек/недостаток справа и слева от точки *b* должен быть компенсирован дополнительной петлей оптоволокну на фалангах пальцев.

Второй вариант крепления более предпочтителен, поскольку нет движения оптоволокну по фалангам пальцев, излишек/недостаток оптоволокну компенсируется изменением радиуса петли оптоволокну R_p .

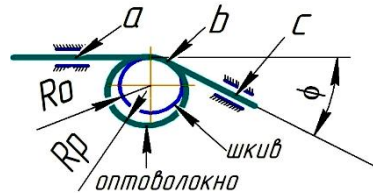


Рис. 3. Схема крепления чувствительного оптоволокну

На рис. 3 приняты следующие условные обозначения:

R_0 – диаметр шкива формирования кривой изгиба оптоволокну;

$\phi \in [0, \phi_{\max}]$ – текущий и максимальный углы поворота фаланги пальца;

R_{p0}, R_p – начальный (при $\phi=0$) и текущий радиусы кривой петли оптоволоконка.

Текущий радиус кривой петли оптоволоконка определяется выражением:

$$R_p = R_{p0} - R_0 \frac{\phi}{2\pi}.$$

Форма кривой изгиба оптоволоконка, проходящего мимо ЧЭ₁-ЧЭ₃, близка к круговой и может быть задана одним радиусом $R_{\phiЛ}$, определяемым точками крепления оптоволоконка к флангам пальцев (рис. 4):

$$R_{\phiЛ} = \frac{d}{\sin(\phi/2)},$$

где d – расстояние от точки фиксации оптоволоконка на фланги пальца до оси ее вращения.

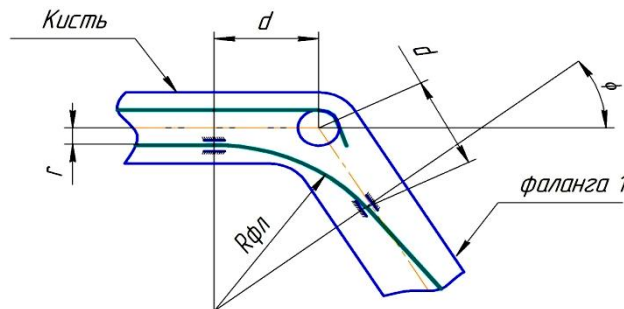


Рис. 4. Кривая изгиба оптоволоконка, проходящего мимо ЧЭ₁-ЧЭ₃

Пренебрегая взаимной трансформацией мод в местах сочленения радиальных и прямолинейных участков оптоволоконка, используя соотношения ортогональности мод и предполагая, что моды оболочки волокна эффективно фильтруются поглощающим полимерным покрытием, определим по методике, изложенной в [19–20] потери мощности оптического излучения (рис. 5, кривая 1)

Согласно [19–20] наблюдается хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Однако, как показывают результаты более тщательного исследования реальное расхождение результатов существенное. Это можно объяснить как малым количеством экспериментальных точек, по которым в [19–20] осуществлялось сравнение теоретических и практических результатов (экспериментальные точки просто «промахивались» мимо участков с резким изменением характера кривой потерь), так и с учетом поляризационных биений, происходящих вследствие поляризации излучения в волокне при его изгибе и интерференции.

На рис. 5 кривая 2 (приведена выборка из 20-ти точек) изображает характер кривой потерь (экспериментальные значения). Хорошо видно, что на участке ϕ_1 - ϕ_2 наблюдается не только резкое отклонение экспериментальной кривой от теоретической, но и возникает неоднозначность в измерении по величине потерь сигнала ЧЭ.

В тоже время, выбрав для работы датчика участки, где нет неоднозначности измерений, можно с достаточной точностью аппроксимировать зависимость потерь сигнала ЧЭ линейной зависимостью (рис. 6).

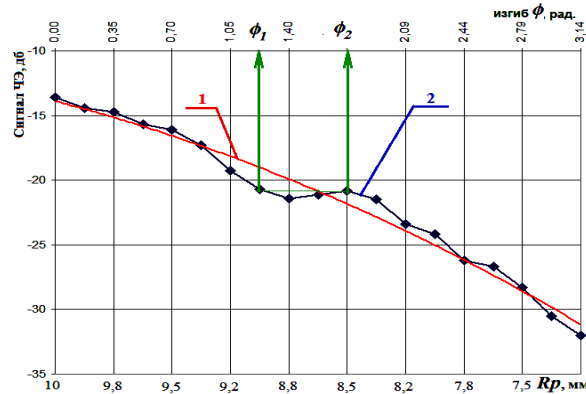


Рис. 5. Зависимость оптических потерь при изгибе чувствительного оптического волокна: кривая 1 – теоретические потери без учета поляризационных биений; 2 – экспериментальные результаты потерь

Учитывая выше изложенное, запишем выражения для сигналов Y_1, Y_2, Y_3 чувствительных элементов ЧЭ₁, ЧЭ₂, ЧЭ₃.

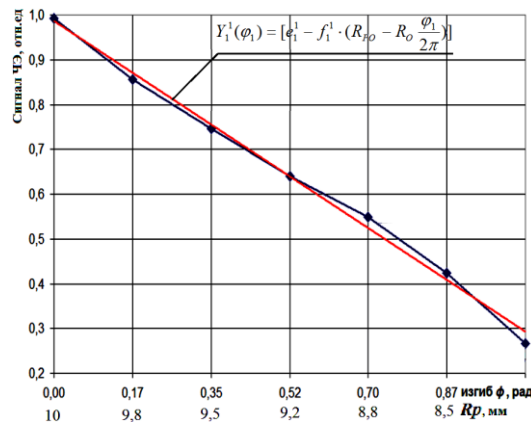


Рис. 6. Зависимость оптических потерь при изгибе оптического волокна в относительных единицах с линейной аппроксимацией

Для участка установки ЧЭ₁ (частичные потери в оптоволокне):

$$Y_1^1(\varphi_1) = [e_1^1 - f_1^1 \cdot (R_{\rho o} - R_o \frac{\varphi_1}{2\pi})]$$

$$Y_2^1(\varphi_1) = [e_2^1 - f_2^1 \cdot \frac{d}{\sin(\varphi_1 / 2)}]$$

$$Y_3^1(\varphi_1) = [e_2^1 - f_2^1 \cdot \frac{d}{\sin(\varphi_1 / 2)}]$$

где e_i^j, f_i^j – коэффициенты линейной аппроксимации для участка оптоволокна фаланги i чувствительного элемента j ; φ_i – угол поворота фаланги i .

Для участка установки ЧЭ₂ (частичные потери в оптоволокне):

$$Y_2^2(\varphi_2) = [e_2^2 - f_2^2 \cdot (R_{PO} - R_O \frac{\varphi_2}{2\pi})]$$

$$Y_3^2(\varphi_2) = [e_3^2 - f_3^2 \cdot \frac{d}{\sin(\varphi_2/2)}]$$

Для участка установки ЧЭ₃ (частичные потери в оптоволокне):

$$Y_3^3(\varphi_3) = [e_3^3 - f_3^3 \cdot (R_{PO} - R_O \frac{\varphi_3}{2\pi})]$$

Тогда полные сигналы ЧЭ₁-ЧЭ₃ будут равны:

$$Y_1(\varphi_1) = [e_1^1 - f_1^1 \cdot (R_{PO} - R_O \frac{\varphi_1}{2\pi})]$$

$$Y_2(\varphi_1, \varphi_2) = Y_2^1 \cdot Y_2^2 = [e_2^1 - f_2^1 \cdot \frac{d}{\sin(\varphi_1/2)}] \cdot [e_2^2 - f_2^2 \cdot (R_{PO} - R_O \frac{\varphi_2}{2\pi})]$$

$$Y_3(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = Y_3^1 \cdot Y_3^2 \cdot Y_3^3 = [e_3^1 - f_3^1 \cdot \frac{d}{\sin(\varphi_1/2)}] \cdot [e_3^2 - f_3^2 \cdot \frac{d}{\sin(\varphi_2/2)}] \cdot [e_3^3 - f_3^3 \cdot (R_{PO} - R_O \frac{\varphi_3}{2\pi})]$$

Выражая в явном виде величины углов ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 из соответствующих зависимостей $Y_1(\phi_1), Y_2(\phi_1, \phi_2), Y_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3)$, можно получить зависимости $Y_1(\phi_1), Y_2(\phi_2), Y_3(\phi_3)$ в явном виде.

Алгоритм линейаризации позиционной характеристики ЧЭ. Как видно из рис. 5-6 позиционная характеристика (ПХ) ЧЭ нелинейная. Для линейаризации ПХ были разработаны алгоритм и программа, позволяющие устранить этот недостаток. Суть алгоритма заключается в следующем.

Каждый ЧЭ после монтажа на пальцы робота калибруется в пространстве нескольких переменных (множество параметров X). Результаты калибровки $F(X)$ записываются в память микропроцессора.

ЧЭ₁ калибруется в пространстве двух переменных: угол поворота фаланги 1 и температура окружающей среды.

ЧЭ₂ калибруется в пространстве трех переменных: угол поворота фаланги 1, фаланги 2 и температура окружающей среды.

ЧЭ₃ калибруется в пространстве четырех переменных: угол поворота фаланги 1, фаланги 2, фаланги 3 и температура окружающей среды.

При этом калибровка осуществляется для сравнительно небольшого количества точек (16-32 точки по каждой переменной).

В рабочем режиме измеряется сигналы ЧЭ₁-ЧЭ₃ и датчика температуры. В процедуре линейаризации программа микропроцессора определяется отрезки $Y_i(X)$ калибровочной характеристики $F(X)$ соответствующего ЧЭ, которому принадлежит измеренное значение $Y(X)$.

Через узловые точки отрезков калибровочной характеристики проводится линейная поверхность (плоскость в многомерном пространстве) и методом линейной интерполяции определяется величина отклонения измеренного значения $Y(X)$ от нижних границ отрезков $Y_i(X), Y_{i+1}(X)$:

$$\Delta Y = Y(X) - Y_i(X).$$

Затем по приведенным выше выражениям вычисляются в явном виде величины углов изгиба фаланг пальцев ϕ_i .

Далее программа вычисляет функцию, обратную калибровочной $F(\phi_i)$. В результате получаем:

$$F^{-1}[F(\phi_i)] = \phi_i$$

После чего осуществляется масштабирование результата измерений в диапазоне значений аргумента ϕ_i :

$$\phi_i \in [0, \phi_{max}]$$

на диапазон изменений выходного результата (десять двоичных разрядов):

$$\text{Код}\phi_i = 1024 \cdot \frac{\phi_i}{\phi_{max}}$$

На рис. 7 приведена ПХ ЧЭ до и после линеаризации (экспериментальные результаты).

Несомненным достоинством алгоритма линеаризации является то, что масштабирование и линеаризация может быть осуществлена в любом диапазоне измеряемых перемещений $\phi_i \in [0, \phi_{max}]$. Это позволяет калибровать ВОСУП простым способом непосредственно на объекте контроля.

Экспериментальные исследования. Технические характеристики. Экспериментальные характеристики собственно ЧЭ без их размещения на фалангах кисти приведены на рис. 5–7.

Проводились экспериментальные исследования передаточных характеристик ЧЭ₁, ЧЭ₂, ЧЭ₃, закрепленных на макете трех-фаланговой кисти антропоморфного робота AP600 (рис. 8). Основные результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1.

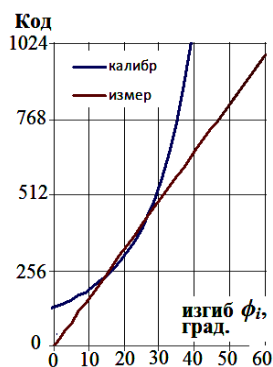


Рис. 7. Позиционная характеристика ЧЭ до и после линеаризации

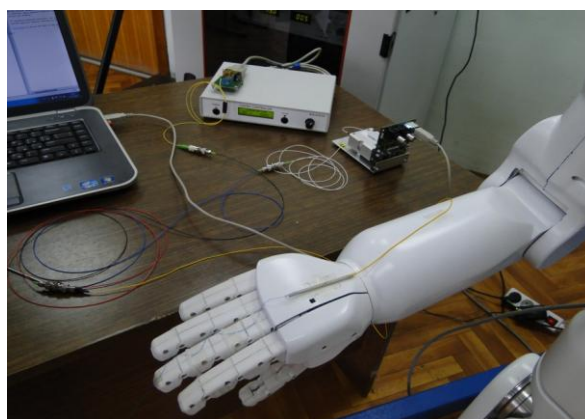


Рис. 8. ЧЭ на кисти антропоморфного робота AP600 и ЭТ

Таблица 1

Основные технические характеристики ВОСУП

Объект	Основные характеристики	Величина
ЧЭ	Диаметр, мм	0,9
	Длина соединительного волоконно-оптического кабеля до, м	10
	Измеряемые углы поворота фланг пальцев, град.	от 0 до 60
	Разрешающая способность, др.разрядов	10
	Нелинейность позиционной характеристики, %	1
ЭТ	Приведенный температурный коэффициент, %/°C	0,08
	Количество измерительных каналов	8
	Габариты, мм	135x85x40
	Напряжение питания, В	5
	Ток потребления, А	0,35
	Выходной сигнал	SPI
	Взаимное влияние каналов измерений до, дБ	минус 20
	Частота опроса ЧЭ, мс	10
Рабочая температура, °C	от 0 до +50	

Заключение. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

- ◆ выявлена связь между величиной поляризационных биений в оптическом волокне и величиной его деформации. Величина поляризационных биений доходит до 5–7 дБ.;
- ◆ разработан принцип компенсации взаимного влияния соседних каналов измерений. Взаимное влияние каналов измерений снижено до минус 20 дБ.;
- ◆ разработан алгоритм линеаризации позиционной характеристики ЧЭ. Нелинейность позиционной характеристики не превышает 1 %, а приведенный температурный коэффициент ЧЭ не превышает 0,08 %/°C.;
- ◆ экспериментальные исследования характеристик ВОСУП подтверждают теоретические исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kirsanov K.* The Architecture of Robotics Control Software for Heterogeneous Mobile Robots Network // 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAM 2013. Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 69. – P. 216-221.
2. *Laird J. E., Wray R. E. III, Marinier R. P. III, & Langley P.* (2009). Claims and Challenges in Evaluating Human-Level Intelligent Systems // Proceedings of the Second Conference on Artificial General Intelligence.
3. *Gerkey B., Vaughan R., and Howard A.* The Player/Stage Project: Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems // Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics. – 2003. – P. 317-323.
4. *Yin Shizhuo, Paul B. Ruffin, T.S.Yu. Francis.* Fiber Optic Sensors. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 477 p.
5. *Nielsen M.D., Mortensen N.A., Albertsen M.* Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers // Optics Express. – 2004. – No. 7. – P. 1775-1779.
6. *Матюнин С.А., Илюхин В.Н.* Бесконтактные волоконно-оптические датчики физических величин для систем управления антропоморфными роботами и роботизированными платформами // Труды X Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления», п. Дамбай, 6-10 апреля 2015 г. – Т. II. – С. 21-32.
7. *Кульчин Ю.Н.* Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети. – Владивосток: Дальнаука, 1999. – 283 с.

8. *Маргелов А.* Оптические датчики положения компании Honeywell // Электронные компоненты. – 2004. – № 10. – С. 105-110.
9. *Лысенко О.* Фотоэлектрические датчики компании SICKAG // Электронные компоненты. – 2005. – № 5. – С. 93-95.
10. *Орлова И.А., Геританский С.А.* Оптоэлектронные датчики для промышленных процессов фирмы SICK AG // Приборы и системы управления. – 1998. – № 10. – С. 68-70.
11. *Гармаш В.Б., Егоров Ф.А. и др.* Возможности, задачи и перспективы волоконно-измерительных систем в современном приборостроении // Спецвыпуск «ФОТОН-ЭКСПРЕСС». – 2005. – № 6. – С. 128-140.
12. *Буймистрюк Г.Я.* Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем. – СПб.: ИВА, ГРОЦ Минатома, 2005. – 191 с.
13. *Буймистрюк Г.Я.* Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков // Фотон-экспресс. – 2011. – № 6 (94). – С. 33-34.
14. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / под ред. Э. Удда: пер. с англ. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
15. *Окуси Т. и др.* Волоконно-оптические датчики: Пер. с яп. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 312 с.
16. *Matyunin S.* Fiber-optical sensors based on mono-crystal films of garnet ferrites for mechatronic systems // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 106. – P. 202-209.
17. *Борисов В.И., Шилова И.В.* Многоканальный микроизгибный волоконно-оптический датчик механического усилия // Вестник Могилевского государственного технического университета. – 2004. – № 1. – С. 19-21.
18. *Matyunin S.* Contactless FiberOptic Vibration Sensors for explosive Manufacturings // Book of abstracts "The 22 International Congress on Sound and Vibration, 12-16 July 2015, Florence (Italy)", The International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV) and the Acoustical Society of Italy (AIA), 2015 г. – P. 150-151.
19. *Хлыбов А.В.* Волоконно-оптические поляриметрические датчики физических величин: дисс. ...канд. физ.-мат. наук. – СПб., 2004. – 215 с.
20. *Шилова И.В., Бельская О.А., Сотский А.Б.* Электродинамическая модель изгибного волоконно-оптического датчика давления // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 1 (14). – С. 43-47.

REFERENCES

1. *Kirsanov K.* The Architecture of Robotics Control Software for Heterogeneous Mobile Robots Network, *24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAM 2013. Procedia Engineering* 2014, Vol. 69, pp. 216-221.
2. *Laird J. E., Wray R. E. III, Marinier R. P. III, & Langley P.* (2009). Claims and Challenges in Evaluating Human-Level Intelligent Systems, *Proceedings of the Second Conference on Artificial General Intelligence*.
3. *Gerkey B., Vaughan R., and Howard A.* The Player/Stage Project: Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems, *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics*, 2003, p. 317-323.
4. *Yin Shizhuo, Paul B. Ruffin, T.S.Yu. Francis.* Fiber Optic Sensors. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008, 477 p.
5. *Nielsen M.D., Mortensen N.A., Albertsen M.* Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers, *Optics Express*, 2004, No. 7, pp. 1775-1779.
6. *Matyunin S.A., Ilyukhin V.N.* Beskontaktnye volokonno-opticheskie datchiki fizicheskikh velichin dlya sistem upravleniya antropomorfnyimi robotami i robotizirovannymi platformami [Contactless fiber-optic sensors of physical quantities for control systems for anthropomorphic robots and robotic platforms], *Trudy Kh Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspek-tivnye sistemy i zadachi upravleniya»*, p. Dambay, 6-10 aprelya 2015 g. [Proceedings of X all-Russian scientific-practical conference "promising systems and control problems", p. Dambi, 6-10 April 2015], Vol. II, pp. 21-32.
7. *Kul'chin Yu.N.* Raspredelemnnye volokonno-opticheskie datchiki i izmeritel'nye seti [Distributed fiber optical sensors and measuring networks]. Vladivostok: Dal'nauka, 1999, 283 p.
8. *Margelov A.* Opticheskie datchiki polozheniya kompanii Honeywell [Optical position sensors Honeywell], *Elektronnyye komponenty* [Electronic Components], 2004, No. 10, pp. 105-110.
9. *Lysenko O.* Fotoelektricheskie datchiki kompanii SICKAG [Photoelectric sensors company SICKAG], *Elektronnyye komponenty* [Electronic Components], 2005, No. 5, pp. 93-95.

10. Orlova I.A., Gershtanskiy S.A. Optoelektronnye datchiki dlya promyshlennykh protsessov firmy SICK AG [Optoelectronic sensors for industrial processes of the company SICK AG], *Pribory i sistemy upravleniya* [Devices and Control Systems], 1998, No. 10, pp. 68-70.
11. Garmash V.B., Egorov F.A. i dr. Vozmozhnosti, zadachi i perspektivy volokonno-izmeritel'nykh sistem v sovremennom priborostroenii [Opportunities, challenges and prospects of fiber measuring systems in modern instrument engineering], *Spetsvyпуск «FOTON-EKSPRESS»* [Special edition "PHOTON-EXPRESS"], 2005, No. 6, pp. 128-140.
12. Buymistryuk G.Ya. Printsipy postroeniya intellektual'nykh volokonno-opticheskikh datchikov [Principles of intelligent fiber optic sensors], *Foton-ekspress* [Photon-Express], 2011, No. 6 (94), pp. 33-34.
13. Buymistryuk G.Ya. Printsipy postroeniya intellektual'nykh volokonno-opticheskikh datchikov [Principles of intelligent fiber optic sensors], *Foton-ekspress* [Photon-Express], 2011, No. 6 (94), pp. 33-34.
14. Volokonno-opticheskie datchiki. Vvodnyy kurs dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov [Fiber-optic sensors. Introductory course for engineers and scientists], Ed. by E. Udda: per. s angl. Moscow: Tekhnosfera, 2008, 520 p.
15. Okosi T. i dr. Volokonno-opticheskie datchiki [Fiber optic sensors]: translated from English. Leningrad: Energoatomizdat, 1990, 312 p.
16. Matyunin S. Fiber-optical sensors based on mono-crystal films of garnet ferrites for mechatronic systems, *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 106, pp. 202-209.
17. Borisov V.I., Shilova I.V. Mnogokanal'nyy mikroizgibnyy volokonno-opticheskiy datchik mekhanicheskogo usiliya [Microscopy multi-channel fiber optic sensor mechanical force], *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik Mogilev State Technical University], 2004, No. 1, pp. 19-21.
18. Matyunin S. Contactless FiberOptic Vibration Sensors for explosive Manufacturings, *Book of abstracts "The 22 International Congress on Sound and Vibration, 12-16 July 2015, Florence (Italy)", The International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV) and the Acoustical Society of Italy (AIA), 2015 p.*, pp. 150-151.
19. Khlybov A.V. Volokonno-opticheskie polyarimetricheskie datchiki fizicheskikh velichin: diss. ...kand. fiz.-mat. nauk [Fiber optic polarimetric sensors of physical quantities. Cand. of eng. sc. diss.]. St. Petersburg, 2004, 215 p.
20. Shilova I.V., Bel'skaya O.A., Sotskiy A.B. Elektrodinamicheskaya model' izgibnogo volokonno-opticheskogo datchika davleniya [Electrodynamic model of bending in lokono-optic pressure sensors], *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki* [problems of physics, mathematics and engineering], 2013, No. 1 (14), pp. 43-47.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор П.К. Кузнецов.

Матюнин Сергей Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)", НИЛ-53; e-mail: S.A.Matyunin@yandex.ru; 443123, Московское шоссе, 34, г. Самара; тел.: +79277171068, факс: 88462674443; кафедра автоматических систем энергетических установок; д.т.н.; профессор.

Matyunin Sergey Alexandrovich – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Samara state aerospace University named after academician S.P. Korolyov (national research University)", NIL-53; e-mail: S.A.Matyunin@yandex.ru; 34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia; phone: +79277171068, fax: +78462674443; dr. of eng. sc.; professor.