

На правах рукописи

**Токмак Петр Львович**

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ  
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С КОМПЛЕКСНОЙ АВТОКОРРЕКЦИЕЙ  
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПЕРВИЧНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Специальность: 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» на кафедре информационных систем и технологий

Научный руководитель: заслуженный работник Высшей школы  
Российской Федерации,  
доктор технических наук, профессор  
Прохоров Сергей Антонович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Гречишников Владимир Михайлович  
кандидат технических наук  
Семавин Владимир Иванович

Ведущая организация – ОАО «Научно-исследовательский институт  
физических измерений», г. Пенза

Защита состоится 21 мая 2010 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.05 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева».

Автореферат разослан 19 апреля 2010 г.

Ученый секретарь совета  
доктор технических наук, профессор

Калентьев А.А.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность темы**

Современный уровень развития автоматике и вычислительной техники создал широкие предпосылки для существенного улучшения потребительских качеств оптоэлектронных цифровых преобразователей перемещений (ОЦПП), включая изготовление первичных преобразователей (ПП) с высокой разрешающей способностью и компактных электронных узлов обработки цифровых данных. В основу созданного многообразия моделей и конструкций ОЦПП положены результаты научных исследований отечественных и зарубежных ученых Гитиса Э.И., Гречишников В.М., Домрачева В.Г., Конюхова Н.Е., Косинского А.В., Леоновича Г.И., Матюнина С.А., Мироненко А.В., Новицкого П.В., Осадчего Е.П., Преснухина Л.Н., Прохорова С.А., Свечникова С.В., Сойфера В.А., Шаповалова В.М., Шляндина В.М., Якушенкова Ю.Г., Bergholm F., Bhanu B., Huang Y.S., Okosi T.I., Shu C.Y., Tcheo P.C. и др. Первостепенное внимание конструированию ОЦПП уделяют отечественные и мировые лидеры оптического приборостроения: ЛОМО, ЛИТМО, НПО «Авангард», СКБ ИС, СКБ ИРФЭ, Elcis, Leine&Linde, M.C.B., Tamagawa Seiki, Sony, Siemens, TM, Megetron, Motorola, IEI Technology, Fraba Posital, Kuebler, Omron, Pepperl+Fuchs, Balluff, Heidenhain, Honeywell и др.

Существенной причиной, сдерживающей практическую реализацию ОЦПП для жестких условий эксплуатации, является значительное ухудшение метрологических показателей при виброударных воздействиях, больших перепадах температуры окружающей среды, сильных электромагнитных полях и других дестабилизирующих факторах. Введение волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) между ПП и электронным блоком обработки функции преобразования перемещения (ФПП) ПП, применение конструктивной компенсации и алгоритмических методов коррекции доминирующих инструментальных погрешностей (ИП) в значительной степени решают проблему стабилизации параметров ОЦПП. Вместе с тем, стремительный рост требований к чувствительности и точности преобразователей ведет к тому, что, например, в преобразователях угловых перемещений период следования и ширина отверстий кодирующих шкал (КШ), а также размеры считывающих элементов (СчЭ) приближаются в линейных величинах к уровню 1 мкм при сравнительно больших диаметрах кодирующих дисков (100-150 мм). Соответственно возрастают значения ИП, вызванные комплексным характером воздействия внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ), приводящих к стохастическим пространственным эволюциям и деформациям КШ, которые в совокупности с дифракцией света на отверстиях КШ существенно искажают ФПП.

Потребность в создании ОЦПП, обеспечивающих заданную точность преобразования в условиях комплексного характера воздействия ВДФ и дифракции света, определяет актуальность поиска новых и совершенствования известных путей повышения точности и стабильности преобразователей.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы», проект №10в-Б001-053 2008 г.

**Цель работы.** Разработка и теоретическое обоснование методики и структурно-алгоритмических средств комплексной автокоррекции инструментальных погрешно-

стей первичного преобразователя ОЦПП, вызванных расширением диапазона параметров внешних дестабилизирующих факторов.

В соответствии с целью определены следующие **задачи исследования**:

- 1) провести теоретический анализ функционирования первичного преобразователя ОЦПП с встроенной ВОЛС;
- 2) исследовать с применением методов математического моделирования искажения ФПП ПП, вызванные пространственными эволюциями и деформацией КШ, вследствие воздействия ВДФ в расширенном диапазоне параметров и дифракцией света на отверстиях КШ;
- 3) разработать структурные схемы ОЦПП с реализацией различных приемов и алгоритмов комплексной коррекции инструментальных погрешностей ПП, вызванных ВДФ и дифракцией света на отверстиях КШ;
- 4) провести экспериментальные и метрологические исследования разработанных ОЦПП, оценить эффективность применяемых методов и алгоритмов комплексной коррекции инструментальных погрешностей ПП, вызванных ВДФ.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались методы интегрального и дифференциального исчисления, аналитической геометрии, планиметрии, теории R-функций, теории волновой оптики, математического моделирования.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

- 1) разработана математическая модель ПП с волоконно-оптическим интерфейсом, учитывающая комплексный характер влияния пространственных эволюций и деформации КШ, дифракции света на отверстиях КШ, функции пропускания оптической системы на форму и линейность ФПП;
- 2) разработаны и теоретически обоснованы структурно-алгоритмические и конструктивные средства линеаризации ФПП на основе выбора спектров источников излучения, введения интерференционных светофильтров в модулирующее сопряжение, изменения геометрической формы отверстий КШ и СчЭ, введения дополнительных каналов измерения, функциональной обработки ФПП;
- 3) разработана методика оценки эффективности применяемых приемов и алгоритмов коррекции инструментальных погрешностей, основанная на анализе изменения гистограмм распределения погрешности ФПП при расширении диапазона параметров ВДФ.

**Практическая ценность**

- 1) Разработанные методика и система моделирования ФПП позволяют на этапе проектирования ОЦПП произвести численную оценку ИП, вызываемых комплексным характером воздействия ВДФ на ПП и дифракцией света на отверстиях КШ.
- 2) Результаты моделирования и анализа ФПП могут применяться при разработке новых и совершенствовании известных структурных схем ОЦПП и конструкций ПП с волоконно-оптическим интерфейсом. В результате введения в двухотсчетный преобразователь угловых перемещений ПП-14 с амплитудной интерполяцией ФПП (число разрядов в каналах грубого и точного отсчета:  $n_{ГО}=9$ ,  $n_{ТО}=5$ ) канала коррекции погрешностей, функционально связанных с пространственными эволюциями кодового диска, погрешность преобразования  $\Delta\alpha=\pm(35'' \dots 2'30'')$ , близкая к заданной ( $\Delta\alpha=\pm 52''$ ), обеспечивается при воздействии на корпус ПП вибрации с пара-

метрами:  $a=1...12g$ ,  $F=10...2000$  Гц. При вибровоздействии без коррекции  $\Delta\alpha=\pm(1'24''...8'30'')$ .

- 3) Методика оценки эффективности применяемых методов и алгоритмов коррекции инструментальных погрешностей позволяет произвести рациональный выбор и доработку структурных схем ОЦПП и конструкций ПП для работы в расширенном диапазоне параметров ВДФ.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) математическая модель ПП, учитывающая пространственные эволюции и деформацию КШ, вызванные ВДФ, и дифракцию света на отверстиях КШ, и полученные на её основе рекомендации по коррекции инструментальных погрешностей ОЦПП с амплитудной и спектральной интерполяцией ФПП;
- 2) структурные схемы ОЦПП с амплитудной и спектральной интерполяцией ФПП, в которых реализованы структурно-алгоритмические и конструктивные приемы комплексной автокоррекции инструментальных погрешностей ПП, вызванных ВДФ, дифракцией света на отверстиях КШ и деградацией энергетических параметров источников и приемников излучения;
- 3) методика оценки эффективности применяемых методов и алгоритмов комплексной автокоррекции инструментальных погрешностей ПП, вызванных расширением диапазона ВДФ.

**Внедрение результатов работы.** Разработанная в диссертационной работе методика анализа ФПП внедрена в НИИФИ (г. Пенза), ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара), в учебном процессе в Самарском государственном аэрокосмическом университете и в Самарском государственном техническом университете.

**Достоверность** результатов основана на обосновании принятых при разработке ОЦПП математических моделей и подтверждается сравнением с имеющимися экспериментальными данными и опубликованными теоретическими результатами.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались, обсуждались и были одобрены на Международных научно-технических конференциях: «Датчики и системы», г. Пенза, 2005; «Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования информационных и электронных технологий в инновационных проектах» (Инноватика - 2007), г. Сочи; на Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиолокации и телекоммуникаций», г. Самара, 2008.

**Вклад автора.** Результаты исследования, изложенные в диссертации, получены автором лично. В частности, лично автором разработана модель ПП с применением методов вычислительного эксперимента, проведен комплексный анализ ФПП при воздействии ВДФ и дифракции света на отверстиях КШ, получены рекомендации по линеаризации ФПП и разработаны структурные схемы ОЦПП с комплексной автокоррекцией ИП, вызванных виброударными воздействиями, дифракцией света на отверстиях КШ и деградацией энергетических параметров источников и приемников излучения. Автором изготовлены экспериментальные образцы ПП и элементы корректирующих устройств, реализующих разработанные алгоритмы коррекции, и проведено их экспериментальное исследование.

**Публикации.** По результатам исследования опубликовано 9 работ, из них 3 статьи – в изданиях, определенных ВАК РФ; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 134 наименований, перечня основных сокращений, изложенных на 149 страницах машинописного текста, принятых в работе, приложений, содержит 79 рисунков и 4 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертации, определена цель работы, изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** на основе принятой классификации и обобщенной структурной схемы ОЦПП дается обзор и характеристика функционирования узлов и элементов ПП с волоконно-оптическим интерфейсом в условиях воздействия ВДФ, изложены структура исследований и методология решения поставленных задач.

Разработаны модели влияния параметров ВДФ на ПП, построенные по различным структурно-конструктивным схемам. Выделены и оценены доминирующие факторы: виброударные и линейные нагрузки, температурная деформация КШ, износ направляющих в кинематическом звене. Энергетические потери обусловлены, в основном, влиянием ВДФ на оптическую систему, кинематическое звено, ВОЛС, деградацией энергетических параметров источников излучения и фотоприемников. Проведен анализ известных методов и алгоритмов коррекции ИП, вызванных ВДФ. Определена необходимость учета комплексного характера воздействия ВДФ и дифракции света на отверстиях КШ при поиске эффективных решений, направленных на повышение стабильности и точности преобразования.

**Вторая глава** посвящена математическому описанию ПП с волоконно-оптическим интерфейсом.

ПП может строиться по нескольким структурным схемам и включать  $N=1, 2, 3, \dots, j, \dots$  каналов. Свет от одного или нескольких ИИ, находящихся в электронном блоке, через подводящие оптические волокна ( $ОВ1_j$ ) подается в ПП, содержащий формирователи световых потоков ( $\PhiСП_j$ ), перемещающуюся КШ, которая оптически сопряжена с неподвижными оптическими СчЭ $_j$  (рис.1).

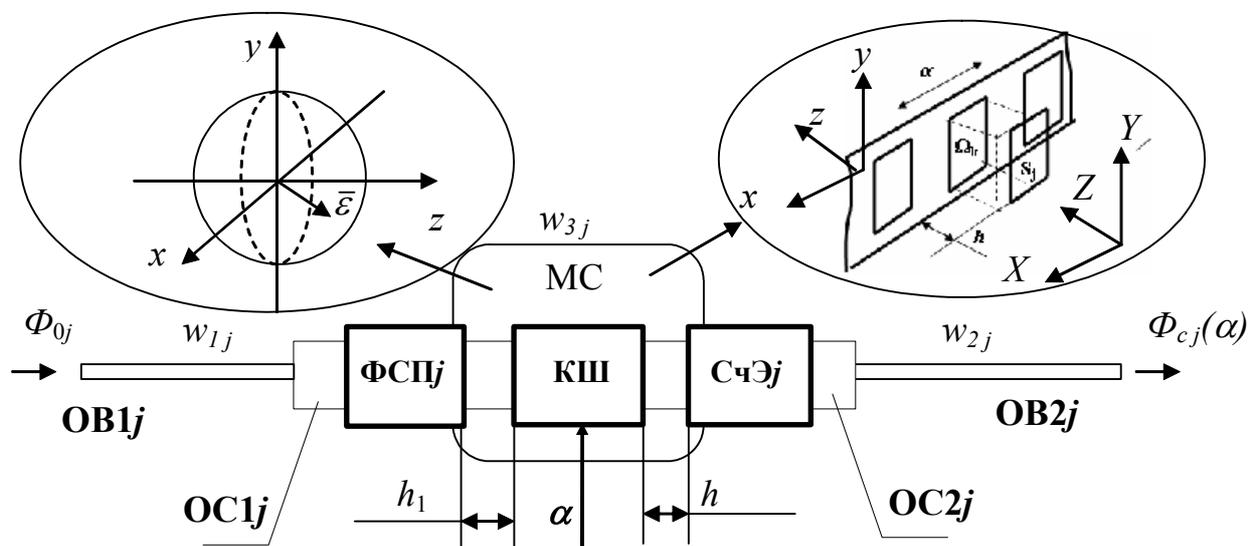


Рисунок 1 – Преобразование перемещения  $\alpha$  в оптический сигнал в одном ( $j$ -м) канале ПП

В модулирующем сопряжении (МС)  $k$ -го отверстия КШ и СчЭ $_j$  осуществляется модуляция заданных параметров светового потока, коррелированная с перемещением  $\alpha$  КШ. Оптическая система канала разделяется на подводящую (ОС1 $_j$ ) и отводящую (ОС2 $_j$ ) световой поток части и может включать специализированные волоконно-оптические элементы и устройства, оптические линзы, спектроформирующие элементы. Модулированные световые потоки с выходов СчЭ $_j$  подаются на выводящие ОВ2 $_j$ .

Световой поток от  $j$ -го СчЭ, подающийся через ОВ на фотоприемник, зависит от нескольких основных аргументов и коэффициентов:

$$\Phi_{cjk}(\alpha) = \Phi_{0j} H_{jk}(\alpha, \Omega_k, \delta\Omega_k, S_j, \delta S_j, \lambda_j, \Delta\lambda_j, \lambda_k, \Delta\lambda_k, h, \epsilon_{jk}, \gamma_{jk}) w_{1j} w_{2j} w_{3j}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{0j}$  – немодулированный световой поток от ИИ;  $H_{jk}(\cdot)$  – безразмерная функция преобразования в модулирующем сопряжении  $j$ -го СчЭ и  $k$ -го отверстия (метки) КШ;  $\alpha$  - перемещение объекта, соединенного с КШ;  $\Omega_k, \delta\Omega_k$  - геометрическая область и искажение формы  $k$ -го отверстия КШ;  $S_j, \delta S_j$  – геометрическая область и искажение формы  $j$ -го СчЭ;  $h$  – базовое расстояние между КШ и СчЭ;  $\lambda_j, \Delta\lambda_j$  – центральная длина волны и ширина спектра оптического излучения;  $\lambda_k, \Delta\lambda_k$  - центральная длина волны и ширина спектра полосы пропускания  $k$ -го отверстия КШ;  $\epsilon_{jk}, \gamma_{jk}$  - векторы смещения и угла поворота  $k$ -го отверстия КШ относительно  $j$ -го СчЭ вследствие воздействия ВДФ;  $w_{1j}, w_{2j}$  - коэффициенты передачи автономных или общих участков волокна ОВ1 $_j$  и ОВ2 $_j$  с учетом потерь на соединениях,  $w_{3j}$  – коэффициент передачи ФСП (с учетом расстояния  $h_1$  – между ФСП и КШ), ОС1 $_j$  и ОС2 $_j$  (с учетом технологических зазоров).

В канале точного отсчета двухотсчетных ОЦПП линейные размеры СчЭ (ширина  $a_c$ , высота  $b_c$ ) и меток ( $a_m, b_m$ ) КШ в большинстве вариантов совпадают:  $a_m = a_c = a = \alpha_0/2 = (10 \dots 100)\lambda_0$ ;  $b_c \leq b_m$ , где  $\lambda_0$  – центральная длина волны излучения,  $\alpha_0$  - период разметки КШ. Базовое расстояние между КШ и СчЭ обусловлено прецизионностью применяемых кинематических звеньев, условиями эксплуатации и находится в пределах  $h = (5 \dots 200)\lambda_0$ . Функция преобразования перемещения  $H_{jk}$  основана на интегрировании функции распределения интенсивности  $I_{pjk}$  светового потока от  $k$ -го отверстия КШ как функции перемещения в пределах  $\alpha = 0 \dots \alpha_0$  по считывающей поверхности  $P$ , часть  $S_j$  которой представляет неподвижный СчЭ $_j$  (рис. 2).

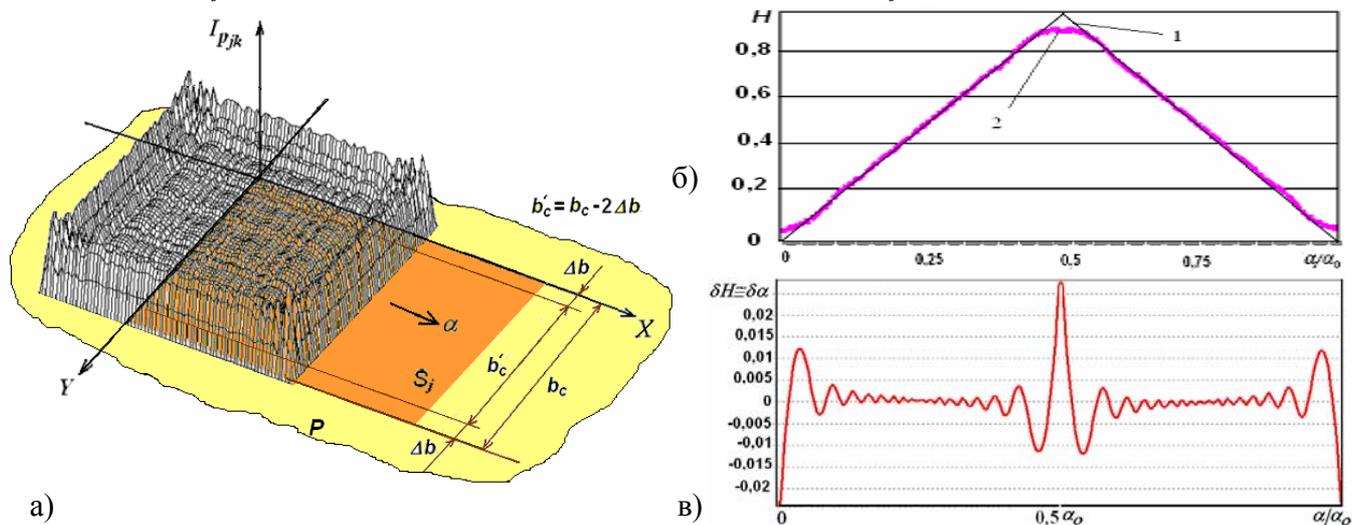


Рисунок 2 – Формирование ФПП: а) распределение интенсивности света по СчЭ при полной за- светке окна КШ и СчЭ; б) ФПП (1– без учета дифракции; 2– с учетом дифракции) в) отклонение ФПП  $\delta H(\alpha) = H(\alpha)_1 - H(\alpha)_2$

Идеальная ФПП  $H_0(\alpha)$ , предназначенная для амплитудной интерполяции в двухотсечном ОЦПП, представляет собой линейно возрастающую до  $\alpha=\alpha_0/2$  и линейно убывающую после  $\alpha=\alpha_0/2$  функцию (рис. 2б, линия 1). Несовершенство технологии изготовления ПП и воздействие ВДФ приводят к отклонению геометрических параметров меток и СчЭ от идеальных и к дополнительному пространственному смещению меток КШ относительно СчЭ в МС. В этом случае ФПП без учета дифракции представляет собой уравнение

$$H_{jk}(X, Y, \alpha, \mathbf{e}_{jk}, \mathbf{r}_{jk}) = \Omega_k(X, Y, \alpha, \mathbf{e}_k, \mathbf{r}_k) \cap S_j(X, Y, \mathbf{e}_j, \mathbf{r}_j).$$

Общая формула для ФПП с учетом воздействия ВДФ и дифракции света для согласованных по спектру ИИ, КШ и СчЭ имеет вид (рис.2а, 2б, линия 2)

$$H(\alpha, \Omega, S, \lambda, \Delta\lambda, h, \mathbf{e}, \mathbf{r}) = \frac{1}{H_0(\alpha_0/2)} \int_P \varpi_c(X, Y) \cdot I_p(\alpha, X, x, Y, y, Z, z, \lambda, \Delta\lambda, h, \mathbf{e}, \mathbf{r}) dS_n, \quad (2)$$

где  $\varpi_c(X, Y) = \begin{cases} 1 & \text{при } \{X, Y\} \in S \\ 0 & \text{при } \{X, Y\} \notin S \end{cases}$  - функция распределения коэффициента передачи

СчЭ по считывающей поверхности  $P$ ;  $dS_n$  - проекция элемента СчЭ  $ds$  на плоскость  $P$ , нормальную к направлению падения светового луча;  $XYZ$  - система координат считывающей поверхности, привязанная к области  $S$  СчЭ;  $xyz$  - система координат КШ, привязанная к области метки  $\Omega$ ;

$$I_p(\alpha, X, x, Y, y, Z, z, \lambda, \Delta\lambda, h, \mathbf{e}, \mathbf{r}) \equiv \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Theta(\lambda) |U_p(X, x, Y, y, Z, z, \alpha, \lambda, h, \mathbf{e}, \mathbf{r})|^2 d\lambda \quad (3)$$

- интенсивность света в точке  $p$  на считывающей поверхности  $P$ ;  $\Theta(\lambda)$  - нормированная спектральная функция источника излучения (НСФ), определяющая спектр  $\Delta\lambda$  излучения;

$U_p(X, x, Y, y, Z, z, \alpha, \lambda, h, \mathbf{e}, \mathbf{r})$  - амплитуда дифрагированной волны в точке  $p$  наблюдения, определяемая в соответствии с известными выражениями для дифракции Френеля в приближении Кирхгофа на широких отверстиях, близких к прямоугольным, при перекосе и смещении отверстия КШ относительно СчЭ.

При прохождении светового потока через МС с функцией спектральной модуляции ФПП может формироваться в трех типовых вариантах:

- аналоговый сигнал, пропорциональный смещению нормированной функции пропускания (НФП) МС  $T_{MC}^\lambda[\lambda(\alpha)]$ , привязанной к перемещению  $\alpha$ , относительно нормированной спектральной функции ИИ  $\Theta(\lambda)$ :  $H(\lambda, \alpha) \equiv \Theta(\lambda) \cap T_{MC}^\lambda[\lambda(\alpha)]$ ;

- унарный или двоичный код перемещения на основе сочетания  $N = 2^n$  или  $n$  спектральных составляющих, определяемого топологией МС и привязанного к перемещению  $\alpha$ ;

- комбинированная функция на основе сочетания  $M$  канальных спектральных составляющих, каждая из которых является аналоговым сигналом.

Для описания геометрических параметров меток  $\Omega(\alpha)$  и СчЭ  $S$  и искажения их формы ( $\delta\Omega$ ,  $\delta S_c$ ) вследствие воздействия ВДФ применены удобные для численного моделирования формулы, базирующиеся на логико-геометрическом аппарате  $R$ -функций и планиметрии.

Определены условия, учитывающие коэффициенты  $w_{1j}$ ,  $w_{2j}$  и  $w_{3j}$ , при которых достигается обеспечение энергетических параметров сигнала, достаточных для получения заданной информационной емкости  $N_{TO}$  канала точного отсчета при амплитудной интерполяции ФПП.

Для оценки функции пропускания МС с узкополосным интерференционным светофильтром (УИС) между КШ и СчЭ разработана приближенная модель энергетической нормированной функции пропускания фильтра для каждой точки  $p$  на считывающей поверхности, которая имеет вид

$$T_p(\lambda, \varphi_Y, \theta_{Y0}, \theta_Y) = T_p(\lambda, \varphi_Y, \theta_{Y0}, X, Z) = \frac{1}{H + D \cdot \cos \left\{ B\nu_0 \cdot \cos \left[ \varphi_Y + \theta_{Y0} + \arctg \left( \frac{X_p}{Z - z} \right) \right] \right\}}, \quad (4)$$

где  $\varphi_Y$  - начальный угол преломления излучения в резонансном слое УИС;  $\theta_{Y0}$  - угол установки УИС относительно СчЭ;  $H, D, B$  - конструктивные параметры фильтра, определяющие характеристики пропускания (ширина полосы, крутизна спектральной характеристики);  $\nu_0 = c/\lambda_0$  - центральная частота излучения;  $\arctg [X/(Z - z)] = \theta_Y$  - угол наклона световых лучей в точке  $p$  при дифракции на краях отверстия;  $X$  - координата точки  $p$  на плоскости считывания;  $Z - z = h$ .

Интенсивность света в точке  $p$  для определения ФПП по формуле (2) в этом случае записывается как

$$I_p^T(\alpha, X, x, Y, y, Z, z, \lambda, \Delta\lambda, h, \mathbf{e}, \mathbf{r}, \varphi_Y, \theta_{Y0}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_p^\lambda(\lambda, \varphi_Y, \theta_{Y0}, X, Z) \Theta(\lambda) I_p(\alpha, X, x, Y, y, Z, z, \lambda, \Delta\lambda, h, \mathbf{e}, \mathbf{r}) d\lambda \quad (5)$$

Модель показывает высокую сходимость с экспериментальными данными при узких щелях, а для широких отверстий ( $a_m \geq h/5 \gg \lambda_0$ ) модель дает хорошее совпадение значений  $\delta\alpha_m$  в точках перемещения  $\alpha=0, \alpha_0/2, \alpha_0$ .

На основе полученных математических выражений разработана автоматизированная система моделирования и анализа ФПП (АСМАФПП).

**В третьей главе** исследуется ФПП (2) при различных типах источников излучения, анализируются искажения ФПП, как безразмерной функции

$$\delta H(\alpha) = \delta H_{jk}(\alpha) = H_{jk}(\alpha) - H_0(\alpha) \equiv \delta\alpha(\alpha) = \Delta\alpha(\alpha)/\alpha_0 \quad (6)$$

в вариантах  $H_{jk}(\alpha) = H_{jk}(X, Y, \alpha, \mathbf{e}, \mathbf{r})$  и  $H_{jk}(\alpha) = H_{jk}(\alpha, \Omega_k, \delta\Omega_k, S_j, \delta S_j, \lambda, \Delta\lambda, h, \mathbf{e}, \mathbf{r})$

и максимальные амплитуды осцилляций  $\delta H_m \equiv \delta\alpha_m$  при  $\alpha \approx 0, \alpha_0/2, \alpha_0$ , обусловленные комплексным характером воздействия ВДФ и дифракции света на отверстиях КШ, оценивается возможность линеаризации ФПП путем выбора спектра излучения, функции пропускания ОС, параметров отверстий КШ и СчЭ, вводом дополнительных каналов измерения.

Воздействие ВДФ имитировалось:

- перекосом и смещением меток КШ ( $\gamma_X, \gamma_Y, \gamma_Z, \varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z$ ) относительно СчЭ в статическом и динамическом режимах;

- изменением средней ширины меток КШ относительно средней ширины СчЭ:  $T = (\Omega + \delta\Omega)/(S + \delta S) = (a_{m0} + \delta a_m)/(a_{c0} + \delta a_c)$  при  $b_m \geq b_c$ .

При монохроматическом ИИ наиболее выражены быстрые осцилляции ФПП, вызванные микросмещением  $\Delta h = \varepsilon_Z$  по оси  $Z$ . С монотонным ростом  $\Delta h$  в пределах  $\lambda_0$  наблюдается периодическое изменение угла наклона  $\beta(h, \lambda)$  средней линии функции  $\delta\alpha(\alpha)$ , которая в точках экстремумов возрастает до  $0,025 \dots 0,04$  при  $a_0 = (80 \dots 100)\lambda_0$ ,  $\lambda_0 = 550 \dots 1500$  нм.

Формируя спектр излучения из 2-х и более монохроматических ИИ, можно подобрать значения  $\lambda_i$ , при которых осцилляции в точках экстремумов находятся в противофазе, а угол  $\beta$  наклона средней линии функции  $\delta\alpha(\alpha)$  сохраняет значение  $\beta(h, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_N) \leq \beta_{\text{дон}}$  в пределах некоторого осевого люфта КШ  $|\Delta h_{\text{дон}}|$ . При моделировании двух монохроматических ИИ, работающих на  $\lambda_1 = 550$  нм и  $\lambda_2 = 1100$  нм достигнуто значение  $\delta\alpha_m \leq (3 \dots 8)10^{-3}$  при  $h = h_0 \pm \Delta h_{\text{дон}} = 95 \dots 105$  мкм. С ростом  $|\Delta h/\alpha_0|$  линейаризация ФПП за счет подбора  $\lambda_i$  и ширины отверстий КШ становится неэффективной, так как при расширении спектра излучения, начиная с  $|\Delta h/\alpha_0| \approx 10^{-4}$ , происходит автокомпенсация угла  $\beta(h)$  и вызванной им быстросциллирующей составляющей погрешности  $\delta\alpha(\alpha, h, \lambda)$ . Поэтому для оценки нелинейности ФПП при относительно широкополосных ИИ исследовалось воздействие ВДФ на значение  $\delta\alpha_m$  в точках близких к значениям перемещения:  $\alpha=0, \alpha_0/2, \alpha_0$ , где наблюдается максимальное значение амплитуды осцилляций.

Погрешность ФПП вследствие перекоса  $\gamma_Y$  КШ относительно СчЭ слабо зависит от  $\Delta\lambda$  (рис. 3,а) и характеризуется сужением и нарушением симметрии ФПП. Погрешность  $\delta\alpha_m = 0,01 \dots 0,04$  при  $\gamma_Y \leq 12'$  для всех  $h$ .

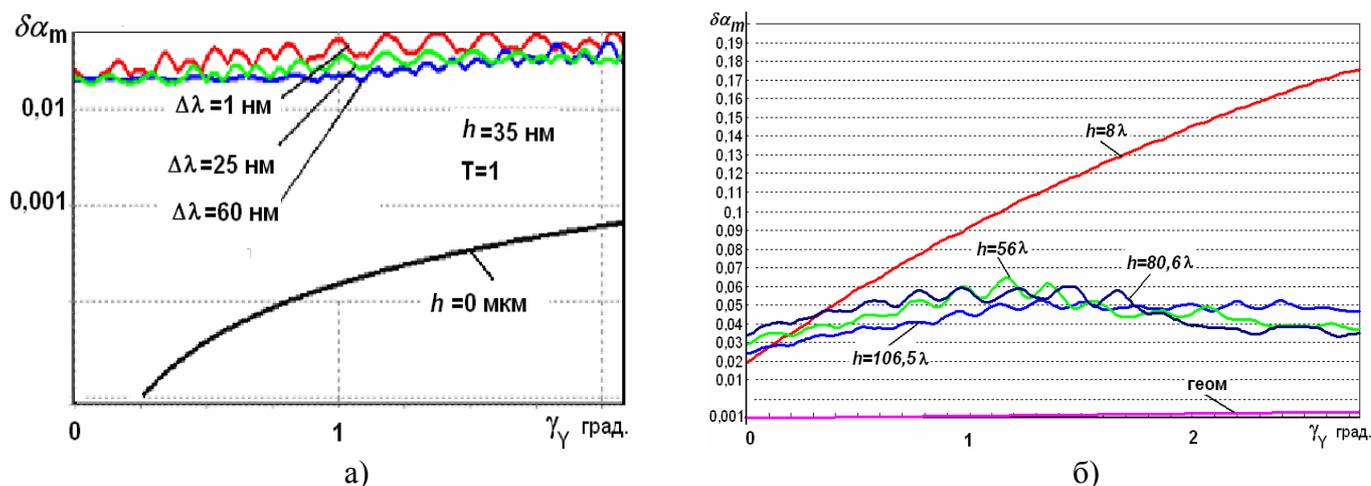


Рисунок 3 – Влияние перекоса КШ  $\gamma_Y$  на максимальную погрешность ФПП  $\delta\alpha_m$ :

а) зависимость  $\delta\alpha_m(\gamma_Y)$  при  $h=0$  и 100 мкм,  $\Delta\lambda=1 \dots 60$  нм,  $T=1$ ; б) зависимость  $\delta\alpha_m(\gamma_Y)$ ,  $h=\text{const}$ ,  $T=1$

По мере увеличения  $h$  и  $\gamma_Y$  разброс значений  $\delta\alpha_m(\gamma_Y)$  достигает  $0,03 \dots 0,08$  при  $\gamma_Y = 1^0 \dots 1^0 30'$  и далее асимптотически идет на убыль, если  $h \geq \alpha_0 = (30 \dots 40)\lambda_0$  (рис.3,б). При расстоянии  $h \leq (1 \dots 3)\alpha_0$  (широкая метка) погрешность  $\delta\alpha_m(\gamma_Y)$  резко возрастает до  $0,14$  при  $\gamma_Y = 2^0$ . Так как изменение  $\Delta\lambda$  и  $T$  не дает уменьшения  $\delta\alpha_m$ , то требуются алгоритмические методы линейаризации ФПП и выбор  $h \geq 20\lambda_0$ . Погрешность  $\delta\alpha_m$  вследствие перекоса  $\gamma_X$  и смещения  $\varepsilon_Y$  метки уменьшается в 2..5 раз за счет выполнения условия  $b_c = b'_c \leq b_m - 2\Delta b$ , где  $\Delta b$  - область с максимальными осцилляциями ФПП по оси  $Y$  (см. рис. 2,а). При перекосе  $\gamma_X$  и  $\gamma_Z$  выбор  $b_c = b'_c$  минимизирует дифракционную со-

ставляющую  $\delta\alpha_m$ , однако не компенсирует геометрическую составляющую погрешности ФПП. При сужении  $a_m$  до абсолютных величин 1...5 мкм необходимо учитывать отношение ширины метки и СчЭ  $T=a_m/a_c$ . Анализ  $\delta\alpha_m(T, h)$  при  $h=(8...160)\lambda_0$ , и  $\gamma_Y=0^\circ, 2^\circ 30'$  с изменением отношения  $T$  в пределах 0,94...1,06 показывает, что при уменьшении  $T$  с 1 до 0,96 и увеличении с 1 до 1,04 погрешность  $\delta\alpha_m$  уменьшается в 1,1...2 раза в зависимости от  $h$ . Сужение и расширение меток КШ на 1..3% ведет к уменьшению осцилляций в точках изменения направления ФПП. При дальнейшем изменении  $T$  погрешность  $\delta\alpha_m$  определяется геометрической проекцией метки на поверхность СчЭ.

Введение УИС между КШ и СчЭ уменьшает амплитуду осцилляции  $I_p$  в точках, близких к  $\alpha=0, \alpha_0/2, \alpha_0$  (рис. 4). Изменение параметра  $D$ , определяющего крутизну НФП, при различных значениях  $\gamma_Y, \gamma_X$  и  $h$  существенно влияет на амплитуду осцилляций (уменьшение в 1,2...3 раза), но не изменяет их характер. В частности, максимальные значения отклонений ФПП от идеальной наблюдаются в основаниях и вершинах ФПП. Поэтому применение УИС в качестве корректирующих элементов имеет ограничение, которое можно частично устранить сочетанием с алгоритмическими методами коррекции и выбором расстояния  $h$  (рис. 5).

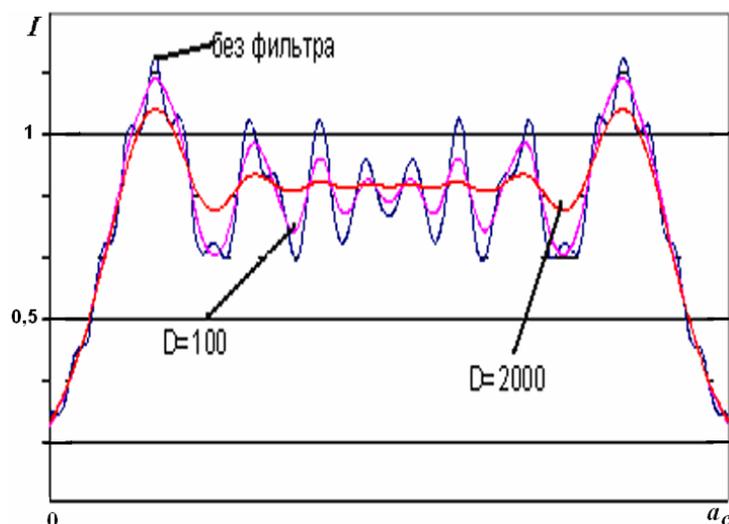


Рисунок 4 – Распределение интенсивности по оси X СчЭ

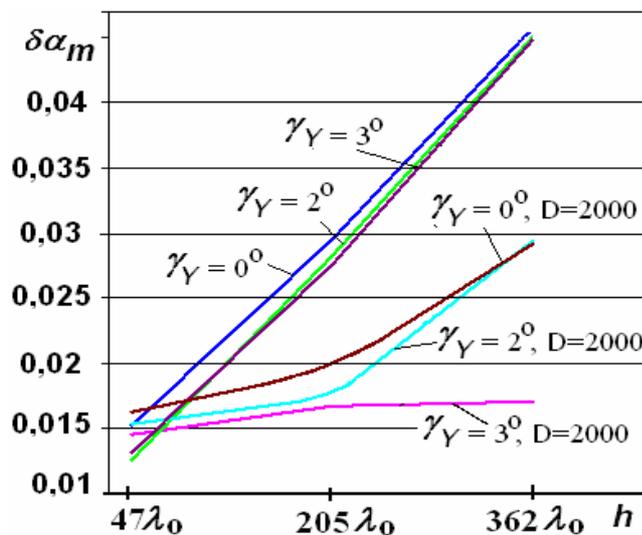


Рисунок 5 - Зависимости  $\delta\alpha_m(h)$  при различных значениях  $\gamma_Y$  до и после введения УИС ( $\theta_{Y0}=3^\circ$ )

**В четвертой главе** описаны разработанные структурные схемы ОЦПП с встроенными ВОЛС, в которых применена коррекция погрешностей ПП, вызванных воздействием ВДФ с учетом дифракции света на отверстиях КШ и деградацией энергетических параметров ИИ и ФПУ.

Установка в МС дополнительных каналов измерения расстояния  $h=h_0+\Delta h$ , углов  $\gamma_Y$  и  $\gamma_X$  между КШ и СчЭ позволяет осуществлять ввод в код перемещения поправок, которые формируются в виде матриц типа  $\delta\alpha(h, \alpha), \delta\alpha(\gamma_Y, \alpha), \delta\alpha(\gamma_Y, h, \alpha), \delta\alpha(\gamma_Y, \gamma_X, h, \alpha)$ , учитывающих дифракционные искажения ФПП. Разработана структурная схема преобразователя угловых перемещений с применением дополнительных волоконно-оптических каналов измерения  $\Delta h$  и  $\gamma_Y$ , которая позволяет произвести оцифровку  $\Delta h$  и  $\gamma_Y$  с погрешностью 3...5%. В памяти канала коррекции по значениям  $\gamma_Y, h$  и  $\alpha$  на этапе калибровки формируется таблица поправок, которая снижает  $\delta\alpha_m$  в  $\geq 3$  раза.

Нанесение на КШ опорной дорожки позволяет реализовать алгоритм адаптивной подстройки коэффициента усиления  $k_y$  сигнала на выходе ФПУ. В соответствии с алгоритмом начальное значение светового потока от ИИ устанавливается на уровне  $\Phi_0 < \Phi_{0\max}$  и изменяется при пространственных эволюциях КШ, снижении чувствительности ФПУ и ухудшении пропускания светового потока в ВОЛС и ОС вследствие воздействия ВДФ. В результате достигается увеличение срока эксплуатации преобразователя до замены ИИ и ФПУ, компенсация мультипликативных и аддитивных помех на выходе ФПУ, уменьшение в 2...5 раз коэффициента нелинейности ФПП.

КШ из периодически повторяющихся комбинаций УИС выполняет функции спектральной и амплитудной интерполяции, а также линейризации ФПП. Разработан тип КШ, реализующий алгоритм выбора из трех ФПП участков с минимальным значением  $\delta\alpha_m$ .

С целью улучшения энергетической эффективности и помехоустойчивости оптического сигнала, определяемых шириной спектра и значением  $\alpha_m$ , разработана нониусная шкала из широкополосных фильтров (ШПФ)  $\Phi_i, i=1...N$ , с высокой точностью нанесения границ (рис. 6). КШ выполняется из периодически нанесенных групп из  $N=2^n$  ( $n=2, 3, 4, \dots$ ) ШПФ. Ширина каждого фильтра равна ширине СчЭ  $\alpha_\phi = \alpha_m = \alpha_c = \alpha_0/2$ . Фильтры смещены вдоль шкал  $\alpha$  и  $\lambda$  на  $i\Delta\alpha_{nc} = i\alpha_0/N$  и  $l\Delta\lambda_n = l\Delta\lambda_{nc0}/N$ , где  $\lambda_{n0}$  – часть диапазона спектра, предназначенная для кодирования перемещения,  $i, l=1, 2, 3, \dots, N$ . Спектр ИИ равен  $\Delta\lambda_{ИИ} = \Delta\lambda_b + N\Delta\lambda_{nc0}$ . При этом полоса пропускания (ППФ<sub>*i*</sub>) каждого ШПФ  $\Delta\lambda_i \gg \Delta\lambda_{nc0}$ . Коэффициент пропускания комбинации фильтров  $T^\lambda(i\Delta\alpha_n) = \prod_{L_i} T^\lambda(\lambda_{l_i} - \lambda_{l_n})$ ,  $l \in L_i$ , соответствует одной из  $N$  комбинаций.

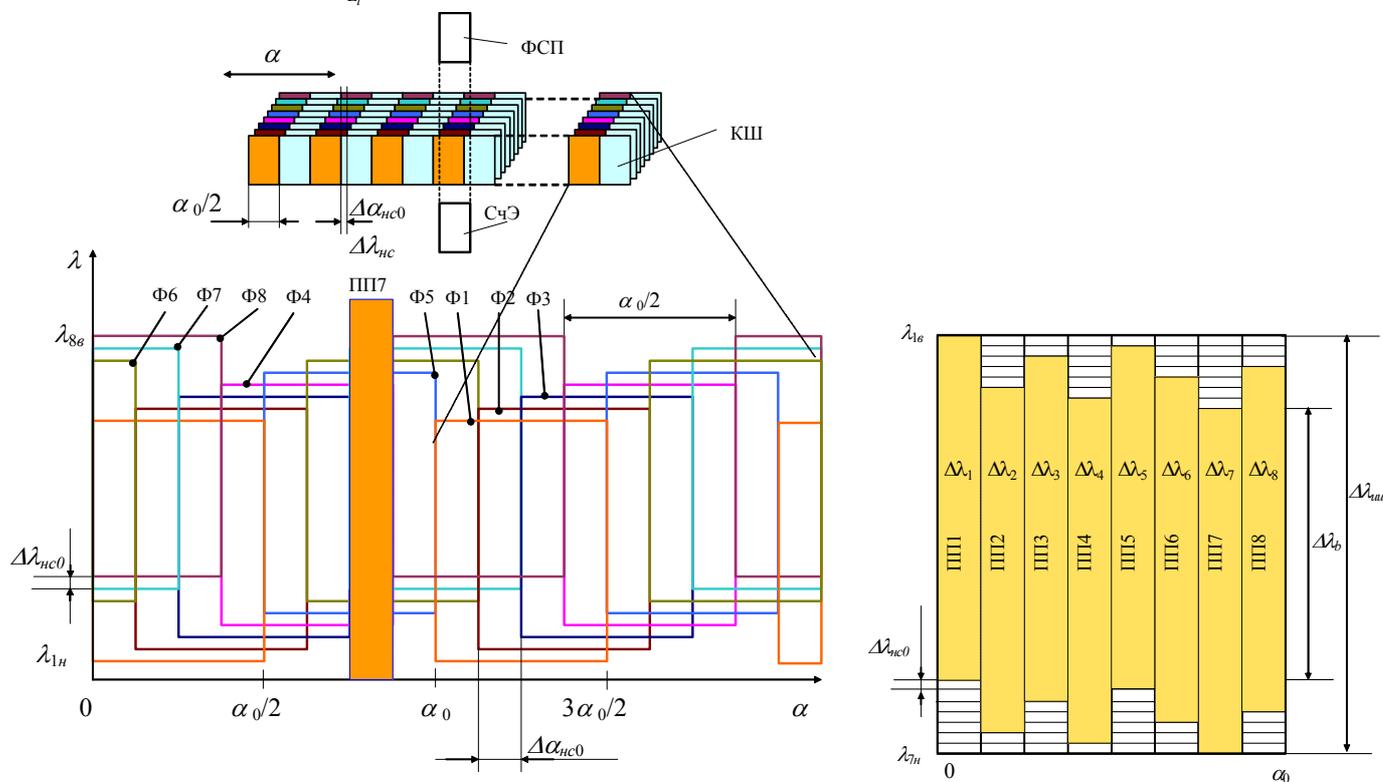


Рисунок 6 - Формирование нониусной КШ из широкополосных светофильтров:

- а) структура нониусной шкалы из сочетаний фильтров для  $n=3$ ; б) пример формирования полосы пропускания системы из восьми фильтров

В пятом разделе проведена оценка адекватности математической модели, изложена методика оценки эффективности применяемых методов стабилизации параметров ПП на основе анализа изменения погрешности ФПП при воздействии ВДФ до и после ввода коррекции; приведены результаты экспериментальных исследований.

В качестве исследуемого и дорабатываемого устройства использовался преобразователь углового перемещения ОЦПП ПП-14 с волоконно-оптическим интерфейсом, разработанный в ОНИЛ-5 и НИЛ-47 (табл. 1). Для детализированной оценки влияния предельных значений ВДФ на канал ТО использовалась экспериментальная установка, содержащая источник излучения АЛ 107А ( $\lambda_0=945$  нм,  $\Delta\lambda_{III}=25$  нм), оптическую систему, образцы регулируемых щелей, набор оптических фильтров, механический узел для реализации пространственных эволюций щели, бескорпусная камера VAC-135 с разрешением  $1280 \times 1024$  пкс, сопряженная с персональным компьютером.

Таблица 1 – Основные технические характеристики преобразователей ПП-14 и ПП-14Э

Параметр	ПП-14 (базовый)	ПП-14Э (доработанный)
Диапазон преобразования, град	0...360	0...360
Информационная емкость, бит (грубого/точного отсчетов)	14 (9/5)	14 (9/5)
Разрешающая способность, град	1'21"	1'21"
Источники света/ фотоприемники	LED16/ PD24	LED16/ PD24
Диапазон частот вибровоздействия, Гц	50...2000	50...2000
Диапазон ускорений вибровоздействий, g	0...12	0...12
Диапазон корректируемых значений радиального и осевого смещения КШ, мм	-	$\pm 0,02$
Относительная погрешность канала коррекции, %	-	4,3
Максимальная погрешность преобразования при ВУВ, град	$\pm 8'19''$	$\pm 1'7''$
Потребляемая мощность, Вт	9,9	12
Вес оптомеханического узла, кг	0,41	0,45
Габариты оптомеханического/ электронного узлов, мм	$\varnothing 40 \times 75 / 100 \times 50 \times 40$	$\varnothing 40 \times 75 / 100 \times 50 \times 40$
Рабочий диапазон температур, $^{\circ}\text{C}$	-45 - +60	-45 - +60

При введении в ПП различных значений составляющих векторов  $\epsilon$  и  $\gamma$ , искажений  $\delta a_m$  и  $\delta a_c$  результаты экспериментов и математического моделирования имеют расхождение  $\leq 8\%$ . На рисунке 7 показан пример ФПП при перекосе щели  $\gamma_z = 2^{\circ}$  по результатам натурального эксперимента, ее расхождение с дифракционной и геометрической моделями (линия 3) в диапазоне перемещения  $0 \dots 0,5\alpha_0$  ( $\alpha_0=100$  мкм).

Для ОЦПП эффективность коррекции определяется из выражения:

$$E_{кор} = (1 - \Delta w) \frac{\Delta P}{P_2} = \left[ 1 - \frac{(W_2 - W_1)}{W_2} \right] \frac{(P_2 - P_1)}{P_2}, \quad (7)$$

где  $W_1, W_2$  — ресурс, затрачиваемый на функционирование ОЦПП до и после введения коррекции, соответственно;  $P_1, P_2$  — вероятность  $P(\delta a \leq \alpha_{кв})$  нахождения погрешности ОЦПП в пределах  $\alpha_{кв}$  (кванта младшего разряда кода перемещения) до и после введения коррекции, соответственно.

На рисунке 8 показаны примеры гистограмм по параметру  $\delta a(h)$ , полученные расчетным и экспериментальным путями при исследовании преобразователя ПП-14Э при выключенном и включенном канале коррекции в условиях виброударных воздействий (ВУВ).

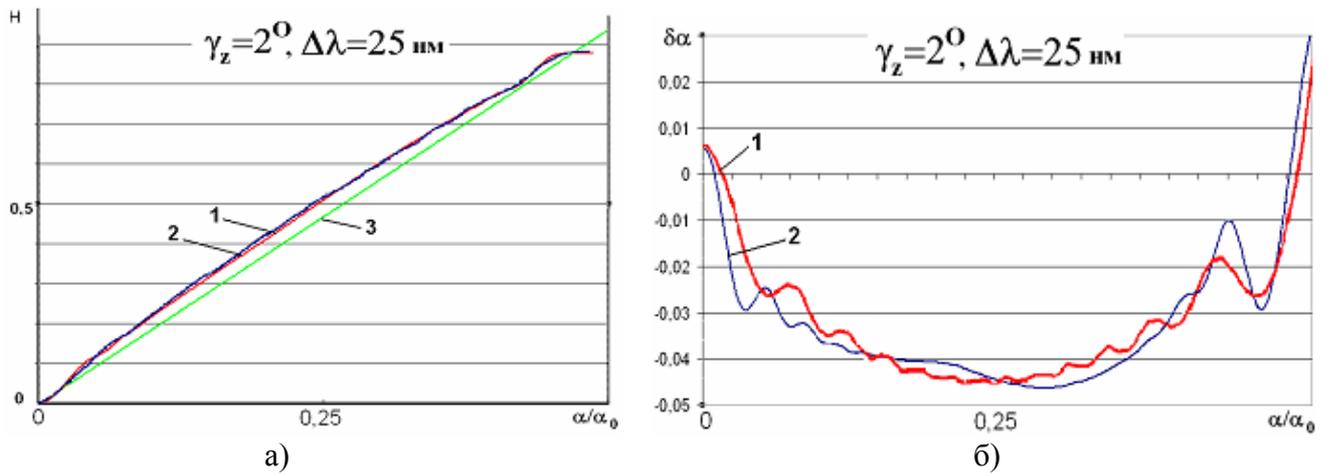


Рисунок 7 – Функция преобразования перемещения (а) и погрешность преобразования (б), полученные в результате вычислительного (линия 1), натурального (линия 2) эксперимента

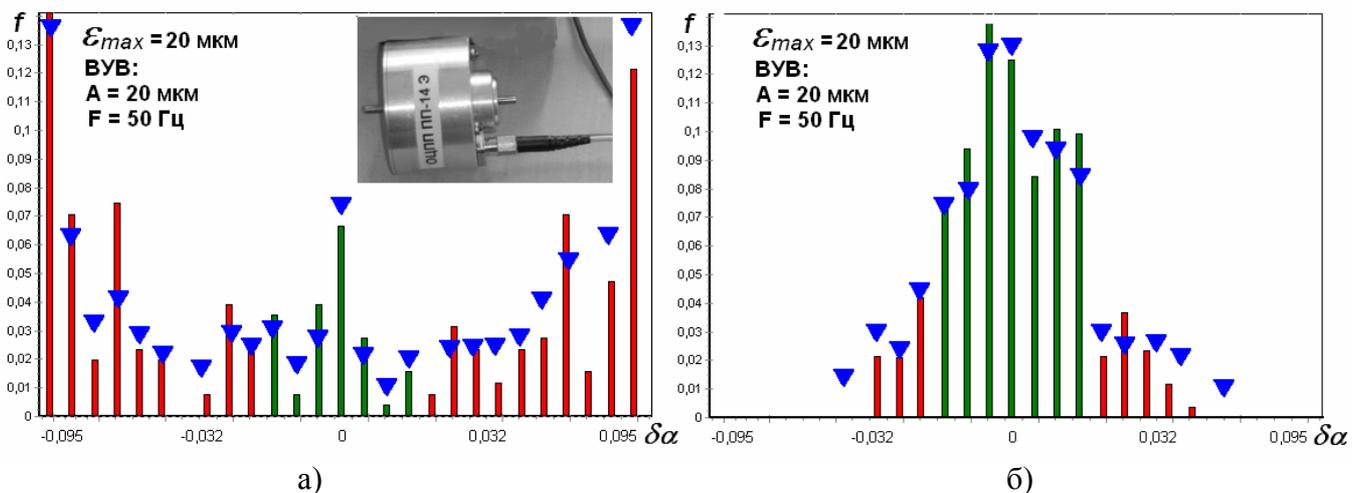


Рисунок 8 – Гистограмма распределения  $\delta\alpha$  до (а) и после (б) введения коррекции по  $\delta\alpha(h)$  при расширенном диапазоне параметров ВУВ ( $\blacktriangledown$  - экспериментальные данные)

Эффективность коррекции определялась по значениям  $P_1$  и  $P_2$ , полученным в результате обработки гистограмм распределения погрешности  $\delta\alpha$ , и оценке ресурса, основанной на методе удельных весов.

При отсутствии внешних воздействий погрешность преобразования  $\Delta\alpha = \pm 52''$ . Вибровоздействия ( $a = 1 \dots 12g$ ,  $F = 50 \dots 2000$  Гц) увеличивают погрешность до  $\Delta\alpha = \pm(1'24'' \dots 8'30'')$ . В ПП встраивался канал коррекции погрешности, основанный на измерении  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$ . Сигналы подавались на два 4-разрядных АЦП, формирующих адрес для ПЗУ канала коррекции. В ПЗУ вводился массив поправок по результатам калибровки, осуществляемой при фиксированных значениях кода  $N_\alpha$  до и после воздействия предельных линейных и угловых нагрузок. В результате введения коррекции погрешность при вибровоздействиях уменьшилась в 1,5...7,4 раза при увеличении веса ПП на 9,7% и потребляемой мощности на 21%. Эффективность коррекции составляет  $E_{кор} = 0,56 \dots 0,82$  в зависимости от параметров ВУВ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана математическая модель ПП с волоконно-оптическим интерфейсом, учитывающая комплексный характер влияния пространственных эволюций и деформации КШ, типа источника излучения, функции пропускания оптической системы и

дифракции света на отверстиях КШ на форму и линейность ФПП. Определены условия, при которых достигается обеспечение энергетических параметров сигнала, достаточных для получения заданной информационной емкости канала точного отсчета при амплитудной и спектральной интерполяции ФПП. С использованием модели разработана автоматизированная система моделирования и анализа ФПП.

2. Получены зависимости погрешности преобразования от расстояния и перекоса КШ относительно СчЭ, вызванных комплексным воздействием ВДФ в расширенном диапазоне значений, спектральных параметров ИИ и оптической системы. Выявлена целесообразность применения структурно-алгоритмических методов коррекции погрешности преобразования перемещения, учитывающих дифракцию света на отверстиях КШ.

3. Разработаны структурные схемы и алгоритмы функционирования ОЦПП с механическими, оптическими и электронными средствами комплексной автокоррекции погрешности преобразования, вызванной воздействием ВДФ и дифракцией света. Реализация метода вспомогательных измерений перекоса и смещения КШ уменьшает погрешность преобразования в  $\geq 3$  раза. Введение опорной дорожки КШ для адаптивной подстройки выходной мощности ИИ уменьшает в 2...5 раз коэффициент нелинейности ФПП. Введение УИС в МС уменьшает осцилляции ФПП в 1,4...3 раза. Формирование КШ из набора УИС, вычлняющих из ФПП участки с минимальной нелинейностью, позволяет уменьшить  $\delta\alpha_m$  в 4...5 раз. Исполнение нониусной шкалы из ШПФ с  $a_m = \alpha_0/2$  наряду с линеаризацией ФПП позволяет получить помехоустойчивый код перемещения, в котором каждому кванту шкалы  $\Delta\alpha_n$  соответствует комбинация из функций пропускания нескольких фильтров.

4. Разработана методика оценки эффективности применяемых приемов и алгоритмов коррекции погрешности ФПП, основанная на анализе изменения гистограмм распределения  $\delta\alpha$ . Основные положения и результаты математического моделирования подтверждены результатами физических экспериментов на макетах и опытных образцах ОЦПП. Проведены вычислительные и натурные эксперименты, оценивающие эффективность коррекции при вибровоздействиях ( $a=1...12g$ ,  $F=50...2000$  Гц). Введение в преобразователь угловых перемещений ПП-14 (погрешность при отсутствии ВДФ  $\Delta\alpha = \pm 52''$ ) канала коррекции по параметру  $\Delta h$  в двух смещенных на  $90^\circ$  по кромке кодового диска точках снижает погрешность преобразования при воздействии ВДФ с  $\Delta\alpha = \pm(1'24''...8'30'')$  до  $\Delta\alpha = \pm(35''...2'30'')$ . Эффективность коррекции  $E_{кор} = 0,56...0,82$ .

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях, определённых ВАК:

1. Токмак, П.Л. Математическая модель оптоэлектронного цифрового преобразователя перемещения в код с автокоррекцией погрешности преобразования, вызванной биениями кодирующей шкалы /Леонович Г.И., Токмак П.Л., Рошупкин М.С. // Вестник СГАУ, 2007, №1, с. 201-206.

2. Токмак, П.Л. Интеллектуальные оптоэлектронные преобразователи перемещения на основе аналоговых оптомеханических сенсоров / Леонович Г.И., Токмак П.Л., Луганский Э.С. // Известия Самарского научного центра РАН, 2007, №3, т.9, с.729-738.

3. Токмак, П.Л. Спектральное и спектрально-модовое кодирование сигналов в оптоэлектронных преобразователях перемещения с волоконно-оптическими каналами передачи ин-

формации / Леонович Г.И., Матюнин С.А., Токмак П. Л., Луганский Э.С. // Известия Самарского научного центра РАН, 2007, №3, т.9, с. 739 - 748.

#### **Статьи, опубликованные в других журналах и изданиях**

4. Токмак, П.Л. Математическая модель оптоэлектронного цифрового преобразователя перемещения в код с автокоррекцией погрешности преобразования, вызванной перекосом и биениями кодирующей шкалы в направляющих перемещениях // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: СГАУ, 2008.-с.124-130.

5. Токмак, П.Л. Оптоэлектронные цифровые преобразователи перемещений с волоконно-оптическими линиями связи для применения в SCADA – системах / Леонович Г.И., Токмак П.Л., Соловьев В.И.// Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: СГАУ, 2008.-С.28-31.

6. Токмак, П.Л. Повышение информационной ёмкости мультисенсорных оптоэлектронных цифровых преобразователей перемещений с волновым уплотнением каналов при передаче информации по ВОЛС на удаленный контроллер Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: СГАУ, 2008.-с.13-19.

#### **Тезисы докладов**

7. Токмак, П.Л. Автоматизированная система моделирования и анализа функции отклика в оптоэлектронных цифровых преобразователях перемещения – АСМФО. /Леонович Г.И., Токмак П.Л., Юнгов Ю.Н., Рощупкин М.С., Луганский Э.С.// «Датчики и системы -2005»: Матер. докл. Междунар. науч.-техн. конф. -Пенза, 2005г.,с.75,76.

8. Токмак, П.Л. Топологический синтез рисунков модулирующих шкал и считывающих элементов оптоэлектронных преобразователей перемещения с учетом дифракции структурированного по спектру светового потока / Леонович Г.И., Токмак П. Л., Луганский Э.С., Ливочкина Н.А.// Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования информационных и электронных технологий в инновационных проектах «Инноватика - 2007»: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. - Москва-Сочи 1-12 октября 2007 г., стр. 4, 5.

9. Токмак, П. Л. Функциональное и структурное резервирование элементов оптоэлектронных преобразователей перемещения с волоконно-оптическими линиями связи. / Леонович Г.И., Токмак П. Л., Луганский Э.С., Ливочкина Н.А. // Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования информационных и электронных технологий в инновационных проектах «Инноватика -2007»: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. - Москва-Сочи 1-12 октября 2007г., стр. 3, 4.

#### **Свидетельства об интеллектуальной собственности**

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010612342 от 31 марта 2010г. Автоматизированная система моделирования и анализа функции преобразования перемещения оптоэлектронных цифровых преобразователей перемещений «АСМАФПП» / Авторы и правообладатели: Токмак П.Л., Леонович Г.И., Прохоров С.А.

Подписано в печать 06.04.10 г. тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета

443086, Самара, Московское шоссе, 34, СГАУ.