ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ



Санкт-Петербург 2012 МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

В.В. Коротаев, А.В. Прокофьев, А.Н. Тимофеев

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Часть І. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений

Учебное пособие



Санкт-Петербург 2012 В.В. Коротаев, А.В. Прокофьев, А.Н. Тимофеев Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Часть 1. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений /Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 114 стр.

Пособие содержит изложение принципов построения оптикоэлектронных преобразователей линейных перемещений, взаимосвязь структурных параметров при преобразовании сигналов на основе теории измерительных преобразований информации, особенностей конструкции.

Пособие предназначено для студентов по направлению подготовки бакалавров и магистров 200400 – «Оптотехника» и по специальности 200401 – «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» на кафедре оптико-электронных приборов и систем, и может быть полезно студентам оптических и радиотехнических специальностей, а также разработчикам измерительной техники.

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптотехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200400 – Оптотехника и по специальности 200401 - Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения, протокол № 4 от 23.04.2012



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012 © В.В. Коротаев, А.В.Прокофьев, А.Н. Тимофеев, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	. 4
ГЛАВА 1 ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ, ОСНОВНЫЕ	
ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИКО-	
ЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	. 6
1.1 Обобщенная модель	6
1.2 Основные характеристики	9
1.3 Классификация оптико-электронных преобразователей	
линейных и угловых перемещений	. 12
ГЛАВА 2 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ	
ИНКРЕМЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛИНЕЙНЫХ	
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	. 16
2.1 Основные принципы действия оптико-электронных	
инкрементных преобразователей перемещения при работе в	
проходящих пучках лучей	. 16
2.2 Принципиальные особенности преобразования	
перемещения для КС с реперными метками	. 20
2.3 Преобразование перемещения при работе в отраженных	
пучках лучей	. 24
ГЛАВА 3. ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ	
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	. 35
3.1 Источники излучения для ОЭПП	. 35
3.2 Приемники оптического излучения ОЭПП и их схемы	
подключения	. 38
3.3 Кодирующие и анализирующие структуры ОЭПЛП	. 48
ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА И	
РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	. 68
4.1 Основное энергетическое уравнение	. 68
4.2 Методика расчета параметров элементов ОЭПЛП	. 75
4.3 Пример расчета параметров ОЭПЛП	. 79
ГЛАВА 5. ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ ОЭПЛП	. 85
5.1 Варианты конструкции профильных ОЭПЛП	. 85
5.2 Варианты конструкции штоковых ОЭПЛП	. 90
5.3 Варианты конструкций ОЭПЛП открытого типа	. 93
5.4 Обработка электрических сигналов в ОЭПЛП	. 95
СПИСОЌ ЛИТЕРАТУРЫ	. 103

введение

В настоящее время практически невозможно найти область в науке, технике, производстве и нашем быту, в которых не находили бы применение оптико-электронные приборы и системы, используемые либо для измерения количественных характеристик и параметров как физических, так и технологических процессов, либо для управления как бытовой техникой, так и подвижными объектами, либо как охранные устройства и системы сбора, передачи и обработки информации.

При этом в силу ряда положительных свойств оптического излучения [1] такие системы могут решать сложные многофункциональные задачи с высокими характеристиками точности, быстродействия, надежности, пропускной способности и практически неограниченными возможностями математической И логической обработки информации.

Характерными представителями таких систем являются оптикоэлектронные преобразователи линейных и угловых перемещений (ОЭПП). В таких преобразователях входная величина (угловое или линейное перемещение) преобразуется в форму, удобную для восприятия техническим средством.

В ОЭПП используются два основных метода преобразования смещений в цифровой код: последовательный счет единичных приращений (инкрементные ОЭПП) и непосредственное считывание (абсолютные ОЭПП).

В последнее время появился промежуточный класс квазиабсолютных ОЭПП. Этот класс имеет более простую структуру, чем абсолютные ОЭПП и свободен от большинства недостатков инкрементных ОЭПП. Применение квазиабсолютных ОЭПП в большинстве случаев экономически более выгодно. Поэтому класс квазиабсолютных ОЭПП находит все более широкое применение в реальных устройствах, особенно в системах с числовым программным управлением.

Хотя в настоящее время достаточно много материалов посвящено вопросам разработки и изготовления, а также анализу характеристик оптико-электронных преобразователей [2, 3, 4, ⁵], однако авторами не обнаружено единого источника, который с учетом развитой электронной элементной базы позволял бы студентам и разработчикам быстро решать технические задачи проектирования и анализа возможности применения современных устройств.

Утвержденный более двадцати лет назад ГОСТ 26242-90 [6] отражает терминологию и характеристики преобразователей перемещений для системы числового программного управления, которые устарели в связи с существенным развитием электроники. Поэтому в настоящем издании сделана попытка ввести понятия и характеристики, которые более адекватно и полно отражают суть процессов, происходящих в современных ОЭПП.

Предполагается, что настоящее учебное пособие будет состоять из нескольких частей, в которых будут рассмотрены разные типы преобразователей, в том числе и аналоговые, основанные на различных современных принципах обработки измерительной информации и имеющие для каждого типа характерные конструктивные решения.

В настоящей книге рассмотрены обобщенная модель угловых и линейных ОЭПП, их классификация, теоретические особенности проектирования накапливающих (инкрементных) оптико-электронных преобразователей линейных перемещений (ОЭПЛП), конструктивные решения и основные характеристики таких ОЭПЛП от различных производителей (ОАО СКБИС, Россия; HEIDENHAIN, Германия; Renishaw, Англия).

Авторы выражают благодарность к.т.н., доценту В.Л. Мусякову за конструктивную критику по содержанию и редактированию пособия.

Главы 1 и подраздел 3.4.1 написаны Тимофеевым А.Н., раздел 2.1 – Коротаевым В.В., глава 4 и 5, разделы 2,2, 3.1 - 3.3 и подразделы 3.4.2 – 3.4.3 - Прокофьевым А.В.

ГЛАВА 1 ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ, ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

1.1 Обобщенная модель

Современные оптико-электронные преобразователи перемещений (ОЭПП) являются сложными системами, в которых сигналы постоянно претерпевают преобразования, связанные с обработкой информации [1]. При этом сначала, как правило, выполняется преобразование оптических сигналов в электрические, а затем их обработка в форме, удобной для выделения информации о величинах угловых и линейных перемещений. При этом в процессе работы часто происходят и обратные преобразования электрических сигналов в оптические или магнитные.

В целом, понятие об измерительном преобразовании предполагает, что измеряемая величина может быть воспринята только вместе с тем физическим процессом, в котором она проявляется. Использование преобразований измерительных является основным методом практического построения измерительных устройств [7], так как любое измерительное устройство использует те или иные функциональные связи между входной и выходной величиной. Любое реально осуществленное аналого-цифровое измерительное или устройство состоит ИЗ последовательной цепи измерительных преобразователей, образующих измерительную цепь средства измерений или измерительный канал в измерительной системе – канал преобразования измеряемой величины в результат измерения [2].

Обобщенную структурную схему ОЭПП можно представить в виде совокупности следующих элементов (рисунок 1.1): излучателя (И), анализирующей (KC), кодирующей структуры структуры (AC), фотоприемного (ΦΠM), модуля системы первичной обработки информации (СПОИ) и системы вторичной обработки информации (СВОИ), которые находятся в физической среде и имеют энергетическое обеспечение. ОЭПП передает полученную информацию во внешние устройства индикации или преобразования (ВУИП).

Поскольку измерительной информации носителем является электромагнитное излучение оптического диапазона, которое распространяется в воздушном тракте, в структуру физической среды необходимо включать воздушный тракт (ВТ), а также эксплуатационные воздействия (ЭВ) на элементы схемы, обусловленные изменениями температуры, вибрации и т.д. При рассмотрении преобразований сигналов в обобщенной схеме ОЭПП необходимо учитывать помехи, которые оказывают не только электрические и механические, но и световые воздействия на элементы.



Рисунок1.1 – Обобщенная схема ОЭПП

Излучатель И может включать несколько источников оптического излучения (ИОИ) и передающую оптическую систему (ПОС), формирующую требуемое поле оптического излучения.

Кодирующая структура КС представляет собой пространственную периодическую структуру, хранящую единицу измеряемой величины, и может быть выполнена в виде линейной или круговой шкалы, растра, дифракционной решетки или голограммы.

Анализирующая структура AC, как правило, имеет ту же структуру, что и КС, и предназначена для определения дробной части единицы.

Фотоприемный модуль ФПМ преобразует оптические сигналы, образованные в результате прохождения излучения через КС и АС, в электрические и может содержать несколько приемников оптического излучения (ПОИ).

Система первичной обработки информации СПОИ, как правило, содержит электронную схему предварительной обработки измерительного электрического сигнала (предварительный усилитель и электронный фильтр).

Система вторичной обработки информации СВОИ окончательно преобразует полученную информацию о перемещении в форму (код или аналоговый сигнал), удобную для восприятия оператором или использования в измерительных системах.

В ряде устройств ОЭПП КС с АС меняются местами, но и в этом случае функции элементов сохраняются.

Основная суть работы ОЭПП состоит в том, что при перемещении КС относительно АС происходит изменение характеристик оптического сигнала от источника И, которые затем с помощью ФПМ трансформируются в электрические сигналы, и эти сигналы сначала

предварительно в СПОИ, а потом и окончательно в СВОИ преобразуются в форму, удобную для непосредственного использования. Для большинства практических применений, в силу ряда преимуществ [2], эта форма является цифровой.

В настоящее время лампы накаливания в излучателях И практически полностью вытеснены полупроводниковыми излучающими диодами (ПИД) и лазерными излучающими диодами (ЛИД). Причиной этого является более высокий к.п.д. преобразования электрической энергии в излучение упомянутых диодов, а также более узкий спектральный диапазон излучения, что позволяет повысить коэффициент преобразования оптического излучения источника в полезный электрический сигнал. Более подробно о связях параметров ИОИ и ПОС с характеристиками ОЭПП будет изложено в разделе 4.1 и подразделе 4.1.2 настоящего пособия.

Так как кодирующая структура КС в ОЭПП реализует единицу измеряемой величины, то она, по сути, является рабочей мерой. В соответствии с этим к ней предъявляют следующие требования: воспроизведение с установленной точностью целых, кратных или дробных значений единицы перемещения; сохранение требуемой точности меры в процессе эксплуатации; возможность изготовления меры с учетом существующей серийного технологии В условиях опытного И производства.

Для ряда цифровых преобразователей структура КС позволяет результаты измерений выдавать в цифровом виде.

Наиболее распространенными КС (разд. 3.3) являются *штриховые*, представляющие собой последовательность штрихов, нанесенных на рабочую поверхность меры через определенные интервалы. В ОЭПП применяют круговые штриховые меры (лимбы) и линейные шкалы. Характерной особенностью *растровых КС* является то, что длина штриха в несколько раз больше его шага. При этом положение комбинационных полос в растровом сопряжении с аналогичной растровой АС позволяет реализовать интерполяционный принцип оценки перемещений.

Пространственное распределение амплитудно-фазовой структуры на стеклянной пластине позволяет реализовать КС на основе явлений интерференции оптического излучения. В качестве КС возможно и применение дифракционных решеток. Ожидается существенное улучшение характеристик КС за счет построения голографических структур.

Для интерференционных и дифракционных КС характерно применение в качестве АС амплитудно-фазовых оптических элементов [4]. При использовании в качестве КС и АС дифракционных решеток, имеющих малый шаг, сравнимый с длиной волны оптического излучения, комбинационные полосы можно наблюдать как при прямом прохождении пучка лучей через решетки, т. е. в нулевом порядке, так и в более высоких

8

спектральных порядках. В последнем случае полосы возникают в результате интерференции пучков различных порядков дифракции. Частота изменения пропускания при сопряжении двух дифракционных решеток зависит от шага решеток и используемых спектральных порядков и может быть получена в 2 - 6 раз большей, чем частота решеток. Этому явлению в настоящем пособии будет уделено особое внимание в разд. 2.2.

В современных ОЭПП оптические сигналы после прохождения КС и АС преобразуются в ФПМ с помощью фотодиодов (ФД) или фоторезисторов в электрические сигналы (подраздел 3.2.1). Далее эти сигналы операционными усилителями (ОУ) и демодуляторами в СПОИ усиливаются и формируются перед окончательной обработкой. Завершающее преобразование информативных сигналов происходит в СВОИ и может представляться как в цифровой форме (разд. 5.4), так и с помощью счетчиков и дешифраторов на дисплее.

В современных оптико-электронных преобразователях линейных перемещений (ОЭПЛП) излучатель И, анализирующая структура АС, фотоприемный модуль ФПМ и система первичной обработки информации СПОИ конструктивно объединены в считывающую головку, которая обычно закрепляется на подвижной часть объекта, в то время как КС закрепляется на неподвижной части. Возможно и обратное расположение: считывающая головка неподвижна, а перемещается КС.

1.2 Основные характеристики

Основными характеристиками ОЭПП являются формы представления выходных величин (вид выходного кода, число разрядов кода, цена единицы наименьшего разряда кода), диапазоны измерений, погрешности, быстродействие, надежность работы.

Входными величинами ОЭПП обычно являются линейное и угловое перемещения или положение какого-либо устройства, преобразуемые с помощью ОЭПП в цифровой код. Реже входными величинами являются линейные и угловые скорости или ускорения.

В качестве *выходных величин* ОЭПП могут использоваться различные виды цифровых кодов, в том числе двоичные, десятичные и двоично-десятичные коды. Иногда используют коды специальных видов, например, циклические и коды в системе остаточных классов.

Выбор того или иного вида цифрового кода зависит от назначения преобразователя. Если преобразователь должен выдавать выходные величины на систему цифровой индикации, непосредственно используемую человеком, удобнее применять привычную десятичную систему счисления. Если преобразователь является входным для цифровых устройств, то целесообразнее применять ту форму, которая оптимальна для дальнейшей обработки информации.

Под диапазоном A_x изменений входной величины x преобразователя определяется разностью между ее максимальным x_{max} и минимальным значениями x_{min} :

$$A_x = x_{\max} - x_{\min} \; .$$

В этой области нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений.

Диапазон изменения выходной величины ОЭПП зависит от диапазона измерения входной величины и от линейного или углового разрешения преобразователя.

Под разрешением (дискретностью) Δx_p ОЭПП понимают минимальное приращение входной величины, соответствующее изменению выходного кода на единицу наименьшего разряда, т. е.

$$\Delta x_p = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N},$$

где *N* — число дискретных уровней квантования диапазона изменения выходной величины преобразователя (разрядность).

Наиболее важной характеристикой преобразователя является погрешность преобразования. Погрешность работы преобразователя определяется отклонением дискретного значения выходной величины, некотором значении входной величины полученного при x. OT соответствующего значения номинальной функции преобразования $f_{sf}(x)$ [8], т. е. погрешностью преобразования Δx . Погрешность преобразования, в основном, обуславливается действием инструментальной погрешности и уровню погрешностей квантования по И времени, являющихся методическими погрешностями.

другие формы Иностранные производители используют представления погрешности. Например, фирма Renishaw, производящая ОЭПП, представляет основную погрешность КС графически в виде зависимости текущего значения погрешности от величины перемещения (рисунок 1.2). Соединяя значения погрешности в начальной и конечной точках диапазона перемещения, определяют наклон секущей, которая показывает изменение мультипликативной составляющей основной погрешности. Эта составляющая погрешности может быть исключена программными средствами при обработке измерительной информации. Относительно этой секущей наблюдается колебание текущего значения систематической погрешности, которое, в конечном итоге, определяет систематической погрешности. Величину систематической поле погрешности предложено характеризовать половиной величины размаха колебаний текущего значения систематической погрешности относительно секущей.

На систематическую составляющую погрешности, представленную на графике, накладывается циклическая составляющая, обусловленная

10

погрешностью разбиения КС (SDE). Эта составляющая равна или кратна периоду разбиения (шагу) шкалы КС и по величине существенно меньше систематической погрешности.



Рисунок 1.2 – График представления основной погрешности преобразователей фирмы Renishaw

В России действует ГОСТ 26242-90 [6], в котором под *предельной погрешностью* ОЭПП понимается наибольшее по абсолютной величине отклонение от действительного значения разности входной величины между двумя любыми точками во всем интервале измерения, исключая дискретность и погрешность устройства, которым они проверяются или с которым работают. В предельные погрешности, в соответствии с ГОСТ 26242-90 (табл. 4.1), входят все разновидности систематических погрешностей, свойственные преобразователям конкретного типа, и их случайные составляющие.

Быстродействие преобразователя определяется временем, затрачиваемым на выполнение одного преобразования непрерывной величины в цифровой код, т. е. временем преобразования. Иногда быстродействие преобразователя характеризуют величиной, обратной времени преобразования, т. е. числом преобразований в единицу времени.

По известному времени преобразования t_{np} можно определить допустимую скорость изменения входной величины. Пусть требуется, чтобы за время преобразования входная величина изменилась не более, чем на q^{0} от линейного или углового разрешения. Тогда допустимая скорость изменения входной величины определяется выражением

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{\partial ON} \le \frac{q}{100N t_{np}} (x_{\max} - x_{\min}).$$

Важной характеристикой преобразователя является надежность его работы. Одним из основных показателей надёжности является средняя наработка на отказ (T_0) или средняя наработка до отказа (T_{cp}).

Минимально допустимые значения в часах определяют по формуле:

 $T_0 \le 15 K \cdot 10^3$ или $T_{cp} \le 15 K \cdot 10^3$,

где

$$K = \frac{l + \sqrt{K_T}}{3 + \sqrt{L}},$$

 K_T – коэффициент, численно равный порядковому номеру класса точности с 1 по 10 и равный 0,5 для преобразователя класса точности 01 и 001 (ГОСТ 26242-90 [6]); L – безразмерная величина, численно равная длине перемещения в метрах.

Отказом следует считать прекращение функционирования или увеличение погрешности при нормальном значении температуры более чем в два раза от номинального значения погрешности.

1.3 Классификация оптико-электронных преобразователей линейных и угловых перемещений

ГОСТ 26242-90 [6] неполно классифицирует преобразователи перемещений, которые со временем претерпели существенные изменения. Поэтому предлагается классификация ОЭПП (рисунок 1.3) с учетом современных особенностей их построения и реализации.

В зависимости от вида преобразуемых координат, как и в прежние годы [6], ОЭПП принято подразделять на *угловые* и *линейные*.

Точные преобразователи угловых перемещений представляют собой сложные оптико-электронные устройства, предназначенные для представления аналогового значения углового положения контролируемого объекта, например вала, в виде параметров (амплитуда, частота, фаза и др.) аналоговых электрических сигналов или в виде дискретных сигналов (цифровой код).

Преобразователи линейных перемещений аналогично преобразуют линейные координаты контролируемого объекта.

Разбиение ОЭПП на подклассы можно осуществлять по принципиальным методам формирования КС (рабочих мер): *растровые*, *интерференционно-дифракционные* и *голографические*.

Растровые КС, представляют собой последовательность штрихов, нанесенных на рабочую поверхность меры через определенные интервалы. В таких КС длина штриха намного больше шага штриха и в результате перемещений АС относительно КС происходит смещение образующихся комбинационных полос.



Рисунок1.3 – Классификация ОЭПП

Частным случаем растровых КС являются стеклянные круги (кодовые диски) или пластинки, на которых выполнена система примыкающих одна к другой разрядных дорожек - кольцевых или линейных - с прозрачными и непрозрачными участками.

У интерференционных и дифракционных преобразователей КС реализуется с помощью явлений, происходящих на поверхности (интерференция или дифракция), в то время как у голографических – в заданном объеме.

С метрологической точки зрения, т. е. в зависимости от метода измерения, а также состава результирующей погрешности и зависимости ее от погрешностей промежуточных преобразований, ОЭПП можно разделить на устройства прямого преобразования и устройства уравновешивающего преобразования.

В устройствах прямого преобразования все преобразования информации осуществляются измерительными преобразователями (ИП) только в одном (прямом) направлении – от входного перемещения к выходному информативному параметру, то есть используется метод непосредственной оценки.

В устройствах уравновешивающего преобразования используются две цепи ИП: цепь прямого и цепь обратного преобразования. При этом по цепи обратного преобразования выходной сигнал поступает на вход и уравновешивает входной сигнал с той или иной степенью точности, то есть используется нулевой метод.

В соответствии *с алгоритмами* существующие преобразователи прямого преобразования пространственных перемещений в цифровой код целесообразно подразделять на две группы: *преобразователи последовательного счета* и *преобразователи параллельного считывания* (рисунок 1.3).

Сущность алгоритма последовательного счета заключается в том, что измеряемая величина разбивается на ряд равных составных частей (приращений), каждой из которых ставится в соответствие единица младшего разряда цифрового кода. При подсчете этих приращений получается код – числовой эквивалент измеряемой величины.

Сущность алгоритма параллельного считывания заключается в том, что измеряемая величина сопоставляется со своеобразным, заранее заготовленным набором всех возможных числовых эквивалентов. В зависимости от значения измеряемой величины происходит считывание определенного числового эквивалента с пространственной структуры, являющейся рабочей мерой.

В свою очередь, преобразователи последовательного счета по методу определения текущей координаты контролируемого объекта можно разделить на три подгруппы: *инкрементные* преобразователи, *квазиабсолютные* и *абсолютные*.

Инкрементный (накапливающий) преобразователь реагирует не на пространственное положение, а на пространственное перемещение, которое с помощью специальной схемы разделяется на ряд элементарных приращений. Накапливая эти приращения путем подсчета, преобразователь формирует цифровой код, пропорциональный измеряемому пространственному положению.

В случае *квазиабсолютных* преобразователей текущая координата начинает определяться путем подсчета последовательных приращений (как у накапливающих) лишь после прохождения референтной метки. В этом случае процесс преобразования наступает не сразу после включения оборудования.

В абсолютных преобразователях не требуется прохождение референтных меток, и текущая координата определяется сразу при

14

включении. Таким образом, в абсолютных преобразователях каждому значению входного перемещения соответствует значение числового эквивалента, который формируется на выходе, как правило, в виде цифрового кода.

Достижение более высокого линейного или углового разрешения возможно благодаря использованию метода определения положения пространственной структуры в долях шага, или, как его иначе называют, *метода интерполирования*. Метод интерполирования позволяет применять специальные кодовые шкалы с более крупным шагом.

Дальнейшее разбиение ОЭПП на подклассы можно осуществлять по конструктивному решению. Например, преобразователи угловых перемещений подразделяются на:

- преобразователи со встроенными подшипниками и цельным валом;

- преобразователи со встроенными подшипниками и полым валом;

- преобразователи со встроенной муфтой;

- преобразователи без подшипников.

В свою очередь, преобразователи линейных перемещений по типу конструкции подразделяются на *закрытые*, *открытые* и *штоковые* преобразователи.

В настоящем пособии будет рассмотрен основной принцип действия линейных преобразователей, реализующих прямое преобразование информации путем последовательного счета, так называемых инкрементных и квазиабсолютных ОЭПЛП. Это рассмотрение позволит сформировать представление о функционировании основных элементов ОЭПП, которые также применяются в большинстве преобразователей других классов и категорий.

ГЛАВА 2 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИНКРЕМЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

При инкрементном способе измерения КС представляет собой пространственно-периодическую структуру на основе стеклянных или плёночных растров или голограмм. Информация о положении получается путём подсчёта шагов измерения от некоторой точки отсчёта.

При включении инкрементные преобразователи показывают нулевое значение. При перемещении КС относительно АС преобразователь вырабатывает сигналы, которые увеличивают или уменьшают (в малых долях) измеренную величину.

Принцип работы ОЭПЛП основан на регистрации относительной величины прошедшего через систему КС-АС потока оптического излучения как координатно-периодической функции взаимного пространственного положения КС и АС. При этом пучки лучей могут проходить через КС или отражаться от нее. Соответственно, различают ОЭПЛП, работающие в прошедших или отражённых пучках лучей.

2.1 Основные принципы действия оптико-электронных инкрементных преобразователей перемещения при работе в проходящих пучках лучей

В основу принципа действия большинства ОЭПЛП, работающих в проходящих пучках лучей, положен принцип растровой модуляции. Принцип действия ОЭПЛП, использующего сопряжение двух растров, легко понять из рис. 2.1, на котором изображены два растра 1 - КС и 2 - АС. КС 1 подвижна и перемещается вдоль направления *x*, указанного стрелками.



Рисунок2.1 – Схема оптической части ОЭПЛП, работающего в проходящих пучках лучей

Источник излучения 3, находящийся в фокальной плоскости линзы 4, освещает параллельным пучком света сопряжение растров КС 1 и AC 2 с одинаковым шагом *w*. За растром AC 2 расположены ПОИ $\Phi\Pi_1 - \Phi\Pi_4$. Каждый ПОИ смещен друг относительно друга на четверть шага растра (*w*/4), поэтому электрические сигналы U₁, U₂, U₃, U₄ (рисунок 2.2 a, б) на каждом ПОИ от потока оптического излучения при перемещениях *x* КС будут сдвинуты по фазе φ на $\pi/2$ (рисунок 2.2 б) относительно предыдущего ПОИ. Для формирования каждого из квадратурных сигналов ПОИ включают попарно через один, т. е. $\Phi\Pi_1$ с $\Phi\Pi_3$ и $\Phi\Pi_2$ с $\Phi\Pi_4$, по балансной схеме.

При перемещении КС в одном направлении изменение первого квадратурного сигнала U_I, создаваемого парой ПОИ ФП₁ и ФП₃, отстает на четверть периода от изменения второго квадратурного сигнала U_{II}, ПОИ $\Phi \Pi_2$ И $\Phi \Pi_4$, при перемещении создаваемого парой а противоположном направлении второй квадратурный сигнал отстает от первого на ту же четверть периода. Поэтому знак фазового сдвига между квадратурными сигналами характеризует направление измеряемого перемещения.



Рисунок 2.2 – Схема элементарных преобразований сигналов в СПОИ ОЭПЛП при формировании четырех импульсов на каждую полосу Синусоидальные квадратурные сигналы могут быть преобразованы с помощью, например, триггеров в прямоугольные сигналы A, B, \overline{A} и \overline{B} , (рисунок 2.2 б). В результате измеряемое перемещение представляется последовательностью однородных прямоугольных импульсов, причем каждый импульс соответствует перемещению КС на один шаг w. Число импульсов подсчитывается электронным реверсивным счетчиком PC (рисунок 2.2 а), в котором непосредственно отсчитываются периоды КС.

Для повышения разрешения инкрементных преобразователей идут не только по пути применения в качестве КС дифракционных решеток с более мелким шагом, но и используют интерполяцию – способы дробления шага сопрягаемых растров на 4 - 20 частей.

На рисунке 2.2 б представлены блок-схема и диаграмма работы отсчетного устройства с реверсивным счетчиком штрихов КС, позволяющего получить четыре импульса на каждый шаг растра.

От ПОИ балансных пар синусоидальные сигналы U_I и U_I, сдвинутые по пространственной фазе на $\pi/2$, поступают в формирователи Φ_1 и Φ_2 . Каждый из формирователей имеет по два выхода. С одного выхода формирователя снимается прямоугольное напряжение с той же фазой, что и входной синусоидальный сигнал, а с другого выхода — прямоугольное напряжение с фазой, сдвинутой на 180° по отношению к первому. Обычно формирователи представляют собой последовательное соединение триггера и потенциального инвертора. В результате на выходах формирователей Φ_1 и Φ_2 образуются четыре прямоугольных напряжения A, B, A и B, три из которых сдвинуты относительно каждого предыдущего на величину $\pi/2$ по пространственной фазе. Эти напряжения служат для управления блоком реверса счетчика PC полос.

Для формирования импульсов сложения служат четыре схемы совпадения $U_1 - U_4$, с выхода которых импульсы поступают на схему собирания ИЛИ₁. Для формирования импульсов вычитания используются схемы совпадения U_5 , - U_8 , с выхода которых импульсы поступают на схему собирания ИЛИ₂. Все схемы совпадения имеют один потенциальный и один импульсный вход. На потенциальные входы схем И подаются прямоугольные напряжения A, B, \overline{A} и \overline{B} , а на импульсные входы - импульсы a, b, \overline{a} и \overline{b} , полученные дифференцированием положительных фронтов прямоугольных напряжений дифференцирующими цепочками Д1 — Д8. Из схемы (рисунок 2.2 а) можно увидеть, что при движении КС в направлении (+) на реверсивный счетчик PC поступают сигналы сложения

$$V = a \overline{B} + b A + \overline{a} B + \overline{b} \overline{A}.$$

При движении КС в обратном направлении (-) на реверсивный счетчик РС поступают сигналы вычитания

$$R = a B + b \overline{A} + \overline{a} \overline{B} + \overline{b} A$$

При перемещении КС на один шаг на счетчик подаются четыре импульса, т. е. данное накапливающее устройство имеет разрешение, соответствующее 1/4 шага растра.

Если из схемы электронного блока исключить дифференцирующие цепочки Д₂, Д₄, Д₆, Д₈ и схемы совпадения И₂, И₄, И₆, И₈, то получим накапливающее устройство с разрешением, соответствующим 1/2 шага растра. Путем же некоторого усложнения блока выработки счетных импульсов можно увеличить разрешение отсчетного устройства вдвое. На рис. 2.3 показана блок-схема отсчетного устройства с РС, позволяющего получить восемь импульсов на один шаг растра. От ПОИ балансных пар синусоидальные сигналы U_I и U_{II}, сдвинутые по пространственной фазе на $\pi/2$, поступают на формирователи Φ_1 , Φ_2 и суммирующе-вычитающее устройство (СВУ), которое вырабатывает суммарный сигнал U_{II} = U_I + U_{II} и разностный сигнал U_{IV} = U_I - U_{II}.



Рисунок 2.3. – Накапливающее отсчетное устройство с формированием восьми импульсов на каждый шаг КС

Сигналы U_{III} и U_{IV} подаются соответственно на формирователи Φ_3 и Φ_4 . Каждый из формирователей Φ_1 - Φ_4 имеет по два выхода. С одного

выхода формирователя Φ_i , снимается прямоугольное напряжение T_i с той же фазой, что и входной синусоидальный сигнал, а с другого выхода - прямоугольное напряжение T'_i с фазой, сдвинутой на 180° по отношению к T_i . Прямоугольные напряжения $T_1 - T_4$, $T'_1 - T'_4$ поступают на логические элементы ИЛИ - НЕ, с выходов которых снимаются сигналы

$$\begin{array}{ll} A = T_1 T_2 T_3 T_4; & D = T_1 T_2 T_3 T_4; & G = T_1 T_2 T_3 T_4; \\ B = T_1 T_2 T_3 T_4; & E = T_1 T_2 T_3 T_4; & H = T_1 T_2 T_3 T_4; \\ C = T_1 T_2 T_3 T_4; & F = T_1 T_2 T_3 T_4; \end{array}$$

Сигналы *A, B, C, D, E, F, G, H* поступают на дифференцирующие цепочки Д и на группы схем совпадения $И_1$ и $И_2$. Сигналы a, b, c, d, e, f, g, h, являющиеся производными прямоугольных сигналов A, B, C, D, E, F, G, H, поступают с выходов дифференцирующих цепочек Д на вторые входы схем совпадения $И_1$ и $И_2$. Группа схем совпадения $И_1$ формирует сигналы сложения

 $V = A \ b + Be + Cd + De + Ef + Fg + Gh + Ha$, а группа схем совпадения $И_2$ — сигнал вычитания

R = A h + Ba + Cb + Dc + Ed + Fe + Gf + Hg.

При перемещении КС на один шаг в реверсивный счетчик РС подаются восемь импульсов, т. е. рассмотренное накапливающее устройство имеет разрешение, соответствующее 1/8 шага растра. В накапливающем устройстве можно предусмотреть блок индикации (БИ) для фиксации дробных частей шага растра.

Выпускаемые промышленностью линейные и цифровые интегральные схемы позволяют создать накапливающие преобразователи с делением шага на 8, удовлетворяющие всем требованиям в отношении точности интерполяции и надежности работы (разд. 4.3).

Рассмотренные схемы для растровых ОЭПЛП позволяют получить разрешающую способность в 2 или 1 мкм, если применять КС с шагом, равным 8 мкм, и делить шаг КС на 4 или 8 частей.

2.2 Принципиальные особенности преобразования перемещения для КС с реперными метками

Инкрементный способ недостаточно удобен для многих задач. Чтобы получить известное начало отсчёта, в современных ОЭППЛ для подсчёта электрических импульсов от шкалы 1 КС 3 (рисунок 2.4) вводится опорный сигнал (так называемый «опорный импульс») от реперной метки 2, устанавливающий абсолютное положение КС 1 (в зарубежных и отечественных источниках большое распространение получило название «референтный сигнал»). Реперная, или референтная, метка 2 состоит из набора линий, ширина которых, как и ширина псевдослучайное прозрачных полос. имеет распределение. Они рассчитаны так, чтобы обеспечить прохождение максимального потока оптического излучения при автокорреляции, т.е. когда линии референтной

АС, идентичные линиям референтной метки КС 1, метки на накладываются непосредственно друг на друга. В других положениях КС 1 (взаимная корреляция) проходит только часть этого потока, что создаёт (рисунок 2.2 б). сигнал U5 Стробируя сигнал U_5 по уровню прямоугольными импульсами электронного интерполятора, получаем референтный сигнал U_{оп}, который по ширине составляет одну дискрету. Таким образом, после включения ОЭПЛП на электронном выходе считывающей головки, которая проходит через референтную метку, создаётся импульс опорного сигнала, который даёт возможность в устройстве цифровой индикации или электронном блоке управления присвоить заданному положению конкретное значение.

При решении некоторых задач довольно сложно найти референтную метку 2, особенно на длинных КС 1 или в случаях большой вероятности сбоя. Важное усовершенствование представляют собой абсолютные ОЭПЛП, имеющие референтные метки, кодированные по дистанции, поскольку они могут обеспечить абсолютную связь на относительно коротких дистанциях перемещения, используя только три сигнала (синусный, косинусный и опорный сигнал). При этом референтные метки располагаются по простому алгоритму. Пример такого расположения показан на рис. 2.4. В этом случае абсолютное значение перемещения рассчитывается, как только пройдены две соседние референтные метки 2.



Рисунок 2.4 – КС ОЭПЛП с референтными метками на кодированных расстояниях

В квазиабсолютных ОЭПЛП текущая координата начинает определяться лишь после прохождения референтной метки 2 путем подсчёта периодов сигналов между двумя референтными метками по следующей формуле [9]:

$$P_1 = \left(|B| - \operatorname{sgn}(B) - 1 \right) \cdot N + \frac{\left(\operatorname{sgn}(B) - \operatorname{sgn}(D) \right) \cdot |M_{RR}|}{2},$$

$$B = 2 \cdot M_{RR} - N$$

где P_1 – положение первой пройденной референтной метки в периодах сигнала; sgn – функция, принимающая значение +1 или –1 в зависимости от знака аргумента; M_{RR} – количество периодов сигналов между пройденными референтными метками; N – номинальное приращение между двумя фиксированными референтными метками в периодах сигнала; D – направление перемещения; $D = \pm 1$ (перемещение вправо соответствует +1).

В моделях ЛИР-7, ЛИР-8, ЛИР-9, ЛИР-10 ОАО «СКБ ИС» (Россия) при относительном перемещении КС 1 (рисунок 2.5) и АС 2, содержащей растровый анализатор, происходит модуляция потока, создаваемого инфракрасными ПИД 3, расположенными на плате И 4. Модулированный поток излучения регистрируется кремниевыми ФД 5, размещенными на плате ФПМ 6 [10].



Рисунок 2.5 – Схема ОЭПЛП с реперными метками и неподвижной КС

Отличительной особенностью схем таких устройств является то, что АС размещена непосредственно за ИОИ и перемещается вместе с ПОИ, а КС стоит перед ПОИ и неподвижна.

Как и в ранее рассмотренном случае, AC 2 (рисунок 2.6) имеет четыре ПОИ и четыре поля считывания A, Ā, B, \overline{B} . Эти поля считывания образуют два идентичных канала приёма излучения: A-Ā и B- \overline{B} , – и обработку сигналов, представленную схемой на рисунке 2.3. Таким образом, узел считывания даёт возможность повысить разрешающую способность ОЭПЛП в четыре раза по сравнению с шагом КС.

На АС (рисунок 2.6) имеется поле «Б» с рисунком (кодом), почти аналогичным коду полей «А» и «В» КС, и поле «Г», являющееся простой диафрагмой. Поле «Г» используется для создания сигнала опорного уровня. ПИД 7, 8 и ФД 9, 10 (рисунок 2.5) совместно с полями «Б» и «Г» образуют канал формирования сигнала референтной метки. При относительном перемещении КС относительно АС в зоне совмещения полей референтной метки происходит модуляция потока оптического излучения, и на выходе ПОИ формируется электрический сигнал U₅ автокорреляционной (рисунок 2.2 б) функции кода, который В нормирующем преобразователе (НП) СПОИ стробируется основными сигналами и преобразуется в импульсный сигнал U_{оп} референтной метки.

Оптические схемы фирмы Heidenhain характерны тем, что AC (рисунки 2.7, 2.8) также размещена непосредственно за источником коллимированного оптического излучения, а ПОИ расположены непосредственно за КС [11].



Рисунок 2.6 – Анализирующая структура ОЭПЛП ЛИР-7 - ЛИР-10



Рисунок 2.7 – Схема ОЭПЛП фирмы Heidenhain с ячеистыми ПОИ

При этом в ОЭПЛП с четырьмя ПОИ (рисунок 2.7) АС выполнена в виде четырех растровых структур, штрихи окон которых дублируют

штрихи КС, параллельны им и смещены на четверть шага периода шкалы (w/4). Поэтому сигналы с ПОИ сдвинуты по фазе на 90° относительно друг друга (напряжения U₁, U₂, U₃, U₄ на рисунок 2.2 б). Обработка сигналов осуществляется аналогично вышеописанной.

В ОЭПЛП фирмы Heidenhain с ПОИ в виде решетки (рисунок 2.8) шаг фоточувствительной решетки имеет отличие от шага на АС. Отличие в шаге фоточувствительной решетки составляет 0,25 шага w АС. При этом ячейки фоточувствительной решетки подключены параллельно друг другу через три, образуя гребенчатую линейную матрицу (рисунок 3.3).

Такая композиция элементов ОЭПЛП позволяет повысить эксплуатационные характеристики, обусловленные условиями размещения КС и АС.

2.3 Преобразование перемещения при работе в отраженных пучках лучей

Большинство ОЭПЛП, работающих в отраженных пучках лучей, используют принцип интерполирования сигналов с ПОИ, подробно изложенный в подразделе 2.2.10 и который за рубежом часто называют принципом оптико-электронного сканирования [9].



Рисунок 2.8 – Оптическая схема ОЭПЛП фирмы Heidenhain с ПОИ в виде решетки

При работе в отраженных пучках лучей поток оптического излучения от коллиматора (рисунок 2.9) проходит через штрихи (тёмные и светлые полосы) АС, проектируется на КС (штриховую меру с аналогичным периодом штрихов) и, отражаясь, приходит на ПОИ, выполненный в виде решетки. Оптические сигналы с ПОИ преобразуются

в четыре сигнала (рисунок 2.2 б), обработка которых осуществляется аналогично описанному в подразделе 2.2.1.

Расположенные на АС оптические фильтры создают близкие к синусоидальным выходные электрические сигналы. Величину периода шкалы ограничивает минимально допустимый зазор между КС и АС, в противном случае глубина модуляции существенно палает допуски для (рисунок 3.10 [2]). Практические зазора при монтаже преобразователей на принципе сканирования изображения обычно нормируются разработчиками [9, 10, 11, 13, 14] и сильно зависят от класса точности ОЭПЛП.



Рисунок 2.9 – Оптико-электронное преобразование линейного перемещения в отраженном потоке оптического излучения

При работе в отраженных пучках могут использоваться непрозрачные шкалы из материалов типа стали или Церодура (Zerodur). КС состоит из хорошо отражающего материала, прикреплённого к полированной поверхности шкалы. На стальных шкалах линии решетки обычно выполняют из золота из-за его высоких отражающих свойств. Маска, вытравленная на поверхности между линиями, поглощает оптическое излучение или отражает его диффузно.

При работе в отраженных пучках лучей в ОЭПЛП в основном используют два принципа обработки информации с КС:

- дифракционный принцип для шкал с периодом от 10 до 200 мкм;

- интерференционный принцип для очень точных шкал с периодом от 4 мкм и меньше.

2.3.1. Дифракционный принцип формирования и обработки информации с КС

При работе в отраженных пучках лучей в АС используют ряд из нескольких окон (рисунок 2.10), каждое из которых состоит из двумерной дифракционной решётки с изменяющимися поперечными периодами. Каждое отдельное окно разделяет пучок лучей на два противофазных луча, перпендикулярных направлению измерения. Совместно с амплитудной дифракционной решёткой КС ЭТО создаёт два пучка лучей, при перемещениях модулированных КС В противофазе, которые регистрируются двумя ФД. Фоточувствительными ячейками создаются два электрических сигнала от соответствующих участков шкалы.

Электронная схема обработки создаёт высокостабильный сигнал, даже если параметры отражения от КС немного изменятся из-за дефектов материала или загрязнения. Этот принцип особенно хорошо подходит для использования КС на стальной ленте с периодами штрихов более 40 мкм и преобладают в преобразователях с большими длинами перемещения – более чем 3 м.



Рисунок 2.10 – ОЭПЛП в отраженном потоке при прямом ходе лучей от источника

Особенностью рассмотренной схемы является осесимметричность конструкции, в которой ИОИ расположен по центру, а ПОИ (вследствие дифракции оптических пучков на КС и АС) – по краям поля зрения объектива.

2.3.2. Интерференционный принцип формирования и обработки информации с КС

Простой, но грубый интерференционный метод сканирования, пригодный для очень малых периодов решёток (8 мкм и 4 мкм), изображен на рис. 2.11, где КС – фазовая дифракционная решетка отражательного типа. Отражающие линии высотой около 0,2 мкм нанесены на плоскую отражающую поверхность. Период решетки *w* соответствует одной четверти длины волны излучения инфракрасного ПИД, используемого для считывания. Излучение ПИД направлено на объектив под углом к его оптической оси.

На расстоянии примерно 1 мм от шкалы находится AC в виде фазовой дифракционной решётки, работающей на просвет. Период этой решётки равен периоду дифракционной решётки KC. Дифракционная фазовая решётка AC сконструирована так, что поток излучения в порядках дифракции –1, 0, +1 примерно одинаков.



Рисунок 2.11 – ОЭПЛП с анализом интерференционной картины при наклонном ходе лучей от источника

ИОИ (инфракрасный ПИД) и объектив (рисунок 2.12) создают плоскую волну. Она падает на АС и разделяется на три сопряжённых пучка, примерно равные по интенсивности. Эти пучки доходят до КС и дифрагируют таким образом, что наибольший поток излучения находится в дифракционных порядках 1 (красный) и –1 (зелёный) отражённых пучков лучей. Эти сопряженные пучки лучей снова встречаются на АС (фазовой дифракционной решётке), где они снова дифрагируют и интерферируют. Это, в конечном счете, создаёт три пучка лучей, которые выходят из AC под разными углами. Объектив коллимирует их прямо на три $\Phi Д$ (2 Ω , 2 Ω +2 ψ и 2 Ω -2 ψ), которые преобразуют падающее излучение в электрические сигналы.

Дифракция на шкале даёт волновые фронты *n*-го порядка дифракции фазы с фазовым сдвигом Ω при перемещении на расстояние *x* в направлении измерения, где $\Omega = 2\pi nx / w$. Когда штрихи перемещаются на 1 период, волновой фронт первого порядка дифракции соответственно смещается на одну длину волны в положительном направлении, а дифракционный порядок –1 перемещается на такое же значение в отрицательном направлении. Так как пучок лучей каждого порядка дифракции +1 и –1 интерферирует на выходе решётки, длины волн в пучках сдвинуты относительно друг друга на две длины волны. Это приводит к тому, что смещение решётки на один период создаёт 2 периода сигнала.



Рисунок 2.12 – Принцип действия интерференционного ОЭПЛП (ψ - сдвиг фазы, возникающий при проходе через АС; Ω - сдвиг фазы, возникающий из-за перемещения КС)

Параметры АС могут изменяться таким образом, что пучок лучей 0го порядка подвергается фазовому сдвигу ψ относительно дифракционных порядков +1 и -1. Это создаёт вдобавок постоянный фазовый сдвиг 2ψ между интерферирующими пучками разного направления. ФД создают три сдвинутых по фазе синусоидальных сигнала, которые соответствуют считываемым сигналам.

Считываемые сигналы создают в интерференционных измерительных системах сигнал, в значительной степени свободный от дополнительных гармонических составляющих. Этот сигнал может быть с высокой точностью электрически интерполирован. Анализ интерференции в схеме с тройной решёткой (рисунок 2.12) проведен А. Спайсом (A. Spies) в литературе [11].

Особый интерес представляют схемы преобразователей типа RG4 и RG2 британской компании Renishaw [12, 13, 14], построенные с применение уникальной системы фильтрации оптического сигнала, отражённого от КС. Модель типа RG2 имеет КС с шагом штрихов 20 мкм и обеспечивает превосходную стабильность выходного сигнала даже при эксплуатации в цеховых условиях.

В схеме преобразователя типа RG2 излучение инфракрасного ПОИ в считывающей головке (рисунок 2.13) проходит через объектив, отражается от KC, выполненной в виде масштабной ленты с измерительной шкалой RGS с наклонными позолоченными гранями (выноска на рисунке 2.13), и, проходя сквозь AC в виде прозрачной фазовой дифракционной решетки, возвращается обратно в считывающую головку, в результате чего в плоскости ПОИ образуются интерференционные полосы.



Рисунок 2.13 – Оптическая схема ОЭПЛП типа RG2

Оптическая схема устроена таким образом, что она усредняет вклад в интерференционную картину от 80 масштабных штрихов КС и игнорирует сигналы, не соответствующие расстоянию между масштабными штрихами. За счет этого обеспечивается стабильность выходного сигнала даже в том случае, если масштабная лента немного повреждена или на ней присутствует загрязнение.

Оптическая схема преобразователей типа RG4 (рисунок 2.14) с шагом измерительной шкалы 40 мкм имеет много общего со схемой типа RG2, в связи с чем у этих систем много общих достоинств. Вместе с тем, между ними есть и различия, благодаря которым RG4 обладает рядом дополнительных преимуществ. Так, например, за счёт увеличенного до 40 мкм расстояния штрихами измерительной между шкалы, преобразователь RG4 может работать при значительно больших, чем RG2, перемещения. RG4 также требуется меньшая скоростях точность установки, а расположение оптических элементов в считывающей головке таково, что она может считывать сигнал, отражённый от самых различных шкал.



Рисунок 2.14 – Оптическая схема открытого ОЭПЛП типа RG4

Результирующая точность измерений сильно зависит от тепловых свойств измерительной шкалы RGS. Концы шкалы жестко закрепляются при установке, поэтому при изменении температуры ее размеры изменяются с тем же коэффициентом расширения, что и поверхность, на которую она наклеена. Благодаря этому при учете влияния температуры нет необходимости вводить дополнительный коэффициент теплового расширения.

Сверху на позолоченную линейку RGS наносится защитное лаковое покрытие, которое предохраняет ее от повреждения и упрощает техническое обслуживание системы. Наличие самоклеющейся основы упрощает процедуру установки масштабной ленты и сводит к минимуму процедуру подготовки поверхности вдоль оси перемещения.

Схемы построения современных ОЭПЛП открытого типа отличаются конструкцией КС. Так ОЭПЛП с измерительной шкалой на инваровой линейке **SIGNIMTM** RELM фирмы Renishaw состоит из считывающей головки **SIGNIMTM** SR, интерфейса Si и линейки RELM, выполненной в виде узкой пластины.

КС RELM содержит референтную метку Renishaw *IN-TRACTM* (рисунок 2.15), которая находится в центре линейки.

Референтная метка *IN-TRACTM* обеспечивает автоматическую синхронизацию и двустороннюю повторяемость нулевого сигнала во всём интервале температур и при всех рабочих скоростях перемещения, а её наличие совершенно не влияет на размеры ОЭПЛП.



Рисунок2.15 – Оптическая схема ОЭПЛП открытого типа SIGNIMTM RELM фирмы Renishaw

КС RELM является плоской металлической отражающей решёткой, имеющей период 20 мкм. Равномерное нанесение штрихов существенно влияет на метрологические характеристики ОЭПЛП, однако шкала RELM не обязана быть хорошей дифракционной решёткой: для уникальной оптической схемы, примененной в считывающей головке, существенно лишь строгое постоянство расстояния между соседними масштабными штрихами. Эта особенность оптической схемы преобразователя связана с принципом получения интерференционных полос, образуемых в плоскости ПОИ считывающей головки отражённым от измерительной шкалы оптическим излучением.

Прозрачная фазовая дифракционная решётка создаёт «изображение» КС, отфильтровывая при этом непериодические помехи, обусловленные загрязнением поверхности линейки. При этом из номинально прямоугольной пространственной структуры решётки в плоскости ПОИ

формируется синусоидальная пространственная интерференционная картина. ПОИ представляет собой периодическую структуру, которая позволяет получать фототок в форме четырёх симметричных сигналов с постоянной разностью фаз между ними (см. подраздел 2.1.1).

После этого происходит дальнейшая обработка сигнала: автоматическая регулировка усиления по каждому каналу, активная регулировка разности фаз между каналами и автоматическая регулировка мощности излучения ПИД, расположенного внутри считывающей головки **SIGNIM**TM.

Оптическое излучение, отражённое от референтной метки ІЛ- $TRAC^{TM}$, (рисунок 2.15) собирается цилиндрической линзой И регистрируется отдельным ПОИ внутри считывающей головки. Система фильтрации оптического сигнала исключает попалание сигнала референтной метки на основной ПОИ головки. С помощью детектора уровня сигнала и специальной схемы синхронизации формируется референтной повторяемость которого выходной сигнал метки, соответствует линейному или угловому разрешению системы при любой рабочей скорости перемещения. Синхронизация сигнала референтной метки с аналоговыми выходными сигналами преобразователя выполняется при установке преобразователя благодаря наличию внутри интерфейса специальной логической схемы, которая также позволяет осуществлять комплексный мониторинг ОЭПЛП и упрощает его настройку [12, 13, 14].

2.3.3. Двухкоординатные преобразователи линейных перемещений с фазовой дифракционной решёткой

Используя уникальные возможности голографии при изготовлении дифракционных решёток сложной конфигурации, можно получить голографическую дифракционную решётку с взаимно ортогональными штрихами. При этом необходимо использовать три скрещенных пучка когерентного оптического излучения. Для этой цели использовался трёхлучевой интерферометр, представленный на рисисунке 2.16 [15].

Работа интерферометра происходит следующим образом. Коллимированный пучок излучения лазерного модуля 1 падает на светоделительную пластину 2. Прошедший луч падает на вторую светоделительную пластину 4, а отражённый луч направляется зеркалом 3 на голограмму 6. Отражённый пластиной 4 луч направляется зеркалом 5 на голограмму 6, куда приходит и прошедший луч. Отметим, что лучи, отраженные полупрозрачными зеркалами 2 и 4, направлены под углом 90° друг к другу и к оси системы. Таким образом, на голограмму приходят три коллимированных пучка, которые создают интерференционное поле с ортогональными интерференционными полосами.





Рисунок 2.16 – Оптическая схема двухкоординатного голографического ОЭПЛП

Рисунок 2.17 – Конструкция двухкоординатного ОЭПЛП

На рисунке 2.16 позиции 7 и 8 указывают также и обтюрационные полосы. При движении голограммы вдоль направления *x* полосы побегут перед ПОИ 7, а перед ПОИ 8 будут неподвижны. При смещении голограммы вдоль направления *y* получим обратную картину.

На рисунке 2.17 показан преобразователь с двухкоординатным растром на стеклянной подложке. Сигналы, созданные интерференцией в считывающей головке, имеют период 4 мкм по каждой координате и обеспечивают дискретность от 0,1 мкм или меньше. Диапазон контроля составляет примерно 65 × 65 мм. Референтные метки обеспечены на обоих направлениях перемещения.

Многообразие принципиальных схем ОЭПП и их конструкций приводят к необходимости последовательного рассмотрения в настоящем учебном пособии особенностей выбора основных оптоэлектронных элементов схемы (ИОИ, ПОИ и предусилителей), а также расчета параметров оптических элементов (объективов, КС и АС).

ГЛАВА **З** ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В процессе проектирования ОЭПП возникает множество вопросов по выбору элементов схемы для её надежного функционирования. Основные вопросы связаны с выбором источников и приемников оптического излучения, согласование их параметров с КС и электронной частью ОЭПП.

3.1 Источники излучения для ОЭПП

Как уже отмечалось в разделе 1.1, в ОЭПП излучатель И (рисунок 1.1) может содержать один или несколько ИОИ.

В 80-е годы прошлого столетия в ОЭПП [2] в качестве ИОИ использовались лампы накаливания в силу простоты их обслуживания, надежности, достаточно малых габаритов и малой стоимости. Однако невозможность внутренней модуляции излучения и значительное энергопотребление заставили перейти к другим ИОИ.

В последние годы в ОЭПП все более широкое применение находят полупроводниковые излучающие диоды (ПИД) и полупроводниковые лазеры, которые обладают высоким к.п.д., малыми габаритами и удобством подключения к источнику питания [16].

Стабильность мощности излучения ПИД во времени, а также большая мощность излучения при высоком внешнем квантовом выходе делают предпочтительным использование ПИД на основе эпитаксиальных p-n-структур, выполняемых на основе AlGaAs.

Важнейшие параметры ПИД, наиболее часто применяемых в отечественных ОЭПП, приведены в табл. 3.1 и 3.2 [17, 13].

Для строгого расчета потока излучения от ИОИ необходимо знать его индикатрису излучения, которая, как правило, имеет сложную форму. Тогда для определения потока излучения, поступающего от ИОИ в оптическую систему, приходится суммировать потоки, распространяющиеся в малых зональных телесных углах, в пределах переднего апертурного угла оптической системы [18].

Исследования показали [19], что при расчетах яркости *L* серийно выпускаемых ПИД АЛ107Б, АЛ115, АЛ119 необходимо вводить коррекционный множитель *К*_{ПИД} т.е.

$$L = 4K_{\Pi M \Pi} P_e / \left[\pi d \sin(\theta / 2) \right]^2 , \qquad (3.1)$$

где *P*_e - мощность излучения; θ - угол излучения ПИД (в пределах которого сила излучения составляет не менее 50% от максимального значения); *d* - диаметр круглой излучающей поверхности ПИД.
Для рассматриваемых ПИД коррекционные множители определены на основе экспериментов и равны 0,70 для АЛ107Б и 0,73 для АЛ115 и АЛ119.

При отсутствии сведений о форме индикатрисы можно воспользоваться приближенными формулами. Для ПИД полусферической конструкции справедливо выражение (3.1) в предположении, что $K_{\Pi U \Pi} = 1$.

Таблица 3.1. Электрические и оптические характеристики ПИД ЛИР (Т_{окр. среды} = 25 °C)

	Обоз-	Vелория	Значение			Единицы
Параметр	наче-	у СЛОВИЯ измерения	MIIII	тип.	макс.	измере-
	ние	измерения	мип.			ния
Сила излучения	Ι	$I_{np.} = 20 \text{ MA}$	10	20	30	мВт/ ср
Мощность оптического излучения	Р	$I_{np.} = 20 \text{ MA}$	3	4	5	мВт
Полный угол излучения	φ	$I_{\rm np.} = 20 \text{ MA}$	20	25	30	угл. градус
Прямое постоянное напряжение	$U_{\pi p.}$	I _{пр.} = 20 мА	1,5	1,65	1,8	В
Обратное постоянное напряжение	U _{обр.}	I _{обр.} = 20 мкА		5		В
Время включения/выключения	$t_{r/f}$	Уровень 0,1-0,9	25	30	35	нс
Спектральный максимум излучения	$\lambda_{max.}$	I _{пр.} = 20 мА	860	880	890	HM

Примечание. *I*_{*np*} – прямой ток ПИД; *I*_{*oбp*} – обратный ток ПИД.

Полупроводниковые лазеры [20] являются перспективными ИОИ, так как они имеют малые габариты и массу, высокое быстродействие, могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме, потребляют небольшую мощность низковольтного источника питания.

Основные параметры импульсных полупроводниковых лазеров приведены в табл. 3.3 [21, 22]. Максимум излучения этих лазеров находится вблизи 0,9 мкм, длительность импульса составляет 100...200 нс при частоте повторения до 10 кГц.

Предварительный выбор ИОИ осуществляется в соответствии с требованиями рабочему спектральному диапазону к ОЭПП. определяемому условиями функционирования. Для уменьшения габаритов системы следует применять ИОИ с максимальными оптической энергетическими параметрами, но эта возможность часто ограничена требованиями к габаритам и энергопотреблению ИОИ. Весьма важными являются временные параметры ИОИ, определяющие выбор вида модуляции потока излучения.

	Таблица	3.2.	Электрические	И	оптические	характери	стики	ПИД
ЛИР	l и ЛИР2 (в ско	бках даны значе	ния	ı для ЛИР2) п	при Т _{окр. сред}	ы = 25	°C

	0602-			Значен	ие	Едини-
Параметр	наче- ние	Условия измерения	МИН.	тип.	макс.	цы изме- рения
Полная мощность оптического излучения	Р	I _{пр} = 100 мА	15	20		мВт
Полный угол излучения	φ	I _{пр} = 100 мА		30 (120)		угл. градус
Прямое постоянное напряжение	U_{np}	$I_{np} = 100 \text{ MA}$ $I_{np} = 250 \text{ MA}$		1,6	1,8 2	В
Обратное постоянное напряжение	U_{odp}	I _{обр} = 10 мкА		5		В
Время включения/выключе ния	$t_{r/f}$	I _{пр} = 100 мА		50		нс
Спектральный максимум излучения	λ_{max}	I _{пр} = 100 мА	860	880	890	НМ
Полуширина спектра оптического излучения	$\Delta\lambda_{0,5}$	I _{пр} = 100 мА		30		НМ

Габаритные размеры основных ПИД марки ЛИР приведены на рисунке 3.1.

Таблица 3.3. Основные параметры импульсных полупроводниковых лазеров

	Мощность	Частота повторе-	Число диодов
Тип	импульса	ния импульсов,	(Р - решетка)
	излучения, Вт	кГц	
ЛПИ-10	5,2	6	1
ЛПИ-14	30	0,5	Р
ЛПИ-15	3	0,25	1
ИЛПИ-102	68	1,6	Р
ИЛПИ-107	10	25	Р
		(до 100)	
TA-7606	2	5	1
TA-7610	13	5	1
TA-7705	50	0,5	1
TA-7689	100	1	10
TA-7692	300	1	60
1000-С	1000	-	Р



Рисунок3.1 – Внешний вид и габаритные размеры ПИД марки ЛИР

3.2 Приемники оптического излучения ОЭПП и их схемы подключения

3.2.1. ПОИ для ОЭПП

Фотоприемный модуль (ФПМ) преобразует оптические сигналы, образованные в результате прохождения КС и АС, в электрические и содержит несколько ПОИ.

Требования к ПОИ включают в себя требования к спектральной чувствительности, быстродействию и отношению сигнал/шум, определяемому обнаружительной способностью или обратной ей величиной – порогом чувствительности.

Можно отметить, что большинство полупроводниковых ПОИ, используемых в ФПМ современных ОЭПП, представляют собой диодные и фототранзисторные структуры [23]. Простота их устройства позволяет достигнуть физического и конструктивного оптимума и обеспечить наиболее полное использование падающего потока излучения [24].

ФД обладают наилучшим сочетанием параметров, важнейших для использования в ФПМ ОЭПП: высокой чувствительности и быстродействия, линейности характеристики в широком диапазоне изменения мощности облучения. В сопоставлении с другими, более сложными ПОИ, кремниевые ФД обладают наибольшей температурной стабильностью характеристик и лучшими эксплуатационными свойствами. Все эти достоинства служат основанием для применения ФД в качестве ПОИ в ОЭПП.

Основные параметры кремниевых ФД, наиболее часто используемых в ОЭПП, приведены в табл. 3.4, 3.5 [25]. Внешний вид этих ПОИ приведён на рис. *3.2*.

Характ	КДФМ2-02	КДФМ4-02	КДФМ4-03	СФД4-01	СФД4-02	СФД4-03
еристика						
Область рабочих						
температур, °С	-60+85	-60+100	-60+85	-20+85	-20+85	-20+85
Эффективная						
фоточувстви-						
тельная площадь						
элемента, мм ²	3,5	2,75	2,75	2,75	2,75	3,2
Темновой ток						
при U = 10 В, нА	1(<10)	1(<10)	1(<10)	1(<10)	1(<10)	1(<10)
Монохромати-						
ческая						
чувствитель-						
ность, А/Вт, при:						
$\lambda = 365 \text{ HM}$		0,12	0,12	0,12	-	0,12
$\lambda = 660 \text{ hm}$		0,38	0,38	0,38	-	0,38
$\lambda = 780$ нм		0,48	0,48	0,48	0,40	0,48
$\lambda = 830 \text{ HM}$		0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Спектральный						
диапазон, нм	400-1100	400-1100	400-1100	400-1100	700-1100 4	400-1100
Длина волны						
максимума						
спектральной						
чувствитель-						
ности при U =						
= 10 B, HM		890	890	890	890	890
Емкость элемента						
при $f = 1 MI ц,$. 4 5		
$U = 0 B, \pi \Phi$	<55	<45	<45	<45	<45	<45
Время нарастания						
при $U = 15 B$,		25	25	25	25	20
$R_{\rm H} = 50 \text{ OM}, \text{ HC}$		25	25	25	25	20
Ψ ототок						
при $U = 5B$, E = 0.5 с $D = /22^2$						
$E_{3} = 0,3 \text{ MBT/CM}$	12(>0)	0(>7)	0(>7)	10(\7)	4.5(>4)	9(\7)
	12(-9)	9(//)	$\frac{9(-7)}{28+28}$	10(-7)	4,3(-4)	$\frac{0(-7)}{20+20}$
Газмер чипа, мм	$2,8 \times 3,2$	$3,8 \times 3,8$	$\frac{3,8 \times 3,8}{4}$	$3,0 \times 3,0$	$3,8 \times 3,8$	$\frac{2,0 \times 2,0}{4}$
Paryon doto	۷	4	4	4	4	- 4
газмер фото-						
Чувствительного	1.7×1.7	1.7×1.7	1.7×1.7	1.7×1.7	1.7×1.7	1 8 ~ 1 8
Элемента, мм	1,/ × 1,/	1,/ × 1,/	1,/ × 1,/	1,/ × 1,/	1,/×1,/	$1,0 \times 1,0$
межэлементный	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
зазор, мм	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
плоский угол						
		120	90	120	120	120
традусы	l	120	70	140	140	140

Таблица 3.4 Основные параметры кремниевых ФД

Примечание. U – напряжение питания ПОИ; f – частота модуляции; $R_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки; $E_{\rm 9}$ – эталонная облученность ПОИ.



Рисунок 3.2 – Внешний вид ПОИ марок КДФМ и СФД

Конструктивные размеры и электрическая схема ПОИ СФД4-08 представлены на рис. *3.3*.



Рисунок 3.3 – Внешний вид и электрическая схема ПОИ СФД4-08+

Таблица 3.5. Основные параметры ФД

Характеристика	СФД4-04	СФД4-05	СФД4-07	СФД4-08	СФД6-01	СФД16-01
Область рабочих						
температур, °С	-20+85	-20+85	-20+85	-20+85	-20+70	-20+85
Эффективная						
фоточувствительная						
площадь одного						
элемента, мм ²	3,2	1,6	3,5	0,38	1,6	1,57
Темновой ток при						
U = 10 В типичный						
(max), нА	1(<10)	1(<5)	1(<5)	1,0(5)	-	1(<5)
Монохроматическая						
чувствительность,						
А/Вт, при:						
$\lambda = 365 \text{ HM}$	-	0,12				
$\lambda = 660 \text{ hm}$	-	0,38				
$\lambda = 780 \text{ hm}$	0,40	0,48				
$\lambda = 830 \text{ HM}$	0,50	0,50				
Спектральный						350-
диапазон, нм	700-1100	320-1100	350-1100	350-1100	400-1100	1100
Длина волны макси-						
мума спектральной						
чувствительности						
при U = 10 В, нм	890	890		900		
Емкость элемента						
при f = 1 МГц,						
$U = 0 B, \pi \Phi$	<55	<25	<55	<55	<25	<25
Время нарастания						
(спада) при U = 15 В,						
$R_{\rm H} = 50 \text{ Om, Hc}$	12 (12,5)	10 (11)				
Фототок при U = 5B,						
E _э =0,5 мВт/см, мкА.	>7	>7	>9,5	>5	>4	>3,5
Разброс значений						
фототока, %	<10	<10	<10	<10	<15	<10
Размер чипа, мм	2,0x2,0	2,4x1,1	3,2x1,4	4,4x3,2	2,4x1,1	2,3x1,05
Число элементов	4	4	۷	20 (5)	6	16
Размер фоточувстви-						
тельного элемента, мм	$1,8 \times 1,8$	2,2 × 0,9		$0,19 \times 2,0$		
Межэлементный						
зазор, мм	0,4	0,4	0,4	0,01	3,5	0,27
Плоский угол зрения						
по уровню 0,5, угл.						
градусы	120	120		120		

ФД могут работать в двух режимах: фотогальваническом (без внешнего источника питания) и в фотодиодном (с внешним источником). фотогальваническом режиме ниже уровень шумов, В но мала чувствительность нелинейна энергетическая характеристика. И В фотодиодном режиме достигается высокая чувствительность, линейная энергетическая характеристика, но выше уровень шумов.

При выборе ФД следует учитывать следующие его параметры и чувствительность характеристики: интегральную S_{uhm} , порог чувствительности в единичной полосе частот Φ_{nl} , время установления нормированной переходной характеристики $\tau_{\rm vcr}$; относительную характеристику чувствительности $S_{omh}(\lambda)$, частотную спектральную характеристику чувствительности S(f) [24, 26].

Также интерес представляют позиционно-чувствительные И ОЭПП перемещения оптопары в контроля лля системах И позиционирования. Характеристики одной из таких оптопар модели К345 приведены в таблице 3.6 [25] Внешний вид лицевой стороны оптопары К345 показан на рис. 3.4.

По порогу чувствительности ПОИ выбирается таким образом, чтобы минимальный поток, падающий на ПОИ, в несколько раз превышал порог чувствительности (подробнее см. подразд.4.1.1).



Рисунок 3.4 – Внешний вид оптопары К345 с лицевой стороны

При выборе ПОИ необходимо также учитывать время установления нормированной переходной характеристики, которое ограничивает быстродействие ОЭПП.

Характеристика	Значение
Область рабочих температур, °С	-20+85
Эффективная фоточувствительная площадь элемента, мм2	1,6
Темновой ток ПОИ при U = 5 В, нА	<5
Фототок при U = 5 B, $E_3 = 0,5$ мBт/см ² , мкA	>4
Разброс значений фототока, %	<10
Спектральный диапазон чувствительности ПОИ, нм	320 - 1100
Спектральный диапазон излучения ПИД, нм	860 - 890
Емкость ПОИ при f = 1 МГц, U = 0 В, пФ	<25
Время нарастания (спада) при U = 15 В, $R_{_{\rm H}} = 50$ Ом, нс	11
Предельная частота при U = 10 В, $R_{_{\rm H}}$ = 50 Ом, МГц	20
Размер чипа ПОИ, мм	2,4 × 1,1
Размер фоточувствительного окна, мм	2,2 × 0,9
Число фоточувствительных элементов	8
Межэлементный зазор (по фоточувствительным окнам), мм	0,4
Падение прямого напряжения ПИД при $I_{np} = 30$ мA, В	< 1,6
Обратный ток при U = 5 В, мкА	< 10
Плоский угол зрения ПОИ (по уровню 0,5), угл. градусы	120
Плоский угол излучения ИД (по уровню 0,5), угл. градусы	60
Излучаемая мощность при I = 30 мА, мВт	> 4
Синусоидальный ток при f < 13,5 МГц, мА	< 150
Габариты без выводов, мм	$11,0 \times 8,8 \times 1,4$

Таблица 3.6. Характеристики оптопар модели К345

3.2.2. Схемы подключения ПОИ в ОЭПП

Как уже отмечалось в подразделе 3.2.1, в ОЭПП чаще всего применяется ФД, работающий в диодном режиме. Типовой схемой включения ФД в таком режиме является схема с использованием ОУ, которая приведена на рисунке 3.5 а.

Каждый из четырех каналов ПОИ ОЭПЛП можно рассматривать как независимый одноэлементный ФД, который подключается ко входной цепи последующей электронной схемы. В данном случае в качестве согласующего каскада целесообразно использовать преобразователь «ток напряжение» на ОУ (рисунок 3.5) [27].

В свою очередь ФД можно включить как в диодном (рисунок 3.5 а), так и в фотогальваническом (рисунок 3.5 б) режиме. Операционные усилители выполняют роль преобразователей фототоков в выходные напряжения $U_{sbix} = I_{\phi} R_{OC}$, где R_{OC} - сопротивление резистора в цепи обратной связи, которое является в классическом понимании служит сопротивлением нагрузки [16].

Приведенные на рисунке 3.5 схемы включения обладают существенными достоинствами:

- каждый ФД работает на низкоомную нагрузку, роль которой весьма малое входное сопротивление выполняет эквивалентное преобразователя «ток — напряжение»; образом, таким во-первых, обеспечивается линейность световой характеристики В широком динамическом диапазоне, а во-вторых, ослабляется действие ёмкости ФД и паразитной емкости входной цепи;

- отпадает необходимость в стабилизации коэффициента усиления и напряжения питания схемы, так как при правильно выбранных элементах эти параметры практически не влияют на точность измерения.



Рисунок 3.5 – Схемы подключения ФД к ОУ

Эти достоинства позволяют получить необходимые метрологические характеристики ОЭПП в целом.

С целью уяснения критериев для оптимального выбора элементов схемы по включению фотодиод - операционный усилитель (ФД–ОУ) рассмотрим эквивалентную схему включения (рисунок 3.6) [27].



Рисунок 3.6 – Эквивалентная схема ФД-ОУ

ФД можно рассматривать как источник тока сигнала $i_{c\partial}$ и тока шума $i_{u\partial}$ с внутренним динамическим сопротивлением R_{∂} . Если ОУ при разомкнутой петле обратной связи имеет собственное входное сопротивление R_{ex} , то при замкнутой петле обратной связи входное эквивалентное сопротивление уменьшается до величины

$$R'_{ex} = R_{OC} / K_o, \tag{3.2}$$

где R_{OC} – сопротивление резистора в цепи обратной связи; K_o – собственный коэффициент усиления ОУ при разомкнутой петле обратной связи, который составляет обычно $10^4 \dots 10^6$.

Поскольку R_{OC} обычно не превышает единиц мегаом (см. ниже), величина R'_{ex} , в свою очередь, не превышает десятков ом.

При К $_{\rm o}>>1$ напряжение сигнала на выходе ОУ определяется выражением

$$U_c = S_I R_{OC} \Phi_e = S_V \Phi_e, \tag{3.3}$$

где S_I – токовая чувствительность ФД; Φ_e – поток излучения, воздействующий на фоточувствительный элемент (ФЧЭ); S_V – вольтовая чувствительность ФПМ. Как видно из выражения (3.3), напряжение сигнала не зависит от коэффициента усиления ОУ и напряжения питания.

Таким образом, меняя в широких пределах сопротивление R_{OC} , можно пропорционально изменять вольтовую чувствительность устройства, что позволяет использовать данную схему в большом динамическом диапазоне Φ_{e} . Однако следует иметь в виду, что максимальное значение R_{OC} должно удовлетворять условию

$$R_{OC} \le U_{max OY} / (S_I \Phi_{e max}), \tag{3.4}$$

где $U_{max OV}$ - максимально допустимое напряжение на выходе ОУ, при котором сохраняется линейность усиления (дается в справочнике); $\Phi_{e\,max}$ — максимальное значение потока излучения в рабочем диапазоне. При выборе оптимального сопротивления R_{OC} всегда необходимо выполнение условия (3.4). В то же время соблюдение условия (3.4) не во всех случаях является достаточным для определения максимально допустимого значения R_{OC} . Так при работе с очень малыми потоками, когда необходимо обеспечить максимальную чувствительность ФПМ, верхний предел сопротивления R_{OC} определяется с учетом следующих условий.

При больших значениях сопротивления R_{OC} (более 1 МОм) напряжение сигнала на выходе ОУ и входное сопротивление преобразователя «ток - напряжение» (являющееся эквивалентным сопротивлением нагрузки ФД) определяются следующими выражениями:

$$U_{c} = \frac{S_{I} \cdot \Phi_{e} \cdot R_{OC}}{1 + \frac{R_{OC}}{K_{o} \cdot R_{ex}} + \frac{1}{K_{o}}}.$$

$$R_{ex}' = \frac{R_{OC}}{K_{o} + 1 + \frac{R_{OC}}{R_{ex}}}.$$
(3.5)
(3.6)

По сравнению с (3.2) и (3.3) выражения (3.5) и (3.6) являются более точными зависимостями, учитывающими влияние параметров ОУ K_o и R_{ex} . Очевидно, что при $R_{OC} / R_{ex} << K_o$ выражения (3.5) и (3.6) приводятся к виду (3.2) и (3.3).

При фиксированном Φ_e пропорциональность между напряжением на выходе ОУ и сопротивлением резистора R_{OC} сохраняется лишь до некоторого значения сопротивления $R_{OC max}$ (обычно $10^6 - 10^8$ OM [28]), пока влиянием параметров ОУ K_o и R_{ex} можно пренебречь. Дифференцируя выражение (3.5) по K_o и пренебрегая членами второго порядка малости, получаем зависимость относительного изменения сигнала на выходе ФПМ от величины нестабильности коэффициента усиления ОУ ΔK_o :

$$\delta = \frac{\Delta U_c}{U_c} \approx \left(\frac{R_{OC}}{R_{ex}} - 1\right) \cdot \frac{\Delta K_o}{K_o^2}.$$
(3.7)

Для всех реальных ОУ параметры K_o , R_{ex} и величина нестабильности K_o в зависимости от температуры окружающей среды даются в справочнике. Воспользовавшись выражением (3.7), можно найти предельное значение сопротивления R_{0C} max, если заданы предельная относительная погрешность измерения амплитуды сигнала и рабочий диапазон температур.

Минимальное сопротивление цепи обратной связи ОУ определяется из условия [27]:

$$1 / R_{OC \max} \le (2 e I_T 4 / (kT) + T / (R_o T_R)), \tag{3.8}$$

где e – заряд электрона; I_T – темновой ток ФД; T – температура ФПМ; k – постоянная Больцмана; R_{∂} – динамическое сопротивление ФД в рабочей точке вольт-амперной характеристики; T_R – температура резистора в цепи ОС.

При работе с модулированным потоком оптического излучения следует учитывать зависимость входного сопротивления и коэффициента передачи преобразователя «ток — напряжение» от частоты:

$$\dot{U}_{c} = \frac{S_{I} \cdot \Phi_{e} \cdot Z_{OC}}{1 + \frac{Z_{OC}}{\dot{K}_{OV} \cdot Z_{ex}} + \frac{1}{K_{OV}}},$$

$$Z'_{ex} = \frac{Z_{OC}}{\dot{K}_{OV} + 1 + \frac{Z_{OC}}{Z_{ex}}},$$
(3.9)
(3.9)

где \dot{U}_c , Z_{OC} , Z_{6x} , \dot{K}_{OY} - соответственно выходное напряжение, сопротивление в цепи обратной связи, входное сопротивление и коэффициент усиления ОУ, записанные в комплексном виде.

В реальных ОУ \dot{K}_{OY} и Z_{6x} в значительной степени зависят от цепей коррекции, которые приходится включать для предотвращения самовозбуждения ОУ.

Комплексное сопротивление в цепи обратной связи определяется выражением

$$Z_{oc} = \frac{R_{oc}}{1 + j\omega C_{oc} \cdot R_{oc}},$$
(3.11)

где C_{OC} – паразитная ёмкость монтажа в цепи обратной связи; $\omega = 2\pi f -$ угловая частота в спектре сигнала (f – частота, Гц).

Отметим, что при правильно выбранном ОУ, имеющем достаточный коэффициент усиления в заданном диапазоне частот, наибольшее влияние на частотную характеристику ФПМ оказывает цепь обратной связи. При этом

$$S_{\nu}(f) \cong \frac{S_{I} \cdot R_{oc}}{\sqrt{1 + (2\pi \cdot f)^{2} \cdot R_{oc}^{2} \cdot C_{oc}^{2}}}.$$
(3.12)

Последнее обстоятельство следует иметь в виду при выборе схемы управления чувствительностью ФПУ по цепи обратной связи. Необходимо принимать меры для уменьшения монтажной емкости C_{OC} .

При работе ФПУ в режиме малых сигналов существенное значение приобретают шумовые характеристики пары ФД - ОУ. Напряжение шума на выходе ОУ в полосе частот $\Delta f = 1$ Гц определяется выражением:

$$U_{u.sbix} = \sqrt{e_{u.y}^2 + (i_{u.y}^2 + i_{u.\phi\partial}^2 + i_{R_{OC}}^2) \cdot R_{OC}^2}, \qquad (3.13)$$

где $e_{u.y.}$ – спектральная плотность напряжения шума усилителя; $i_{u.\phi.d.}$ – спектральная плотность шумового тока ФД; $i_{u.y.}$ – спектральная плотность шумового тока усилителя; $i_{R_{oc}}$ - спектральная плотность шумового тока сопротивления резистора R_{OC} . Шумовые характеристики ОУ обычно приводятся в справочнике. Для большинства современных ОУ спектральная плотность шумового напряжения и шумового тока находятся соответственно в следующих пределах [29]:

$$e_{u.y} \approx (1 \div 7) \cdot 10^{-8} \text{ B} / \Gamma^{1/2}; \quad i_{u.y} \approx (1 \div 2) \cdot 10^{-14} \text{ A} / \Gamma^{1/2}.$$

Плотность шумового тока ФД, работающего в фотодиодном режиме: $i_{u.\phi\partial} = \sqrt{2e \cdot I_T}$; плотность шумового тока ФД, работающего в фотогальваническом режиме: $i_{u.\phi\partial} = \sqrt{4k \cdot T / R_A}$; плотность шумового тока сопротивления резистора R_{OC} : $i_{R_{OC}} = \sqrt{4k \cdot T / R_{OC}}$, где I_T – темновой ток ФД; k – постоянная Больцмана; T – температура p – n-перехода; R_A – динамическое сопротивление несмещённого p – n-перехода. При использовании малошумящих ОУ основной вклад вносят шумы ФД и резистора *R*_{OC}. Поэтому:

$$U_{u.6bix} \approx \sqrt{(i_{u.\phi 0}^{2} + i_{R_{OC}}^{2}) \cdot R_{OC}^{2}}.$$
(3.14)

Отношение сигнал/шум на выходе ФПМ в единичной полосе частот можно рассчитать по формуле:

$$\left(\frac{U_c}{U_u}\right)_{\rm gask} = \frac{S_I \cdot \Phi_e}{\sqrt{i_{u.\phi\partial}^2 + i_{R_{OC}}^2}}.$$
(3.15)

При работе ФД в фотогальваническом режиме сопротивление резистора R_{oc} выбирается обычно больше, чем эквивалентное сопротивление несмещенного ФД ($R_{OC} > R_{Д}$). В этом случае спектральная плотность шума ФД $i_{u.\phi\partial}$ намного больше спектральной плотности шума сопротивления нагрузки, и отношение сигнал/шум в единичной полосе частот преобразуется к виду [27]:

$$\left(\frac{U_c}{U_{uu}}\right)_{ebux} \approx \frac{S_I \cdot \Phi_e}{\sqrt{4k \cdot T / R_{\mathcal{A}}}}.$$
(3.16)

При выборе ОУ, используемого в схеме ФПМ, следует руководствоваться рядом условий:

- коэффициент усиления ОУ K_o и входное сопротивление R_{ex} при разомкнутой цепи обратной связи должны быть как можно больше во всем диапазоне рабочих частот;

- шумовые параметры ОУ должны удовлетворять условию:

$$i_{u,y}^2 \le 2e \cdot I_T + 4k \cdot T / R_{\mathcal{A}}; \qquad e_{u,y}^2 > i_{u,\phi\partial} / C_{ex},$$

где C_{ex} – эквивалентная ёмкость входной цепи, примерно равная ёмкости p - n-перехода; $R_{\mathcal{I}}$ – динамическое сопротивление ФД в рабочей точке вольт-амперной характеристики.

3.3 Кодирующие и анализирующие структуры ОЭПЛП

3.3.1. Преобразование оптического излучения при различном сопряжении кодирующих и анализирующих структур

Как уже указывалось в предыдущих главах, одним из основных элементов ОЭПЛП является КС (рисунок *l.1*), которая образует пространственную периодическую структуру, являющуюся рабочей мерой. Она может быть реализована различными способами: линейная шкала, растр, дифракционная решетка и т.д. Технически она реализуется в виде подложки с нанесенной на ней кодовой маской в виде кодовых дорожек с прозрачными и непрозрачными для потока излучения участками. Рисунок кодовой маски отображает принятый в преобразователе цифровой код.

Коэффициент пропускания τ_{KC-AC} характеризует изменение потока излучения, прошедшего сопряжение КС и АС ОЭПЛП:

$$\tau_{\rm KC-AC} = \Phi / \Phi_0 , \qquad (3.17)$$

где Φ - поток излучения, прошедший через растровое сопряжение КС и АС, анализирующую диафрагму и попадающий на фоточувствительную поверхность $\Phi Д$; Φ_0 - поток излучения, падающий на растровое сопряжение в пределах анализирующей диафрагмы.

Модулирующие свойства КС и АС для растрового сопряжения можно описать соответственно с помощью функций пропускания $\tau_1(x, y)$ и $\tau_2(x, y)$. На рисунке 3.7 а показана КС, у которой прозрачные участки изображены заштрихованными. Ее функцию пропускания $\tau_1(x, y)$ будем считать равной единице в прозрачных участках и нулю в непрозрачных. На практике КС определяет число N прозрачных окон и их высоту h. На рис. 3.7 б, в, г приведены различные варианты АС, причем прозрачные окна этих растров изображены заштрихованными. Для упрощения дальнейших выкладок примем, что функция пропускания $\tau_2(x, y)$ описывает совместное действие КС и АС, причем она принимает два возможных значения: «1» - в прозрачных участках и «0» - в непрозрачных.

Пусть поток излучения Φ_0 создает на растровом сопряжении облучённость E_0 . После прохождения растрового сопряжения облучённость можно записать в таком виде:

$$E_0(x, y) = E \tau_1(x, y) \tau_2(x, y).$$
(3.18)

Величину потока излучения Φ после растрового сопряжения, которая определяет реакцию ПОИ, найдем из выражения (3.18) интегрированием по переменным *x* и *y*:

$$\boldsymbol{\Phi} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0 \tau_1(x, y) \tau_2(x, y) dx dy \quad .$$
(3.19)

Поток излучения, падающий на растровое сопряжение:

$$\Phi_0 = E_0 A , \qquad (3.20)$$

где А - площадь анализирующей диафрагмы, совмещенной с АС.

Подставляя выражения (3.19) и (3.20) в формулу (3.17), получим коэффициент пропускания растрового сопряжения:

$$\tau_{KC-AC} = \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_1(x, y) \tau_2(x, y) dx dy$$
(3.21)



а – КС, совмещенная с АС; б – обтюрационная АС; в, г – муаровые АС

Чтобы найти конкретные зависимости пропускания $\tau_{\text{KC-AC}}$ для обтюрационного, нониусного и муарового растровых сопряжений, будем в дальнейшем использовать математический аппарат двумерного интегрального преобразования Фурье.

Перейдем от пространственной функции пропускания $\tau_2(x, y)$ к ее преобразованию Фурье. Можно записать, что:

$$\tau_2(x,y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_2(\omega_x, \omega_y) e^{j(\omega_x x + \omega_y y)} d\omega_x d\omega_y , \qquad (3.22)$$

где

$$\tau_2(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_2(x, y) e^{-j(\omega_x x + \omega_y y)} dx dy$$

представляет собой пространственный спектр функции $\tau_2(x, y)$.

Пространственные частоты:

$$\omega_{\rm x} = 2\pi / T_x,$$
$$\omega_{\rm y} = 2\pi / T_v,$$

где T_x , T_y — периоды пространственных гармонических составляющих соответственно по координатам *x* и *y*.

Подставляя соотношение (3.22) в формулу (3.21), получим следующее выражение:

$$\tau_{KC-AC} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{\infty} T_2(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y \int_{-\infty}^{\infty} \tau_1(x, y) e^{j(\omega_x x + \omega_y y)} dx dy \qquad (3.23).$$

Из выражения (3.23) следует, что внутренний двойной интеграл, если к нему отнести множитель $1/2\pi$, можно рассматривать как прямое двумерное преобразование Фурье, записанное в следующем виде:

$$T_{l}^{*}(\omega_{x},\omega_{y}) = \frac{l}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_{l}(x,y) e^{-j(\omega_{x}x+\omega_{y}y)} dxdy , \qquad (3.24)$$

где T_1^*

 $T_{I}^{*}(\omega_{x},\omega_{y})$ – комплексно-сопряженная частотная характеристика КС. С учетом выражения (3.24) формулу (3.23) можно переписать так:

$$\tau_{KC-AC} = \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_{I}^{*}(\omega_{x}, \omega_{y}) T_{2}(\omega_{x}, \omega_{y}) d\omega_{x} d\omega_{y}.$$
(3.25)

Найдем частотную характеристику КС. Учитывая периодичность функции пропускания $\tau_1(x, y)$ по оси x (рисунок 3.8 а), можно записать частотную характеристику КС следующим образом:

$$T_{10}(\omega_x, \omega_y) = \sum_{-\infty}^{\infty} g_k \delta(\omega_x - k\omega_0) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega_y y} dy , \qquad (3.26)$$

где $\omega_0 = 2\pi / w_1$ - основная пространственная частота КС; w_1 - шаг КС; $\delta(\omega_x - k\omega_0)$ - дельта-функция.

Значения коэффициентов *g_k* совпадают со значениями коэффициентов разложения в ряд Фурье бесконечной последовательности прямоугольных импульсов с амплитудой, равной единице:

$$g_{k} = \frac{\sin \pi k \frac{a_{1}}{w_{1}}}{\pi k} = \frac{\sin \pi k \tau_{1}}{\pi k}, \ k = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

где $\tau_1 = a_1 / w_1 - коэффициент пропускания КС; <math>a_1$ - ширина прозрачных штрихов КС.

Значение интеграла в формуле (3.26) с учетом условного интегрального определения дельта-функции можно записать в виде:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega_y y} dy = 2\pi \delta(\omega_y).$$
(3.28)

С учетом выражений и (3.28) получаем из (3.26) частотную характеристику КС:

$$T_{10}(\omega_x, \omega_y) = 2\pi\delta(\omega_y) \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin\pi k\tau_1}{\pi k} \delta(\omega_x - k\omega_0).$$
(3.29)

Формула (3.29) записана для мгновенного значения коэффициента пропускания τ при неподвижной КС. В процессе работы растрового преобразователя КС перемещается в направлении оси *x*. Частотная характеристика КС (3.29) записана относительно ее центра. Перемещение КС можно учесть, используя преобразование функции, смещенной в пространстве:

$$T_{I}(\omega_{x},\omega_{y}) = T_{I0}(\omega_{x},\omega_{y})e^{j\omega_{x}x}, \qquad (3.30)$$

где *х* - текущее значение координаты центра КС.

Подставляя в формулу (3.30) зависимость (3.29), можно записать комплексно-сопряженную частотную характеристику подвижной КС:

$$T_{I}^{*}(\omega_{x},\omega_{y}) = 2\pi\delta(\omega_{y})e^{j\omega_{x}x}\sum_{-\infty}^{\infty}\frac{\sin\pi k\tau_{I}}{\pi k}\delta(\omega_{x}-k\omega_{0}).$$
(3.31)

Из выражения (3.31) видно, что частотная характеристика КС по оси ω_x представляет собой ряд бесконечно узких линий на пространственных частотах $k\omega_0$, где k - целое число, $\omega_0 = 2\pi w_l$, а частотная характеристика по оси ω_y - спектральную линию на нулевой частоте. Поэтому КС можно рассматривать как пространственно-частотный фильтр по оси ω_x с рядом бесконечно узких полос пропускания при значениях пространственных частот $k\omega_0$.

Подставляя значение $T^*_l(\omega_x, \omega_y)$ из выражения (3.31) в формулу (3.25), получим

$$\tau_{KC-AC} = \frac{2\pi}{A} \int_{-\infty}^{\infty} T_2(\omega_x, \omega_y) \delta(\omega_y) e^{j\omega_x x} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \pi k \tau_1}{\pi k} \delta(\omega_x - k\omega_0) d\omega_x d\omega_{y}. (3.32)$$

Меняя в выражении (3.32) порядок операций суммирования и интегрирования, а также используя свойство дельта-функции, получим:

$$\tau_{AC-KC} = \frac{2}{A} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \pi k \tau_1}{k} T_2(k\omega_0) e^{j\omega_x x} .$$
(3.33)

Выражение (3.33) представляет собой, как известно, ряд Фурье в комплексной форме, у которого комплексная амплитуда *k*-ой гармонической составляющей:

$$C_k = \frac{2}{A} \frac{\sin \pi k \tau_1}{k} T_2(k\omega_0).$$

В общем случае пространственно-частотный спектр $T_2(\omega_{x}, \omega_{y})$ является комплексным. Тогда C_k , можно представить следующим образом:

$$C_{k} = \frac{2}{A} \frac{\sin \pi k \tau_{I}}{k} \left[P(k\omega_{0}) - jQ(k\omega_{0}) \right], \qquad (3.34)$$

где $P(k\omega_0)$ и $Q(k\omega_0)$ - соответственно вещественная и мнимая части пространственно-частотной функции $T_2(k\omega_0)$. На основании формулы (3.34) можно записать выражения для амплитуды и фазы соответствующей гармонической составляющей коэффициента пропускания $\tau_{\text{KC-AC}}$:

$$C_{k} = |C_{k} + C_{-k}| = \frac{4}{A} \frac{\sin \pi k \tau_{I}}{k} |T_{2}(k\omega_{0})|;$$

$$\varphi_{k} = \operatorname{arctg} \frac{Q(k\omega_{0})}{P(k\omega_{0})}.$$

Итак, амплитуда и фаза каждой гармонической составляющей в основном определяются пространственно-частотным спектром $T_2(k\omega_0)$ при значениях пространственных частот:

$$\omega_x = k\omega_0 = k\frac{2\pi}{w_1}; \quad \omega_y = 0$$

Как следует из рис. 3.7 б, в, г, AC, совмещенную с анализирующей диафрагмой, можно рассматривать как совокупность прозрачных окон, ориентированных определенным образом относительно координатных осей x и y. То есть анализирующая диафрагма представляет собой часть AC, расположенной в пределах окна высотой h и включающей в себя определённое количество прозрачных и непрозрачных штрихов.

Из рисунка 3.7, б, в, г видно, что площадь *А* анализирующей диафрагмы, совмещённой с АС, определяется выражением:

$$A = Nhr$$
,

где N – число прозрачных окон AC; h – высота прозрачных окон, равная высоте диафрагмы; r – расстояние между продольными осями соседних прозрачных окон AC.

АС, показанная на рисунке 3.7 в, имеет прозрачные окна в виде параллелограммов, повернутых на угол $\varphi << \pi/2$ относительно координатных осей. Сопрягая такую АС с КС (рисунок 3.7 а), получим при $r = w_l$ муаровое растровое сопряжение, причем муаровые комбинационные полосы будут параллельны оси x. На рисунке 3.7 г изображен наиболее общий случай построения АС, когда прозрачные окна в виде параллелограммов повернуты вокруг своих центров на угол φ , а затем линия, соединяющая эти центры, повернута относительно оси x на угол v. Этот вид АС при сопряжении с КС также приводит к образованию комбинационной муаровой картины.

Общее выражение для коэффициента пропускания растрового сопряжения τ_{AC-KC} выглядит следующим образом:

$$\tau_{AC-KC} = \frac{1}{\pi^3} \frac{\omega^2}{hr} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin k\pi \tau_1}{k} \frac{\sin \left[k\pi \frac{a_2}{\omega} (\cos \phi + \sin \phi \ tg \mu) \right]}{k(\cos \phi + \sin \phi \ tg \mu)} \times \frac{\sin (k\pi \frac{h \sin \phi}{\omega \cos \mu})}{k \sin \phi} \frac{\sin (Nk\pi \frac{r}{w} \cos v)}{N \sin (k\pi \frac{r}{w} \cos v)} e^{jk \frac{2\pi}{\omega} (x + x_0)} \qquad (3.35)$$

Это выражение для пропускания $\tau_{\text{KC-AC}}$ позволяет подробно проанализировать модулирующее свойство растровых сопряжений наиболее распространенных видов: обтюрационного, нониусного и муарового, применяемых в ОЭПЛП.

Пропускание сопряжений дифракционных решеток определяется явлениями дифракции и интерференции и зависит от параметров ИОИ и величины воздушного зазора между решетками.

На рис. 3.8 показаны две идентичные решетки P_1 и P_2 с одинаковым шагом w, расположенные параллельно друг другу с зазором g. Параллельный пучок излучения с длиной волны λ падает на первую решетку под углом i относительно нормали к решетке.

Если предположить, что дифракционные решетки концентрируют падающее излучение преимущественно в нулевой и первый порядки и ограничивающая щель выбирает только первую группу, то дифракционная картина будет являться результатом взаимной интерференции двух когерентных пучков, одинаковых по амплитуде порядков дифракции (0, 1) и (1, 0). Если амплитуда первого пучка равна E_1 а второго пучка E_2 , то результирующая интенсивность определяется известным уравнением:

$$I = E_1^{2} + E_2^{2} + 2 E_1^{2} E_2^{2} \cos \varphi_{\text{отн}},$$

где $\phi_{\text{отн}}$ - относительная разность фаз между волновыми фронтами соответствующих порядков дифракции.

Положим, что:

$$E_1^2 + E_2^2 = I_0,$$

$$E_1^2 E_2^2 = I_1.$$

Используя введенные обозначения, получаем:

$$I = I_o + I_I \cos \left(\varphi_{\text{const}} + 2\pi x / W \right), \qquad (3.36)$$

где φ_{const} - постоянная, зависящая от параметров решетки; *W* - шаг муаровых интерференционных полос.

При равенстве периодов штрихов КС и АС и их смещении на четверть периода друг относительно друга W = w; $\varphi_{const} = \pi / 2$. Тогда уравнение (3.36) примет вид:

 $I = I_o + I_I \sin (2\pi x / w) .$



Рисунок 3.8 – Образование дифракционных порядков

Результирующая функция пропускания для дифракционного сопряжении КС и четырёх каналов АС, сдвинутых друг относительно друга на четверть периода растра, будет иметь вид для канала A-Ā (подраздел 2.1):

$$\tau^{\pi}_{\partial u \phi p_{A,\overline{A}1}} = \frac{1}{4} \pm \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{w} x ;$$

для канала $B-\overline{B}$:

$$\tau^{n}_{\partial u \phi p_{B,\bar{B}}} = \frac{1}{4} \pm \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{w} x .$$
 (3.37)

Таким образом, результирующая интенсивность изменяется синусоидально с изменением смещения *x*. Однако в общем случае выбранная группа содержит более двух интерферирующих лучей. По этой причине в результирующей интенсивности содержится не только основная гармоника, определяемая уравнением (3.36), но и более высокие гармоники. В работе [2] показано, как, изменяя угловую ширину падающего излучения (или воздушный зазор), можно регулировать процентное содержание высших гармоник.

Большие возможности имеет предложенная Г. Н. Рассудовой [30] измерительная система, состоящая из прозрачной и отражательной дифракционных решеток (рисунки 2.10 - 2.15). В этой системе с автоколлимационной схемой фиксации муаровых интерференционных полос свет дифрагирует один раз на отражательной и два раза на

прозрачной решетках. Шаг прозрачной решетки $w_1 = w_2 / 2$, где w_2 - шаг отражательной дифракционной решетки. Цена муаровой полосы

$$\varepsilon = \lambda / 4 \sin \beta = w_2 / 2m$$
,

где β - угол дифракции; *m* — рабочий порядок дифракции отражательной решетки.

Область применения по цене муаровой полосы $-0,4\lambda \le \epsilon \le 10\lambda$. При определенном выборе шагов решеток и интерферирующих пучков в данной системе можно получить муаровые интерференционные полосы, цена которых изменяется в интервале от 10 до 0,3 мкм, а контраст практически не зависит от расстояния между решетками, угловой ширины ИОИ и его спектрального интервала.

Измерительная система с использованием дифракционных решеток показана на рисунке 3.9. Параллельный пучок оптического излучения от ИОИ падает нормально к поверхности КС P_1 и АС P_2 . Непосредственно за АС располагается ПОИ.



Рисунок 3.9 – Оптическая схема ОЭПЛП с дифракционными решетками

Для того чтобы найти распределение облучённости за AC, приведем некоторые сведения из теории амплитудных (поглощающих) дифракционных решеток.

Положение главных максимумов при нормальном падении света определяется уравнением

w sin
$$\theta_n = n\lambda$$
,

где w – период штрихов решётки; n = 0, 1, 2, 3, ... – порядок дифракции.

Распределение интенсивностей по главным максимумам описывается выражением:

$$I_{m} = I_{0} \frac{N^{2} w^{2}}{\pi^{2} n^{2} a^{2}} \sin^{2} \frac{\pi n a}{w}$$

где I_0 - интенсивность нулевого порядка; a - ширина щелей в решетке; N - число штрихов решетки.

Если $a / w = \lambda / k$, где k - некоторое целое число, то $I_m = 0$, то есть при некоторых n соответствующие максимумы выпадают из дифракционной картины.

В работе [2] показано, что фазовые решетки концентрируют энергию преимущественно в нулевой и первые порядки, а распределение интенсивностей зависит от соотношения прозрачного и непрозрачного штрихов решетки. Каждая отдельная волна (порядок дифракции), полученная в результате дифракции от решетки, ничем не отличается от обычной плоской волны.

Также в работе [2] показано, что распределение облученности в плоскости решетки, соответствующее пересечению волновых фронтов нулевого и первого порядка, повторяется в плоскостях, параллельных решетке и отстоящих в первом приближении на расстояниях, определяемых уравнением:

 $l\approx m'w^2/\lambda,$

где *т* – порядок дифракции.

Если АС поместить в одну из этих плоскостей, то результат будет таким, как если бы решетки находились в контакте друг с другом. На рис. *3.10* представлен график, характеризующий зависимость контраста муаровых полос от величины зазора между решетками. Если величина зазора между решетками находится в пределах

 $g = (m \pm 0.1) 2w / \lambda,$ (3.38)

то амплитуда основной гармоники составляет не менее 0,9 своего максимального значения.

Практически величину *m* выбирают равной нулю или единице. Например, для решеток с шагом w = 25 мкм при длине волны 0,9 мкм, соответствующей максимальной чувствительности кремниевого ПОИ, $g_0 = 0 \div 70$ мкм; $g_1 = 700 \pm 70$ мкм. Второй случай более предпочтителен, так как диапазон, в котором может изменяться воздушный зазор без значительного уменьшения амплитуды первой гармоники, в 2 раза шире и выполняется практически с меньшими трудностями. Для более крупных решеток целесообразно выбирать m = 0, для того чтобы не нарушать компактность системы, так как при больших воздушных зазорах сильно возрастают требования к степени параллельности падающего излучения.



Рисунок 3.10 – Зависимость контраста муаровых полос от зазора между решетками.

Функцию пропускания, близкую по форме к синусоиде, можно получить двумя способами: регулированием угловой ширины падающего на решетки излучения или путем введения небольшого наклона AC, что позволяет обеспечить необходимое соотношение между шагом муаровых полос и шириной считывающей щели. Совместное применение этих двух способов позволяет образовать практически синусоидальную функцию пропускания без значительного падения амплитуды первой гармоники. Последнее обстоятельство позволяет строить на основе голографических решеток интерполирующие системы, погрешность измерения которых составляет несколько десятых длины волны падающего излучения.

3.3.2. Технология изготовления кодирующих структур

Выбор способа изготовления рабочих КС определяется основными требованиями к КС:

- точность КС;

- число кодовых дорожек КС;

- специфика конструкции преобразователя (толщина кодированного диска; система считывания; ширина межразрядных перемычек и др.);

- общие возможности изготовителя – срочность изготовления;

- условия эксплуатации КС;

- трудоемкость способа;

- себестоимость изготовления.

Основные технологические требования, предъявляемые к КС, можно свести к следующим:

- плоскостность поверхности;

- механическая прочность основания;

- точность позиционирования краев градаций маски по кодовым зонам и между ними;

- ровные и четкие края градаций, отсутствие сколов, выбоин и других дефектов;

- прозрачность светлых градаций и достаточная плотность темных градаций; отсутствие посторонних включений, пыли, грязи, царапин и других повреждений на рабочей части;

- хорошая адгезия маски с подложкой КС;

- стабильность геометрических и физических параметров при изменении условий эксплуатации.

Для каждого способа изготовления КС характерным является число приемов, необходимых для ее получения. Так, например, можно изготовить КС непосредственно за один прием. Иногда необходимо сначала получить первичный инструмент, с помощью которого изготавливаются КС. В этом случае мы имеем дело с двумя приемами и т. д.

Как правило, в условиях промышленного производства процесс изготовления КС состоит из двух стадий: изготовления эталонного образца КС и последующего тиражирования этого образца с целью получения рабочих копий.

Технологические процессы, наиболее часто применяемые для изготовления, можно разделить на три группы: делительно-граверные, фототехнологические и лазерные (рисунок 3.11) [31].

Технологические процессы производства на основе делительнограверных машин имеют наиболее богатую историю, насчитывающую более сотни лет. Известно, что этот процесс характеризуется достаточно высокой стоимостью и низкой производительностью (например, требуется несколько недель для изготовления многоразрядного кодового диска или прецизионного растра с количеством штрихов более 8000). Более того, при увеличении времени изготовления КС к концу цикла изготовления отмечалось снижение качества резцов, приводящее к заметному увеличению результирующей погрешности изделия. Эти особенности стали резко тормозить процесс широкого внедрения ОЭПП в различные отрасли промышленности.

По этой причине с середины прошлого столетия стали быстро развиваться более производительные технологии на основе фотопроцессов. К середине 80-х гг. безусловным мировым лидером стала технология проекционной фотолитографии, созданная немецкой фирмой "Heidenhain", широко известная под названием "технология Diadur". Многие фирмы во всем мире ставили перед собой задачу освоения данной технологии. Только в Европе, кроме фирмы-разработчика, эту технологию освоили "Carl Zeiss-Jena" (ГДР), "RSF" (Австрия), "Iskra" (Югославия). В СССР данную технологию разрабатывал Вильнюсский филиал ЭНИИМС – головное предприятие в Советском Союзе по выпуску угловых преобразователей. Кроме попыток ЭНИИМС повторить "Diadur-технологию", в СССР в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) и Московском институте электронной

⁵⁹

техники (МИЭТ) под руководством проф. Л.Н. Преснухина велись работы по специализированных на лелительных машин созданию основе фототехнологических процессов. Однако никому из них не удалось достичь уровня фирмы "Heidenhain" как по точности синтеза КС, так и по точности преобразователей. К середине 90-х гг. все четче стала проявляться тенденция замедления роста точности угловых преобразователей. В основном OH систематических поддерживался за счет компенсации погрешностей преобразователей, реализуемой с помощью соответствующих электронных блоков, благодаря быстрому развитию микроэлектроники.



Рисунок 3.11 – Технологические процессы, применяемые в настоящее время для изготовления КС

В основе делительно-граверных процессов, лежит метод нанесения штрихов режущим инструментом на поверхности заготовок или в защитных органических или металлических покрытиях с помощью делительных машин. Необходимые обозначения, например, оцифровку геодезических лимбов в этих процессах производят, как правило, на отдельных специализированных копировально-фрезерных станках (пантографах). Делительные машины для производства лимбов по функциональному назначению подразделяют на круговые и специальные [3]. Круговые делительные машины используются для создания лимбов и многоразрядных кодовых дисков, специальные - для нанесения кривых сложной формы и шкал с особым расположением штрихов. Наибольшее распространение в граверно-делительном производстве получили машины моделей ТКF-100, ТКF-500 и ТКF-1000 (число в названии модели указывает максимальный диаметр заготовки). Высокая точность нанесения делений на машинах обеспечивается тщательным изготовлением их деталей и узлов. Так, фирма "Feinmess" выпускала машины модели TKF-500 в двух исполнениях: первое - для нанесения штрихов с погрешностью не хуже ± 1" и второе - с погрешностью не хуже 0,6". Погрешность машин модели TKF-1000 не должна превышать 1" или 0,2" в зависимости от исполнения. На рис. 2 приведен измеренный на установке УКЛ график погрешности геодезического лимба, изготовленного на УОМЗ на машине модели TKF-100, со следующими параметрами: количество штрихов 360, средний радиус записи Rcp = 45,2 мм.

Для растров, изготовленного по описанной технологии, накопленное значение погрешности достигает ±1,6" [31].

При технологии на основе фотографических процессов предварительно изготавливают увеличенный чертеж маски. Затем путем фотографирования получают негативы, размеры которых соответствуют требуемым размерам кодирующего диска. Негатив подвергают фототехнической обработке. В настоящее время этот метод практически не используется из-за сложности изготовления чертежа и большой угловой погрешности получаемых образцов. Так, погрешность, равная 10', была наиболее типичной угловой погрешностью кодовых дисков, изготовленных по данной технологии. Минимальная достигнутая погрешность не снижалась ниже уровня 5'.

Технологии на основе фотомеханических процессов основаны на экспонировании градаций КС световым лучом в светочувствительной эмульсии и осуществляются с помощью высокоточных делительных устройств. Как разработаны производства правило, данные технологии были ДЛЯ многоразрядных кодовых дисков. При фотомеханическом способе подачу поворотного стола с заготовкой со светочувствительным слоем можно осуществлять как дискретно, так и непрерывно. Были созданы две разновидности фотомеханического способа изготовления кодовых дисков: секториальный (однооборотный) и поразрядный (многооборотный).

В настоящее время секториальный фотомеханический способ изготовления кодовых дисков практически не находит применения.

Поразрядный фотомеханический способ изготовления кодовых дисков лег в основу разработок автоматических специальных делительных машин (АСДМ), созданных в ЛИТМО. АСДМ выпускались в нескольких модификациях в зависимости от специфики работы машины.

В середине 70-х гг. прошлого века в МИЭТ была создана автоматизированная фотомеханическая делительная машина (АФДМ), которая позволяла создавать не только фотошаблоны кодовых масок, но и регулярные растры. В состав АФДМ, работающей под управлением ЭВМ, входят система экспонирования, цифровой позиционный датчик обратной связи угол-код, установленный соосно с приводом вращения и предметным столом. На предметном столе крепится фотозаготовка. В процессе непрерывного вращения фотозаготовки ЭВМ рассчитывает угловые координаты фотовспышек, анализирует коды датчика угол-код и в случае равенства этих кодов

61

вырабатывает команду на запуск через импульсный усилитель системы экспонирования. Таким образом, полное экспонирование круговой дорожки лимба в большинстве случаев происходит за один оборот предметного стола.

В 80-х гг. прошлого века данная технология была внедрена на Белорусском оптико-механическом объединении (БелОМО), где с ее помощью выпускались фотоэлектрические угловые преобразователи "Секунда-1",и "Секунда-2".

Технологии на основе фотолитографических процессов обеспечивают получение изображения шкал и лимбов методами травления или нанесения слоя пленкообразующего вещества по защитным рельефным маскам, образованным на поверхности заготовок из слоя высокомолекулярного светочувствительного соединения (фоторезиста) путем его экспонирования и последующего проявления рельефного изображения.

К 90-м годам прошлого столетия в мире при производстве высокоточных ОЭСПП наибольшее распространение получила технология проекционной "Heidenhain" фотолитографии немецкой фирмы [32]. Отличительная особенность данной технологии состоит в том, что результирующая структура формируется путем многократного "впечатывания" в фоточувствительный слой фотошаблона изображения заранее подготовленного фрагмента, причем "впечатывание" фрагмента производят каждый раз со сдвигом на период структуры, сформированной на данном фрагменте. При соответствующем выборе экспозиции каждый элемент синтезированной структуры будет сформирован за *n* экспозиций, где *n* - число периодов структуры на подготовленном фрагменте. Время синтеза структуры равно $N \tau$, где N - число штрихов в синтезированной структуре, τ - время позиционирования и экспозиции на каждом периоде синтезируемой структуры. В каждом элементе синтезированной шкалы случайные отклонения положения штрихов исходного

фрагмента будут ослаблены в \sqrt{n} раз. Данная особенность технологии трактуется как эффект пространственного усреднения погрешностей исходного фрагмента, который позволяет повысить точность синтезируемых структур. Однако данный эффект не может подавить влияние систематических погрешностей и медленных дрейфов, что особенно существенно для данной технологии, так как время синтеза структур довольно значительно. Так, по данным работы [33], время синтеза растра с N = 36000 может достигать 10 ч. Исследования показали [31], что для этой технологии погрешности лимба преобразователя ROD-800 фирмы "Heidenhain" (количество штрихов 36 000, средний радиус записи Rcp = 56 мм.) накопленное значение погрешности достигает ± 1,4". Кроме того, была зарегистрирована специфическая для Diadurтехнологии погрешность в виде разрыва непрерывности на стыке начала и конца шкалы, достигающая 2,2". Кроме указанного недостатка, для данной технологии следует отметить также сложность синтеза многоразрядных кодовых дисков, нерегулярных структур. Используя данную технологию, фирма "Heidenhain" освоила выпуск широкой гаммы угловых преобразователей, среди которых наименьшую погрешность имеют преобразователи моделей RON-905 (0,4" без коррекции и 0,2" с коррекцией, при использовании электронного блока AWE 1024) и ROD-800 (0,8"). Данные результаты фирма получила за счет применения в конструкциях ОЭСПП считывающих головок с так называемыми индикаторными растрами, что позволило сгладить локальные погрешности сформированных структур. Кроме того; применяемый в угловых преобразователях метод многоотсчетной регистрации данных (или, как его еще называют, метод путевого усреднения [34]) позволяет значительно снизить результирующую погрешность прибора по сравнению с погрешностью используемого растра.

В СССР подобную технологию освоил (хотя и не смог довести ее до мирового уровня) Вильнюсский филиал ЭНИИМС (сейчас это американолитовская компания "Brown@Sharp-Precizika"). Исследования погрешности лимба, изготовленного данным предприятием в 1987 г. (количество штрихов 18000, $R_{cp} = 53$ мм), показали, что накопленная погрешность растра составляет $\pm 3,3$ ", что почти в три раза хуже, чем у фирмы "Heidenhain" [31]. При этом так же, как и у фирмы-разработчика технологии, имеет место разрыв непрерывности кривой погрешности в точках начала и конца шкалы, достигающий 3".

Самый точный угловой преобразователь фирмы "Brown@Sharp-Precizika" - это преобразователь модели A170, по габаритным, присоединительным и электрическим параметрам являющийся аналогом преобразователя ROD-800 ("Heidenhain"). Однако его результирующая погрешность равна 2,5", что почти в три раза хуже, чем у прототипа.

Технологии записи КС на основе лазерных (X-Y)-генераторов изображений используют современные высокоинтенсивные источники когерентного излучения – лазеры. Они входят в состав так называемых лазерных генераторов изображений, работающих либо в декартовой (X-Y), либо в полярной системе координат.

В России данную технологию использует Санкт-Петербургский филиал УОМЗ - "Урал-ГОИ". В своей работе его специалисты применяют многолучевой лазерный генератор изображений ЭМ589 (разработка КБТМ, г. Минск). Запись структур производится по фоторезисту с последующим травлением хрома. Для определения погрешности растров, создаваемых на этой установке, была записана регулярная структура со следующими параметрами: $R_{cp} = 21,4$ мм, количество штрихов 4096. Результат измерения погрешности данного растра показал, что погрешность синтеза УИС на данном генераторе достигает ± 6" [31].

Надо отметить, что результат синтеза кругового растра, полученный специалистами "Урал-ГОИ" на установке ЭМ589, является достаточно типичным для установок данного типа. Даже признанный лидер в этой области - японская фирма "Тата-gawa Seiki Co" на начальной стадии процесса синтеза

аналогичных структур имела близкий результат: \pm 3,3" [35]. Используя довольно сложный алгоритм обработки данных, включающий решение системы из 16 уравнений, проводится коррекция закона движения записывающей головки, в результате которой выполняется запись растра диаметром 150 мм, погрешность которого не превышает \pm 0,3". На базе этого растра фирма создала уникальный 30-битный угловой преобразователь абсолютного типа, имеющий погрешность, не превышающую \pm 0,2".

Синтез РЭС на основе технологий растрового сканирования был разработан в Институте автоматики и электрометрии (ИАиЭ) СО АН СССР в начале 80-х гг. прошлого века. Суть этого метода заключается в следующем. Заготовка шкалы с нанесенным фоточувствительным слоем размещается на поворотном столе шпинделя, который переводится в режим непрерывного вращения. Топология элемента формируется в этом слое с помощью двух механических движений (быстрого вращения заготовки и медленного смещения луча лазера в радиальном направлении) и быстрого управления с помощью модулятора мощностью лазерного излучения, подводимого к фоточувствительному слою. Движение в радиальном направлении может производиться либо в пошаговом режиме, либо по спирали. Время записи структур не зависит от их сложности и определяется ее радиальным размером и выбранной скоростью движения каретки в радиальном направлении. Например, время записи радиального растра с 36 000 штрихов, аналогичного растру для преобразователей ROD-800 и RON-905, не превышает 2 ч. Данная технология не требует создания фрагмента будущей шкалы в виде стеклянного Изображение будущей фотошаблона. структуры подготавливается В управляющем компьютере с помощью стандартных графических пакетов типа AutoCAD и хранится в памяти компьютера. Новая технология позволяет за один технологический цикл и нанести прецизионную угловую шкалу, и оцифровать (при необходимости) штрихи данной шкалы, используя любой доступный шрифт, и нанести любую служебную информацию [36].

Одним из первых среди производителей угловых преобразователей, кто начал широко использовать метод растрового сканирования для синтеза УИС, было Специальное конструкторское бюро измерительных систем (СКБ ИС, Санкт-Петербург). Лимб преобразователя модели ЛИР-190 (количество штрихов 6000, R_{ср} - 33 мм). имеет накопленное значение погрешности ± 2,6" [31].

С 2001 г. установку CLWS-300/С, реализующую принцип растрового стал использовать УОМЗ сканирования, для производства широкой номенклатуры УИС, различных номограмм, сеток и другой продукции. Угловая CLWS-300/C установки была определена во погрешность время приемосдаточных испытаний путем записи партии однотипных УИС типа геодезического лимба. Для лимбов с количеством штрихов 360 на среднем радиусе записи $R_{cp} = 45,225$ мм погрешность синтеза РЭС не превышает $\pm 1,0$ " [37].

В настоящее время технология растрового сканирования стала усиленно развиваться в Японии. Корпорация "SONY" разработала специальную LBR (laser beam recording) машину. В ходе выполнения работ японскими исследователями был синтезирован растр диаметром 132 мм с числом штрихов 415 800. Результат измерения погрешности указанного растра показал, что погрешность растра не превышает 0,6" [38].

В 2007 г. в КТИ НП СО РАН была запущена модернизированная версия лазерного генератора модели CLWS-300. В ходе проведения испытаний по определению точностных показателей новой машины были записаны тестовые лимбы диаметром 85 мм с количеством штрихов N= 6000. Результаты обмеров тестовых лимбов показали, что для растра, изготовленного по технологии растрового сканирования на CLWS-300, модернизированном генераторе накопленное значение погрешности не превышает $\pm 0,7$ " [31].

В 80-е гг. в СССР серьезные инвестиции со стороны государства были вложены в развитие уникальной технологии синтеза прецизионных угловых основе голографической на метода записи, предложенной растров профессором, д. т. н Б.Г. Турухано и разработанной в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ). Технология позволяет синтезировать прецизионные растры с высоким пространственным разрешением для построения так голографических угловых преобразователей. называемых Радиальные голографические решетки изготавливаются на стеклянных подложках и представляют собой совокупность центрально-радиальных штрихов синусоидальной формы, расходящихся в виде лучей из одного центра, образующих периодическую структуру с высокой пространственной частотой. Решетки бесконтактным способом синтезируются С помощью голографического интерферометра. По характеру воздействия на световой поток они представляют собой пропускающие дифракционные решетки. Одним из главных узлов установки ПИЯФ для производства голографических лимбов аэростатический высокоточный шпиндель. Шпиндель является имеет встроенный угловой датчик и электродвигатель. Двигатель обеспечивает стабильное вращение шпиндельного узла в течение процесса записи. Весь процесс создания радиальной решетки длится 2 мин и выполняется автоматически под управлением компьютера. Компьютер используется также для коррекции погрешности углового датчика. По своей сути, данный процесс процесс впечатывания фрагмента будущей напоминает шкалы фоточувствительный слой, характерный для технологии Diadur, с той разницей, что данный фрагмент здесь формируется в результате интерференции лазерных пучков. Однако, как и в случае с Diadur-технологией, данной технологии присущи следующие серьезные недостатки: не предусмотрена оцифровка шкал, невозможно изготавливать фотошаблоны нерегулярных шкал, в том числе специальных сеток, работающих в декартовых координатах, проблематично изготовление многоразрядных кодовых дисков.

65

Сравнение между собой измерительных приборов по точности не проблемы. Для ЭТОГО серьезной используют различные представляет показатели, например, относительную или абсолютную погрешность приборов. В случае УИП, для которых предел измерений чаще всего постоянный и равен 360°, нагляднее использовать абсолютные значения погрешности: доли либо градуса, либо угловой минуты, а для высокоточных приборов - доли угловой секунды. Однако то, что удобно для самих преобразователей, не всегда бывает **v**добно технологического оборудования, c помощью которого ЛЛЯ изготавливаются главные узлы этих преобразователей - растры и лимбы. Уже давно замечено, что на одном и том же оборудовании лимбы малого диаметра всегда изготавливаются с большей погрешностью, чем лимбы большого диаметра. По этой причине все высокоточные угловые преобразователи имеют большой диаметр. В [39]. было предложено оценивать технологии синтеза КС с помощью так называемого дестабилизирующего фактора F. Под этим предложено понимать некоторую линейную величину, параметром характеризующую нестабильность положения синтезируемой структуры относительно записывающего инструмента в пределах полного оборота. Для установок типа CLWS-300 этот фактор может вырождаться в тривиальное биение оси вращения шпинделя в плоскости подложки относительно оптического центра канала записи. Значение данного фактора для структур диаметром D несложно получить с помощью простого пересчета угловой погрешности растра $\Delta \phi$

$$F = \pi D \ 10^3 \varDelta \ \varphi \ / \ 1296000,$$

где D задано в миллиметрах, а $\Delta \phi$ — в угловых секундах.

Результаты расчета дестабилизирующего фактора, характерного для анализируемых технологий, приведены в табл. 3.7.

Фирма-	Диаметр	Погрешность	Дестабилизирующий
изготовитель,	растра D	растра ⁄ <i>ф</i> ,	фактор F, мкм, технология
	ММ	угл.с	
"Brown@Sharp-	200	2,0	0,969 проекционная фотолитография
Precizika"			
ЭНИИМС(1987 г.)	106	3,3	0,847, проекционная фотолитография
"Урал-ГОИ"	55	6	0,8, Х-Ү генератор изображений
СКБИС	66	2,5	0,399, растровое сканирование
TKF- OO(Feinmess)	90	1,6	0,35, УОМЗ
"Heidenhain"	110,7	1,1	0,293, Diadur-технология
CLWS-300 (2001, YOM3)	90	1,0	0,218, растровое сканирование

Таблица 3.7. Результаты расчета дестабилизирующего фактора

"SONY" (2004 г.)	132	0,6	0,191, растровое сканирование
CLWS-300 (2007,	85	0,7	0,144, растровое сканирование
КТИ НП)			
"Tamagawa Seiki	150	0,3	0,109, Х-У генератор изображений
Со." (2004 г.)			

Вгоwn@Sharp-Precizika, за двадцать лет не смог серьезно повысить точность своей технологической установки и, как минимум, более чем в три раза не дотягивает до современных грандов в этой области, например, фирмы "Heidenhain" (Германия). Технологическая установка фирмы СКБ ИС имеет двухкратный запас по точности по сравнению с "Brown@Sharp-Precizika", что позволяет ей производить достаточно конкурентоспособную продукцию, однако все же заметно уступает фирме "Heidenhain". Делительные машины типа ТКF-I00 имеют неплохие показатели поточности, однако им присущ существенный недостаток - увеличение накопленной погрешности при создании изделий с большим временем изготовления. Генераторы изображений CLWS-300 (УОМЗ) и фирмы "SONY" имеют небольшой запас по точности по сравнению с технологическим комплексом фирмы "Heidenhain". Еще более значительный запас по точности (по сравнению с немецкой фирмой) имеет установка CLWS-300 (КТИ НП). Лидером, согласно данным этой таблицы, бесспорно, является фирма "Tamagawa Seiki Co" (Япония).

Сравнивая на представительном временном интервале динамику снижения угловой погрешности при формировании КС, можно уверенно выделить технологические комплексы на основе лазерных генераторов изображений, работающих как в декартовой, так и в полярной системах координат. По достигнутым абсолютным показателям они отличаются между собой совсем незначительно, но именно они обеспечили к настоящему времени существенное повышение точности синтеза РЭС. И можно прогнозировать, что дальнейший прогресс в снижении погрешности УИП будет обеспечиваться за счет их использования.

ГЛАВА 4 ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА И РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

4.1 Основное энергетическое уравнение

4.1.1 Особенности энергетического расчета

При разработке и проектировании ОЭПЛП энергетический расчет позволяет на основании требований по диапазону перемещений и погрешности измерений выбрать ИОИ, ПОИ, основные параметры оптической системы и входные характеристики СПОИ.

Поскольку ОЭПЛП работают в реальных условиях и их элементы подвержены воздействию различных внешних и внутренних факторов, то формирование энергетического уравнения имеет свои специфические особенности и трудности. Это объясняется тем, что информация о величине перемещения, заложенная сначала в оптических, а затем претерпевая преобразования электрических сигналах, постоянно В соответствии с требуемыми алгоритмами и принципами, теряется и искажается. Энергетическое уравнение для ОЭПЛП определяет такую взаимосвязь его основных энергетических и электрических параметров и габаритных размеров его элементов, которая позволяет допускать потери информации. не превышающие требуемой величины. Основным выходным параметром является допустимая погрешность преобразований в заданном диапазоне перемещений.

В ОЭПЛП оптическое излучение (рисунок *1.1*) формируется обычно оптической системой (рисунки 2.7, 2.8), проходит через КС и изменяется в зависимости от перемещения КС либо считывающей головки с АС. Прошедшее через систему КС – АС оптическое излучение преобразуется ФПМ в электрический сигнал, который в СПОИ трансформируется в форму, необходимую для обработки в СВОИ.

Поэтому для проведения энергетического расчета исходным является значение требуемой величины оптического сигнала на входе ФПМ, который надежно регистрируется и обрабатывается в электронном блоке ОЭПЛП. В свою очередь, величина оптического сигнала обусловлена требуемым отношением сигнал/шум µ на входе СПОИ.

Если вернуться к алгоритмам вычислений перемещений в СПОИ, то, например, в канале А- \overline{A} (раздел 2.1) с пары ПОИ при перемещении КС снимаются два противофазных электрических сигнала U_I и U_2 (рисунок. 4.1), которые потом, вычитаясь, преобразуются в сигнал напряжением U_I . Очевидно, что случайные шумы в ПОИ вызовут флуктуации напряжения U_I . Если величину напряжения шума, снимаемого с каждого ПОИ, обозначить δU_{μ} , то с учетом статистической независимости напряжений шумов ПОИ в напряжении U_I будет присутствовать суммарная шумовая составляющая $\delta U_{u\Sigma}$:

$$\delta U_{u\Sigma} = \delta U_{u} \sqrt{2} . \tag{4.1}$$

При нормальном законе распределении составляющих шума она вызовет флуктуацию напряжения U_I в пределах $\pm 3\delta U_{u\Sigma}$. Это явление вызовет в работе СПОИ временную погрешность формирования сигналов А и \overline{A} , выражающуюся во флуктуации фазы сигнала в каналах на величину $\delta \phi_{m\Sigma}$ (рисунок 4.1). Если величина шума будет существенна, то возможно недопустимое плавание фазы. Очевидно, что допустимое плавание фазы $\delta \phi_{m\Sigma}$, обусловленное шумами ПОИ, должно быть существенно меньше, чем период электрического сигнала *T* на выходе СПОИ.

Чтобы обеспечить минимальную погрешность при интерполяции сигналов, получаемых с ПОИ, величина порогового напряжения для входа СПОИ должна быть установлена по уровню половины амплитуды сигнала U_I . При этом, исходя из накопленного опыта разработок [40], $\delta \phi_{\rm m\Sigma}$ должна находиться в пределах $\pm 0,01w$ (см. рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Диаграммы электрических сигналов при обработке в СПОИ

Тогда отношение сигнал/шум μ на входе СПОИ можно найти, исходя из указанного условия. При этом, поскольку амплитуда переменной

составляющей сигнала на входе компаратора СПОИ составит U_I , а амплитуда шума на входе компаратора должна быть в момент срабатывания в пределах $2U_I \sin(0,01.2\pi)$, то отношение сигнал/шум:

$$\mu = 1 / 2\sin(0,01 \cdot 2\pi) \cong 32$$

Тогда основное условие энергетического расчета будет:

 $U_{\rm I} \ge 3\mu \,\delta U_{\rm m\Sigma} \tag{4.2}$

На основании этой формулы, с учётом числовых значений, полученных выше для отношения сигнал/шум, основное условие энергетического расчета примет вид:

$$U_{\rm I} \ge 96 \ \delta U_{\rm m\Sigma} \,. \tag{4.3}$$

Из этого выражения следует, что отношение сигнал шум μ должно быть более 96.

Напряжение U_I определяется величиной потока оптического излучения, попадающего на ПОИ, а $\delta U_{u\Sigma}$ – характеристиками ПОИ и схемой его включения (подраздел 3.2.2).

4.1.2 Расчет потока излучения, создаваемого оптической системой источника

Поток излучения, формируемого ПОС ОЭПП, зависит от многих параметров как источника, так и ПОС.

На рис. 4.2 показана структура пучков лучей ПОС, выполненной в виде объектива Об₁ и расположенного в его фокальной плоскости ИОИ [41, 42, 43,].

Чтобы определить поток излучения, приходящий на площадку, перпендикулярную оптической оси и находящуюся на расстоянии l от выходного зрачка объектива ПОС, рассмотрим распределение облучённости $E_e(y)$ на этой площадке. Пусть яркость ИОИ L_e по его излучающей поверхности постоянна и аберрации оптической системы отсутствуют. Как известно, при диаметре диафрагмы за излучающей поверхностью ИОИ, равном D_{ucr} , и фокусном расстоянии объектива коллиматора, равном f_1 , угловое поле объектива и расходимость пучков лучей ω при $D_{ucr} << (-f_1)$ будет определяться выражением:

$$2\omega = 2 \operatorname{arctg}\left(\frac{D_{ucm}}{-2f_1}\right) \cong \frac{D_{ucm}}{-2f_1}.$$
(4.4)

Дистанция формирования пучка лучей ПОС p_0' для диаметра выходного зрачка объектива D_1 будет равна:

$$p'_{0} = \frac{D_{I}}{2tg\omega} \cong \frac{D_{I}}{D_{ucm}} \left(-f_{I}\right)$$

$$(4.5)$$



Рисунок 4.2 – Структура пучков лучей, создаваемых ПОС ОЭПЛП

Точка M_0 , лежащая на оптической оси ПОС и удалённая от его выходного зрачка на расстояние p'_0 , называется точкой формирования пучка лучей ПОС.

Облучённость, создаваемая ПОС в точках, лежащих на оптической оси, равна [43]:

$$E_{e0} = \pi L_e \tau_{\Pi OC} \tau_c \sin^2 \sigma'_{A'} \tag{4.6}$$

где L_e – энергетическая яркость ИОИ; τ_{noc} , τ_C – коэффициенты пропускания ПОС и среды распространения оптического излучения; $\sigma'_{A'}$ – апертурный угол ПОС со стороны пространства изображений (задний апертурный угол).

Величина заднего апертурного угла ПОС для точек, лежащих на оптической оси, определяется расстоянием *l* до выходного зрачка:

при
$$l > p'_0$$
 $\sigma'_{A'} = arctg \frac{D_l}{2l}$, (4.7)

при
$$l \le p'_0$$
 $\sigma'_{A'} = \omega = \operatorname{arctg} \frac{D_{ucm}}{-2f_l} \cong \frac{D_{ucm}}{-2f_l}$ (4.8)

При отсутствии виньетирования ИОИ оправой объектива ПОС для внеосевой точки *G* облучённость *E*_{*e*β} равна [43]:
$$E_{e\beta'} = E_{e0} \cdot \cos^4 \beta', \qquad (4.9)$$

где β' – угол между оптической осью и линией от центра выходного зрачка до точки *G*. При малых углах β' облучённость $E_{e \beta'}$ можно считать постоянной и равной E_{e0} .

Если в заштрихованной зоне **A** на рис. 4.2 виньетирование ИОИ оправой объектива ПОС отсутствует, то облучённость в сечениях, перпендикулярных оптической оси, в пределах этой зоны будет постоянна.

Из выражений (4.6) и (4.8) следует, что в зоне А:

$$E_{e\beta'} \cong E_{e0} \cong \pi \tau_{\Pi OC} \tau_c L_e \left(\frac{D_{ucm}}{-2f_1}\right)^2$$
(4.10)

Следовательно, в зоне A облучённость не зависит от расстояния l до данного сечения, а значит, во всех точках этой зоны облученность одинакова.

В заштрихованной зоне **В** виньетирование отсутствует лишь в пределах круга диаметром $D_{\rm n}$, перпендикулярного оптической оси, поэтому и облучённость $E_{e\beta}$, в сечении, перпендикулярном оптической оси, в пределах этого круга будет постоянна.

Из выражений (4.6) и (4.7) следует, что в зоне В:

$$E_{e\beta'} \cong E_{e0} \cong \pi \tau_{\Pi OC} \tau_c L_e \left(\frac{D_l}{2l}\right)^2.$$
(4.11)

Следовательно, хотя в зоне **В** облучённость $E_{e\beta}$, в пределах сечения, перпендикулярного оптической оси, одинакова, но зависит от расстояния l до данного сечения.

За пределами заштрихованных зон **A** и **B** величина виньетирования изменяется, и облучённость монотонно уменьшается до нуля с увеличением β '. Из рис. 4.2 следует, что диаметры пятен равномерной облучённости для зон **A** и **B**:

$$D_{\Pi A} = D_1 - \left(\frac{D_{\mu CT}}{-f_1}\right) \cdot l, \qquad D_{\Pi B} = \left(\frac{D_{\mu CT}}{-f_1}\right) \cdot l - D_1.$$
(4.12)

Рассмотрим случай, когда ФЧЭ ПОИ находится в заштрихованной зоне **A** равномерной облученности (рисунок 4.2).

Будем предполагать такое построение оптической системы, при котором потери энергии излучения возникают только на границах раздела сред и в самих средах, то есть отсутствуют потери на диафрагмах. Это означает также, что размер пятна засветки не больше размера ФЧЭ.

Из (4.10) следует, что в этом случае поток излучения на ПОИ будет равен:

$$\Phi_{e} = \pi \tau_{\Pi OC} \tau_{c} \tau_{KC-AC} L_{e} \left(\frac{D_{ucm}}{-2f_{1}}\right)^{2} A_{2} = \tau L_{e} \left(\frac{A_{ucm} A_{2}}{f_{1}^{2}}\right)^{2}, \qquad (4.13)$$

где A_{ucr} – площадь излучающей поверхности ИОИ; A_2 – используемая площадь ФЧЭ ПОИ; $\tau = \tau_{\Pi OC} \tau_c \tau_{KC-AC}$

Рассмотрим случай, когда ПОИ находится в заштрихованной зоне **В** (рисунок 4.2).

Из (4.11) следует, что в этом случае поток излучения на ПОИ будет равен:

$$\Phi_e = \pi \tau_{\Pi OC} \tau_c \tau_{KC-AC} L_e \left(\frac{D_l}{2l}\right)^2 A_2 = \tau L_e \left(\frac{A_l A_2}{l^2}\right)^2, \qquad (4.14)$$

где A_1 – площадь выходного зрачка объектива; $A_1 = \pi D_1^2 / 4$.

Яркость *L*_e ИОИ в виде ПИД следует определить по формуле (3.1).

Поскольку в ОЭПЛП расстояние от объектива ПОС до ПОИ, как правило, не превышает нескольких миллиметров, т.е. ПОИ находится в зоне **A**, то поток, приходящий на ПОИ, с учетом яркости источника L_e (3.1) и формулы (4.13) будет равен

$$\Phi_e = \tau \cdot \frac{K_{\Pi M \chi} \cdot P_e}{\pi \ d^2 \cdot \sin^2(\theta / 2)} \cdot \left(\frac{D_{ucm}}{-2f}\right)^2 \cdot A_2.$$
(4.15)

Если диаметр ИОИ *d* равен диаметру диафрагмы *D*_{*ucm*}, то из выражения (4.14) поток излучения будет определяться по формуле:

$$\Phi_e = \tau \cdot \frac{K \cdot P_e}{4\pi f^2 \cdot \sin^2(\theta/2)} \cdot A_2, \qquad (4.16)$$

где A_2 – площадь ФЧЭ ПОИ, либо площадь диафрагмы, установленной перед ПОИ.

В выражениях (4.15) и (4.16) при расчетах величины потока, пришедшего на ПОИ, необходимо знать величину коэффициента пропускания $\tau_{\text{KC-AC}}$, расчет которой, в зависимости от вида сопряжения, имеет свои особенности (подраздел 3.3.1).

4.1.3 Расчет максимальной величины потока излучения, попадающего на ПОИ

Поток излучения, попадающий на ПОИ в ОЭПЛП, будет максимальным в случае, когда структуры КС и АС совпадают друг с другом. Функция пропускания при таком сопряжении примет значение, равное 1/2, то есть значение коэффициента $\tau_{\rm KC-AC}$ составит 0,5.

В этом случае поток Ф_{мах}, приходящий на ПОИ, будет определяться с учетом выражений (4.15) и (4.16):

$$\Phi_{max} = \tau \cdot \frac{K_{\Pi U \Pi} \cdot P_e}{2 \cdot \pi \ d^2 \cdot \sin^2(\theta / 2)} \cdot \left(\frac{D_{ucm}}{-f}\right)^2 \cdot A_2 \ . \tag{4.17}$$

Если диаметр ИОИ d равен диаметру диафрагмы D_{ucm} , то поток излучения будет определяться по формуле

$$\Phi_{max} = \tau \cdot \frac{K_{\Pi H \square} P_e}{8\pi f^2 \sin^2(\theta/2)} \cdot A_2 . \qquad (4.18)$$

Соответственно, минимальным поток излучения, попадающий на ФЧЭ ПОИ ОЭПЛП, будет в случае, когда прозрачные участки КС полностью перекрываются непрозрачными участками АС. В этом случае поток излучения полностью перекрывается КС и АС и на ФЧЭ ПОИ не попадает. При этом сигнал, снимаемый с сопротивления нагрузки, будет определяться темновым током и тепловыми шумами ПОИ (подраздел 3.2.2).

4.1.4 Энергетическое уравнение

Рассмотрим энергетическое уравнение ОЭПЛП, при помощи которого можно определить соотношения основных параметров элементов устройства.

Если перейти к потоку излучения Φ_{max} , приходящему на ПОИ, то условие (4.2) преобразуется к виду

$$\Phi_{\max} S_{\mathrm{I}} R_{\mathrm{OC}} \ge 96 \, \delta U_{\mathrm{III}\Sigma},$$

где *S*_I – интегральная токовая чувствительность ПОИ к излучению ИОИ.

Поскольку в реальных ОЭПЛП ПОИ находится на небольших расстояниях от ПОС. т.е в зоне **A**, то, подставив значение Φ_{max} и $\delta U_{\text{m}\Sigma}$ из (4.18) и (3.13), получим неравенство

$$\tau \frac{K_{\Pi H \square} P_e S_I R_{OC}}{8 \cdot 96 \pi f^2 \sin^2(\theta / 2)} A_2 \ge \sqrt{e_{u.y}^2 + (i_{u.y}^2 + 2eI_T + 4kT / R_{OC}) R_{OC}^2} .$$

Для случая, когда шумы ОУ (3.13) много меньше шумов ФД, получим

$$\tau \frac{K_{\Pi U \square} P_e S_I}{8 \cdot 96 \pi f^2 \sin^2(\theta / 2)} A_2 \ge \sqrt{i_{u.y}^2 + 2eI_T + 4kT / R_{oC}} .$$
(4.19)

Таким образом, энергетический расчет ОЭПЛП для выбранных типов ИОИ и ПОИ сводится к определению требуемой мощности излучения ПИД P_e , при которой величина напряжения сигнала U_c с ПОИ обеспечит оптимальную обработку сигналов в СВОИ.

4.2 Методика расчета параметров элементов ОЭПЛП

Обычно при проектировании ОЭПЛП задаются диапазоном измерения, классом точности, дискретностью отсчета, напряжением питания, характеристиками сигналов на выходе и условиями эксплуатации.

Исходя из этих требований, предлагается следующая методическая последовательность для выбора и расчёта основных параметров элементов ОЭПЛП:

- определение предела допускаемого значения погрешности измерения перемещения;

- выбор метода реализации принципа последовательного счета и схемы построения оптической системы ОЭПЛП;

- выбор параметров КЭ и АС и при необходимости, коэффициента интерполяции информационного сигнала;

- выбор ПОИ;

- выбор ИОИ и его параметров;

- расчет и выбор параметров оптической системы ОЭПЛП;

- расчет параметров элементов электрической схемы СПОИ, расчет отношения сигнал/шум;

- коррекция величины тока питания ПИД и проверочный расчёт отношения сигнал/шум с учётом корректировки.

4.2.1 Определение предела допускаемой погрешности измерения перемещения

Исходя из требуемого класса точности в соответствии с ГОСТ 26242-90 [6], для преобразователей линейных перемещений нетрудно найти предел допускаемой погрешности $\Delta_{Д}$ (табл. 4.1). При этом предельные погрешности учитывают все разновидности систематических погрешностей, свойственные преобразователям конкретного типа, и их случайные составляющие

Таблица 4.1. Предел допускаемой погрешности в зависимости от класса точности преобразователя

Класс точности	Предел допускаемой	Нормальное значение	
	погрешности	температуры	
	перемещений Δ_{J} , мкм	окружающего воздуха, °С	
001	0,1+0,2 L	$20 \pm 0,1$	
01	0,25 + 0,5 L	$20 \pm 0,1$	
1	0,5 + 1,2 L	$20 \pm 0,2$	
2	$1 + 2,5^{-}L$	$20 \pm 0,2$	
3	2 + 4,5 L	$20 \pm 0,5$	
4	$5 + 8 \cdot L$	20 ± 1	
5	10 + 15·L	20 ± 2	

6	20 + 30 L	20 ± 2	
7	$40 + 50^{\circ}L$	20 ± 5	
8	$80 + 100^{\circ}L$	20 ± 5	
9	$150 + 200^{\circ}L$	20 ± 5	
10	Не нормируются		

Примечание: *L* – безразмерная величина, численно равная длине перемещения в метрах.

4.2.2 Определение метода и схемы построения ОЭПЛП

На основе полученного значения погрешности выбирается метод формирования КС (разд. 2.2, гл. 2): растровый, дифракционный или интерференционный.

При реализации принципа последовательного счета (разд. 1.3) важную роль играют условия эксплуатации разрабатываемого ОЭПЛП. В условиях, где существует опасность попадания пыли, стружки и смазочноохлаждающей жидкости на КС, целесообразно использовать конструкцию, исключающую указанную опасность. В таких условиях наиболее широкое распространение получили ОЭПЛП *закрытого типа* с реализацией принципа последовательного счета при работе в проходящих пучках лучей, то есть построение ОЭПЛП может осуществляться по схемам, представленным на рис. 2.1, 2.5, 2.7, 2.8 (разд. 2.3).

Если условия эксплуатации позволяют избежать загрязнения КС, а также в случае, когда требуется отсутствие механического контакта между ней и считывающей головкой, целесообразно использовать конструкцию ОЭПЛП *открытого типа* с реализацией принципа последовательного счета при работе в отражённых пучках лучей, то есть построение измерительного звена будет осуществляться по схемам, представленным на рис. 2.9 - 2.14.

Технология изготовления (подраздел 3.3.2) позволяет достаточно легко реализовывать КС с периодом шкалы, равным 20 мкм и 40 мкм. Разработки шкал с периодом 10 мкм, 5 мкм и 2 мкм и их применение должно быть обосновано с технологической и экономической точки зрения.

4.2.3 Выбор параметров КС и АС и коэффициента интерполяции информационного сигнала

Исходя из требуемого значения предела допускаемого значения погрешности конструируемого ОЭПЛП, а также дискретности выходного сигнала, выбирается величина периода растровой структуры КС и АС, а также, при необходимости, коэффициент интерполяции электрического сигнала. Как уже было показано в разд. 2, перемещение КС относительно АС (или наоборот) на один период шкалы по ходу движения вызовет на выходе СПОИ сигнал, равный четырём дискретам, то есть изначально осуществляется четырёхкратная интерполяция электрического сигнала, что необходимо учитывать при выборе периода указанных растров, а также электрической схемы обработки информационного сигнала.

Наиболее оптимальным вариантом является случай, когда коэффициент интерполяции равен единице и период электрического сигнала на выходе ОЭПЛП (аналогового или дискретного) равен четверти периода муаровой картины на ФЧЭ ПОИ. Однако, в силу разного ряда причин: технологических, конструктивных, экономических,для достижения требуемой дискретности перемещения становится целесообразным применение растровых структур В сочетании С электронной интерполяцией сигнала.

Выпускаемые промышленностью линейные и цифровые интегральные схемы позволяют создать накапливающие преобразователи с делением шага на 8, удовлетворяющие всем требованиям в отношении точности интерполяции и надежности работы (подраздел 5.4). Таким образом, с учетом использования в схеме ОЭПЛП четырех ПОИ нетрудно достичь дискретности отсчета в 1/32 от величины шага КС.

Растровые окна AC должны быть реализованы таким образом, чтобы усреднять вклад помех в формируемый оптический сигнал, поэтому в плоскости окна должны быть не менее 80–100 периодов шкалы КС. За счет этого обеспечивается стабильность выходного сигнала даже в том случае, если структура КС немного повреждена или на ней присутствует загрязнение.

4.2.4 Выбор ПОИ

Как уже отмечалось в подраздел 3.2, кремниевые ФД обладают наибольшей температурной стабильностью характеристик и хорошим спектральным согласованием с оптическим излучением наиболее мощных ИОИ. Эти факторы и определяют применение кремниевых ФД в качестве ПОИ в ОЭПЛП. Среди множества таких ФД критерием дальнейшего выбора являются такие чисто конструктивные параметры, как размеры ФЧЭ и возможность реализации четырех или двух соприкасающихся ФЧЭ в едином корпусе. Электронная промышленность освоила ряд таких ФД (табл. 3.4 - 3.5), и поэтому, исходя из требуемых габаритных параметров AC, а также условий эксплуатации (напряжение питания, стабильность характеристик и т.д.), выбирается требуемый тип. Обычно рекомендуется ФД типа СФД4-04 – СФД16-01 (табл. 3.5), выполненный на единой подложке, так как в этом случае он менее подвержен влиянию условий эксплуатации.

4.2.5 Выбор ИОИ

В качестве ИОИ в современных ОЭПЛП широкое распространение получили ПИД, выбор модели которых осуществляется таким образом, чтобы обеспечить максимальное использование потока излучения выбранным типом ПОИ. Средняя мощность потока излучения ПИД в непрерывном режиме работы должна обеспечивать требуемое отношение сигнал/шум на выходе электронной схемы СПОИ в соответствии с выражением (3.14).

Кроме того, при выборе ПИД руководствуются его габаритами и конструкцией (табл. 3.1).

4.2.6 Расчет параметров оптической системы

Суть расчета параметров оптической системы состоит в определении требуемого потока излучения, создаваемого ПОС на ФЧЭ ПОИ, путем выбора мощности потока ПИД из выражения (4.19) с учетом диаметра выходного зрачка ПОС, её фокусного расстояния и условий равномерности облученности засветки ПОИ (4.12) (подраздел 4.1.2).

4.2.7 Определение величины нагрузочного сопротивления и коэффициентов усиления сигналов в СПОИ

Качество преобразования оптического сигнала в электрический зависит от параметров схемы подключения ПОИ (нагрузочного сопротивления, коэффициента усиления и требуемого отношения сигнал/шум). Расчет величины электрического сигнала, получаемого на выходе СПОИ, и выбор параметров элементов электрической схемы этого блока ОЭПЛП проводится в соответствии с выражениями (3.4)... (3.16) в подраздел 3.2.2.

После выбора и расчета параметров элементов ОЭПЛП проводится коррекция величины тока питания ПИД для получения мощности излучения P_e ПИД, обеспечивающей требуемое отношение сигнал/шум. Зависимость мощности излучения от тока питания ПИД определяется физическими процессами, проходящими в ПИД, и, как правило, носит линейный характер. Тогда, преобразовав условие (4.19), нетрудно найти требуемую мощность излучения ПИД из выражения:

$$P_{e} \ge \frac{8 \cdot 96\pi f^{2} \sin^{2}(\theta/2) \sqrt{i_{u,y}^{2} + 2eI_{T} + 4kT/R_{OC}}}{\tau K_{\Pi OH} S_{I} A_{2}}.$$
(4.20)

После этого необходимо провести проверочный расчет отношения сигнал/шум (3.16) с учётом этой корректировки.

4.3 Пример расчета параметров ОЭПЛП

Рассмотрим пример расчета по изложенной методике параметров ОЭПЛП с диапазоном измерения L = 0,2 м, классом точности преобразователя 3, дискретностью отсчета 1 мкм, без референтной метки, с напряжением питания преобразователя 5 В, прямоугольными импульсами TT на выходе и при цеховых условиях эксплуатации.

4.3.1 Определение предела допускаемого значения погрешности измерения перемещения

Для заданного в настоящем примере класса точности предел допускаемого значения погрешности измерений $\Delta_{\rm Z}$ определяется по формуле из табл. 4.1 и с учетом числового значения величины диапазона перемещения $\Delta_{\rm Z}$ проектируемого ОЭПЛП равен 2,9 мкм на всем диапазоне перемещений.

4.3.2 Выбор метода реализации и схемы построения ОЭПЛП

Поскольку условия эксплуатации разрабатываемого ОЭПЛП цеховые, то есть существует опасность попадания пыли, стружки и смазочно-охлаждающей жидкости на КС, то целесообразно использовать конструкцию двухкорпусного ОЭПЛП, в котором реализован принцип последовательного счета при работе в проходящих пучках лучей.

оптической системы ОЭПЛП систему. В качестве возьмём представленную на рис. 2.7, с той лишь разницей, что АС будет расположена не впереди (по ходу лучей) КС, а после нее, перед ФЧЭ ПОИ. Такое построение оптической системы позволяет упростить настройку относительно И ФЧЭ ПОИ. взаимного расположения AC КС Неравномерность потока излучения, падающего на ФЧЭ ПОИ, легко регулировать при настройке введением в ход лучей заслонок (настроечных винтов т.д.), предварительно предусмотрев таковые И при конструировании считывающей головки ОЭПЛП.

4.3.3 Расчет параметров КС, АС и коэффициента интерполяции информационного сигнала

Исходя из заданной дискретности отсчета в 1 мкм и возможности интерполирования электрических сигналов (подраздел 4.2.3), для схемы с четырьмя ПОИ значение шага КС не должно превышать 32 мкм.

Принципиально можно изготовить КС с периодом штрихов 4 мкм, что при четырёхэлементном ПОИ обеспечит на выходе сигнал дискретностью 1 мкм, однако технологические трудности, возникающие в процессе изготовления КС (подраздел 3.3.2), делают предпочтительным использование периодических пространственных структур с большим шагом с последующей электронной интерполяцией сигнала. Одно из наиболее распространённых значений шага КС равно 20 мкм, поэтому остановим выбор на этом значении. В этом случае для четырех ПОИ дискретность разрабатываемого ОЭПЛП составит 5 мкм (20 мкм / 4). Так как дискретность преобразователя должна быть равна 1 мкм, то необходимо в нашем случае применить не менее чем пятикратную электронную интерполяцию, выбрав, например, нормирующий преобразователь НП-5.

При этом общая длина одного окна АС с учетом требований подраздела 4.2.3 может составлять величины от 1,6 до 2 мм.

Для удобства настройки изготовим пластину AC с размером растровых окон 1,6×1,6 мм и зазором между растровыми окнами 1 мм (рисунок 4.3). Таким образом, упрощается настройка сигналов, снимаемых с ФЧЭ, поскольку диапазон перемещения электронной платы с ПОИ будет достаточно широким для точной установки ФЧЭ напротив растровых окон пластины AC.





4.3.4 Выбор модели ПОИ

Для того, чтобы при прохождении излучения источника через КС и AC осуществлялось требуемое преобразование, КС или AC должны равномерно облучаться (рисунки 2.5, 2.7, 2.8). Поэтому общий размер ФЧЭ должен быть не меньше, чем размер окна AC.

Для выбранной оптической системы и рассчитанных параметров AC (рисунок 4.3), целесообразно использовать четырёхэлементный ПОИ. По данным, приведённым в таблице 3.4 (раздел 3.2), выбираем ПОИ модели СФД4-03, характеристики которого приведены в таблице 3.4. Размер ФЧЭ составляет 1,8×1,8 мм, а межэлементный зазор составляет 0,4 мм.

4.3.5 Выбор модели ИОИ

Большей мощностью излучения обладают ПИД инфракрасного диапазона, поэтому в качестве ИОИ для выбранного типа ПОИ целесообразно использовать ПИД модели ЛИР-2, характеристики которого представлены в таблице 3.2 (раздел 3.2).

4.3.6 Расчет параметров оптической системы ОЭПЛП

Как и в случае оптической системы ОЭПЛП фирмы Heidenhain, приведённой на рис. 2.7, в рассматриваемом примере AC выполнена в виде четырех растровых окон, штрихи в которых дублируют штрихи KC, параллельны им и смещены на четверть периода друг относительно друга.

Поскольку в нашем случае КС и АС имеют равные периоды, а также одинаковое направление прозрачных и непрозрачных участков, то коэффициент пропускания из выражения (3.37) будет изменяться от 0 до 0,5.

Расстояние *g* между КС и AC определяем из выражения (3.38). Поскольку фазовые решетки концентрируют энергию преимущественно в нулевой и первые порядки, то принимаем m = 1. ПИД ЛИР-2 (табл. 3.2) имеет спектральный максимум излучения на длине волны 0,88 мкм. Подставляя числовые значения в (3.38), находим максимальное g_{max} и минимальное g_{min} расстояние между КС и АС:

 $g_{max} = (1 + 0.1)20^2 / 0.88 = 500 \text{ MKM} = 0.5 \text{ MM},$

 $g_{min} = (1 - 0.1)20^2 / 0.88 \cong 409$ мкм $\cong 0.41$ мм,

т.е. величина зазора между КС и АС может находиться в пределах от 0,41 мм до 0,5 мм. Таким образом, допуск на отклонение зазора $g = 0.45^{+500}_{-400}$ мм.

Обычно из технологических соображений толщина типовых стеклянных подложек для КС и АС ОЭПЛП составляет 3 мм.

Из рис. 4.3 видно, что пятно засветки должно покрывать все четыре окна AC, и тогда его диаметр D_{Π} :

$$D_{\pi} \ge (1, 5 \cdot 2 + 1) \cdot \sqrt{2}$$

Получаем, что $D_{\Pi} \ge 5$, 65 мм. Примем $D_{\Pi} = 6$ мм.

Если ПОИ располагается сразу за AC, то из условия равномерной облучённости в пятне засветки можно определить расстояние l от выходного зрачка объектива ПОС до плоскости расположения AC. Предположим, что входной и выходной зрачок объектива ПОС совпадают, а КС располагается на расстоянии 1 мм от плоскости выходного объектива. Тогда расстояние l от выходного зрачка до плоскости расположения AC складывается из величины расстояния от плоскости выходного зрачка до КС, редуцированной к воздуху толщины стеклянной подложки этого растра и расстояния между КС и AC, то есть l = 3,45 мм.

Поскольку габариты оптической системы разрабатываемого ОЭПЛП должны быть минимальными, чтобы поместиться в стандартный профиль,

целесообразно рассматривать случай, когда AC и ФЧЭ ПОИ находятся в заштрихованной зоне A (рисунок 4.2), то есть в пределах пятна равномерной облученности. Тогда диаметр пятна равномерной облучённости рассчитывается по формуле (4.12) для случая $D_{\Pi A}$.

Кроме того для обеспечения равномерности засветки входного зрачка ПОС передний апертурный угол объектива ПОС должен быть не менее половины угла излучения ПИД. Поскольку угол излучения выбранного типа ПИД составляет 120° (табл. 3.2), то передний апертурный угол объектива σ_A должен быть не менее 60°. Тогда фокусное расстояние объектива можно определить из рис. (4.2) :

$$D_1 = -f_1(2 tg \sigma_A) = f'_1(2 tg \sigma_A)$$
.

Подставляя эту формулу в выражение (4.12) для $D_{\Pi A}$, получим:

$$D_{\Pi A} = -f_l (2 tg \sigma_A) - (D_{ucm}/-f_l) l.$$

Подставляя числовые значения и решая квадратное уравнение, находим значение диаметра выходного зрачка объектива и его фокусное расстояние:

$$-f_1 \cong 2,46$$
 мм; $D_1 \cong 8,52$ мм.

Теперь рассчитаем поток излучения, попадающий на каждый ФЧЭ. Полагаем, что прозрачные и непрозрачные штрихи КС и АС совпадают. Тогда коэффициент пропускания растрового сопряжения для каждого канала составит $\tau_{AC-KC} = 0,5$. С учётом потерь на отражение и поглощение в стеклянных подложках [43] коэффициент пропускания ПОС составит:

$$\tau_{\Pi OC} = 0.96^2 \ 0.99^2 \cong 0.95$$
.

Полагаем, что коэффициент пропускания среды распространения оптического излучения и коэффициент пропускания анализирующей диафрагмы ПОИ равны единице. Тогда суммарный коэффициент пропускания ПОС, коэффициент пропускания системы КС – АС $\tau_{\text{KC-AC}}$, анализирующей диафрагмы ПОИ и среды распространения составит:

$$\tau = \tau_{\pi 0 C} \tau_{\text{KC-AC}} = 0.95^{\circ} 0, \ 5 \cong 0.43.$$

Поток излучения ПИД, попадающий на каждый ФЧЭ четырёхэлементного ПОИ, рассчитывается с учетом (4.18) по формуле:

$$\Phi_{\Pi O H} = \tau \cdot \Phi_e \cdot 4 \cdot \frac{A_{\Pi O H}}{\pi \cdot D_{\Pi}^2},$$

где *А*_{пои} – используемая площадь ФЧЭ ПОИ, которая равна площади окна АС перед ФЧЭ ПОИ.

Для выбранного типа ИОИ полная мощность излучения при прямом токе в 100 мА составит 20 мВт. Площадь окна АС составляет $A_{\Pi O II} = 1,5 \times 1,5 = 2,25 \text{ мм}^2 = 2,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Подставляя числовые значения, получим величину максимального потока излучения, приходящего на

каждый ФЧЭ выбранного типа ПОИ, при условии совпадения прозрачных и непрозрачных штрихов КС и АС,:

 $\Phi_{\Pi O H \max} = 0,43.20 \cdot 10^{-3} \cdot 4^{\circ} 2,25 \cdot 10^{-6} / (3,14.36 \cdot 10^{-6}) \cong 6,8 \cdot 10^{-4} \text{ Bt.}$

4.3.7 Расчет параметров элементов электрической схемы СПЭС, расчет отношения сигнал/шум

Пусть электронная схема включения одного ФЧЭ выбранного четырёхэлементного ФД модели СФД4-03 выглядит так, как показано на рис. *3.5*,а. Аналогично можно подключить и другие ФЧЭ.

Одним из наиболее распространённых типов ОУ, применяемых в СПОИ, в частности, в электронных схемах ОЭПЛП, разрабатываемых в ОАО «СКБ ИС», является усилитель AD8604 фирмы Analog Devices. Для этой модели ОУ максимально допустимое напряжение на выходе, при котором сохраняется линейность усиления, составляет 4,975 В при напряжении питания 5 В и температуре 25 °C.

Тогда из выражения (3.4) расчетное значение сопротивление обратной связи будет $R_{OC} \le 4,975 / (0,5^{\circ}6,8^{\circ}10^{-4}) \cong 14632$ Ом.

Выбираем из ряда E24 номинальных сопротивлений резисторов (ГОСТ 10318-80) значение $R_{OC} = 13$ кОм.

Темновой ток ФД модели СФД4-03 (табл.3.4) $I_{\rm T} = 1$ нА. Плотность шумового тока в единичной полосе частот этого ФД, работающего в диодном режиме, будет равна

 $i_{u.\phi\partial} = \sqrt{2e \cdot I_T} \cong 1,79 \cdot 10^{-14} \text{ A/Fu}^{1/2}.$

Плотность шумового тока сопротивления резистора при выбранном значении *R*_{OC} в единичной полосе частот:

$$i_{R_{OC}} = \sqrt{4k \cdot T / R_{OC}} \cong 1,06^{-10} \text{ A/} \Gamma \text{u}^{1/2}.$$

Тогда отношение сигнал/шум (3.15) на выходе ФПМ в единичной полосе частот можно рассчитать по формуле:

$$\left(\frac{U_c}{U_{u}}\right)_{\rm soux} = \frac{S_I \cdot \Phi_e}{\sqrt{i_{u.\phi\partial}^2 + i_{R_{OC}}^2}} \cong 321^{\circ}10^6.$$

4.3.8 Коррекция величины тока питания ПИД и расчёт отношения сигнал/шум с учётом корректировки

Полученные в предыдущем разделе значения отношения сигнал/шум являются избыточными, поэтому можно уменьшить поток излучения ПИД, уменьшив, соответственно, его ток питания. Из типовых зависимостей мощности излучения ПИД от прямого тока, приведённых в [26], следует, что при уменьшении тока питания ПИД до 10 мА, мощность излучения составит 2 мВт. Тогда максимальный поток излучения, попадающий на один из четырёх ФЧЭ ПОИ, составит:

$$\begin{split} \varPhi_{\Pi OH \max} &= 0,43^{\circ}2^{\circ}10^{-3} \cdot 4^{\circ}2,25^{\circ}10^{-6} / (3,14^{\circ}36^{\circ}10^{-6}) \cong 0,68^{\circ}10^{-4} \text{ Bt.} \\ I_{cp.} &= 0,25^{\circ}0,68^{\circ}10^{-4} \cong 0,17^{\circ}10^{-4} \text{ A.} \\ & \left(\frac{U_{c}}{U_{u}}\right)_{_{6bx}} = \frac{S_{I} \cdot \varPhi_{e}}{\sqrt{i_{u.\phi\partial}^{2} + i_{R_{OC}}^{2}}} \cong 32^{\circ}10^{6}. \end{split}$$

параметров преобразователей Ha основе рассчитанных осуществляется разработка их конструктивного решения. Конкретное конструктивное решение зависит от многих факторов: назначения, (подраздел 3.3.2), от материала, размеров И формы требований, регламентирующих функционирование прибора и условий его работы, а также от вида производства.

Конкретные примеры конструктивных решений ОЭПЛП ведущих производителей приведены в следующей главе.

ГЛАВА 5. ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ ОЭПЛП

Производители ОЭПЛП предлагают два варианта исполнения ОЭПЛП: закрытый (КС находятся в герметичном корпусе) и открытый (считывающая головка, содержащая излучатель И, АС, ФПМ и СПОИ, расположена в отдельном герметичном блоке, а КС закрепляется на перемещающемся объекте). Первый вариант исполнения ОЭПЛП обычно применяется для преобразователей, работающих в таких условиях, где требуется защита КС и АС от внешних воздействий. При этом преобразователи перемещений, в основном, работают в проходящих пучках лучей. Второй вариант характерен, как правило, лля преобразователей, работающих отражённых В пучках лучей И функционирующих в лабораторных условиях или условиях, в которых не требуется защита от воздействия влаги и пыли.

В этой главе основное внимание будет уделено закрытым вариантам исполнения ОЭПЛП в силу сложности их конструктивного исполнения.

Среди закрытых ОЭПЛП можно выделить профильные и штоковые преобразователи.

В профильных ОЭПЛП КС находится в герметичном корпусе – профиле, а считывающая головка находится вне этого корпуса. Преобразование линейных перемещений может осуществляться либо перемещением профиля с закреплённой в нём КС относительно неподвижной считывающей головки, либо перемещением считывающей головки относительно неподвижной КС, установленной в профиле, закреплённом на неподвижном элементе конструкции.

В штоковых ОЭПЛП КС закреплена на подвижном элементе – штоке, а И, АС и ФПМ со схемой предварительной обработки электрического сигнала СПОИ расположены в корпусе преобразователя.

5.1 Варианты конструкции профильных ОЭПЛП

Профильные ОЭПЛП состоят из перемещающихся друг относительно друга двух узлов: профиля (корпуса) и считывающей головки.

Пример конструкции корпуса ОЭПЛП в поперечном сечении представлен на рис. 5.1. Корпус 1 имеет специальные пазы: один паз - для фиксации КС 2, два других паза - для заправки профильных уплотнителей 3. КС в пазу фиксируется резиновым шнуром 4, обеспечивающим минимальное воздействие температурных деформаций на работу ОЭПЛП [10].

Считывающая головка состоит из двух узлов: узла считывания 1 (рисунок 5.2) и корпуса головки 2.



Рисунок 5.1 – Корпус ОЭПЛП с КС



Рисунок 5.2 – Считывающая головка ОЭПЛП

Узел считывания включает в себя конструктивно все элементы, представленные на рис. 2.5, кроме КС. Все эти элементы смонтированы на основании каретки 1 (рисунок 5.3), которая имеет форму уголка.



Рисунок5.3 – Узел считывания

К внешней стороне уголка 1 приклеивается AC 2 и винтами закрепляется плата ПИД 3. Поток от каждого ПИД, проходя через соответствующую диафрагму, через AC попадает на соответствующий ПОИ платы ФД 4, смонтированной на другой стороне уголка 1. На первой стороне уголка запрессованы три оси с подшипниками 5, на второй – две. Подшипники являются базой для установки каретки на КС и базой её перемещения. Прижим 6 имеет два таких же подшипника и обеспечивает

надёжность контакта трёх подшипников 5 каретки с АС. Рабочее усилие прижима 6 обеспечивается установкой согласно рис. 5.3. Контакт двух подшипников 5 каретки с торцем шкалы ОЭПЛП обеспечивается подпружиненным шариком 5 корпуса головки (рисунок 5.2), который входит в контакт с тремя шариками каретки. Этот прижим является связующим звеном каретки и корпуса головки и одновременно обеспечивает постоянство контакта каретки и КС на изделии потребителя.

В корпус головки (рисунок 5.2) устанавливается нормирующий преобразователь (НП) 3. Провода 4 от плат ПИД и ФД соединяют последние с НП. Кабель 6 обеспечивает питание электронных схем ОЭПЛП и его связь с устройством приёма информации. Заделка кабеля в корпус головки осуществляется втулкой 7, в которой кабель фиксируется его обжимом.

На рисунке 5.4 показан ОЭПЛП модели ЛИР-7 производства ОАО СКБ ИС с длиной преобразуемого перемещения равной нулю, т.к. это даёт возможность увидеть одновременно крайние положения каретки внутри ОЭПЛП: слева - начало отсчёта, справа – конец отсчёта. Из рисунка видно, что считывающая головка ОЭПЛП имеет возможность выбега за пределы преобразуемого перемещения по 3,5 мм в обе стороны. С двух сторон корпуса ОЭПЛП установлены опоры 1, через пазы которых корпус крепится у потребителя.



Рисунок 5.4 – Конструкция ОЭПЛП модели ЛИР-7

На виде «А-А» показано раскрытие защитных профильных уплотнителей 2 в зоне головки, положение каретки 3 относительно шкалы 4, а также прижим 5, обозначенный на рис. 5.3 позицией 6, в рабочем положении.

На рис. 5.5 показана конструкция ОЭПЛП моделей ЛИР-8, ЛИР-9, ЛИР-10 производства ОАО СК БИС, построенных на базе модели ОЭПЛП

ЛИР-7. Выбег считывающей головки за пределы измерения – по 10 мм в обе стороны.



Рисунок 5.5 – Конструкция ОЭПЛП моделей ЛИР-8 - ЛИР-10

В корпусах ОЭПЛП устанавливаются самоклеющиеся метки 6 (рисунки 5.4 и 5.5). Зона установки меток определяется по срабатыванию сигнала референтной метки при прохождении считывающей головки вдоль шкалы с функционирующими референтными метками. На крышке 7 считывающей головки маркируется код заказа. Шаблон 8 фиксирует рабочее расстояние между корпусами ОЭПЛП и головки и используется как технологический при установке ОЭПЛП на объекте.

Н преобразует сигналы платы ПОИ в выходные сигналы в соответствии с исполнением преобразователя подраздел 5.4.

Среди закрытых ОЭПЛП, выпускаемых за рубежом, особое место следует уделить преобразователям фирмы HEIDENHAIN (Германия).

Закрытые ОЭПЛП этой фирмы поставляются в двух исполнениях: с крупнопрофильным корпусом шкалы (высокая стойкость к вибрациям, измеряемая длина – до 30 м) и с мелкопрофильным корпусом шкалы (ограниченное место монтажа, измеряемая длина – до 1240 мм, с монтажной шиной или крепежными элементами – до 2040 мм).

В закрытых ОЭПЛП фирмы HEIDENHAIN (Германия) (рисунок 5.6) алюминиевый корпус защищает считывающий элемент (И, АС, ФПМ) и его направляющую от пыли, стружки или воды. Уплотнение закрывает корпус снизу. Считывающий элемент передвигается вдоль шкалы без контакта с ней. Подвеска соединяет считывающий элемент с корпусом считывающей головки, компенсируя таким образом несоосность между шкалой и суппортом станка [44].



Рисунок 5.6 – Конструкция закрытых ОЭПЛП фирмы HEIDENHAIN (Германия)

Типовыми представителями закрытых ОЭПЛП, выпускаемых фирмой HEIDENHAIN, являются преобразователи серии LS 100 – для случая крупного профиля измерительной шкалы и серии LS 400 – для мелкого профиля измерительной шкалы.

Преобразователи с крупнопрофильным корпусом шкалы отличаются стойкостью к вибрациям. Благодаря высокой точности и широким температурным диапазонам работы преобразователи серии LS 100 предназначены для применения на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Линейные преобразователи с мелкопрофильным корпусом шкалы используются, прежде всего, в случаях ограниченного монтажного пространства.

Особым преимуществом в случае мелкопрофильных преобразователей является монтаж при помощи монтажной шины (рисунок 5.7). Эта шина закрепляется еще при сборке станка. Лишь при конечном монтаже на нее закрепляется ОЭПЛП. В случае сервисного обслуживания он может быть легко заменен [44].



Рисунок 5.7 – Крепление закрытого ОЭПЛП с мелкопрофильным корпусом шкалы

Технические характеристики типовых закрытых инкрементных ОЭПЛП фирмы HEIDENHAIN приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

	Модели		
Характеристики	LS 187,	LS 487	
	LS 177	LS 477	
Период сигнала	20 мкм	20 мкм	
Класс точности, мкм	±5, ±3	±5, ±3	
Рекомендуемый шаг измерения, мкм	От 1 до 0,5	От 1 до 0,5	
Диапазон измерений, мм	от 140 до 3040	от 70 до 2040	
Референтная метка	Одна или с кодированным		
	расстоянием		

5.2 Варианты конструкции штоковых ОЭПЛП

Характерными представителями штоковых ОЭПЛП являются модели ЛИР-14, 15, 17 и 19, выпускаемые ОАО СКБИС (Санкт-Петербург) [45].

Конструктивно штоковые ОЭПЛП моделей ЛИР-14, 15, 17 различаются выходом кабеля, величиной рабочего хода штока, наличием или отсутствием его защиты. Общим для этих моделей ОЭПЛП является конструктивное решение основных узлов и их компоновка (рисунок 5.8).

Основные узлы штоковых ОЭПЛП:

- шток 1 с запрессованным на нём ограничителем 2 перемещается в подшипнике качения, наружная обойма 3 которого запрессована в корпусе 4;

- КС 5 в оправе жёстко связана через ограничитель со штоком;

- узел считывания в составе AC 6, платы излучателя 7 и платы ПОИ 8, смонтированных на оправе 9, крепится к корпусу 4 через штифт 10, что позволяет регулировать наклон AC относительно КС (для обеспечения параллельности штрихов их растровых структур).

Шток, ограничитель и шкала образуют подвижный модуль, способный совершать поступательные перемещения относительно АС в пределах хода штока. Параллельно перемещению штока в корпус установлена направляющая 11. Двумя винтами 12 выбирается зазор между ограничителем и направляющей, что исключает разворот подвижного модуля.

Усилие, обеспечивающее постоянный контакт наконечника 13 с поверхностью контролируемого объекта и возврат штока в исходное положение (при любой ориентации штокового ОЭПЛП в пространстве), создаётся работающей на растяжение цилиндрической пружиной 14. Один



конец пружины закреплён на стойке 15 неподвижной части ОЭПЛП, а другой – на ограничителе 2 подвижного модуля.

Рисунок 5.8 – Конструкция штокового ОЭПЛП типа ЛИР-14

Со стойкой 15 жёстко связан кронштейн 16 с закреплённым на нём НП 17. Через отверстия в кронштейне пропущены провода от плат узла считывания к НП.

Кабель 18 обеспечивает питание ОЭПЛП и его связь с устройством приёма информации потребителя. В ОЭПЛП модели ЛИР-14 положение кабеля фиксируется прижимом 20, что предохраняет распайку кабеля на

плате НП. Выходящий из ОЭПЛП конец кабеля проходит через ниппель 21, зафиксированный прижимом 22 на крышке 23 кожуха 24.

Конструкция штокового ОЭПЛП ЛИР-19 представлена на рис. 5.9.







Шток 1 перемещается в подшипнике качения, наружная обойма 2 которого зафиксирована в корпусе 3. На шток установлена оправа 4 с КС 5.

К корпусу 3 крепится печатная плата 6 НП с ПОИ 7 и кронштейн 8 с АС 9 и излучателем 10.

Усилие, обеспечивающее постоянный контакт наконечника 11 с поверхностью контролируемого объекта и возврат штока в исходное положение (при любой ориентации штокового ОЭПЛП в пространстве), создаётся работающей на растяжение цилиндрической пружиной 12. Один конец пружины закреплён на стойке (на рис. *5.9* не показана), вмонтированной в корпус 3, а другой – на штифте 13, запрессованном в перемещающуюся вместе со штоком оправу 4.

Кабель, осуществляющий связь ОЭПЛП с устройством приёма информации, выведен через фланец 15 кожуха 16 и зафиксирован втулкой 17. Кольцо 18 и шайбы 19 обеспечивают герметичность конструкции в месте выхода кабеля.

На рис. 5.10 представлены конструктивные отличия исполнения штокового ОЭПЛП модели ЛИР-19 с защитой штока и ограничителем его рабочего хода до 8 мм. На шток 1 одевается манжета 20, обеспечивающая герметичность штока. Один конец манжеты одевается на наконечник 21, а другой – на удлинитель 22 наружной обоймы 2. Функцию жёсткого упора, ограничивающего ход штока до 8 мм, выполняет установленный на корпусе 3 кронштейн 23 с резиновым штифтом 24.

5.3 Варианты конструкций ОЭПЛП открытого типа

Открытые ОЭПЛП состоят из двух перемещающихся друг относительно друга узлов: КС и считывающей головки с АС. Перемещение или неподвижность этих узлов во время эксплуатации ОЭПЛП определяется конструкцией объекта, на который устанавливается ОЭПЛП. В большинстве случаев происходит перемещение КС относительно неподвижной считывающей головки.

Преобразователи типа RG4 и RG2 (рисунки 2.13 и 2.14) британской компании Renishaw являются открытыми бесконтактными оптическими системами с нулевым трением и отсутствием механического износа.

Все считывающие головки RG2 обеспечивают стандартные аналоговые выходные сигналы или стандартные выходные сигналы прямоугольной формы в соответствии с промышленным стандартом. Период аналогового сигнала составляет 20 мкм, а дискретность прямоугольных импульсов на выходе электронного интерполятора находится в пределах от 5 мкм до 10 нм. В комплект поставки считывающих головок всех типов входят референтные метки, которые обеспечивают приход в нулевую точку с высокой повторяемостью.

Система RG4 может поставляться со считывающими головками двух разных типов. RGH34 является компактной считывающей головкой, к которой с помощью плоского кабеля присоединена печатная плата малых размеров. На выходе она дает аналоговый сигнал амплитудой 1В или

цифровой сигнал прямоугольной формы с разрешением от 10 до 0,1 мкм. Система поставляется с контрольной меткой или концевым выключателем на магнитном принципе действия.

Считывающие головки RGH41 и RGH40 создают на выходе аналоговый или цифровой сигнал прямоугольной формы с разрешением от 10 до 0,1 мкм. Считывающая головка RGH41 предназначена для использования с позолоченной измерительной шкалой RGS40-S, а головка RGH40 используется со стеклянной шкалой RGS40-G. Эти головки также поставляются с контрольной меткой и парой концевых выключателей на магнитном принципе действия. Обе считывающие головки снабжены уникальными индикаторами настройки производства Renishaw.

Оптическая схема ОЭПЛП типа RG2 представлены на рис. 2.13, а оптическая схема ОЭПЛП типа RG4 представлена на рис. 2.14. Уникальная оптическая схема обеспечивает малую величину погрешностей при небольших перемещениях, величина которых не превышает величину периодической ошибки (ошибки подразбиения), которая находится в пределах $\pm 0,15$ мкм (RG2) или $\pm 0,25$ мкм (RG4). Эта погрешность является частью ошибки линеаризации, которая составляет $\pm 0,75$ мкм (RG2) или ± 1 мкм (RG4) на длине 60 мм или ± 3 мкм на длине 1 м в любой части измерительной шкалы.

Сверху на позолоченную КС RGS20 нанесено защитное лаковое покрытие (см. выносные элементы на рис. 2.13, 2.14), которое предохраняет ее от повреждения и упрощает техническое обслуживание системы.

Пример открытого ОЭПЛП типа RG2 приведен на рис. 5.11



Рисунок 5.11 – ОЭПЛП фирмы Renishaw типа RGH25F

Открытый ОЭПЛП типа RGH34 представлен на рис. 5.12 и состоит из КС и бескорпусных считывающей головки и платы интерфейса [12, 13, 14].



Рисунок 5.12 – ОЭПЛП фирмы Renishaw типа RGH34

ОЭПЛП открытого типа с КС на инваровой линейке **SIGNIM**TM RELM фирмы Renishaw состоит из считывающей головки **SIGNIM**TM SR 1 (рисунок 5.13), интерфейса Si и КС RELM 2, выполненной в виде узкой пластины.



Рисунок 5.13 – ОЭПЛП типа SIGNIMTM RELM фирмы Renishaw

КС RELM изготавливается из инвара – железо-никелевого сплава, имеющего низкий температурный коэффициент линейного расширения – менее 1,4 мкм / (м ·°C). Погрешность изготовления измерительных шкал находится в пределах ±1 мкм.

5.4 Обработка электрических сигналов в ОЭПЛП

Как правило, во всех ОЭПЛП система первичной обработки (СПОИ) (рисунок 1.1) размещается в считывающей головке и формирует ортогональные периодические токовые сигналы (рисунок 2.2), которые являются выходными сигналами считывающей головки. В зависимости от

требуемого вида входных сигналов внешнего устройства индикации или преобразования (ВУИП) (рисунок 1.1) в систему вторичной обработки (СВОИ) встраивается нормирующий преобразователь (НП), который и решает задачу обеспечения внешнего интерфейса. НП входит в состав всех моделей преобразователей линейных и угловых перемещений марки ЛИР, выпускаемых ОАО СКБ ИС. Он преобразует поступающие от СПОИ ортогональные периодические сигналы каналов А, В и референтной метки R (рисунок 2.5) с явно выраженным максимумом в выходные сигналы, тип, форма, амплитуда (или уровень) и период (или дискретность) которых определяются исполнением преобразователя [44].

5.4.1 Электрические схемы нормирующих преобразователей ОЭПЛП с синусоидальными прямыми и инверсными выходными сигналами напряжения

Схема НП с синусоидальными прямыми и инверсными выходными сигналами напряжения с амплитудой 1 В и напряжением питания +5 B ± 5% типа НП-Usin (+5 B) приведена на рис. 5.14.





НП состоит из усилителей-формирователей сигналов A и B D1.1...D1.4, и усилителей-формирователей канала R D2.1...D2.4. Сигналы с ФД поступают на инвертирующие входы усилителей. На неинвертирующие входы подаётся напряжение смещения с R13, R14, C10, равное U_{num} / 2. С выходов операционных усилителей через защитно-согласующие резисторы прямые и инверсные сигналы поступают на выход преобразователя.

Синусоидальные выходные сигналы A, B (рисунок 5.15) при напряжении питания $U_{num} = +5 \text{ B} \pm 5\%$ измеряются в дифференциальном режиме на резисторе 120 Ом размах: (P + Q) = 0,6...1,2 B; ассиметрия: |P - Q| / (P + Q) $\leq 0,065$; отношение (P_A + Q_A) / (P_B + Q_B) = 0,8...1,25; фазовый сдвиг: (f₁ + f₂) / 2 = 90° $\pm 10^{\circ}$).



Рисунок 5.15 – Сигналы, формируемые на выходе НП-Usin

Схема НП с синусоидальными выходными сигналами напряжения с амплитудой 8 В и прямоугольным сигналом референтной метки с напряжением питания ± 12 B $\pm 5\%$ типа НП-Usin (± 12 B) приведена на рис. 5.16.

Для описанной схемы при напряжении питания $U_{num} = +(12,0 \pm \pm 0,6)$ В двойная амплитуда сигналов А, В (рисунок 4.17) равна $U_c = (15 - 16)$ В, а сигнала референтной метки R: $U_{Rh} = 11$ B; $U_0 = 0$ B.

5.4.2 Электрические схемы нормирующих преобразователей ОЭПЛП с прямоугольными импульсными прямыми и инверсными выходными сигналами

Схема НП с прямоугольными импульсными прямыми и инверсными выходными сигналами, коэффициентом интерполяции – 1, напряжением питания +5 B \pm 5%; +12 B \pm 5%.типа НП-1 (+5 B; +12 B) представлена на рис. 5.18.

НП состоит из усилителей фототока D1.1...D1.3, формирователя опорного напряжения на микросхеме D1.4, компараторов D2.1... D2.3, формирователя сигналов стандарта RS422 на микросхеме D3. Сигналы с ФД каналов А, В, R после усиления поступают на выходы компараторов. С выходов компараторов каналов А и В (D2.1, D2.2) сигналы поступают на входы 1 и 7 микросхемы D3 и на схему формирования сигнала референтной метки VD1...VD3, R18. На эту же схему поступает сигнал с выхода компаратора D2.3 канала R. Сформированный по длительности и фазе выходной сигнал референтной метки R поступает на вход 9 микросхемы D3. При напряжении питания +5 В в качестве формирователя D3 используется микросхема AM26LS31, а при напряжении питания +12 В – 26ET31.



Рисунок 5.16 – Схема НП с синусоидальными выходными сигналами и прямоугольным сигналом референтной метки



Рисунок 5.17 – Синусоидальные выходные сигналы НП и прямоугольным сигналом референтной метки

Формирование прямоугольных парафазных сигналов, частота которых либо соответствует частоте входных токовых сигналов, либо в K раз выше (K – коэффициент интерполяции) в зависимости от исполнения НП. Это позволяет при соответствующем приёме информации ВУИП повысить разрешающую способность преобразователя в 4 раза или в 4K раз по сравнению с шагом растра. Форма выходных сигналов представлена на рис. 5.19.



Рисунок 5.18 – Схема НП с прямоугольными импульсными прямыми и инверсными выходными сигналами



Рисунок 5.19 – Выходные прямоугольные парафазные сигналы

Помимо основных сигналов перемещения преобразователь вырабатывает сигнал референтной метки (PM) или сигнал начала отсчёта *I_{Ri}* (рисунок 5.19 б). Этот сигнал позволяет использовать преобразователь как датчик положения. При полном совпадении аналогичных кодовых растров Г и Б (рисунок 2.6) поток излучения излучателя 4, принимаемый одной из секций ФПМ 6, в 3-4 раза больше, чем при любом другом взаимном положении этих кодовых растров. Ширина сигнала РМ по уровню 0,5 от её амплитуды не превышает периодов одного из сигналов перемещения. Для фиксирования этого уровня вне зависимости от интенсивности излучения И 4 (рисунок 2.5) организован опорный сигнал: поток излучения от И 4 через диафрагму Г поступает на вторую секцию ФПМ 6.

Выходной прямоугольный импульсный сигнал (рисунок 5.19 а) уровня TTL при напряжении питания $U_{num} = +5 \text{ B} \pm 5\%$ в приведенной схеме будет равен $U_I >> 2,4 \text{ B}$ при $I_{6blx} \le 20 \text{ MA}$; $U_0 < 0,5 \text{ B}$ при $I_{6blx} \le 20 \text{ MA}$ (выходная емкость НП $C_H < 1000 \text{ пФ}$ при токах: $I_{6blx} \le 20 \text{ MA}$).

Длительность фронтов выходных сигналов – не более 100 нс.

Время задержки сигнала референтной метки относительно основных выходных сигналов: *t*_d ≤ 100 нс.

Выходной прямоугольный импульсный сигнал (рисунок 5.19 б) уровня HTL при напряжении питания $U_{num} = +12 \text{ B} \pm 5\%$ в приведенной схеме будет равен $U_I >> U_{num} - 2,4$ В при $I_{eblx} \le 20$ мА; $U_0 < 0,5$ В при $I_{eblx} \le 20$ мА (выходная емкость HП $C_H < 1000$ пФ при токах: $I_{eblx} \le 20$ мА).

Длительность фронтов выходных сигналов – не более 300 нс.

Время задержки сигнала референтной метки относительно основных выходных сигналов: $t_d \leq 300$ нс.

Схема НП с прямоугольными импульсными прямыми и инверсными выходными сигналами, коэффициентом интерполяции – 1; 2; 5; 10, напряжением питания +5 B \pm 5%; +12 B \pm 5%.типа НП-10 (+5 B; +12 B) приведена на рис. 5.20.

НП состоит из усилителей фототока D1.1, D1.2, D1.3, специальной микросхемы D2, формирователя D3. Сигналы с ФД через усилители D1.2 и D1.4 поступают на вход микросхемы D2, которая преобразует входные ортогональные синусные сигналы в выходные ортогональные последовательности прямоугольных импульсов с частотой $f_{eblx} = K f_{ex}$, где K – коэффициент интерполяции, который может принимать значения 1, 2, 5, 10 в зависимости от кода на выводах 4 и 5 микросхемы D2. Формирователь D3 преобразует импульсные сигналы с выхода D2 в стандарт RS422. При напряжении питания +5 В в качестве формирователя D3 используется микросхема AM26LS31, а при напряжении питания +12 В – 26ET31.



Рисунок 5.20 – Схема НП с прямоугольными прямыми и инверсными выходными сигналами и коэффициентом интерполяции – 1; 2; 5; 10

Схема НП с прямоугольными импульсными прямыми и инверсными выходными сигналами, коэффициентом интерполяции –25; 50, напряжением питания +5 B ± 5% типа НП-25...50 (+5 B) приведена на рис. 5.21.

НП состоит из усилителей сигналов с ПОИ каналов A, B, R, выполненных на операционных усилителях D1.1, D1.3, D1.2. С выходов операционных усилителей сигналы поступают на соответствующие входы

специализированной микросхемы аналого-цифрового преобразователя D2, которая преобразует входные синусно-косинусные сигналы в выходные цифровые с необходимым коэффициентом интерполяции.

В микросхеме D3 хранится информация о режиме работы D2. C8, L1, C9 – фильтр по питанию микросхемы D2. Микросхема D4 – формирователь выходных сигналов.

Описанные схемы позволяют упростить процессы проектирование электронной части ОЭПЛП с учетом перевода ее на современную элементную базу.



Рисунок 5.21 – Схема НП с прямоугольными импульсными прямыми и инверсными выходными сигналами и коэффициентом интерполяции –25;50

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Порфирьев Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. Л.: Машиностроение, 1989. - 387 с.

2 Фотоэлектрические преобразователи информации /Преснухин Л.Н., Шаньгин В.Ф. и др. М., «Машиностроение», 1974. - 376 с.

3 Маламед Е.Р. Фотоэлектрические преобразователи линейных перемещений на дифракционных решетках. Учебное пособие, ЛИТМО, 1990. - 45 с.

4 Городецкий А.Е., Тарасова И.Л., Артеменко Ю.Н. Интерференционно-кодовые преобразования. — СПб.: Наука, 2005. - 472 с.

5 Датчики: Справочное пособие /Шарапов В.М., Полищук Е.С., Ишанин Г.Г и др./Под. ред. Шарапова В.М., Полищука Е.С., Черкассы, 2008, 1072 с.

6 ГОСТ 26242-90. Системы числового программного управления. Преобразователи перемещений. Общие технические условия / М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам.

7 РМГ 29-99 (Т80). Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения

8 ГОСТ 8.009-84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений»

9 Каталог фирмы Heidenhain "Exposed Linear Encoders", May 2007.

10 ОАО СКБИС «Преобразователи линейных перемещений. Модели ЛИР-7, ЛИР-8, ЛИР-9, ЛИР-10. Технические условия ЛИР-7.000.000 ТУ» Мау 2007.

11 Spies, A., "Längen in der Ultraprazisionstechnik messen", Feinwerktechnik &: Meβitechnik 98 (1990), 10, pp. 406-410.

12 Обзорный каталог "Non-contact position encoders" фирмы Renishaw. Июль, 2007.

13 Обзорный каталог "Бесконтактные системы с обратной связью для измерения перемещений" фирмы Renishaw, Май 2004.

14 Обзорный каталог "Бесконтактные энкодеры" фирмы Renishaw, Декабрь 2005.

15 http://bsfp.media-security.ru/school3/16.htm

16 Ишанин Г.Г., Козлов В.В. Источники оптического излучения: Учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов. СПб.: Политехника, 2009, - 415с.

17 http://www.micrel.spb.ru/

18 Литвинов В.С., Рохлин Г.Н. Тепловые источники оптического излучения. - М.: Энергия, 1985.

19 Джабиев А.Н., Мусяков В.Л., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н. "Оптико-электронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной". Монография/Под.общ.ред. Э.Д. Панкова - СПб., ИТМО, 1998. - 238с.

20 Высокоточные угловые измерения / Д.А.Аникст, К.М.Константинов, И.В. Меськин, Э.Д. Панков и др.; Под ред. Ю.Г. Якушенкова. - М.: Машиностроение, 1987. - 480 с.

21 Лазерные измерительные системы // А.С.Батраков, М.М. Бутусов, Г.П. Гречка и др.; Под ред. Д.П.Лукьянова. - М.: 1981. - 456 с.

22 Рябов С.Г., Торопкин Г.Н., Усольцев И.Ф. Приборы квантовой электроники. - М.: 1985. - 200 с.

23 Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. - М.: Советское радио, 1989.- 360 с.

24 Павлов А.В., Черников А.И. Приемники излучения автоматических оптико-электронных приборов.- М.: Энергия, 1972.- 240 с.

25 ООО «МЭРИ» [http://www.mery.spb.ru/index.html].

26 Ишанин Г.Г, Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. - СПб.: Папирус, 2003, с.-525.

27 Андреев А.Л., Ишанин Г.Г., Мусяков В.Л., Польщиков Г.В. Выбор и расчет схем включения позиционно-чувствительных и многоэлементных фотоприемников. Учебное пособие.- Л.: Лен. Ин-т точн. механики и оптики, 1987, с.68.

28 Хоровиц П., Хилл У. «Искусство схемотехники» / Пер. с англ.: Б. Н. Бронина, А. И. Коротова, М. Н. Микшиса, Л. В. Поспелова, О. А. Соболевой, Ю. В. Чечёткина — Изд. 5-е, переработанное и дополненное. — М.: Мир, 1998.

29 Аксененко М.Д. и др. Микроэлектронные фотоприемные устройства. – М.: Энергоатомиздат, 1984

30 Рассудова Г. Н. Интерференционные муаровые полосы в системе из прозрачной и отражательной дифракционных решеток. / «Оптика и спектроскопия», 1967, т, XVII, вып. 1, с. 142-154; вып. 3, с. 473-479; вып. 4, с. 614-625

31 Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., , Кручинин Д. Ю., Яковлев О. Б. Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений (Аналитический обзор). "Оптический журнал", том 74, № 12. 2007, с. 40-49.

32 Angular encoders: General Catalog / Heidenhain GmbH. Traunreut, Germany: Heidenhain GmbH, 2000. 82 p.

33 Шухард Г. Новый приборный комплекс для изготовления высокоточных круговых шкал // Иенское обозрение. 1986. №2. С. 92-94.

34 Ишанин Г.Г., Прокопенко В.Т., Кирилловский В.К., Андреев А.Н. Оптические измерения. Учебное пособие М., Логос, 2006. - 450 с.

35 Kojima T., Kikuchi Y., Seki S., Masuda T., Wakiwaka H. Development of high-precise angle calibrating apparatus and high-precise angle sensor // Proc. of the 1st International Conference on Positioning Technology. [Tokyo: the Japan Society for Precision Engineering]. 2004. P. 417-422.

36 Ведерников В.М., Кирьянов В.П., Корольков В.П., Ко-ронкевич В.П., ПолещукА.Г., Седухин А.Г., Чурин Е.Г., Щербаченко А.М., Юрлов Ю.И. Лазерная технология изготовления круговых шкал и кодовых дисков. Препринт № 319. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1986. 39 с.

37 Kiryanov V.P., KiryanovA. V., KokarevC.A., Nikitin V.G., BartikS.A., Frizin S.E., Kruchinin D.Yu., Yakovlev O.B. Development of a technique for the determination of metrological parameters of technological system CLWS300/C for synthesize of high precision angular measuring structures // Proc. of 10th IMEKO TC7 Intern. Symposium on Advances of Measurement Science. 2004. TC 7. V. 2. P. 316-320.

38 Mukai N., Kono T., Suzuki A., Takagi K., Imanishi S., Furuki M., Tuchiya H. High accuracy scale disk for rotary encoder // Proc. of the lsl Intern. Conf. on Positioning Technology. [Tokyo: the Japan Society for Precision Engineering]. 2004. P. 312-316.

39 Кирьянов В. П., Блинов А.В., Кирьянов А.В., Мокрое Е.А., Трофимов А. А., Чугуй Ю.В. Ключевые аспекты миниатюризации суперточных преобразователей угла поворота для ракето-космических комплексов // Труды ВНПК "ДиС-2006". 2006. С. 106-116.

40 Alfons Ernst. Digitale Längen- und Winkelmeβtechnik. / Verlag moderne industrie, D-86895 Landsberg/Lech. 1998

41 Коротаев В.В., Мусяков В.Л Энергетический расчет ОЭП / Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. - 44 с.

42 Якушенков Ю.Г. Теория и расчёт оптико-электронных приборов: Учебник для вузов. – М. : Логос, 2004.

43 Теория оптических систем: Учеб. пособие для вузов / Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев. - СПб.: Лань, 2008. 447 с.:

44 ОАО СКБИС «Нормирующие преобразователи. Руководство по эксплуатации ЛИР-7-НП.000 РЭ»

45 Обзорный каталог фирмы Heidenhain, Сентябрь 2007.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Кафедра создавалась в 1937-38 годах и существовала под следующими названиями:

- с 1938 по 1958 год кафедра военных оптических приборов;
- с 1958 по 1967 год кафедра специальных оптических приборов;
- с 1967 по 1992 год кафедра оптико-электронных приборов;
- с 1992 года кафедра оптико-электронных приборов и систем. Кафедру возглавляли:
- с 1938 по 1942 год профессор К.Е. Солодилов;
- с 1942 по 1945 год профессор А.Н. Захарьевский (по совместительству);
- с 1945 по 1946 год профессор М.А. Резунов;
- с 1947 по 1972 год профессор С.Т. Цуккерман;
- с 1972 по 1992 год заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев;
- с 1992 по 2007 год заслуженный деятель науки РФ, профессор Э.Д. Панков.
- с 2007 года по настоящее время почетный работник высшего профессионального образования, профессор В.В. Коротаев.

История кафедры началась в 1937-38 годах с организации в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) кафедры военных оптических приборов. Первым заведующим кафедрой был К.Е. Солодилов, до этого возглавлявший Центральное конструкторское бюро (ЦКБ) Всесоюзного объединения оптико-механической
промышленности (ВООМП). Преподавателями кафедры стали сотрудники этого ЦКБ - М.А. Резунов, М.Я. Кругер, С.Т. Цуккерман, В.А. Егоров, Б.М. Кулежнов.

В годы Великой Отечественной войны кафедра была эвакуирована в Черепаново Новосибирской области, где ее объединили с кафедрой Оптико-механических приборов под руководством профессора А.Н. Захарьевского.

На 1 апреля 1945 года преподавателями кафедры состояли д.ф-м. наук, профессор В.М. Чулановский, к.т.н., доцент М.Я. Кругер и старший преподаватель Г.Я. Гриневич. После реэвакуации в Ленинград кафедрой Военно-оптических приборов сначала заведовал профессор А.Н. Захарьевский, позже в 1945-46 годах заведовал начальник КБ ГОИ М.А.Резунов.

В начале 1947 года кафедру возглавил профессор С.Т. Цуккерман, который руководил ею до 1972 года. В 1958 году кафедра была реорганизована в кафедру специальных оптических приборов, а в 1967 году в кафедру оптико-электронных приборов (ОЭП).

Создание С.Т. Цуккерманом в предвоенные годы книги «Точные механизмы» (М.: Оборонгиз, 1941) является значительным вкладом в развитие отечественного точного приборостроения. С.Т. Цуккерман является автором более 120 научных работ и более 50 изобретений. В предвоенные, военные и послевоенные годы С.Т. Цуккерман работал над прицельных устройств зенитной созданием для И авиационной артиллерии. Он был одним из создателей серийного авиационного гироскопического прицела АСП с автоматической выработкой поправки на упреждение, который устанавливался на истребителях МиГ, а также механического ракурсного прицела для мелкокалиберной зенитной артиллерии, широко применяемого во время войны во Вьетнаме.

В 1958 г. при кафедре была организована отраслевая лаборатория «Специальные оптические приборы» с достаточно сильной группой конструкторов-разработчиков. С.Т. Цуккерман и старший научный сотрудник А.С. Гридин руководили разработкой приборов управления по лучу (ПУЛ), предназначенных для управления движением различных подвижных объектов по прямой линии или по программе.

В начале 60-х годов старший научный сотрудник Г.Г. Ишанин занимался разработкой фотометрической аппаратуры, предназначенной для паспортизации оптико-электронных приборов и систем различного назначения.

Значительное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре выдающегося специалиста в области оптико-электронного приборостроения, члена-корреспондента Российской академии наук (PAH), Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской премии профессора М.М. Мирошникова, который, работая на кафедре ОЭП с 1969 года по 1976 год в должности профессора по совместительству, поставил и читал курс «Теория оптико-электронных приборов».

С 1972 года по 1992 год кафедрой ОЭП заведовал заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев, известный специалист в области автоматических ОЭПиС в комплексах навигации и управления авиационной и космической техникой. Соответственно тематика выполнения научно-исследовательских работ на кафедре приобрела новые направления, существенно увеличилось число тем, носящих поисковый фундаментальный характер. Были разработаны новый учебный план и программы учебных дисциплин.

Л.Ф. Порфирьев является автором 19 учебников, учебных пособий и монографий, среди которых можно выделить такие как «Теория оптико-электронных приборов и систем» (Л.: Машиностроение, 1980), «Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах» (Л.: Машиностроение, 1989). Результаты его работ можно оценить как значительный вклад в разработку общей теории оптикоэлектронных систем.

Л.Ф. Порфирьев как руководитель проводил достаточно жесткую кадровую политику, при которой на кафедре оставались работать только те сотрудники, которые отличались преданностью делу. При этом он оказывал всемерную поддержку сотрудникам кафедры по разработке ими различных направлений теории и практики оптико-электронного приборостроения. По результатам научно-исследовательских работ в этот период защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Г.Н. Грязин (1983 г.), Е.Г. Лебедько (1985 г.), Э.Д. Панков (1986 г.), Г.Г. Ишанин (1988 г.), защищено много диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В этот период под руководством Э.Д. Панкова начали проводиться исследования по разработке новых оптико-электронных систем измерения взаимного положения разнесенных в пространстве объектов.

Г.Н. Грязин, перешедший на кафедру с радиотехнического факультета в конце 60-х годов, продолжил свои работы в области прикладного телевидения, в частности, по разработке систем наблюдения за быстродвижущимися объектами и быстропротекающими процессами.

С 1975 года заведующим отраслевой лабораторией стал старший научный сотрудник А.Н. Тимофеев, который продолжил исследования по разработке методов и средств контроля пространственного положения объектов с помощью ОЭП с оптической равносигнальной зоной для машиностроения, энергетики, строительства, судостроения и железнодорожного транспорта.

С 1975 года, после увольнения в запас, из Ленинградской военной инженерной краснознаменной академии (ЛВИКА) им. А.Ф. Можайского

на кафедру пришел работать в должности профессора С.П. Авдеев, известный специалист в области ОЭПиС космических аппаратов. Он поставил курсы и читал лекции по учебным дисциплинам «Оптико-электронные приборы», «Оптико-электронные приборы систем управления», «Оптико-электронные приборы для научных исследований».

Существенное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре лауреата Ленинской и Государственной премий профессора Б.А. Ермакова, известного специалиста в области физической оптики и оптико-электронного приборостроения. Б.А. Ермаков работал на кафедре ОЭП с 1979 года по 1992 год в должности профессора по совместительству и поставил курс «Оптико-электронные приборы с лазерами».

В 70-80 доцента Е.Г. Лебедько годах под руководством проводились исследования законов отражения лазерного излучения от нестационарных поверхностей и протяженных объектов, исследования в области теории идентификации объектов по их излучению в сложной фоновой ситуации. Создан лазерной комплекс для локации крупногабаритных морских объектов сложной конфигурации и водной поверхности. В этих работах принимали участие доценты О.П. Тимофеев и С.Б. Лукин.

В 70-90 годах под руководством Л.Ф. Порфирьева был разработан ряд астродатчиков, систем астроориентации и космической навигации (В.И. Калинчук, А.Л. Андреев, С.Н. Ярышев).

С 1992 г. заведующим кафедрой является заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Э.Д. Панков. В 1992 году кафедра была переименована в кафедру оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС).

Под руководством Э.Д. Панкова в 70-90-х годах были проведены разработки ряда оптико-электронных приборов и систем специального и гражданского применения, нашедших практическое внедрение и способствующих научно-техническому прогрессу и укреплению обороноспособности нашей страны.

В частности, исследования и разработки в области линейных и угловых измерений позволили приступить к решению общей проблемы согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах с помощью оптико-электронных систем.

указанной проблемы доцентом И.А. Коняхиным В рамках исследования, проводились результаты которых можно классифицировать разработку теории как построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации.

110

В то же время доцентом В.В. Коротаевым разработан ряд поляризационных приборов и измерительных установок. Теоретическим результатом работ явилась разработка методологии анализа оптических поляризационных свойств систем с изменяющейся ориентацией элементов. По результатам указанных работ В.В. Коротаев (в 1997 г.) и И.А. Коняхин (в 1998 г.) защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

Применение многоэлементных приемников в системах пеленгации дало толчок развитию телевизионных систем технического зрения, измерительных телевизионных систем и систем обработки изображений. Результаты этих исследований были использованы доцентом А.Л. Андреевым при постановке учебных курсов «Оптико-электронные системы с ЭВМ», «Специализированные аппаратные и программные средства ОЭП», «Автоматизированные телевизионные вычислительные комплексы», а также доцентом С.Н. Ярышевым при постановке им в 1993 году учебной дисциплины «Видеотехника».

Указанные курсы обеспечиваются лабораторным практикумом на базе рабочих мест, оснащенных персональными компьютерами, объединенными В локальную сеть. Рабочие места оснащены аппаратными и программными средствами цифровой видеозаписи и изображений. В ЭТОТ период Г.Н. Грязиным обработки были подготовлены дисциплинам: «Телевизионные системы», «Прикладное телевидение и телевизионно-вычислительные комплексы» (совместно с А.Л. Андреевым).

На основе обобщения методик расчета оптико-электронных систем различного назначения и принципа действия в 1981 году были развернуты работы по созданию элементов систем автоматизированного проектирования ОЭП. За период с 1981 по 1987 год под руководством И.А. Коняхина были разработаны оригинальные пакеты прикладных программ расчета параметров систем измерения пространственного положения объектов.

Развитие компьютерной техники и программного обеспечения общего назначения позволило создать проблемно-ориентированное программное обеспечение поддержки проектирования ОЭП на системотехническом уровне.

По результатам научных работ сотрудниками кафедры ОЭПиС выпущено в свет 15 монографий, 11 учебников и учебных пособий. На кафедре подготовлено 14 докторов наук, а также более 110 кандидатов наук.

На разработки кафедры получены авторские свидетельства СССР и патенты Российской Федерации на более чем 200 изобретений. Наибольший вклад в изобретательскую деятельность внес Э.Д. Панков - автор 123 изобретений, из которых 33 внедрены в промышленности.

При заявлении научно-педагогической школы «Оптико-электронное приборостроение» в 2009 году были сформулированы следующие основные научно-технические результаты, достигнутые в период с 1938 по 2009 годы:

• разработаны принципы построения военных оптикомеханических приборов;

• разработаны принципы построения точных механизмов;

• разработаны принципы построения оптико-электронных приборов с оптической равносигнальной зоной;

• систематизированы теоретические основы и принципы построения оптико-электронных приборов;

• разработаны методы описания импульсных сигналов, идентификации и классификации объектов в системах нестационарной лазерной локации;

• разработаны теория, принципы построения и методы расчета импульсных телевизионных систем наблюдения быстродвижущихся объектов;

• обнаружен термоупругий эффект в кристаллическом кварце и создан новый тип приемников оптического излучения;

• разработана теория построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;

• разработана методология анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов;

• систематизированы теоретические основы и принципы построения измерительных систем на основе матричных фотопреобразователей;

• разработаны основы построения ОЭС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах.

Основоположники научной школы:

Солодилов Константин Евгеньевич, заведующий кафедрой с 1938 г. по 1942 г., профессор;

Цуккерман Семен Тобиасович, заведующий кафедрой с 1947 г. по 1972 г., профессор;

Мирошников Михаил Михайлович, директор ГОИ, д.т.н., профессор, профессор кафедры ОЭП с 1967 г. по 1978 г.; член-корреспондент Российской Академии наук, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии.

Порфирьев Леонид Федорович, заведующий кафедрой с 1972 г. по 1992 г., д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

С 2007 г. заведующим кафедрой является почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор В.В. Коротаев.

На кафедре была открыта подготовка по новой специализации инженеров «Оптико-электронные приборы и системы обработки видеоинформации» и новая магистерская программа «Оптикоэлектронные методы и средства обработки видеоинформации».

В 2007 году был создан научно-образовательный центр оптикоэлектронного приборостроения (НОЦ ОЭП).

Научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения выполняет научно-исследовательские И опытноконструкторские работы созданию видеоинформационных ПО И информационно-измерительных приборов различного назначения, высокоточных приборов для измерения линейных, угловых и других физических величин в промышленности, энергетике, на транспорте, а также систем технического зрения и обработки видеоинформации. К выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ широко привлекаются студенты, аспиранты, молодые специалисты, молодые кандидаты наук. Научно-образовательный центр является активным участником Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Направления научных исследований кафедры ОЭПиС в 2007-2011 годах.

Развитие теоретических основ и принципов построения оптикоэлектронных приборов и систем, в том числе:

- видеоинформационных измерительных систем;
- видеоинформационных систем наблюдения;
- видеоинформационных импульсных систем наблюдения быстродвижущихся объектов;
- комплексированных телевизионно-тепловизионных систем наблюдения,
- ОЭПиС обеспечения техносферной безопасности;
- ОЭПиС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах;

• автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;

- ОЭПиС цветового и спектрального анализа объектов;
- фотометрических систем аттестации ОЭПиС, источников и приемников оптического излучения;
- систем лазерной локации с нестационарным облучением;
- ОЭС сепарации полезных ископаемых.

Идет активное пополнение преподавательского состава молодыми кандидатами наук. В настоящее время на кафедре работает 7 кандидатов наук в возрасте до 35 лет.

Мы занимаемся разработкой оптико-электронных приборов и систем в целом:

- системотехническое проектирование,
- разработка (выбор) оптической системы,
- разработка конструкции,

• разработка (выбор) электроники и средств обработки информации,

- разработка программного обеспечения,
- изготовление, сборка, юстировка, настройка и испытания.

По итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов СПбГУ ИТМО 2007-2010 годов кафедра занимала призовые места.

Подробная информация о кафедре ОЭПиС имеется на сайте кафедры: http://oeps.ifmo.ru/

Валерий Викторович Коротаев Александр Валерьевич Прокофьев Александр Николаевич Тимофеев

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ Часть 1. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений

Учебное пособие

В авторской редакции Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО Зав. РИО Н.Ф. Гусарова Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99 Подписано к печати Заказ № Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

