

В.П. Кузнецов, А.А. Иванов, Б.П. Кудряшов

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



Курганский
государственный
университет



редакционно-издательский
центр
41-71-07

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Курганский государственный университет»

В.П. Кузнецов, А.А. Иванов, Б.П. Кудряшов

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Учебное пособие

Курган 2013

УДК 681.7(075.8)

ББК 32.965я73

К89

Рецензенты:

директор института геологии и нефтедобычи Тюменского государственного нефтегазового университета, д-р. техн. наук, проф. **О.Н. Кузяков**;
начальник отдела эксплуатации станков с ЧПУ ООО «Сенсор-Сервис»
В.Н. Постных.

Печатается по решению методического совета Курганского государственного университета в рамках проекта «Инженерные кадры Зауралья».

К89 Кузнецов В.П., Иванов А.А., Кудряшов Б.П. Проектирование средств измерения параметров технологических объектов на основе волоконно-оптических преобразователей: учебное пособие. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2013. 84 с.

В пособии излагаются вопросы проектирования средств измерения параметров технологических объектов, выполненных на основе перспективных волоконно-оптических измерительных преобразователей. Рассмотрены способы преобразования информации с помощью волоконно-оптических преобразователей. Представлены основы расчёта элементов волоконно-оптических преобразователей с внешней модуляцией светового потока. Показано практическое применение волоконно-оптических преобразователей для измерения параметров технологических процессов в машиностроении и нефтегазовой промышленности.

Учебное пособие предназначено для студентов и магистрантов, обучающихся по курсу «Технические измерения и приборы» в рамках направления «Автоматизация технологических процессов и производств».

УДК 681.7(075.8)

ББК 32.965я73

ISBN 978-5-4217-0242-9

© Кузнецов В.П., Иванов А.А.,
Кудряшов Б.П., 2013

© Курганский государственный
университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СТРУКТУРА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ВОП	5
1.1 Общие сведения о волоконно-оптических преобразователях	5
1.2 Основные параметры и классификация волоконно-оптических преобразователей с внешней модуляцией	16
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ВОП С ВНЕШНЕЙ МОДУЛЯЦИЕЙ.....	25
2.1 Общий подход к проектированию волоконно-оптических преобразователей с внешней модуляцией.....	25
2.2 Обоснование выбора и расчёт основных элементов оптической части ВОП	25
2.3 Выбор основных элементов электронной части ВОП	36
2.4 Пример разработки ВОП для измерения перемещений индентора	38
3 ПРИМЕРЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ВОП	47
3.1 Контактный датчик малых линейных перемещений на основе ВОП	47
3.2 Инструмент со встроенным ВОП для выглаживания поверхностей деталей на многоцелевых станках	51
3.3 Волоконно-оптический преобразователь для контроля параметров ресурса центробежного нефтяного насоса.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	61
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	62

ВВЕДЕНИЕ

Отсутствие широкой номенклатуры волоконно-оптических преобразователей (ВОП) и недостаточные темпы их разработок являются сдерживающими факторами их широкого внедрения в автоматизированные системы управления технологическим оборудованием и в информационно-измерительные системы. Поэтому существует реальная потребность в разработке различных типов ВОП и их адаптации для измерения и контроля параметров существующих и вновь разрабатываемых технологических объектов.

Основное преимущество ВОП обусловлено их возможным использованием в условиях эксплуатации, в которых электронные устройства либо вообще нельзя использовать, либо такое использование сопровождается значительными трудностями и расходами. ВОП обеспечивают чрезвычайно высокий уровень безопасности при эксплуатации в потенциально искро-, пожаро- и взрывоопасных условиях. Важнейшим достоинством ВОП является их невосприимчивость к высокочастотным и импульсным электромагнитным помехам. Внедрение ВОП во многих случаях существенно упрощает и уменьшает массу и объем измерительных средств в различных отраслях техники.

Научно-технические и технологические предпосылки к решению проблем создания и изготовления ВОП созданы В.Д. Бурковым, В.И. Бусуриным, М.М. Бутусовым, Е.А. Заком, Н.Е. Конюховым, Я.В. Малковым, Т.И. Мурашкиной, А.Л. Патлахом и др. В то же время в учебной литературе для студентов машиностроительных направлений подготовки недостаточно отражены вопросы проектирования, настройки, регулировки и юстировки средств измерения параметров технологических объектов на основе ВОП.

Особенностью проектирования высокоточных и надежных ВОП для различных отраслей является необходимость разработки подходов к выбору принципов преобразования информации и реализации конструктивного исполнения преобразователей с учётом спектра внешних влияющих факторов.

Представленное учебное пособие ставит своей задачей ознакомиться с теоретическими основами ВОП и особенностями проектирования на их основе средств измерения параметров технологических объектов в промышленности.

1 СТРУКТУРА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ВОП

1.1 Общие сведения о волоконно-оптических преобразователях

Во многих промышленных целях использование электрических преобразователей неэлектрических величин ограничено допустимыми условиями эксплуатации [5]. Так, имеется большая потребность в преобразователях и датчиках давления, уровня жидкости, перемещения, температуры и т. д., пригодных для работы в условиях взрывоопасности, высокой радиации, высоких и низких температур, агрессивных сред и т.п. (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Промышленная потребность в помехозащищенных датчиках

Условия эксплуатации	Области использования	Регистрируемый параметр
Взрывоопасность	Газовая, нефтяная, химическая промышленность, заправочные баки	Давление, уровень жидкости, расход жидкости, температура
Высокая радиация	Атомная энергетика, медицина	Давление, температура
Сильные электромагнитные помехи	Электростанции, энергоустановки	Напряжение, ток, вибрация, частота вращения
Высокие температуры	Энергоустановки, двигатели, турбины	Перемещение, давление, вибрация, частота вращения
Необнаружимость	Специальная техника	Давление, температура, перемещение, вибрация

Решение проблемы датчиков и приборов для таких условий эксплуатации и применений может быть достигнуто на основе использования оптических и волоконно-оптических элементов, в которых измеряемая величина воздействует на оптический канал, изменяя параметр излучаемого потока при его распространении от источника к приемнику (рисунок 1.1).

При использовании в оптическом канале световодов данный вид оптоэлектронных преобразователей называют волоконно-оптическими преобразователями (ВОП).

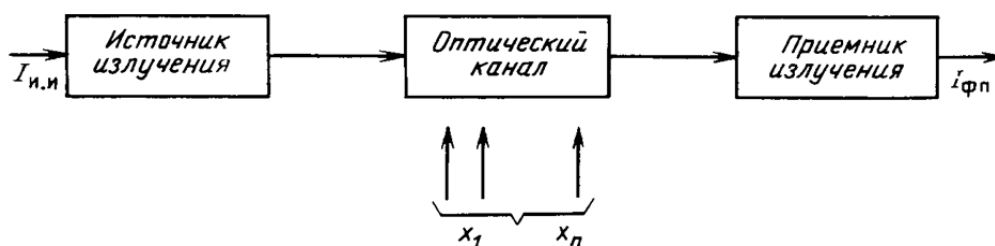


Рисунок 1.1 – Схема канала преобразования информации оптических преобразователей

Начало работ в области создания ВОП относится к середине 70-х годов прошлого века; с тех пор исследования и разработки по этому направлению непрерывно развиваются. По прогнозам в XXI веке мировой объем производства ВОП увеличится в 20...30 раз, и они будут составлять несколько процентов от общего числа датчиков [4; 5].

Общая структура преобразования информации в оптическом (волоконно-оптическом) преобразователе представлена на рисунке 1.2. В процессе измерения внешнего воздействия в ВОП происходит ряд взаимосвязанных преобразований: *предварительное, физического эффекта, модуляционное и фотоприемное* [5].

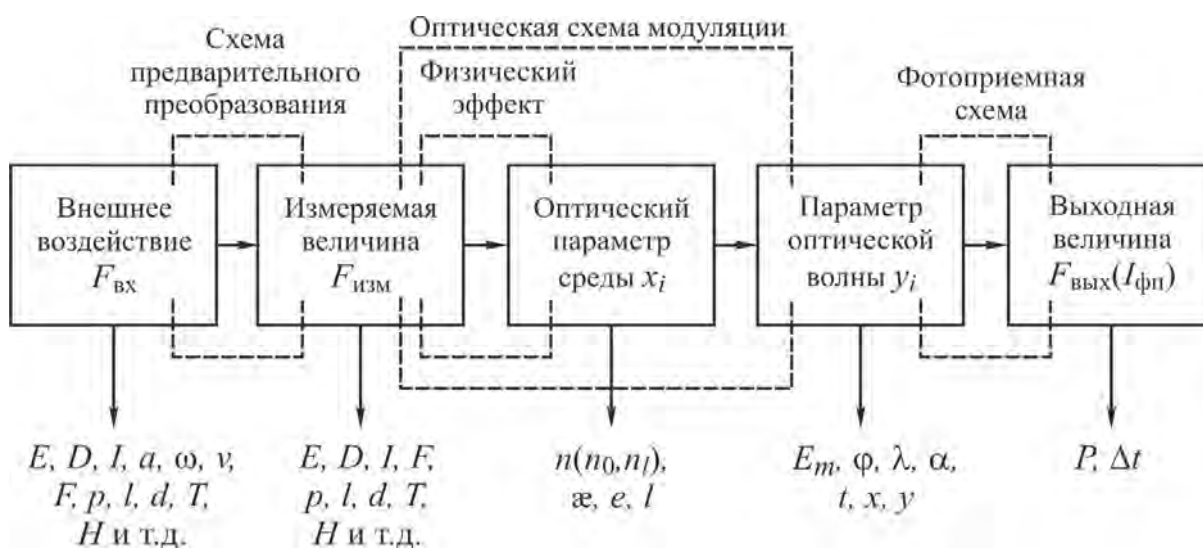


Рисунок 1.2 – Преобразования измеряемой информации в ВОП

В качестве внешнего воздействия $F_{вх}$ могут выступать напряженность электрического и магнитного полей E и H , ток I , температура T , линейное ускорение a , угловая и линейная скорости (ω и v), сила F , давление p и др. Таким образом, внешнее воздействие может быть электрического, магнитного, теплового, механического, химического, радиационного и других типов.

Схема предварительного преобразования необходима, если нельзя непосредственно измерить внешнее воздействие (например, линейное ускорение) или в наличии уже имеется датчик для измерения другого физического параметра.

Для того, чтобы полнее использовать ВОП, важно знать *методы*, применяя которые, внешнее воздействие $F_{вх}$ можно преобразовать в измеряемую величину $F_{изм}$, например, температуру в давление. Здесь одним из способов является использование происходящего при нагреве расширения газа, жидкости или твердого тела, которое сдерживается каким-либо образом, благодаря чему возникает давление.

Некоторые физические величины, подлежащие измерению, показаны на рисунке 1.3 с указанием того, как конкретный параметр может быть определен с помощью измерения других параметров.

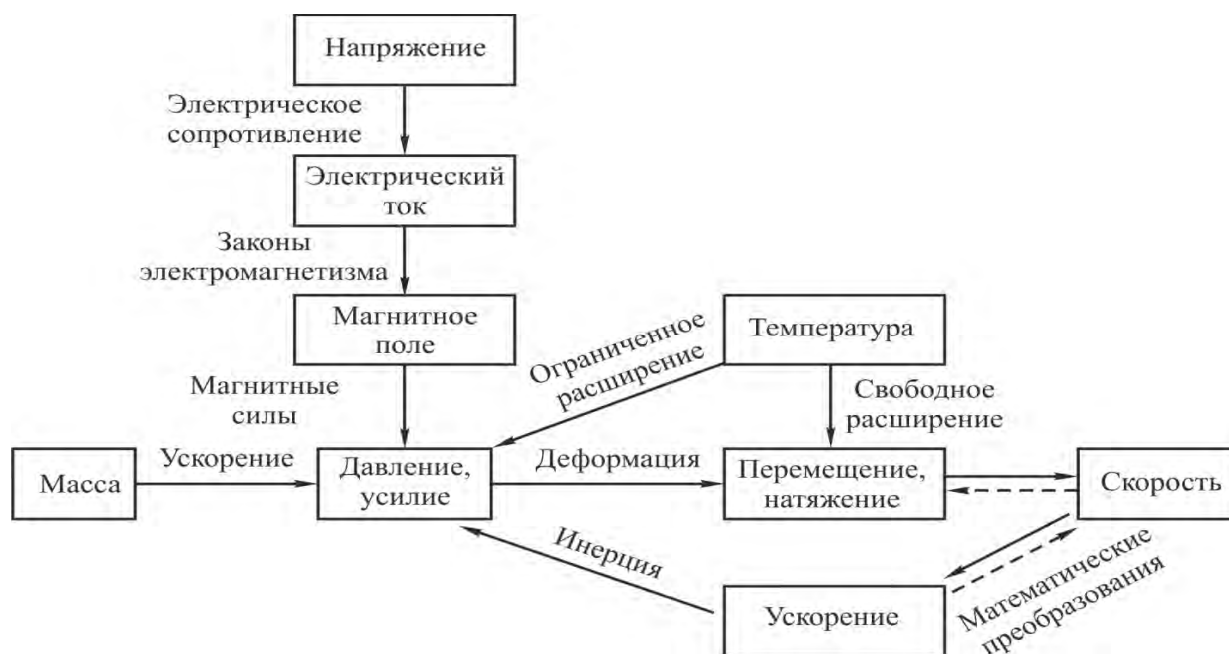


Рисунок 1.3 – Преобразование физических величин при измерении параметров технологических объектов

Одним из наиболее полезных измеряемых параметров является перемещение l , которое относительно просто вызывается различными физическими эффектами.

Схема предварительного преобразования может использовать разнообразные физические принципы и быть электромеханической, магнитомеханической, механической, электромагнитной и т. д.

Измеряемая величина (E, H, I, T, F, p и др.) с помощью какого-либо *физического эффекта* (электро- или магнитооптического, пьезоэлектрического, акусто- или пьезооптического и др.) вызывает изменение *оптических параметров* x_i среды, по которой распространяется излучение (показателя преломления n , коэффициента поглощения света k , линейных размеров l) (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Преобразование физических величин в изменение оптических параметров среды

Измеряемая величина	Используемый физический эффект	Изменяющийся оптический параметр среды
1	2	3
<i>Электрическая:</i> - напряженность электрического поля E - электрическая индукция D - электрический ток I	Электрооптические эффекты Керра и Погкельса	n
	Электроиндуцированное поглощение	k
	ЭлектрOLUMиНесценция	e
	Пьезоэлектрический эффект	l
	Электросмачиваемость	k
<i>Магнитная:</i> - напряженность магнитного поля H - магнитная индукция B	Магнитооптический эффект Фарадея	n
	Магнитострикция	n, l
	Магнитопоглощение	k
<i>Механическая:</i> - сила F - давление p - перемещение l - плотность ρ - скорость v - угловая скорость ω	Пьезооптический эффект (фотоупругость)	n
	Пьезоабсорбция	k, n
	Изменение положения кристаллографических осей	l
	Изменение длины взаимодействия	l
	Абсорбция	k
Эффект Саньяка	n	

1	2	3
<i>Тепловая:</i> - температура T	Термооптические явления	$n, n l$
	Термолюминесценция	e
<i>Химическая:</i> - химический состав	Физико-химические явления	n, n
	Люминесценция	e
<i>Излучательная:</i> - рентгеновское излучение - радиация - оптическое излучение	Индукцированное излучением изменение оптических свойств	n, n, e
	Индукцированное излучение и поглощение	n, e
	Оптически индуцированное изменение показателя преломления	n

Оптическая схема, в которой осуществляется амплитудная, фазовая, поляризационная, частотная, спектральная, временная или пространственная модуляция, связывает изменение оптического параметра x_i среды, индуцированное измеряемой физической величиной, с параметром проходящей через датчик оптической волны y_i (амплитудой A , фазой φ , поворотом плоскости поляризации α , длиной волны λ , временем задержки импульса отклика t , пространственными координатами регистрируемого излучения x, y) (таблица 1.3).

Таблица 1.3 - Преобразование изменений параметров оптической среды в изменение характеристик световой волны

Изменяемые оптические параметры среды	Используемая оптическая схема модуляции	Изменяющийся параметр оптической волны
1	2	3
n, l, n, e	<i>Амплитудная:</i> изменение отражательной (пропускательной) способности; нарушение полного внутреннего отражения; управляемая связь волноводов или мод многомодового световода; ослабление в среде (закон Бургера); дополнительное излучение	Амплитуда A
n, l	<i>Фазовая:</i> изменение оптической длины взаимодействия; изменение длины ячейки; изменение поперечных размеров волновода	Фаза φ

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3
n, l	<i>Поляризационная:</i> поворот плоскости поляризации линейно поляризованного света; нарушение полного внутреннего отражения; переход к эллиптической поляризации за счет двулучепреломления	Поляризация α
l, n	<i>Частотная:</i> перемещение светофильтров; смещение края полосы поглощения (Эффект Франца – Келдыша)	Частота λ
l, n	<i>Временная:</i> изменение времени отклика	Время t
n, l	<i>Пространственная:</i> изменение пространственного положения регистрируемого излучения	Координаты x, y

Среди используемых принципов действия оптических схем модуляции следует отметить изменение отражательной или пропускательной способности среды, нарушение полного внутреннего отражения, управляемую связь волноводов, изменение поглощения среды (амплитудная модуляция); изменение длины ячейки или оптической длины среды, поперечных размеров волновода (фазовая модуляция); поворот плоскости поляризации и изменение типа поляризации (поляризационная модуляция); смещение края полосы поглощения и перемещение светофильтров (спектральная модуляция).

Для детектирования и измерения изменений оптического параметра среды могут использоваться различные *фотоприемные схемы* (таблица 1.4).

Они осуществляют непосредственное измерение мощности сигнала либо содержат дополнительные устройства: интерферометрическую схему или анализатор угла поворота плоскости поляризации, светофильтр или спектрально-чувствительный фотоприемник (для измерения длины волны), позиционно-чувствительные фотоприемник и светофильтр (для измерения пространственных координат излучения).

Практически во всех случаях окончательно регистрируемой величиной является амплитуда тока на выходе фотоприемника $I_{\text{фп}}$. Многообразие физических эффектов, схем модуляции и фотоприемных схем обуслови-

вадет обилие возможных вариантов реализации даже при регистрации одной физической величины.

Таблица 1.4 – Регистрация параметров оптической волны

Изменяющийся параметр оптической волны	Фотоприемная схема	Измеряемая выходная величина
A	Непосредственное измерение	P
φ	Двухплечевая или одноволоконная интерферометрическая схема	P или количество интерференционных полос
λ	Поляризационный анализатор; светофильтр или спектрально-чувствительный фотоприемник	P P
α	Поляризационный анализатор	P
t	Анализатор временной задержки	Δt
x, y	Позиционно-чувствительные светофильтр или фотоприемник	P

С точки зрения способа использования оптического волокна различают три типа преобразователей, структуры которых представлены на рисунке 1.4.

1) преобразователи, работа которых основана на изменении характеристик оптического волокна под влиянием внешних воздействий (рисунок 1.4 а). При этом используются такие физические явления, как эффект Фарадея, эффект Керра и др.;

2) преобразователи «физическая величина - свет». Чувствительным элементом может быть как сам измеряемый объект, так и специальный элемент, прикрепляемый к нему (рисунок 1.4 б);

3) преобразователи, где под воздействием физической величины изменяется интенсивность потока некогерентного излучения (рисунок 1.4 в).

Световод, используемый в составе ВОП, существенным образом влияет на параметры и характеристики преобразователя.

В общем смысле под световодом понимается материальный канал, по которому может передаваться излучение от чувствительного элемента [4; 5].

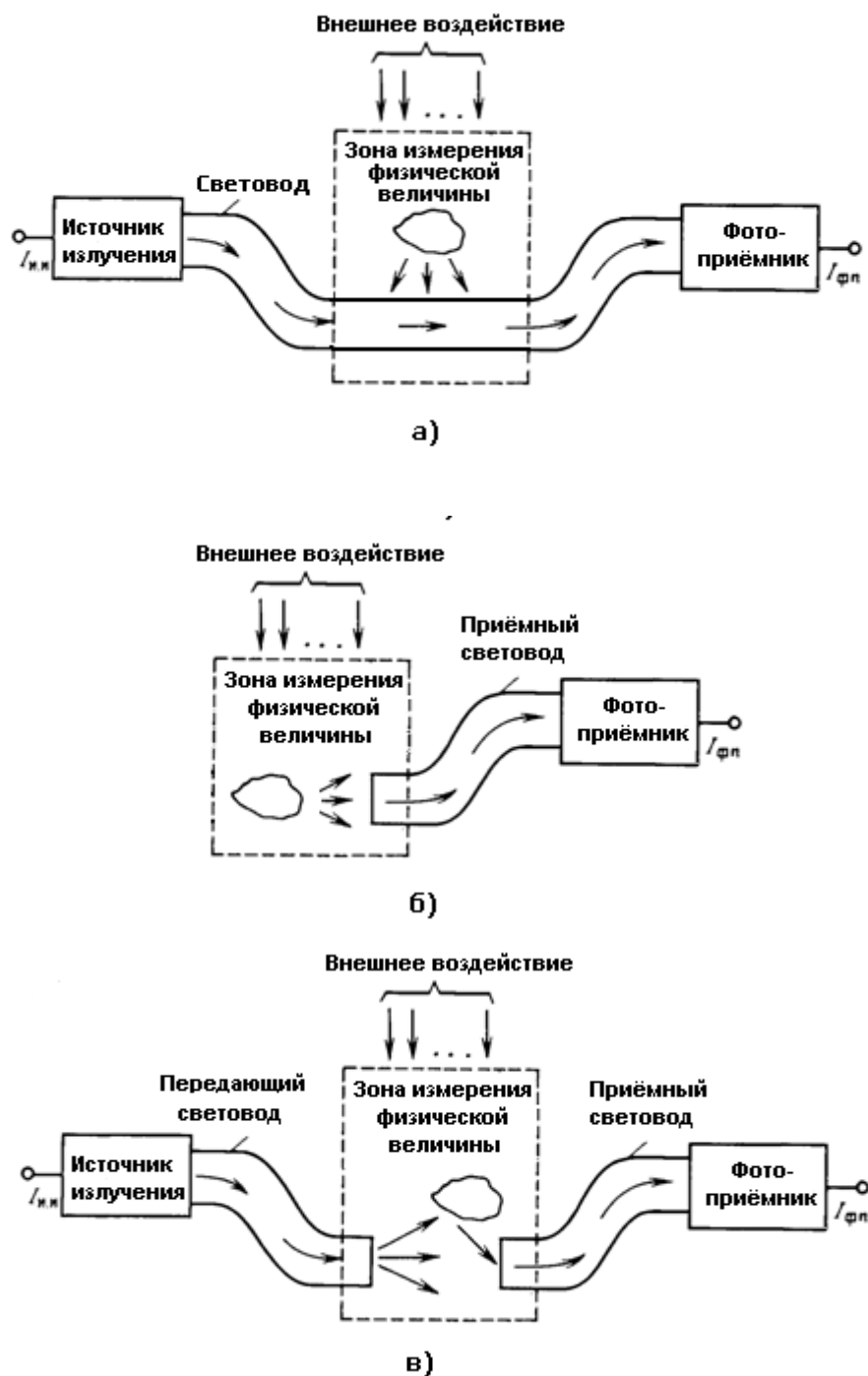


Рисунок 1.4 – Структурные схемы ВОП

Световод может состоять из одного или большого числа оптических волокон (волоконный жгут). Современное оптическое волокно состоит из сердцевины, по которой распространяется свет, и оболочки. Снаружи она закрыта полимерной пленкой. Сердцевина представляет собой нить из пластика или стекла с определенными добавками (как правило, германий) для повышения коэффициента преломления. Коэффициент преломления сердцевины примерно на 0,01...0,02 превышает коэффициент преломле-

ния оболочки. Благодаря этому луч света, направленный в сердцевину, распространяется по ней, многократно отражаясь от границы раздела «серцевина-оболочка».

Важнейшей характеристикой оптоволокна является *числовая апертура* – максимально возможный угол, с каким свет, введенный в волокно, может распространяться в нем. Числовая апертура определяется коэффициентами преломлений сердечника. Если угол ввода луча света в сердечник меньше некоторого значения, то он испытывает полное внутреннее отражение и распространяется только в нем. При нарушении этого условия часть вводимого излучения преломляется и уходит в оболочку, а часть – отражается внутрь сердечника.

Оптические волокна могут быть *одномодовыми* и *многомодовыми*. В многомодовом волокне может распространяться несколько мод (упрощенно – оптических лучей под разными углами), в одномодовом – одна мода. Многомодовые оптические волокна технологичны, легко соединяются с источниками и приёмниками излучения, а также с другими волокнами. Недостаток многомодового волокна – нарушение когерентности излучения источника на выходе волокна, поэтому оно может быть использовано для передачи информации только об интенсивности оптического сигнала.

В одномодовых волокнах может использоваться поляризация и фаза когерентного источника, например, полупроводникового лазера, и на его основе возможно построение датчиков с волокном в качестве чувствительного элемента. Основные недостатки одномодового волокна — высокая чувствительность к внешним механическим воздействиям, изменение параметров с течением времени и относительная сложность сопряжения с другими оптическими компонентами.

Внешний диаметр многомодовых и одномодовых волокон одинаков и составляет 50...150 мкм.

Параметры волоконно-оптических преобразователей

Функция преобразования ВОП представляет собой сложную многоступенчатую зависимость тока фотоприемника $I_{\text{фп}}$ ВОП от внешнего воздействия $F_{\text{вх}}$:

$$I_{\text{фп}} = P_{\text{ии}}(I_{\text{ии}}) f_{\text{фп}} \{y_j [x_i (F_{\text{изм}} (F_{\text{вх}}))]\} S_{\text{фп}} k_{\text{п}}, \quad (1.1)$$

где $P_{\text{ии}}(I_{\text{ии}})$ – мощность оптического излучения, создаваемого источником излучения (ИИ) при протекании по нему тока $I_{\text{ии}}$, Вт; $f_{\text{фп}}$ – функция

фотоприемного преобразования; $S_{\text{фп}}$ – интегральная чувствительность фотоприемника, мкА/Вт; $k_{\text{п}}$ – коэффициент потерь мощности оптического излучения при нулевом входном воздействии $F_{\text{вх}}=0$.

Качество того или иного датчика принято оценивать по следующим основным параметрам:

- 1) *диапазону входных воздействий* $F_{\text{вх}}$: $F_{\text{вх.мин}} - F_{\text{вх.макс}}$.
- 2) *основной погрешности* (рисунок 1.5), %:

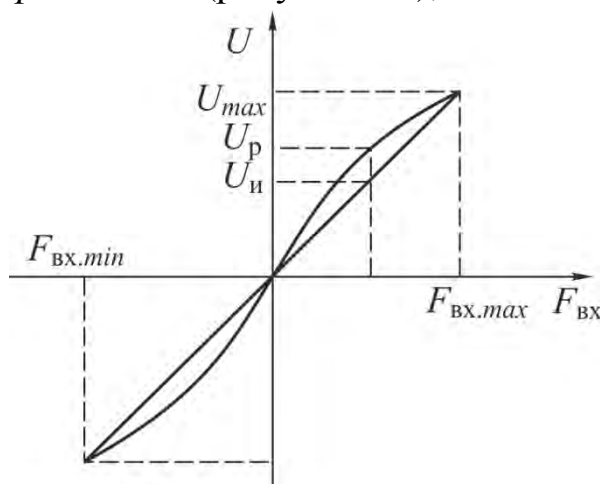


Рисунок 1.5 – К определению параметров ВОП

$$\delta = |(U_{\text{п}} - U_{\text{и}})_{\text{макс}} / U_{\text{макс}}| \cdot 100. \quad (1.2)$$

- 3) *нелинейности характеристики*, %:

$$\delta_{\text{нел}} = |(U_{\text{п}} - U_{\text{и}}) / U_{\text{и}}|_{\text{макс}} \cdot 100. \quad (1.3)$$

- 4) *температурному диапазону* $T_{\text{мин}} - T_{\text{макс}}$.

- 5) *дополнительной температурной погрешности*, %/(10 К):

$$\delta_{\text{Тд}} = |(U_{\text{Т+10К}} - U_{\text{Т}}) / U_{\text{Т}}| \cdot 100, \quad (1.4)$$

где $U_{\text{Т+10К}}$ – значение выходного сигнала при приращении температуры на 10 К.

- 6) *дополнительной погрешности от давления*, %/Па:

$$\delta_{\text{р}} = \left| \frac{U_{\text{р}_0 + \Delta\text{р}} - U_{\text{р}_0}}{U_{\text{р}_0}} \right| \cdot \frac{1}{\Delta\text{р}} 100, \quad (1.5)$$

где р_0 , $\Delta\text{р}$ – начальное значение и приращение давления.

7) *минимально измеряемому воздействию* $F_{\text{мин}}$, которое определяется шумами фотоприемной схемы и нормирующего преобразователя.

- 8) *частотному диапазону работы* $f_{\text{мин}} - f_{\text{макс}}$.

- 9) *динамическому диапазону датчика*:

$$D = 20 \lg[(F_{\text{вх.макс}} - F_{\text{вх.мин}}) / F_{\text{мин.дет}}]. \quad (1.6)$$

10) *собственным потерям оптического излучения* в датчике, дБ:

$$B_0 = 10 \lg(P_{\text{ин}} / P_{\text{вых}_0}) = 10 \lg(1 / k_{\text{п}}), \quad (1.7)$$

где $P_{\text{вых}_0}$ – выходная мощность оптического излучения на выходе датчика при $F_{\text{вх}}=0$

11) *индуцированным потерям оптического излучения*, дБ:

$$\Delta B = 10 \lg(P_{\text{вых}_0} / P_{\text{вых}}). \quad (1.8)$$

12) *суммарным потерям оптического излучения*, дБ:

$$B = B_0 + \Delta B. \quad (1.9)$$

К этому следует добавить такие важнейшие эксплуатационные характеристики, как влагостойкость, устойчивость к вибрационным и ударным механическим нагрузкам, долговечность, надежность. Важны, разумеется, и такие свойства ВОП, как габариты и масса, потребляемая мощность, простота эксплуатации, стоимость.

Практическое использование различных типов ВОП

Все рассмотренные выше волоконно-оптические датчики вполне доступны для промышленного использования.

Несмотря на то, что амплитудные датчики на основе модуляции излучения переменным коэффициентом поглощения среды отличаются простотой конструкции, в которой отсутствуют механически перемещающиеся части (таблица 1.3), область применения этой схемы модуляции ограничена лишь измерением температуры, дозы радиации, напряженности электрического поля. Это обусловлено отсутствием материалов, эффективно изменяющих свое поглощение при других физических воздействиях.

Волоконно-оптические преобразователи на основе нарушения полного внутреннего отражения обладают высокой чувствительностью, позволяют использовать однократное отражение, что в значительной степени уменьшает габариты устройства. Как и в предыдущем случае, недостатком их является наличие механической системы. Область применения в основном ограничена измерением давления, перемещения, усилия.

Светогенерационные ВОП также отличаются простотой конструкции, не требуют источника излучения (лазера, светодиода). Недостатком их является ограниченная область применения, охватывающая измерение температуры по длине световода и определение координаты наиболее горячей точки. Для этих преобразователей необходимы и специальные ВС.

Волоконно-оптические преобразователи на основе управляемой связи волноводов обладают высокой чувствительностью, хорошими массогабаритными показателями. Отсутствие механической системы является существенным достоинством этих датчиков, однако технология их изготовления достаточно сложна.

Наиболее широкое распространение на практике получили *преобразователи с внешней модуляцией* несмотря на наличие механической системы, которая требует точной юстировки. Вместе с тем они отличаются простотой конструкции, что позволяет использовать *многомодовые световоды*. Данный тип ВОП обеспечивает хорошую линейность и стабильность характеристик.

Более подробно преобразователи этого типа рассмотрены в следующем подразделе.

Контрольные вопросы

1 Какой эффект даёт введение световодов в оптический канал оптоэлектронного преобразователя?

2 Какие способы получения измерительной информации характерны для ВОП?

3 Каким образом влияет мощное оптическое излучение, введённое в световод, на его оптические свойства?

4 Что такое числовая апертура световода?

1.2 Основные параметры и классификация волоконно-оптических преобразователей с внешней модуляцией

Для измерения технологических параметров объектов на практике наиболее широкое распространение получили преобразователи, где под воздействием физической величины изменяется интенсивность потока некогерентного излучения (рисунок 1.2 в). Это связано с простотой их конструкции, низкой стоимостью компонентов и разнообразием регистрируемых с их помощью физических величин.

Оптический канал преобразователей этого типа выполняется, как правило, в виде двух световодов (единичных оптических волокон или жгутов волокон) и промежутка между ними. Поток излучения от источника вводится в передающий световод. На выходе передающего световода в зоне измерений формируется поток излучения, заключенный в конусе

апертуры световода. Часть потока излучения падает на вход приёмного световода, выводится из зоны измерений к фотоприемнику и преобразуется в электрический сигнал.

Физическую основу работы таких оптоэлектронных преобразователей составляет изменение (под действием измеряемого параметра) интенсивности излучения, проходящего с выхода передающего световода на вход приемного световода в соответствии с диаграммой направленности, светопропусканием световодов и способами модуляции.

С учетом того, что в данном случае волоконно-оптический канал в значительной степени определяет метрологические и конструктивные характеристики преобразователей, а также того, что модуляция потока излучения осуществляется в промежутке между двумя световодами, эти устройства получили название «волоконно-оптические преобразователи (ВОП) с внешней модуляцией» [4].

Рассмотрим математическую модель преобразователя, работающего на отражение (рисунок 1.6).

Разместим точечный источник излучения в начале координат, а фоточувствительную площадку приемника – в плоскости ZY. Отражающую плоскость (измерительную поверхность) Q поместим параллельно плоскости Q на расстоянии X.

Для случая зеркального отражения и точечного источника излучения зависимость потока излучения, попадающего на фоточувствительную площадку приемника, от расстояния до отражающей поверхности описывается выражением:

$$\Phi(x) = \frac{I_0}{4} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\cos^4[\arctg \sqrt{(z/2x)^2 + (y/2x)^2}]}{x^2} dydz,$$

где I_0 – энергетическая сила источника излучения в направлении оси X; $\Phi(x)$ – поток излучения, падающий на фоточувствительную площадку приемника.

При использовании в качестве фотоприемника полупроводникового диода полный ток через него определяется выражением:

$$I = I_\phi - I_s(e^{DU} - 1), \quad (1.10)$$

где I_ϕ – фототок, I_s – обратный ток через р-п переход, U – напряжение на фотодиоде, D – коэффициент.

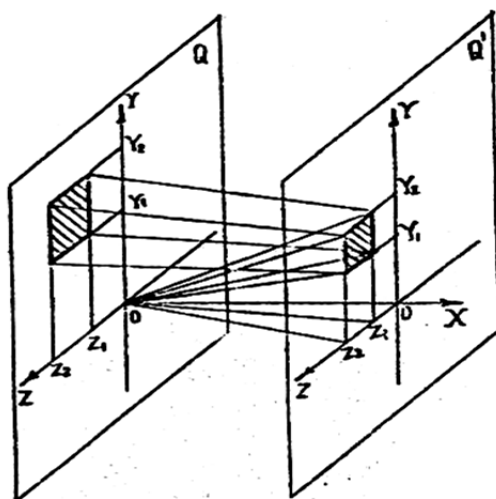


Рисунок 1.6 – Схема для определения зависимости потока излучения

Причем $I_\phi = S\Phi$, где S – интегральная токовая чувствительность фотодиода, А/лм. Таким образом, имеет место зависимость:

$$I = S\Phi(x) - I_s(e^{DU} - 1), \quad (1.11)$$

на основе которой и разрабатывается целый ряд универсальных оптоэлектронных датчиков.

Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией наряду с достоинствами оптронов с открытым каналом имеют такие преимущества, как слабая зависимость результатов измерений от температуры, электромагнитных полей большой интенсивности и вибраций в зоне измерений, стойкость к агрессивным средам и химическая инертность, высокая локальность измерений, возможность получения заданных конструктивных и метрологических характеристик за счет конструкции волоконно-оптических каналов при использовании серийно выпускаемой элементной базы (источников излучения, фотоприемников, оптических волокон).

Для ВОП характерны два основных способа получения измерительной информации. *Первый способ* отражает работу ВОП рефлектометрического типа, для которых наиболее характерно отсутствие контакта с объектом измерений или вспомогательным измерительным звеном. Здесь поток излучения с выхода передающего световода направляется на отражающую поверхность объекта и часть отраженного потока, зависящая от положения поверхности объекта, ее формы и отражающих свойств, воспринимается входным торцом приемного световода.

Рассмотрим зависимость выходного сигнала ВОП на примере преобразования светового потока, отражающегося (без потерь и рассеяния) от

движущейся плоской поверхности. Поверхность перемещается относительно торцов приемного и передающего световодов, лежащих в одной плоскости (рисунок 1.7 а).

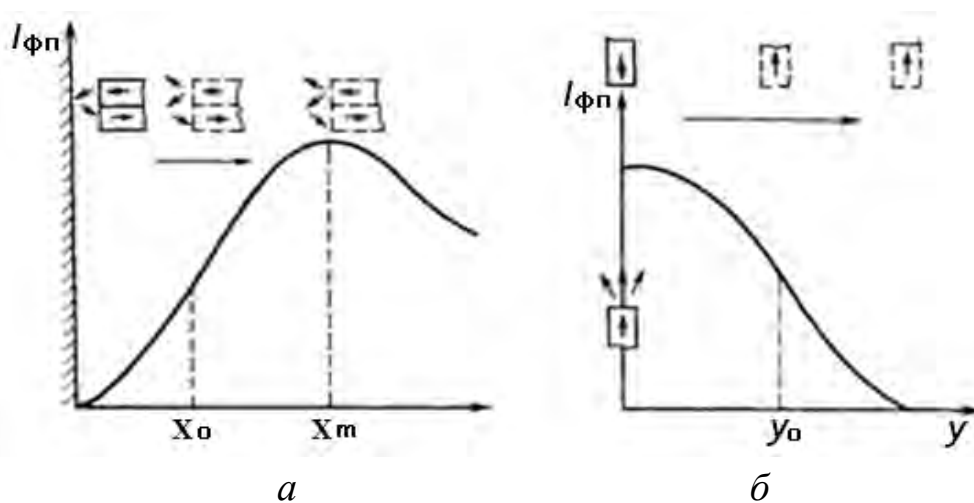


Рисунок 1.7 – Формирование функции преобразования рефлектометрических ВОП аксиальных перемещений (а) и ВОП проходящего типа при измерении ортогональных перемещений (б)

Если торец световода контактирует с отражающей поверхностью, то поток к фотоприемнику практически не проходит. При увеличении расстояния поток излучения, заключенный в конусе апертуры световода, падает на все большую площадь на объекте измерений, и эта площадь становится «источником» вторичного потока, который возвращается к приемному световоду. В соответствии с диаграммой излучения световода лучи, выходящие под наибольшим углом к торцу передающего световода, переносят меньшую часть излучаемого потока и при небольших расстояниях до поверхности воспринимаемая часть отраженного потока растет медленно.

С увеличением площади отраженного «пятна» и входом в торец лучей с большей энергией наблюдается резкий рост принимаемого потока. При определенном соотношении размеров торцов крутизна изменения потока растет до тех пор, пока границы отраженного «пятна» не выходят за пределы торца приемного световода. Когда рост принимаемого потока из-за увеличения интенсивности элементарных потоков, попадающих в приемный световод, частично компенсируется потерями зависимость между расстоянием до поверхности и потоком, попадающим в приемный световод, функция преобразования остается линейной.

При увеличении расстояния потери преобладают, рост зависимости замедляется и вблизи некоторого расстояния поток, проходящий к фотоприемнику, остается практически постоянным. В дальнейшем преобладают потери за счет выхода отраженного потока за пределы торца приемного световода и поток, приходящий к фотоприемнику, убывает.

Таким образом, функция преобразования такого ВОП имеет квазилинейный участок наибольшей крутизны с центром X_0 , участок максимума вблизи X_m и падающий участок при $X > X_m$. При начальной установке световода в X_0 изменение потока на фотоприемнике практически линейно связано с изменением расстояния до отражающей поверхности. Вблизи максимума выходной сигнал ВОП практически не зависит от расстояния до отражающей поверхности и будет определяться мощностью источника излучения, потерями в световодах и отражающими свойствами поверхности.

Второй способ характерен для ВОП проходящего типа, где поток излучения, выходящий с торца передающего световода, направляется на торец приемного световода и модуляция осуществляется либо изменением взаимного расположения торцов под действием физической величины (рисунок 1.7 б), либо изменением условий распространения потока между неподвижными каналами. В ряде случаев конструкция ВОП проходящего типа содержит дополнительное механическое звено, обеспечивающее преобразование физической величины в перемещение одного из каналов.

Формирование отклика ВОП проходящего типа можно показать на примере с ортогональным перемещением торцов световодов. Если торцы параллельны и оси совпадают, то поток, передаваемый к фотоприемнику, максимален. При ортогональном перемещении торцов начинается выход лучей, переносящих большую часть общего потока излучения за пределы торца приемного световода. Однако эти потери частично компенсируются потоком, создаваемым лучами, переносящими меньшие элементарные потоки. Дальнейшее смещение приводит к тому, что уменьшается принимаемый поток. При еще больших смещениях это изменение становится более плавным. Из рисунка 1.7 б видно, что преобразование перемещений целесообразно вблизи точек перегиба (X_0, y_0) на участках наибольшей крутизны и линейности.

Во всех рассматриваемых ниже преобразователях получение измерительной информации связано с изменением амплитуды потока, проходящего с торца передающего световода под влиянием измеряемого пара-

метра. Такое изменение может быть получено в результате воздействия большинства известных физических величин либо непосредственно на проходящий в промежутке поток, либо через вспомогательные измерительные звенья.

Как указано ранее, преобразователи, в которых для получения измерительной информации используется отражение от поверхности объекта измерений или измерительного звена преобразователя, называют *рефлектометрическими ВОП*.

Если при распространении между торцами световодов поток не меняет своего общего направления, то такие преобразователи называют *ВОП проходящего типа*.

Для ВОП рефлектометрического типа существенным признаком, определяющим конструкцию, возможность конкретного использования и метрологические характеристики, является пространственное расположение торцов приемных и передающих оптических волокон. Хотя теоретически такое расположение может быть произвольным, на практике реализуются две основные конструкции каналов: когда торцы передающего и приемного каналов установлены под определенным углом друг к другу и когда приемный и передающий световоды имеют общий плоский торец (ВОП с совмещенным торцом), выполненный в виде зонда. Наиболее часто применяют вторую конструкцию, так как установка торцов под определенным углом затрудняет сборку ВОП и усложняет процесс начальной юстировки, особенно при отражении от неплоских поверхностей.

Весьма существенным является взаимное расположение торцов приемных и передающих волокон. Например, только за счет соответствующей конструкции коэффициент преобразования рефлектометрических ВОП может изменяться более чем на порядок при равных потоках излучения, вводимых от источника.

Приемный и передающий каналы рефлектометрических ВОП могут быть выполнены как из отдельных светопроводящих волокон, так и из жгутов из них. Наибольшее распространение получили ВОП с каналами, состоящими из жгутов светопроводящих волокон следующих конструкций: со случайным распределением передающих и приемных волокон на общем торце жгута; жгутов, в которых на общем торце группа передающих (приемных) волокон окружена группой приемных (передающих) волокон (коаксиальный канал); жгутов, в которых на общем торце группа

передающих волокон расположена рядом с группой приемных волокон (канал с разделенным торцом) [4].

Максимальную чувствительность при бесконтактном измерении аксиальных перемещений имеют ВОП со случайным распределением приемных и передающих волокон на общем торце. Это объясняется тем, что все излучающие волокна участвуют в формировании функции преобразования с момента, когда $X > 0$. Однако это приводит к тому, что максимальное значение выходного сигнала появляется при значениях X меньших, чем для других конструкций. Волоконно-оптические преобразователи с таким типом канала имеют минимальное рабочее расстояние $X_0 = 100 \dots 200$ мкм и самый короткий квазилинейный участок функции преобразования. Максимальный квазилинейный участок $100 \dots 2000$ мкм дают каналы с разделенными торцами. Средние значения по указанным параметрам позволяют получить ВОП с коаксиальными каналами.

Однако рассмотренные конструкции каналов не позволяют установить X_0 более чем на 3-5 мм. Это затрудняет использование ВОП аксиальных перемещений в тех случаях, когда максимальное значение перемещений неизвестно или может произойти разрушение объекта от случайного контакта с преобразователем. Здесь целесообразно использовать гибридные ВОП, состоящие из приемопередающего канала с совмещенным торцом и специальной оптической насадки, применение которой позволяет увеличить X_0 до десятков сантиметров.

Несмотря на то, что оптические каналы из жгутов многомодовых волокон позволяют получить высокую чувствительность для большого класса объектов, особенности технологии производства жгутов волокон ограничивают их длину $10 \dots 20$ м. Это затрудняет применение ВОП в тех случаях, когда необходимо удалить электронный блок (фотоприемник и источник излучения) на большие расстояния. Для передачи информации на большие расстояния (более 20 м) целесообразно использовать ВОП, составленные из волокон, используемых в оптических линиях связи. Однако особенности изготовления общего торца ВОП ограничивают число объединяемых волокон. Наиболее типичной является конструкция, в которой одно излучающее волокно окружено приемными. Коэффициент преобразования ВОП с таким каналом ниже, чем у рассмотренных выше, а ход функции преобразования соответствует каналу со случайным распределением волокон в торце [3].

Наивысшую локальность измерений дают ВОП с одним излучающим волокном. Минимальные размеры чувствительного элемента, вводимого в зону измерений, при большой протяженности квазилинейного участка могут быть получены с помощью приемопередающего канала, выполненного в виде одного световода. Здесь поток от источника излучений вводится в световод через полупрозрачное зеркало. Отраженный по этому же световоду поток возвращается к фотоприемнику. Однако такая схема предполагает значительные потери энергии из-за введения полупрозрачного зеркала.

Классификация ВОП с внешней модуляцией представлена на рисунке 1.8.

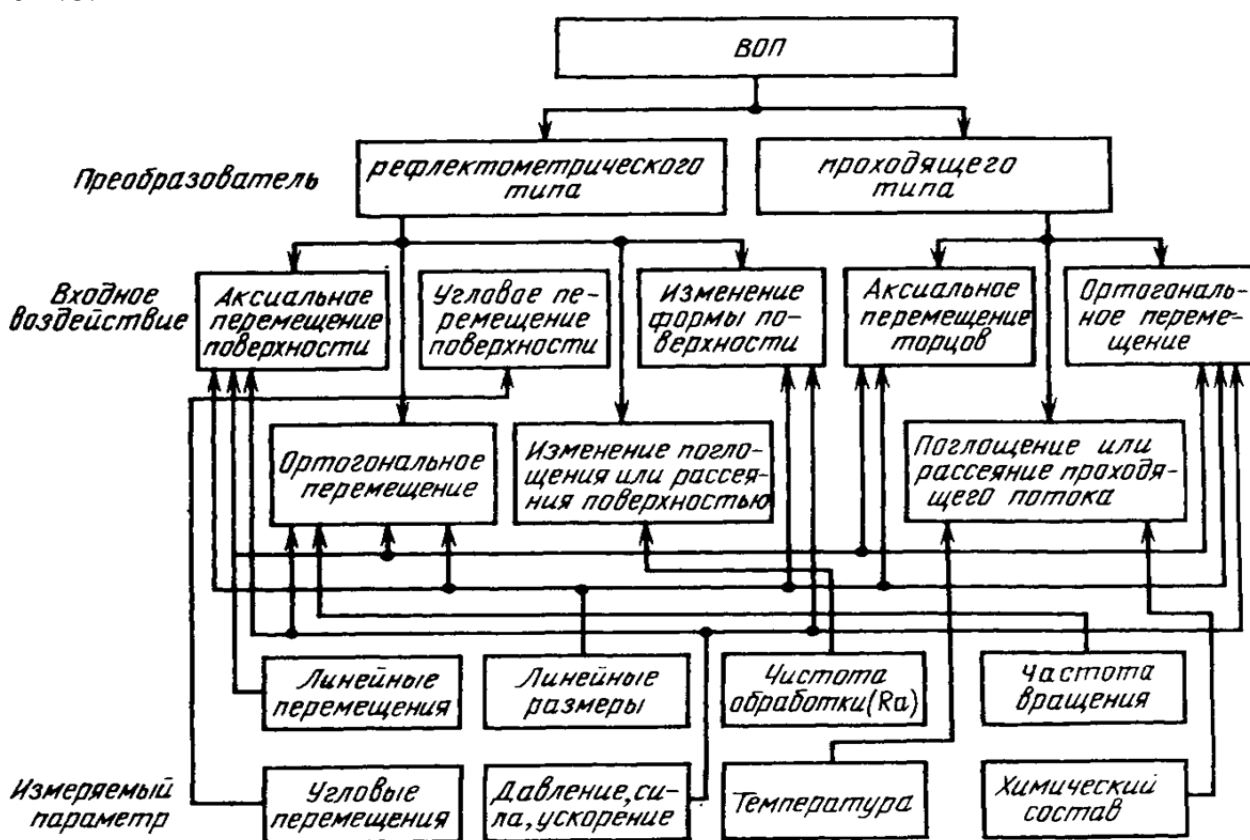


Рисунок 1.8 – Классификация ВОП с внешней модуляцией

В большинстве случаев в ВОП проходящего типа каналы выполняются из отдельных оптических волокон. Однако для преобразования больших перемещений, уровня и температуры каналы представляют собой линейки оптических волокон, ось которых совпадает с направлением перемещения каналов или перекрывающего поток звена. В некоторых

ВОП проходящего типа для повышения чувствительности на передающие и приемные торцы наносят растровые решетки с шагом 3-10 мкм.

Классификация показывает, что одни и те же физические величины могут быть преобразованы с помощью различных типов ВОП. Выбор схемы преобразователя в данном случае определяется требованиями к амплитудному и частотному диапазонам, к конструкции и условиям измерения, к точности, а также к значениям коэффициента преобразования.

Наибольший коэффициент преобразования при минимальной протяженности квазилинейного участка имеют ВОП проходящего типа. Наибольшая протяженность линейного участка характерна при меньшем коэффициенте преобразования для режима перекрытия у рефлектометрических ВОП, среднее положение занимают ВОП аксиальных перемещений.

Контрольные вопросы

1 Какие основные конструкции каналов имеют на практике ВОП рефлектометрического типа?

2 Волоконно-оптические преобразователи какого типа имеют наибольший коэффициент преобразования?

3 Волоконно-оптические преобразователи какого типа имеют наибольшую локальность измерений? Почему?

Список литературы (раздел 1)

1 Мусаев Э.С. Оптоэлектронные устройства на полупроводниковых излучателях. М.: Радио и связь, 2004. 208 с.

2 Окоси Тамакори, Окамото К., Оцу М. и др. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.

3 Ghosh, S.K.; Sarkar, S.K.; Chakraborty, S. (2002). "Design and development of a fiber optic intrinsic voltage sensor". Proceedings of the 12th IMEKO TC4 international symposium Part 2 (Zagreb, Croatia): 415–419

4 Зак Е.А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией. М.: Энергоатомиздат, 1989.

5 Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ВОП С ВНЕШНЕЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

2.1 Общий подход к проектированию волоконно-оптических преобразователей с внешней модуляцией

При проектировании волоконно-оптического преобразователя для измерения параметров технологических объектов решаются три задачи.

1-я задача

- определяется структурная схема ВОП, обеспечивающая требуемые метрологические характеристики и условия измерения заданного параметра технологического объекта;

- выбирается световод (световоды);

- обосновывается выбор источника и приёмника излучения.

2-я задача – исходя из выбранных характеристик световода, источника излучения и фотоприёмника определяются и рассчитываются основные элементы электронного модуля ВОП:

- схема питания источника излучения;

- схема преобразования сигнала фотоприёмника;

- схема нормирующего усилителя.

3-я задача – разрабатывается конструкторская документация на проектируемый преобразователь.

2.2 Обоснование выбора и расчёт основных элементов оптической части ВОП

2.2.1 Обоснование структурной схемы ВОП

Проектирование ВОП начинается, как правило, с формирования структурной схемы. Если структура однозначно не оговорена в техническом задании, то для её формирования следует руководствоваться первым разделом данного учебного пособия: по рисункам 1.1 и 1.2, исходя из заданного параметра (внешнего воздействия $F_{вх}$) технологического объекта, определяются методы и способы измерения. При этом могут быть использованы физические эффекты, перечисленные в таблице 1.2. После этого по

таблицам 1.3 и 1.4 выбираются оптические схемы преобразователей и разрабатываются конструктивные исполнения (рисунок 1.4).

Многообразие физических эффектов, схем модуляции и фотоприёмных схем обуславливает инвариантность конструктивной реализации преобразователя. При выборе конкретного варианта необходимо руководствоваться требованиями технического задания и экономическими соображениями. Следует учесть, что наиболее просты в реализации преобразователи, в которых при преобразовании физической величины изменяется интенсивность потока некогерентного излучения (рисунок 1.4 в), и именно им при прочих равных условиях следует отдавать предпочтение [4].

После формирования структурной схемы и принципов конструктивной реализации можно переходить к выбору и разработке отдельных элементов оптической и электрической части ВОП. На этом этапе необходимо стремиться к максимальному использованию изделий и компонентов, которые выпускаются серийно.

Ниже представлены рекомендации по выбору и расчёту основных элементов оптической части ВОП с внешней модуляцией.

2.2.2 Обоснование выбора модулятора светового потока

Модулятор является основным элементом ВОП, обеспечивающим первый этап преобразования измеряемого параметра технологического объекта в интенсивность потока некогерентного излучения. В зависимости от вида измеряемого параметра для преобразователей *рефлектометрического типа* можно использовать следующие основные способы получения измерительной информации (рисунок 2.1).

Для измерения **перемещений, толщины, расстояний** – модуляция потока осуществляется за счёт аксиального движения отражающей поверхности на технологическом объекте (рисунок 2.1 а).

Измерение **давлений, усилий, ускорений, поворота и кривизны поверхностей, линейных размеров** – производится путём модуляции потока при угловых перемещениях плоской отражающей поверхности и за счёт изменения формы отражающей поверхности (рисунок 2.1 б, в) .

Для измерения **ударных воздействий, скорости и ускорения, частоты вращения, наличия и положения детали в схвате робота** – модуляция потока производится за счёт ортогонального перемещения границ поверхностей с различными отражающими свойствами (рисунок 2.1 г).

Измерение шероховатости, поглощающих, рассеивающих или поляризующих свойств неподвижных поверхностей – осуществляется модуляцией потока за счет потерь на переотражение (рисунок 2.1 д).

Для преобразователей *проходящего типа* могут быть использованы следующие основные способы получения измерительной информации.

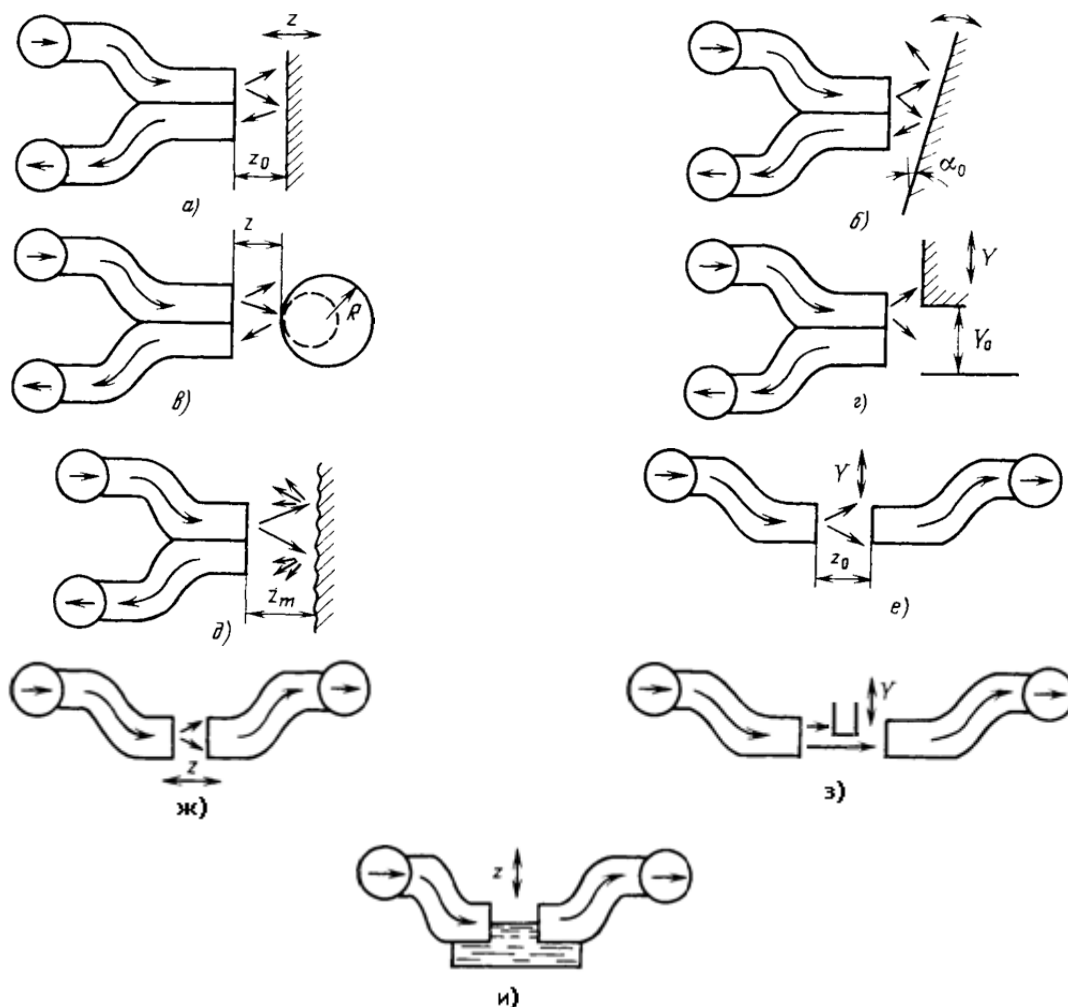


Рисунок 2.1 – Способы получения измерительной информации чувствительным элементом ВОП

Ортогональное перемещение торцев – для измерения **силы, ускорений, скоростей потока жидкостей и газов** (гидрофоны, преобразователи) (рисунок 2.1 e).

Аксиальное перемещение торцев – для измерения **больших перемещений** (до десятков метров) (рисунок 2.1 ж).

Перекрытие проходящего потока - для измерения малых перемещений, линейных размеров, давления, разрушения режущего инструмента, температуры (рисунок 2.1 з).

Поглощение или рассеяние проходящего потока – для измерения **уровня жидкости, запыленности, температуры** (рисунок 2.1 и).

Следует отметить, что при выборе вида модуляции светового потока преобразователя следует руководствоваться конкретными требованиями технического задания к конструкции, точности и другим метрологическим характеристикам ВОП.

Следует учитывать, что при минимальной протяженности квазилинейного участка характеристики наибольший коэффициент преобразования и чувствительность имеют ВОП проходящего типа. Наибольшая протяженность линейного участка характерна при меньшем коэффициенте преобразования у рефлектометрических ВОП. Среднее положение по чувствительности занимают ВОП аксиальных перемещений. Необходимо стремиться, чтобы влияние внешних неинформативных факторов при реализации модулятора было либо полностью устранено на структурном уровне, либо имело как можно меньшее значение.

Расчёты механической части модулятора технологических объектов, как правило, достаточно просты. Однако именно здесь закладываются основные *метрологические характеристики* преобразователя, обеспечивается минимальная *инструментальная погрешность измерения*. Особое внимание необходимо уделять стабильности расположения и перемещения подвижных поверхностей, их однородности, стабильности оптических (отражательных) свойств.

Необходимо также учитывать требуемый рабочий диапазон температур, влажность воздуха и дестабилизирующие факторы, при которых будет эксплуатироваться ВОП и которые оговорены в техническом задании. Необходимо учесть возможность юстировки, поверки и контроля разработанной конструкции, удобство эксплуатации и обслуживания.

С различными конструкциями модуляторов ВОП можно ознакомиться по литературе [10;11].

Один из основных параметров, который должен быть определён при выборе конструкции модулятора, это прежде всего собственные потери оптического излучения. Его численные значения варьируются от 3 до 60 дБ и могут быть определены по методикам, изложенным в литературе [8;9].

По результатам расчёта может быть сделан вывод о необходимости использования другой схемы (принципа) модуляции светового потока или другой структуры измерительного преобразователя.

2.2.3 Выбор световодов ВОП

С точки зрения проектирования ВОП параметры световодов могут быть разделены на «внешние» и «внутренние». К «внешним» можно отнести те параметры, которые в процессе проектирования можно варьировать: *длина световода, его диаметр, структура распределения волокон в жгуте*. К «внутренним» относятся параметры, заданные производителем: *номинальная апертура, коэффициент поглощения в материале волокна, потери на отражение от торцов волокна и коэффициент отражения на границе жила-оболочка*.

Световоды являются изделиями единичного или мелкосерийного производства, поэтому разработчики волоконно-оптических преобразователей при оформлении заказа имеют возможность задать любые «внешние» параметры световода в пределах технологических возможностей предприятия-изготовителя световодов [10].

Длина световода выбирается исходя из технического задания или, если в техническом задании она не оговорена, то исходя из конструктивных соображений. При этом следует стремиться к минимальной длине световода, поскольку пропорционально увеличению длины увеличиваются и потери световой энергии в световоде и связанные с ними дополнительные погрешности преобразования ВОП [4].

Диаметр световода также выбирается исходя из технического задания или, если в техническом задании он не оговорен, то исходя из требуемых параметров функции преобразования или конструктивных соображений. В большинстве случаев торцы световодов являются частью чувствительного элемента ВОП, и их конструктивное исполнение определяет многие метрологические характеристики преобразователя. Имеет значение и форма торца световода.

На рисунке 2.2 представлена зависимость чувствительности $S(X_0)$ рефлектометрического ВОП от радиуса торцев передающего R_1 и приёмного R_2 каналов при их коаксиальном расположении [9]. Руководствуясь данной зависимостью при проектировании преобразователя, можно подо-

брать диаметр световода для обеспечения оптимального значения чувствительности.

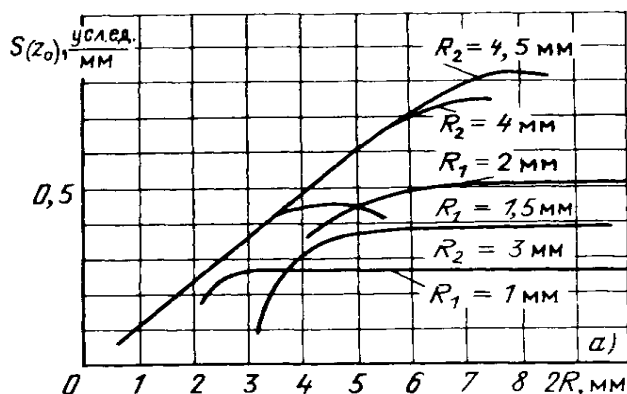
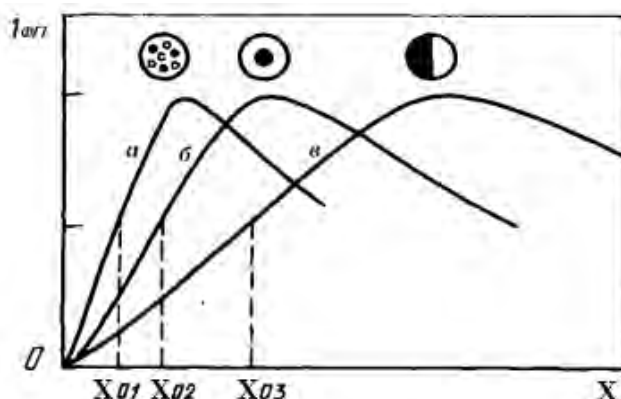


Рисунок 2.2 – Зависимость чувствительности ВОП от размеров торцов коаксиальных каналов

При выборе диаметра световода необходимо учитывать диаметр и диаграммы направленности источника излучения и фотоприёмника.

Структура распределения волокон в жгуте и геометрические характеристики торца световода, являющегося частью чувствительного элемента ВОП, определяют вид функции преобразования.

Для *рефлектометрических* ВОП на рисунке 2.3 показана зависимость функции преобразования от распределения приёмных и передающих волокон на торце световода (размещение передающих волокон на торце световода показано черной заливкой, приемных – белой).



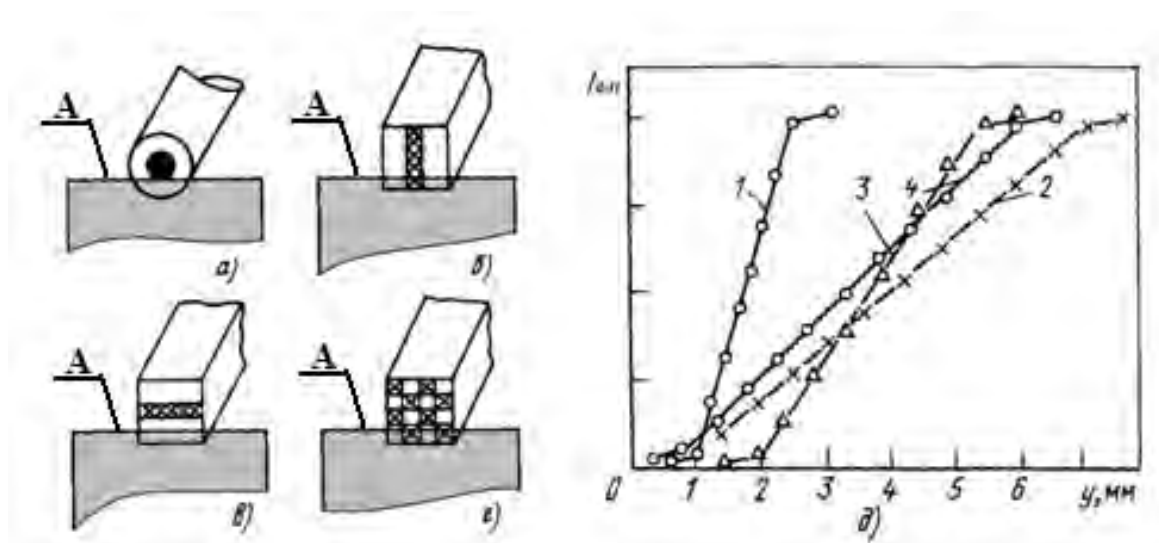
а) случайное расположение волокон; б) коаксиальное расположение волокон; в) приёмные и передающие волокна делят торец надвое

Рисунок 2.3 – Зависимость функции преобразования от распределения волокон на торце световода для рефлектометрических ВОП

Для получения высокой чувствительности необходимо использовать случайное распределение волокон на торце световода (рисунок 2.3 а). Меньшую чувствительность можно получить при коаксиальных каналах с внутренним передающим световодом (рисунок 2.3 б). Самая низкая чувствительность при использовании структуры, где приёмные и передающие волокна делят торец световода надвое (рисунок 2.3 в). Вместе с тем можно отметить, что последнее распределение волокон позволяет обеспечить самый широкий диапазон измерения и наилучшую линейность характеристики ВОП.

При расчетах функции преобразования, диапазона измерения, нелинейности функции преобразования и других метрологических характеристик рефлектометрических ВОП можно использовать подходы и зависимости, приведённые в литературе [9;11].

Для ВОП *ортогональных перемещений* зависимость функции преобразования от распределения приёмных и передающих волокон на торце световода (передающие волокна выделены чёрным цветом) показана на рисунке 2.4.



1 – к схеме канала а; 2 – к схеме канала в; 3 – к схеме канала г;
4 – к схеме канала б

Рисунок 2.4 – Каналы ВОП ортогональных перемещений (а-г) и соответствующие функции преобразования (д)

Показано, что изменяя форму, расположение и соотношение передающих и приёмных элементов на торце световода, можно задавать не

только значение чувствительности и диапазон измерения, но и смещать начало и конец диапазона измерения на достаточно большую величину.

Замечательной особенностью ВОП *ортогональных перемещений* является возможность получения практически любого вида функции преобразования за счёт задания определённой формы границы оптической неоднородности А (рисунок 2.4).

Жгуты волокон для ВОП могут иметь *регулярную* и *нерегулярную структуру*. В регулярных структурах жгутов относительное расположение выходных торцов волокон совпадает с расположением входных торцов. Следует учитывать, что для некоторых способов получения измерительной информации (например, при применении модулятора ортогональных перемещений) необходимо, чтобы излучающие волокна были расположены или регулярно, или полностью нерегулярно. Наличие произвольно расположенных совокупностей упорядоченных волокон приводит к значительной нелинейности функции преобразования ВОП. В этом случае в передающем канале целесообразно использовать регулярные жгуты с одинаковой геометрией входного и выходного торцов.

Важнейшей характеристикой оптоволоконна является **числовая апертура** – максимально возможный угол, с каким свет, введенный в волокно, может распространяться в нем. Числовая апертура определяется коэффициентами преломлений сердечника световода. Если угол ввода луча света в сердечник меньше некоторого значения, то он испытывает полное внутреннее отражение и распространяется только в нем. При нарушении этого условия часть вводимого излучения преломляется и уходит в оболочку, а часть отражается внутрь сердечника.

В оптическом канале ВОП с внешней модуляцией наиболее целесообразно использовать *высокоапертурные светопроводящие волокна*.

Распределение потока излучения по оптическому волокну определяется, как было указано выше, коэффициентом поглощения в материале волокна, потерями на отражение от торцов волокна и коэффициентом отражения на границе жила-оболочка. Существуют аналитические зависимости, позволяющие рассчитать значения этих показателей [9;11], однако они справедливы лишь для световодов, у которых отсутствуют микродефекты. Реальные световоды имеют пузырьки в стекле сердцевины, расплавленные частицы шихты, посторонние включения; трещины и т.д. Это приводит к рассеянию света и, следовательно, к уменьшению свето-

пропускания. В результате на практике производитель указывает интегральную характеристику световода, включающую в себя и потери на границе жила-оболочка, – *коэффициент светопропускания*, значение которого, как правило, не превышает 0,45.

Светопропускание оптического волокна зависит от длины волны излучения λ [3]. В световодах, изготовленных из оптического стекла, оно минимально для длин волн 0,3-1,5 мкм, что хорошо согласуется со спектральными характеристиками источников излучения и фотоприемников, применяемых в ВОП.

На практике чаще всего применяют световоды, которые изгибаются в процессе эксплуатации. Значительные изгибы световодов также приводят к увеличению светопоглощения и изменению индикатрисы светораспределения. В обычных условиях упругая деформация позволяет изгибать световоды по радиусу не меньше 50 радиусов волокна. При таких радиусах изгиба изменение хода лучей незначительно, и его можно не учитывать.

Потери на отражение от торцев волокна зависят от качества их обработки и на этапе предварительных расчётов принимаются равными 6 дБ. В некоторых случаях между торцом световода и источником (приёмником) излучения целесообразно вводить специальный прозрачный гель, препятствующий проникновению в зазор влаги о пыли и уменьшающий потери на отражение от торцов волокна.

При проектировании ВОП необходимо учитывать стабильность параметров световодов при температурных и механических воздействиях. При механических воздействиях, в частности разрывных усилиях и многократных изгибах, возникают микротрещины, приводящие к разрушению оптических волокон. При многократном изгибе число циклов до разрушения увеличивается с уменьшением диаметра волокон, поэтому жгуты из волокон малых диаметров более устойчивы к воздействию вибраций. Значительное влияние на сопротивление волокон многократному изгибу оказывает влажность воздуха [4]. Всё это может существенным образом повлиять на стабильность метрологических характеристик ВОП.

При относительно невысоких температурах (до 200-300 °С) применяют жгуты волокон, соединенные на торцах с помощью эпоксидных смол. При более высоких температурах используются жгуты со спеченными торцами, тогда предельная температура эксплуатации определяется температурой размягчения оптического стекла и может достигать до

700-800 °С. Однако следует учитывать, что спекание концов волокон при сохранении гибкости жгута может привести к его разрушению в переходной зоне от монолита к свободным волокнам.

Источник излучения. Выбор источника излучения оказывает значительное влияние на метрологические характеристики и надёжность ВОП. Их характеризуют спектральный состав, мощность излучения, диаграмму направленности, уровень широкополосного оптического шума.

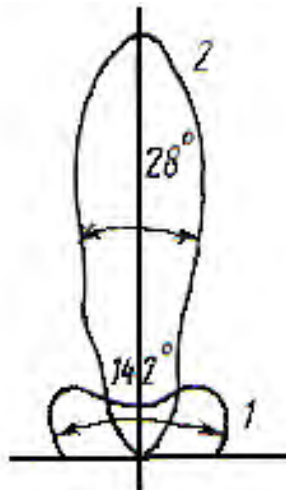
Лазерные диоды. В лазерных диодах, стоимость которых в сочетании с сопутствующей аппаратурой достаточно высока, сфокусированные узкие световые потоки, введенные в передающий световод, на несколько порядков превышают потоки других источников. Несмотря на то, что лазерные диоды позволяют получить большую мощность излучения, узкая диаграмма направленности в некоторых случаях ограничивает их применение. Для газовых лазеров и лазерных диодов характерны собственные амплитудные и фазовые модуляции, в частности из-за разной длины оптических волокон в жгутах приемных световодов, что налагает существенные ограничения при измерении малых изменений потока.

Лампы накаливания в значительной степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к источникам излучения для ВОП: имеют непрерывный спектр излучения, диапазон которого охватывает как видимую, так и инфракрасную область ($\lambda=0,4...4$ мкм). Лампы накаливания являются высокоинерционными источниками и, следовательно, имеют малый коэффициент пульсации. Основные параметры ламп сильно зависят от питающего напряжения, что создает необходимость питания их от стабилизированного источника напряжения, режим которого контролируется. При длительной эксплуатации источников следует учитывать их собственную нестабильность.

Существенная часть спектра излучаемой мощности лампы лежит вне спектрального диапазона световодов. Лампы потребляют значительную мощность, что затрудняет эффективное управление питающим током и стабилизацию режимов питания.

Светодиоды. Наряду с лампами накаливания мощные инфракрасные (ИК) светодиоды ($\lambda = 1$ мкм) удовлетворяют большинству требований, предъявляемых к источникам излучения ВОП. Отличительной особенностью светодиодов является узкая диаграмма направленности излучения, позволяющая вводить поток в световоды без вспомогательной оптики (ри-

сунок 2.5). Выпускаемые в настоящее время ИК-светодиоды имеют мощность до 5Вт при потребляемом токе до 5А [18]. Мощные ИК-световоды позволяют получить плотность излучения, соизмеримую с аналогичным значением для ламп накаливания при гораздо меньшей потребляемой мощности.



*1 – «широкая» диаграмма направленности,
2 – «узкая» диаграмма направленности*

Рисунок 2.5 – Диаграмма направленности излучения ИК-светодиодов

При проектировании ВОП возможно использовать импульсный режим запитки ИК-светодиодов, что позволяет уменьшить влияние внешней засветки зоны измерения за счет повышения мощности светового потока. Однако при проектировании ВОП необходимо учитывать наличие низкочастотного оптического шума с частотами до 1 кГц, что снижает эффективность применения светодиодов при измерении медленно меняющихся величин. Необходимо учитывать, что для некоторых мощных ИК-светодиодов при изменении питающего тока трансформируется диаграмма направленности, что в свою очередь приводит к изменению функции преобразования ВОП [5]. Кроме того, изменение температуры окружающей среды приводит к смещению положения максимума спектральной характеристики и изменению мощности оптического излучения.

Фотоприемник. Основными типами фотоприемников, применяемых в ВОП с внешней модуляцией, являются фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, интегральные ПЗС и КМОП фотоматрицы.

Фоторезисторы, принцип действия которых основан на изменении сопротивления полупроводникового слоя под действием лучистой энер-

гии, имеют большую постоянную времени, что делает их малоприспособленными для применения в ВОП.

Интегральные ПЗС и КМОП фотоматрицы требуют наличия специальных микросхем-контроллеров для получения сигнала изображения, что существенно ограничивает возможности их применения в составе ВОП.

Наиболее приемлемыми типами фотоприемников для ВОП являются фотодиоды и фототранзисторы. Спектральная чувствительность кремниевых фотодиодов и фототранзисторов хорошо согласуется со спектральными характеристиками ламп накаливания, инфракрасных светодиодов и волоконных световодов.

Фотодиоды в составе ВОП могут быть включены по разным схемам, отличающимся уровнем собственного шумового тока и напряжения, характеристикой преобразования светового потока в электрический сигнал и параметрами быстродействия.

Фототранзисторы по сравнению с фотодиодами имеют не только более высокую чувствительность, но и существенно большую зависимость характеристик от температуры. Рекомендуется использовать их в составе ВОП при работе оптического канала в импульсном режиме [6;7].

2.3 Выбор основных элементов электронной части ВОП

2.3.1 Источники питания светоизлучающих диодов

Основное назначение источника питания (ИП) светодиода – обеспечить такой режим, при котором достигается наибольшая стабильность потока излучения источника излучения. В [5] показано, что таким режимом для ИК-светодиода является смешанный (промежуточный между режимом питания от генератора напряжения и питания от генератора тока), который получают при подключении светодиода к генератору напряжения через токоограничивающий резистор. Однако оптимальное значение токоограничивающего резистора составляет несколько Ом, при этом внутреннее сопротивление источника питания должно быть существенно ниже. Поскольку внутреннее сопротивление источника питания имеет порядок долей Ома, это затрудняет практическую реализацию смешанного режима питания светодиода.

Основным недостатком режима питания от генератора напряжения является опасность токовой перегрузки, вероятность которой возрастает

при повышении температуры кристалла из-за эффекта саморазогрева при токах питания, близких к максимальным. Поэтому целесообразно светодиод питать от генератора тока, а для снижения мультипликативной погрешности ВОП, вызванной нестабильностью потока излучения, применять дополнительные схемы коррекции во вторичном устройстве [14].

Если устройство первичной обработки информации содержит структурные схемы цифровой коррекции, то источник питания целесообразно дополнить цифро-аналоговым преобразователем и источником образцового напряжения (ИОН), что исключает нестабильность потока излучения, связанную с влиянием наводок на соединительный кабель.

2.3.2 Устройство согласования приемника излучения (УСПИ) является обязательным промежуточным звеном между приемником излучения и устройством первичной обработки информации. Оно предназначено для их электрического согласования и реализации режимных особенностей функционирования ПИ.

Входным параметром устройства согласования приемника излучения является выходной ток фотодиода. В общем случае он представляет собой сумму фототока, который в ВОП рефлетометрического типа несет информацию об измеряемой величине, темнового тока, пропорционального напряжению смещения на фотодиоде, и шумового тока.

Для снижения *аддитивной погрешности* измерений предпочтительно использовать фотодиод с обратным смещением, так как интегральная чувствительность в этом режиме в 1,5-2 раза выше, чем в *фотовольтаическом* (без смещения).

Однако при малом значении потока, попадающего на фотоприемник, а значит и малом коэффициенте преобразования датчика целесообразно использовать *фотовольтаический* режим работы фотодиода, при котором отсутствует темновой ток. Это позволяет повысить также точность измерения медленно меняющихся перемещений, так как исключается погрешность, связанная с дрейфом темнового тока.

В простейшем случае УСПИ представляет собой резистор, который является нагрузкой фотодиода, работающего с обратным смещением (фотодиодный режим). Основные достоинства такой схемы: простота реализации, отсутствие активных элементов, которые являются источниками дополнительных шумов и дрейфа на выходе, возможность получения вы-

сокой чувствительности датчика при увеличении сопротивления резистора R_n . Однако частотный диапазон ВОП при этом существенно ограничен.

Практически для ВОП с чувствительностью 1 мВ/мкм $R_n = 10\text{-}100 \text{ кОм}$, что обуславливает применение датчика совместно со вторичной аппаратурой, имеющей высокое входное сопротивление (более 1 МОм). При этом необходимо применять дополнительные меры по экранированию соединительного кабеля и сигнальных цепей для снижения погрешностей измерения, связанных с наводками.

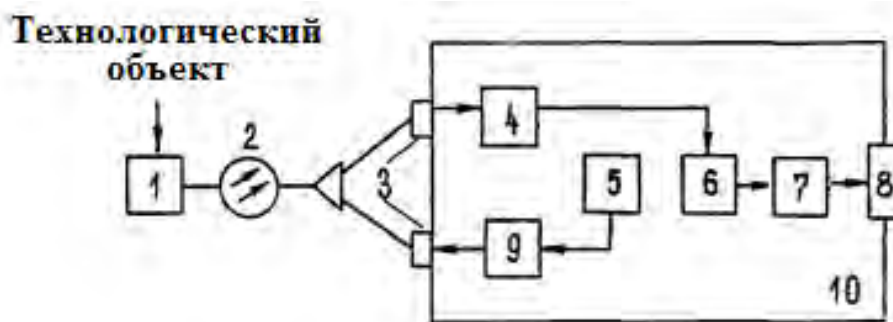
Значительно расширить частотный диапазон ВОП *рефлектометрического* типа и снизить выходное сопротивление позволяет *УСПИ на базе операционного усилителя (ОУ)*. Малое входное сопротивление ОУ, которое при замкнутой обратной связи обычно не превышает 1 Ом , обеспечивает работу фотодиода *в режиме короткого замыкания*, что дает возможность получить максимальное быстродействие [14].

Заданная чувствительность датчика может быть установлена регулировкой резистора в обратной связи, что практически не оказывает влияния на режим работы фотодиода. Основным недостатком здесь является увеличение порога чувствительности датчика из-за собственных шумов ОУ и дрейфа его параметров. Поэтому в ИП такого типа необходимо применять прецизионные операционные усилители.

2.4. Пример разработки ВОП для измерения перемещений индентора

Задание на проектирование

Разработать бесконтактный волоконно-оптический преобразователь для измерения малых линейных перемещений индентора выглаживающего инструмента. Действие преобразователя должно быть основано на изменении отражения света от поверхности модулятора. В качестве модулятора использовать поверхность торца индентора инструмента, изменяющего своё положение относительно торца световода. Рекомендуемая структура ВОП представлена на рисунке 2.6.



1 – модулятор светового потока; 2 – двухволоконный оптический световод; 3 – оптические разъёмные соединители; 4 – фотоприёмник; 5 – источник тока; 6 – устройство преобразования сигнала фотоприёмника; 7 – нормирующий усилитель; 8 – электрический соединитель; 9 – источник излучения; 10 – оптоэлектронный блок

Рисунок 2.6 – Структурная схема ВОП для бесконтактного измерения малых перемещений

Технические характеристики проектируемого ВОП:

Уровень выходного сигнала оптоэлектронного блока, В	0...10
Диапазон измерения, мкм	0...100
Порог чувствительности, мкм	..0,2
Погрешость изменения, мкм	± 0,5
Диапазон частот, Гц, не более	1...1000
Напряжение питания, В	± 12
Диапазон рабочих температур, °С	+10...+ 85
Масса, не более, кг	0,3
Габариты преобразователя, не более, мм	35 x 70

Анализ структурной схемы ВОП и путей обеспечения требуемых метрологических характеристик и условия измерения

Исходя из функционального назначения и заданной структуры определяем, что преобразователь для измерения малых линейных перемещений индентора выглаживающего инструмента относится к преобразователям *рефлектометрического типа*. Известно [9], что функция преобразования для данного типа ВОП имеет вид, представленный на рисунке 2.7.

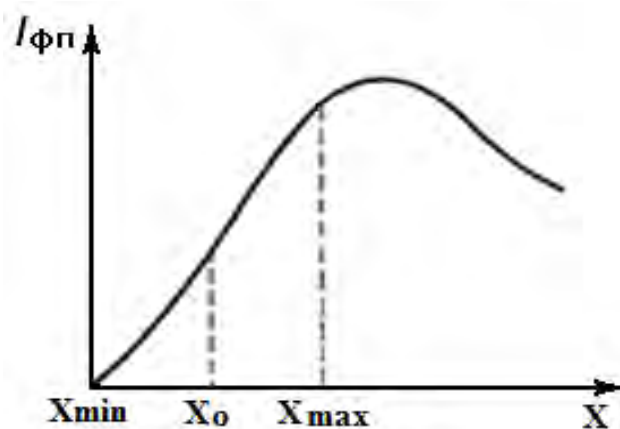


Рисунок 2.7 – Функция преобразования оптической части ВОП малых линейных перемещений для контроля положения выглаживающего инструмента

Для получения как можно более высокой чувствительности преобразователя используется восходящий рабочий участок функциональной статической характеристики.

На функциональной характеристике значения измеряемой величины X_{\min} , X_0 и X_{\max} соответствуют началу, середине и концу диапазона измерений. Согласно исследованиям процесса выглаживания [15], рекомендуется диапазон измерений 0-100 мкм.

Для получения максимально монотонной функциональной характеристики отражающая поверхность должна иметь равномерную шероховатость величиной $R \leq 0,2$ мкм при максимально возможном коэффициенте отражения и максимальное рассеивание света поверхностью. При пескоструйной обработке индентора обеспечивается коэффициент отражения 0,2-0,3 [16].

Выбор световода

Для реализации выбранной выше структуры преобразователя выбираем *световод разветвлённого типа*.

Структура распределения волокон в жгуте выбирается исходя из рекомендаций [9;11]. Для получения максимально возможной чувствительности преобразователя *рефлектометрического типа* выбираем световод со случайным распределением волокон.

Диаметр световода выбирается исходя из технического задания или, если в техническом задании он не оговорен, то исходя из требуемых параметров функции преобразования или конструктивных соображений. С

учётом конструкции выглаживающего инструмента принимаем диаметр коллекторной части световода 3,9 мм, диаметр разветвлённых концов световода – 2,5 мм.

Длина световода для уменьшения оптических потерь и дополнительных погрешностей, связанных с температурой, с возможными повреждениями волокон в процессе эксплуатации, принимается как можно меньшей исходя из технологических возможностей производителя световодов. Разветвлённые световоды изготавливаются с длиной коллекторной части не менее 50 мм и длиной разветвлённой части не менее 100 мм. Таким образом, необходимо использовать *укороченные* разветвлённые световоды, для которых длина не превышает 50 мм.

Коэффициент светопропускания световода задаётся исходя из технологических возможностей производителя – 0,45.

Обоснование выбора источника и приёмника излучения

В качестве источника излучения для разрабатываемого преобразователя ИК-светодиод марки АЛ115, имеющий мощность излучения 10 мВт при токе 50 мА. Узкая диаграмма направленности излучения этого светодиода позволяет вводить его излучение в световод с минимальными потерями без использования дополнительных фокусирующих элементов [17]. Диаметр светодиода 2,5 мм и его конструктивное исполнение позволяют вводить оптическое излучение в световод с минимальными потерями.

Обоснование и выбор фотоприёмника

В качестве фотоприёмника для разрабатываемого преобразователя фотодиод марки ФД-19КК, имеющий интегральную токовую чувствительность не хуже 4,2 мА/лм в спектральном диапазоне 0,5-1,2 мкм. Конструкция данного фотодиода позволяет передавать на него излучение со световода с минимальными потерями без использования дополнительных фокусирующих элементов [18].

Определение и расчёт основных элементов электронного модуля ВОП исходя из выбранных характеристик световода, источника излучения и фотоприёмника

Схема питания источника излучения

Для питания светоизлучающего диода используем типовую схему источника тока на операционном усилителе (ОУ), представленную на рисунке 2.8.

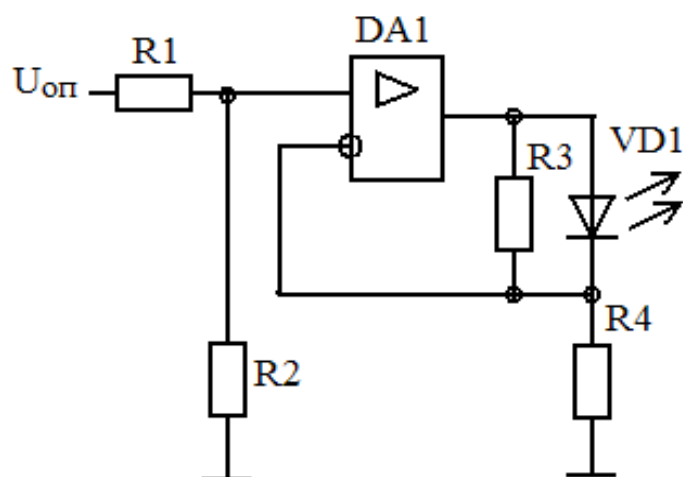


Рисунок 2.8 – Схема питания ИК-светодиода

На схеме светоизлучающий диод VD1 получает ток с выхода ОУ DA1. Для компенсации снижения мощности излучения светодиода от температуры параллельно ему включен резистор R3, сопротивление которого подбирается на этапе макетирования преобразователя. Для получения ещё более точной температурной компенсации последовательно с резистором R3 может быть включен терморезистор.

Ток через светоизлучающий диод VD1 (без учёта тока через резистор R3) $I_{св}$ определяется значением сопротивления резистора R4 и напряжением на неинвертирующем входе ОУ – U_n . При заданном токе сопротивление резистора R4 рассчитываем по формуле

$$R4 = U_n / I_{св}. \quad (2.1)$$

В свою очередь, напряжение на неинвертирующем входе U_n ОУ зависит от значения напряжения $U_{оп}$ и соотношения сопротивлений резисторов R1 и R2. Напряжение $U_{оп}$ – выходное напряжение микросхемы источника опорного напряжения (ИОН).

Источник опорного напряжения подбираем по условию минимального выходного напряжения при как можно меньшем температурном дрейфе в заданном температурном диапазоне. Выбираем микросхему ИОН МАХ6061 с выходным напряжением 1,25В. Температурный дрейф выходного напряжения не более 0,002 %/град. [19].

Принимаем падение напряжения на резисторе R4, а значит и U_n равным 1,0В. Принимаем ток через светодиод $I_{св}$ равным 25 мА, тогда в соответствии с (2.1) $R4 = 1В / 0,025А = 40$ Ом. Принимаем $R4 = 39$ Ом.

Значения сопротивлений резисторов R1 и R2 определяем, задавшись током через резистор R2 $I_{R2}=0,1 \text{ мА}$, тогда

$$R2 = U_H / I_{R2}. \quad (2.2)$$

Подставляя значения U_H и I_{R2} , получим

$$R2 = 1\text{В} / 0,1 \text{ мА} = 10\text{кОм}.$$

Значения сопротивлений резистора R1 определяем по формуле

$$R1 = (U_{оп} - U_H) / I_{R2}. \quad (2.3)$$

С учетом выбранных выше значений получим

$$R1 = (1,25\text{В} - 1\text{В}) / 0,1\text{мА} = 250 \text{ Ом}.$$

Принимаем $R1=240 \text{ Ом}$.

В качестве ОУ выбираем микросхему КР140УД7 [19].

Устройство преобразования сигнала фотоприёмника

В качестве устройства преобразования сигнала фотоприёмника используем типовую схему с токовым входом на операционном усилителе (ОУ), преобразующую фототок фотодиода в выходное напряжение, представленную на рисунке 2.9.

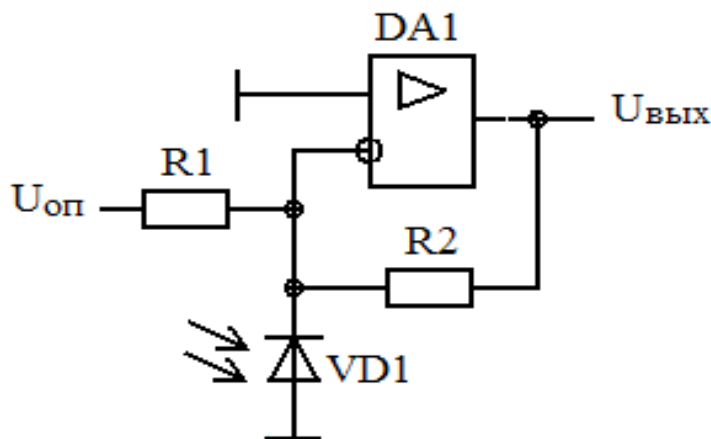


Рисунок 2.9 – Схема усиления сигнала фотоприёмника

В этой схеме фотодиод работает в режиме короткого замыкания. Операционный усилитель DA1 включен по инвертирующей схеме. Коэффициент преобразования схемы сопротивлением резистора R2. Ток через резистор R1 определяет компенсирующий сигнал, смещающий выходное напряжение ВОП к уровню 0 В на начальном участке характеристики преобразования.

Для достижения минимальной погрешности усилителя выбираем прецизионный ОУ типа ОР-07 [19].

Для оценки значения сопротивлений резисторов определим выходной ток фотоприёмника в точке рабочей характеристики X_{max} .

Мощность оптического излучения светоизлучающего диода АЛ115 при токе 25 мА $P_{изл}$ составляет 5 мВт.

Примем коэффициент потерь на ввод излучения в световод с учетом диаграммы направленности светодиода и апертуры световода $K_1=0,3$.

Примем коэффициент потерь на отражение от торцев световода $K_2=0,4$.

Примем коэффициент поглощения света в материале волокна $K_3=0,45$.

Примем коэффициент потерь на вывод излучения из световода в фотоприёмник с учетом диаграммы направленности фотодиода и апертуры световода $K_4=0,2$.

Примем коэффициент потерь в модуляторе с учётом оптических свойств отражательной поверхности $K_5=0,2$.

Суммарный коэффициент потерь с учетом наличия в преобразователе трёх торцев световода составит:

$$K=K_1 K_2 K_2 K_2 K_3 K_4 K_5 =0,3*0,4*0,4*0,4*0,45*0,2=0,0017. \quad (2.4)$$

Мощность, падающая на фотоприёмник:

$$P_{фп}= P_{изл} K; \quad (2.5)$$

$$P_{фп}=5\text{мВт}*0,0017=0,0086 \text{ мВт}.$$

Определим световой поток, падающий на фотоприёмник

$$\Phi_{фп}=K_m K_c P_{фп}, \quad (2.6)$$

где K_m – светотехническая константа, $K_m=683$ лм/Вт,

K_c – коэффициент соответствия спектральных характеристик светодиода и фотоприёмника, принимаем $K_c=0,6$.

Тогда световой поток, падающий на фотоприёмник

$$\Phi_{фп}=683 \text{ лм/Вт}*0,6*0,0086 \text{ мВт}=3,5 \text{ млм}.$$

Рассчитаем фототок фотодиода в режиме короткого замыкания:

$$I_{фп}= SI \Phi_{фп}, \quad (2.7)$$

где SI – интегральная токовая чувствительность, для выбранного фотодиода ФД-19КК $SI = 4,2$ мА/лм, тогда

$$I_{фп}= 4,2 \text{ мА/лм}*3,5 \text{ млм}= 14,7 \text{ мкА}.$$

Учитывая, что рассчитанному значению тока фотодиода должно соответствовать максимальное значение выходного напряжения усилителя

Увых, равное 10В (по заданию), определим значение сопротивления резистора R2:

$$R2 = U_{\text{вых}} / I_{\text{фп}}. \quad (2.8)$$

Подставив значения Uвых и Iфп, получим

$$R2 = 10\text{В} / 14,7 \text{ мкА} = 689 \text{ кОм}.$$

Следует учесть, что рассчитанное значение имеет ориентировочный характер и требует уточнения на этапе макетирования ВОП.

Значение сопротивления резистора R1 зависит от переотражения светового потока в световоде и определяется опытным путём на этапе макетирования ВОП.

Рассчитанная схема усиления сигнала фотоприёмника выполняет функции и нормирующего усилителя, поэтому введение в состав ВОП нормирующего усилителя не требуется.

Контрольные вопросы

- 1 Какую функцию выполняет чувствительный элемент в составе ВОП?
- 2 На какой длине волны светопропускание оптического волокна из кварцевого стекла имеет наибольшую величину?
- 3 В чём состоит специфика применения светоизлучающих диодов в качестве источников излучения ВОП?
- 4 Как уменьшить влияние температуры на характеристики ВОП?

Список литературы (раздел 2)

- 1 Носов Ю.Р., Сидоров А.Н. Оптроны и их применение. М.: Радио и связь, 1991.
- 2 Measures, Raymond M. (2001). Structural Monitoring with Fiber Optic Technology. San Diego, California, USA: Academic Press. pp. Chapter 7.
- 3 Рождественский Ю.К., Вайнберг В.Б., Саттаров Д.К. Волоконная оптика в авиационной и ракетной технике. М.: Машиностроение, 1991.
- 4 Зак А.Ф. Физико-химические свойства стеклянного волокна. М.: Ростехиздат, 1962.
- 5 Конюхов Н.Е., Плютт А.А., Марков П.И. Оптоэлектронные контрольно-измерительные устройства. М.: Энергоатомиздат. 1985.
- 6 Иванов В.И., Аксенов А.И., Ющин А.М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы. М.: Энергоатомиздат, 1994.

- 7 Коган Л.М. Полупроводниковые излучающие диоды. М.: Энергоатомиздат, 1993.
- 8 Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988.
- 9 Зак Е.А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 10 Лыткаринский Завод Оптического Стекла. URL: <http://lzos.ru/index.php>.
- 11 Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
- 12 Чео П.К. Волоконная оптика: Приборы и системы: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
- 13 Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.
- 14 Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 2-е изд. / пер. с нем. М.: ДМК Пресс, 2008. Т.1. 832 с.
- 15 Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Губанов В.Ф. и др. Обеспечение требуемого качества поверхностей деталей на основе управления динамической системой процесса выглаживания: учебное пособие. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2005. 85 с.
- 16 Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988.
- 17 Мусаев Э.С. Оптоэлектронные устройства на полупроводниковых излучателях. М.: Радио и связь, 2004. 208 с.
- 18 Пароль Н.В., Кайдалов С.А. Фоточувствительные приборы и их применение: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 112 с.
- 19 Якубовский С.В., Барканов Н.А., Ниссельсон Л.И. Аналоговые и цифровые интегральные микросхемы: справочник. М.: Радио и связь, 1989.

3 ПРИМЕРЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ВОП

3.1 Контактный датчик малых линейных перемещений на основе ВОП

Контактный датчик малых линейных перемещений (далее – датчик) предназначен для контроля линейных перемещений в диапазоне 0-2 мм с погрешностью, не превышающей 1 мкм в статическом режиме. Выходной сигнал датчика – аналоговое напряжение 0-10 В.

Датчик предназначен для использования в составе автоматизированной системы контроля параметров геометрической точности металлорежущих станков с ЧПУ (рисунок 3.1) [1].

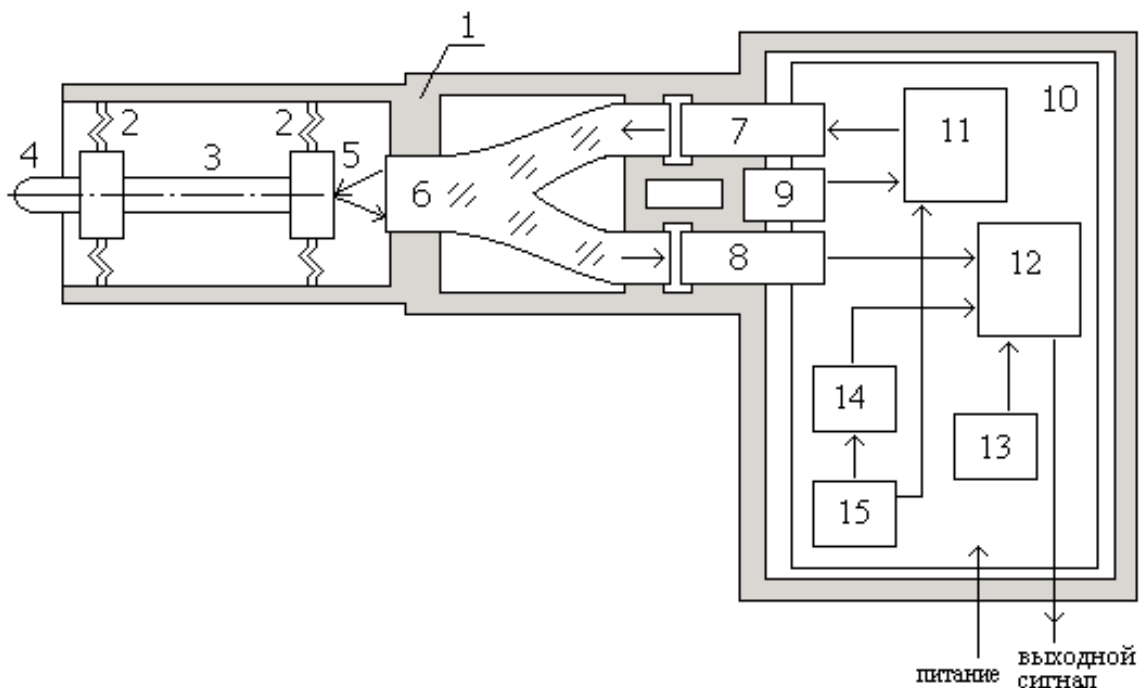


Рисунок 3.1 – Датчик малых линейных перемещений

Конструкция датчика представлена на рисунке 3.2.

В металлическом корпусе 1 с помощью плоских пружин 2 закреплен шток 3. При соприкосновении измерительного наконечника 4 штока с контролируемой поверхностью благодаря плоским пружинам он может перемещаться только в осевом направлении. При этом меняется зазор между отражающей поверхностью 5 штока и коллекторным торцом разветвлённого волоконного световода 6.

Основой датчика является волоконно-оптический преобразователь рефлектометрического типа, состоящий из ИК-светодиода 7, фотоприёмника 8 и отражающей поверхности штока (принцип действия этого типа преобразователей был подробно описан в разделе 1). Использование в оптическом канале разветвлённого волоконного световода со специальным распределением волокон обеспечило выравнивание светового потока над отражающей поверхностью, за счет чего удалось существенно снизить погрешности преобразователя, связанные с возможным радиальным смещением отражающей поверхности.



1 – корпус; 2 – плоская пружина; 3 – шток; 4 – измерительный наконечник; 5 – отражающая поверхность; 6 – волоконный световод; 7 – ИК-светодиод; 8 – фотоприёмник; 9 – термочувствительный элемент; 10 – электронная плата; 11 – источник питания светодиода; 12 – усилитель сигнала фотоприёмника; 13 – регулятор усиления; 14 – регулятор смещения; 15 – источник опорного напряжения

Рисунок 3.2 – Устройство датчика малых линейных перемещений

Электронные элементы датчика размещены на плате 10: 11 – источник питания светодиода, выходной ток которого зависит от температуры термочувствительного элемента 9; усилитель сигнала фотоприёмника 12, 13 – регулятор коэффициента усиления усилителя; 14 – регулятор смеще-

ния выходного сигнала усилителя; 15 – источник опорного напряжения. Термочувствительный элемент, имеющий непосредственный тепловой контакт со светоизлучающим диодом и фотоприёмником, обеспечивает существенное уменьшение дополнительной температурной погрешности преобразователя.

Функция преобразования ВОП представлена на рисунке 3.3.

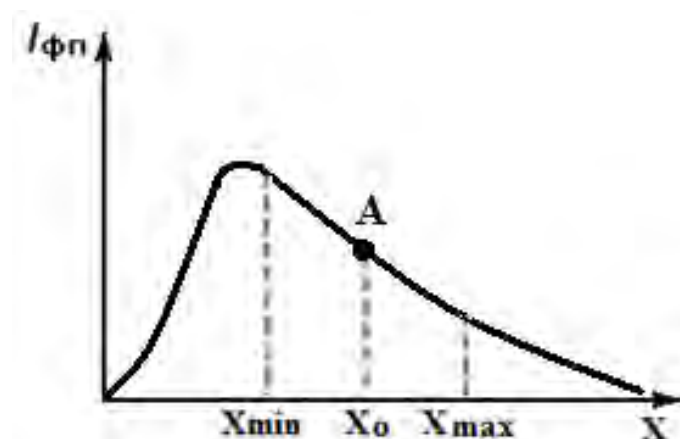


Рисунок 3.3 – Функция преобразования оптической части ВОП малых линейных перемещений

Рабочий участок характеристики располагается на ниспадающей части функции преобразования, чем достигается заданный диапазон измерения перемещения $\Delta X = X_{max} - X_{min} = 2$ мм. Разрешающая способность не превышает 1 мкм.

Большое значение имеет расположение рабочего участка характеристики (середина участка – точка A на рисунке 3.3) относительно экстремума функции преобразования для обеспечения минимальной дополнительной погрешности преобразования σ_D от возможного радиального смещения и поворота отражающей поверхности. Анализ распределения световых потоков показал, что дополнительная погрешность преобразования σ_D зависит от следующих конструктивных характеристик ВОП:

- распределения волокон передающего и приёмного каналов на коллекторном торце разветвлённого световода,
- соотношения размеров и расположения передающего и приёмного каналов на коллекторном торце разветвлённого световода,
- отражающих и рассеивающих свойств отражательной поверхности.

В результате проведённых практических исследований и экспериментов были определены оптимальные сочетания оговоренных выше кон-

структивных характеристик датчика, что позволило добиться абсолютной погрешности преобразования не превышающей 1 мкм.

Снятие статической характеристики датчика производится на специальном стенде (рисунок 3.4), позволяющем осуществлять перемещение измерительного наконечника датчика на заданную величину и одновременную регистрацию выходного напряжения с помощью вольтметра.



Рисунок 3.4 – Стенд для снятия статической характеристики датчика

Разработанные контактные датчики малых линейных перемещений в составе автоматизированной системы контроля параметров геометрической точности металлорежущих станков с ЧПУ прошли успешную апробацию на ОАО «Воткинский завод», ОАО «НИТИ ПРОГРЕСС» (г. Ижевск), ОАО «Луганский машиностроительный завод» (г. Луганск, Украина) [2].

Контрольные вопросы

1 Какие параметры геометрической точности могут контролироваться датчиком в соответствии с требованиями ГОСТ 8-82?

2 Какие приспособления должны использоваться при проведении испытаний?

3 Каким образом могут синхронизироваться при испытаниях съём данных с датчиков ЭВМ и работа станка с ЧПУ?

4 Опишите алгоритм калибровки датчиков малых линейных перемещений на станке.

3.2 Инструмент со встроенным ВОП для выглаживания поверхностей деталей на многоцелевых станках

Выглаживание – метод финишной обработки поверхностей прецизионных деталей. [3] Одним из факторов, ограничивающих широкое применение данного метода, является поддержание стабильной глубины внедрения инструмента в поверхностный слой и обеспечение требуемого уровня субмикро- и нанопрофиля обработанной поверхности. Технологический процесс реализуется на станках высокой точности и жесткости. Существенное влияние на управление глубиной внедрения индентора и формирование профиля поверхности при выглаживании оказывает динамика внедрения индентора в обрабатываемый материал.

На рисунке 3.5 представлена 3D-профилограмма поверхности детали из стали 20X13 (HB150) после выглаживания индентором со сферической рабочей частью из натурального алмаза с радиусом заточки 10 мм при скорости выглаживания 100 м/мин, подаче 0,08 мм/об и силе выглаживания 100 Н на токарно-фрезерном центре MULTUS B300 фирмы OKUMA.

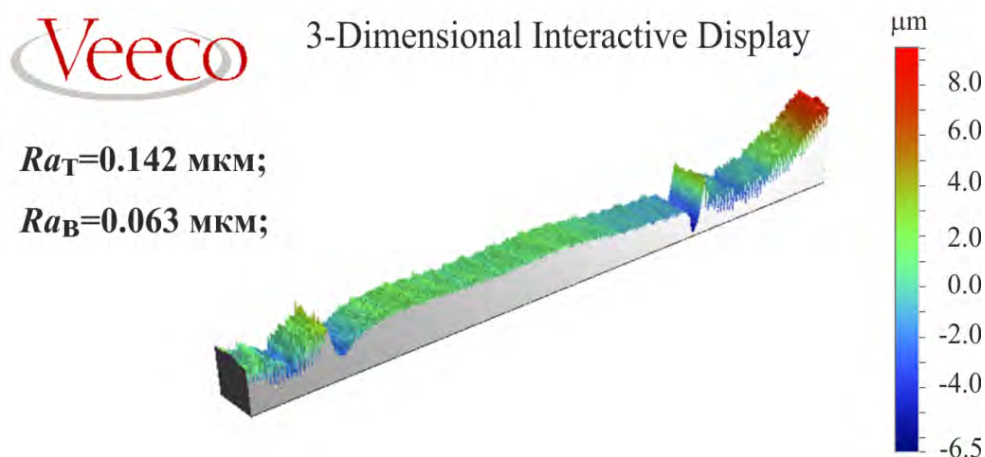


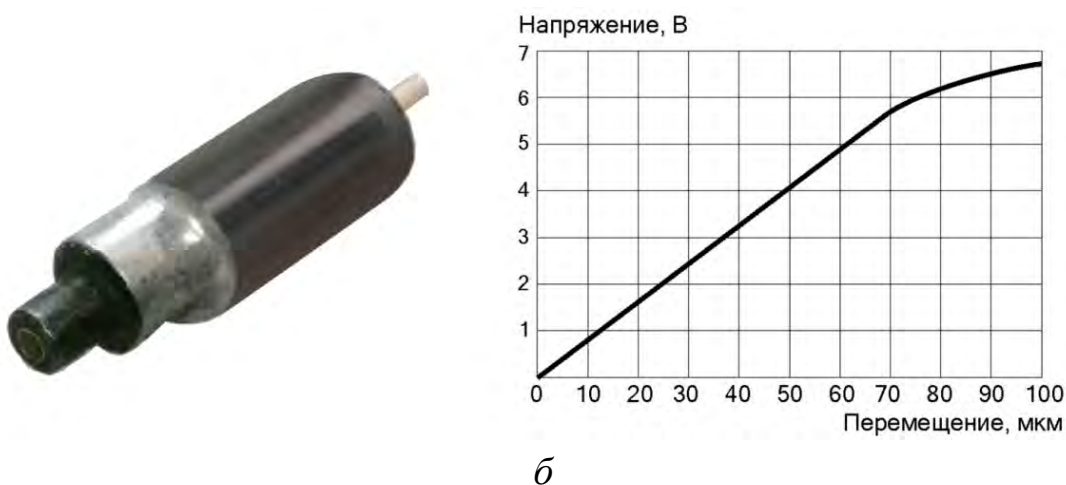
Рисунок 3.5 – 3D-профилограмма поверхности детали после выглаживания (оптический профилометр WYKO NT1100)

Управление глубиной внедрения инструмента и динамикой формирования микропрофиля поверхностей деталей возможно на основе разработки технических средств и методов, позволяющих контролировать процесс в реальных условиях.

Для решения поставленной задачи создан измерительный преобразователь линейного перемещения индентора с датчиком микроперемещений на основе встроенного ВОП, обеспечивающего диапазон измерения 0-100 мкм и абсолютную погрешность не более 0,5 мкм в частотном диапазоне 0-10 кГц.

Анализ характеристик современных преобразователей линейных перемещений показывает, что оптические датчики в отличие от емкостных и индуктивных отличаются высокой вибростойкостью, которая объясняется отсутствием в их конструкции намоточных изделий и высокоточных механических узлов. Кроме того, оптические датчики обладают повышенным быстродействием и хорошей переходной характеристикой за счет отсутствия в конструкции промежуточных инерционных элементов. Преимущества оптических датчиков перед ёмкостными и индуктивными – более широкий диапазон измерений и невосприимчивость к электромагнитным помехам.

При создании измерительного преобразователя выглаживающего инструмента за основу был взят оптоэлектронный датчик малых перемещений с внешней модуляцией. Внешний вид разработанного преобразователя представлен на рисунке 3.6 а, его статическая функция преобразования – на рисунке 3.6 б.



а) внешний вид преобразователя; б) статическая функция преобразования
Рисунок 3.6 – Оптоэлектронный преобразователь малых перемещений

Работа оптоэлектронного преобразователя, входящего в состав измерительной системы, основана на контроле светового потока, отражённого от торца индентора (рисунок 3.7).

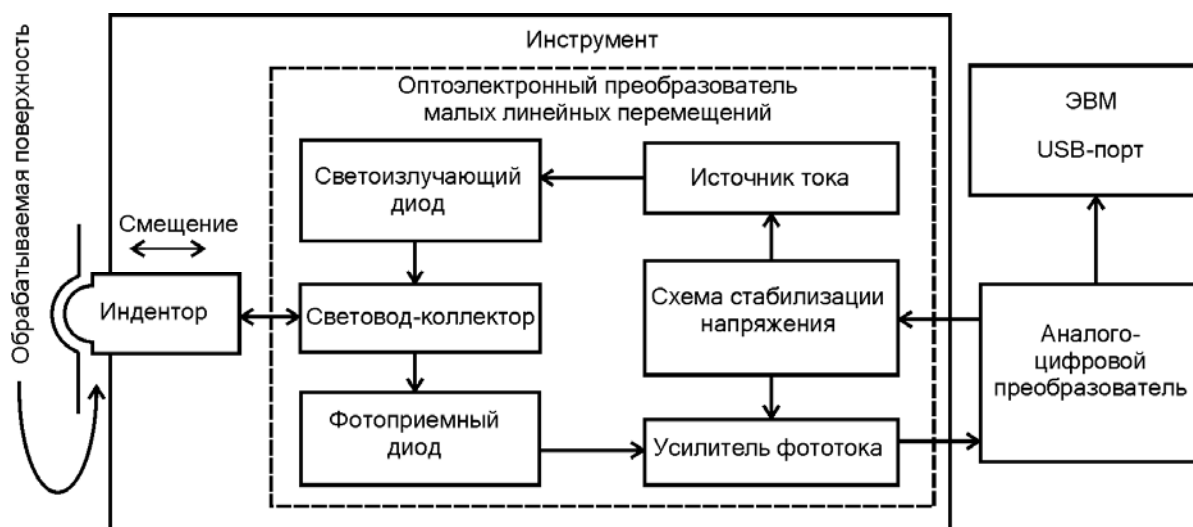


Рисунок 3.7 – Структурная схема оптоэлектронной системы контроля выглаживающего инструмента

Световой поток генерируется излучающим ИК-светодиодом с узкой диаграммой направленности излучения. Перемещение индентора модулирует амплитуду отражённого светового потока, который преобразуется фотоприёмным диодом в электрический сигнал и усиливается усилителем фототока.

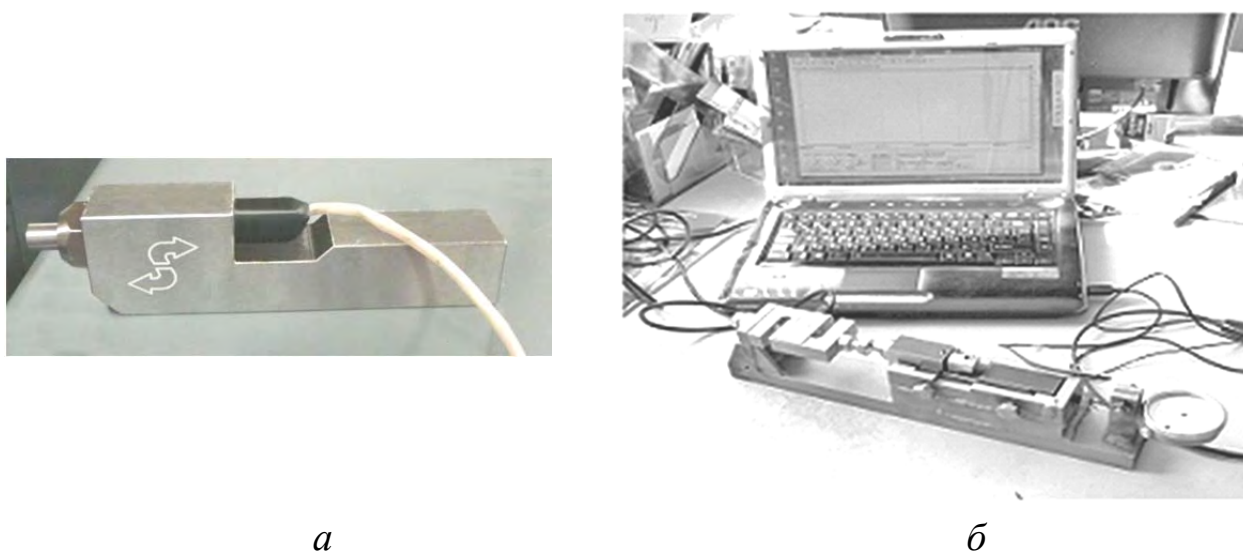
Выходной аналоговый сигнал преобразователя оцифровывается аналого-цифровым преобразователем и вводится в ЭВМ. Волоконно-оптический световод-коллектор обеспечивает значительное повышение чувствительности преобразователя и его защиту от воздействия пыли и СОТС.

Зависимость выходного сигнала измерительного преобразователя от расстояния до индентора имеет нелинейный характер (рисунок 3.6 б), который компенсируется программно при помощи УЧПУ станка.

Для обеспечения высокой точности датчика светоизлучающий диод запитывается от термокомпенсированного источника тока, а прецизионная схема стабилизации напряжения обеспечивает работу преобразователя в широком диапазоне питающих напряжений. Использование в конструкции электронных SMD-компонентов позволило реализовать преобразователь в заданных габаритах.

В диапазоне 0...100 мкм расчётное значение основной погрешности разработанного преобразователя не превышает 0,2 мкм, частотная характеристика линейна до частоты 10 кГц. Инструмент со встроенным оптоэлектронным преобразователем запатентован [4] и представлен на рисунке 3.8 а.

В качестве аналого-цифрового преобразователя применен цифровой USB-осциллограф VM8020 с соответствующим программным обеспечением, информация с осциллографа записывалась на персональный компьютер.



а) внешний вид инструмента; б) стенд для калибровки оптоэлектронного преобразователя

Рисунок 3.8 – Инструмент со встроенным оптоэлектронным преобразователем

Для снятия статической функции преобразования и калибровки волоконно-оптического преобразователя перемещений был изготовлен специальный стенд, при помощи которого к индентору инструмента прикладывалась нагрузка, соответствующая реальной силе выглаживания, и осуществлялся контроль его фактического перемещения (рисунок 3.8 б).

Производственные испытания системы были проведены при выглаживании детали, изготовленной из стали 20X13 (HB 150), индентором со сферической рабочей частью из натурального алмаза с радиусом заточки радиусом 10 мм на станке MULTUS B300 фирмы OKUMA (рисунок 3.9).

В ходе испытаний были получены осциллограммы, соответствующие действительному положению индентора в процессе выглаживания. Одна из них приведена на рисунке 3.10.

Участок осциллограммы от 0 до 2 с с уровнем выходного напряжения измерительной системы 5 В соответствует подходу индентора к обрабатываемой поверхности, после чего наблюдается вдавливание индентора в поверхность детали и всплытие, заканчивающееся на отметке времени 5 с.

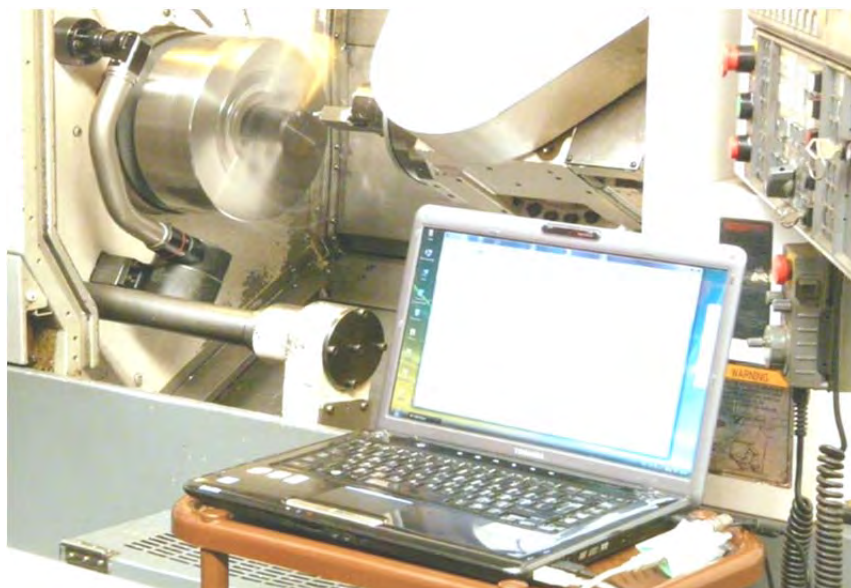


Рисунок 3.9 – Запись осциллограммы в процессе выглаживания поверхности детали на станке MULTUS B300

На отрезке времени от 5 с до 24 с глубина внедрения индентора в обрабатываемую поверхность постепенно увеличивается. Это объясняется нагревом индентора вследствие работы при поверхностном пластическом деформировании. Начиная с отметки времени 24 с наблюдается вдавливание инструмента, образовавшееся при выключении подачи и последующем отводе инструмента.

Информация, полученная с помощью инструмента со встроенным оптоэлектронным преобразователем, впервые позволила определить фактическую глубину внедрения индентора в поверхность при наноструктурирующем выглаживании конструкционных сталей. Разработанный инструмент со встроенным оптоэлектронным преобразователем может быть положен в основу адаптивных систем управления технологическим процессом выглаживания.

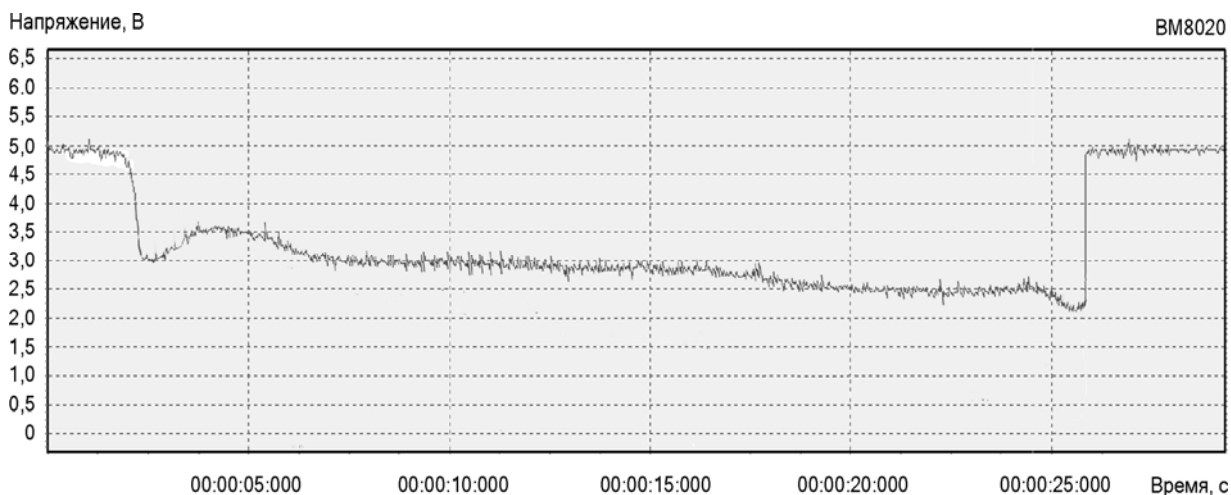


Рисунок 3.10 – Осциллограмма выходного напряжения оптоэлектронного преобразователя на мониторе ЭВМ измерительной системы

Контрольные вопросы

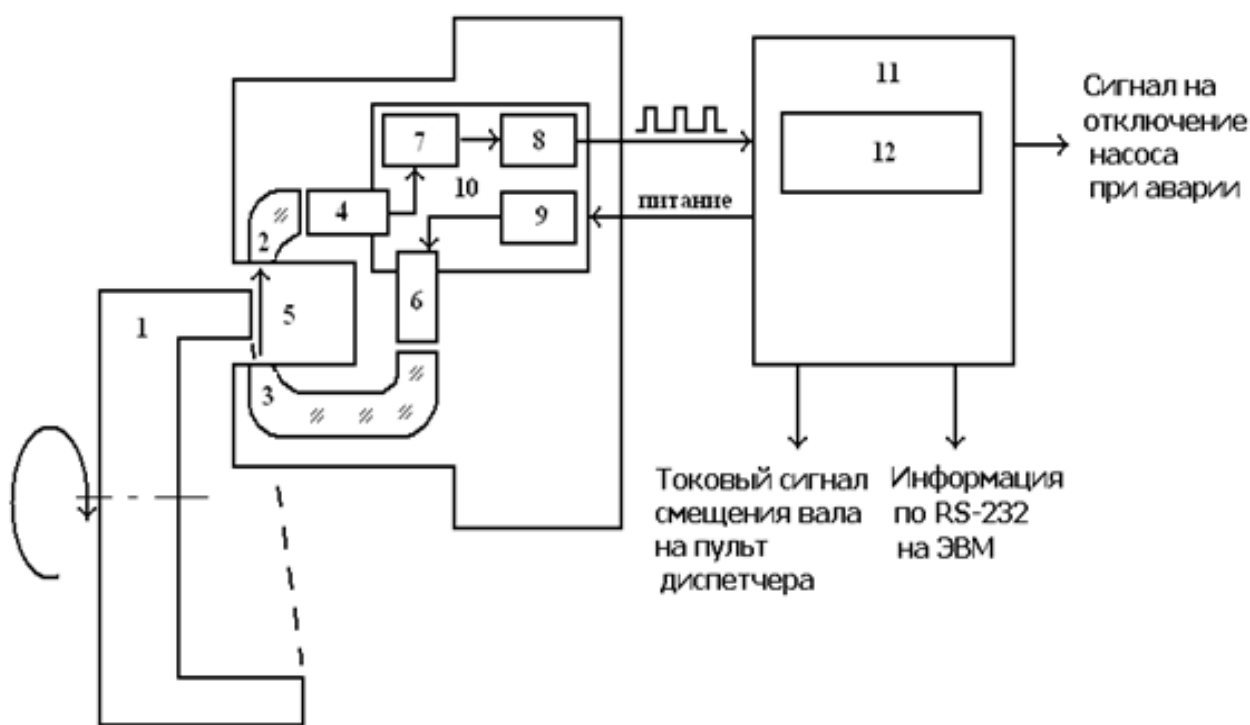
- 1 Как влияет процесс начального внедрения индентора в обрабатываемую деталь на профиль поверхности, сформированной в результате выглаживания?
- 2 Опишите порядок снятия метрологических характеристик и калибровки выглаживателя с оптоэлектронным датчиком на стенде.
- 3 Определите максимальную частоту высокочастотных составляющих сигнала, наблюдаемых на осциллограмме?
- 4 Как управлять процессом выглаживания, используя информацию с оптоэлектронного преобразователя, встроенного в вышеописанный инструмент?

3.3 Волоконно-оптический преобразователь для контроля параметров ресурса центробежного нефтяного насоса

Волоконно-оптический преобразователь обеспечивает измерение смещения пяты центробежного нефтяного насоса при эксплуатации в диапазоне 0...5 мм с дискретностью 0,1 мм, частоты вращения вала насоса в диапазоне 1000...5000 об/мин с разрешением 10 об/мин, а также количества включений-выключений и суммарное время работы насоса. Рабочий диапазон температур составляет -20...80 °С [5].

Структурная схема волоконно-оптического преобразователя представлена на рисунке 3.11 [6].

Оптоэлектронный блок волоконно-оптического преобразователя содержит в себе герметично залитую компаундом электронную плату 10, на которой выполнена схема источника тока 9 для питания ИК-светодиода 6 и схема формирователя сигнала фотоприёмника 4, состоящая из фильтра низких частот 7 и триггера Шмитта 8. Канализация оптического излучения в рабочий зазор 5 осуществляется волоконными световодами 2 и 3. При вращении модулятора 1, выполненного в виде диска с винтовым профилем, световой поток в рабочем зазоре 5 перекрывается, и на выходе оптоэлектронного блока появляются импульсы с постоянной скважностью. Значение скважности определяется величиной внедрения винтового профиля в рабочий зазор оптоэлектронного блока, что соответствует определённому осевому смещению вала насоса.



1 – модулятор в виде диска с винтовым профилем; 2 – приёмный волоконный световод; 3 – передающий волоконный световод; 4 – фотоприёмник; 5 – рабочий зазор оптического преобразователя; 6 – светодиод; 7 – фильтр низких частот; 8 – триггер Шмитта; 9 – источник тока; 10 – электронная плата; 11 – микроконтроллер; 12 – индикатор

Рисунок 3.11 – Структурная схема ВОП для контроля параметров ресурса центробежного нефтяного насоса

Благодаря использованию световодов обеспечивается высокая локализация светового потока в рабочем зазоре, за счёт чего достигается невосприимчивость датчика к внешним дестабилизирующим факторам. Сигнал с оптического преобразователя передаётся на микроконтроллер 11 с индикатором 12.

Микроконтроллер рассчитывает значение осевого смещения вала насоса с дискретностью 0,1 мм в диапазоне 0-5 мм, а при его выходе за установленные границы зажигает аварийный индикатор и формирует сигнал на аварийное отключение насоса. Также определяется частота вращения вала насоса, количество запусков-остановов, суммарное время наработки насоса.

На рисунке 3.12 показана установка ВОП на насос: на корпусе насоса закреплён кронштейн 1 с оптоэлектронным блоком 2, в щелевой зазор которого входит винтовой профиль модулятора 3, установленного на валу насоса.

Выходной сигнал с выхода оптоэлектронного блока преобразователя передаётся на микроконтроллер.

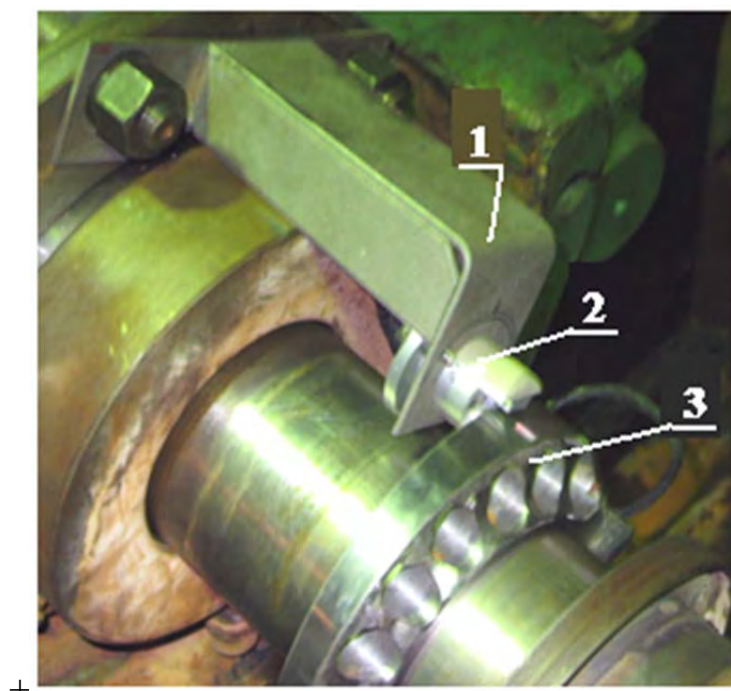


Рисунок 3.12 – Установка волоконно-оптического преобразователя на нефтяном центробежном насосе

Информация о смещении пяты насоса может быть передана на удаленный диспетчерский пульт в виде унифицированного токового сигнала 5-20 мА. Также возможна передача информации на внешнюю ЭВМ по протоколу RS-232. Микроконтроллер имеет энергонезависимую память информации о работе насоса и выполнен во взрывозащищенном исполнении.

Микроконтроллер имеет служебный режим работы, в котором возможен ввод границ порогового смещения вала насоса, калибровка оптического датчика, обнуление количества запусков-остановов, суммарного времени наработки.

Внедрение разработанной системы на ОАО «Нижневартовскнефтегаз» позволило предотвратить аварии в результате катастрофического износа пяты нефтяных насосов и получить существенное снижение затрат на ремонт и обслуживание нефтяных центробежных насосов ЦНС-180 на перекачивающих станциях.

Контрольные вопросы

- 1 Опишите алгоритм определения и расчёта микроконтроллером частоты вращения вала насоса (в об/мин).
- 2 Разработайте методику и алгоритм калибровки волоконно-оптического преобразователя.

Список литературы (раздел 3)

- 1 ГОСТ 8-82Е Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность.
- 2 Кузнецов В.П., Иванов А.А. Лушников И.Н. Система контроля точности технологического оборудования на основе волоконно-оптических преобразователей перемещений и IBM-совместимой микро-ЭВМ // Датчик-92: тез. докл. всесоюзн. конф. Гурзуф, 1992.
- 3 Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Схиртладзе А.Г. Обеспечение требуемого качества поверхностей деталей на основе управления динамической системой процесса выглаживания: учебное пособие. Курган, 2005. 85с.
- 4 Патент на полезную модель №120385. Инструмент со встроенной системой контроля выглаживания. Кузнецов В.П., Иванов А.А., Горгоц В.Г. Заявка №2012117003. Приоритет 26 апреля 2012г.

5 ГОСТ Р53675-2009. Насосы нефтяные для магистральных трубопроводов. Общие требования.

6 Патент на полезную модель № 60633. Устройство контроля осевого перемещения вала нефтяного центробежного насоса. Горгоц В.Г., Кузнецов В.П., Иванов А.А., Кораблёв А.С., Варнавский Р.О. Заявка №2006127907. Приоритет 31 июня 2006 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современный этап развития промышленного производства требует активной разработки и внедрения новых высокоэффективных средств измерения, одним из которых являются волоконно-оптические преобразователи.

Представленные в пособии теоретические и практические основы проектирования волоконно-оптических преобразователей параметров технологических объектов призваны восполнить некоторый недостаток учебной литературы в этой области. Приведены примеры практического использования волоконно-оптических преобразователей в машиностроении и нефтегазодобывающей промышленности, которые призваны способствовать лучшему пониманию достоинств и особенностей применения ВОП.

Основное внимание в пособии уделено волоконно-оптическим преобразователям с внешней модуляцией как наиболее простым и универсальным в эксплуатации. Вместе с тем преобразователи, работа которых основана на использовании источников когерентного излучения, всё активнее используются в современном высокотехнологичном производстве. Перспективным шагом является встраивание в ВОП микроконтроллерных средств, существенным образом расширяющих возможности преобразователей и улучшающих их метрологические характеристики.

В настоящее время открываются широкие перспективы и новые области промышленного внедрения автоматизированных средств измерения и контроля параметров технологических объектов на основе волоконно-оптических преобразователей благодаря существенному снижению цен на основные электронные компоненты преобразователей, а также на световоды различного типа и источники когерентного излучения.

Для глубокого освоения основ проектирования в приложениях А и Б приведены методики проектирования ВОП и задания на разработку преобразователей для измерения комплекса параметров различного технологического оборудования.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Методика проектирования ВОП

1 Техническое задание на проектирование

Основным документом на проектирование автоматизированных средств контроля на основе ВОП является техническое задание. Техническое задание (ТЗ) – это документ, определяющий исходные требования, предъявляемые к объекту разработки, а также объем, форму и сроки представления результатов работы по технической специальности, направлению или дисциплине.

В ТЗ содержатся основные данные, являющиеся исходными для расчета и проектирования. Техническое задание составляется исполнителем (студентом), согласовывается с заказчиком (руководителем) и предполагает разработку требований, предъявляемых к ВОП. Объем ТЗ зависит от сложности проектируемого ВОП, но по составу все ТЗ достаточно однородны и содержат следующие разделы:

- 1) «Назначение и комплектность»;
- 2) «Технические требования»;
- 3) «Эксплуатационные условия»;
- 4) «Требования к конструкции»;
- 5) «Требования по надежности»;
- 6) «Требования к технической документации».

В разделе «Назначение и комплектность» формируются общие требования к разрабатываемому средству измерения (ВОП): дается название, определяется его место в структурной схеме прибора, описываются условия работы и взаимодействие с объектом измерения и последующими устройствами, использующими получаемую ВОП информацию от объекта измерения. Перечисляются те устройства, которые должны быть рассчитаны или выбраны для работы в комплекте с ВОП. Этот раздел дает общее представление о разрабатываемом ВОП.

Раздел «Технические требования» содержит требования о технической сущности ВОП. В этом разделе дается полная характеристика измеряемой величины. Характеристика задается в виде требований к диапазо-

ну (пределам) измерения ВОП и к частотному диапазону. Диапазон измерений может быть симметричным, когда измеряемая величина является знакопеременной, и несимметричным. При несимметричном диапазоне измерения минимальное и максимальное значения измеряемой величины не равны абсолютному значению. Пределы измерения назначаются в соответствии с рядами предпочтительных номиналов.

Частотный диапазон средства измерения (ВОП) отражает его способность к восприятию изменения измеряемой величины. Чаще всего требования к частотному диапазону формируются применительно к синусоидальной форме изменения измеряемого параметра в виде значений нижней и верхней граничных частот. Если нижняя граничная частота равна нулю, то ВОП называется статико-динамическим, т.е. способным измерять как постоянную составляющую входной величины, так и переменную. Если нижняя граничная частота не равна нулю, то ВОП называется динамическим, т.е. измеряющим только переменную составляющую входной величины. В тех случаях, когда необходимы измерения скачкообразно изменяющихся параметров и характеристик процессов, требования к частотным свойствам ВОП могут быть заданы в виде допустимой скорости изменения измеряемой величины.

Для некоторых параметров, таких как давление или сила, требования к амплитудному и частотному диапазонам работы ВОП определяют и требования к мощности измеряемой величины. Но для большинства параметров (перемещение, ускорение, температура, расход и т.д.) этих требований недостаточно, и поэтому должна быть задана величина, характеризующая мощность объекта измерения, или характеристика, позволяющая вычислить эту мощность. Например, для ВОП перемещения такой характеристикой может быть допустимое контактное усилие, для ВОП ускорения – его допустимая масса.

В разделе дается также полная характеристика выходной величины: тип выходного сигнала, его номинальное значение и мощность. В качестве, например, электрического выходного сигнала используются напряжение, ток, относительное изменение сопротивления или частоты измерительной цепи ВОП. Номинальное значение выходных сигналов устанавливается соответствующим рядом предпочтительных чисел или – при большой мощности выходного сигнала – нормализованным значением.

В качестве характеристики мощности обычно дается требование к значению сопротивления нагрузки.

Требования к точности разрабатываемого ВОП, как правило, формулируются в виде требований к основной и дополнительной погрешностям ВОП. В некоторых случаях даются требования к отдельным составляющим основной погрешности: нелинейности, дискретности и т.п.

В этом же разделе приводятся данные, характеризующие источник питания: значения и частота напряжения или тока питания, допустимые пределы отклонения значений напряжения и частоты питания, значение и допустимые пределы изменения входного сопротивления ВОП.

В разделе «Эксплуатационные условия (требования)» описываются условия эксплуатации ВОП. Это, в первую очередь, параметры и характеристики окружающей среды: температура, влажность, давление, значения параметров электрических и магнитных полей и т.п. Точное значение параметров окружающей среды позволяет оптимально подойти к выбору материалов измерительных преобразователей ВОП и наиболее точно определить его функцию преобразования. Поэтому в этом разделе приводятся не только пределы изменения параметров окружающей среды, но и значения скорости их изменения, время воздействия того или иного параметра. Исчерпывающей характеристикой воздействия на ВОП окружающей среды является закон распределения параметров.

Важными являются требования по устойчивости ВОП к различным механическим воздействиям: вибрациям, ускорениям, ударам. Часто эти воздействия являются очень значительными и поэтому должны быть правильно сформулированы. Если задан частотный диапазон вибраций, то обязательно должны быть задана амплитуда вибраций в единицах перегрузок для высоких частот и в единицах перемещений для низких частот, задано время воздействия вибраций и закон распределения частоты и амплитуды вибрации.

В этом же разделе могут быть сформулированы и другие требования, характеризующие условия работы ВОП.

В разделе «Требования к конструкции» предусматривают обеспечение допустимых или минимальных габаритных размеров и массы, оговаривается использование стандартных и серийно выпускаемых элементов и комплектующих изделий. Очень часто в этом разделе задаются требования по установке ВОП на объекте измерения, по стыковке ВОП с после-

дующим звеном в тракте преобразования информации, о соединительных линиях и т.д.

В разделе «Требования по надежности» устанавливается значение вероятности безотказной работы, время непрерывной работы ВОП, сроки хранения, число циклов работы и другие параметры ВОП, характеризующие его надежность.

В разделе «Требования к технической документации» должен быть представлен перечень графического материала и раскрыто содержание расчетно-пояснительной записки.

В ТЗ могут включаться и другие разделы, характеризующие специфику ВОП и дополняющие его характеристику.

Следует заметить, что требования всех пунктов ТЗ должны найти свое отражение в материалах курсового проекта.

Разработка ТЗ на проектирование является одним из наиболее ответственных этапов проектирования. ТЗ должно выглядеть, безотносительно к конкретному проекту, примерно таким образом:

НАЗНАЧЕНИЕ И КОМПЛЕКТНОСТЬ

1 Средство измерения (ВОП) предназначено для измерения значений (подробное указание неэлектрической величины) и выдачи электрического сигнала на вход (указать, на вход какого устройства – ИИС, АСУ, САК и т.п.).

2 В комплект средства измерения (ВОП) должны входить: перечисляются серийные изделия и преобразователи, например, стабилизированный источник питания, преобразователь с унифицированным выходным сигналом, усилитель, соединительный кабель и т.д.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

3 Пределы измерения измеряемой величины.

4 Характер измерения измеряемой величины во времени.

5 Требования к выходной величине (ток, напряжение, частота) и, если необходимо, диапазон изменения измеряемой величины.

6 Частотный диапазон средства измерения (ВОП).

7 Основная и дополнительная погрешности.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ

8 Средство измерения (преобразователь) должен питаться от источника напряжения (тока) с напряжением ... В, частотой ... Гц.

9 Значение питающего напряжения может изменяться в пределах от + ... до -

10 Частота питающего напряжения может изменяться в пределах ...

11 Температура окружающей среды может изменяться в пределах от ... до ... °С со скоростью не более град/мин.

12 Предельно допустимое время непрерывной работы при нормальной температуре окружающей среды не менее ... часов, при максимальной температуре не менее ... часов (минут).

13 Вибрация и тряска ВОП происходят с ускорением до ... м/с² в диапазоне частот ... Гц.

14 Давление окружающей среды изменяется в пределах от ... до ... Па.

15 Относительная влажность окружающей среды при температуре ... °С составляет ... %.

16 Возможно попадание на ВОП осадков в виде дождя, снега, брызг воды (или агрессивных жидкостей).

ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

17 Допустимые габаритные размеры и масса ВОП.

18 Конструктивное выполнение способа крепления ВОП к объекту измерения.

19 Конструктивное выполнение электрических соединений ВОП с источником питания и выходным устройством.

20 Конструктивные требования по обеспечению работоспособности ВОП в условиях подп. 11-16.

ТРЕБОВАНИЯ ПО НАДЕЖНОСТИ

21 Вероятность безотказной работы должна быть не менее

22 Число циклов работы должно быть не менее

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

23 Содержание технической документации, представляемой в результате проведенной разработки (пояснительная записка, чертежи).

Для большей наглядности ниже приведен пример составления ТЗ.

ПРИМЕР

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

НАЗНАЧЕНИЕ И КОМПЛЕКТНОСТЬ

1 ВОП давления предназначен для измерения динамических давлений жидкостей и газов в мощных энергетических установках и агрегатах и

выдачи электрического сигнала, пропорционального давлению, на вход автоматизированного контроля.

2 В комплект с ВОП должны входить нормирующий преобразователь с унифицированным выходным сигналом – постоянный ток (0 – 4) мА, стабилизированный источник напряжения питания, соединительный кабель.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

3 Пределы измерения: (1; 1,5; 4; 6; 10) 105 Па.

4 Частотный диапазон измерения ВОП до 500 Гц.

5 Основная погрешность составляет 1,5%, дополнительная погрешность – 2,5%.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ

6 ВОП должен питаться от источника переменного тока напряжением 25 В с частотой 10 кГц.

7 Значение питающего напряжения в процессе измерения может изменяться не более чем на 0,1 В.

8 Температура окружающей среды (воздуха) может измениться в пределах от 15 °С до 45 °С со скоростью 1 °С/с.

9 Измеряемая среда – агрессивные и неагрессивные газы и жидкости. Температура измеряемой среды от 100 °С до +200 °С. Скорость изменения температуры измеряемой среды до 20 °С/с (термоудары).

10 Относительная влажность воздуха окружающей среды до 95% при температуре 40 °С.

11 Время непрерывной работы ВОП при температуре измеряемой среды +50 ÷ 200 °С не менее 2 часов.

ТРЕБОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИИ

12 ВОП должен иметь минимальные габариты и массу.

13 Подсоединение ВОП к объекту должно с помощью резьбового соединения М18 х 1,5.

Для съема сигнала и подачи напряжения на ВОП должен быть установлен разъем типа 2РМГ.

14 Обеспечение заданного предела должно осуществляться в пределах единого конструктивного оформления ВОП с максимально возможной унификацией деталей и размеров.

ТРЕБОВАНИЯ ПО НАДЕЖНОСТИ

15 Число циклов работы должно быть не менее 104.

16 Вероятность безотказной работы не менее 0,95.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

17 Пояснительная записка.

18 Плакаты.

19 Чертежи.

2 Этапы проектирования

Приведенные ниже материалы показывают этапы полного проектирования технических средств. Проект в силу ограниченности объема затрагивает не все рассмотренные моменты. Однако для получения общего представления есть смысл привести все этапы подробнее.

Разработка новых средств измерений (ВОП) состоит из двух основных этапов – научно-исследовательского (НИР) и опытно-конструкторского (ОКР).

На этапе НИР производится расчетная и исследовательская проработка всех вопросов, решение которых позволяет составить представление об общем облике разрабатываемого средства измерения (ВОП). В результате НИР составляется научно-исследовательский отчет, в котором излагаются результаты проведенных исследований, рассматриваются принципы построения ВОП и возможности его технической реализации.

ОКР является инженерным воплощением результатов НИР в виде принципиальной и конструктивной схем ВОП. Результаты этой части разработки составляют содержание основного инженерного решения. Конечными результатами ОКР являются теоретические, экспериментальные и расчетные исследования, конструкторско-технологическая проработка и технико-экономическая оценка ВОП. Этап заканчивается выпуском полного комплекта технической документации на средство измерения (ВОП), изготовлением и испытанием опытного образца.

Основные определения изложены в ГОСТ 7.103-68. НИР включает стадии разработки технического задания и технического отчета, а ОКР – ТЗ, техническое предложение, техническое и рабочее проектирование.

Вопросы разработки ТЗ достаточно подробно рассматривались выше. Можно отметить, что качество разработки ТЗ определяет качество будущего устройства, затраты на его проектирование, изготовление и эксплуатацию, жизнеспособность устройства.

Надо стремиться к тому, чтобы параметры устройства были заданы оптимально и полно, чтобы удовлетворение заданных характеристик могло обеспечиваться наиболее простыми, доступными и перспективными средствами.

Техническое предложение – это совокупность конструкторских документов, содержащих технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки ВОП и различные варианты возможных решений, сравнительную оценку решений с учетом технических, конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого ВОП и уже существующих, в том числе и зарубежных. На этой стадии разрабатываются объективные критерии оценки устройства ВОП, приводится обзор литературных (и патентных) материалов.

Основным конструкторским документом стадии разработки технического предложения является расчетно-пояснительная записка, включающая:

- 1) обзор методов и принципов построения ВОП;
- 2) анализ существующих ВОП и выбор вариантов возможных решений;
- 3) технико-экономическое обоснование целесообразности разработки данного типа ВОП.

Третья стадия проектирования – разработка эскизного проекта (ЭП). Эскизный проект – это совокупность конструкторских документов, содержащих принципиальные схемы, основные конструкторские решения, а также данные, определяющие назначение, параметры и габаритные размеры. При разработке ЭП производится расчет основных параметров и характеристик устройства, осуществляется изготовление макетов устройства, экспериментальное исследование характеристик, не подлежащих расчету, и экспериментальная проверка основных расчетных данных. Успешное проведение эксперимента во многом определяется программой и методикой испытаний.

При выполнении эскизного проекта должны быть разработаны следующие основные конструкторские документы:

- 1) расчетно-пояснительная записка, в которую включается расчет основных параметров и характеристик устройства;
- 2) чертеж общего вида;
- 3) принципиальная электрическая схема;

4) программа и протокол испытаний макета.

В расчетно-пояснительной записке определяется объем и производится сам расчет. Результаты расчета приводятся в виде таблиц, графиков, номограмм. Производится анализ расчетных данных и выбор оптимальных соотношений между параметрами и характеристиками ВОП.

Чертеж общего вида ВОП – это изображение конструкции изделия, дающее представление о взаимодействии его составных частей и принцип работы.

Принципиальная электрическая схема отражает все электрические связи между элементами ВОП.

Эскизный проект после согласования, а часто после защиты подлежит утверждению в установленном порядке и является основанием для разработки технического проекта или рабочей конструкторской документации.

Технический проект – совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения и дающих полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, а также исходные данные для создания рабочей документации. На этой стадии производится разработка проектов технических условий (ТУ), технического описания (ТО), комплекта рабочих чертежей. Утвержденный технический проект служит основанием для создания рабочей документации опытного образца.

Рабочий проект является завершающей стадией процесса конструирования. При этом производится разработка конструкторских документов опытного образца, его изготовление и приемочные испытания. Опытные образцы изготавливаются в небольшом количестве. В ходе приемочных испытаний, проводимых по соответствующей программе, проверяют соответствие изделий требованиям ТЗ и правильность оформления технической документации. Производится утверждение ТУ и ТЗ, разработка технологической оснастки и технологического процесса.

Далее на стадии рабочего проекта идет изготовление установочной серии устройства, назначением которой является полная проверка технологической оснастки и технологического процесса.

После изготовления и испытания установочной серии всю конструкторскую документацию корректируют (по результатам испытаний) и принимают решение об окончании освоения продукции.

Проектирование средств измерений (ВОП), включая рассмотренные выше этапы, заканчивается разработкой комплекта конструкторской документации, пригодной для организации промышленного изготовления средств измерений с заданными характеристиками. В стране принята Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Ниже приведены полезные сведения, дающие представление об ЕСКД.

Виды изделий. В соответствии с ЕСКД (ГОСТ 7.101-68) изделием называют любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии. В зависимости от назначения они делятся на изделия основного производства и изделия вспомогательного производства. К изделиям основного производства относятся изделия, предназначенные для поставки (реализации). К изделиям вспомогательного производства относятся изделия, предназначенные для собственных нужд предприятия, изготавливающего его.

Средства измерений как предметы производства относятся к изделиям основного производства. По ЕСКД (ГОСТ 2.101-68) устанавливаются следующие виды изделий: детали, сборочные единицы, комплексы и комплекты.

Деталью является изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций; это также изделия, подвергнутые покрытиям независимо от вида, толщины и назначения покрытия или изготовленные с применением местной сварки, пайки, склеивания и т.п. из одного куска материала.

Сборочная единица – изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями (свинчивание, клепка, пайка, сварка и т.д.).

Комплекс – два и более специфицированных изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенные для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций (например, информационно-измерительная система).

Комплект – два или более изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющие набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например, комплект запасных частей, измерительный прибор с кабелями, штепсельными разъемами, предохранители и т.п.

Виды конструкторской документации. Согласно ГОСТ 2.102-68 ЕСКД к конструкторским документам относятся графические и текстовые документы, которые в отдельности или в совокупности определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки или изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонтов.

Документы разделяются на виды: чертеж детали, сборочный чертеж, чертеж общего вида, габаритный чертеж, монтажный чертеж, схемы, спецификация, ведомость ссылочных документов, ведомость покупных изделий, ведомость технического предложения, ведомости эскизного и технического проектов, пояснительная записка, технические условия, программа и методика испытаний, расчет, ремонтные документы, патентный формуляр, карта технического уровня и качества изделия и др. При выполнении чертежей, например, ВОП, следует руководствоваться ГОСТ 2.109-73 (Основные требования к чертежам), ГОСТ 2.119-73 (Эскизный проект) и ГОСТ 2.120-73 (Технический проект). Чертеж общего вида эскизного и технического проекта в общем случае должен содержать:

а) изображения изделия (виды, разрезы, сечения), текстовую часть и надписи, необходимые для понимания конструктивного устройства изделия, взаимодействия его составных частей и принципа работы изделия;

б) наименования, а также обозначения (если они имеются) тех составных частей изделия, для которых необходимо указать данные (технические характеристики, указания о материале и т.п.) или запись которых необходима для пояснений изображений чертежа общего вида, описания принципа работы изделия и др.).

в) размеры и другие наносимые на изображения данные (при необходимости);

г) схемы, которые оформлять отдельным чертежом нецелесообразно;

д) технические характеристики изделия, если это необходимо для удобства чтения чертежа.

Изображения общего вида изделия выполняют с максимальными упрощениями, предусмотренными стандартами ЕСКД для рабочих чертежей (ГОСТ 2.109-73).

Схемная документация. В соответствии с ГОСТ 2.701-84 ЕСКД применяются следующие виды схем: электрическая – Э, гидравлическая – Г, пневматическая – П, кинематическая – К, комбинированная – С. Каждая из указанных схем может быть выполнена в виде: структурной – 1 (ин-

декс), функциональной – 2, принципиальной – 3, соединений – 4, подключений – 5, общей – 6, расположения – 7. Например, схема электрическая принципиальная обозначается как ЭЗ.

Структурная схема, изображаемая в виде комбинации прямоугольников, определяет состав изделия, его функциональные части, назначение и взаимосвязи.

Функциональная схема поясняет принципы функционирования составных частей и изделия в целом.

Принципиальная схема включает полный состав элементов изделия, отражает связи между ними и дает полное представление о работе изделия или системы. Изображение элементов на принципиальных схемах оговорено в ГОСТ 2.747-68, ГОСТ 7.730-73, ГОСТ 7.728-74 и др.

Схема соединений содержит соединения составных частей изделия и определяет провода, жгуты и кабели, посредством которых выполняются эти соединения.

Внешние подключения изделия изображаются на схеме подключений.

Общая схема изображает составные части комплекса и их соединение между собой в месте эксплуатации.

Схема расположения изображает взаимное расположение отдельных частей комплекса в эксплуатации.

Работа над проектом должна проводиться в соответствии с содержанием этапов проектирования и включает следующие стадии: техническое задание, техническое предложение и эскизный проект.

Техническое задание (ТЗ), составленное студентами с учетом предположенных выше рекомендаций, может в дальнейшем уточняться и дополняться. Так, когда ВОП для измерения неэлектрической величины уже выбран конкретно, можно уточнить характер распределения параметров, описывающих условия эксплуатации. Можно выбрать тот или иной закон распределения температуры, влажности, вибрации, продолжительности работы ВОП и т.п. ТЗ может быть уточнено по параметрам источника питания ВОП (постоянное, переменное напряжение, его стабильность, частота), характеристикам соединительных линий, габаритным размерам. На стадии работы с ТЗ должны быть сформулированы основные направления разработки, отмечены вопросы, требующие детального изучения и рассмотрения.

При разработке технического предложения необходимо не только учитывать технические, эксплуатационные и конструктивные характеристики существующих преобразователей и ВОП, но и метод преобразования физической неэлектрической величины в электрическую, заложенный в этих ВОП. В результате анализа методов преобразования должны быть сделаны выводы и предложения о распространении метода для построения тех или иных ВОП, о достоинствах и недостатках, о возможности использования предложений в разрабатываемом ВОП.

Основное внимание на данном этапе должно быть уделено поиску и изучению источников технической информации, в том числе и через интернет, в которых дается информация о средствах измерения (ВОП), наиболее близких по сущности к разрабатываемому объекту. При подборе материалов следует, в первую очередь, учитывать метод преобразования, тип измеряемого параметра, пределы измерений, точность, условия эксплуатации, габаритные и весовые характеристики. По этим характеристикам выбирается прототип и определяется объем дальнейших работ для уточнения характеристик прототипа. Работая с источниками технической информации, следует иметь в виду не только сбор данных по конкретным типам средств измерений (ВОП) и их характеристик, но и по расчету, конструированию, объектной оценке характеристики конструкции ВОП.

В результате выполнения технического предложения должны быть описаны широко применяемые для разрабатываемого типа ВОП методы преобразования, наиболее распространенные и оригинальные конструкции ВОП, основные их характеристики; проведен сравнительный анализ параметров и характеристик этих ВОП, выбран метод преобразования и прототип. Разработана структурная схема ВОП, указаны достоинства и недостатки выбранной схемы. В результате сравнительного анализа параметров и характеристик существующих ВОП должен быть сделан вывод о технико-экономической целесообразности разработки ВОП.

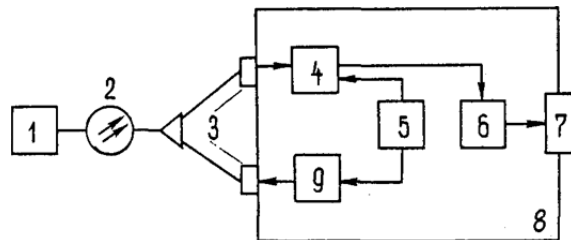
Успешная разработка технического предложения создает необходимые предпосылки для разработки эскизного проекта, составляющего основу проекта.

Тематика заданий на проектирование волоконно-оптических преобразователей параметров технологических объектов

1 Разработать ВОП для измерения переменного давления в условиях повышенной температуры.

На основе предлагаемой структуры ВОП (рисунок Б.1) необходимо обеспечить измерение переменного давления газов в цилиндрах двигателей при температуре до 500 °С. Принцип действия ВОП должен быть основан на отражении света от модулятора в виде кремниевой или никелевой мембраны при изменении ее положения под действием давления газов. При этом меняется количество света, поступающего в волоконно-оптический кабель.

Система должна работать в широком температурном диапазоне, иметь гальваническую развязку датчика с последующей аппаратурой, малые габариты преобразователя.



1 – модулятор - преобразователь давления; 2 – высокотемпературный защищенный двухволоконный оптический модуль; 3 – оптические разъемные соединители; 4 – фотоприёмник; 5 – импульсный генератор; 6 – усилитель; 7 – электрический соединитель; 8 – оптоэлектронный блок; 9 – источник излучения

Рисунок Б.1 – Структурная схема ВОП для измерения давления газов в цилиндрах двигателей

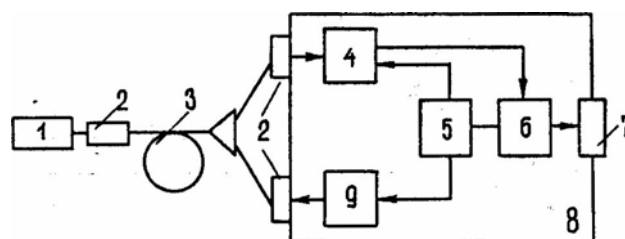
Технические характеристики

Уровни выходного аналогового электрического сигнала оптоэлектронного блока, В	±5
Диапазоны измеряемых давлений, атм.....	0...50,0...500
Погрешность измерения давлений, %, не более	1
Диапазон рабочих частот, Гц	1...500
Напряжение питания, В	~220

Ток потребления, А, не более	0,2
Габариты, не более, мм	
модулятора-преобразователя давления	10x15
оптоэлектронного блока	160x100x50
Длина высокотемпературного оптоволоконного блока, м	3...5
Масса, не более, кг	
модулятора-преобразователя давления	0,1
оптоволоконного модуля	2...4
оптоэлектронного блока	0,8
Диапазон рабочих температур, °С	
ВОП в целом	-60...+85
модулятора, не более.....	+500

2 Разработать ВОП для измерения уровня жидкости в открытых и закрытых резервуарах для эксплуатации во взрывоопасных помещениях.

На основе предлагаемой структуры ВОП (рисунок Б.2) необходимо обеспечить измерения уровня жидкости в открытых и закрытых резервуарах при контакте с оптическим чувствительным элементом.



1 – модулятор - чувствительный элемент уровня жидкости; 2 – оптические разъемные соединители; 3 – оптоволоконный модуль; 4 – фотоприёмник; 5 – импульсный генератор; 6 – усилитель; 7 – электрический соединитель; 8 – оптоэлектронный блок; 9 – источник излучения

Рисунок Б.2 – Структурная схема ВОП для измерения уровня жидкости в открытых и закрытых резервуарах

При соприкосновении чувствительного элемента с жидкостью происходит нарушение условия полного внутреннего отражения. Световой поток частично высвечивается в жидкость, что приводит к уменьшению коэффициента преобразования. Система должна работать в широком тем-

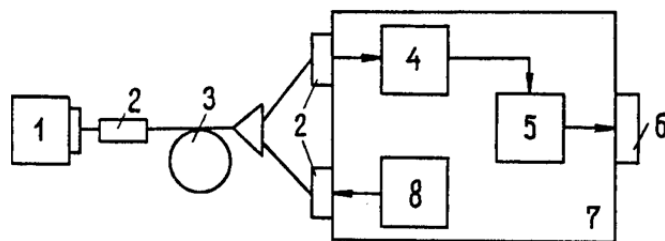
пературном диапазоне, иметь гальваническую развязку датчика с последующей аппаратурой, малые габариты преобразователя.

Технические характеристики

Уровни выходного сигнала оптоэлектронного блока, В.	0...10
Контролируемые жидкости.....	вода, спирт, бензин
Погрешность измерения, мм.....	±2
Напряжение питания, В.....	±15
Ток потребления, А, не более.....	0,2
Диаметр модулятора – чувствительного элемента уровня жидкости, мм.....	5
Габариты оптоэлектронного блока, не более, мм.....	160x100x50
Масса, не более, кг	
модулятора-чувствительного элемента.....	0,005
оптоэлектронного блока.....	0,65
Диапазон рабочих температур, °С.....	
модулятора-чувствительного элемента.....	–30...+40
оптоэлектронного блока.....	+5...+40

3 Разработать и выполнить расчеты ВОП для измерения ускорения.

На основе предлагаемой схемы ВОП (рисунок Б.3) необходимо обеспечить измерение постоянных и импульсных ускорений узлов и устройств механических систем; ударных волн в твердых и жидких средах в широком диапазоне амплитуд и частот, а также передачу информации по световодному кабелю.



1 – модулятор для преобразования ускорения; 2 – разъемные световодные соединители; 3 – оптоволоконный модуль; 4 – фотоприёмник; 5 – электронный преобразователь; 6 – электрический разъемный соединитель; 7 – оптоэлектронный блок; 8 – источник излучения

Рисунок Б. 3 – Структурная схема ВОП для измерения ускорения

Принцип измерения должен быть основан на использовании пьезооптического эффекта (фотоупругости). Параметры оптического излучения, проходящего через пьезооптический преобразователь, должны быть преобразованы в стандартный электрический сигнал.

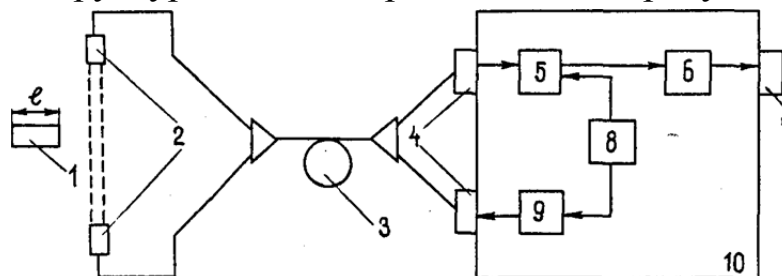
Оптоволоконная система ВОП должна быть устойчива к воздействию сильных электрических полей (постоянных и импульсных) и пригодна для эксплуатации в пожаро- и взрывоопасных помещениях.

Технические характеристики

Пределы измерения, м/с^2	1...100
Полоса пропускания частот, Гц.....	0...1000
Основная погрешность, %	2
Поперечная чувствительность, %, не более	3
Длина оптоволоконного модуля, м, не более	300
Температура окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$	-50...+50
Габариты, не более, мм	
модулятора.....	20x10
оптоэлектронного блока.....	25x140x160
Масса, не более, кг	
модулятора.....	0,02
оптоэлектронного блока.....	0,65

4 Разработать оптоволоконную систему измерения положения непрозрачного объекта.

Система должна обеспечивать измерение положения непрозрачного объекта. Принцип действия ВОП основан на прерывании коллимированного светового потока, проходящего между излучающим и приемным световодами. Рекомендуемая структура системы представлена на рисунке Б.4.



1 – непрозрачный контролируемый объект; 2 – коллиматоры; 3 – оптоволоконный модуль; 4 – оптические разъемные соединители; 5 – фотоприёмник; 6 – усилитель; 7 – электрический соединитель; 8 – импульсный генератор; 9 – источник излучения; 10 – оптоэлектронный блок

Рисунок Б.4 – Структурная схема ВОП для измерения положения непрозрачного объекта

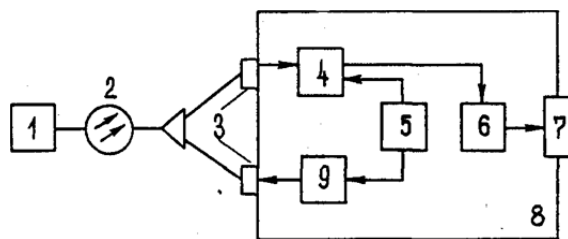
Система должна иметь высокую помехозащищенность и допускать расположение датчика на значительном расстоянии от аппаратуры контроля.

Технические характеристики

Уровень выходного сигнала оптоэлектронного блока, В..	0...10
Минимальный размер контролируемого объекта, мм	1,5
Расстояние между коллиматорами, м, не более	2
Напряжение питания, В.....	15
Ток потребления, А, не более	0,2
Диаметр коллиматоров, мм.....	5
Габариты оптоэлектронного блока, мм, не более	100x50x40
Масса, не более, кг	
коллиматора.....	0,02
оптоэлектронного блока.....	0,65
Диапазон рабочих температур, °С	
коллиматоров	-30...+40
оптоэлектронного блока.....	+5...+40

5 Разработать ВОП для измерения амплитуды и частоты виброускорения механизмов и узлов насосного оборудования нефтеперекачивающих станций.

Действие преобразователя основано на изменении отражения света от модулятора – мембраны, перемещающейся относительно торцев оптического волокна под действием инерционных сил закрепленного на ней массивного элемента. Рекомендуемая структура системы приведена на рисунке Б.5.



1 – модулятор виброускорения; 2 – двухволоконный оптический модуль; 3 – оптические разъёмные соединители; 4 – фотоприёмник; 5 – импульсный генератор; 6 – усилитель; 7 – электрический соединитель; 8 – оптоэлектронный блок; 9 – передающий оптический модуль

Рисунок Б.5 – Структурная схема ВОП для измерения амплитуды и частоты виброускорения механизмов и узлов

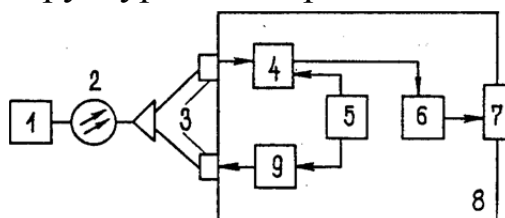
Система должна иметь высокую помехозащищенность, низкий уровень собственных шумов, гальваническую развязку датчика с последующей аппаратурой.

Технические характеристики

Уровни выходного сигнала оптоэлектронного блока, В..	± 5
Предел измеряемых виброускорений, м/с^2	1,10,100,1000
Погрешность измерения виброускорения, %, не более..	1
Диапазон частот, Гц.....	1...5000
Напряжение питания, В.....	~ 220
Ток потребления, А, не более	0,2
Габариты, не более, мм	
модулятора-преобразователя	35x40
оптоэлектронного блока.....	160x100x40
Длина оптоволоконного модуля, м	7,5...30
Масса, не более, кг	
модулятора-преобразователя	0,7
оптоволоконного модуля.....	1,2...4,4
оптоэлектронного блока.....	0,65
Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	$-60...+85$

6 Разработать ВОП для бесконтактного измерения амплитуды и частоты вибраций механизмов и узлов механических систем во взрыво- и пожароопасных условиях.

Действие преобразователя основано на отражении света от вибрирующей поверхности модулятора, связанного с исследуемым механизмом или узлом. ВОП виброперемещения должен обладать высокой помехозащищенностью и иметь гальваническую развязку с последующей аппаратурой. Рекомендуемая структура ВОП представлена на рисунке Б.6



1 – модулятор виброперемещения; 2 – двухволоконный оптический модуль; 3 – оптические разъемные соединители; 4 – фотоприёмник; 5 – импульсный генератор; 6 – усилитель; 7 – электрический соединитель; 8 – оптоэлектронный блок; 9 – источник излучения

Рисунок Б.6 – Структурная схема ВОП для бесконтактного измерения амплитуды и частоты вибраций

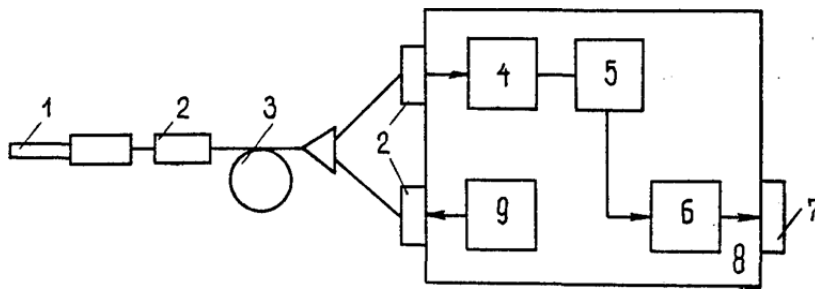
Технические характеристики

Уровни выходного аналогового электрического сигнала оптоэлектронного блока, В	±5
Материал контролируемого объекта.....	металл, дерево, керамика, бумага и др.
Пределы измеряемых виброперемещений, мкм.....	50...150
Погрешность измерения, %, не более	1
Диапазон частот виброперемещений, Гц.....	1...20000
Напряжение питания, В.....	~220
Ток потребления, А, не более	0,2
Габариты, не более, мм	
модулятора-преобразователя	15x330
оптоэлектронного блока.....	160x100x50
Длина оптоволоконного модуля, м	7,5...30
Масса, не более, кг	
модулятора-преобразователя виброперемещения....	0,05
оптоволоконного модуля.....	1,2...4,4
оптоэлектронного блока.....	0,65
Диапазон рабочих температур, °С	-60...+85

7 Разработать ВОП для измерения температуры газов и жидкостей.

Принцип работы должен быть основан на изменении оптических свойств световодного чувствительного элемента в зависимости от температуры. Модулированное оптическое излучение должно восприниматься фотоприемником и преобразовываться в стандартный электрический сигнал. Рекомендуемая структура ВОП приведена на рисунке Б.7.

ВОП должен быть нечувствителен к воздействию сильных электрических и магнитных полей и пригоден для измерения температуры взрывоопасных сред на химических и биологических объектах. Световод-модулятор должен быть выполнен химически нейтрального, немагнитного материала, имеющего низкую теплопроводность.



1 – световод - модулятор температуры; 2 – разъемные световодные соединители; 3 – оптоволоконный модуль; 4 – фотоприёмник; 5 – приемный оптический модуль; 6 – электронный преобразователь; 7 – электрический разъемный соединитель; 8 – оптоэлектронный блок; 9 – источник излучения

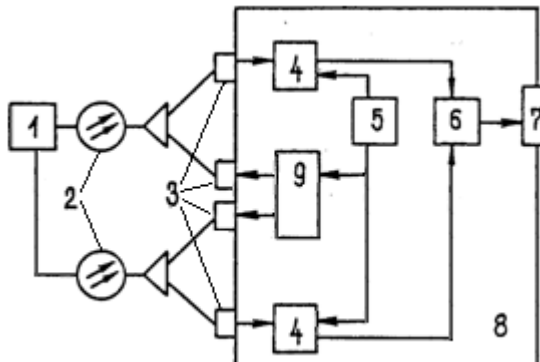
Рисунок Б.7 – Структурная схема ВОП для измерения температуры газов и жидкостей

Технические характеристики

Диапазоны измерения, °С	– 50...+50; 0...+200; +200...+700; 700...+1600
Основная погрешность, %	0,5
Время установления выходного сигнала, с	1
Выходной сигнал в виде постоянного напряжения, В	0...10
Длина оптоволоконного модуля, м, не более	300
Ток потребления, А, не более	0,2
Потребляемая мощность, Вт, не более	2
Габариты, не более, мм	
световода–модулятора температуры.....	8x40
оптоэлектронного блока.....	25x140x160
Масса, не более, г	
измерительного преобразователя	20
оптоэлектронного блока.....	650

8 Разработать ВОП для измерения коэффициентов отражения, поглощения и рассеяния оптического излучения от непрозрачных поверхностей во взрыво- и пожароопасных условиях.

Рекомендуемая структура системы представлена на рисунке Б.8.



- 1 – модулятор - поверхность; 2 – двухволоконные оптические модули;
 3 – оптические разъёмные соединители; 4 – фотоприёмники;
 5 – импульсный генератор; 6 – дифференциальный усилитель;
 7 – электрический соединитель; 8 – оптоэлектронный блок;
 9 – источник излучения*

Рисунок Б.8 – Структурная схема ВОП для измерения коэффициентов отражения, поглощения и рассеяния оптического излучения

Технические характеристики

Уровни выходного аналогового электрического сигнала оптоэлектронного блока, В	±5
Материал контролируемого объекта.....	металл, керамика, бумага и др.
Пределы регистрируемых коэффициентов отражения, поглощения, рассеяния.....	0,01...0,99
Погрешность измерения, %, не более	0,5
Напряжение питания, В.....	~220
Ток потребления, А, не более	0,2
Габариты, не более, мм	
модулятора	15[33
оптоэлектронного блока.....	160x100x50
Длина оптоволоконного жгута, м.....	7,5...30
Масса, не более, кг	
модулятора	0,05
оптоволоконного модуля	1,2...4,4
оптоэлектронного блока.....	0,65
Диапазон рабочих температур, °С.....	+5...+40

Учебное издание

Кузнецов Виктор Павлович
Иванов Алексей Александрович
Кудряшов Борис Петрович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Учебное пособие

Редактор Н.М. Быкова

Подписано к печати 26.03.14	Формат 60×84 1/16	Бумага тип. №1
Печать цифровая	Усл. печ. л. 5,25	Уч.-изд. л. 5,25
Заказ 92	Тираж 100	

Редакционно-издательский центр КГУ.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.