

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА

Н.И. ЛИМАНОВА

**МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

Учебное пособие

САМАРА 2003

ББК 31.222:32.96

УДК 681.518.3:681.586.782:621.389:681.2

Лиманова Н.И. Магнитооптические преобразователи перемещений: Учеб. пособие / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2003.-140с.

ISBN 5-7883-0268-4

Рассмотрены способы построения электромагнитных, оптических и магнитооптических преобразователей перемещений. Дан анализ информационных аспектов конструирования отдельных преобразователей. Рассмотрены математические модели преобразователей методом параметрических структурных схем и их практическое применение.

Предназначено для студентов вузов и инженерно-технических работников, специализирующихся в области систем управления, измерения и контроля.

Табл. 6 Ил. 52 Библиогр.: 115 назв.

Печатается по решению редакционно - издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

Рецензенты: В.Н. Михелькевич, А.Г. Саноян

ISBN 5-7883-0268-4

© Н.И. Лиманова, 2003

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2003

Предисловие

На основе использования достижений науки и техники для расцвета отечественной экономики необходимо ускорить внедрение автоматизированных систем управления (АСУ) с использованием робототехники, гибких автоматизированных производств, микропроцессоров и микроЭВМ, внедрение автоматизированных методов и средств контроля качества и испытания продукции как составной части технологических процессов. Необходимо сосредоточить усилия на совершенствовании вычислительной техники, ее элементной базы, средств и систем сбора, передачи и обработки информации.

Эффективные и надежные автоматизированные системы управления различными промышленными установками и технологическими процессами могут быть созданы лишь на базе эффективных и надежных средств автоматизации, в ряду которых стоят преобразователи различных параметров этих процессов.

Одним из важнейших параметров является перемещение.

Принцип действия электромагнитных преобразователей основан на изменении электрических и магнитных составляющих полного сопротивления обмотки. На низкой и звуковой частотах активное сопротивление меняется незначительно, основному же воздействию на любых частотах подвергается реактивное сопротивление.

Принцип действия оптических преобразователей основан на изменении интенсивности светового потока и его регистрации фотоприемниками, построенными на основе фотоэлектронной эмиссии, фотопроводимости, а также фотогальванического и пироэлектрического эффектов.

Электромагнитные преобразователи перемещений преобразуют входную величину в виде перемещений в измерения электрических

параметров индуктивности или взаимоиндуктивности за счет изменения длины, площади воздушного зазора, геометрии магнитопровода, его магнитной проницаемости, числа витков, частоты, экранирующего действия проводников.

Оригинальные конструкции преобразователей, а также вопросы теории и расчета разработаны и описаны в трудах Б.С. Сотского, Л.Ф. Куликовского, М.Ф. Зарипова, В.Г. Домрачева, Н.Е. Конюхова, Д.И. Агейкина, П.В. Новицкого, А.Л. Дорофеева, В.Г. Герасимова, В.Е. Шатерникова и других ученых.

Однако потребности практики таковы, что область применения электромагнитных преобразователей часто ограничивается: нелинейностью; низкой чувствительностью; зависимостью выходного сигнала от координаты подвижной части; регулируемостью выходных характеристик; стоимостью и быстродействием преобразователей, использующих микропроцессорную технику и ЭВМ.

Оптические преобразователи перемещений преобразуют входную величину в виде перемещений в изменения электрических величин тока или напряжения за счет изменения светового потока или силы света источника излучения, активной площади фотоприемника или расстояния от источника излучения до фотоприемника.

Оригинальные конструкции волоконно-оптических преобразователей, а также вопросы теории и расчета разработаны и описаны в трудах Н.Е. Конюхова, Г.П. Катгиса, В.М. Гречишникова, С.А. Матюнина, Ю.В. Рождественского, Б.В. Скворцова, В.М. Шаповалова, Д.К. Саттарова и других ученых. Одним из перспективных методов улучшения метрологических характеристик преобразователей перемещений является использование электромагнитных и оптических датчиков. Такое сочетание объединяет положительные качества электромагнитных преобразователей с оптическими преобразователями и отвечает повышенным требованиям, предъявляемым

к преобразователям перемещений: высокой линейности и возможностью регулировки выходных характеристик, уменьшенной погрешности, значительной выходной мощности и чувствительности, высокой надежности работы, низкой стоимости, малым габаритам и массе. Данная работа посвящена вопросам разработки и исследования перспективных магнитооптических преобразователей перемещений.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

1.1. Магнитные системы преобразователей

Электромагнитные преобразователи - это такие преобразователи, у которых связь между входными и выходными величинами обусловлена взаимным влиянием магнитных и электрических параметров. У преобразователей с распределенными параметрами магнитные системы аналогичны длинным электрическим линиям. Однако по сравнению с указанными линиями, достаточно полно исследованными в работах по теоретическим основам электротехники, длинные линии с распределенными магнитными и электрическими параметрами являются более сложными. В общем случае их можно было бы рассматривать как неоднородные линии с распределенными нелинейными параметрами, у которых из-за наличия подвижной части коэффициент распространения и характеристическое сопротивление не являются постоянными [37].

Рассмотрим распределенную магнитную цепь по аналогии с электрической цепью. Для этого найдем магнитные аналоги электрических величин – тока I , заряда q , напряжения U и электрических параметров – сопротивления R , индуктивности L , емкости C , записав следующие критерии [36,111]:

1) энергетический критерий – магнитная мощность p_m , равная произведению магнитного тока i_m на магнитное напряжение u_m и измеряемая в ваттах:

$$p_m = i_m u_m ; \quad (1.1)$$

2) критерий интенсивности - магнитный ток i_m , равный первой производной по времени от магнитного заряда q_m и измеряемый в вольтах:

$$i_M = \frac{dq_M}{dt} ; \quad (1.2)$$

3) статический критерий - магнитное напряжение u_M , равное произведению магнитного тока i_M на магнитное сопротивление R_M и измеряемое в амперах (закон Ома для магнитных цепей):

$$u_M = i_M R_M ; \quad (1.3)$$

4) критерий динамики первого рода - магнитный ток i_M , равный первой производной по времени от произведения магнитной емкости C_M на магнитное напряжение u_M :

$$i_M = \frac{d}{dt}(C_M u_M) ; \quad (1.4)$$

5) критерий динамики второго рода - магнитное напряжение u_M , равное первой производной по времени от произведения магнитной индуктивности L_M на магнитный ток i_M :

$$u_M = \frac{d}{dt}(L_M i_M) . \quad (1.5)$$

Магнитное напряжение и магнитодвижущую силу можно представить в виде

$$u_M = Hl ; \quad (1.6)$$

$$e_M = i w , \quad (1.7)$$

где H - напряженность магнитного поля; l - длина средней силовой линии поля; i - электрический ток обмотки возбуждения с числом витков w .

Магнитный заряд q_M эквивалентен магнитному потоку Φ и измеряется в веберах:

$$q_M = \Phi . \quad (1.8)$$

Магнитное сопротивление R_M эквивалентно электрической проводимости G на пути токов в магнитопроводе, создаваемых переменным магнитным потоком, и измеряется в сименсах:

$$R_m = G. \quad (1.9)$$

Магнитная емкость C_m является аналогом магнитной проводимости G_m магнитопровода и измеряется в генри:

$$C_m = G_m = \mu \frac{S}{l}, \quad (1.10)$$

где μ, S, l - соответственно магнитная проницаемость, площадь поперечного сечения и длина рассматриваемого участка магнитной цепи.

Магнитная индуктивность L_m представляет собой аналог электрической емкости C на пути токов в магнитопроводе, создаваемых переменным магнитным потоком, и измеряется в фарадах:

$$L_m = C = \epsilon \frac{S_n}{l_n}, \quad (1.11)$$

где ϵ, S_n и l_n - соответственно диэлектрическая проницаемость, площадь поверхности и расстояние между поверхностями магнитопровода. Таким образом, динамические параметры магнитной цепи - магнитная емкость и магнитная индуктивность - зависят от размеров магнитопровода и от его физических констант - магнитной и диэлектрической проницаемости. Для удобства анализа процессов в магнитных цепях используют также параметры, являющиеся обратными рассмотренным выше: $G_m = 1/R_m$ - магнитная проводимость; $W_m = 1/C_m$ - магнитная жесткость; $D_m = 1/L_m$ - инверсная магнитная индуктивность.

Магнитные напряжение u_m и ток i_m в магнитной линии являются функциями двух независимых переменных: координаты x , определяющей место наблюдения, и времени t , определяющего момент наблюдения. Обычно требуется найти пространственно-временное распределение в линии магнитного тока $i_m(x, t)$ и магнитного

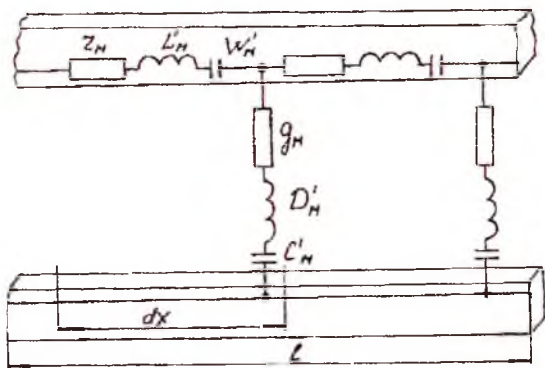


Рис.1.1. Магнитная линия

напряжения $u_M(x, t)$. По аналогии с электрической линией для магнитной цепи (линии), показанной на рис.1.1, можно записать следующие уравнения [23]:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial U_M}{\partial X} &= r_M \cdot i_M + L'_M \frac{\partial i_M}{\partial t} + \int W'_M \cdot i_M dt ; \\ -\frac{\partial i_M}{\partial X} &= \frac{1}{\left[\frac{1}{g_M U_M} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{D'_M U_M} \right) + \int C'_M U_M \right]} \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

где r_M , g_M , C'_M , L'_M , W'_M , D'_M - соответственно погонные магнитные сопротивление, проводимость, емкость, индуктивность, жесткость и инверсная индуктивность.

Уравнения (1.12) могут быть решены однозначно при использовании начальных и граничных условий. Начальными условиями являются значения магнитного напряжения и тока в начале или в конце линии в момент времени, принятый за нулевой. Граничные условия определяются связями между магнитным напряжением и током в начале или в конце линии; эти связи зависят от заданного режима работы линии. Решение приведенных уравнений позволяет

найти функциональные зависимости магнитного напряжения и тока от переменных x и t .

Будем считать, что если к линии приложено синусоидальное электрическое напряжение, то в любой точке линии магнитное напряжение и магнитный ток изменяются по синусоидальному закону с частотой источника питания ω .

Комплексное сопротивление для последовательного участка магнитной линии и комплексную проводимость для ее параллельного участка можно записать в виде

$$Z_M = r_M + j\omega L'_M + \frac{W'_M}{j\omega}; \quad (1.13)$$

$$Y_M = \frac{1}{\left[\frac{1}{g_M} + j\omega \frac{1}{D'_M} + \frac{1}{j\omega C'_M} \right]} \quad (1.14)$$

Обозначим комплексные амплитуды магнитного напряжения и тока на расстоянии x от начала линии через $\dot{U}_M(x)$ и $\dot{I}_M(x)$.

Перепишем уравнения (1.12) в комплексном виде, заменяя частные производные по x обыкновенными в связи с тем, что комплексные значения \dot{U}_M и \dot{I}_M не зависят от t , а являются только функциями x :

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\dot{U}_M}{dx} &= Z_M \dot{I}_M \\ \frac{d\dot{I}_M}{dx} &= \frac{\dot{U}_M}{\frac{1}{g_M} - j\omega \frac{1}{D'_M} - \frac{1}{j\omega C'_M}} \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Дифференцируя эти уравнения по x и исключая из системы сначала магнитный ток, а затем напряжение, получаем

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \dot{U}_M}{dx^2} &= \dot{\gamma}^2 \dot{U}_M^2, \\ \frac{d^2 \dot{I}_M}{dx^2} &= \dot{\gamma}^2 \dot{I}_M^2, \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

где

$$\dot{\gamma} = \xi + j\alpha = \sqrt{\frac{Z_M}{\frac{1}{g_M} - \frac{j\omega}{D_M} - \frac{1}{j\omega C_M}}} \quad (1.17)$$

Решая уравнения (1.16), находим

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_M &= \dot{A}_1 \exp(-\dot{\gamma} x) + \dot{B}_1 \exp(\dot{\gamma} x); \\ \dot{I}_M &= \frac{1}{Z_s} [\dot{A}_1 \exp(-\dot{\gamma} x) - \dot{B}_1 \exp(\dot{\gamma} x)], \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

где волновое сопротивление линии

$$Z_B = \sqrt{\frac{Z_M}{Y_M}}, \quad (1.19)$$

\dot{A}_1, \dot{B}_1 – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

Подставляя (1.17) в (1.18), имеем

$$\dot{U}_M = \dot{A}_1 \exp(-\xi x) \exp(-j\alpha x) + \dot{B}_1 \exp(\xi x) \exp(j\alpha x). \quad (1.20)$$

Мгновенное значение магнитодвижущей силы в точке x равно мнимой части выражения $\sqrt{2} \dot{U}_M \exp(j\omega t)$:

$$\begin{aligned} \ddot{u}_M(x, t) &= \text{Im} \left[\sqrt{2} \dot{A}_1 \exp(-\xi x) \exp(-j\alpha x) \cdot \exp(j\omega t) + \right. \\ &+ \left. \sqrt{2} \dot{B}_1 \exp(\xi x) \exp(j\alpha x) \exp(j\omega t) \right] = \\ &= \sqrt{2} \dot{A}_1 \exp(-\xi x) \sin(\omega t + \Psi_1 - \alpha x) + \\ &+ \sqrt{2} \dot{B}_1 \exp(\xi x) \cdot \sin(\omega t + \Psi_2 + \alpha x) \quad , \end{aligned} \quad (1.21)$$

где ψ_1 и ψ_2 аргументы комплексных величин \dot{A} и \dot{B} .

Если считать точку x фиксированной, то первая составляющая выражения (1.21) представляет собой синусоидальную функцию времени с постоянной амплитудой $\sqrt{2} \dot{A}_1 \exp(-\xi x)$. Если же считать фиксированным момент времени t , то получим затухающую синусоидальную волну, амплитуда которой $\sqrt{2} \dot{A}_1 \exp(-\xi x)$ убывает с ростом x . Вторая составляющая выражения (1.21) также представляет собой синусоидальную волну, но ее амплитуда $\sqrt{2} \dot{B}_1 \exp(\xi x)$ возрастает с увеличением x .

Величину ξ , характеризующую изменение амплитуды волны, называют коэффициентом затухания, а величину α , характеризующую изменение фазы, — коэффициентом фазы. Убывание амплитуды волны вдоль линии обусловлено потерями в линии, а изменение фазы — конечной скоростью распространения электромагнитных колебаний. Оба коэффициента входят в комплексный параметр $\dot{\gamma}$ (1.17), который характеризует распространение по линии волны магнитного напряжения и магнитного тока.

С течением времени прямая, или падающая, волна, характеризующаяся первой составляющей u_M , перемещается от начала линии к ее концу с фазовой скоростью

$$V_\phi = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\alpha} \quad (1.22)$$

Обратная, или отраженная, волна, определяемая второй составляющей u_M , перемещается с такой же скоростью от конца линии к ее началу. Таким образом, происходит сложение двух волн, движущихся в противоположных направлениях, причем каждая из этих волн затухает в направлении движения. Рассмотрим случай, когда формулы (1.13) и (1.14) приобретают вид

$$Z_M = r_M; \quad Y_M = g_M \quad (1.23)$$

Будем считать, что при сделанных предположениях $\dot{I}_m = c\dot{\Phi}$, где c - некоторый размерный множитель, численное значение которого примем равным единице.

Тогда уравнения (1.15) могут быть записаны в виде

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\dot{U}_m}{dx} &= r_m \dot{\Phi}; \\ -\frac{d\dot{\Phi}}{dx} &= g_m \dot{U}_m. \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

Эти уравнения используются при исследовании электромагнитных преобразователей, работающих в статическом режиме.

1.2. Сравнительные характеристики электромагнитных преобразователей перемещений

Электромагнитные преобразователи с распределенными параметрами отличаются тем, что при перемещении их подвижных элементов (ферромагнитного сердечника, короткозамкнутого витка или экрана, катушки с током) изменяются электрические и магнитные параметры, распределенные вдоль пути перемещения подвижного элемента.

Рассмотрим электромагнитный преобразователь перемещений ЭПП (табл. 1.1; 11), состоящий из П - образного магнитопровода обмотки возбуждения 2, расположенной на его основании, подвижного ферромагнитного сердечника 3, перемещающегося вдоль стержней магнитопровода, и измерительной обмотки 4, равномерно распределенной на одном из стержней [37,57].

При подключении обмотки возбуждения к источнику переменного напряжения U_B в измерительной обмотке возникает ток I_u зависящий от координаты подвижного сердечника x . Указанная зависимость

обусловлена тем, что при изменении x меняются индуктивности обмотки возбуждения L_B и измерительной обмотки L_U , а также их взаимдуктивность M .

В общем случае ток нагрузки определяется соотношением

$$\dot{I}_u = \frac{j\omega M \dot{U}_B}{(R_u + Z_u + j\omega L_u)(R_B + j\omega L_B) + \omega^2 M^2}, \quad (1.25)$$

где R_B, R_u, Z_u - активные сопротивления обмотки возбуждения и измерительной обмотки и полное сопротивление нагрузки.

Значения L_B, L_u и M могут быть представлены в виде полиномов:

$$\left. \begin{aligned} L_B &= \sum_{k=1}^n G_{Bk} w_{Bk}^2; \\ L_U &= \sum_{k=1}^n G_{Uk} w_{Uk}^2; \\ M &= \sum_{k=1}^n G_{Mk} w_{Bk} w_{Uk}. \end{aligned} \right\} \quad (1.26)$$

где w_{Bk} и w_{Uk} - числа витков, соответствующие k -му элементу магнитопровода.

Величины, входящие в (1.26), можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} G_{Bk} &= G_{Bk0} + g_{Bk} x; \quad G_{Uk} = G_{Uk0} + g_{Uk} x; \quad G_{Mk} = G_{Mk0} + g_{Mk} x; \\ w_{Bk} &= w_{Bk0} + w_{Buk} x; \quad w_{Uk} = w_{Uk0} + w_{Uyk} x. \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

Параметры $g_{Bk}, g_{Uk}, g_{Mk}, w_{Buk}, w_{Uyk}$ могут зависеть от x , причем некоторые из них обращаются в частных случаях в нуль; индекс "у" указывает, что рассматривается удельное (погонное) значение соответствующего числа витков. Для рассматриваемого ЭПП в первом приближении можно записать:

$$\left. \begin{aligned} L_a &= (g_h x_M + g_\delta l_\delta + G_{as}) w_a^2; \\ L_u &= \left(\frac{g_h x_M^3}{3} + g_\delta l_\delta x^2 + G_{us} x_M^2 \right) w_{uy}^2; \\ M &= \left(\frac{g_h x_M^2}{2} + g_\delta l_\delta x \right) w_a w_{uy}, \end{aligned} \right\} \quad (1.28)$$

где g_h и g_δ – погонные значения магнитной проводимости в промежутке h между длинными стержнями магнитопровода и магнитной проводимости в промежутке δ на длине подвижного элемента l_δ ; w_{uy} – число витков измерительной обмотки, приходящихся на единицу пути перемещения; x_M – максимальное значение координаты x ; w_B – число витков обмотки возбуждения; G_{us} , G_{as} – магнитные проводимости для потоков рассеяния обмотки возбуждения и измерительной обмотки.

Если обозначить магнитное сопротивление материала магнитопровода Z_M , и ток обмотки возбуждения I_B , можно получить следующую формулу для ЭДС измерительной обмотки:

$$E_u = -j\omega w_{uy} I_B w_B (A - Z_M B), \quad (1.29)$$

где $A = g_h \frac{x_M^2}{2} + g_\delta l_\delta x$;

$$B = \frac{5}{24} g_h^2 x_M^3 + \frac{1}{2} g_\delta l_\delta g_h x_M^2 + g_\delta g_h l_\delta x_M x + g_\delta^2 l_\delta x^2 - \frac{2}{3} g_\delta g_h l_\delta x^2.$$

Линейность статической характеристики ЭПП с распределенными параметрами зависит в основном от постоянства w_{uy} и w_B . Магнитное сопротивление на пути рабочего магнитного потока должно быть неизменным; это достигается при использовании магнитопровода особой формы, обеспечивающей постоянство длины пути потока в ферромагнитной части.

Классификация электромагнитных преобразователей (датчиков) перемещений

I		Преобразователи малых перемещений			II	
Индуктивные (параметрические)		Трансформаторные			Преобразователи больших перемещений	
С центральным сердечником	1	2	3	4	5	6
	7	8	9	10	11	12
Накладные (двухреборчатые)	13	14	15	16	17	18
	19	20	21	22	23	24
Индуктивные		Дифференциальные			Дифференциальные	
Совмещенным подвижным элементом		Одноэлементные			Трансформаторные	
9		10			11	
13		14			15	
19		20			21	
23		24			25	

Магнитопроводы и обмотки таких преобразователей имеют сравнительно сложную форму, часто профилированы.

Разрешающая способность ЭПП ограничивается остаточным выходным сигналом при среднем положении подвижной части. Минимальное значение остаточного сигнала легко обеспечивается в том случае, когда перемещение подвижного элемента вызывает изменение только индуктивности L_B . При этом в среднем положении влияние несинфазных сигналов минимально.

Зависимость фазы выходного сигнала от координаты подвижной части имеет большое значение при использовании ЭПП в качестве компенсирующих элементов в автокомпенсационных установках. В этих устройствах незначительное изменение фазы выходного сигнала приводит к появлению квадратурной составляющей на входе усилителя. Для уменьшения фазовых сдвигов приходится использовать магнитные материалы с малыми потерями и увеличивать воздушные зазоры, что приводит к росту габаритных размеров преобразователя.

На подвижный сердечник ЭПП действует сила притяжения

$$F = \frac{I_a^2}{2} \frac{dL_a}{dx} . \quad (1.30)$$

Для устойчивой работы преобразователя необходимо, чтобы указанная сила была по крайней мере на один порядок меньше силы, обуславливающей измеряемое перемещение.

Не каждая конструкция ЭПП, приведенная в табл. I.1, в полной мере отвечает специфическим требованиям, предъявляемым к преобразователям перемещений. Основные требования: широкий диапазон контролируемых перемещений; высокая разрешающая способность; линейность статической характеристики; высокая чувствительность; минимальная зависимость выходного сигнала от координаты подвижной части; минимальные электромеханические силы, действующие на подвижную часть преобразователя [38].

При выборе ЭПП по диапазону контролируемых перемещений стремятся при достаточно высокой чувствительности обеспечить минимальные поперечные размеры преобразователя. С этой точки зрения ЭПП удобно классифицировать следующим образом. Преобразователи с переменным зазором и экранные (см. табл. 1.1; 1-8) можно разделить на ЭПП микроперемещений с диапазоном x_m меньше 100 мкм и отношением $k_r = \frac{x_m}{b} = 10^{-4} \dots 10^{-5}$ и на ЭПП малых перемещений с

$x_m = \pm(0,1 \dots 3)$ мм и $k_r = 0,1 \dots 0,5$ (здесь b - максимальный поперечный размер ЭПП). Преобразователи 9 - 12 можно разделить на ЭПП средних перемещений 9, 10 с диапазоном $x_m = \pm(2 \dots 50)$ мм и $k_r = 0,5 \dots 1$, к которым относятся в основном преобразователи с переменной площадью зазора и соленоидного типа, и на ЭПП больших перемещений 11, 12 с диапазоном $x_m = \pm(50 \dots 10000)$ мм и $k_r = 5 \dots 100$.

Следует отметить, что чаще используют индуктивные ЭПП с автономными обмотками и трансформаторные преобразователи малых перемещений с подвижными сердечниками и переменными зазорами (ЭППС). Эти преобразователи имеют высокую чувствительность, они позволяют обнаружить изменение воздушного зазора от десятых и сотых долей микрометра до 3-5 мм. К недостаткам одноэлементных конструкций ЭППС (см. табл. 1.1; 1,3) следует отнести нелинейность статической характеристики, обусловленную нелинейностью характеристики намагничивания ферромагнитного сердечника и потоками выпучивания. Для получения удовлетворительной линейности рабочее изменение зазора не должно превосходить 0,1 его номинального значения. В указанных ЭППС выходной сигнал не обращается в нуль ни при одном значении зазора, что снижает порог чувствительности. Другие их недостатки - зависимость фазы выходного сигнала от положения якоря; значительная тяговая сила, действующая на подвижную часть преобразователя; невозможность регулировки выходной характеристики.

Для частичного устранения этих недостатков используют дифференциальные конструкции (см. табл.1.1;2,4), в которых изменения полных сопротивлений обмоток при перемещении сердечника противоположны по знаку. При конструировании дифференциального ЭПС необходимо обеспечить строгую симметрию обеих его половин, чтобы остаточное выходное напряжение в нейтральном положении подвижного сердечника и изменение фазового угла были минимальными.

Недостатками дифференциальных преобразователей являются зависимость величины линейного участка статической характеристики от сопротивления нагрузки, обусловленная тем, что ток нагрузки размагничивает магнитопровод с меньшим воздушным зазором, а также изменение выходного напряжения при изменении напряжения и частоты питающей сети. Ферро-резонансные стабилизаторы не могут скомпенсировать влияние сети из-за своей низкоточности и резкой зависимости выходного напряжения от частоты. Нелинейность выходных характеристик с рассмотренных ЭПС составляет примерно 1,5 - 2 %, фазовая погрешность $\Delta\varphi$ не превышает 1,5 - 2 %, чувствительность - $S_{\text{И}}$ равна 0,5...1 мВ/мм.

Для измерения перемещений широко применяют также накладные (вихреговые) и экранные электромагнитные преобразователи (см. табл.1.1;5-8). Экранирование магнитного поля проводником, используемое в преобразователях этой группы, объясняется размагничивающим действием вихревых токов, индуцированных в проводнике [21,38,57]. Эти токи, а следовательно и эффективность экранирования, увеличиваются с ростом частоты. Большинство преобразователей без сердечников работает на высоких частотах,ходящих до десятков мегагерц. При наличии сердечников удовлетворительную чувствительность можно получить при низких частотах вплоть до 50 Гц. В качестве подвижных элементов, управляющих индуктивностью, использовать короткозамкнутые

обмотки или витки 3, перемещающиеся вдоль стержня магнитопровода (1), а также электропроводящие поверхности 3, перемещаемые вблизи катушек, или пластины, вводимые в зазор магнитопровода (5,7,8). Сопротивление, которое вносится немагнитными экранами, обладающими обычно высокой электропроводимостью, приводит к изменению тока нагрузки, определяемого соотношением (1.25).

ЭППЭ могут быть одноэлементными и дифференциальными, они могут работать при различных схемах включения. Преимущества высокочастотных преобразователей - большая чувствительность ($S_H > 1$ В/мм) и малое измерительное усилие. К недостаткам конструкции ЭППЭ следует отнести большую нелинейность выходной характеристики ($\varepsilon > 1\%$), необходимость использования дополнительных электронных схем, большое влияние емкостей и индуктивностей линий связи, повышенную чувствительность к расположенным вблизи прибора металлическим деталям.

1.3. Анализ конструкторских методов коррекции погрешностей электромагнитных преобразователей

Представляют интерес разработка и исследование комбинированных ЭПП, содержащих измерительные и экраные обмотки (в отдельных случаях короткозамкнутые витки). Такие преобразователи объединяют положительные качества ЭППС и ЭППЭ и отвечают повышенным требованиям, предъявляемым к преобразователям перемещений.

С помощью комбинированных ЭПП можно получить широкий класс функциональных зависимостей между перемещением и выходным сигналом при относительно высокой линейности и регулируемости выходных характеристик. Изменение фазы выходного напряжения при перемещении якоря незначительно.

Остаточное выходное напряжение в исходном положении подвижной части преобразователя, обусловленное гармониками в дифференциальных схемах, для рассматриваемых ЭПП является минимальным. Это предотвращает нагрев обмоток управления усилителей и двигателей в системах с автоматическим слежением, а также увеличивает точность и чувствительность устройств.

Высокая чувствительность комбинированных ЭПП позволяет отказаться от промежуточных усилителей и получить значительную выходную мощность. Комбинированные ЭПП имеют малые габаритные размеры, массу и тяговые силы, низкую стоимость; они просты в изготовлении и эксплуатации, обладают высокой надежностью. Характеристики комбинированных ЭПП повторяются от образца к образцу. Электромагнитные преобразователи перемещений с подвижными ферромагнитными сердечниками и экранами (ЭПСЭ) имеют большое число конструктивных вариантов, практическое применение которых позволяет решать широкий круг научно-технических задач в различных отраслях промышленности.

На рис. 1.2 изображены продольные сечения дифференциальных ЭПСЭ, имеющих наибольшее распространение. В конструкции, показанной на рис. 1.2, *а*, экраны выполнены в виде короткозамкнутых витков (колец), расположенных по всей поверхности якоря [15, 60]. В варианте, представленном на рис. 1.2, *б*, для расширения диапазона перемещений экранные кольца располагаются на поверхности якоря только в полостях между внешними и внутренними цилиндрическими частями неподвижных сердечников [17, 18]. Указанные кольца могут быть размещены в пазах подвижного сердечника, что обеспечивает более полное использование окон неподвижных сердечников (рис. 1.2, *в*). В конструкции (рис. 1.2, *г*) экраны выполнены в виде обмоток, замкнутых накоротко или на внешнюю нагрузку; это позволяет получить регулируемые выходные характеристики преобразователя [16]. Экранные кольца и обмотки

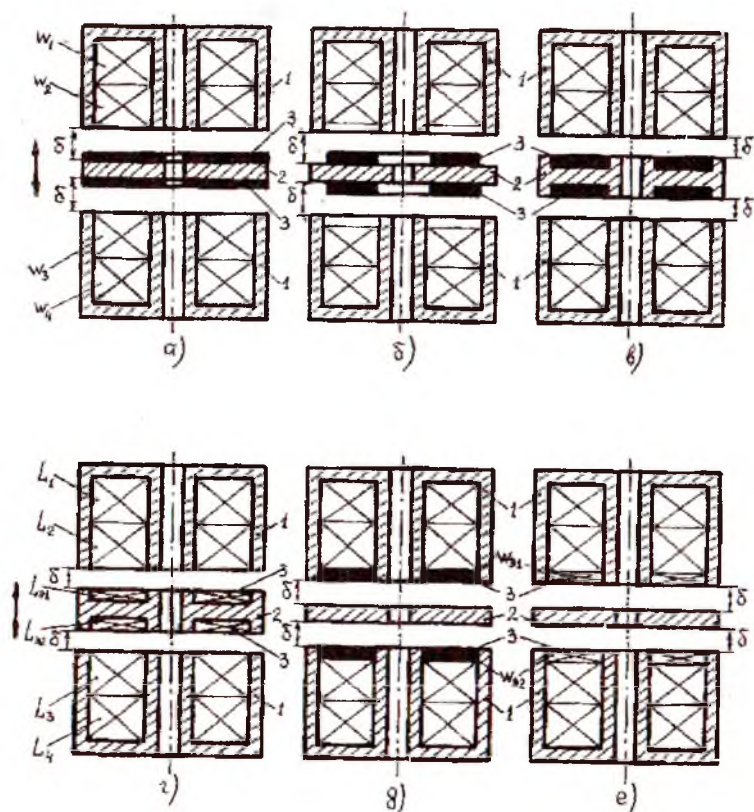


Рис. 1.2. Конструкции комбинированных электромагнитных преобразователей перемещений: 1 - неподвижные сердечники; 2 - подвижные сердечники; 3 - экраны

w_{31} и w_{32} (рис. 1.2; д, е) могут быть размещены на неподвижных сердечниках вместе с измерительными обмотками $w_{31} - w_{34}$ [62].

Рассмотренные преобразователи работают следующим образом: при перемещении из нейтрального положения подвижного сердечника, связанного с объектом измерения, изменяются воздушные зазоры δ ; в результате меняются сопротивления измерительных обмоток и выходной сигнал преобразователя.

ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

2.1. Оптические системы преобразователей

2.1.1. Принцип действия и основы теории

Оптический преобразователь измеряемой величины X_1 или X_2 в выходную электрическую величину I (рис. 2.1) содержит источник излучения светового потока Φ_1 , некоторый оптический канал и приемник излучения, воспринимающий световой поток Φ_2 и преобразующий его в выходной электрический сигнал I .



Рис. 2.1. Структурная схема оптических преобразователей перемещений

Воздействие входной величины X на поток излучения Φ_2 может осуществляться двумя путями. В первом случае измеряемая величина X_1 (рис. 2.1) воздействует непосредственно на источник излучения и изменяет тот или иной параметр излучаемого потока Φ_1 . Во втором случае измеряемая величина X_2 модулирует соответствующий параметр потока Φ_2 в процессе его распространения по оптическому каналу. Поэтому для уяснения общих принципов действия оптических преобразователей ниже будут рассмотрены законы оптического излучения, законы распространения оптического излучения и взаимодействия его с веществом и основные характеристики источников и приемников излучения, а также примеры наиболее распространенных оптических преобразователей.

Оптическое излучение представляет собой электромагнитное излучение в диапазоне длин волн λ от 0,003 до 300 мкм, что

соответствует частотам от 10^{12} до 10^{17} Гц. Оптический диапазон подразделяют на инфракрасную область ($\lambda > 0,8$ мкм), способную давать тепловое ощущение, видимую область ($0,4 \leq \lambda \leq 0,8$ мкм), способную давать зрительное, цветовое ощущение, и невидимую-ультрафиолетовую ($\lambda < 0,4$ мкм).

Электромагнитное излучение, в том числе и оптическое, распространяется в веществе со скоростью $V_x = c/n$, где c - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме ($c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с), являющаяся фундаментальной физической константой, n - оптическая плотность среды (показатель преломления). Показатель преломления воздуха $n = 1,0003$, поэтому скорость света в атмосфере незначительно отличается от скорости света в вакууме. Постоянство скорости света в вакууме (и с некоторым приближением в атмосфере) используется для измерения расстояний. При измерениях больших расстояний измеряется время, необходимое для прохождения светом расстояния до объекта измерения и обратно (световые локаторы и светодальномеры). При измерениях малых расстояний удобнее сравнивать их с длиной световой волны посредством фазовых или интерференционных методов.

Прохождение оптического излучения через вещество характеризуется поглощением и рассеянием. Интенсивность пучка параллельных лучей при прохождении слоя среды толщиной x убывает вследствие поглощения по закону $\Phi_x = \Phi_0 e^{-k_\lambda x}$. Коэффициент поглощения k_λ зависит от длины волны (селективность или избирательность поглощения). У "прозрачных" веществ в видимой области спектра k_λ составляет от 10^{-3} м $^{-1}$ (воздух) до 1 м $^{-1}$ (стекло).

Поглощение оптического излучения, проходящего через раствор, зависит от его концентрации c (поглощением растворителя пренебрегаем): $\Phi_x = \Phi_0 e^{-X_\lambda cx}$, где X_λ - коэффициент, определяемый свойствами молекул растворенного вещества и длиной волны света. При прохождении оптического излучения через мутное вещество

туман, дым, жидкость, содержащая взвешенные частицы, коллоидный раствор) часть света рассеивается в стороны. Поэтому для мутных веществ ослабление светового потока описывается выражением $\Phi_x = \Phi_0 e^{-(k_x + k_s)}$, где k_x - коэффициент экстинкции, величина которого зависит от длины волны света и размеров рассеивающих частиц. Изменение интенсивности поглощения в зависимости от толщины слоя, а также селективность поглощения лежат в основе действия целого ряда оптических преобразователей, предназначенных для определения толщины, уровня, концентрации, структуры и химического состава веществ.

На границе раздела двух прозрачных сред, имеющих разные коэффициенты преломления, световое излучение претерпевает преломление (рефракцию) и отражение (рис. 2.2). Между углами падения φ_1 , преломления φ_2 и отражения φ_3 существует простая связь: $\varphi_1 = \varphi_3$; $\sin \varphi_1 / \sin \varphi_2 = n_2 / n_1$, где n_1 и n_2 - коэффициенты преломления сред до и после границы раздела. Коэффициент преломления прозрачной среды убывает с ростом длины волны, следовательно, при одном и том же угле падения световые лучи больших длин волн преломляются под большими углами.

Это свойство используется в спектральных приборах для разложения и анализа сложного света. Измеряя углы падения и преломления, можно измерять коэффициенты преломления веществ (рефрактометрия). Коэффициент отражения непрозрачных тел сильно зависит от рода материала и состояния поверхности. Это свойство используется при измерениях шероховатости, точки росы по помутнению зеркала и т. д.

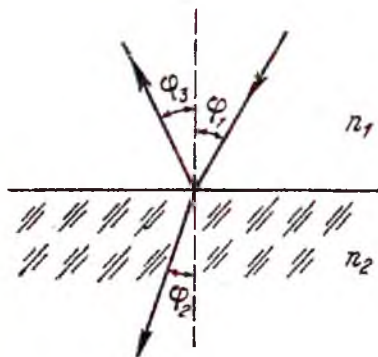


Рис. 2.2. Трансформация светового излучения на границе раздела прозрачных сред

Электромагнитные волны, в том числе и световые, являются поперечными, и важной характеристикой оптического излучения является плоскость поляризации, т. е. плоскость, в которой лежит вектор напряженности электрического поля и направление распространения электромагнитной волны. Для многих веществ показатель преломления и скорость распространения имеют различные значения в зависимости от ориентации плоскости поляризации (оптическая анизотропия). Оптически активные вещества (сахар, высокомолекулярные соединения) способны поворачивать плоскость поляризации проходящего через них света прямо пропорционально концентрации и толщине слоя.

Оптическая анизотропия и активность могут вызываться механическими напряжениями, электрическим полем, магнитным полем. Поэтому поляризационно-оптические преобразователи широко используются для точных измерений характеристик кристаллов и концентрации оптически активных веществ [95], для измерения механических напряжений методом фотоупругости, а также для построения безынерционных модуляторов света, управляемых электрическим или магнитным полем [45].

Оптическое излучение возникает при возбуждении атомов и молекул вещества путем нагревания (тепловое или температурное излучение) либо путем прямого преобразования (атомами или молекулами) других видов энергии ("холодное", или люминесцентное, излучение).

Интенсивность потока оптического излучения характеризуется мощностью P в ваттах, переносимой излучением всех длин волн, присутствующих в потоке. Характеристикой излучающих тел является энергетическая светимость R , т. е. поток, излучаемый единицей поверхности, в Вт/м². Указанные величины, отнесенные к единичному интервалу длин волн (вблизи длины волны λ), называются соответственно спектральной плотностью потока P_λ в Вт/м² или светимости R_λ в Вт/м³.

Силой излучения J в Вт/ср называется поток, отнесенный к единице телесного угла, в пределах которого распространяется излучение. Сила излучения единицы площади светящейся поверхности называется ее яркостью B и измеряется в Вт/(м²×ср). При тепловом излучении спектральная светимость любого тела определяется из закона Кирхгофа $R_{\lambda} = a_{\lambda} R_{\lambda}^*$, где a_{λ} – коэффициент поглощения тела на данной длине волны, зависящий главным образом от свойств тела, а R_{λ}^* – спектральная светимость некоторого гипотетического тела, обладающего способностью поглощать полностью падающее на него излучение любой длины волны (т. е. $a_{\lambda} \equiv 1$) и называемого поэтому абсолютно черным телом (АЧТ). По формуле Планка светимость АЧТ R_{λ}^* определяется однозначно его абсолютной температурой:

$$R_{\lambda}^* = C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (2.1)$$

где $C_1 = 2\pi hc^2$, $C_2 = hc/k$, h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана. На рис. 2.3 приведены кривые спектральной светимости АЧТ, параметром которых является абсолютная температура АЧТ.

При данной температуре T максимальное значение спектральной светимости АЧТ, составляющее $R_{\lambda}^* \max = 1,301 \cdot 10^{-5} T^5$, приходится на длину волны $\lambda \max = 2886/T$ мкм, а его интегральная светимость, т. е. площадь, ограниченная соответствующей кривой на рис. 2.3, равна $R^* = 5,67 \cdot 10^{-8} T^4$ (закон Стефана-Больцмана). Эти фундаментальные законы позволяют использовать оптические мето-

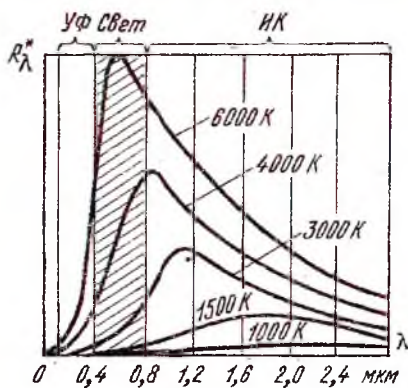


Рис. 2.3. Кривые спектральной светимости абсолютно черного тела

ды для бесконтактного измерения температуры АЧТ, а при известности α_λ и для измерения температуры любого реального тела.

Наиболее простым по спектральному составу является излучение веществ в газообразном или парообразном состоянии. Так как атомы и молекулы газа характеризуются строго индивидуальным и дискретным набором возможных значений внутренней энергии E_i , то газы и пары обнаруживают значительное поглощение (а следовательно, и излучение) только на резонансных частотах $\nu_{0i} = E_i/h$ или при длинах волн $\lambda_{0i} = hc/E_i$. Поэтому тонкие слои газов и паров характеризуются линейчатыми спектрами поглощения и излучения. В качестве примера на рис.2.4 показан видимый спектр излучения паров кадмия.

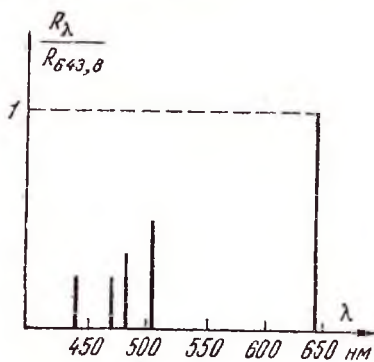


Рис.2.4. Видимый спектр излучения паров кадмия

Резонансные частоты (длины волн) излучения некоторых элементов обнаруживают весьма высокую стабильность и воспроизводимость (до 10^{-8}), что позволяет использовать их в качестве образцовых мер длины (красная линия кадмия, оранжевая линия криптона). Исследование спектров излучения и поглощения веществ в газо- или парообразном состоянии позволяет производить

качественный (по расположению линий в спектре) и количественный (по интенсивности линий) анализы.

2.1.2. Источники теплового и светового излучения

Источники оптического излучения подразделяются на тепловые и люминесцентные. К тепловым относятся лампы накаливания и газоразрядные лампы сверхвысокого давления. К люминесцентным — электролюминофоры, газоразрядные лампы, оптические кванто-

ые генераторы и светодиоды [58,104,105]. Основными характеристиками источников являются интенсивность и спектральный состав излучения. Для удобства сравнения спектров различных источников их излучательную способность на данной длине волны выражают в долях или процентах от максимальной спектральной излучательной способности.

Для оценки интенсивности видимого излучения (света) чаще применяют не энергетические, а фотометрические характеристики, основанные на сравнении световых потоков по зрительному воздействию. Основной фотометрической величиной является сила света источника. Единицей силы света является кандела. Световой поток измеряется в люменах. Люмен - это световой поток, испускаемый точечным изотропным источником силой света в одну канделу (1 кд) в телесном угле один стерадиан (1 ср). Яркость источников света измеряется в кд/м².

Важной характеристикой источников света является их светоотдача. Она характеризуется отношением видимого глазом светового потока ко всему лучистому потоку источника и выражается в лм/Вт. Если известна функция распределения мощности излучения по длинам волн P_λ , то видимый световой поток в люменах равен

$$\Phi = 683 \int_0^\infty P_\lambda k_\lambda d\lambda, \quad (2.2)$$

где k_λ - функция относительной видности, характеризующая относительную спектральную чувствительность глаза. Численные значения k_λ приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Функция относительной видности в зависимости от длины волны

λ , мкм	0,400	0,450	0,500	0,555	0,590	0,650	0,700
k_λ	0,000	0,038	0,323	1,000	0,957	0,107	0,004

Световому потоку в 1 лм соответствует разная мощность в зависимости от спектрального состава света. В области максимальной чувствительности глаза ($\lambda=0,555$ мкм) световому потоку в 1 лм соответствует мощность 1/683 Вт.

Лампы накаливания применяются в оптических приборах. К этим лампам предъявляются повышенные требования в отношении качества стекла баллонов, формы и главным образом расположения тела накала, которое должно быть малым по величине и равномерным по яркости. Например, лампы типа ОП12-100 имеют тело накала выполненное в виде конической спирали, витки которой расположены таким образом, что в проекции они накладываются друг на друга образуя почти равномерный по яркости диск. Электрические лампы накаливания излучают сплошной спектр. Спектральное распределение энергии излучения и интегральная светимость ламп накаливания сильно зависят от температуры нити и, следовательно, от режима питания. Параметры ламп накаливания типа ОП, а также фотометрических (светоизмерительных) ламп типа СИС и СИП приведены в работе [55].

Газоразрядные источники света дают свечение в результате прохождения электрического тока через газ или пар. Различают газоразрядные источники дугового, тлеющего и импульсного разрядов. По величине давления в колбе различают лампы низкого высокого и сверхвысокого давлений.

Ртутно-кварцевые лампы сверхвысокого давления имеют баллон шаровой формы из кварцевого стекла, внутри которого при работе давление достигает 30-50 атм. В этих условиях дуговой разряд в паре ртути концентрируется между концами электродов, причем яркости разрядного промежутка достигает очень больших величин, недоступных для ламп накаливания. Излучение ртутно-кварцевых ламп имеет линейчатый спектр (максимальную интенсивность имеет ультрафиолетовая линия с длиной волны 365 мм), наложенный на непрерывный фон, излучаемый раскаленными электродами лампы

Основные световые и электрические параметры ртутно-кварцевых ламп приведены в работе [104].

Импульсные лампы [94] являются источниками световых вспышек. Для этих ламп характерно то, что их электроды соединены с заряженным конденсатором. При поджиге разрядного промежутка высоковольтным импульсом происходит разряд конденсатора через лампу, сопровождаемый интенсивной вспышкой.

Газоразрядные спектральные лампы являются источниками сплошечастотным спектром излучения и находят применение в спектроскопии, рефрактометрии и т. д. Они состоят из кварцевой разрядной трубки, заполненной аргоном и парами металлов: ртути, кадмия, цинка, натрия, цезия. Разрядные трубки заключаются в стеклянный баллон. Наиболее интенсивные линии, излучаемые лампами этой группы, соответствуют длинам волн для лампы ДНаС18 (пары натрия) 589 нм, для лампы ДКдС20 (пары кадмия) 467,8; 480; 508,6; 643,8 нм.

Оптические квантовые генераторы (лазеры) позволяют получить чрезвычайно интенсивные остронаправленные пучки монохроматического света. В настоящее время наибольшее распространение имеют три типа лазеров: газовые, твердотельные (в частности, рубиновые) и полупроводниковые [26, 42]. Наиболее монохроматическим и остронаправленным является излучение газовых лазеров. Разработаны и выпускаются малогабаритные газовые лазеры типов ЛГ-18, ЛГ-55, ЛГ-56 с активным веществом в виде гелиево-неоновой смеси. Они имеют следующие характеристики: длина волны излучения 632,8 нм, мощность излучения от 0,5 мВт (ЛГ-18) до 2 мВт (ЛГ-56), сечение пучка - круг диаметром 1-2 мм, угол расходимости пучка не более 10'. Рубиновые лазеры излучают свет с $\lambda = 694,30 \pm 0,02$ нм и могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Мощность излучения в импульсе ($\tau = 0,5 \cdot 10^{-3}$ с) может составлять 10^4 Вт. Угол расходимости луча 20-30'.

Основными преимуществами оптических генераторов в полупроводниковых материалах (арсенид галлия, кремний примесью индия, фосфид галлия, арсенид индия и др.) являются высокий к. п. д. (80-90%) и простота возбуждения и модуляции оптического излучения (путем воздействия на ток возбуждения). Длина волны излучения зависит от типа активного вещества. Ширина линии излучения может составлять несколько нанометров, угол расходимости пучка 6-10°.

Светодиоды являются весьма удобными миниатюрными источниками света, для которых используются те же полупроводниковые материалы, что и для полупроводниковых лазеров. В отличие от лазеров, светодиоды не имеют резонаторов, поэтому их излучение некогерентно. Ширина линии излучения светодиодов составляет 10,0-20,0 нм. Достоинства полупроводниковых светодиодов заключаются в высоком к. п. д., возможности модуляции излучения по произвольному закону (путем управления возбуждающим током) и долговечности. Характеристики серийно выпускаемых светодиодов типа АЛ102 и КЛ101 приведены в табл.2.2.

Температурные диапазоны работы светодиодов составляют: на основе арсенида галлия - от -60 до +80 °С, фосфида галлия от -60 до +70 °С, карбида кремния - от -10 до +70 °С. При повышении температуры длина волны, на которую приходится максимум излучения, увеличивается примерно на 0,3 нм на 1 К [105].

Таблица 2.2

Характеристики некоторых светодиодов

Тип	Цвет излучения	Яркость, кд/м ²	Номинальный ток, мА	Номинальное напряжение, В
АЛ102А	Красный	5	5	3,2
АЛ 102В	Красный	40	20	4,5
АЛ 102В	Зеленый	50	30	5
КЛ101	Желтый	20 - 60	10 - 40	---

2.1.3. Приемники оптического излучения

Приемники оптического излучения можно разделить на две большие группы: тепловые и фотоэлектрические. К тепловым приемникам относятся термоэлементы и болометры, принцип работы которых основан на предварительном преобразовании энергии излучения в тепловую. К фотоэлектрическим приемникам, объединяемым общим названием "фотоэлементы", относятся преобразователи, в которых используются явления внешнего или внутреннего фотоэффекта: вакуумные и газонаполненные фотоэлементы, фоторезисторы, вентильные фотоэлементы, фотодиоды и фототриоды, фотогальваномагнитные фотоэлементы.

Тепловой приемник представляет собой тонкий металлический диск 1 и термочувствительный элемент 3, измеряющий температуру диска (рис. 2.5).

Диск 1, покрытый слоем черни 2, поглощающим падающее на него излучение, нагревается до температуры, при которой мощность, рассеиваемая излучением, теплопроводностью и конвекцией, будет равна поглощаемой мощности. Коэффициент поглощения черной поверхности мало отличается от единицы в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного излучения, если слой черни имеет толщину (до 30-40 мкм), большую, чем максимальные длины волн, на которые рассчитан приемник.

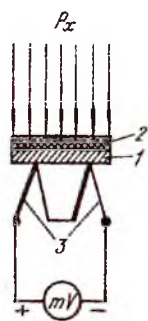


Рис.2.5. Тепловой приемник

Таким образом, выходная величина приемника пропорциональна интегральной мощности P_x падающего на его приемную площадку излучения и не зависит от спектрального состава этого излучения.

Для уменьшения конвективных потерь преобразователь излучения помещают в вакуум (при откачивании воздуха в баллоне до 10^{-4} мм рт.ст. чувствительность возрастает более чем в 10 раз.)

Стеклянная стенка оболочки поглощает излучение и ограничивает спектральный диапазон преобразователя, этот недостаток может быть уменьшен, если применять тонкие окна из кварца, прозрачного для инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Площадь элемента, воспринимающего излучение, не должна превышать сечения падающего пучка лучей и в зависимости от поставленной задачи может составлять от 0,1 до 10^4 мм². В качестве термочувствительного элемента могут быть использованы терморезисторы или батарея терморезисторов, а также пироэлектрический преобразователь или пьезорезонатор, частота которого изменяется в зависимости от температуры.

В ряде случаев преобразователь излучения не имеет специального диска и представляет собой плоскую полосу из двух различных металлов, образующих термопару, или тонкую полосу из металла или полупроводника, изменяющую свое сопротивление в зависимости от температуры. Преобразователи с изменяющимся сопротивлением называются болометрами. Порог чувствительности по мощности излучения, при котором выходное напряжение преобразователя равно эффективному напряжению шумов, составляет для наиболее чувствительных преобразователей излучения 10^{-8} - 10^{-10} Вт. Наименьшая постоянная времени преобразователей 0,5-5 мс [93, 102].

Фотоэлементы, в отличие от тепловых приемников, являются селективными преобразователями, поэтому выходная величина фотоэлементов определяется наряду с интенсивностью падающего на них излучения и его спектральным составом.

Спектральной чувствительностью фотоэлемента называется отношение приращения фототока к изменению монохроматического лучистого потока длиной волны λ :

$$S_{\lambda} = \frac{\Delta I}{\Delta P_{\lambda}}, \text{ мкА/Вт} . \quad (2.3)$$

Зависимость $S_{\lambda} = f(\lambda)$ называется абсолютной спектральной характеристикой фотоэлемента. Практически чаще используется

относительная спектральная характеристика $\gamma_\lambda = S_\lambda / S_{\lambda \max}$, где $S_{\lambda \max}$ - максимальное значение спектральной чувствительности фотоэлемента. Интегральная чувствительность фотоэлемента зависит, как видно из рис.2.6, от степени перекрытия функций спектральной чувствительности фотоэлемента γ_λ и спектральной плотности P_λ лучистого потока:

$$S_p = \frac{\Delta I}{\Delta P} = \frac{S_{\lambda \max} \int_0^\infty P_\lambda \gamma_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty P_\lambda d\lambda} \quad (2.4)$$

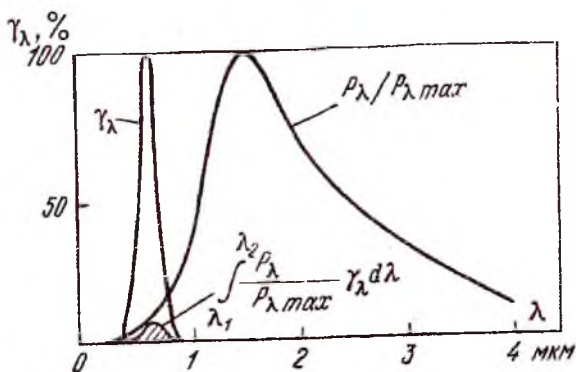


Рис. 2.6. Относительная спектральная характеристика фотоэлемента

Фотоэлементы, предназначенные для работы в видимой области спектра, характеризуются интегральной световой чувствительностью $S_p = \Delta I / \Delta \Phi$, мкА/лм, которая может быть рассчитана по формуле (2.4), если ее знаменатель заменить выражением (2.2). Интегральные чувствительности, приводимые в паспортных данных, определены при использовании стандартных источников: источника типа А ($T=2848$ К) для фотоэлементов с внешним фотоэффектом, источников типа А, Б ($T=2500$ К) и В ($T=2360$ К) для данного фотокаатода. Поэтому длина волны λ_0 называется длинноволновой

границей фотоэлементов с внутренним фотоэффектом. При использовании источников излучения, отличных от стандартных, интегральная чувствительность должна быть пересчитана, например по формуле (2.4).

Чувствительность фотоэлементов определяют, кроме того, при вполне определенных напряжении питания, схеме включения, частоте пульсаций светового потока и т. д. В связи с этим оказываются важными следующие характеристики фотоэлементов, с помощью которых можно корректировать паспортные данные применительно к реальным условиям эксплуатации:

1) вольт-амперная характеристика - зависимость фототока от величины напряжения, приложенного к фотоэлементу, при постоянной величине светового потока;

2) световая характеристика - зависимость фототока от величины светового потока (неизменного спектрального состава) при неизменном напряжении питания, характеризующая нелинейность фотоэлемента;

3) частотная характеристика - зависимость чувствительности от частоты изменения интенсивности светового потока.

Порог чувствительности фотоэлементов ограничивается флуктуационными помехами и темновым током. Величины темновых токов обычно указываются в числе других характеристик фотоэлементов. Верхний предел измерения ограничен наличием эффекта усталости светочувствительного слоя (зависящего от величины светового потока и времени его действия), вызывающего уменьшение чувствительности и смещение спектральной характеристики фотоэлемента. Световая чувствительность восстанавливается после пребывания фотоэлемента в течение некоторого времени в темноте, однако при больших освещенностях уменьшение чувствительности может быть необратимым.

Эффект усталости характеризуется величинами максимально допустимых освещенностей или максимально допустимых выходных

токов и кривыми утомляемости фотоэлементов. Температура окружающей среды влияет на величины флуктуационных помех, темнового тока и чувствительности фотоэлементов, и для некоторых типов фотоэлементов, в особенности подверженных действию температуры (фоторезисторы), в паспорте приводятся и температурные характеристики.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом - это **вакуумные и газонаполненные фотоэлементы и фотоумножители**. Принцип действия этих фотоэлементов заключается в том, что кванты света, достигая чувствительной поверхности (фотокатода), выбивают фотоэлектроны, которые увлекаются внешним электрическим полем и создают фототок. Электрон может покинуть катод, только если энергия фотона больше работы выхода, т. е. $hc/\lambda_0 \geq c\phi$, и, следовательно, излучение с длиной волны $\lambda > \lambda_0$ не может вызвать фотоэмиссии с данного фотокатода. Поэтому длина волны λ_0 является длинноволновой границей спектральной чувствительности фотоэлемента. Для работы в видимой области спектра используются фотокатоды из щелочных металлов: лития, натрия, цезия, калия, рубидия. Спектральные характеристики вакуумных газонаполненных фотоэлементов и фотоумножителей целиком определяются свойствами фотокатодов. На рис. 2.7 приведены такие характеристики для наиболее распространенных серебряно-кислородно-цезиевого (кривая 1), сурьмяно-цезиевого (кривая 2) и многощелочного (кривая 3) фотокатодов [112].

В фотоумножителях для усиления первичного фототока используется вторичная электронная эмиссия. Для этого в фотоумножителях помимо фотокатода и анода вводятся вторичные катоды (эммитеры) и системы фокусировки электронного пучка. Коэффициент вторичной эмиссии в зависимости от материала и свойств поверхности эммитера, скорости электронов может составлять 2,5 - 4. Общий коэффициент усиления в многокаскадных фото-

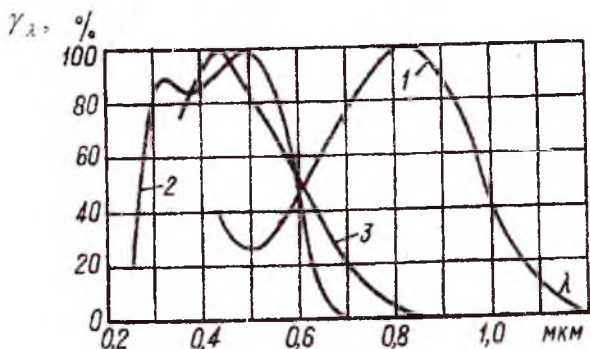


Рис.2.7. Спектральные характеристики распространенных фотокатодов

умножителях может достигать сотен тысяч. Напряжение питания подводится ко всем катодам и аноду посредством резистивного делителя.

Световые характеристики фотоумножителей при малых анодных токах (несколько микроампер) весьма близки к линейным. При больших токах приходится учитывать нелинейность, хотя максимальная величина выходного тока может достигать 1 мА. Явление вторичной электронной эмиссии практически безынерционно, поэтому фотоумножители, как и вакуумные фотоэлементы, могут использоваться для регистрации весьма быстропротекающих процессов.

Конструктивно фотоумножители выпускаются в миниатюрном (ФЭУ60), малогабаритном (ФЭУ62) и обычном (ФЭУ19) исполнении. Параметры промышленных фотоумножителей приведены в работе [100].

Фоторезисторы представляют собой однородную полупроводниковую пластинку, которая при освещении уменьшает свое сопротивление в результате внутреннего фотоэффекта, т. е. вследствие образования дополнительных пар "электрон-дырка" за счет энергии падающих фотонов.

Спектральные характеристики фоторезисторов представлены на рис.2.8, а и определяются свойствами используемых полупроводни-

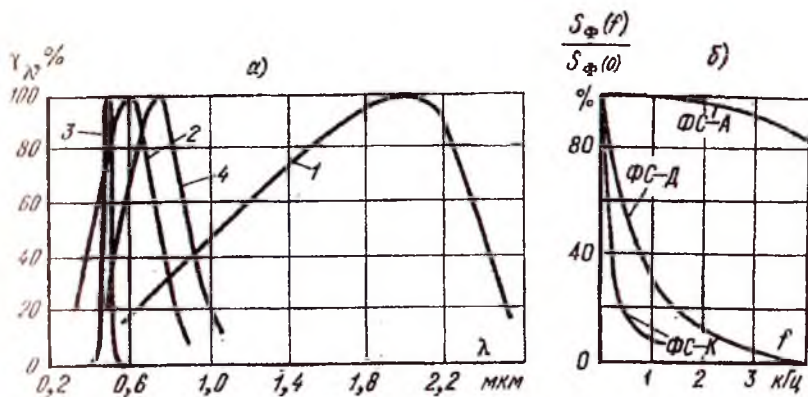


Рис. 2.8. Спектральные и частотные характеристики фоторезисторов

ловых материалов. Кривая 1 характеризует фоторезисторы из сернистого свинца (тип $\Phi\text{C-A}$), кривая 2 - из поликристаллов сернистого кадмия (тип $\Phi\text{C-K}$), кривая 3 - из монокристаллов сернистого кадмия (тип $\Phi\text{C-КМ}$) и кривая 4 - из селенида кадмия (тип $\Phi\text{C-D}$). Фоторезисторы характеризуются кратностью изменения сопротивления под действием света $n = R_{\text{темн}} / R_{\text{свет}}$, которая для различных типов фоторезисторов лежит в пределах от 1,2 до сотен и тысяч. Такое значительное изменение сопротивления нужно иметь в виду при выборе схем включения фоторезисторов, чтобы не получить большой нелинейности.

Вольт-амперные характеристики фоторезисторов линейны в пределах допустимых мощностей рассеяния (0,01 - 0,1 Вт в зависимости от типа и конструкции резистора). Световая характеристика имеет вид $I_{\Phi} = k\Phi_x^n$, где n лежит в пределах 0,5-1. Таким образом, световую характеристику фоторезистора можно считать линейной только при малых уровнях светового потока или малых освещенностях. В частности, для фоторезисторов типа $\Phi\text{C-D}$ световая характеристика линейна примерно до 200-300 лк.

Частотные характеристики фоторезисторов, справедливые для комнатных температур и слабых световых потоков (10^{-5} лм), приведены

на рис.2.8,б. Порог чувствительности фоторезисторов определяется как и в обычном резисторе, тепловыми шумами. Для снижения уровней шумов при измерении слабых сигналов резисторы охлаждаются. Характеристики фоторезисторов (темновое сопротивление, чувствительность, инерционность) сильно зависят от температуры. Темновое сопротивление и чувствительность с ростом температуры уменьшаются, а постоянная времени τ увеличивается. Для большинства фоторезисторов допустимый температурный диапазон составляет от -60 до $+60^\circ\text{C}$. Основные характеристики выпускаемых промышленностью фоторезисторов приведены в работах в [97, 100], некоторые характеристики в качестве примера указаны в табл.2.3.

Таблица 2.3

Характеристики фоторезисторов

Тип фоторезистора	Площадь светочувствительной поверхности, мм ²	S_Φ , мкА/(лм×В)	$R_{\text{темн}}$, Ом	$n = R_{\text{темн}}/R_{\text{свет}}$	τ , с	Температурный коэффициент чувствительности, град/К	$U_{\text{пит}}$, В
ФС-А1	24	500	10^4 - 10^5	1,2	10^{-5}	1,5	4-40
ФС-К4	24	6000	2×10^6	100	$2,5 \cdot 10^{-2}$	0,2	220
ФС-КМ1	1,65	-	10^6	Более 10^3	10^{-2}	0,5-2,0	50-150
Примечание. Здесь S_Φ -интегральная чувствительность при напряжении питания 1 В							

Следует отметить, что фоторезисторы могут иметь самые разнообразные конструктивные решения: герметизированные, с жесткими и мягкими выводами, кольцевой формы и т. д. Представляют интерес дифференциальные фоторезисторы, которые имеют три вывода и могут прямо включаться в дифференциальные измерительные цепи.

В последнее время выпускаются, кроме того, так называемые позиционно-чувствительные фоторезисторы, выполняющие роль бесконтактных реохордов и делителей тока, управляемых перемещением светового пятна.

Генераторные фотоэлементы. В генераторных фотоэлементах, как и в фоторезисторах, используется внутренний фотоэффект в полупроводниках. Однако в них создаются условия, приводящие к пространственному разделению возбуждаемых светом носителей тока (электроны и дырки) и, следовательно, к образованию фото- э. д. с. на контактах фотоэлементов.

Практическое применение в настоящее время имеют методы разделения с помощью магнитного поля и с помощью заборных слоев (p - p -переходов). Соответственно следует различать гальваномагнитные и вентильные (заборные) фотоэлементы.

Гальваномагнитный фотоэлемент (рис.2.9, а) состоит из полупроводникового монокристалла, размещенного между полюсными наконечниками 2 постоянного магнита. Поток излучения, поглощаемый поверхностью кристалла, создает вблизи нее повышенную концентрацию электронно-дырочных пар, которые диффундируют в глубь кристалла. Движущиеся электроны и дырки отклоняются магнитным полем в разные стороны, и между электродами 3 и 4 устанавливается разность потенциалов. Если замкнуть эти электроды на малое внешнее сопротивление, то в цепи возникнет фототок, пропорциональный световому потоку: $i_{\Phi} = kB\Phi_x$

Основным достоинством гальваномагнитных фотоэлементов является возможность измерения инфракрасных излучений (максимум чувствительности при $\lambda = 6,2$ мкм) при весьма малой инерционности, не превышающей 0,2 мкс, что недоступно для других фотоэлементов и для термочувствительных элементов, обычно используемых для измерения инфракрасных излучений. В практических конструкциях гальваномагнитных фотоэлементов в качестве чувствительного элемента используются монокристаллы объемом 1-2 мм³

сурьмянистого индия высокой чистоты. Фотоэлемент размещается в цилиндрическом корпусе, служащем одновременно магнитной системой, индукция в зазоре которой составляет 0,8 Т. При общей массе фотоэлемента 100г энергетическая чувствительность характеризуется величиной порядка 1 В/Вт или примерно 30мА/Вт

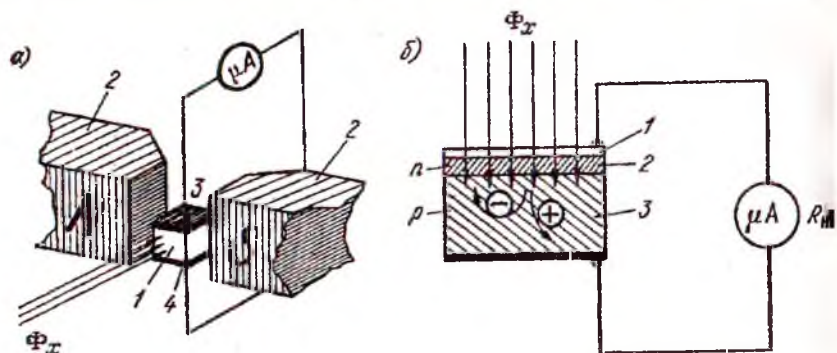


Рис. 2.9. Гальваномагнитный и вентильный фотоэлементы

Вентильный фотоэлемент (рис. 2.9, б) представляет собой полупроводниковый диод, один из электродов которого выполняется полупрозрачным. Световой поток Φ_x , проходит через полупрозрачный электрод 1, тонкий слой 2 полупроводника n -типа и поглощается в прилегающей к нему части пластинки полупроводника p -типа 3. В ней вследствие фотоэффекта образуется повышенная концентрация электронно-дырочных пар. Электроны увлекаются потенциальным барьером на границе p - n -перехода и беспрепятственно проникают в слой 2.

Сопротивление p - n -перехода в обратном направлении $R_{обр}$ составляет десятки килоом, поэтому избыток основных носителей (дырок) вынужден течь через меньшее сопротивление r слоя 3 и сопротивление нагрузки R_H . Сопротивление $R_{обр}$ резко уменьшается с ростом Φ_x , ибо высота потенциального барьера снижается на величину фото-э.д.с. (падение напряжения на сопротивлениях

($r + R_H$). Отсюда следует, что фото-э.д.с. не может превышать потенциального барьера, т. е. 0,1-0,2 В.

Вентильный фотоэлемент можно рассматривать как источник тока $I_{\Phi} = k\Phi$, но в нагрузку поступает лишь ток

$$I_H = I_{\Phi} \frac{R_{обр}(\Phi)}{R_{обр}(\Phi) + r + R_H} = \frac{k\Phi}{1 + (R_H + r)/R_{обр}(\Phi)}. \quad (2.5)$$

Ток в нагрузке линейно зависит от потока только при $r + R_H \ll R_{обр}$, т. е. при малых значениях потока и малых сопротивлениях нагрузки ($R_H \approx 10^2 \div 10^3$ Ом). При больших световых потоках $R_{обр} < r$ и световые характеристики нелинейны даже в режиме короткого замыкания. В качестве примера на рис. 2.10, а приведены световые характеристики селеновых фотоэлементов. Их интегральная чувствительность S_{Φ} составляет 200-500 мкА/лм, а для фотоэлементов из сернистого серебра (Ag_2S) - даже около 1000 мкА/лм. Частотные характеристики селеновых и сернистосеребряных вентильных фотоэлементов представлены на рис. 2.10, б. Инерционность фотоэлементов настолько велика, что они могут

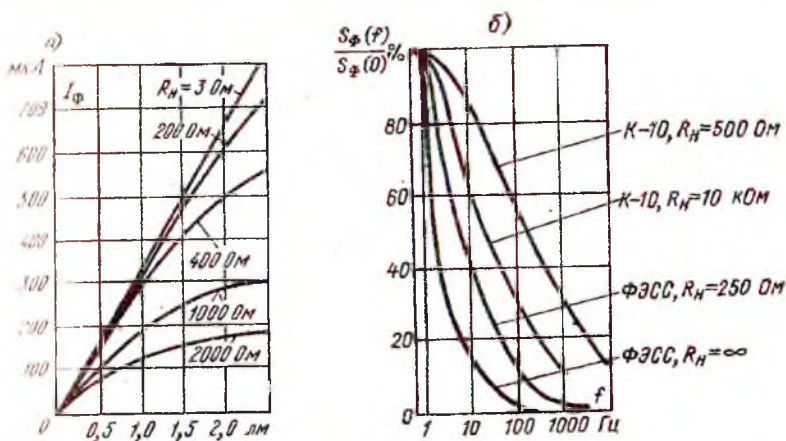


Рис. 2.10. Световые и частотные характеристики вентильных фотоэлементов

использоваться только при постоянных световых потоках. Кривые интегральной чувствительности селеновых фотоэлементов близки, а

при использовании корректирующих светофильтров практически совпадают с кривыми спектральной чувствительности глаза, поэтому селеновые фотоэлементы широко используются в фотометрической аппаратуре (люксметры, экспонометры и т. д.) для измерения освещенности и потоков цветного излучения, ибо дают результаты, согласованные с визуальным фотометрированием.

Фотодиоды представляют собой вентильные фотоэлементы, к которым приложено обратное напряжение (10-30 В) от внешнего источника. При таком включении потенциальный барьер возрастает и определяется внешним напряжением.

Условия проникновения неосновных носителей из освещенной зоны через $p-n$ -переход существенно облегчаются, а обратное сопротивление этого перехода $R_{обр}$ резко возрастает. Вследствие этого возрастает чувствительность, а световые характеристики в широком диапазоне световых потоков становятся строго линейными. При работе в фотодиодном режиме ток, протекающий через нагрузку, способен создать на ней падение напряжения того же порядка, что и напряжение источника питания, при этом величина тока мало зависит от напряжения питания.

Наибольшее практическое значение имеют германиевые и кремниевые фотодиоды. Кремниевые фотодиоды имеют узкую область спектральной чувствительности, ограниченную длинами волн 0,8- 1,2 мкм ($\lambda_{s, max} = 0,9$ мкм). Германиевые фотодиоды также наиболее чувствительны к инфракрасному излучению ($\lambda_{s, max} = 1,5$ мкм). Однако с их помощью можно регистрировать и видимое излучение. Инерционность фотодиодов очень мала и характеризуется постоянной времени $\tau = 10^{-5} \div 10^{-6}$ с. Чувствительность фотодиодов I/Φ_v не зависит от температуры, однако при изменении температуры очень сильно меняется темновой ток, достигающий у германиевых фотодиодов 20-30 мкА при $\Theta = 60^\circ\text{C}$ (2-3 мкА при $\Theta = 20^\circ\text{C}$), у кремниевых фотодиодов эта зависимость меньше. В

В заключение следует отметить, что фотодиоды обладают значительной интегральной чувствительностью $S_{\Phi} \approx 10 \text{ мА/лм}$, имеют малые габариты, не боятся механических нагрузок, имеют длительный срок службы (500-5000 ч). Характеристики фотодиодов приведены в работе [100].

Используя усилительные свойства комбинированных *p-n-p*-или *n-p-n*-переходов (полупроводниковых триодов), можно усиливать десятки раз фототок, возникающий в одном из этих переходов, включенном в запертом направлении (коллекторный переход). Фототриоды имеют световой вход для освещения области базы, и коэффициент усиления первичного фототока составляет 10-20. Полупроводниковые фототриоды обычно включаются по схеме с общим эмиттером и могут не иметь базового вывода.

В последнее время широкое применение получают оптические преобразователи в качестве вспомогательных узлов и элементов измерительных приборов, схем автоматики и телемеханики, вычислительной техники и т. д. В качестве примера можно рассмотреть оптрон, представляющий собой комбинацию миниатюрного источника света и приемника излучения, заключенных в общем корпусе (рис. 2.11).

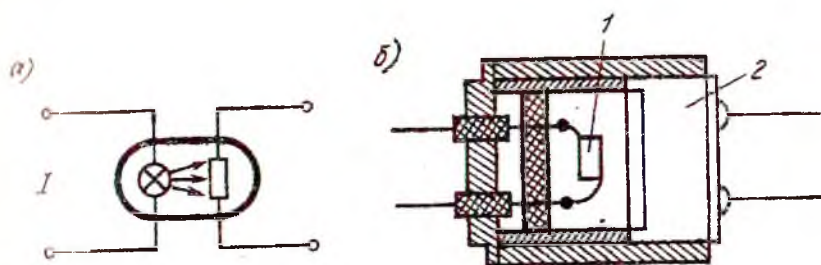


Рис. 2.11. Оптрон

Если в качестве источника света 1 используется светодиод, а в качестве приемника 2-пленочный фоторезистор, то оптрон можно рассматривать как сверхминиатюрный управляемый электрическим

током резистор, причем цепи регулирования и управления оказываются гальванически развязанными, а само управление - маломощным, инерционным, сопротивление может изменяться в пределах от 10^0 Ом (при $I = 0$) до 10^4 Ом (при $I = 10$ мА). Подобные элементы (которые могут быть выполнены также на основе фотодиодов, фототранзисторов) могут быть использованы как управляемые делители тока и напряжения в частотных модуляторах, импульсных генераторах, в качестве логических элементов, в ячейках памяти вычислительных устройств и т. д.

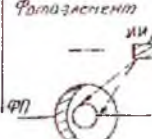
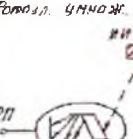
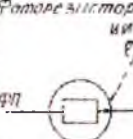
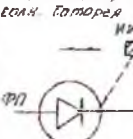
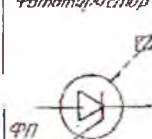
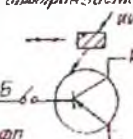
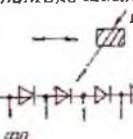
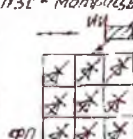



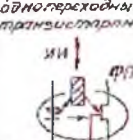
2.2. Сравнительные характеристики оптических преобразователей перемещений

По принципу оптико-электрического преобразования датчики можно разделить на четыре типа: на основе эффектов фотоэлектронной эмиссии, фотопроводимости, фотогальванического и пироэлектрических (табл.2.4).

Фотоэлектронная эмиссия, или внешний фотоэффект, - это испускание электронов при падении света на физическое тело. Для вылета электронов из физического тела им необходимо преодолеть энергетический барьер. Поскольку энергия фотоэлектронов пропорциональна hc/λ (где h - постоянная Планка, c - скорость света, λ - длина волны света), то чем короче длина волны облучающего света, тем больше энергия электронов и легче преодоление им указанного барьера. К датчикам, работающим по этому принципу оптико-электрического преобразования, относятся электровакуумный фотоэлемент и фотоэлектронный умножитель, характеризующиеся высокой чувствительностью, высокой скоростью отклика, возможностью счета фотоимпульсов, а фотоэлектронный умножитель еще и хорошим отношением сигнал-шум и большим выходным сигналом.

Эффект фотопроводимости, или внутренний фотоэффект, - это изменение электрического сопротивления физического тела при

Классификация оптических преобразователей (датчиков) перемещений

<p>15 Фотогальванический</p> <p>16 Фотогальванический</p> <p>17 Фотогальванический</p> <p>18 Фотогальванический</p> <p>19 Фотогальванический</p> <p>20 Фотогальванический</p>	<p>1 Фотоэлемент</p> 	<p>2 Фотоэлектронный умножитель</p> 	<p>3 Фоторезистор</p> 	<p>4 Фотодиод, если фотодиод</p> 
<p>21 Фотогальванический</p> <p>22 Фотогальванический</p> <p>23 Фотогальванический</p> <p>24 Фотогальванический</p> <p>25 Фотогальванический</p> <p>26 Фотогальванический</p>	<p>5 Фототранзистор</p> 	<p>6 Фототранзистор</p> 	<p>7 Линейка диодов</p> 	<p>8 ИАП - ППЗ - ПЗС - Матрицы</p> 
<p>27 Фотогальванический</p> <p>28 Фотогальванический</p> <p>29 Фотогальванический</p> <p>30 Фотогальванический</p> <p>31 Фотогальванический</p> <p>32 Фотогальванический</p>	<p>9 Диодная</p> 	<p>10 Тиристорная</p> 	<p>11 Транзисторная с двухпереходным транзистором</p> 	<p>12 Транзисторная с однопереходным транзистором</p> 

облучении его светом. Среди материалов, обладающих эффектом фотопроводимости, – ZnS, CdS, GaAs, GI, PbS и др. Максимум спектральной чувствительности CdS приходится приблизительно на свет с длиной волны 500 – 550 нм, что соответствует приблизительно середине зоны чувствительности человеческого зрения. Оптические датчики – фоторезисторы, работающие на эффекте фотопроводимости, рекомендуется использовать в фотоэкспонетрах и кинокамерах, в автоматических включателях и регуляторах света, обнаружителях пламени и др. Недостаток этих датчиков – замедленная реакция (50 мс и более).

Фотогальванический эффект заключается в возникновении ЭДС на выводах $p-n$ перехода в облучаемом светом полупроводнике. Под воздействием света внутри $p-n$ перехода появляются свободные электроны и дырки и генерируется ЭДС. Типичные датчики,

работающие по этому принципу, – фотодиоды, фототранзисторы. Первые различаются по рабочей области спектра: ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной. Они отличаются малыми габаритами твердотельной конструкции и не требуют источника электрического питания. Малоинерционные фотодиоды обладают высокой скоростью отклика, особенно у PIN - диодов, а фотодиоды чувствительный к ближней инфракрасной области спектра, – простотой согласования с транзисторами. Фотодиод со встроенной схемой усилителя, чувствительный к видимой области спектра, имеет широкий динамический диапазон, значительный выходной сигнал. В фотокамере используется логарифмичность характеристики.

Фототранзистор характеризуется мощным выходным сигналом, малой стоимостью, хорошим согласованием с транзисторами.

К данному классу датчиков относятся также и фототиристоры, позволяющие управление большими токами, вследствие чего удобно использовать в высоковольтных схемах.

Такой же принцип действия имеет оптико-электрическая часть двумерных твердотельных датчиков изображения, например датчиков на приборах с зарядовой связью (ПЗС-датчиков), характеризующихся простотой объединения матрицы элементов коммутирующей схемой, схемой развертки, регистрами передачи и др.

Для получения электроэнергии из датчиков на фотогальваническом эффекте выделяют солнечные батареи. Достаточно нескольких последовательно соединенных элементов для получения 2,1 - 5,6 В, возможно присоединение резисторов и диодов для ограничения обратного тока, а также интегральных схем для предотвращения перегрузок.

Пироэлектрические эффекты – это явления, при которых на поверхности физического тела вследствие изменений поверхностной температурного "рельефа" возникают электрические заряды соответствующие этим изменениям. Среди материалов, обладающих подобными свойствами, – LiTaC_3 , PbTiO_3 , BaTiO_3 и множество др.

их так называемых пирозлектрических датчиков с встроенным полевым транзистором, который позволяет преобразовать высокое входное сопротивление пирозлектрического элемента с его мизерными электрическими зарядами в более низкое и оптимальное выходное сопротивление датчика. Из датчиков этого типа наиболее часто используются инфракрасные датчики, не требующие охлаждения, а также источники электрического смещения.

Оптрон - комбинированный вид оптических датчиков, фотоприемник с оптическим излучателем.

Основные преимущества оптических датчиков перед датчиками других типов:

Возможность бесконтактного обнаружения.

Возможность (при соответствующей оптике) измерения объектов как с чрезвычайно большими, так и необычайно малыми размерами.

Высокая скорость отклика.

Удобство применения интегральной технологии (оптические датчики, как правило, твердотельные и полупроводниковые), обеспечивающей малые размеры и большой срок службы.

Обширная сфера использования: измерение различных физических величин - перемещения, температуры, давления, плотности и др., определение формы, распознавание объектов и т.д.

Наряду с преимуществами оптические датчики обладают и некоторыми недостатками, а именно чувствительны к загрязнению, подвержены влиянию постороннего света, светового фона, а также температуры (при полупроводниковой основе) [43].

2.3. Фоторезистивные функциональные преобразователи перемещений

Рассмотрим принципы построения прецизионных фоторезистивных функциональных преобразователей (ФФП) малых перемещений на примере логарифмического преобразователя [110].

Известно, что при изменении по линейному закону (рис.2.1) одного из двух (например R_1 , кривая 3), включенных параллельно сопротивлений, суммарное сопротивление R_{Σ} (кривая 2) изменяется по закону, близкому к логарифмическому (кривая 1).

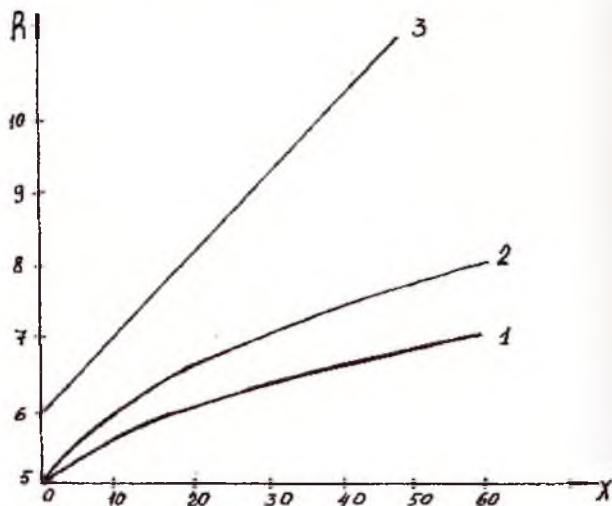


Рис. 2.12. Изменения сопротивлений резисторов в функции координаты

Кривая 3 может быть реализована постоянным затемнением освещенного фоторезистора светонепроницаемой шторкой, перемещающейся вдоль его светочувствительной поверхности. Координата X на рис.2.12 соответствует положению границы "свет-тьень" на плоскости фоторезистора. Как видно из рисунка, кривая 2 изменения суммарного сопротивления на начальном участке совпадает с логарифмической, но при больших X отличается от логарифмической на 10 - 15 %. Очевидно, что для уменьшения отклонения закона изменения суммарного сопротивления от требуемого кривой 1 необходимо скорректировать кривую 2 до логарифмического закона.

Это возможно осуществить двумя способами:

1. Потребовать от R_1 нелинейного изменения сопротивления в функции X , которое корректировало бы кривую 2 до логарифмического закона.

торое сопротивление R_2 параллельной ветви при этом остается постоянным.

Потребовать от R_2 соответственного изменения в функции ординаты X , оставляя при этом закон $R_1(X)$ линейным.

Рассмотрим второй способ, обеспечивающий более высокую эффективность и точность.

Для того чтобы выходное сопротивление R_{Σ} изменялось по логарифмическому закону, например $R_{\Sigma} = \ln x + C$, где C - константа, изменение R_2 должно соответствовать закону

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot (\ln x + C)}{R_1 - (\ln x + C)}. \quad (2.6)$$

Графически эта зависимость изображена кривой 2 на рис.2.13.

Осуществляя кусочно-линейную аппроксимацию кривой 2 с требуемой точностью, определим коэффициенты отрезков прямых на участках аппроксимации.

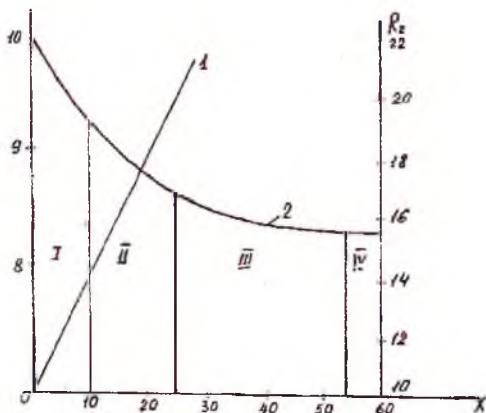


Рис. 2.13. Изменения сопротивлений резисторов по заданному закону

Расчеты показали, что точности логарифмического преобразования R_{Σ} соответствует кусочно-линейная аппроксимация на четырех отрезках полиномами первой степени, причем относительная погрешность аппроксимации на участках не превышает

$$\varepsilon_c = \max \left(\frac{y_i - p_i(x)}{y_i} \right) \leq 0,005, \quad (2)$$

где $P_i(x) = a_i + b_i x$;

y_i - значение функции на i -м участке аппроксимации;
 a_i, b_i - коэффициенты аппроксимирующих полиномов.

Коэффициенты полиномов находятся из условия минимума среднеквадратической погрешности:

$$\delta = \sum_{i=0}^n (y_i - p_i(x))^2, \quad (2)$$

где n - число участков аппроксимации, причем в точках сопряжения обеспечивается совпадение значений аппроксимирующего полинома с аппроксимируемой функцией. Принципиальная схема оптоэлектронного преобразователя малых перемещений приведена на рис. 2.14, а.

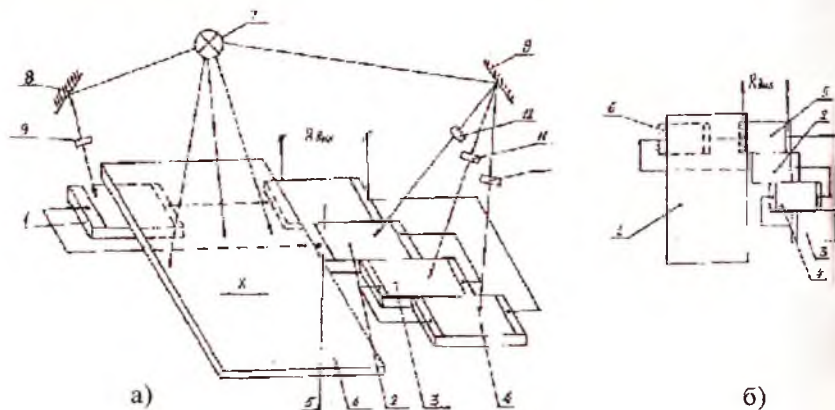


Рис. 2.14. Схема построения функционального преобразователя

Преобразователь состоит из фоторезисторов 1,2,3,4 и 5, которые прикрыты подвижной светонепроницаемой шторкой 6. Затемненные фоторезистор 1 и освещенные фоторезисторы 2,3 и 4 соединены между

Фоторезисторы 1, 2, 3 и 4 включены параллельно освещенному фоторезистору 5. Фоторезисторы 1, 2, 3 и 4 имеют дополнительную боковую подсветку от осветителя 7 через систему зеркал 8 и фильтры 9, 10, 11, 12 с различной оптической плотностью. Расположение подвижной шторки относительно фоторезисторов в исходном состоянии поясняется на рис. 2.14, б. Принцип действия преобразователя заключается в следующем.

Преобразуемые перемещения "X" воспринимаются светопропускаемой шторкой 6, которая при своем движении затемняет освещенные фоторезисторы 2, 3, 4, 5 и открывает затемненный фоторезистор 1. Сопротивление фоторезистора 5 при движении шторки изменяется по линейному закону (кривая 1, рис. 2.13) и соответствует в формуле (2.6) сопротивлению R_2 . А сопротивлению R_1 той формулы соответствует сумма сопротивлений фоторезисторов 1, 2, 3, 4, включенных последовательно:

$$R_1 = R_{\Phi 1} + R_{\Phi 2} + R_{\Phi 3} + R_{\Phi 4}.$$

Расположение фоторезисторов 1, 2, 3 и 4 выбрано в соответствии с шириной расчетных участков аппроксимации так, что на первом участке при движении шторки 6 освещается только фоторезистор 1 и изменяется (уменьшается) лишь сопротивление $R_{\Phi 1}$, на втором участке изменяется (увеличивается) сопротивление $R_{\Phi 2}$ второго фоторезистора, на третьем и четвертом участках аналогично второму. Ширина участков аппроксимации, определенная расчетами по допустимой погрешности преобразования, равной 0,5 %, составляет соответственно 0,166; 0,234; 0,485; 0,1 от диапазона преобразуемых перемещений. Этим и определяется интервал между границами фоторезисторов 2, 3, 4 и 5. Уровень освещения фоторезисторов 1, 2, 3 и 4 выбран с учетом обеспечения требуемого угла наклона отрезков прямых на участках аппроксимации, что определяется соответствующей оптической плотностью фильтров 9, 10, 11 и 12. Принципиально в рассмотренной выше конструкции логарифмического преобразователя возможно увеличение количества участ-

ков аппроксимации с целью расширения диапазона и повышения точности преобразования. В этом случае необходимо определить новые значения как коэффициентов аппроксимации, так и ширины этих участков, учитывая при этом соответствующую ориентацию тродов фоторезистора.

Отметим, что варьируя оптической плотностью светофильтра, выбирая количество и изменяя взаимное расположение фоторезисторов, можно получить фактически любой закон функционального преобразования. Это позволяет использовать преобразователь в качестве универсального функционального позиционно-чувствительного датчика микроперемещений, при возможности его использования как на постоянном, так и переменном токе, высокая точность, технологичность и надежность выгодно отличают его от других конструкций функциональных преобразователей.

Применение волоконной оптики в подобных конструкциях позволяет, используя тот же принцип функционального преобразования, существенно упростить его конструкцию, применив, например, один фоторезистор (рис.2.15, а).

Связь между фоторезистором 2 и источниками света осуществляется волоконно-оптическими световодами 4, выходные зрачки которых сформулированы в виде расположенных последовательно друг за другом прямоугольников, перекрывающих междуэлектродное расстояние. Каждый из выходных зрачков световодов освещается отдельным источником света, интенсивность излучения которых регулируется потенциометрами. При соответствующей настройке здесь также можно получить логарифмический характер изменения выходного сопротивления (рис.2.15, б). При этом не исключается возможность использования фильтров различной оптической плотности на входных зрачках и одного источника света. Волоконно-оптические функциональные преобразователи отличаются конструктивной простотой, универсальностью и схем

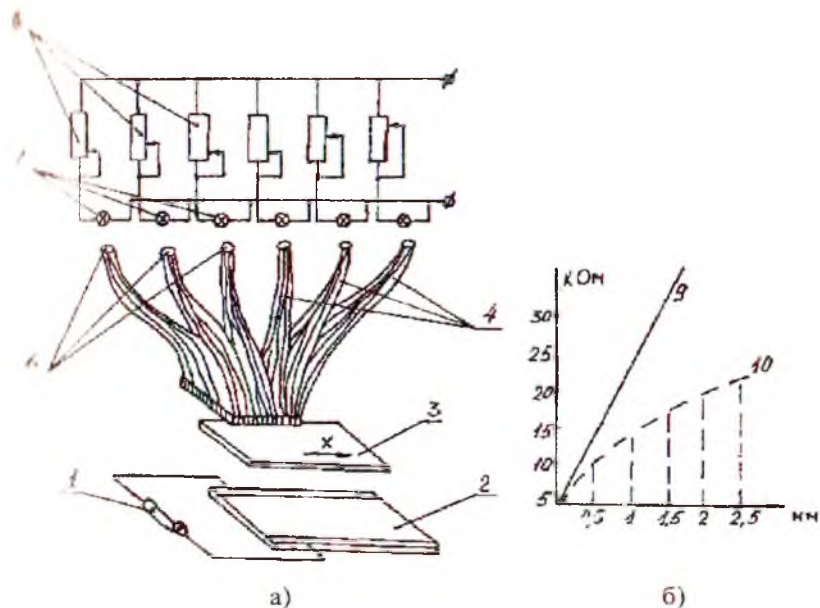


Рис. 2.15. Схема построения волоконно-оптического ФФП

технической гибкостью, обеспечивают высокую чувствительность и точность функционального преобразования.

В зависимости от назначения в пилотажно-навигационной системе конструкция ФП может быть различной, но принцип построения может быть единым.

Например, для анероидного чувствительного элемента (ЧЭ) возможна следующая схема построения ФФП (рис.2.16). ФФП содержит чувствительный элемент 3 с укрепленным на шарнирах зеркальцем 4, которое освещается световым зондом, сформированным цилиндрической линзой 2 и источником света 1. Отраженные лучи света от зеркала 4 поступают на вход волоконно-оптического коллектора 5, выходные торцы которого разведены по соответствующим фотоприемникам ФР1-ФР4. Выходные торцы волоконно-оптического коллектора сформированы в виде

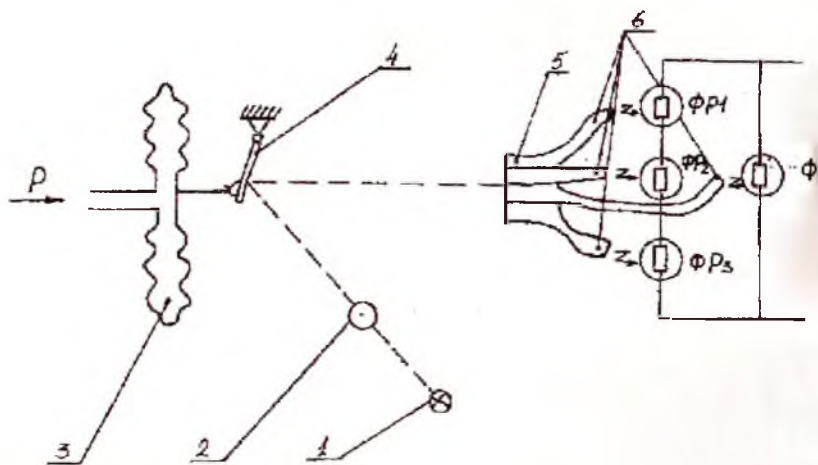


Рис. 2.16. Схема построения ФФП с анероидным чувствительным элементом

прямоугольников 2, 7, 10 и 13 (рис.2.17) и установлены в пазах 6, 8 и 11 панели 14 с возможностью перемещения с помощью фрикционов 3, 4, 9 и 12.

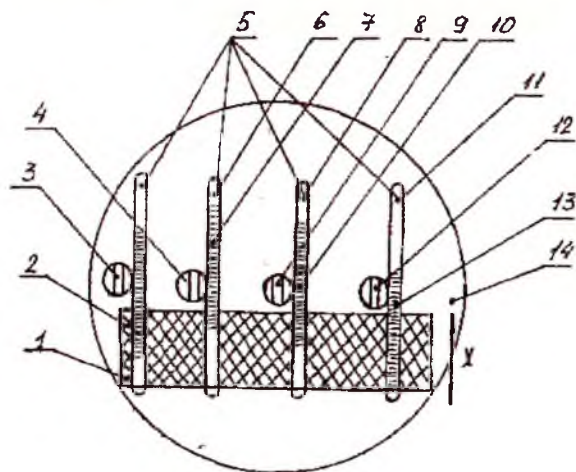


Рис. 2.17. Взаимное расположение входных торцев светодиодов и светового зонта

При соответствующей установке с помощью фрикционных 3, 4, и 12 сформированных входных торцов 2, 7, 10 и 13 световодов поперечно подвижного светового зонда 1 достигается требуемая поперечно-линейная аппроксимация выходной статической характеристики, аналогичной описанной выше (рис.2.14).

2.4. Волоконно-оптические датчики перемещения

ВОДП являются неотъемлемой частью систем автоматического управления различными технологическими процессами. Во многих случаях перемещение объекта, изменение параметров вибраций или других физических величин, связанных с перемещением, является определяющей характеристикой состояния контролируемого объекта [2, 82, 87, 90]. Например, частотный спектр пульсаций давления в компрессоре газотурбинного двигателя несет информацию о состоянии двигателя, на основании которой можно прогнозировать наступление резонансного состояния. Измерение параметров вибраций лопаток газотурбинного двигателя служит для диагностики состояния лопаточного венца [96]. Таким образом, широкий класс задач при непрерывном контроле качества промышленной продукции сводится к задаче измерения перемещений.

ВОДП обладают небольшими габаритными размерами, массой, уровнем потребляемой мощности по сравнению с датчиками другой физической природы. Они не чувствительны к электрическим и электромагнитным полям, влажности. В волоконно-оптических датчиках могут модулироваться интенсивность проходящей световой волны (амплитудная модуляция), фаза, состояние поляризации света, спектральный состав излучения.

Фазовые датчики используют эффект накапливающегося изменения фазы в протяженном отрезке волокна. Поэтому их динамический диапазон и порог чувствительности зависят от длины волоконного отрезка чувствительного элемента, следовательно,

теоретически достижимы любые требуемые значения. Однако фазовые датчики имеют большие размеры. Для них используется одномодовое волокно, что значительно усложняет их изготовление. Наконец, для детектирования сигнала необходимо применять когерентные методы гомо- и гетеродинамного детектирования [25].

Поляризационные волоконно-оптические датчики могут использоваться в локализованной и распределенной конструкции в зависимости от того, какой элемент - встроенный преобразователь или само волокно - применяется для поляризационной модуляции света в волокне [27]. Для детектирования поляризационно-модулированного сигнала применяется схема со скрещенными поляризаторами. Существует ряд ограничений, препятствующих широкому применению поляризационных датчиков: двулучепреломление в волокне, высокочастотный эффект Керра, релеевское рассеяние в световодном волокне, эллиптичность волокна, механические напряжения и другие причины, снижающие вырождение поляризации в одномодовом волокне, являющиеся источником ошибок и шумов в поляризационных датчиках.

Простейшими и, как правило, наиболее дешевыми являются ВОДП с амплитудной модуляцией интенсивности световой волны, сокращенно именуемые амплитудными. Они имеют малые габаритные размеры, поскольку чувствительные элементы представляют собой либо специально встроенные в волоконно-оптический тракт модулирующие устройства, либо введенную в волоконную линию неупругость (разрыв, изгиб и т.д.). Другим достоинством таких датчиков является их совместимость с простыми в работе и доступными по цене системами передачи информации по многомодовым волокнам. Наконец, для детектирования амплитудно-модулированного по интенсивности светового сигнала применяется обычная методика фотодетектирования. Амплитудные датчики позволяют с практически достаточной точностью измерять линейные перемещения, абсолютное давление, перепад давлений

формы, ускорения, пульсации давления и т.д. [28,115]. Амплитудные датчики можно классифицировать следующим образом [54]: устройства, в которых регистрируемое физическое возмущение модулирует мощность источника излучения; устройства с детектированием пучка света, интенсивность которого модулируется помещенным на его пути attenuатором. Attenuатором могут служить, в частности, непрозрачный подвижный экран, перекрывающий при своем перемещении часть поперечного сечения пучка света. Устройства с детектированием мощности световой волны, модулируемой изменениями положения отражателя, помещенного между источником излучения и фотоприемником. ВОДП в этом случае можно называть рефлектметрическими [35].

Рассмотрим ВОДП рефлектметрического типа [3,106,108]. Принцип работы таких датчиков состоит в следующем. Параллельно отражающей свет поверхности 3 (рис.2.18) располагают торцы чувствительных ВС 2 и приемных ВС 4, связанных соответственно с источником излучения 1 и фотоприемником 5. По величине сигнала фотоприемника U и по функциональной зависимости $U=f(z)$, которая получена при некоторых начальных значениях мощности источника 1, чувствительности фотоприемника и коэффициента отражения от поверхности контролируемого объекта, определяют величину Z расстояния до объекта [34].

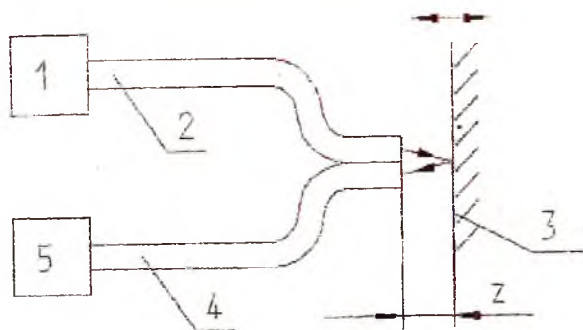


Рис. 2.18. Одноканальный ВОДП рефлектметрического типа

ВОДП рефлектометрического типа присущи следующие недостатки: под действием мешающих факторов, например в результате изменения питающих напряжений, старения и т.д. может изменяться мощность источника излучения и чувствительность фотоприемника, что приводит к ошибке в определении величины Z ; коэффициент отражения света от контролируемой поверхности различен для разных объектов (зависит от типа материала и качества обработки поверхности) и, что очень существенно, может изменяться со временем (запыление поверхности, окисление в неблагоприятной среде или при повышенных температурах), что в свою очередь также приводит к погрешности при определении величины Z ; наличие внешних засветок оказывает существенное влияние на результат измерений; ФП ВОДП существенно нелинейна, ограничивает диапазон измерений.

Длина линейного участка ФП существующих ВОДП, имеющих погрешность измерения, обусловленную нелинейностью ФП (более 6%), не превышает 50-100 мкм. Экспериментальная проверка ВОДП при измерении перемещений различных объектов, в частности, зеркал и пластин из стали, меди, бронзы, латуни и алюминия показала, что чувствительность в рабочей точке при отражении зеркальной поверхности на 10% (и более) выше, чем на остальных образцах, где разброс не превышает 1% относительно среднего значения [31]. Изменения мощности источника излучения вносят пропорциональные погрешности в результат измерений. Таким образом, разработка устройств и алгоритмов обработки сигналов, исключающих влияние вышеназванных погрешностей на результат измерений, является актуальной.

2.5. Методы коррекции погрешностей волоконно-оптических датчиков перемещений

Рассмотрим существующие методы компенсации погрешностей ВОДП и устройства, в которых частично устранены указанные в разд. 2.4 недостатки.

более простым способом коррекции является компенсация снижения чувствительности ВОДП пропорциональным изменением мощности источника излучения [35]. Если отражающие свойства контроля или мощность источника излучения изменяются с течением времени, то реальная ФП будет выше (кривая 2) или ниже (кривая 3) номинальной (кривая 1) ФП (рис.2.19), по которой отсечены значения максимального сигнала с выхода фотоприемника, сигнала, соответствующего начальному рабочему зазору - установочному зазору Z_0 , и чувствительность ВОДП

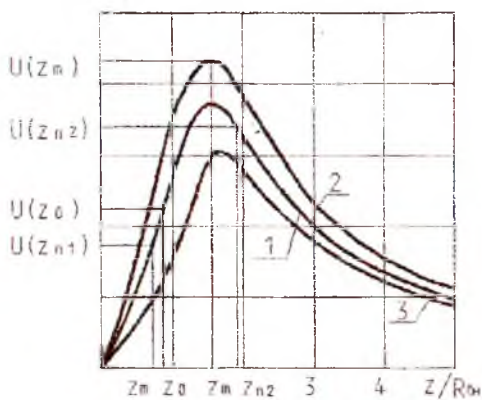


Рис.2.19. Рефлектометрический ВОДП и влияние на него дестабилизирующих факторов

Для коррекции предлагается перемещать торец волоконно-оптического жгута относительно контролируемой поверхности. В момент появления максимального выходного тока фотоприемника чувствительность потока излучения источника изменяется так, чтобы максимум кривой соответствовал требуемому значению. Затем торец приближается к контролируемой поверхности до тех пор, пока боковая составляющая сигнала фотоприемника не будет соответствовать оптимальному расстоянию Z_0 [35]. Однако такой

способ коррекции можно использовать только тогда, когда фФП не изменяется при изменении отражающих или рассеивающих свойств или форм контролируемого объекта. Кроме того, значительно увеличивается время измерений, так как в процессе контроля необходимо сначала отодвинуть торец жгута световодов для определения максимального сигнала фотоприемника, а затем приблизить к контролируемой поверхности для установки оптимального расстояния.

Автоматизировать процесс коррекции позволяет метод "коррекции в движении" [1], если измеряемые перемещения быстро изменяются во времени. Тогда постоянная составляющая сигнала с фотоприемника характеризует расстояние до отражающей поверхности в соответствии с ФП, а переменная составляющая сигнала при установке торца жгута световодов в Z_0 будет нести информацию о параметрах вибрации. Данный метод реализуется с помощью схемы, приведенной (рис. 2.20).

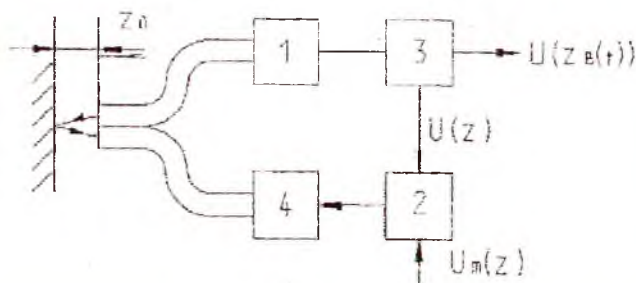


Рис. 2.20. Схема автоматической коррекции чувствительности ВОДП

Сигнал с фотоприемника поступает на вход блока 3 разделенный на постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая сигнала через блок 2 сравнения поступает на блок 4 управления токочем источника излучения. При движении торца жгута световодов в направлении отражающей поверхности происходит выбрание максимального значения постоянной составляющей сигнала.

приемника. Это значение сравнивается с максимальным значением линейной ФП, затем производится соответствующая коррекция источника. Недостатками метода являются невозможность точной величины зазора при неподвижном жгуте световодов, высокая точность задания величины установочного зазора, что ведет к выходу рабочей точки за пределы линейного участка ФП, что, в свою очередь, снижает точность измерения вибрации. Этот метод не отличается высоким быстродействием, поскольку не позволяет сразу установить торец жгута световодов на оптимальном расстоянии от вибрирующей поверхности.

Один из методов автоматической коррекции погрешностей ВОДП состоит в том, что вблизи от контролируемой поверхности устанавливается расщепленный осветительный световод, связанный с источником 1 излучения (рис. 2.21), и два неравноудаленных от контролируемой поверхности приемных световода, подключенных к соответствующим фотоприемникам 2 и 3 [35].

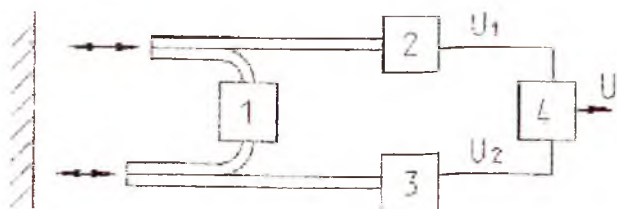


Рис. 2.21. Двухканальный ВОДП с разноудаленными каналами измерения

Приемные световоды образуют вместе с торцами осветительного канала измерения. Величину смещения измерительных каналов друг относительно друга выбирают такой, чтобы в том случае, когда сигнал U_1 фотоприемника 2 соответствует точке максимума ФП ВОДП, сигнал U_2 фотоприемника 3 соответствовал бы точке перегиба ФП ВОДП. В блоке 4 определяется соотношение сигналов U_1 и U_2 . В процессе установки зазора Z_0 передвигают жестко соединенные между собой световоды и запоминают значение U_1 ;

с первого канала измерения. Сравнивая значения U_{1i} между собой определяют точку максимум ФП. По сравнению с рассмотренными выше методами описываемый метод обладает более высоким быстродействием, поскольку благодаря наличию второго канала измерения нет необходимости с помощью одного и того же светового луча определять и точку максимума, и установочный зазор Z_0 .

Метод имеет следующие недостатки:

1) Само абсолютное значение величины U_1 не несет в себе информации о наличии максимума функции $U = f(Z)$ в данной точке. Приходится сравнивать величину U_1 с предыдущими значениями и анализировать полученные результаты. Это затрудняет практическую реализацию метода. Таким образом, определение величины установочного зазора возможно только при продолжительном изменении зазора, что исключает возможность контроля этой величины с помощью неподвижных световодов.

2) Так как наклон ФП ВОДП в точке максимума практически равен нулю (см. рис.2.19), то точность задания в этом методе величины установочного зазора небольшая, так как случайные ошибки измерения U_{1i} приводят к большим ошибкам в оценке Z_0 (сигнал U_1 в точке максимума почти не зависит от величины Z). Этот недостаток усугубляется еще и тем, что приходится анализировать не саму величину U_1 , а разности между величинами U_{1i} .

3) В процессе измерения виброперемещения величина U_1 может измениться в силу различных факторов, например уменьшения коэффициента отражения поверхности контролируемого объекта. При этом в рассматриваемом способе не представляется возможным определить, а следовательно, и учесть, чем это изменение вызвано.

а) уменьшением мощности источника излучения или изменением коэффициента отражения поверхности контролируемого объекта.

б) изменением величины установочного зазора. Причем неясно, в какую сторону необходимо изменить Z , так как величина U_1 уменьшается при отклонении Z от точки максимума в любую сторону.

Реализация метода предусматривает использование двух каналов зрения. Однако в рабочем режиме только один канал "чувствует" ишню, т.е. с точки зрения получения максимальной чувствительности способ не оптимален, так как один из каналов не "чувствует" ишню. Неточная установка необходимого зазора по причинам, указанным в пп. 1-3, приводит к тому, что рабочий участок выходит за пределы линейности ФП ВОДП, что увеличивает погрешность измерений. Аналогичный метод коррекции [35] основан на использовании трехпучкового световода (рис. 2.22).

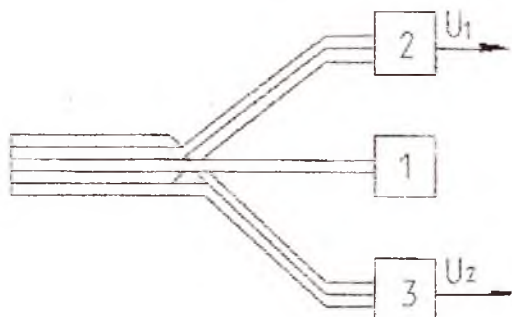


Рис. 2.22. ВОДП с трехпучковым световодом

Контролируемую поверхность освещают с помощью осветительного световода, а с помощью двух приемных световодов и связанных с ними фотоприемников получают сигналы U_1 и U_2 . По переменной составляющей сигнала U_2 судят о виброперемещении. Недостатком метода является его сложность при практической реализации, т.к. путем подгона конструктивных параметров трехпучкового световода необходимо добиться, чтобы при одном и том же установочном зазоре Z_0 сигнал U_2 соответствовал бы точке перегиба ФП ВОДП, а сигнал U_1 - точке максимума ФП. Необходимую величину установочного зазора Z_0 определяют так же, как и в методе использования двух неравноудаленных от контролируемой поверхности световодов, поэтому этому методу присущи те же недостатки.

ВОДП положения [101], содержащий ВС, сохраняющий поляризацию источника излучения, позволяет повысить точность измерений. Повышение точности достигается за счет применения когерентного оптического детектирования. Пучок от лазерного источника проходит через лучерасщепитель и фокусируется объективом на вход ВС, направляющего луч света на контролируемой поверхности. Между выходным торцом ВС и поверхностью расположена четвертьволновая пластина. На выходе ВОДП формируется сигнал, содержащий информацию о расстоянии между торцом и контролируемой поверхностью. Недостатком устройства является сложность конструкции датчика: необходимость применения когерентного источника излучения, а следовательно, лазера, больших одномодовых ВС, фокусирующих объективов для обеспечения необходимой точности позиционирования светового луча в сердцевину ВС, диаметр которой для одномодовых волокон составляет несколько мкм. Кроме того, диапазон измерений ВОДП ограничен амплитудой фазовой модуляции и не превышает 1 - 2

ВОДП [40] содержит три волоконных световода. Через первый световод на объект падает световой поток. Через второй и третий световоды отраженный объектом свет поступает на два фотоприемника. Входной торец второго световода расположен ближе к выходному торцу первого. В зависимости от расстояния до поверхности объекта изменяется как абсолютное значение интенсивности светового потока, попадающего на фотоприемники, так и отношение интенсивностей этих пучков. Характер зависимости отношения интенсивностей пучков от расстояния до объекта известен. По результатам анализа с помощью ЭВМ преобразованных в цифровой код интенсивностей световых пучков, воспринятых фотоприемниками, определяется перемещение объекта. Недостатком устройства является влияние на результат измерений внешних засветок. Таким образом, анализ существующих методов коррекции погрешностей рефлектометрических ВОДП и существующих ВОДП

структурной избыточностью показал, что они не позволяют устранить недостатки, свойственные ВОДЛ и отмеченные в разд. 2.4.

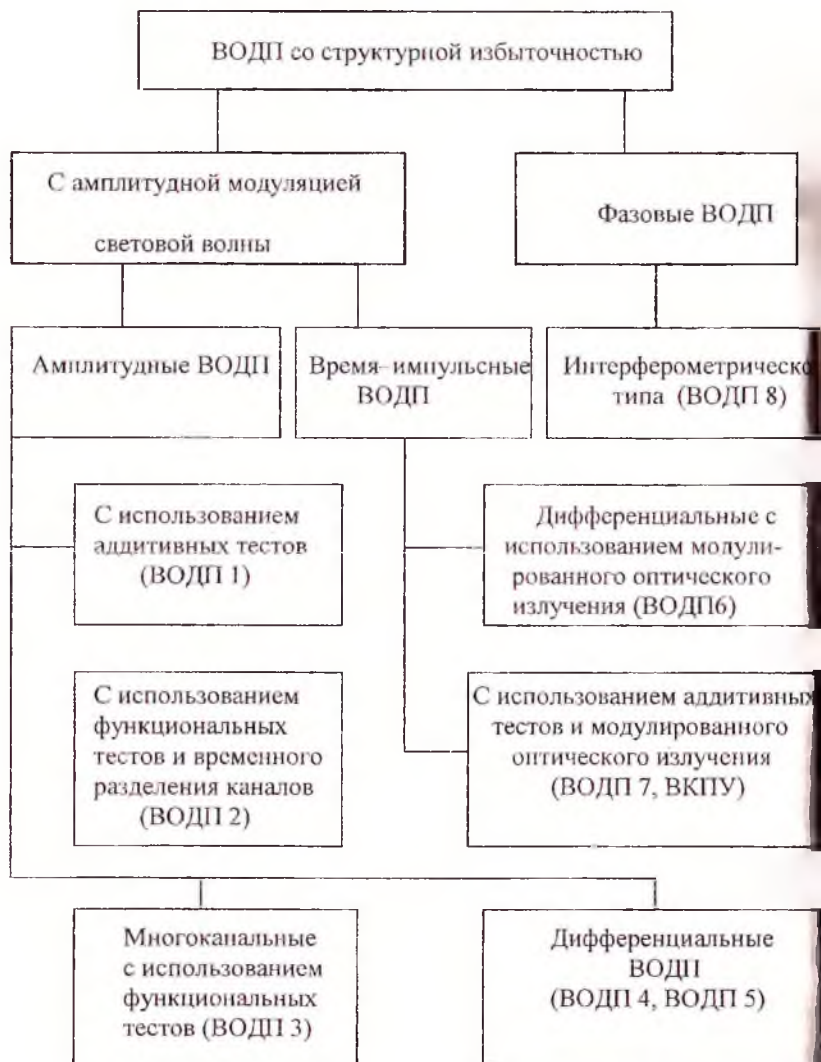
2.6. Методы коррекции погрешностей волоконно-оптических датчиков перемещений структурной избыточностью

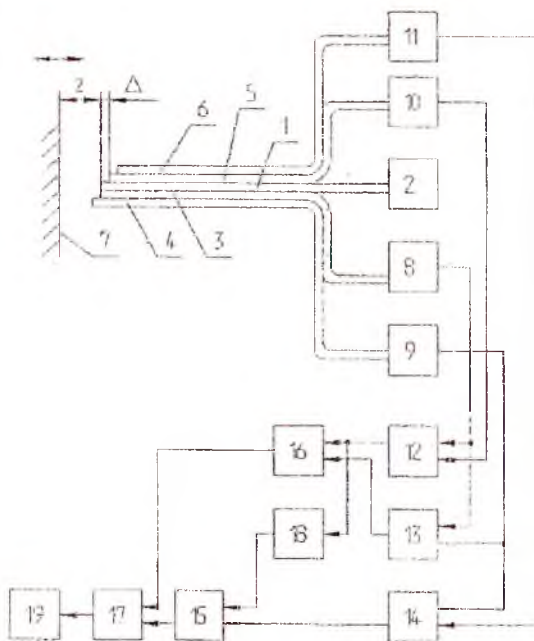
Анализ существующих методов повышения точности измерений применительно к ВОДП показал, что возможности конструктивно-технологических методов [4,5,29,85,86,75,61] весьма ограничены. Так, в устройстве [4] коррекция нелинейности ФП осуществлялась в результате совмещения в одном устройстве каналов измерения различной физической природы: оптической и электромагнитной. Однако для каждого из измерительных каналов, входящих в устройство, практически сложно сформировать ФП, обладающие нелинейностью заданного вида. Поэтому погрешность от нелинейности ФП устройства в целом оказывается значительной.

Структурные методы [22,56,98,103] основаны на введении дополнительных каналов измерения и (или) выполнении дополнительных измерений, несущих информацию о погрешностях измерений, и позволяют исключить эти погрешности из результата измерения. Например, в устройстве [7] за счет введения двух дополнительных каналов определяются параметры ФП датчика, что позволяет повысить точность измерения. В результате применения структурных методов к ВОДП удалось устранить недостатки датчиков рефлектометрического типа, указанные в разд. 2.4 и 2.5.

Классификация созданных ВОДП со структурной избыточностью приведена в табл.2.5. Здесь и далее по тексту под Z будем понимать величину перемещения, нормированную относительно внешнего сигнала $K_{\text{из}}$ торца жгута ВС. В ВОДП 1 [80] используются пять жгутов (см. рис. 2.23): излучающий жгут 1, связанный с источником

Классификация разработанных ВОДП со структурной избыточностью





Амплитудный ВОДП с использованием аддитивных тестов (ВОДП 1) (рис. 2.13). Излучающий, первый, второй, третий и четвертый приемные жгуты 1, 3 и 6 соответственно, торцы которых параллельны поверхности контролируемого объекта.

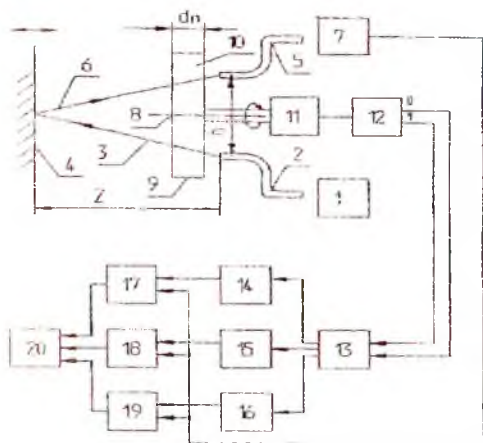
Торцы световодов 4, 5 и 6 смещены относительно торцов излучающего и первого приемного световодов 1 и 3 на фиксированные расстояния, соответственно, $-\Delta$, Δ и 2Δ . Оптические оси торцов жгутов 3, 4, 5 и 6 расположены на одинаковом расстоянии от оптической оси торца излучающего жгута 1. Устройство содержит четыре фотоприемника 8, 9, 10 и 11, оптически связанных с приемными жгутами ВС 3, 4, 5 и 6 соответственно, преобразователями 12, 13, 14 и 15 вычитания, блок 16 сложения, блок 17 масштабирования, масштабный преобразователь 18 и блок 19 индикации. Способ бесконтактного измерения перемещений осуществляется согласно следующему выражению:

$$Z_g = \frac{U_2 - 2U_1 + U_3}{3U_1 - U_2 - 3U_3 + U_4} \Delta,$$

где U_1 , U_2 , U_3 и U_4 , - сигналы на выходах соответствующих фотоприемников 8, 9, 10 и 11; $Z_g = Z - Z_{п}$, $Z_{п}$ - точка перегиба зависимости $U = f(Z)$.

Способ [64] и ВОДП 1 позволяют исключить влияние на результаты измерений коэффициента отражения поверхности объекта контрольных изменений мощности источника 2 и внешних засветок. Однако, показано в главе 4, использование аддитивных тестов в ВОДП сопровождается появлением существенной методической погрешности (более 20%), связанной с отклонениями реальных ФП ВОДП от теоретической модели.

В связи с этим были предложены ВОДП с использованием функциональных тестов (ВОДП 2, ВОЛП 3) [89]. Построение таких датчиков возможно на основе как временного, так и пространственного разделения каналов измерения. ВОДП 2 (рис. 2) с временным разделением каналов содержит источник 1 излучения, излучающий жгут ВС 2, формирующий падающий луч 3 светового луча, отражающийся от поверхности 4 контролируемого объекта, приемный жгут 5, принимающий часть отраженного луча 6, фотоприемник 7, комбинируемую пластину 8. Пластина 8 состоит из расположенных в одной плоскости и соединенных встык прозрачной и полупрозрачной пластин 9 и 10 соответственно. Устройство содержит также микродвигатель 11, вращающий комбинируемую пластину 8, преобразователь 12 угол-код, дешифратор 13, а также первый, второй, третий одновибраторы 14, 15, 16, первый, второй и третий блоки памяти 17, 18 и 19, вычислительный блок 20. Измеряемое расстояние Z зависит от величины функционального теста, пропорционального длине пути светового луча в пластине. Результат измерений ВОДП 2 не зависит от изменений мощности источника излучения, параметров фотоприемника, коэффициента отражения поверхности контролируемого объекта и внешних засветок.



14 ВОДП с использованием функциональных тестов и временного разделения каналов измерения (ВОДП2)

проектировать конструкцию ВОДП 2 можно, если значение Z вычислять, исходя из величины $p = (U_3 - U_2)/(U_2 - U_1)$ по заранее известной зависимости $Z = f(p)$. Такой подход иллюстрирует ВОДП 3 с пространственным разделением каналов измерения, представленный на рис. 2.25. Устройство содержит источник излучения оптический жгут ВС 2, первый, второй, третий приемные жгуты (3, 4) три фотоприемника 6, 7 и 8, три блока вычитания 9, 10 и АЦП 12, ПЗУ 13, индикатор 14, источник опорного напряжения 15, инвертиратор 16. В отличие от существующих ВОДП в ВОДП 3 вместо 3 приемных, коаксиально расположенных жгутов ВС. К основным преимуществам устройства можно отнести независимость результата измерения от коэффициента отражения контролируемой поверхности, изменений мощности источника излучения, а также наличие фоновых выходов. При измерении вибраций, пульсаций давления основной является задача установки и контроля рабочего расстояния (опорного зазора) между торцом волоконного жгута и поверхностью контролируемого объекта.

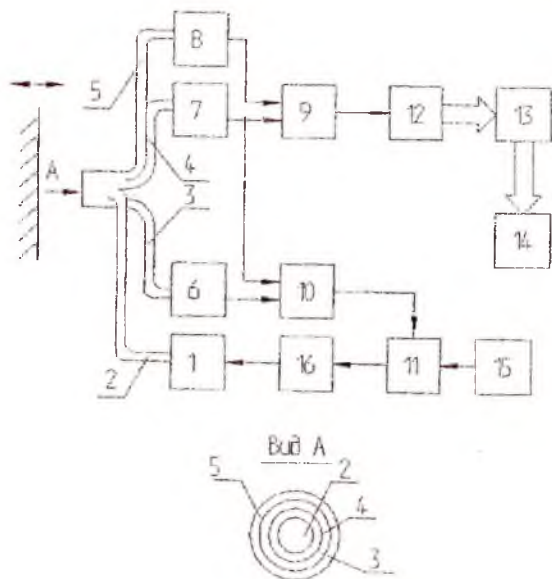


Рис. 2.25. Трехканальный ВОДП с использованием функциональных тестов (ВОДП 3)

Проведенный в разд. 2.5 анализ показал, что главными недостатками существующих волоконно-оптических датчиков вибрации являются неточный выход на линейный участок ФП и зависимость чувствительности датчиков вибраций к изменению коэффициента отражения поверхности объекта, мощности источника излучения и т.д.

На рис. 2.26 изображена структурная схема оригинального датчика вибрации [13] - ВОДП 4, обладающего сравнительно простым способом [13] обработки сигналов с фотоприемников измерительных каналов и несложной конструкцией, позволяющей устранить указанные недостатки. Датчик содержит стабилизатор 1 и источник 2 света и излучающий жгут 3, приемные световоды 4 и связанные с ними фотоприемники 7 и 8, блок 9 сложения, интегратор 10, блок 11 вычитания, фильтр 12 верхних частот, выход которого

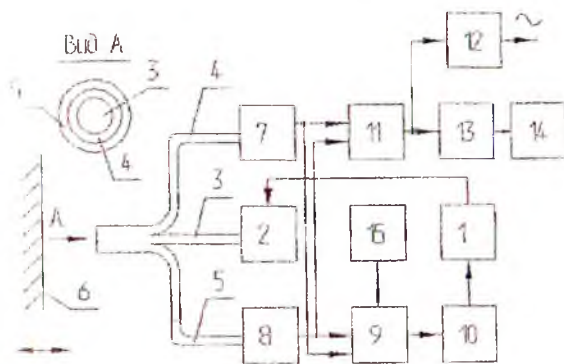


Рис. 2. 26. Дифференциальный датчик вибраций (ВОДП 4)

систем выходом датчика, фильтр 13 нижних частот, блок 14 индикации, который включает в себя светодиоды красного и зеленого цвета. Кроме этого датчик содержит также источник 15 опорного излучения. На рис. 2.26 условно изображена поверхность 6 контролируемого объекта. Излучающий 4, два приемных жгута световодов 3 расположены коаксиально и образуют на торце общего волоконно-оптического жгута концентрические зоны, как показано на виде А на рис. 2.26. Внешний вид датчика приведен в приложении 3. Способ и устройство позволяют устанавливать и контролировать рабочее состояние в процессе измерения вибраций и вне зависимости от величины мощности источника излучения, коэффициента отражения поверхности контролируемого объекта, и, что актуально, от возможных перекосов торцев жгута ВС.

Чувствительность к вибрации остается постоянной в рабочей точке. ВОДП 4 позволяет с точностью в 1 мкм контролировать рабочий диаметр. В некоторых случаях такая задача может являться основной. Например, в лазерном микроскопе ЛСМ требовался датчик измерения с точностью позиционирования 0,1 мкм. На базе ВОДП 4 был изготовлен датчик положения - ВОДП 5, используемый в

системе позиционирования указанного микроскопа. Структурная схема датчика приведена на рис. 2.27.

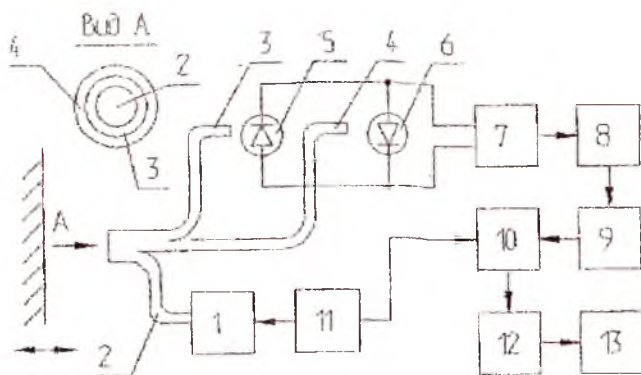


Рис. 2.27. Двухканальный датчик положения (ВОДП 5)

На рисунке обозначено: 1 - лазер, 2 - жгут излучающих ВС, 3, 4 - приемные жгуты, 5, 6 - фотодиоды, 7 - преобразователь тока фотодиода в напряжение, 8 - усилитель переменного тока, 9 - фильтр верхних частот, 10 - синхронный детектор, 11 - генератор импульсов, 12 - фильтр нижних частот, 13 - регистратор. В ВОДП 5 формирование разностного сигнала производится путем вычитания токов самих фотодиодов; поверхность контролируемого объекта освещается модулированным светом с помощью полупроводникового лазера. В рассматриваемом устройстве вычитание токов фотодиодов происходит до их преобразования в напряжение, поэтому точность формирования разностного сигнала не зависит от изменения коэффициента преобразования преобразователя тока фотодиода в напряжение. В ВОДП 5 поверхность контролируемого объекта освещается модулированным светом с помощью полупроводникового лазера, что позволило отказаться от измерения постоянной составляющей сигналов фотодиодов 5, 6. Таким образом, влияние изменения напряжения смещения преобразователя 7 тока в напряжение, изменение нап-

дифференциальный смещения усилителей сигналов на результат измерений ВОДП 5 устранено.

В рассмотренных ВОДП 1 - ВОДП 5 измеряется амплитуда выходного сигнала. В некоторых случаях требуется преобразование измеряемой величины в код. В этих случаях для упрощения аналого-цифрового преобразования предлагается использовать ВОДП импульсного типа с модулированным оптическим излучением [50,51,67,72].

В рассматриваемых ниже устройствах производится также цифровизация ФП ВОДП в диапазоне измерений. Результат измерений представляется в виде временного интервала, длительность которого пропорциональна измеряемому перемещению. Схема такого датчика ВОДП 6 [51] показана на (рис. 2.28).

ВОДП 6 состоит из генератора тактовых импульсов 1, двух формирователей 2 и 3 функционально изменяющихся напряжений,

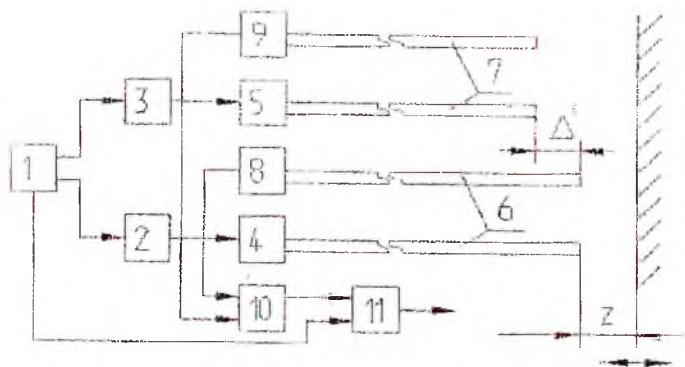


Рис. 2.28. Дифференциальный ВОДП импульсного типа (ВОДП 6)

двух источниках 4 и 5 излучения, первого и второго каналов измерения 6 и 7. Устройство содержит также первый и второй фотоприемники 8 и 9, компаратор 10 и триггер 11. ВОДП 6 представляет собой дифференциальный датчик с модулированным оптическим излучением. Использование в ВОДП 6 двух каналов измерения и импульсного питания позволяет исключить влияние

на результат измерений коэффициента отражения контролируемой поверхности, возможность линеаризовать ФП ВОДП на рабочем участке, увеличить быстродействие, упростить аналого-цифровое преобразование измеряемой величины и уменьшить погрешности компарации вследствие сравнения встречно изменяющихся напряжений. Однако, как будет показано в главе 4, в ВОДП 6 существенной оказывается погрешность от неадекватности временных функциональных зависимостей напряжений возбуждения источника излучения и ФП каналов измерения. Кроме того, в описываемом устройстве не представляется возможным отстроиться от внешних засветок, вносящих аддитивную составляющую в погрешности измерения.

ВОДП 7 [50,52], построенный с использованием аддитивных тестов измеряемого параметра и модулированного оптического излучения, позволил устранить погрешности, свойственные ВОДП 6. ВОДП 7 (рис. 2.29) содержит генератор тактовых импульсов 1,

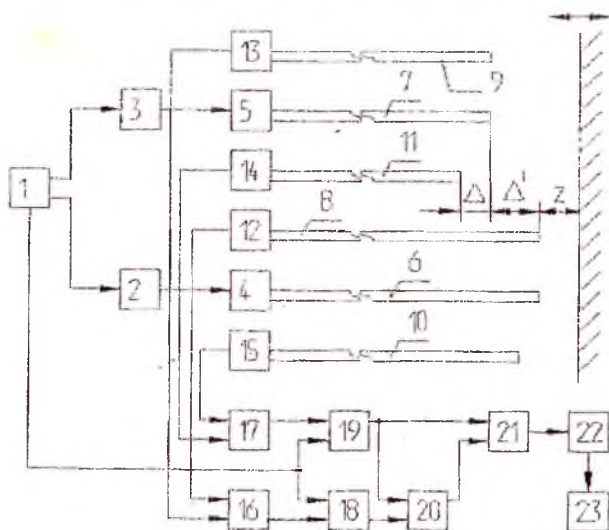


Рис. 2.29. ВОДП времяимпульсного типа с использованием аддитивных тестов (ВОДП 7)

первый и второй формирователи 2 и 3 функционально изменяющихся напряжений, первый и второй источники 4 и 5 излучения, первый и второй жгуты излучающих ВС 6 и 7, первый, второй, третий и четвертый жгуты 8, 9, 10 и 11 приемных световодов, первый, второй, третий и четвертый фотоприемники 12, 13, 14 и 15, первый и второй коммутаторы 16 и 17, первый и второй триггеры 18 и 19, схема считывания 20, схема деления 21, масштабный преобразователь 22, регистратор 23. ВОДП состоит из двух групп световодов, причем вторая группа сдвинута относительно первой в направлении от контролируемого объекта на некоторое расстояние Δ' .

ВОДП реализует алгоритм вида

$$Z = \frac{t_1}{t_2 - t_1} \Delta, \quad (2.10)$$

где t_1 и t_2 - длительности временных интервалов, формируемых триггерами 18 и 19. Таким образом, результат измерений представляется непосредственно в виде отношения временных интервалов, которое пропорционально величине измеряемого перемещения, что упрощает преобразование в требуемый код. Описанный ВОДП дает возможность проводить измерения с высокой точностью при изменении в широком диапазоне условий контроля.

На рис. 2.30 приведен вариант построения волоконно-оптического волокового преобразователя угла (ВКПУ) [66] со структурной избыточностью, нечувствительного к изменениям амплитуд сигналов фотоприемников, вызываемым, например, ухудшением свечения источника излучения, и к внешним засветкам. ВКПУ содержит источник 1 излучения, оптический диск 2, синусно-косинусную дорожку 3, фотоприемники 13 разрядного кода Грея 4, фотоприемники 5 синусного и косинусного (\sin/\cos) сигналов, фотоприемники 6 \sin/\cos сигналов, сдвинутые относительно фотоприемников 5 на фиксированное расстояние Δ . Для каждого из сигналов используется два или более приемников. Для формирования именно синусоидальных и косинусоидальных сигналов применяются

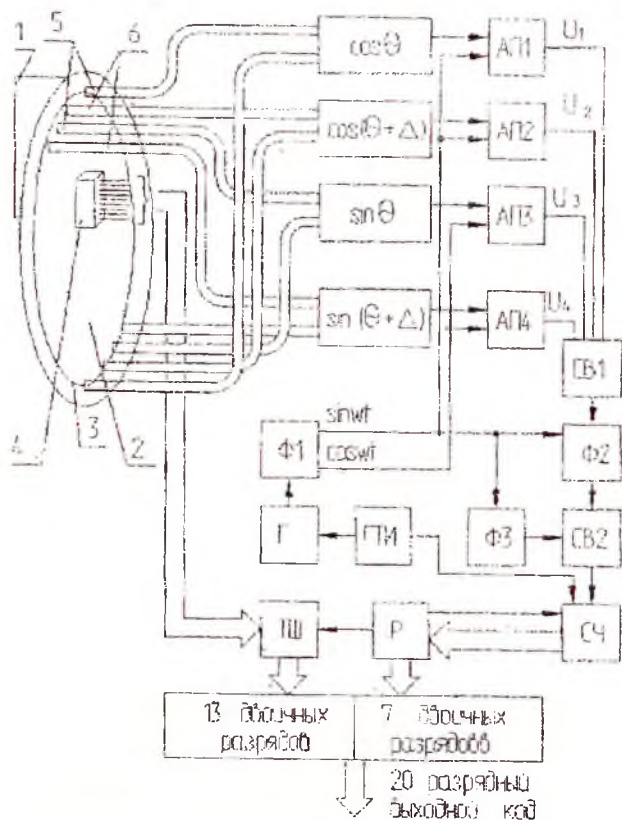


Рис. 2.30. ВКУ с использованием аддитивных тестов

усредняющие схемы. ФП фотоприемников 5 и 6 можно описать выражениями

$$\left. \begin{aligned} f_{15}(\Theta) &= \sin \Theta + a_0; \\ f_{25}(\Theta) &= \cos \Theta + a_0; \\ f_{16}(\Theta) &= \sin(\Theta + \Delta) + a_0; \\ f_{26}(\Theta) &= \cos(\Theta + \Delta) + a_0, \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

где Θ - измеряемое угловое перемещение,

a_0 - коэффициент, учитывающий внешние засветки и другие факторы, вносящие аддитивную погрешность измерения.

В состав ВКПУ введен генератор Г (9) опорной частоты ω , формирователь Ф1, формирующий \sin/\cos сигналы

$$\left. \begin{aligned} F_1(t) &= \cos \omega t; \\ F_2(t) &= \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

При их перемножении в аналоговых перемножителях АП 1 - АП 4 на выходные \sin/\cos сигналы преобразователя образуются следующие модулированные сигналы:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= (\cos \Theta + a_0) \sin \omega t; \\ U_2 &= (\cos(\Theta + \Delta) + a_0) \sin \omega t; \\ U_3 &= (\sin \Theta + a_0) \cos \omega t; \\ U_4 &= (\sin(\Theta + \Delta) + a_0) \cos \omega t, \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

где Θ - фаза сигналов с выходов АП 1 - АП 4.

Сигналы U_1, U_2, U_3, U_4 складываются и вычитаются в схеме СВ вычитания:

$$U_5 = U_4 - U_2 - U_3 + U_1. \quad (2.14)$$

Фаза сигнала U_5 по отношению к сигналу $\sin \omega t$ зависит от значения Θ :

$$U_5 = 2 \sin \frac{\Delta}{2} \cos \left(\omega t - \Theta - \frac{\Delta}{2} \right). \quad (2.15)$$

Как видно из алгоритма, описываемого выражением (2.15), угол Θ характеризуется фазой сигнала U_5 и не зависит от амплитуд синусной и косинусной составляющих, поступающих с фотоприемников, от амплитуды сигнала, генерируемого с частотой ω , а также от коэффициента a_0 , характеризующего внешние засветки. В формирователе Ф2 относительно опорного сигнала $\sin \omega t$ формируется временной интервал, длительность которого пропорциональна $\Theta + \Delta/2$. Длительность импульса формирователя Ф3 которого пропорциональна $\Delta/2$, а длительность сигнала со схемы СВ 2 вычитания пропорциональна измеряемому угловому перемещению Θ .

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

3.1. Электромагнитное множительно-делительное устройство фоторезистивного типа

Электромагнитное множительно-делительное устройство [1] показано на рис. 3.1.

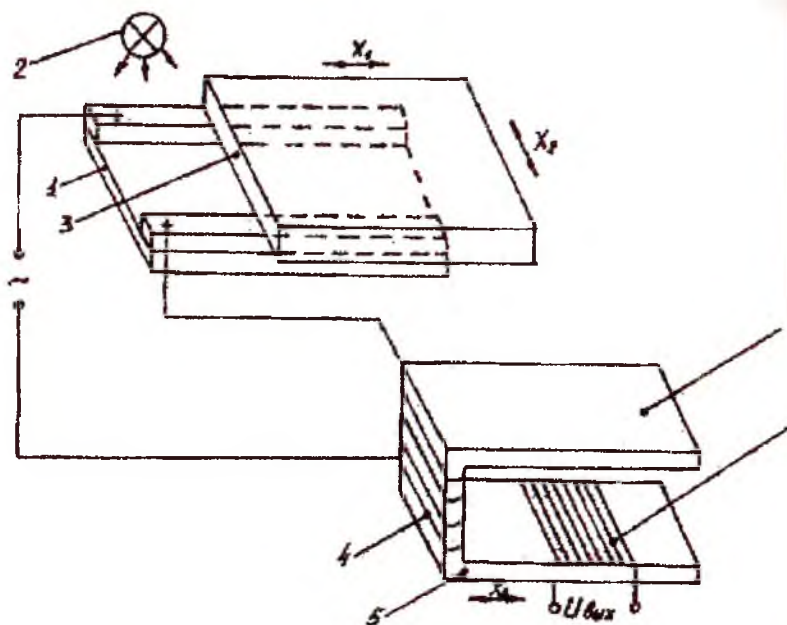


Рис. 3.1. Электромагнитное фоторезистивное множительно-делительное устройство

Устройство содержит фоторезистор 1, освещаемый источником света 2 и прикрытый подвижной светонепроницаемой шторкой 3, имеющей возможность перемещаться в направлении координат X_1 и

4). Фоторезистор включен последовательно с обмоткой возбуждения 4 индуктивного датчика 5, имеющего на П - образном магнитопроводе 6 подвижную вдоль координаты X_3 измерительную обмотку. При перемещении шторки изменяется освещенность фоторезистора, что приводит к изменению его сопротивления $R_{\text{ФС}}$.

При перемещении шторки вдоль координаты X_1 сопротивление R_c изменяется по линейному закону $R_{\text{ФС}} = \kappa X_2$, а при перемещении ее вдоль координаты X_2 – по обратно пропорциональному закону $R_{\text{ФС}} = \kappa / X_2$, где κ – коэффициент пропорциональности, зависящий от источника света и типа фоторезистора. Переменное сопротивление фоторезистора, зависящее от координат перемещения, управляет током возбуждения в обмотке возбуждения датчика.

Выходное напряжение индуцируется в измерительной обмотке и зависит от тока возбуждения и координаты перемещения X_3 . При перемещении шторки вдоль координаты X_1 выходное напряжение определяется выражением $U_{\text{вых}} = C \frac{X_3}{X_1}$, а при ее перемещении вдоль координаты X_2 выражением $U_{\text{вых}} = C X_2 X_3$, где C – коэффициент пропорциональности, учитывающий конструктивные особенности и параметры фоторезистора и датчика.

3.2. Электромагнитный преобразователь перемещений с корректирующим оптическим каналом

На рис.3.2 рассматривается электромагнитный преобразователь со всеми его достоинствами: надежностью, простотой изготовления и т.д.

ЭПП содержит ферромагнитный сердечник 1 с катушкой 2 и ферромагнитный подвижный якорь 3. Здесь нет самостоятельного оптического датчика, а есть оптический канал, который улучшает характеристики электромагнитного преобразователя и состоит из

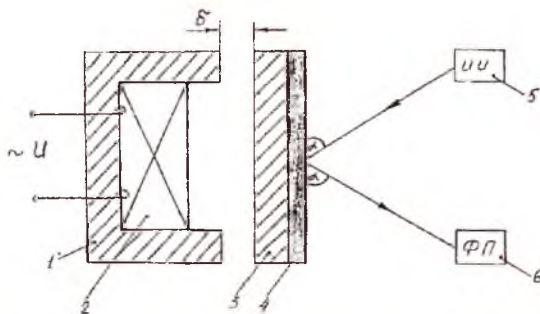


Рис. 3.2. Электромагнитный преобразователь перемещений с оптическим каналом

зеркальной поверхности 4, источника излучения 5 и фотоприемника 6. Данная комбинация используется в тех случаях, когда нельзя применять или нецелесообразно использовать оптический датчик для контроля перемещений, например, при отсутствии стабильного источника излучения и наличия внешних мешающих оптических полей, что имеет место в полевых условиях. Внутренний корректирующий оптический канал может быть создан по образцу внутренней обратной связи и при наличии внешних оптических помех [2].

Линейность у оптических датчиков высокая, до 1%, но обычно в небольшом диапазоне перемещений [114].

Из графика зависимости $U_{\text{вых}} = f(\delta)$ (рис.3.3) видно, что чувствительность преобразователя к линейным перемещениям, пропорциональная производной

$\frac{dU_{\text{вых}}}{d\delta}$, имеет наибольшее значение в зоне А, меньшее в зоне В и минимальное в зоне Б.

Зона А используется, например, когда датчик работает в качестве преобразователя продольных перемещений поверхности контролируемого объекта. Диапазон измерений δ , соответствующий этой зоне, находится в пределах 0-250 мкм.

Возможно действие преобразователя и на участке В, хотя чувствительность при этом снижается в 5-9 раз и знак производной

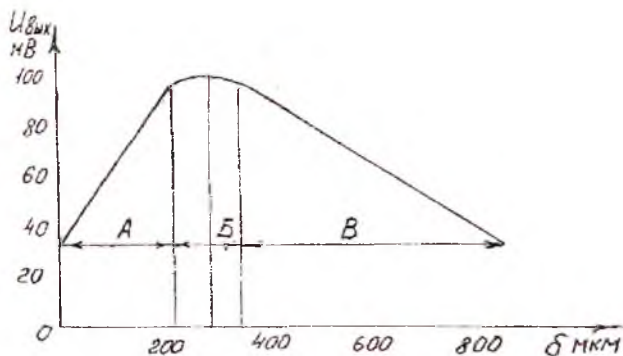


Рис. 3.3. Выходная характеристика оптического канала преобразователя перемещений

изменяется на противоположный. Диапазон измерений δ , соответствующий этой зоне, находится в пределах 380-1000 мкм.

Зона Б используется в том случае, когда преобразователь должен быть чувствителен не к продольным, а к поперечным перемещениям поверхности объекта. Чувствительность преобразователя к продольным перемещениям минимальна при $\delta=300$ мкм.

Крутизна k в зависимости $U_{\text{вых}} = f(\delta)$ преобразователя определится для участка А:

$$k \approx 18\rho\tau LS_n R_1,$$

а для участка В:

$$k \approx -2\rho\tau LS_n R_1,$$

где ρ - коэффициент отражения поверхности объекта, τ - коэффициент пропускания световода, L - лучистость источника измерения (энергия или мощность излучения), S_n - вольтовая чувствительность фотоприемника к излучению светодиода, R_1 - внутренний радиус фотоприемной площадки.

Для обеспечения максимальной чувствительности и заданного диапазона измерений преобразователя необходимо, чтобы ось симметрии его располагалась нормально к поверхности объекта. Отклонение оси симметрии от нормали к поверхности влияет на

характеристики, однако при работе в зоне А это влияние незначительно, т.к. количество излучения, попадающего на фотоприемник, не изменяется. В зонах В и Б чувствительность преобразователя к отклонениям его оси симметрии от нормали к поверхности возрастает.

Как показано, общая нелинейность такого вида во всем диапазоне перемещений от 0 до 1000 мкм как раз нужна для линеаризации нелинейности электромагнитного датчика, имеющего гиперболическую зависимость $U_g = f(\delta)$, что в итоге расширяет диапазон измерения, увеличивает однозначную чувствительность и может применяться для уничтожения зоны Б нулевой чувствительности у самостоятельных оптических датчиков.

Высокая чувствительность оптических датчиков достигается обычно тогда, когда они работают в комплексе с дискретной интегральной, зачастую и микропроцессорной техникой, что значительно удорожает первичный преобразователь по сравнению с простыми аналоговыми устройствами и уменьшает его быстродействие. Предлагаемый электромагнитный преобразователь предназначен для работы в аналоговом режиме.

При больших перемещениях световое пятно с отражающей поверхности действительно сместится. Для этого предусмотрено параллельное включение ряда фотоприемников 8, смещенных в пространстве в функции перемещения (рис.3.4), или при наличии

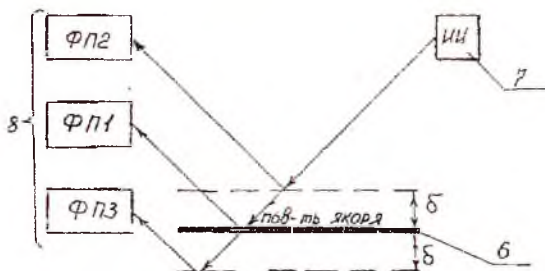


Рис. 3.4. Принцип построения оптического канала с рядом фотоприемников

одного фотоприемника δ используется волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) с разветвленными элементами в пространстве в зависимости от измеряемого перемещения δ (рис.3.5). Это обеспечивает линейаризацию характеристики в большом диапазоне перемещений.

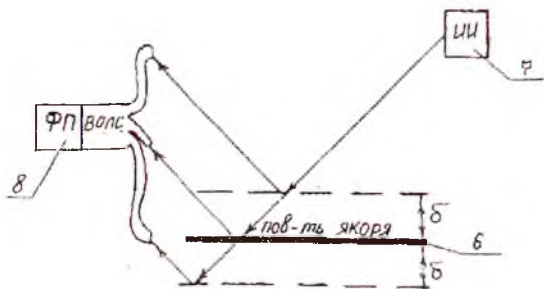


Рис. 3.5. Оптический канал с одним фотоприемником и произвольной ВОЛС

При использовании усилителя с переменным коэффициентом усиления расширяется диапазон измерений.

На рис.3.6 приведена конструкция электромагнитного преобразователя перемещений с оптическим экраном и щелью ромбической формы, на рис.3.7 - конструкция электромагнитного преоб-

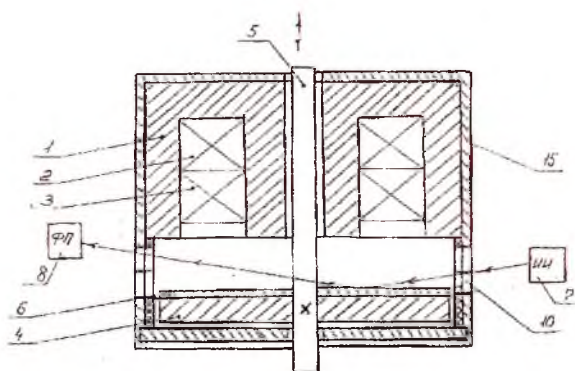


Рис. 3.6. Электромагнитный преобразователь перемещений с оптическим экраном и ромбической щелью

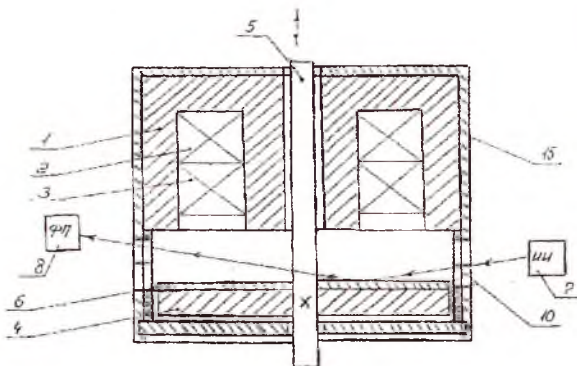


Рис. 3.7. Разновидность электромагнитного преобразователя перемещений с оптическим каналом (ЭПКО)

разователя, где функцию экрана выполняет корпус. На рис.3.8 представлена структурная схема электромагнитного преобразователя, на рис. 3.9 - зависимости величин выходных напряжений соответствующих устройств от величин измеряемых перемещений.

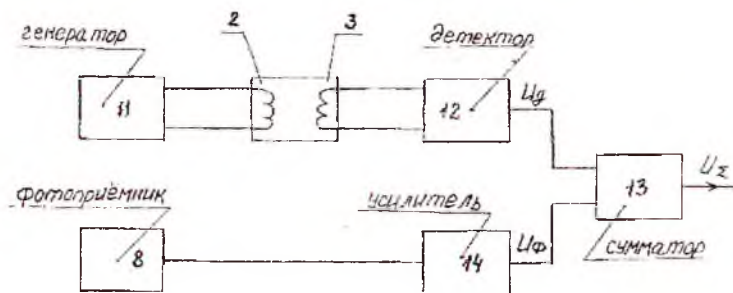


Рис. 3.8. Структурная схема ЭПКО

Электромагнитный преобразователь перемещений содержит ферромагнитный сердечник 1 броневого типа с возбуждающей 2 и измерительной 3 обмотками, ферромагнитный якорь, фотоприемник 8, экран 9 со щелью 10 или корпус 15 со щелью 10. Форма щели

выбирается таким образом, чтобы обеспечить требуемый закон изменения интенсивности светового потока.

Луч света от источника излучения 7 через щель 10 в экране 9 или корпусе 15 падает на зеркальное покрытие 6 якоря 4, отражается от него и улавливается фотоприемником 8.

Генератор 11 подключен к возбуждающей обмотке 2 преобразователя. Измерительная обмотка 3 подсоединена к амплитудному детектору 12, выход которого соединен с одним из выходов сумматора 13. Ко второму входу сумматора 13 подключен фотоприемник 8 через усилитель 14 переменным коэффициентом усиления.

Сигнал с измерительной обмотки 3 преобразователя после детектирования амплитудным детектором 12 имеет вид кривой U_g .

Как видно из графика (рис. 3.9), с увеличением зазора между якорем 4 и сердечником 1 напряжение U_g на измерительной обмотке

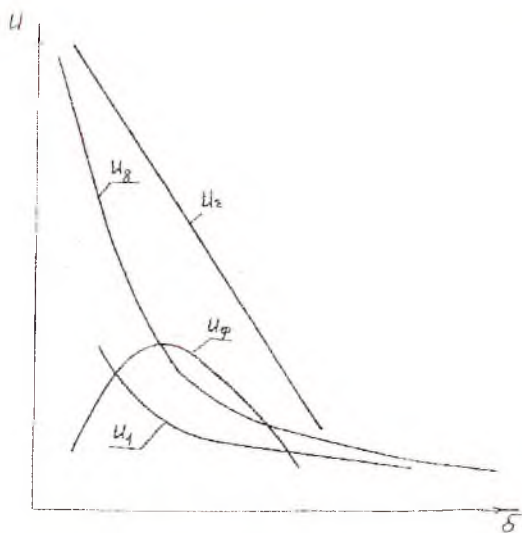


Рис. 3.9. Зависимость выходных напряжений от измеряемых перемещений

3 преобразователя изменяется нелинейно. Кривая U_1 интерпретирует зависимость напряжения от измеряемого перемещения в случае

использования немагнитных накладок (см. рис. 1.2). Характер изменения падения напряжения на фотоприемнике 8 в зависимости от зазора δ показывает кривая U_{ϕ} . Такое изменение напряжения связано с изменением тока через фотоприемник, который меняется пропорционально интенсивности облучения фотоприемника световым потоком. Закон изменения интенсивности светового потока определяется формой щели 10 в экране 9 или корпусе 15 и перемещением якоря 4. В данном случае для реализации кривой U применена щель ромбической формы. Так, при движении якоря 4 вниз, т.е. при увеличении зазора δ , напряжение на фотоприемнике 8 вначале увеличивается, согласно кривой U_{ϕ} , а затем - уменьшается. В результате с выхода сумматора 13 снимается линейно изменяющееся напряжение.

Сравнивая полученную характеристику ЭППОК U_{Σ} с выходным сигналом прототипа ЭПСЭ U_1 , можно сделать вывод, что линейность увеличена в 2 раза, а чувствительность в 10 раз, причем найденные соотношения изменяются в зависимости от формы щели и коэффициента усиления усилителя.

1. Установлено, что существующие конструкции ЭПП, способные преобразовать широкодиапазонные и функциональные перемещения в электрический сигнал, не отвечают требованиям, предъявляемым к преобразователям со стороны систем автоматического управления из-за увеличенной нелинейности и низкой чувствительности.

2. Анализ научно-технической и патентной литературы показал необходимость разработки новых электромагнитных преобразователей перемещений с аналоговым и дискретным выходом, работающих в широком диапазоне перемещений. Показано, что наиболее универсальным приемом, обеспечивающим одновременное улучшение нескольких характеристик, является использование многопараметрового метода преобразования.

3. На основании выявленных принципов совершенствования ЭПП и их классификации по элементам конструкций предложены способ преобразования широкодиапазонных перемещений и ряд конструкций с использованием оптического канала ЭППОК, позволяющих уменьшить нелинейность выходной характеристики, увеличить ее чувствительность и улучшить ряд других метрологических характеристик.

3.3. Электромагнитный датчик перемещений интерферометрического типа

Дополнительными преимуществами по сравнению с амплитудными и импульсными датчиками в плане достижения повышенной разрешающей способности обладают фазовые ВОДП - ВОДП 8 [11,12].

ВОДП 8 (рис.3.10) представляет собой преобразователь пере-

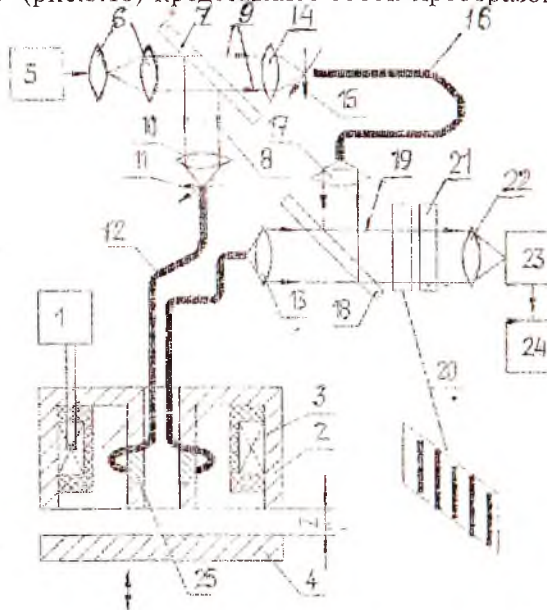


Рис. 3.10. ВОДП с фазовой модуляцией световой волны

перемещений интерферометрического типа и содержит генератор 1, неподвижный сердечник 2 броневго типа с возбуждающей обмоткой 3, подключенной к выходу генератора 1, подвижный якорь 4. Якорь 4 выполнен в виде ферромагнитного диска и связан с перемещающимся объектом. Устройство содержит также источник 5 излучения, расположенные по ходу излучения коллиматор 6 и первый светоделитель 7. Светоделитель 7 формирует измерительный и опорный потоки излучения 8 и 9 соответственно. По ходу измерительного потока 8 расположен первый фокусирующий микрообъектив 10, первый микропозиционер 11, измерительный одномодовый ВС 12 и первый выходной объектив 13. По ходу опорного потока 9 расположены второй фокусирующий микрообъектив 14, второй микропозиционер 15, опорный одномодовый ВС 16 и второй выходной объектив 17. ВОДП 8 содержит также второй светоделитель 18, оптически сопряженный с опорным и измерительным потоками излучения 9 и 8 соответственно и формирующий выходной поток 19 излучения. По ходу выходного потока излучения расположены элемент 20 визуализации интерференционной картины, экран 21 со щелью и собирающей линзой 22, фотоприемник 23 и амплитудный детектор 24. Источник излучения должен быть когерентным. Фотоприемник 23 оптически сопряжен с собирающей линзой 22, его выход соединен с входом амплитудного детектора 24. Участок 25 внутреннего керна броневго сердечника 2 выполнен из магнитострикционного материала и охвачен измерительным одномодовым оптическим волокном 12. В устройстве измеряется фазовое рассогласование между измерительным и опорным плечами 12 и 16 интерферометра, которое пропорционально величине Z измеряемого перемещения. Как показано в главе 2, минимальная достоверно измеряемая с помощью ВОДП 8 величина перемещения при условии хорошего экранирования устройства составляет сотысячные доли нм, а рабочий диапазон в 5 - 6 раз больше, чем у известных интерферометрических датчиков.

Таким образом, предложенные способы и устройства позволяют устранить недостатки, свойственные рефлектометрическим ВОДП.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МАГНИТО- ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

4.1. Методы параметрических структурных схем

Одним из важных требований, предъявляемых к разрабатываемым ЭППОК, является наличие математических зависимостей, описывающих их характеристики. Потребность в математической модели связана, в частности, с тем, что в широко используемых в теории автоматического регулирования структурных схемах [99] необходимо знать характеристики всех элементов. Однако для многих элементов САУ, в том числе и ЭППОК, характеристики математически описаны недостаточно полно [24]. Они могут быть получены на основе общих математических моделей. Так как принцип действия преобразователей основан на ряде эффектов в цепях различной физической природы, то при их описании приходится оперировать разнородными величинами и параметрами. Кроме того, для полного математического описания необходимо учитывать активные и реактивные распределенные параметры. Все это приводит к значительным трудностям, особенно при питании преобразователей импульсным током [41]. Поэтому известные методы решения поставленной задачи мало пригодны. Для составления математической модели ЭППОК в работе используется метод параметрических структурных схем (ПСС) [39], который опирается на систему обобщенных величин и параметров и основан на единстве математического описания процессов независимо от физической природы цепей и эффектов, положенных в основу работы преобразователей.

Из анализа различных конструкций ЭППОК можно сделать вывод о том, что независимо от конструктивных особенностей преобразователей в них происходит преобразование информации в

четырёх физических цепях, а именно: механической, магнитной, электрической и оптической. Для упрощения анализа расчёта и синтеза цепей различной физической природы удобно использовать единый математический аппарат, использующий принцип прямой аналогии, т.е. в качестве обобщённых величин, характеризующих процессы в цепях любой физической природы ЭППОК, приняты: величина воздействия - обобщённое напряжение, величина реакции - обобщённый ток I и интегральная величина реакции - обобщённый заряд q .

В качестве обобщённых параметров ЭППОК приняты параметры обобщённого сопротивления R , обобщённой ёмкости C и обобщённой индуктивности L .

Между цепями различной физической природы существуют физические эффекты, устанавливающие связь между обобщёнными величинами и параметрами цепи. При этом количественно величина описывается с помощью коэффициента с соответствующими индексами.

Процесс, происходящий в преобразователе, может быть представлен в виде совокупности элементарных преобразований одной физической величины в другую, каждое из которых является в первом приближении линейной зависимостью. Весь процесс в этом случае описывается большим сочетанием взаимосвязанных элементарных прямо пропорциональных зависимостей между величинами, характеризующими процесс, и параметрами, характеризующими физические константы и размеры объекта.

В соответствии с методом ПСС элементарные преобразования рассматриваемого физического процесса представляются как последовательность простейших звеньев. Каждое звено представляет собой как бы самостоятельный преобразователь одной величины в другую величину или параметр, а весь процесс преобразования перемещений в электрический сигнал в преобразователе представляет

собой совокупность таких звеньев, соединенных между собой в определенном порядке и образующих ПСС.

В теории автоматического регулирования в качестве элементарного звена САУ используется какое-либо устройство с известной передаточной функцией. Серьезной проблемой является то, что для большинства устройств передаточные функции неизбежны. В ПСС передаточной функцией звена является либо параметр, либо коэффициент эффекта, как правило, известные и легко вычисляемые, а сама ПСС служит для нахождения передаточной функции устройства, используемого в структурной схеме САУ, что позволяет решить вышеуказанную проблему. ПСС изображается в виде цепочки последовательно соединенных звеньев-прямоугольников. Линии, соединяющие прямоугольники, соответствуют входной величине до прямоугольника и выходной величине - после прямоугольника. Стрелки, входящие в прямоугольник сверху, соответствуют стабильным величинам, не зависящим от входных величин. Каждая ПСС преобразователя информации может быть описана математическими зависимостями входной величины от выходной. Причем общий коэффициент преобразования представляет собой произведение всех параметров структурной схемы и величин, обозначенных стрелками, входящими в прямоугольник. Рассмотрим математические зависимости, описывающие электромагнитный и оптоэлектронный эффекты, с учетом принципов аналогий и подобия для получения выражений межцепных коэффициентов ПСС [44].

4.2. Математическая модель электромагнитного преобразователя перемещений

Электромагнитный эффект, связанный с изменением длины воздушного зазора магнитопровода под действием механических сил [41], по сути дела, является эффектом изменения магнитной

жесткости W_μ или проводимости G_μ магнитопровода в основном за счет изменения геометрических параметров магнитной цепи.

Эффект изменения магнитного сопротивления воздушного зазора R_δ (магнитной жесткости W_δ) определяется выражением

$$\Delta R_\delta = \Delta W_\delta = k_{q'_m W_\delta} \Delta q'_m = k_{q'_m R_\delta} \Delta q'_m, \quad (4.1)$$

где $q'_m = F$ - внешнее механическое перемещение (сила);

$k_{q'_m R_\delta} = k_{q'_m W_\delta} = \frac{dW_\delta}{dq'_m} = \frac{dR_\delta}{dq'_m}$ - коэффициент связи механического перемещения с магнитным сопротивлением (жесткостью) воздушного зазора.

Полное магнитное сопротивление R_μ , или полная магнитная жесткость W_μ , преобразователя перемещений запишется в виде

$$R_\mu = W_\mu = \frac{l_c}{\mu_c S_c} + \frac{\delta}{\mu_0 S_0} = R_c + R_\delta = W_c + W_\delta, \quad (4.2)$$

где μ_c , S_c , l_c - соответственно магнитная проницаемость, сечение и длина средней силовой линии поля в сердечнике;

μ_0 , S_0 - магнитная проницаемость и сечение воздушного зазора;

$$R_c = W_c = \frac{l_c}{\mu_c S_c}; \quad R_\delta = W_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 S_0} - \text{магнитное сопротивление}$$

(магнитная жесткость) сердечника и воздушного зазора.

Воздушный зазор под действием внешнего механического воздействия q'_m изменяется по закону

$$\delta = \delta_0 (1 \pm k_{q'_m \delta} \Delta q'_m), \quad (4.3)$$

где δ_0 - начальный воздушный зазор преобразователя перемещений;

$$k_{q'_m \delta} = \frac{d\delta}{dq'_m} - \text{коэффициент чувствительности к механическим}$$

воздействиям.

Подставляя выражение 4.3 в 4.2, выделим магнитное сопротивление воздушного зазора (магнитную жесткость воздушного зазора)

$$R_{\delta} = W_{\delta} = \frac{\delta_0 (1 \pm k_{q'} \Delta q'_{\text{м}})}{\mu_0 \cdot S_0} = \frac{\delta_0}{\mu_0 S_0} \pm \frac{\delta_0 k_{q'} \Delta q'_{\text{м}}}{\mu_0 S_0} = R_{\delta_0} \pm \Delta R_{\delta} = W_{\delta_0} \pm \Delta W_{\delta}, \quad (4.4)$$

где $R_{\delta_0} = W_{\delta_0}$ - составляющая магнитного сопротивления (магнитной жесткости) воздушного зазора, соответствующая начальному воздушному зазору;

$\Delta R_{\delta} = \Delta W_{\delta}$ - составляющая магнитного сопротивления (магнитной жесткости) воздушного зазора, соответствующая изменению магнитного сопротивления (магнитной жесткости) зазора при механическом воздействии на подвижный якорь преобразователя,

$$\Delta R_{\delta} = \Delta W_{\delta} = k_{q'} \frac{\delta_0}{\mu_0 \cdot S_0} \Delta q'_{\text{м}} = k_{q'} R_{\delta_0} \Delta q'_{\text{м}} = k_{q'} W_{\delta_0} \Delta q'_{\text{м}}. \quad (4.5)$$

Сравнивая выражение (4.5) с (4.1) получим значение коэффициента межцепной связи

$$k_{q'_{\text{м}}} R_{\delta} = k_{q'_{\text{м}}} W_{\delta} = k_{q'} \frac{\delta_0}{\mu_0 S_0}. \quad (4.6)$$

На основании сказанного и с учетом принятых обозначений магнитооптический преобразователь перемещений, показанный на рис.3.6 и рис.3.7, может быть представлен без оптического канала в виде конструкции ЭПП на рис. 4.1.

В связи с тем, что сердечник и якорь магнитопровода ЭПП выполнены обычно из материала с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на вихревые токи и магнитная жесткость магнитопровода значительно меньше магнитной жесткости воздушного зазора, то при разработке математической модели ЭППОК пренебрегают потерями на вихревые токи в магнитопроводе, а магнитную проводимость магнитопровода считают бесконечно большой.

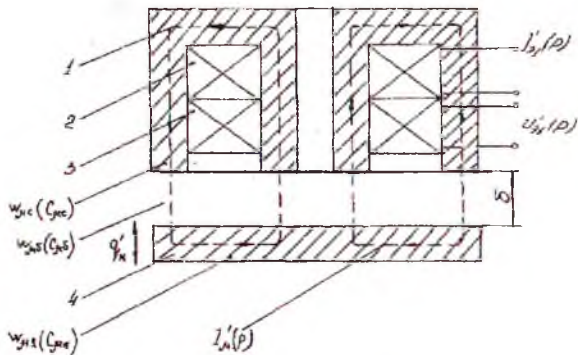


Рис. 4.1. Величины воздействия и реакции электромагнитных преобразователей перемещений (ЭПП) без оптического канала

Процессы, происходящие в ЭПП могут быть описаны в помощью параметрической структурной схемы (ПСС), представленной на рис.4.2.

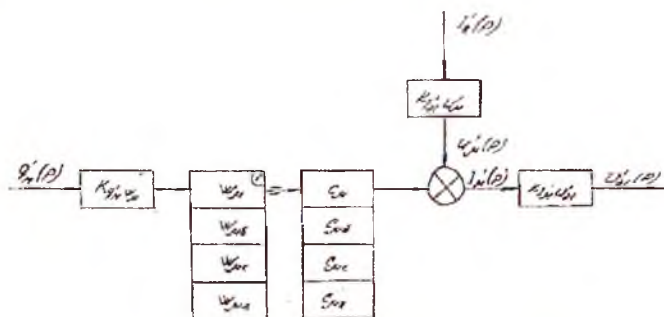


Рис. 4.2. Параметрическая структурная схема ЭПП

4.3. Математическая модель оптического преобразователя перемещений

Эффект изменения импульса излучения P_0 (оптического заряда q_0) при перемещении отражающей поверхности, воспринимаемого фотоприемником, определяется выражением

$$\Delta P_0 = k_{q'_M P_0} \Delta q'_M, \quad (4.7)$$

где $q'_M = F$ - внешнее механическое перемещение, или перемещение подвижного якоря преобразователя;

$$k_{q'_M P_0} = \frac{dP_0}{dq'_M} - \text{коэффициент связи механического перемещения}$$

с импульсом излучения.

Импульс источника излучения света P_0 запишется в виде

$$P_0 = n_1 \frac{h\nu}{c}, \quad (4.8)$$

где h - постоянная Планка;

ν - частота излучаемого света,

c - скорость света;

n_1 - число испускаемых излучателем фотонов.

Воздушный зазор под действием внешнего механического воздействия

q'_M изменяется по закону (4.3).

Число фотонов, поглощаемых фотоприемником, в зависимости от перемещения якоря в воздушном зазоре можно определить аналогично выражению (4.3):

$$n_2 = n_0 (1 \pm k_\delta \cdot \delta), \quad (4.9)$$

где n_0 - число поглощаемых фотонов при начальном воздушном зазоре δ в зависимости от параметров оптической линии связи;

$$k_\delta = \frac{dn_2}{d\delta} - \text{коэффициент чувствительности оптического канала}$$

к воздушному зазору.

Подставляя выражение (4.3) в (4.9), получим число поглощаемых фотонов в функции внешнего механического воздействия q'_M :

$$n_2 = n_0 (1 \pm k_\delta (\delta_0 (1 \pm k_q \Delta q'_M))). \quad (4.10)$$

Подставляя выражение (4.10) в (4.8) и полагая $n_1 = n_2$, получим импульс излучения, поглощаемый фотоприемником:

$$\begin{aligned}
 P_0 &= n_2 \frac{h\nu}{c} = n_0 \frac{h\nu}{c} \pm n_0 \frac{h\nu}{c} k_\delta \delta_0 \pm \\
 &\pm n_0 \frac{h\nu}{c} k_\delta \delta_0 k_{q'} \Delta q'_{\text{м}} = \\
 &= P'_0 \pm P_{\delta_0} \pm P_{\delta_0} k_{q'} \Delta q'_{\text{м}} = P'_0 \pm \Delta P_0, \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

где P'_{δ_0} - составляющая импульса излучения, поглощаемая фотоприемником при начальном зазоре δ_0 , с учетом составляющей P'_0 в линии связи,

$$P'_{\delta_0} = P'_0 + P_{\delta_0} = n_0 \frac{h\nu}{c} (1 \pm k_\delta \delta_0) = P'_0 (1 \pm k_\delta \delta_0), \quad (4.12)$$

ΔP_0 - составляющая импульса излучения, поглощаемая фотоприемником при механическом воздействии на подвижный якорь преобразователя,

$$\Delta P_0 = n_0 \frac{h \cdot \nu}{c} k_\delta \delta_0 k_{q'} \Delta q'_{\text{м}} = P_{\delta_0} k_{q'} \Delta q'_{\text{м}}, \quad (4.13)$$

Сравнивая выражения (4.13) с (4.7), получим значение коэффициента межцепной связи,

$$k_{q'_{\text{м}}} P_0 = k_{q'} n_0 \frac{h\nu}{c} k_\delta \delta_0. \quad (4.14)$$

4.4. Математическая модель магнитооптического преобразователя перемещений

Электромагнитный преобразователь перемещений с оптическим каналом (ЭППОК), показанный на рис. 3.6 и 3.7, можно представить в виде конструкции на рис. 4.3, а ПСС ЭППОК - на рис. 4.4.

Анализируя ЭППОК, следует отметить, что обобщенный магнитный ток $I'_{\mu}(p)$ в магнитопроводе преобразуется с помощью

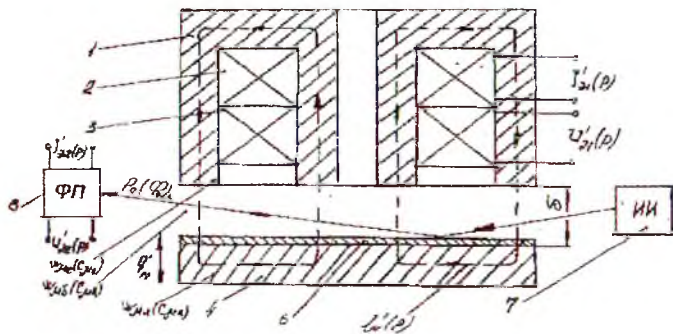


Рис. 4.3. Величины воздействия и реакции в ЭПП при наличии оптического канала

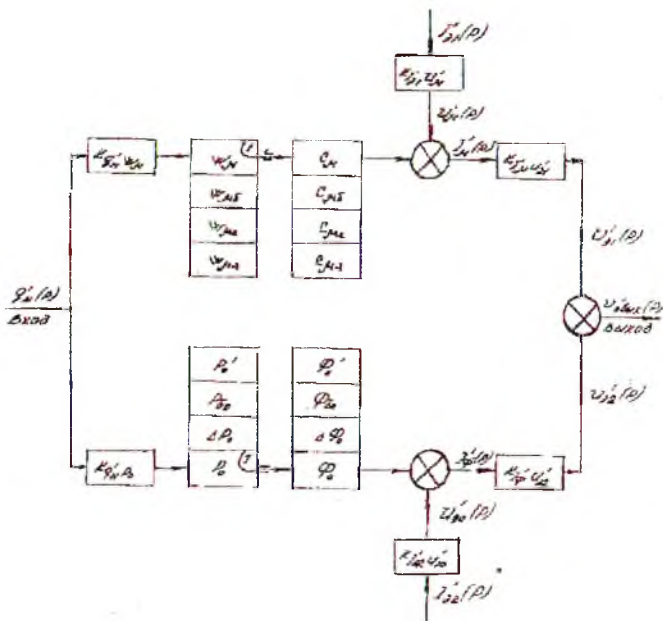


Рис. 4.4. Параметрическая структурная схема ЭППОК

межцепного эффекта в выходное электрическое напряжение $U'_{21}(p)$ электромагнитного канала. Межцепной коэффициент $k_{\mu, 21}$

устанавливающий связь между наводимой ЭДС $U'_{\omega 1}(p)$ и обобщенным магнитным током $I'_{\mu}(p)$, является числом витков w_2 измерительной обмотки преобразователя перемещений,

$$U_{\omega 1} = 4,44 w_2 \frac{\Phi}{t} = 4,44 w_2 I_{\mu} . \quad (4.15)$$

Обобщенный магнитный ток - $I'_{\mu}(p)$ является следствием обобщенного магнитного напряжения $U'_{\mu}(p)$, действующего в магнитопроводе.

Электрический питающий ток $I'_{\omega 1}(p)$ преобразуется с помощью межцепного эффекта в обобщенное магнитное напряжение $U'_{\mu}(p)$.

Межцепной коэффициент $k_{I'_{\omega 1} U'_{\mu}}$, устанавливающий связь между

обобщенными магнитным напряжением $U'_{\mu}(p)$ и возбуждающим электрическим током $I'_{\omega 1}(p)$, является числом витков w_1 возбуждающей обмотки преобразователя перемещений,

$$U_{\mu} = I_{\omega 1} \cdot w_1 , \quad (4.16)$$

Входная величина механического воздействия $q'_m(p)$ и, следовательно, перемещение подвижного якоря преобразователя преобразуются в электромагнитном канале с помощью межцепного эффекта в магнитную жесткость воздушного зазора W_{μ} или в обратную

ей величину - обобщенную магнитную проводимость $G_{\mu} = \frac{1}{W_{\mu}}$.

Межцепной коэффициент $k_{q'_m W_{\mu}}$, устанавливающий связь между

обобщенной магнитной жесткостью W_{μ} и механическим входным воздействием $q'_m(p)$, является удельной магнитной жесткостью к воздействиям преобразователя перемещений,

$$W_{\mu} = k_{q'_m W_{\mu}} q'_m , \quad (4.17)$$

Одновременно входное воздействие $q'_m(p)$ воздействует через перемещение подвижного якоря преобразователя на его оптический канал. Оно преобразуется с помощью междцепного эффекта в зависимый от перемещения фотоимпульс P_0 , поглощаемый фотоприемником,

$$P_0 = \frac{n_2 h \nu}{c} = \frac{w_0}{c}, \quad (4.18)$$

где w_0 - энергия квантов $h\nu$ от фотонов n_2 , поглощаемая фотоприемником.

Мощность поглощения соответствует потоку излучения Φ_c ,

$$\Phi_c = \frac{w_0}{t}. \quad (4.19)$$

Поток излучения Φ_c , связан с фотоимпульсом соотношением

$$\Phi_c = \frac{c}{t} P_0, \quad (4.20)$$

где c - скорость света;

t - время прохождения света.

Междцепной коэффициент $k_{q'_m P_0}$, устанавливающий связь между фотоимпульсом, или обобщенным оптическим зарядом P_0 , и механическим входным воздействием $q'_m(p)$, является удельным оптическим зарядом преобразователя,

$$P_0 = k_{q'_m P_0} q'_m, \quad (4.21)$$

Дальнейшие преобразования светового потока в электрический сигнал и получение необходимого сигнала из оптического канала на входе сумматора осуществляются в фотоприемнике и в цепях одной физической природы - в электрических цепях по известным законам электротехники.

Электрический питающий ток $I'_{э2}(p)$ преобразуется с помощью междцепного эффекта в электрическое напряжение $U'_{э0}(p)$, которым

запитывается фотоприемник. Межцепной коэффициент $k_{I'_{\Sigma 2} U'_{\Sigma 0}}$, устанавливающий связь между электрическим напряжением $U'_{\Sigma 0}(p)$ и электрическим током $I'_{\Sigma 2}(p)$, является электрическим сопротивлением четырехполюсника,

$$U'_{\Sigma 0} = k_{I'_{\Sigma 2} U'_{\Sigma 0}} I'_{\Sigma 2}, \quad (4.22)$$

При наличии источника напряжения данный буферный каскад исключается, а на фотоприемник подается сразу напряжение $U'_{\Sigma 0}$.

Электрический фототок $I'_{\Phi}(p)$ на выходе фотоприемника преобразуется с помощью межцепного эффекта в усилителе с переменным коэффициентом усиления в выходное электрическое напряжение $U'_{\Sigma 2}(p)$ оптического канала. Межцепной коэффициент $k_{I'_{\Phi} U'_{\Sigma 2}}$ устанавливающий связь между электрическим напряжением $U'_{\Sigma 2}(p)$ и электрическим фототоком $I'_{\Phi}(p)$, является также электрическим сопротивлением усилителя,

$$U'_{\Sigma 2} = k_{I'_{\Phi} U'_{\Sigma 2}} I'_{\Phi}. \quad (4.23)$$

Операционный усилитель, как и электронный сумматор, выполненные в интегральном исполнении могут находиться как в корпусе преобразователя перемещений, так и в специальном вынесенном электронном блоке.

Выходное электрическое напряжение $U'_{\Sigma \text{вых}}(p)$, снимаемое с выхода сумматора, есть результат суперпозиции двух напряжений: напряжения электромагнитного канала $U'_{\Sigma 1}(p)$ и напряжения оптического канала $U'_{\Sigma 2}(p)$.

Таким образом:

1. Процессы, происходящие в преобразователе, представлены в виде совокупности элементарных преобразователей одной физической величины в другую, каждое из которых является в первом приближении линейной зависимостью. Весь процесс описывается

большим сочетанием взаимосвязанных элементарных зависимостей между величинами, характеризующими процесс, и параметрами, характеризующими физические константы и размеры объекта. Элементарные преобразования рассматриваемого физического процесса представляются как последовательность простейших звеньев, каждое звено представляет собой как бы самостоятельный преобразователь одной величины в другую величину или параметры, а весь процесс - совокупность таких звеньев.

2. Проведенный оригинальный анализ ЭППОК по методу параметрических структурных схем (ПСС) связал воедино механическую, электрическую, магнитную и оптическую цепи преобразователей.

3. Разработана математическая модель ЭППОК, получены зависимости, описывающие характеристики отдельных звеньев преобразователя с позиций единого математического аппарата.

4. Исследования магнитооптических преобразователей перемещений осуществлялись в функции внешнего механического воздействия q'_m , т.е. в функции механической силы F . В случае необходимости анализа преобразователей также в функции времени величины воздействия $I(p)$, $q'_m(p)$ и реакции $U(p)$ должны быть представлены в операторной форме, где оператор p является комплексным числом с вещественной и мнимой частью:

$$p = q'_m + j\omega. \quad (4.24)$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

5.1. Электромагнитный измеритель амплитуды вибраций

Прибор ЭИАВ предназначен для измерения амплитуды вибраций поверхностей из стали и ее сплавов. В комплект прибора входят регистрирующее устройство и выносной датчик [59].

Датчик представляет собой измерительную катушку L_3 , которая вместе с К.З. витком (экраном) помещается в ферромагнитный сердечник Бб. Сердечник заключен в латунный патрон, который соединяется с микрометром. Датчик устанавливается на отдельной штанге вблизи колеблющейся поверхности.

Структурная и принципиальная схемы регистрирующего устройства ЭИАВ даны на рис. 5.1 и 5.2. С блока питания (БП) на транзисторах VT_{10} , VT_{11} , VT_{12} стабилизированное напряжение 12В подается на все каскады прибора.

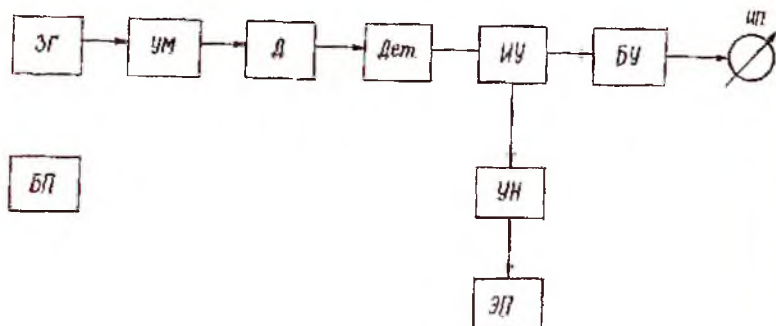


Рис. 5.1. Структурная схема электромагнитного измерителя амплитуды вибраций (ЭИАВ)

Задающий генератор (ЗГ), собранный на транзисторе VT_1 по трехточечной схеме, питает катушку преобразователя частотой

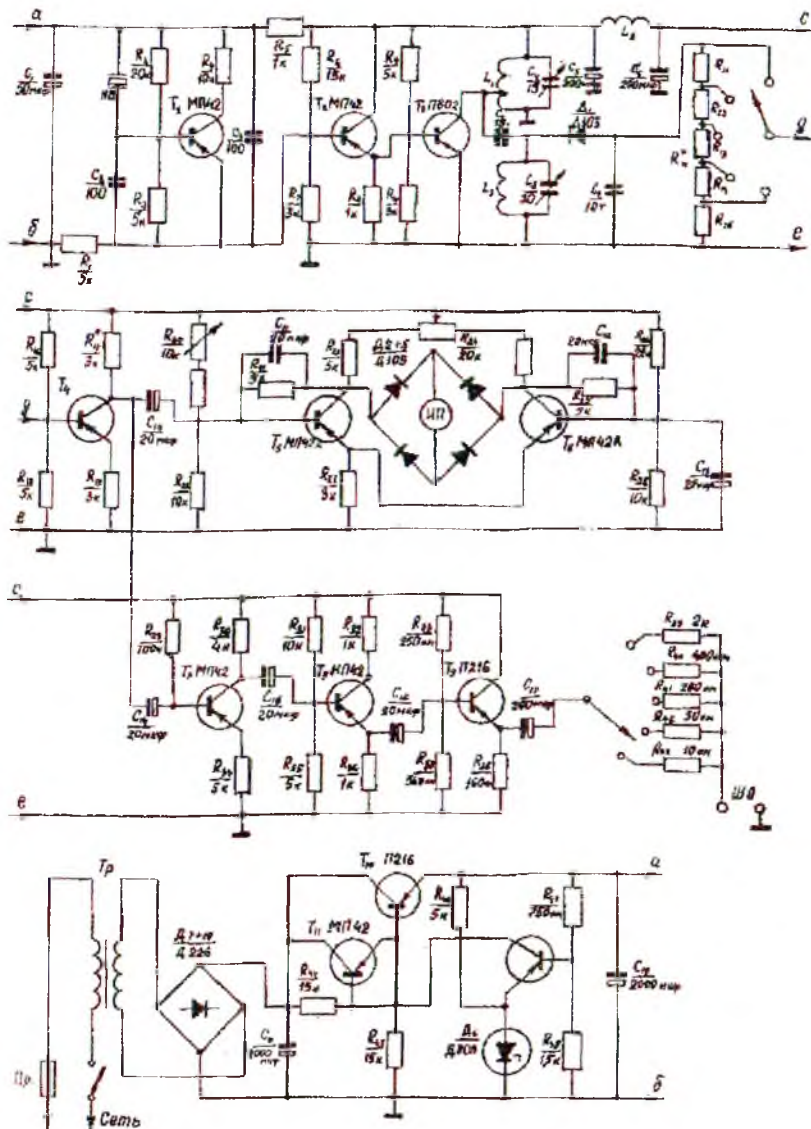


Рис. 5.2. Принципиальная схема регистрирующего устройства ЭИАВ

0,1÷1,0 МГц, стабилизированной кварцем. Амплитуда высокочастотного (В.Ч.) напряжения может достигать величины $8\div 30В$ в зависимости от точки включения транзистора в контур усилителя мощности (УМ), собранного на транзисторе VT_3 .

Эмиттерный повторитель на транзисторе VT_2 служит для согласования входного и выходного сопротивлений, упомянутых каскадов. Контур усилителя мощности настраивается в резонанс на частоту задающего генератора. Через емкость C_7 энергия подается на датчик (Д) L_3 , который настроен в резонанс с помощью подстроечного конденсатора C_8 .

Колеблющаяся поверхность тела в поле датчика изменяет его параметры, что вызывает модуляцию высокочастотного напряжения. После детектирования (Дет) низкочастотное напряжение подается на измерительный усилитель (ИУ), собранный на транзисторе VT_4 . С выхода измерительного усилителя напряжение подается на балансировый усилитель (БУ), собранный на транзисторе VT_7 канала записи.

На транзисторах VT_8 и VT_9 собраны два эмиттерных повторителя (ЭП); с нагрузки последнего переменное напряжение, пропорциональное амплитуде вибраций, подается на шлейфовый осциллограф ШО типа Н700. В диагональ балансного усилителя (БУ) включен измерительный прибор ИП типа М265, который позволяет осуществлять визуальный контроль за амплитудой вибраций.

Основные технические данные прибора ЭИАВ:

Максимальная амплитуда вибраций 1мм

Погрешность $\pm 5\%$

Параметры питающей сети 200В, 50Гц

Потребляемая мощность 50Вт

Габаритные размеры 250×160×160мм

Масса 4,5кг

Общий вид прибора ЭИАВ с датчиком приведен на рис.5.3.

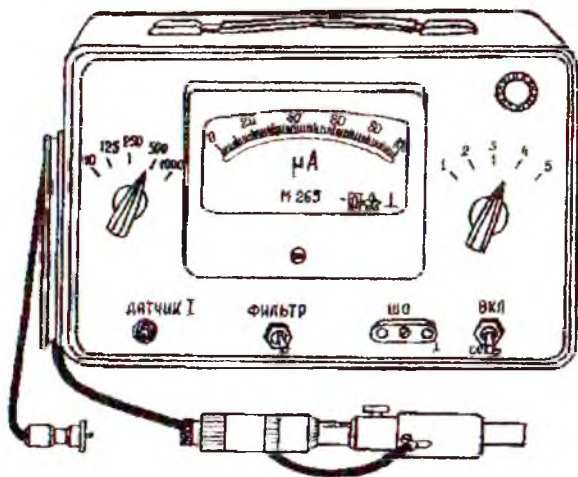


Рис. 5.3. Общий вид прибора ЭИАВ

Прибор внедрен для контроля вибраций валов авиационных двигателей.

5.2. Двухканальный волоконно-оптический измеритель вибраций

Принципиальная электрическая схема двухканального волоконно-оптического измерителя вибраций (ВОИВ) приведена на рис. 5.4 [69]. Функционирует ВОИВ следующим образом. Световые потоки с двух приемных световодов постушают на фотодиоды VD_1 , VD_2 . Преобразователи тока в напряжение, выполненные на операционных усилителях A_1 , A_2 , преобразуют токи фотодиодов в напряжения U_1 , U_2 , которые снимаются с выходов A_1 , A_2 . Далее с помощью схемы вычитания, выполненной на усилителе A_3 , формируется разностный сигнал $S_1 = U_2 - U_1$, который снимается с выхода A_3 . Суммарный сигнал $S_2 = U_2 + U_1$ формируется на выходе блока сложения, выполненном на операционном усилителе A_4 , который

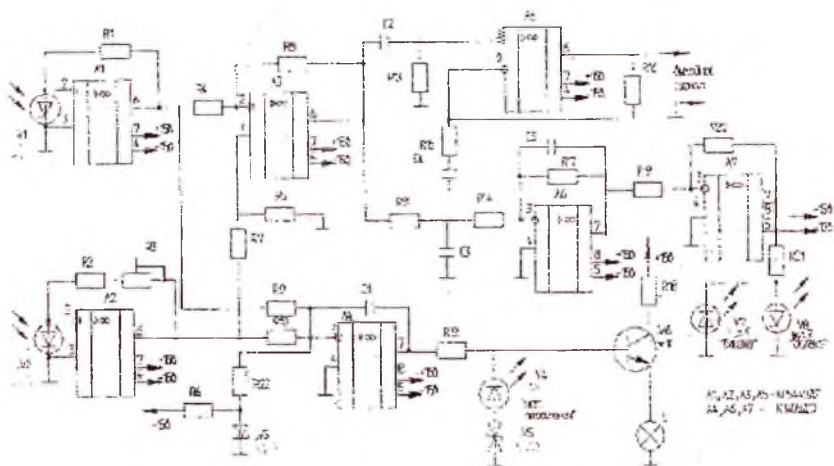


Рис. 5.4. Принципиальная электрическая схема волоконно-оптического измерителя вибраций (ВОИВ)

одновременно за счет наличия конденсатора $C1$ выполняет функции интегратора. Кроме сигналов U_1 , U_2 , поступающих на вход $A4$, на этот же вход подается также сигнал $U_{0П}$, снимаемый с источника опорного напряжения $VD3$, выполненного на прецизионном стабилизаторе $KС191У$. Сигналы U_1 , U_2 и $U_{0П}$ имеют разные знаки, поэтому в установившемся режиме, когда на входе $A4$ присутствует нулевой сигнал, выполняется равенство $U_1 + U_2 = U_{0П} = const$. Таким образом, в процессе установки тока источника света L (лампочка накаливания типа $СМН 6 - 20 - 2$) напряжение на выходе $A4$ изменяется (при этом изменяется ток через L) до момента появления нулевого сигнала на входе $A4$, т.е. до выполнения равенства $U_1 + U_2 = U_{0П} = const$. Транзистор VT служит для усиления тока через лампочку L . Если датчик ВОИВ расположен далеко от отражающей поверхности, то отражения нет и напряжение на выходе интегратора $A4$ начинает неограниченно возрастать, так как разомкнута обратная световая связь между $VD1, VD2$ и L . Если не принять специальных мер, то лампочка перегорит из-за подачи на нее недопустимо высокого напряжения. Чтобы исключить выгорание

108

лампочки, напряжение на базе транзистора VT ограничено путем последовательного включения стабилитрона VD5 - КС168 и светодиода VD4 - АЛ307. Напряжение на этих элементах не превышает соответственно 6, 8 и 1,8 вольта, поэтому напряжение на базе VT составляет не более $6,8+1,8=8,6$ вольта. Учитывая падение напряжения на переходе база-эмиттер транзистора VT (0,6 вольта), напряжение на лампочке L при отсутствии отражающей поверхности не превышает $8,6-0,6=8$ вольт, что исключает ее выгорание. Светодиод VD4 расположен на передней панели прибора под надписью "Нет отражения". Общий вид прибора ВОИВ с датчиком приведен на рис. 5.5. Свечение этого светодиода информирует оператора или об отсутствии отражающей поверхности вообще или о сильном загрязнении отражающей поверхности, не позволяющем производить измерения.

Рассмотрим теперь процесс установки рабочего зазора Z_0 в ВОИВ. При поддержании разностного сигнала S_1 равным нулю удастся поддерживать постоянной и величину рабочего зазора Z_0 вне зависимости от мощности источника света, коэффициентов отражения, усиления и т.д. Разностный сигнал S_1 поступает на вход усилителя, выполненного на операционных усилителях А6, А7. Номиналы резисторов R11, R14, R17, R19, R20 выбраны таким образом, что суммарный коэффициент усиления разностного сигнала превышает 10000. Конденсаторы С3, С5 совместно с другими элементами образуют фильтр нижних частот с полосой пропускания 0,5 Гц. При отклонении рабочего зазора между торцом волоконно-оптического жгута датчика и отражающей поверхностью от номинального значения сигнал S_1 становится отличным от нуля (полярность сигнала зависит от направления движения), что приводит к появлению сигнала на выходе А7 и свечению одного из светодиодов VD7, VD8, расположенных на передней панели прибора.

Оператор в процессе установки рабочего зазора изменяет его до тех пор, пока не перестанут светиться оба светодиода. Надписи "близко"

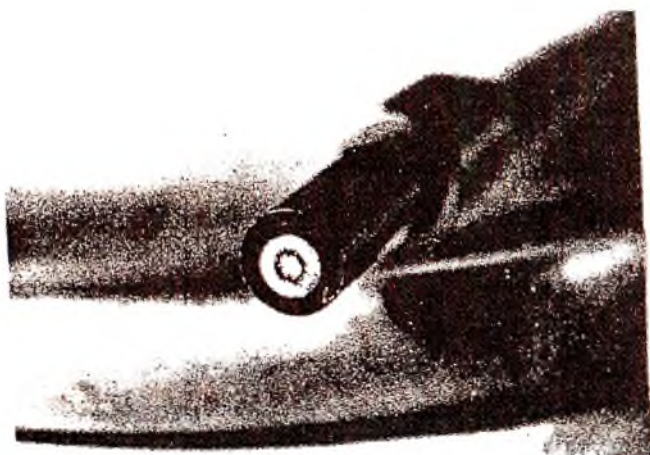


Рис. 5.5. Общий вид прибора ВОИВ с датчиком

и "далско", нанесенные на переднюю панель прибора над соответствующими светодиодами VD6, VD7, подсказывают оператору необходимое направление перемещения торца волоконно-оптического жгута. Можно предусмотреть автоматическую установку и поддержание рабочего зазора, для чего к выходу А7 необходимо подключить электромагнит, перемещающий волоконно-оптический световод в направлении, перпендикулярном отражающей поверхности. Все три светодиода VD4, VD6, VD7 имеют красное свечение, и возбуждение любого из них означает для оператора, что имеются отклонения от номинального режима измерения.

Переменная составляющая сигнала S_1 , амплитуда которой пропорциональна амплитуде измеряемой вибрации, усиливается усилителем А5, выход которого подключен к разъему "выходной сигнал" на передней панели прибора. Этот сигнал в зависимости от задач измерения может поступать на аналоговый или цифровой регистратор, анализатор спектра или некоторый сумматор для работы в комплексе с другими преобразователями, например, электромагнитными.

Ниже приведены технические характеристики ВОИВ при использовании жгута ВС с внешним радиусом 2,4 мм и оптимальными соотношениями внутренних радиусов:

Установочный зазор	1,35 мм
Чувствительность	10 В/мм
Диапазон частот измеряемой вибрации (по уровню ЗдБ)	1,4Гц-85кГц
Разрешающая способность	0,08 мкм
Габаритные размеры блока электроники	150 x 100 x 30 мм
Внешний радиус торца жгута ВС	2,4 мм
Потребляемая мощность	12 Вт
Режим работы	непрерывный
Амплитуда вибрации (при нелинейности 2 %)	0,18 мм

Электронная часть прибора ВОИВ выполнена на базе операционных усилителей 140УД17 и 544УД2. Блок питания, цепи регулировки смещения и коррекции в операционных усилителях из-за стандартности технического решения для этой схемы не приводятся.

Прибор внедрен в систему контроля пульсаций давления в компрессоре газотурбинного двигателя.

Рассматриваемый измеритель вибраций ВОИВ позволяет с погрешностью 0,1 % контролировать рабочий зазор. В некоторых случаях такая задача может являться основной. Так, например, в лазерном микроскопе ЛСМ необходим датчик положения с точностью позиционирования 0,1мкм. Это необходимо для того, чтобы оператор, отметив интересующий его объект, мог провести сканирование в окрестности этой точки, а далее быстро вернуться в интересующую его точку. На базе измерителя вибрации ВОИВ 4 был изготовлен измеритель положения ВОИП [67], используемый в системе позиционирования указанного микроскопа. Проведенные исследования измерителя вибрации ВОИВ показали, что основная погрешность позиционирования обусловлена изменениями напряжения смещения, коэффициента передачи фотоприемников и влиянием внешней засветки. Для устранения отмеченных недостатков и учитывая, что высокое быстродействие в данном случае не требуется, был разработан измеритель положения, в котором:

- 1) Формирование сигнала S_1 производится путем вычитания самих токов фотодиодов;
- 2) Поверхность КО освещается модулированным светом с помощью полупроводникового лазера;
- 3) Длительность импульса лазера выбирается кратной $1/50\Gamma_{\text{ц}}=20\text{мс}$.

Измеритель положения функционирует в составе системы позиционирования лазерного микроскопа следующим образом. Оператор, желая запомнить положение интересующего его объекта,

включает автоматическую систему управления положением жгута ВС, которая изменяет его положение относительно предметного столика микроскопа до тех пор, пока на выходе измерителя не появится нулевой сигнал, после этого положение торца волоконно-оптического жгута фиксируется. Далее оператор, перемещая предметный столик, исследует с помощью микроскопа окрестности интересующего его объекта, а в случае необходимости снова получить изображение интересующего его объекта, включает автоматическую систему позиционирования, которая перемещает предметный столик микроскопа до получения нулевого сигнала на выходе измерителя положения. В отличие от интерферометрических датчиков рассматриваемый измеритель имеет только одно положение, при котором на его выходе имеется нулевой сигнал. Кроме того, знак выходного сигнала измерителя однозначно определяется направлением смещения торца жгута ВС, его значение приблизительно пропорционально величине отклонения, что определяет простоту включения этого измерителя в автоматическую систему позиционирования.

5.3. Магнитооптический измеритель перемещений

Электрическая структурная схема прибора МОИП для контроля малых перемещений, представленная на рис.5.6, содержит: 1 - генератор пилообразного напряжения, 2 - устройство управления, 5 - специализированный микропроцессор, 6 - датчик линейных перемещений, 7 - устройство согласования, 8 - коммутатор, 9 - компаратор, 10 - счетчик, 11 - кварцевый генератор.

Генератор пилообразного напряжения 1 по команде устройства управления 2 вырабатывает импульсы напряжения, линейно изменяющегося во времени. Эти импульсы поступают на вход интегратора 3.

На выходе интегратора формируются импульсы квадратичной формы, которые попадают в первичную обмотку датчика линейных

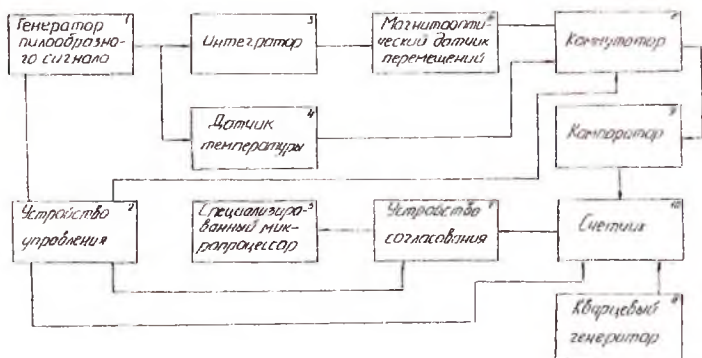


Рис.5.6. Электрическая структурная схема прибора МОИП

перемещений 6. Датчик содержит броневого ферритовый сердечник, якорь, первичную и вторичную обмотки. В зависимости от деформации в листовых изделиях изменяется воздушный зазор между якорем и сердечником. Следовательно, изменяется сопротивление магнитной цепи. На вторичной обмотке датчика появляются импульсы напряжения, линейно изменяющегося во времени. Причем скорость нарастания пилы обратно пропорциональна измеряемой деформации. Импульсы тока от генератора можно описать уравнением

$$I = \kappa t^2, \quad (5.1)$$

где κ - коэффициент пропорциональности, A/c^2 ;

t - длительность импульса, с.

Квадратично изменяющийся ток, протекающий по первичной обмотке датчика, индуцирует напряжение, которое можно записать в виде

$$U_2 = \frac{w_1 w_2}{R\mu} \cdot \frac{dI}{dt}, \quad (5.2)$$

где w_1 и w_2 - числа витков в первичной и вторичной обмотках соответственно. Подставляя в (5.2) выражения (5.1) и (4.2) получим

$$U_2 = \frac{2\kappa w_1 w_2 \mu S_0}{\delta} t. \quad (5.3)$$

Из формулы (5.3) видно, что напряжение на вторичной обмотке преобразователя линейно изменяется во времени и обратно пропорционально величине перемещения. Это линейно изменяющееся напряжение подается на один из входов компаратора. В результате сравнения с опорными напряжениями напряжения U на выходе компаратора сформируется импульс, длительность которого можно выразить следующей формулой:

$$t = \frac{U_{оп2} - U_{оп1}}{2w_1 w_2 \kappa \mu_0 S} \delta, \quad (5.4)$$

где t - длительность импульса на выходе компаратора, с;
 $U_{оп1}$, $U_{оп2}$ - опорные напряжения на 1 и 2 выходах компаратора соответственно, В.

Как видно из формулы (5.4) длительность импульса прямо пропорционально зависит от величины измеряемого перемещения.

Прибор работает в двух режимах: измерения перемещения и измерения температуры. В режиме измерения перемещения коммутатор 8 по команде устройства управления 2 подключает вторичную обмотку датчика линейных перемещений 6 к компаратору 9. На входе компаратора формируются импульсы, длительность которых прямо пропорциональна крутизне линейно изменяющегося напряжения. Эти импульсы являются стробирующими для счетчика 10. Счетчик заполняется импульсами кварцевого генератора 11. Таким образом, число импульсов, прошедших в счетчик, зависит от длительности импульса, сформированного компаратором, и, следовательно, прямо пропорционально измеряемому перемещению. С целью увеличения точности процесс измерения перемещения проводится 8 раз. Команды на повторение процесса измерения идут из устройства управления. После окончания цикла измерения перемещения счетчик сбрасывается по сигналу устройства управления. Устройство согласования 7

необходимо для преобразования уровня логических сигналов и гальванической развязки при вводе результатов измерений в специализированный микропроцессор 5. По команде устройства управления 2 прибор переходит в режим измерения температуры. Информация о температуре вводится в специализированный микропроцессор 5 для реализации последующей компенсации температурной погрешности измерения перемещения. В режиме измерения температуры коммутатор 8 подключает ко входу компаратора 9 датчик температуры 4. Измерение сигнала с датчика температуры аналогично измерению сигнала с датчика перемещений. Датчик температуры представляет собой резистивный делитель, одним из резисторов которого является термистор. С термистора снимается напряжение, линейно изменяющееся во времени. Причем крутизна пилы обратно пропорционально зависит от измеряемой температуры. Поэтому длительность импульса с компаратора и, следовательно, количество импульсов, поступающих в счетчик, прямо пропорциональны измеряемой температуре. После ввода в микропроцессор информации о перемещении и температуре устройство управления отключается и начинается обработка полученных данных в специализированном микропроцессоре по программе, заложенной в него оператором.

Принципиальная схема прибора изображена в прил. 1 (см. вклейку). При нажатии кнопки "Пуск" высокий логический уровень потенциалом +9В поступает на интегрирующую цепь R4, C2. На входе Д2.1 формируется напряжение логической "1" с задержкой, величина которой определяется R4 и C2. После двойного инвертирования элементами Д2.1 и Д2.2, необходимыми для повышения крутизны фронта, сигнал логической "1" поступает на вход "4 С" Д3.1 и запускает ждущий одновибратор, собранный на Д3.1, С5 и К14, который формирует импульс "сброс", необходимый для установки всей схемы в исходное состояние. Работу схемы иллюстрируют эпюры напряжений в прил. 2 (см. вклейку).

На выходе 1 ДЗ.1 формируется напряжение логического "0". С инверсного выхода 2 ДЗ.1 отрицательный импульс поступает на вход 5 Дб.1. На остальных выходах Дб.1 имеется в этот момент времени напряжение логической "1". На выходе Дб.1 формируется положительный импульс, который через инвертор запускает ждущий одновибратор, собранный на Д1.2 С4, R12. Отрицательный импульс с выхода 13 Д1.2 через инвертор поступает на вход "С" Д1.1 и вырабатывает на выходе 1 Д1.1 импульс напряжения логической "1", транзистор VT3 открывается, открывая транзисторы VT1 и VT6. Емкости С1 и С6 разряжаются. По заднему фронту положительного импульса закрываются транзисторы VT3, VT1 и VT6. Генератор пилообразного напряжения, собранный на ДА1, вырабатывает напряжение, линейно изменяющееся во времени. Это линейно изменяющееся напряжение подается на интегратор, собранный на ДА2, и термочувствительный датчик на R20 через усилитель ДА3.

На выходе интегратора формируется ток, квадратично изменяющийся во времени, который усиливается транзисторами VT7 и VT9 и подается в первичную обмотку датчика. На вторичной обмотке датчика формируется напряжение, линейно изменяющееся во времени, причем крутизна пилы обратно пропорциональна измеряемому перемещению. Это напряжение через коммутатор, собранный на полевых транзисторах VT11, VT16, работой которых управляют триггеры Д13.1 и Д13.2, поступает на вход компаратора, собранного на микросхемах ДА5, ДА6.

Так как полевые транзисторы VT1, VT6, используемые в качестве ключей сброса, имеют остаточное напряжение, то пилообразное напряжение на участке характеристики, ограниченном остаточным напряжением, не будет строго линейным. Поэтому компаратор собран по двухпороговой схеме, уровни срабатывания компаратора выбраны следующими: $U_{ср1}=0,5В$; $U_{ср2}=2В$. Для обеспечения заданных уровней необходим источник опорного напряжения. Он выполнен на транзисторе VT21. Напряжение $U_{оп1}$ снимается с резистора R41,

напряжение $U_{оп2}$ - с R43. По достижении напряжением со вторичной обмотки датчика уровня $U_{оп1}$ на выходе компаратора ДА6 появляется напряжение логической "1", которое поступает на вход 13 Д27, и происходит заполнение счетчика, выполненного на Д17 - Д20, импульсами кварцевого генератора, собранного на Z1. Это продолжается до тех пор, пока линейно изменяющееся напряжение с датчика не достигнет уровня $U_{сн2}$.

Прибор работает в двух режимах: измерения перемещения (описанный выше) и измерения температуры. Данные о температуре вводятся в специализированный микропроцессор А2 для реализации последующей компенсации температурной погрешности измерения перемещения.

В режиме измерения температуры к выходу генератора линейно изменяющегося напряжения через усилитель на ДА3 подключен термистор R20, который является одним из резисторов делителя R19, R.20. С термистора снимается напряжение, линейно изменяющееся во времени. Скорость нарастания пилы обратно пропорционально зависит от температуры. Через транзистор VT11 это напряжение попадает на вход компараторов ДА5, ДА6. Дальнейшая обработка сигнала происходит аналогично процессу измерения перемещения.

С целью увеличения точности процессы измерения перемещения и температуры проводят 8 раз. Для этого с выхода ДА3 линейно изменяющееся напряжение подается на вход триггера Шмидта, собранного на Д4.1, Д4.2, Д4.3, который из этого напряжения армирует импульс положительной полярности. Этот импульс через инвертор поступает на вход 3 Д6.1. Процесс образования импульсов линейно изменяющегося напряжения продолжается. После прохождения 16 импульсов через счетчик Д5 на его выходе образуется напряжение логической "1", которое переключает Д13.1 в состояние логического "0" на выходе "1", переключающего прибор в режим измерения температуры.

Одновременно напряжение логической "1" поступает на схему формирования импульса на микросхемах Д4.4, Д4.5, Д4.6, Д10.3 и Д10.4. Импульс напряжения логического "0" с выхода Д10.4 через Д14.1 и Д14.2 переводит схему управления в режим записи содержимого счетчика Д17 - Д20 в специализированный микропроцессор А2. Запись происходит следующим образом. Первый тактовый импульс с выхода делителя Д13 с коэффициентом деления 4 через Д14.2 поступает в сдвиговый регистр Д8. С его выхода 5 напряжение логической "1" открывает коммутатор тока Д25. Происходит запись числа из счетчика Д20 через дешифратор Д28 и ключи К1 - К10 в специализированный микропроцессор А2. С приходом 2,3,4-тактовых импульсов происходит последовательная запись в микропроцессор содержимого остальных счетчиков. С приходом 5-тактового импульса на выходе Д12.1 формируется напряжение логической "1", которое закрывает VT23, и прохождение тактовых импульсов прекращается. Одновременно 5-тактовый импульс подается на схему формирования на Д11, Д14. Импульсом с выхода Д11.5 открывается транзисторный ключ на VT35 и формируется в специализированный микропроцессор команда "с/п". Импульс с Д13.4 проходит через Д14.4 и является импульсом сброса счетчика.

Импульс синхронизации с выхода Д14.3 поступает на вход С2 микросхемы Д3.2, устанавливая триггер в положение логической "1", так как перед этим он был установлен в положении логического "0".

На выходе Д6.2 появляется импульс напряжения логического "0", и запуск генератора линейно изменяющегося напряжения повторяется описанным выше методом, но в отличие от режима измерения перемещения, ко входам компараторов ДА5, ДА6 подключен не датчик перемещений, а термочувствительный резистивный делитель. После прохождения 16 импульсов происходит ввод числа в специализированный микропроцессор, как было описано выше.

При необходимости пошаговой проверки работы схемы нажимают кнопку "Такт". Триггер, собранный на Д2.1, переводит схему из автоматического режима работы в ручной. Теперь, нажимая кнопку "Шаг", можно имитировать прохождение синхронизирующих импульсов из специализированного микропроцессора на вход Д14.2. Таким образом, производится ручной пошаговый ввод числа из счетчика Д17 - Д20 в микропроцессор.

Встраивание микропроцессоров в контрольно-измерительную и регистрирующую аппаратуру позволяет в несколько раз повысить точность, скорость, надежность измерений, снизить стоимость приборов, осуществить автоматизацию измерений и обработку результатов; расширить функциональные возможности приборов и повысить эффективность выполнения следующих функций: калибровка, усреднение показаний, температурная компенсация, сравнение показаний, умножение показаний на константу; контроль и управление измерительным комплексом, преобразование и обработка данных, индикация, регистрация, представление информации.

Однокристалльная большая интегральная схема калькулятора МК-52 представляет собой микропроцессор узкого назначения без возможности доступа извне к составляющим его частям. Скорость ввода информации в десятичной системе счисления и выполнение простых арифметических операций достигают 20 команд/с. Эти особенности микрокалькулятора определяют специфику его использования в измерительных системах, например, в устройствах с частотными датчиками. Для этого требуется замена ключей клавиатуры микрокалькулятора входными периферийными устройствами на "жесткой" логике, реализующими заданный алгоритм работы системы в целом.

В данной работе согласование прибора с микропроцессором осуществляется через оптрона АОУ 103. Время включения 10 мкс; время выключения 35 мкс. Сопротивление гальванической развязки

$5 \times 10^8 \text{ Ом}$. Оптроны дают возможность обеспечения идеальной электрической развязки между входом и выходом, возможность реализации бесконтактного оптического управления электронными объектами. На схеме не указан оптический канал магнитооптического датчика. С целью увеличения точности процесса измерения перемещения коммутатор 8 по команде устройства управления 2 подключает оптический канал к коммутатору 9 и производит 8 измерений с последующей аналогичной их обработкой. Оптический канал с магнитооптического датчика может быть реализован самостоятельным прибором, как показано в п. 5.2.

В данной работе реализован прибор [63,70,82-84] для контроля малых перемещений в листовых изделиях из алюминиевых сплавов; не электрическая контролируемая величина - перемещение с помощью магнитооптического датчика – преобразуется в электрическую величину - напряжение, которое вводится в измерительно-вычислительный комплекс, подвергается соответствующей обработке в процессорном блоке и выводится на цифровом дисплее микрокалькулятора.

Основные технические данные прибора МОИП:

Диапазон измеряемых перемещений	10^{-4} -3,0мм
Погрешность	0,01%
Параметры питающей сети	36В, 50Гц
Потребляемая мощность	5Вт
Габаритные размеры	260×190×140мм
Масса	1,5кг

Общий вид конструкции прибора МОИП приведен в приложении 3 (см. вклейку). Прибор внедрен для контроля листовых изделий из алюминиевых сплавов Д16Т и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. С. 362314 (СССР). Электромеханическое множителемно-делительное устройство / А.А.Плют, Н.Е.Кошохов. Оpubл. в Б. И. 1971.
2. А. С. 1392365(СССР). Электромагнитный преобразователь перемещений / Н.Е.Конюхов, Н.И.Лиманова и др. Оpubл.в Б. И. 1988. №16.
3. Registration of Intravascular Pressure and Sound By a Fiber Optic Catheter // A. Ramires, W.B. Hood, M. Polyani at all. // Journ. Of Appl. Physiology. - V.26. - №5. - p.679-683.
4. А. С. 1392365 (СССР). МКИ g08 с 9/04. Электромагнитный преобразователь перемещений / Н.Е. Конюхов, Н.И. Лиманова, В.М. Гречишников и др. - Оpubл. 30.04.88. Бюл. №16.
5. А. С. 1446460 (СССР). МКИ G01 В 7 /30. Измеритель угловых перемещений / Н.И. Лиманова. - Оpubл. 23.12.88. Бюл. №47
6. А. С. 1561119 (СССР). МКИ H01 H 36/00. Бесконтактный переключатель / Ю.С. Дмитриев, Н.И. Лиманова. - Оpubл. 30.04.90. Бюл. №16.
7. А. С. 1585693 (СССР). МКИ G01 H 11/00. Электромагнитное измерительное устройство / Н.И. Лиманова, А.Р. Шишкин, В.Н. Буров. - Оpubл. 15.08.90. Бюл. №30.
8. А. С. 1702511 (СССР). МКИ H03 В 1/00, G01 N27/00. Генератор синусоидальных сигналов / А.Р. Шишкин, В.Н. Буров, Н.И. Лиманова, В.С. Вопилин. - Оpubл. 30.12.91. Бюл. №48.
9. А. С. 1702511 (СССР). МКИ H03 В1/00, G01 №27/00. Генератор синусоидальных сигналов / Лиманова Н.И., Шишкин А.Р., Буров В.Н., Вопилин В.С. - Оpubл. 30.12.91. Бюл. №48.
10. А. С. 1742620 (СССР). Преобразователь перемещений / Н.И. Лиманова. Оpubл. 23.06.92. Бюл. №23.
11. А. С. 1779918 (СССР). Устройство для измерения расстояний до объекта / Н.И. Лиманова. Оpubл. 07.12.92. Бюл. №45.

12. А. С. 1779919 (СССР). Способ измерения расстояний до объекта и устройство для его осуществления / Н.Е. Конюхов, Н.И. Лиманова и др. Оpubл. 07.12.92. Бюл. №45.
13. А. С. 1798632 (СССР). МКИ G01 Н 17/00.Способ измерения вибраций и устройство для его осуществления / Конюхов Н.Е., Лиманова Н.И., Шишкин А.Р., Гречишников В.М., Данилов А.В. - Оpubл. 28.02.93. Бюл. №8.
14. А. С. 1805291 (СССР). Преобразователь перемещений / Н.Е. Конюхов, Н.И. Лиманова. Оpubл. 30.03.93. Бюл. №12.
15. А. С. 191380 (СССР). Дифференциальный индуктивный датчик перемещений/ И.А. Лиманов. Оpubл. Б.И., 1967. №3.
16. А. С. 403955 (СССР). Дифференциальный индуктивный датчик перемещений/ М.Ф. Зарипов, Н.М. Старобинский, И.А. Лиманов. Оpubл. в Б.И., 1973. №43.
17. А. С. 428428 (СССР). Дифференциальный индуктивный датчик перемещений/ М.Ф. Зарипов, И.А. Лиманов, М.И. Генне. Оpubл. в Б.И., 1974. №18.
18. А. С. 428429 (СССР). Дифференциальный индуктивный датчик перемещений/ М.Ф. Зарипов, Н.М. Старобинский, И.А. Лиманов. Оpubл. в Б.И., 1973. №18.
19. А. С. 470746(СССР). Цифровой электроизмерительный прибор/ Л.Ф.Куликовский, Н.Е.Конюхов, А.А.Плют, С.А.Матюнин. Оpubл.в Б.И., 1981.
20. Абрамов Г.В., Осипов В.Н., Лиманов И.А. и др. Прибор для измерения амплитуды вибраций // Информационный листок. - 484 - 73, Куйбышев: "ЦНТИ", 1973. 2 с.
21. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.И. Датчики контроля и регулирования. М.: Машиностроение, 1965. 928с.
22. Алиев Т.М., Сейдель Л.Р. Автоматическая коррекция погрешностей цифровых измерительных приборов. - М.: Энергия, 1975. 216 с.

23. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1. М.–Л.: Энергия, 1966. 319с.
24. Будь Б. К. Основы теории и расчета магнитных цепей. – М.: Энергия, 1964. 464с.
25. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоиздат, 1990 254 с.
26. Валитов Р.А., Кокодий Н.Г. и др. Измерение характеристик оптических квантовых генераторов. М.: Издательство стандартов, 1969. 184 с.
27. Ванюрихин А.И., Герчановская В.П. Оптико-электронные поляризационные устройства. – Киев: Техника, 1984. 160 с.
28. Волоконно-оптическая связь: Приборы, схемы и системы / Р. Дэйвис, И. Гаррет, Р. Гудфеллоу и др.: Пер. с англ. И.Г. Ксендзацкого; Под. ред. М.Е. Жаботинского. – М.: Радио и связь, 1982. 270 с.
29. Голубева Т.В., Лиманова Н.И. Алгоритм сшивания типовых фрагментов (Рукопись деп. 05.10.84 в ВИНТИ № 6567 - 84).
30. ГОСТ 23222-78. Средства измерений и автоматизации ГСП. Нормируемые метрологические и точностные характеристики. – Переизд., март, 1983. -10с.
31. Гудков Ю. И. Методы и средства автоматической коррекции погрешностей волоконно-оптических преобразователей для систем контроля ГАП // Измерительная техника. – 1988. №11. С. 14-15.
32. Денисов В.А., Лиманова Н.И. Диагностическая система для оперативного контроля механических факторов коммутации электрических микромашин // Специальные электрические машины: Сб. науч. Тр. – Куйбышев: КПТИ, 1983. С.118-124.
33. Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Рубин А.Л. Индукционная толщинометрия. М. : Энергия, 1969.152с.

34. Жилин В.Г. Волоконно-оптические и измерительные преобразователи скорости и давления. - М.: Энергоатомиздат, 1987, 112 с.
35. Зак Е.А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией. - М.: Энергия, 1969. 176 с.
36. Зарипов М.Ф. Датчики малых угловых скоростей / Уфимский авиационный институт. Уфа, 1975. 72с.
37. Зарипов М.Ф. Преобразователи с распределенными параметрами М.: Энергия, 1969. 176с.
38. Зарипов М.Ф. Элементы автоматики и информационно-измерительной техники на основе преобразователей с распределенными электромагнитными параметрами // Аналоговые магнитные элементы. М.: Наука, 1968. С. 50 - 62
39. Зарипов М.Ф., Мамаджанов М.М., Петрова И.Ю. Анализ динамических характеристик элементов систем управления по структурным схемам: Учеб. пособие для вузов. -Ташкент 1978. -88с.
40. Заявка 63293401 Японии, МКИ G01 В 11/00. Волоконно-оптическое устройство для измерения перемещений / Мияниса Хидэки (Яп); К.к. Ясунага Тэккосе (Яп). - №62 - 127967. Заявлено 27.05.87; Опубл. 30.11.88; Кокай токке кохо. Сер. 6 (1).- 1988, 182, с.1-4.
41. Иванов В.В., Капцов А.В. Математическая модель электромагнитного преобразователя // Применение радиоэлектроники, аппаратуры связи, вычислительной и лазерной техники в народном хозяйстве. Куйбышев, 1983. С. 25-30 (Рукопись дей. в ЦНИИ "Электроника", 19261/84).
42. Ищенко Е.Ф., Климов Ю.М. Оптические квантовые генераторы. М.: Сов. радио, 1968. 470 с.
43. Како Н., Яманэ Я. Датчики и микроЭЖ.: Пер. с япон.- Л.: Энергоатомиздат, 1986.

44. Капцов А. В., Лиманова Н.И. Исследование характеристик преобразователей с помощью структурных схем // Всесоюзное совещание: - семинар "Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических устройств и систем": Тез. докл. Кишинев, 1983. С. 49.
45. Катус Т.П., Кравцов Н.В., Чирков Л.Е., Коновалов С.М. Модуляция и отклонение оптического излучения. - М.: "Наука", 1967. С. 167.
46. Козырев Ю.Г., Лиманова Н.И. О двух вариантах подключения датчиков к шине ISA персонального компьютера IBM PC // 8 научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления": Тез. док. Под ред. д.т.н. проф. Азарова. В 2 Т. - М.: МГИЭМ, 1996, Т. 1. С. 182 - 183.
47. Конюхов Н.Е., Лиманова Н.И., Шишкин А.Р. и др. Способ измерения вибраций и устройство для его осуществления. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке №480037/28 от 26.06.91.
48. Конюхов Н.Е., Лиманова Н.И. Волоконно-оптические датчики перемещений со структурной избыточностью // Новые информационные технологии и системы: Матер. докл. Международ. научно-технической конференции. - Пенза: ПГТУ, 1994. С. 119.
49. Конюхов Н.Е. и др. Оптоэлектронные контрольно-измерительные устройства. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
50. Конюхов Н.Е. Лиманова Н.И. Датчики перемещений с совмещенными каналами измерения различной физической природы // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр. - Вып. №12. - Пенза: ППИ, 1992. С. 77 -83.

51. Конюхов Н.Е., Лиманова Н.И. Волоконно-оптические датчики перемещений со структурной избыточностью // Оптические, радиоволновые и тепловые методы и средства неразрушающего контроля качества промышленной продукции: Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции. - Саратов, 1991. С. 5 - 6.
52. Конюхов Н.Е., Лиманова Н.И. Преобразователь перемещений. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке №4932507/28 от 26.03.92.
53. Конюхов Н.Е., Лиманова Н.И., Шишкин А.Р., Гречишников В.М. Способ измерения расстояний до объекта и устройство для его осуществления. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке №8408674/28 от 22.08.91.
54. Красюк Б.А., Семенов О.Г., Шереметьев А.Г., Шестериков В.А. Световодные датчики. - М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
55. Кругер М.Я., Панов В.А., Кулагин В.В. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. - Л.: Машиностроение, 1967. С. 760.
56. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: Учебное пособие для вузов. - М.: Энергоиздат, 1986. 448 с.
57. Куликовский Л.Ф., Зарипов М.Ф. Индуктивные преобразователи перемещений с распределенными параметрами. М.: Энергия, 1966.
58. Левшин В.Л., Левшин Л.В. Люминисценция и ее применение. - М.: Наука, 1972. С. 182.
59. Лиманов И. А. Электромагнитные преобразователи перемещений с распределенными параметрами. М.-Л.: Энергоатомиздат, 1984. 57с.
60. Лиманов И.А. Индуктивный преобразователь с токовихревым эффектом // Измерительная техника. 1969. №7. С. 72 - 74.

61. Лиманов И.А., Лиманова Н.И., Макаров А.В., Денисов Е.В. Термостабилизированный вихретоковый преобразователь // Электромагнитные методы контроля качества материалов и изделий: Тез. док. Всесоюзной научно-технической конференции. Ч.1. Омск: ОПИ, 1983. С. 90 -91.
62. Лиманов И.А., Федоров М.А. Индуктивный датчик с корректирующими обмотками // Изв. вузов. Приборостроение, 1966. Т. IX.
63. Лиманова Н.И. Автоматизированная система для контроля параметров технологических процессов с использованием многоканальных волоконно-оптических датчиков // Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и информатика - 95": Тез. док. - Москва: МГИЭТ ТУ, 1995. С. 250.
64. Лиманова Н.И. Алгоритм обработки сигналов волоконно-оптических средств измерения перемещений со структурной избыточностью // Вопросы проектирования информационных и кибернетических систем: Сб. науч. тр. - Уфа: УАИ, 1992. С. 86-91.
65. Лиманова Н.И. Амплитудные времяимпульсные, фазовые волоконно-оптические датчики перемещений со структурной избыточностью // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: Тез. док. Международной научно-технической конференции. - Курск: КПИ, 1993. С. 50.
66. Лиманова Н.И. Бесконечное измерение перемещений и параметров вибраций с помощью волоконно-оптических датчиков со структурной избыточностью // Современные методы и приборы контроля качества продукции: Матер. семин. - М.: МДНТП, 1992 (в печ).
67. Лиманова Н.И. Волоконно-оптические датчики перемещений со структурной избыточностью // Датчики и преобразователи

- информации систем измерения, контроля и управления: Тез. док. 4 научно-технич. совещания и специалистов с участием представителей зарубежных стран. - Гурзуф, 1992. - С.16.
68. Лиманова Н.И. Волоконно-оптический датчик положения с модулированным оптическим излучением. - Информационный листок №304 - 92. Самара: ЦНТИ, 1992. -2с.
69. Лиманова Н.И. Двухканальный волоконно-оптический измеритель вибраций. - Информационный листок №116 - 92. Самара: ЦНТИ, 1992. -2с.
70. Лиманова Н.И. Использование многоканальных волоконно-оптических датчиков для контроля параметров технологических процессов // Всероссийская научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления": Тез. док. - Крым: 1995. Ч. 2. С. 394 -395.
71. Лиманова Н.И. Использование функциональных тестов при построении многоканальных волоконно-оптических датчиков // 8 научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления": Тез. док. Под ред. д.т.н. проф. Азарова. В 2 Т. - М.: МГИЭМ, 1996. Т. 1. С. 180 - 181.
72. Лиманова Н.И. Метод повышения точности измерений волоконно-оптических датчиков перемещений на основе принципов инвариантности и структурной избыточности // Оптические, радиоволновые и тепловые методы и средства неразрушающего контроля качества промышленной продукции: Сб. науч. тр. - Л.: СЭПИ, 1992, (в печ.).
73. Лиманова Н.И. Оптоэлектронная контролирующая система // Научно-исследовательские разработки и высокие технологии двойного применения: Материалы 1-й Поволжской научно-

- технической конференции. - Самара: ГПСО "Импульс", 1995. Ч. 2. С. 69.
74. Лиманова Н.И. Преобразователь перемещений. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке № 4843068/28 от 23.04.91.
75. Лиманова Н.И. Преобразователь с разделенными параметрами // Труды 2-й научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Куйбышевского авиационного института. Ч.4. Куйбышев, 1982. С.17 - 21 (Рук. деп. в ЦНИИТЭИ приборостроения № 2121-11).
76. Лиманова Н.И. Синтез волоконно-оптических преобразователей со структурно-временной избыточностью // Королевские чтения: Тез. док. Всесоюзной научно-технической конф. Куйбышев, 1991. С.60
77. Лиманова Н.И. Система для измерения параметров вибраций узлов летательных аппаратов // Всероссийская молодежная научно-техническая конференция "Гагаринские чтения": Тез. док. - Москва: МГАТУ, 1995. Ч. 3. С. 36.
78. Лиманова Н.И. Способы бесконтактного измерения перемещений и параметров вибраций с помощью волоконно-оптических датчиков со структурной избыточностью // Современные методы и приборы неразрушающего контроля: Матер. семин. - М.: ЦРДЗ, 1992. С.11 - 17.
79. Лиманова Н.И. Способы повышения точности измерений волоконно-оптических датчиков перемещений // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Тез. док. Международной научно-технической конференции. - Гурзуф: МГИЭМ, 1993. Ч. 2. С. 215 -216.
80. Лиманова Н.И. Устройство для измерения расстояний до объекта. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке №4808673/28 от 15.08.91.

81. Лиманова Н.И. Устройство для контроля и диагностики параметров газотурбинных двигателей // Тез. док. 36 межвузовской СНТК. - 1986. С. 66.
82. Лиманова Н.И. Устройство для контроля малых перемещений // Тез. док. 36 межвузовской СНТК. - Куйбышев: КуАИ, - 1986. С.62.
83. Лиманова Н.И. Устройство для контроля малых перемещений // Тез. док. 36 межвузовской СНТК. - Куйбышев: КуАИ, 1986. 140 с.
84. Лиманова Н.И. Устройство для контроля перемещений с повышенной точностью // Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических систем: Тез. док. Всесоюзного совещ. молодых ученых и специалистов. - М., 1987. - С. 109.
85. Лиманова Н.И. Электромагнитный термостабилизированный преобразователь перемещений // Применение радиоэлектроники, аппаратуры связи, вычислительной и лазерной техники в народном хозяйстве: Сб. науч. тр. - Куйбышев, 1983. С. 19 - 25.
86. Лиманова Н.И., Голубева Т.В. Электромагнитное устройство с повышенной температурной стабильностью / Рукопись деп. 0.5.09.84 в ВИНТИ №6077 - 84. Куйбышев, 84.
87. Лиманова Н.И., Денисов В.А. Устройство прогнозирования надежности щеточных контактов электрических микромашин // Разработка и исследование специальных электрических машин: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КПТИ, 1987. С. 28 - 31.
88. Лиманова Н.И., Капцов А.В., Шишкин А.Р. Электромагнитный преобразователь для неразрушающего контроля с импульсным питанием // Новые методы и средства неразрушающего контроля качества материалов, полуфабрикатов и изделий:

- Тез. док. 4 областной научно-технической конференции. - Куйбышев: Куйб. обл. дом техники НТО, 1982. С. 27 - 28.
89. Лиманова Н.И., Колюхов Н.Е. Преобразователь перемещений. Решение о выдаче авторского свидетельства по заявке №4834504/28 от 27.11.91.
90. Лиманова Н.И., Пиганов М.Н., Капцов А.В. Способ неразрушающего контроля качества электромагнитных реле с повышенной долговечностью // Прогрессивные методы и средства неразрушающего контроля полуфабрикатов, деталей и изделий: Тез. док. 6 областной научно-технической конференции. - Куйбышев, 1987. С. 94 - 95
91. Лиманова Н.И., Пиганов М.Н., Капцов А.В. Физико-математическая модель электромагнитной и механической систем электромагнитного устройства питания // Опто-электронные и электромагнитные датчики механических величин: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1988. С. 56- 59.
92. Лиманова Н.И. Устройство для контроля малых перемещений // Тез. док. 36 межвузовской СНТК. - Куйбышев, 1986. С. 66.
93. Марков М.М. Приемники инфракрасного излучения. - М.: Наука, 1968. С. 167.
94. Маршак И.С. Импульсные источники света. - М.-Л.: Госэнгиздат, 1963. С. 336.
95. Меланхолин Н.М. Методы исследования оптических свойств кристаллов. - М.: Наука, 1970. С. 156.
96. Мельников А.В., Лиманова Н.И. Устройство для контроля и диагностики параметров газотурбинных двигателей // Тез. док. 36 межвузовской СНТК. - Куйбышев, 1986. С. 66.
97. Олеск А.О. Фоторезисторы. - М.: Энергия, 1966. С. 129.
98. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. - Киев: Высшая школа, 1971. 552 с.

99. Основы автоматического регулирования и управления / Под ред. Пономарева В.М. и Литвинова А.П.-М. : Высшая школа, 1974.-439с.
100. Павлов А.В., Черников А.И. Приемники излучения автоматических опико-электронных приборов. - М.: Энергия, 1972. С. 240.
101. Пат. 4824251 США, МКИ G01 B 9/02. Optical Position Sensor Using Coherent Detection and Polarization Preserving Optical Fiber / Slotwinski Antony R., Kenion Stephen C. (США); Digital Signal Corp. (США) - №101102; заявлено 25.04.89; НКИ 356/349.
102. Приемники инфракрасного излучения / Перевод с французского.: Под ред. Л.Н. Курбатова. - М.: Мир, 1969. С. 283.
103. Розенберг В.Я. Введение в теорию точности измерительных систем. - М.: Сов. радио, 1975. 304 с.
104. Рохлин Г.Н. Газоразрядные источники света. - М.-Л.: Энергия, 1966. С. 560.
105. Свечников С.В. Элементы оптоэлектроники. - М.: Сов. радио, 1971. С. 272.
106. Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов / Пер. с англ. Под ред. Е.М. Данилова, В.В. Шевченко. - М.: Радио и связь, 1987. 655 с.
107. Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. Накладные и экранные датчики. Новосибирск: Наука, 1967.1440.
108. Темников Ф.Е. Теория развертывающих систем. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 168 с.
109. Фотопроводящие пленки(типаС)/ З.И.Кирьяшкина и др. - Саратов:Изд-во Сарат. ун-та, 1979.
110. Фотоэлектрические преобразователи информации. Л.Н.Преснухин, В.Ф.Шаньгин, С.А.Майсров и др. - Машиностроение, 1974.

111. Харкевич А.А. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. Т. 1. М.: Наука, 1973. 399с.
112. Чечик Н.О. Фотоэлементы и их применение. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955. С. 112.
113. Чечикто, Файнштейн В.Н., Лифшиц Т.Н. Электронные умножители. М.: Гостехиздат, 1957. 575 с.
114. Чиж И. Г. и др. Оптоэлектронный преобразователь малых перемещений с коаксиальным расположением излучателя и фотоприемника // Оптомеханическая промышленность. 1986. №8. С. 32-33.
115. Ярив А. Введение в оптическую электронику / Пер. с англ. Г.П. Киселева; Под ред. О.В. Богданкевича. - М.: Высшая школа, 1983. 398 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	6
1.1. Магнитные системы преобразователей	6
1.2. Сравнительные характеристики электромагнитных преобразователей перемещений	13
1.3. Анализ конструкторских методов коррекции погрешностей электромагнитных преобразователей	20
Глава 2. ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	23
2.1. Оптические системы преобразователей	23
2.1.1. Принцип действия и основы теории	23
2.1.2. Источники теплового и светового излучения	28
2.1.3. Приспособления оптического излучения	33
2.2. Сравнительные характеристики оптических преобразователей перемещений	46
2.3. Фоторезистивные функциональные преобразователи перемещений	49
2.4. Волоконно-оптические датчики перемещения	57
2.5. Методы коррекции погрешностей волоконно- оптических датчиков перемещений	60
2.6. Методы коррекции погрешностей волоконно-оптических датчиков перемещений структурной избыточностью	67
Глава 3. МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	80
3.1. Электромагнитное множителем-делительное устройство фоторезистивного типа	80
3.2. Электромагнитный преобразователь перемещений с корректирующим оптическим каналом	81
3.3. Электромагнитный датчик перемещений интерферометрического типа	89

Глава 4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	91
4.1. Методы параметрических структурных схем	91
4.2. Математическая модель электромагнитного преобразователя перемещений	93
4.3 Математическая модель оптического преобразователя перемещений	96
4.4. Математическая модель магнитооптического преобразователя перемещений	98
Глава 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	104
5.1. Электромагнитный измеритель амплитуды вибраций	104
5.2. Двухканальный волоконно-оптический измеритель вибраций	107
5. 3. Магнитооптический измеритель перемещений	113
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	122
Приложения	137

Учебное издание

Лиманова Наталья Игоревна

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Учебное пособие

Ответственный редактор
доктор технических наук Н.Е. Конюхов

Редактор Л. Я. Чегодаева
Компьютерная верстка О. А. Ананьев

Сдано в печать 27.11.03. Формат 60 × 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.печл. 7,9. Усл. кр.-отт. 8,0. Уч.-издл. 8,75+
+0,6 печ.л. вклейка.

Тираж 50 экз. Заказ 96. Арт. С-5(Д2)/2003.

Самарский государственный аэрокосмический
университет им. академика С.П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

РИО Самарского государственного университета.
443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.