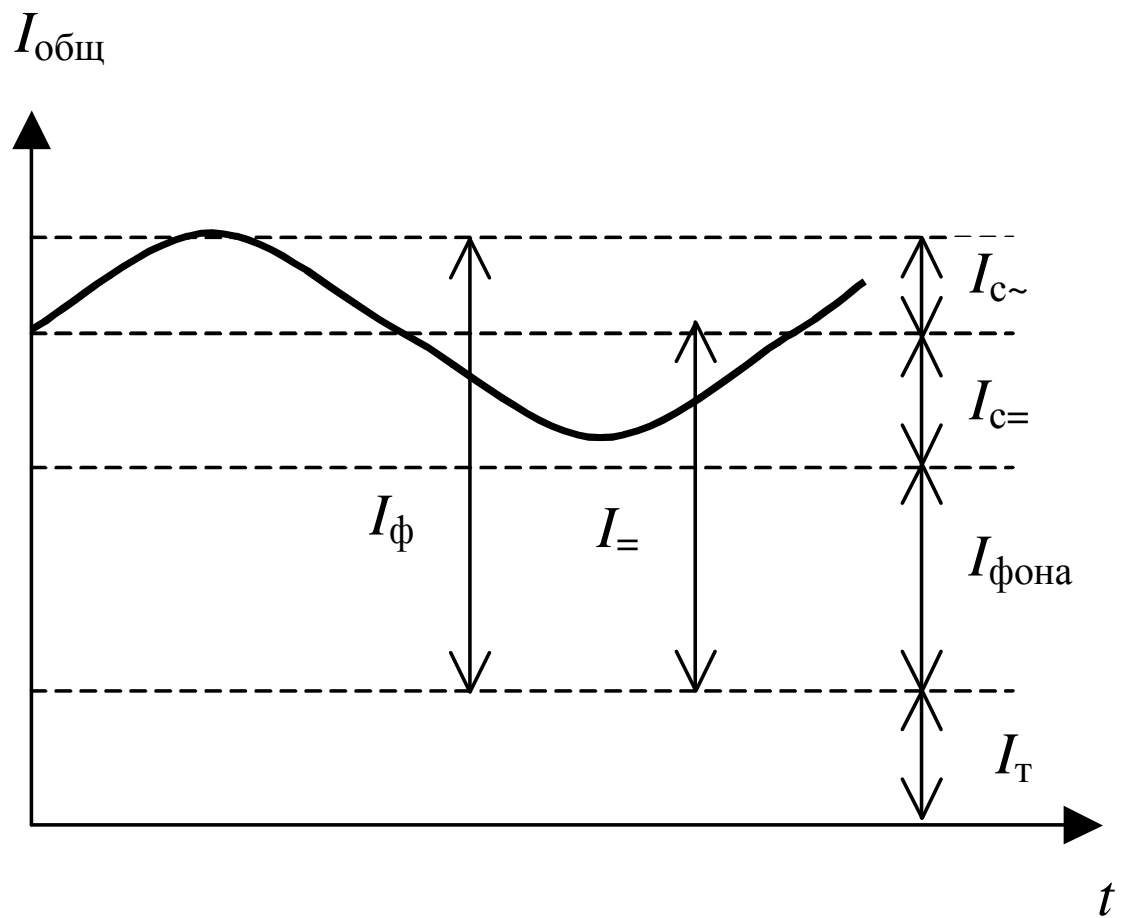


**В.В. Коротаяев**

# **РАСЧЕТ ШУМОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**



**Санкт-Петербург  
2012**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

**В.В. Коротаев**

**РАСЧЕТ ШУМОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

**Методические указания**



**Санкт-Петербург  
2012**

Коротаев В.В. Расчет шумовой погрешности оптико-электронных приборов. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 47 с.

Пособие содержит краткие теоретические сведения и описывает порядок и содержание основных этапов энергетического расчета типовых оптико-электронных приборов, а также набор заданий, которые преподаватели могут использовать для практических занятий и в качестве домашних заданий, а студенты – при самостоятельной работе для подготовки к выполнению курсовых работ и проектов, УИРС, НИРС и ВКР. Содержание пособия соответствует материалам, излагаемым в дисциплинах «Оптические и оптико-электронные приборы и системы», «Источники и приемники излучения», «Измерительные ОЭС». В пособии приведен список литературы

Пособие предназначено для студентов факультета оптико-информационных систем и технологий НИУ ИТМО, обучающихся по специальностям 200203 – «Оптико-электронные приборы и системы» (ГОС 2) и 200401 – «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» (ГОС 3), а также бакалавров и магистров по направлениям 200200 – «Оптотехника» (ГОС 2) и 200400 – «Оптотехника» (ГОС 3).

Рекомендовано к печати Ученым советом ФОИСТ, от 11 сентября 2012 г., протокол № 7

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



© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012

©В.В. Коротаев, 2012

## Содержание

Содержание .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....	5
1 ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ .....	9
2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА .....	16
2.1 Расчет потока излучения, падающего на фоточувствительный элемент приемника оптического излучения.....	16
2.1.1 Оптическая схема коллиматора (прожектора).....	16
2.1.2 Оптическая схема пирометра (фотометра) .....	19
2.2 Расчет интегральной чувствительности приемника оптического излучения к излучению источника.....	23
2.3 Расчет приемной составляющей сигнала и величины постоянной составляющей тока на выходе приемника оптического излучения .....	25
2.4 Расчет напряжения и тока шума приемника оптического излучения в заданной полосе частот электронного тракта.....	27
2.5 Расчет порога чувствительности и обнаружительной способности приемника оптического излучения по отношению и излучению заданного источника .....	29
2.6 Расчет основных составляющих шумовой погрешности оптико-электронного прибора и отношения сигнал/шум в заданной полосе частот электронного тракта.....	30
2.7 Расчет шумовой погрешности оптико-электронных систем измерения температуры.....	33
Литература .....	37

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основные принципы и методика энергетического расчета оптико-электронного прибора (ОЭП) излагаются в нескольких дисциплинах, читаемых студентам специальностям 200203 «Оптико-электронные приборы и системы» (ГОС 2), 200401 – «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» (ГОС 3), а также бакалаврам и магистрам по направлению 200200 – «Оптотехника» (ГОС 2) и 200400 – «Оптотехника» (ГОС 3).

Цель данного пособия заключается в том, чтобы разъяснить студентам выполнение основных этапов энергетического расчета, представляющих для них, как показывает практика, большие трудности.

В пособии изложены методика расчета потока излучения, поступающего на приемник оптического излучения для двух типов оптических схем ОЭП: коллимационной схемы и схемы пирометра (фотометра); порядок пересчета справочных параметров приемника оптического излучения в параметры для излучения реального источника излучения; порядок расчета шумов приемника оптического излучения и шумовой погрешности для двух типов ОЭП.

В пособии приведены также варианты заданий для выполнения энергетических расчетов во время самостоятельной работы студентов.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- Абсолютная спектральная характеристика чувствительности ПОИ –  $S_{\lambda}(\lambda)$   
Амплитуда переменной составляющей потока излучения –  $\Phi_{\sim}$   
Амплитуда переменной составляющей фототока –  $I_{\sim}$   
Амплитуда переменной составляющей напряжения фотосигнала –  $U_{\sim}$   
Вольтовая чувствительность ПОИ –  $S_U$   
Время установления нормированной переходной характеристики (постоянная времени) ПОИ –  $\tau_{\text{ПОИ}}$   
Входная ёмкость предварительного усилителя –  $C_{\text{в}}$   
Геометрическая фоточувствительная площадь ПОИ –  $A_{\text{фч}}$   
Диаметр входного зрачка объектива –  $D_{\text{об}}$   
Диаметр выходного зрачка объектива –  $D'_{\text{об}}$   
Диаметр зрачка объектива –  $D_{\text{об}}$   
Диаметр излучающей поверхности ИИ -  $D_{\text{ист}}$   
Диаметр изображения излучающей поверхности ИИ -  $D_{\text{из}}$   
Диаметр области пространства изображений с постоянной облученностью –  $D_n$   
Диаметр полевой диафрагмы –  $D_{\text{ПД}}$   
Дистанция формирования пучка –  $p_0$   
Длина волны –  $\lambda$   
Ёмкость инерционного контура –  $C_{\text{к}}$   
Ёмкость монтажа –  $C_{\text{м}}$   
Ёмкость ПОИ –  $C_{\text{п}}$   
Заднее фокусное расстояние объектива –  $f'$   
Задний апертурный угол объектива –  $\sigma'_{\text{А'}}$   
Заряд электрона –  $e$   
Интегральная вольтовая чувствительность –  $S_{U \text{ инт}}$   
Интегральная токовая чувствительность –  $S_{I \text{ инт}}$   
Интегральная чувствительность ПОИ к излучению паспортного ИИ в световых величинах –  $S^{\text{I}}_{\text{инт, в}}$   
Интегральная чувствительность ПОИ к излучению паспортного ИИ в энергетических величинах –  $S^{\text{I}}_{\text{инт, e}}$   
Коэффициент использования излучения заданного ИИ глазом (к.п.д. глаза) –  $\kappa^{\text{II}}_{\text{г}}$   
Коэффициент использования излучения заданного ИИ заданным ПОИ –  $\kappa^{\text{II}}$   
Коэффициент использования излучения паспортного ИИ глазом (к.п.д. глаза) –  $\kappa^{\text{I}}_{\text{г}}$   
Коэффициент использования излучения паспортного ИИ заданным ПОИ –  $\kappa^{\text{I}}$   
Коэффициент использования контрастного черного излучателя –  $\xi_{\text{чт}}$   
Коэффициент пропускания атмосферы –  $\tau_{\text{А}}$

Коэффициент пропускания оптической системы коллиматора –  $\tau_k$   
 Коэффициент пропускания оптической системы приёмного устройства –  $\tau_n$   
 Коэффициент теплового излучения –  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$   
 Относительное спектральное распределение потока излучения паспортного ИИ –  $\phi_{e,\lambda}^I(\lambda)$   
 Коэффициент усиления фотоумножителя по току –  $M_{\PhiУ}$   
 Круговая частота модуляции –  $\omega_m$   
 Максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости ЧТ –  $M_{e,\lambda,max}^o$   
 Максимальное значение спектральной чувствительности –  $S_{\lambda,max}$   
 Мощность излучения ИД –  $P_{ИД}$   
 Напряжение дробового шума ПОИ в заданной полосе частот –  $U_{ш,др.ПОИ,\Delta f}$   
 Напряжение дробового шума фототока ПОИ –  $U_{ш,др.ПОИ,\Delta f,эфф.I}$   
 Напряжение теплового шума ПОИ в заданной полосе частот –  $U_{ш,т.ПОИ,\Delta f}$   
 Напряжение токового шума ПОИ в заданной полосе частот –  $U_{ш,т.ПОИ,\Delta f}$   
 Напряжение шума ПОИ –  $U_{ш}$   
 Нормированный закон модуляции сигнала –  $f(t)$   
 Облучённость –  $E_e$   
 Облучённость на оптической оси –  $E_{e0}$   
 Обнаружительная способность –  $D$   
 Обнаружительная способность ПОИ к излучению паспортного ИИ в световых величинах –  $D_v^I$   
 Обнаружительная способность ПОИ к излучению паспортного ИИ в энергетических величинах –  $D_e^I$   
 Общий ток ПОИ –  $I_{общ}$   
 Относительная спектральная плотность энергетической светимости ЧТ –  $m_{e,\lambda}^o(\lambda)$   
 Относительная спектральная характеристика чувствительности –  $s_\lambda(\lambda)$   
 Относительная или логарифмическая спектральная ширина полосы пропускания ПОИ –  $(\Delta \ln \lambda)_{эф}$   
 Относительное спектральное распределение потока излучения паспортного ИИ –  $\phi_{e,\lambda}^I(\lambda)$   
 Отношение сигнал/шум –  $\mu$   
 Переднее фокусное расстояние объектива –  $f$   
 Площадь входного зрачка объектива –  $A_{об}$   
 Площадь входного зрачка объектива приёмного устройства –  $A_2$   
 Площадь выходного зрачка объектива коллиматора –  $A_1$   
 Площадь излучающей поверхности ИД –  $A_{ИД}$   
 Площадь излучающей поверхности ИИ –  $A_{ист}$   
 Площадь изображения излучающей поверхности ИИ –  $A_{из}$   
 Площадь излучающей поверхности ЧТ –  $A_{ЧТ}$   
 Площадь полевой диафрагмы –  $A_{ПД}$

Порог чувствительности ПОИ в единичной полосе частот –  $\Phi_{п1}$   
 Порог чувствительности ПОИ в заданной полосе частот –  $\Phi_{п}$   
 Порог чувствительности ПОИ к излучению паспортного ИИ в заданной полосе частот в световых величинах –  $\Phi_{п,v}^I$   
 Порог чувствительности ПОИ к излучению паспортного ИИ в заданной полосе частот энергетических (Вт) величинах –  $\Phi_{п,e}^I$   
 Постоянная времени инерционного контура –  $\tau_k$   
 Постоянная составляющая потока излучения –  $\Phi_{=}$   
 Постоянная составляющая тока –  $\bar{I}$   
 Постоянная Стефана-Больцмана –  $\sigma$   
 Поток излучения от фоновых засветок от окружающих объектов –  $\Phi_{фона}$   
 Поток излучения, падающий на ПОИ -  $\Phi_{ПОИ}$   
 Поток излучения –  $\Phi_e$   
 Распределение облучённости –  $E_e(y)$   
 Расстояние –  $l$   
 Расстояние от оптической системы до изображения –  $a'$   
 Расстояние от оптической системы до предмета –  $a$   
 Светимость или энергетическая светимость ИД –  $M_{ИД}$   
 Световой поток –  $\Phi_v$   
 Сила света или излучения ИД –  $I_{ИД}$   
 СКЗ шумовой погрешности измерения фототока –  $\sigma_{ш,i}$   
 СКЗ шумовой составляющей погрешности измерения температуры –  $\sigma_T$   
 Сопротивление нагрузки –  $R_n$   
 Сопротивление ПОИ –  $R_{ПОИ}$   
 Спектральная плотность мощности (дисперсия) белого шума –  $N$   
 Спектральная плотность облученности –  $E_{e,\lambda}$   
 Спектральная плотность потока излучения –  $\Phi_{e,\lambda}$   
 Спектральная плотность энергетической светимости –  $M_{e\lambda}$   
 Спектральная плотность энергетической светимости черного тела –  $M_{e,\lambda}^0$   
 Спектральная плотность энергетической яркости –  $L_{e,\lambda}$   
 Спектральное распределение потока излучения –  $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$   
 Спектральный коэффициент пропускания –  $\tau(\lambda)$   
 Спектральный коэффициент теплового излучения объекта –  $\varepsilon(\lambda)$   
 Среднее значение потока излучения –  $\Phi_{с=}$   
 Средняя квадратическая погрешность измерения амплитуды сигнала –  $\sigma_{ш}$   
 Суммарный ток шума ПОИ с учетом дробового шума фототока –  $I_{ш.ПОИ.\Delta f \text{эфф}.\Sigma}$   
 Суммарное напряжение шума ПОИ с учетом дробового шума фототока –  $U_{ш.ПОИ.\Delta f \text{эфф}.\Sigma}$   
 Темновой ток –  $I_T$   
 Температура объекта –  $T$   
 Ток дробового шума ПОИ в заданной полосе частот –  $I_{ш,др.ПОИ.\Delta f}$



Ток дробового шума фототока ПОИ –  $I_{ш.др.ПОИ. \Delta f.эфф. I}$   
 Ток сигнала на выходе ПОИ -  $I_c$   
 Ток теплового шума ПОИ в заданной полосе частот –  $I_{ш.т.ПОИ. \Delta f}$   
 Ток токового шума ПОИ в заданной полосе частот –  $I_{ш. I. ПОИ. \Delta f}$   
 Ток фотокатода –  $I_{ФК}$   
 Ток шума ПОИ –  $I_{ш}$   
 Токовая чувствительность ПОИ –  $S_I$   
 Точка формирования пучка –  $M_0$   
 Угловое поле объектива –  $2\omega$   
 Угол излучения ИД –  $\Theta$   
 Угол между оптической осью и линией от центра выходного зрачка до рассматриваемой точки –  $\beta'$   
 Удельная обнаружительная способность ПОИ –  $D^*$   
 Удельная энергия сигнала за время измерения  $T_{и} - e_0$   
 Удельный порог чувствительности –  $\Phi_{п}^*$   
 Фототок –  $I_{ф}$   
 Частота модуляции –  $f_{мод}$   
 Энергетическая светимость ЧТ при данной температуре  $T - M_e^\circ$   
 Энергетическая яркость источника –  $L_e$   
 Эффективная шумовая полоса частот -  $\Delta f_{эфф}$   
 Эффективная шумовая полоса частот, при которой производилась аттестация ПОИ –  $\Delta f_{эфф \text{ пасп}}$   
 Яркость излучающего диода –  $L_{ИД}$

# 1 ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Рассматривается два типа оптических схем. В первом случае источник излучения (ИИ) удалён на значительное расстояние (рис. 1.1). Приёмное устройство состоит из объектива (Об), расположенного в фокальной плоскости модулятора (М) и приёмника оптического излучения (ПОИ), перед которым расположена диафрагма (Д). Сигнал с ПОИ усиливается в предварительном усилителе (ПУ1) и усилителе мощности (У1) и поступает на вход синхронного детектора (СД). Для получения опорного сигнала использованы излучающий диод (ИД) и приёмник опорного сигнала (ПОИ ОС). Опорный сигнал с ПОИ ОС усиливается в предварительном усилителе (ПУ2) и усилителе мощности (У2) и поступает на второй вход синхронного детектора (СД). С выхода СД сигнал поступает на индикатор (И), на котором отображается результат измерения.

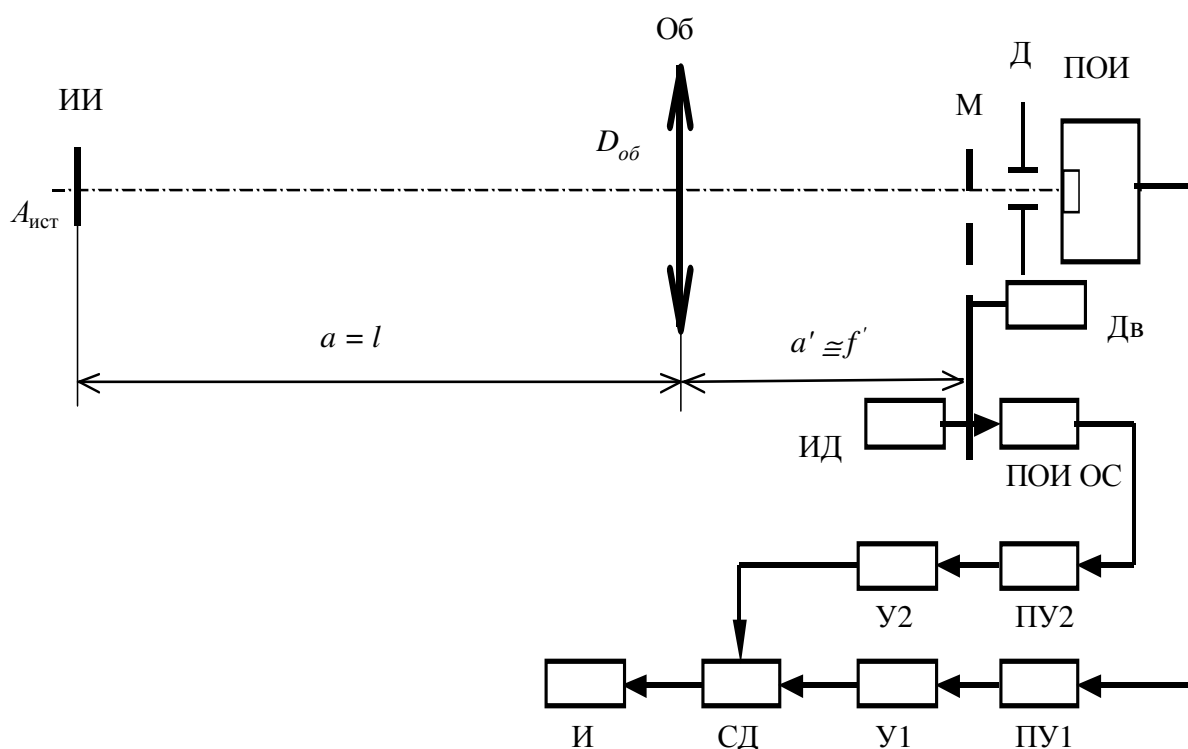


Рисунок 1.1 – Структурная схема пирометра (фотометра): ИИ – источник излучения; Об – объектив; М – модулятор; Дв – двигатель; Д – диафрагма; ПОИ – приёмник оптического излучения; ИД – излучающий диод; ПОИ ОС – приёмник опорного сигнала; ПУ – предварительные усилители; У – усилители мощности; СД – синхронный детектор; И – индикатор

Опорный сигнал с ПОИ ОС усиливается в предварительном усилителе (ПУ2) и усилителе мощности (У2) и поступает на второй вход синхронного детектора (СД). С выхода СД сигнал поступает на индикатор (И), на котором отображается результат измерения.

Во втором случае оптическая схема прибора состоит из коллиматора (прожектора) и приёмного устройства (рис. 1.2). Коллиматор (прожектор) состоит из объектива ( $Об_1$ ) и расположенного в его фокальной плоскости ИИ. Излучение ИИ модулируется, например, по цепи питания (внутренняя модуляция) или за счёт внешних модуляторов. Приёмное устройство состоит из объектива ( $Об_2$ ) и ПОИ.

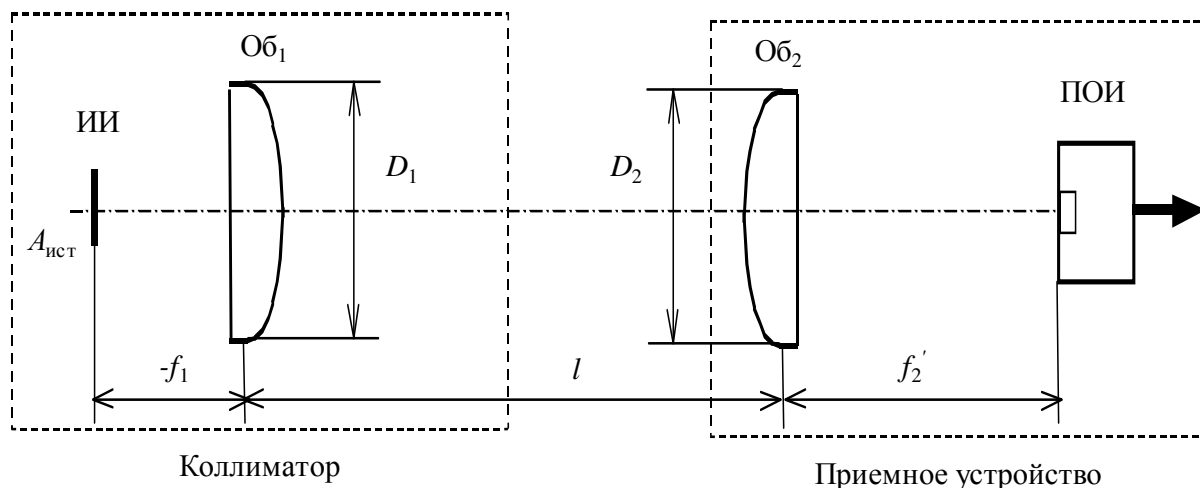


Рисунок 1.2 – Схема коллиматора и приемного устройства: ИИ - источник излучения;  $Об_1$ ,  $Об_2$  - объективы коллиматора и приемного устройства; ПОИ - приемник оптического излучения;  $A_{ист}$  - площадь излучающей поверхности ИИ;  $-f_1$ ,  $f_2'$  - переднее и заднее фокусные расстояния объективов коллиматора и приемного устройства;  $l$  - расстояние между коллиматором и приемным устройством ( $l \gg -f_1$ ;  $l \gg f_2'$ );  $D_1$ ,  $D_2$  - диаметры выходного и входного зрачков объективов коллиматора и приемного устройства

Типы оптических систем, их параметры, а также марки ИИ и ПОИ для различных вариантов приведены в таблицах 1.1 – 1.4.

Для упрощения расчетов спектральные коэффициенты пропускания среды и оптической системы для заданий в табл. 1 будем считать не зависящими от длины волны:  $\tau(\lambda) = 1$ .

Таблица 1.1

№ вар.	ИИ		ИД	ПОИ	Оптическая схема по рисунку
	ЧТ с Т, К				
	а	б			
1	1000	1500	-	БП2-3А	1
2	-	-	АЛ103А	ФД-9К	2
3	1500	1600	-	НБГ-1	1
4	-	-	АЛ115А	ФД-28КП	2
5	2000	1700	-	ФР1-3	1
6	-	-	АЛ107А	ФД-5Г	2
7	3500	1800	-	ФД-4Г	1
8	-	-	АЛ108А	ФД-20-30К	2
9	4000	1900	-	ФД-11К	1
10	-	-	АЛ106А	Ф-5	2
11	4500	2000	-	ФД-20-32К	1
12	-	-	АЛ116А	ФД-3А	2
13	5000	2200	-	Ф-6	1
14	-	-	АЛ102А	ФД-1	2
15	5500	2300	-	Ф-9	1
16	-	-	АЛ341В	Ф-21	2
17	6000	2400	-	Ф-1	1
18	-	-	АЛ341Д	ЦГ-3	2
19	7000	2500	-	Ф-14	1
20	-	-	АЛ341А	СЦВ-4	2
21	8000	2600	-	Ф-6	1
22	-	-	АЛ102В	Ф-22	2
23	9000	2700	-	Ф-2	1
24	-	-	АЛ119А	ФД-11К	2
25	10000	2800	-	Ф-9	1

Таблица 1.2

№ вар.	Параметры оптической системы				Дистанция $l$ , м		Диаметр $D_{\text{ист}}$ или площадь $A_{\text{ист}}$ излучающей поверхности ИИ
	$-f_1$ , мм	$D_1$ , мм	$f_2'$ , мм	$D_2$ , мм	а	б	
1	-	-	50	30	1000	100	300 мм
2	100	30	70	40	5	-	3 мм <sup>2</sup>
1	-	-	90	40	900	200	200 мм
2	150	60	100	50	6	-	3 мм <sup>2</sup>
1	-	-	110	50	800	300	250 мм
2	200	80	120	60	7	-	3 мм <sup>2</sup>
1	-	-	130	60	700	400	400 мм
2	300	100	140	50	8	-	3 мм <sup>2</sup>
1	-	-	150	70	600	500	150 мм
2	100	50	50	20	9	-	12 мм <sup>2</sup>
1	-	-	60	20	5000	600	1000 мм
2	150	70	70	30	10	-	3 мм <sup>2</sup>
1	-	-	80	40	6000	700	200 мм
2	200	100	90	40	12	-	0,3×0,3 мм <sup>2</sup>
1	-	-	100	40	7000	800	300 мм
2	300	150	110	50	14	-	12 мм <sup>2</sup>
1	-	-	120	50	8000	900	300 мм
2	100	40	130	50	16	-	12 мм <sup>2</sup>
1	-	-	140	50	9000	1000	200 мм
2	150	80	150	60	20	-	12 мм <sup>2</sup>
1	-	-	100	60	10000	1100	100 мм
2	200	120	170	60	24	-	0,3×0,3 мм <sup>2</sup>
1	-	-	180	60	11000	1200	50 мм
2	300	170	60	30	30	-	3 мм <sup>2</sup>
1	-	-	100	30	12000	1300	100 мм

Таблица 1.3

№ вар.	Диапазон температур, °С.	ПОИ	$D_{\text{вх}}$ , мм	$f''$ , мм	$l$ , м
1	200-500	ФРО-Х1-142	30	60	1
2	300-600	ФСГ-28РТА	40	80	1
3	400-700	ФСГ-223А1	30	70	1
4	500-800	ФДО-119	40	90	1
5	600-900	ФР1-3	50	100	1
6	700-1000	ФД-5Г	40	80	1
7	800-1100	ФД-11К	30	70	1
8	900-1200	ФД-3А	40	90	1
9	1000-1300	ФД-9К	40	100	2
10	1100-1400	ФД-2	30	60	2
11	1200-1500	ФД-28КП	30	80	2
12	1300-1700	ФД-1	40	100	2
13	1400-1800	Ф-5	40	90	2
14	1500-1900	ФД-9К	20	50	2
15	1600-2000	Ф-1	20	60	2
16	1700-2100	ФД-21КП	30	80	2
17	1800-2200	Ф-2	30	70	3
18	1900-2300	ФД-24К	40	80	3
19	2000-2500	Ф-3	40	90	5
20	2100-2600	ФДК-227	30	60	5
21	2200-2700	Ф-4	30	70	5
22	2300-2800	ФД-256	20	50	5
23	30-40	ФРО-Х1-142	50	150	4
24	100-150	ФСГ-28РТА	30	70	4
25	200-400	ФУО-614-1	50	100	4
26	300-500	ФУО-613	40	90	3
27	400-600	ФУО-612	40	80	3
28	500-700	ФУМ-611-11	30	70	3
29	600-800	ФУЛ-611-4	30	70	2
30	700-900	ФД-11К	40	90	2
31	800-1000	ФД-5Г	40	100	2
32	900-1100	ФД-21КП	30	80	1
33	1000-1200	ФД-4Г	30	70	1
34	1100-1300	ФД-256	40	80	1

Показатели визирования  $P = D_{\text{пд}}/s'$ , где  $D_{\text{пд}}$  – диаметр полевой диафргмы, а  $s'$  – задний отрезок, в табл. 2 следует выбрать из ряда 1/5; 1/10; 1/16; 1/20; 1/25; 1/40; 1/70; 1/100. Коэффициенты пропускания среды и оптической системы для заданий в табл. 2 считать зависящими от длины волны.

Таблица 1.4

№ вар.	$t_{\text{атм}},$ °С	Влажность $f,$ %	Метеорологическая дальность видимости, м	Примечания
1	0	70	200	Материал оптической системы выбрать: 1) для $t$ от 100 до 600 °С - флюорит ( $\text{Ca F}_2$ ); спектральный диапазон пропускания - $\Delta\lambda = 0,4...9,0$ мкм; при толщине $d = 2$ мм $\tau = 0,92$ ;  2) для $t$ от 400 до 2000 °С - кварцевое стекло КИ; спектральный диапазон пропускания - $\Delta\lambda = 0,4...3,5$ мкм;  3) для $t$ от 900 до 3500 °С - оптическое стекло К8; спектральный диапазон пропускания - $\Delta\lambda = 0,4...2,5$ мкм.
2	10	80	50	
3	20	90	400	
4	30	70	50	
5	0	80	1000	
6	10	90	50	
7	20	70	500	
8	30	80	50	
9	0	90	4000	
10	10	70	50	
11	20	80	1500	
12	30	90	50	
13	0	70	1500	
14	10	80	50	
15	20	90	2000	
16	30	70	50	
17	0	80	2500	
18	10	90	50	
19	20	70	1500	
20	30	80	50	
21	0	90	2000	
22	10	70	50	
23	20	80	2000	
24	30	90	50	
25	0	70	2000	
26	10	80	50	
27	20	90	1500	
28	30	70	50	
29	0	80	2000	
30	10	90	50	
31	20	70	1500	
32	30	80	50	
33	0	90	2000	
34	10	70	50	

Частоту модуляции потока излучения заданного ИИ  $f_{\text{мод}}$  и эффективную шумовую полосу частот электронного тракта приемного устройства  $\Delta f_{\text{эфф}}$  считать равными: для тепловых ПОИ  $f_{\text{мод}} = 12$  Гц и  $\Delta f_{\text{эфф}} = 2$  Гц, для ПОИ на основе фотоэффекта  $f_{\text{мод}} = 1000$  Гц и  $\Delta f_{\text{эфф}} = 200$  Гц.

В процессе выполнения энергетического расчета надлежит выполнить следующее:

1. Рассчитать поток излучения, падающий на фоточувствительный элемент ПОИ при заданных параметрах оптической системы и ИИ.
2. Рассчитать интегральную токовую или вольтовую чувствительность заданного ПОИ к излучению заданного ИИ в энергетических величинах (А/Вт, В/Вт).
3. Рассчитать амплитуду переменной составляющей сигнала и величину постоянной составляющей тока на выходе ПОИ.
4. Рассчитать напряжение или ток шума ПОИ в заданной полосе частот электронного тракта.
5. Рассчитать порог чувствительности или обнаружительную способность ПОИ по отношению к излучению заданного ИИ на основании имеющихся справочных данных.
6. Рассчитать основные составляющие шумовой погрешности ОЭП и отношение сигнал/шум в заданной полосе частот электронного тракта.
7. Рассчитать шумовую погрешность измерения пирометра.



## 2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

### 2.1 Расчет потока излучения, падающего на фоточувствительный элемент приемника оптического излучения

#### 2.1.1 Оптическая схема коллиматора (прожектора)

На рисунке 2.1 показана структура пучка лучей коллиматора (прожектора), выполненного в виде объектива Об<sub>1</sub> и ИИ, расположенного в его фокальной плоскости [10].

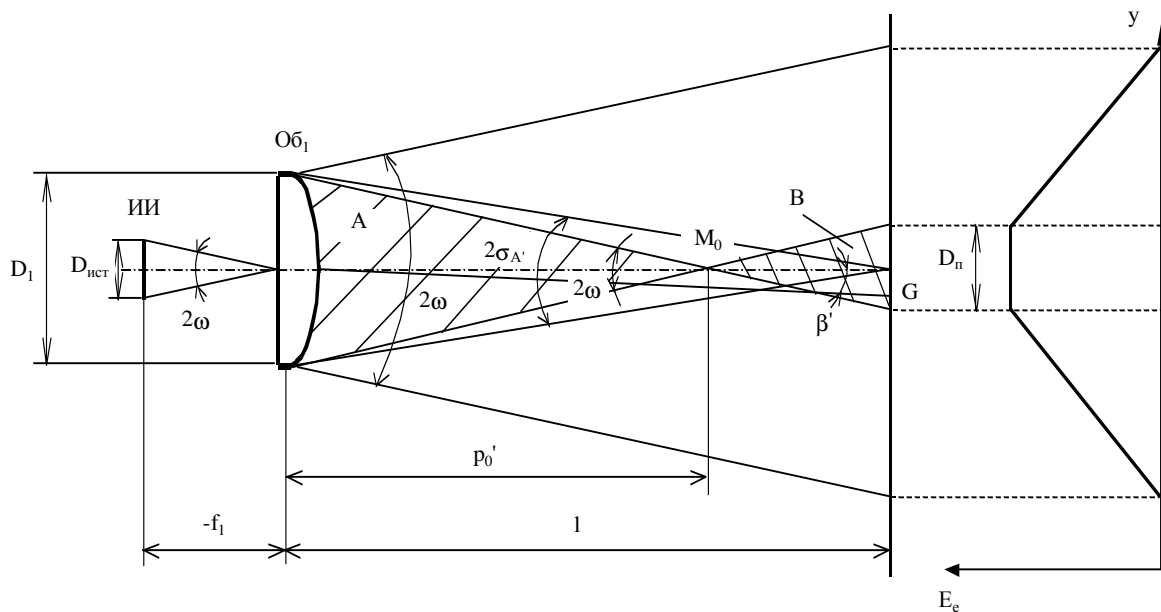


Рисунок 2.1 – Структура пучка лучей коллиматора (прожектора):  
ИИ - источник излучения; Об<sub>1</sub> - объектив коллиматора (прожектора);  
 $l$  - расстояние от выходного зрачка объектива до рассматриваемого сечения пучка;  $D_1$  - диаметр выходного зрачка объектива; ПОИ - приемник оптического излучения;  $D_{\text{ист}}$  - диаметр излучающей поверхности ИИ;  $-f_1$  - переднее фокусное расстояние объектива;  $p_0'$  - дистанция формирования пучка;  $M_0$  - точка формирования пучка;  $D_{\text{п}}$  - диаметр области с постоянной облученностью;  $2\omega$  - угловое поле объектива;  $\sigma'_A$  - задний апертурный угол объектива

Рассмотрим распределение облучённости  $E_e(y)$  в сечении пучка лучей, перпендикулярном оптической оси и находящемся на расстоянии  $l$  от выходного зрачка объектива. Пусть яркость ИИ по его излучающей поверхности постоянна, aberrации оптической системы отсутствуют, дисперсия объектива не влияет на световой пучок. Пусть диаметр излучающей поверхности равен  $D_{\text{ист}}$ , фокусное расстояние объектива коллиматора (прожектора) –  $(-f_1)$ , диаметр выходного зрачка объектива –  $D_1$ .

Тогда угловое поле объектива и расходимость пучка лучей коллиматора (прожектора) при  $D_{\text{ист}} \ll (-f_1)$ :

$$2 \cdot \omega = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} \right) \approx \frac{D_{\text{ист}}}{-f_1} \quad (2.1)$$

а дистанция формирования пучка лучей коллиматора (прожектора):

$$p'_0 = \frac{D_1}{2 \cdot \operatorname{tg} \omega} \approx \frac{D_1}{D_{\text{ист}}} \cdot (-f_1) \quad (2.2)$$

Точка  $M_0$ , лежащая на оптической оси коллиматора (прожектора) и удалённая от его выходного зрачка на расстояние  $p'_0$ , называется **точкой формирования пучка** лучей коллиматора.

Облучённость, создаваемая коллиматором (прожектором) в точках, лежащих на оптической оси [7]:

$$E_{e0} = \pi \cdot L_e \cdot \tau_K \cdot \tau_A \cdot \sin^2 \sigma'_A \quad (2.3)$$

где  $L_e$  – энергетическая яркость ИИ;  $\tau_K$ ,  $\tau_A$  – коэффициенты пропускания оптической системы коллиматора (прожектора) и атмосферы;  $\sigma'_A$  – апертурный угол коллиматора (прожектора) со стороны пространства изображений (задний апертурный угол).

Величина заднего апертурного угла коллиматора (прожектора) для точек, лежащих на оптической оси, определяется расстоянием  $l$  до выходного зрачка:

$$\text{при } l > p'_0, \sigma'_A = \operatorname{arctg} \frac{D_1}{2 \cdot l}, \quad (2.4)$$

$$\text{при } l \leq p'_0, \sigma'_A = \omega = \operatorname{arctg} \frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} \approx \frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} \quad (2.5)$$

При отсутствии виньетирования ИИ объективом коллиматора (прожектора) для внеосевой точки  $G$  облучённость равна [7]:

$$E_{e\beta'} = E_{e0} \cdot \cos^4 \beta' \quad (2.6)$$

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

Рассмотрим влияние виньетирования на изменение облучённости. В заштрихованной зоне  $A$  на рис. 3 виньетирование ИИ оправой объектива коллиматора (прожектора) отсутствует, поэтому облучённость в пределах этой зоны постоянна.

Из выражений (2.3) и (2.5) следует, что в зоне  $A$ :

$$E_{e0} \approx \pi \cdot \tau_K \cdot \tau_A \cdot L_e \cdot \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} \right)^2 \quad (2.7)$$

Следовательно, облучённость  $E_{e0}$  не зависит от расстояния  $l$  до данного сечения.

В заштрихованной зоне  $B$  величина виньетирования не равна нулю, но в пределах круга диаметром  $D_{\text{п}}$ , перпендикулярного оптической оси, она постоянна, поэтому и облучённость в пределах этого круга тоже постоянна.

Из выражений (1.3) и (1.4) следует, что в зоне  $B$ :

$$E_{e0} \approx \pi \cdot \tau_{\text{К}} \cdot \tau_{\text{А}} \cdot L_e \cdot \left( \frac{D_1}{2 \cdot l} \right)^2 \quad (2.8)$$

За пределами заштрихованных зон  $A$  и  $B$  величина виньетирования изменяется, и облучённость монотонно уменьшается до нуля. Из рис. 3 следует, что диаметры пятен равномерной облучённости для зон  $A$  и  $B$ :

$$D_{\text{ПА}} = D_1 - \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-f_1} \right) \cdot l, \quad D_{\text{ПВ}} = \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-f_1} \right) \cdot l - D_1 \quad (2.9)$$

Определим поток излучения, падающий на ПОИ в оптической системе, изображенной на рисунка 1.2.

Рассмотрим случай, когда входной зрачок объектива приемного устройства находится в заштрихованной зоне  $A$  в пределах пятна равномерной облученности (рис. 2.1).

В этом случае расходимость пучка лучей относительно мала, и термин "коллиматор" является более подходящим по сравнению с термином "прожектор".

Будем предполагать такое построение оптической системы приемного устройства, при котором потери энергии излучения возникают только на границах раздела сред и в самих средах, то есть отсутствуют потери на диафрагмах. Это означает также, что размер пятна засветки меньше размера чувствительной площадки ПОИ.

Из (2.7) следует, что в этом случае поток излучения на ПОИ будет равен:

$$\Phi_e = \pi \cdot \tau_{\text{К}} \cdot \tau_{\text{А}} \cdot \tau_{\text{п}} \cdot L_e \cdot \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} \right)^2 \cdot A_2 = \tau \cdot L_e \cdot \frac{A_{\text{ист}} \cdot A_2}{f_1^2} \quad (2.10)$$

где  $\tau_{\text{п}}$  – коэффициент пропускания оптической системы приёмного устройства;  $\tau$  – коэффициент пропускания среды и оптических систем;  $A_{\text{ист}}$  – площадь излучающей поверхности ИИ;  $A_2$  – площадь входного зрачка объектива приёмного устройства.

Рассмотрим случай, когда входной зрачок объектива приемного устройства находится в заштрихованной зоне  $B$  в пределах пятна равномерной облученности (рис. 2.1).

В этом случае расходимость пучка лучей относительно велика, и термин "прожектор" является более подходящим по сравнению с термином "коллиматор".

Будем предполагать такое построение оптической системы приемного устройства, при котором потери энергии излучения возникают только на границах раздела сред и в самих средах, то есть отсутствуют потери на диафрагмах. Это означает также, что размер пятна засветки меньше размера чувствительной площадки ПОИ.

Из (2.8) следует, что в этом случае поток излучения на ПОИ будет равен:

$$\Phi_e = \pi \cdot \tau_K \cdot \tau_A \cdot \tau_{\Pi} \cdot L_e \cdot \left( \frac{D_1}{2 \cdot l} \right)^2 \cdot A_2 = \tau \cdot L_e \cdot \frac{A_1 \cdot A_2}{l^2} \quad (2.11)$$

где  $A_1$  – площадь выходного зрачка объектива коллиматора.

Яркость ИИ в виде черного тела (ЧТ) следует определить, исходя из того, что пространственное распределение излучение ЧТ подчиняется закону Ламберта. Поэтому [2, 9]:

$$L_e = \frac{M_e^{\circ}}{\pi} = \frac{\Phi_e}{\pi \cdot A_{\text{чт}}} \quad (2.12)$$

где  $M_e^{\circ}$  – энергетическая светимость ЧТ при данной температуре  $T$ ;  $\Phi_e$  – поток излучения ЧТ;  $A_{\text{чт}}$  – площадь излучающей поверхности ЧТ.

Для ИД можно приближённо считать, что в пределах угла излучения  $\Theta$  излучение распределено по закону Ламберта, а за пределами этого угла яркость  $L_{\text{ИД}}$  равна нулю [2, 9]. Тогда яркость ИД в пределах угла  $\Theta$ :

$$L_{\text{ИД}} = \frac{M_{\text{ИД}}}{\pi \cdot \sin^2 \Theta} = \frac{P_{\text{ИД}}}{\pi \cdot A_{\text{ИД}} \cdot \sin^2 \Theta}; L_{\text{ИД}} = \frac{I_{\text{ИД}}}{A_{\text{ИД}}}, \quad (2.13)$$

где  $M_{\text{ИД}}$  – светимость или энергетическая светимость ИД;  $P_{\text{ИД}}$  – мощность излучения ИД;  $A_{\text{ИД}}$  – площадь излучающей поверхности ИД;  $I_{\text{ИД}}$  – сила света или излучения ИД.

### 2.1.2 Оптическая схема пирометра (фотометра)

Рассмотрим особенности расчета потока излучения, падающего на фоточувствительный элемент ПОИ, для оптической схемы пирометра или фотометра (рис. 1.1). Для этой схемы и для заданий в табл. 2 коэффициент пропускания среды и оптической системы будем считать зависящим от длины волны.

Спектральная плотность облученности, создаваемая источником излучения и оптической системой, находящейся в воздушной среде, в точке на элементарной площадке, перпендикулярной оптической оси:

$$E_{e\lambda} = \tau(\lambda) \pi L_{e\lambda}(\lambda) \sin^2 \sigma'_{A'}, \quad (2.14)$$

где  $\tau(\lambda)$  – спектральный коэффициент пропускания среды и оптической системы пирометра;  $L_{e\lambda}(\lambda)$  – спектральная плотность энергетической яркости источника в соответствующей точке;  $\sigma'_{A'}$  – задний апертурный угол оптической системы в пространстве изображений.

Для точек, лежащих на оптической оси, при малой толщине линз объектива:

$$\sin \sigma'_{A'} \approx \sigma'_{A'} = \operatorname{tg} \sigma'_{A'} = \frac{D'_{об}}{2a'} \cong \frac{D_{об}}{2a'} \quad (2.15)$$

где  $D'_{об}$  и  $D_{об}$  - диаметры выходного и входного зрачков объектива (при линейном увеличении в зрачках  $\beta_p = 1$  их диаметры равны:  $D_{об} = D'_{об}$ );  $a'$  - расстояние от задней главной точки объектива до осевой точки изображения источника.

Если расстояние от источника до объектива  $l \gg f'$ , где  $f'$  - фокусное расстояние объектива, то  $a' \approx f'$ .

Для ламбертовского излучателя (черного тела) по следствию из закона Ламберта (2.12) получаем из (2.15) и (2.16), что спектральная плотность облученности в точке изображения:

$$E_{e\lambda} \approx \tau(\lambda)\varepsilon(\lambda)(\lambda)M_{e\lambda}^o(\lambda, T) \frac{D_{об}^2}{4(a')^2} = \tau(\lambda)\varepsilon(\lambda)M_{e\lambda}^o(\lambda, T) \frac{A_{об}}{\pi(a')^2} \quad (2.16)$$

где  $\varepsilon(\lambda)$  - спектральный коэффициент теплового излучения объекта;  $M_{e\lambda}^o$  - спектральная плотность энергетической светимости черного тела при температуре объекта;  $A_{об}$  - площадь входного зрачка объектива.

Можно показать, что последнее выражение справедливо также и для оптических систем, имеющих форму входного зрачка, отличную от круглой (квадратную, кольцевую).

Показания пирометра не должны зависеть от размера объекта и от расстояния до него, поэтому угловое поле пирометра в пространстве предметов  $2\omega$  должно быть меньше углового размера объекта:

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{ПД}}{a'} < \frac{D_{ист}}{a} = \frac{D_{ист}}{l} \quad (2.17)$$

где  $D_{ПД}$  - диаметр полевой диафрагмы, установленной перед фоточувствительным элементом (ФЧЭ) ПОИ, или (при отсутствии диафрагмы) диаметр ФЧЭ;  $D_{ист}$  - диаметр излучающей поверхности ИИ.

Спектральная плотность потока излучения от равномерного объекта (ЧТ) в пределах линейного поля пирометра в пространстве изображений из (2.16):

$$\Phi_{e\lambda} = E_{e\lambda}(\lambda)A_{ПД} = M_{e\lambda}^o(\lambda, T)\varepsilon(\lambda)\tau(\lambda) \frac{A_{об}A_{ПД}}{\pi(a')^2}, \quad (2.18)$$

где  $A_{ПД}$  - площадь полевой диафрагмы (или ФЧЭ ПОИ).

Если угловое поле прибора (например, фотометра) больше углового размера объекта:

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{ПД}}{a'} > \frac{D_{ист}}{a} = \frac{D_{ист}}{l} \quad (2.19)$$

то диаметр изображения источника:

$$D_{из} = D_{ист} \frac{a'}{a}, \quad (2.20)$$

а соотношение площадей источника и его изображения:

$$A_{из} = A_{ист} \left( \frac{a'}{a} \right)^2. \quad (2.21)$$

В этом случае спектральная плотность потока излучения, создающего изображение равномерного по площади объекта из (2.16) и (2.21):

$$\Phi_{e\lambda} = E_{e\lambda}(\lambda) A_{из} = \tau(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda, T) \frac{A_{ист} A_{об}}{a^2} \quad (2.22)$$

Для серого ламбертовского излучателя по следствию из закона Ламберта (2.12) формула (2.22) примет вид:

$$\Phi_{e\lambda} = \varepsilon(\lambda) \tau(\lambda) M_{e\lambda}^o(\lambda, T) \frac{A_{ист} A_{об}}{\pi a^2} \quad (2.23)$$

Рассмотрим расчет потока излучения, проходящего через полевую диафрагму и падающего на чувствительную площадку ПОИ.

Пусть ИИ представляет собой равномерную площадку диаметром  $D_{ист}$ , тогда изображение ИИ в плоскости полевой диафрагмы имеет диаметр

$$D_{из} = D_{ист} \frac{a'}{a}. \quad (2.24)$$

Соотношение площадей ИИ и его изображения имеет вид:

$$A_{из} = A_{ист} \left( \frac{a'}{a} \right)^2, \quad (2.25)$$

где  $A_{ист}$  и  $A_{из}$  – площади ИИ и его изображения соответственно.

При расчете потока излучения, проходящего через полевую диафрагму, следует иметь в виду два возможных случая:

- 1) диаметр полевой диафрагмы  $D_{ПД}$  больше диаметра изображения ИИ  $D_{из}$  ( $D_{ПД} \gg D_{из}$ ), то есть угловое поле прибора больше углового размера ИИ;
- 2) диаметр полевой диафрагмы  $D_{ПД}$  меньше диаметра изображения ИИ  $D_{из}$  ( $D_{ПД} \ll D_{из}$ ), то есть угловое поле прибора меньше углового размера ИИ.

Рассмотрим первый случай ( $D_{ПД} > D_{из}$ ).

В этом случае угловое поле прибора  $2\omega$  больше углового размера ИИ:

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{ПД}}{a'} > \frac{D_{ист}}{a} = \frac{D_{ист}}{l}, \quad (2.26)$$

где  $D_{ист}$  – диаметр источника излучения.

Из (2.20) и (2.21) следует, что спектральная плотность потока излучения от равнояркого ИИ:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = E_{e\lambda}(\lambda) A_{\text{из}} = \tau(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda) \frac{A_{\text{об}} A_{\text{из}}}{(a')^2}, \quad (2.27)$$

Из (2.21) следует, что

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda) \frac{A_{\text{об}} A_{\text{ист}}}{a^2} = \tau(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda) \frac{A_{\text{ист}} A_{\text{об}}}{l^2}. \quad (2.28)$$

Последнее выражение справедливо как для оптических систем, имеющих форму входного зрачка, отличную от круглой (квадратную, кольцевую), так и для ИИ, имеющих произвольную форму.

Рассматриваемые малоразмерные ИИ часто описываются величиной спектральной плотности силы излучения  $I_{e\lambda}(\lambda)$ . Для малых ИИ  $L_{e\lambda}(\lambda) = I_{e\lambda}(\lambda) / A_{\text{ист}}$ , поэтому

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda) I_{e\lambda}(\lambda) \frac{A_{\text{об}}}{l^2}. \quad (2.29)$$

Если излучатель ламбертовский, то из (2.28):

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda) M_{e\lambda}(\lambda) \frac{A_{\text{об}} A_{\text{ист}}}{\pi \cdot a^2} = \tau(\lambda) M_{e\lambda}(\lambda) \frac{A_{\text{ист}} A_{\text{об}}}{\pi \cdot l^2}, \quad (2.30)$$

где  $M_{e\lambda}(\lambda)$  - спектральная плотность энергетической светимости ИИ.

Для тепловых ИИ:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \tau(\lambda) M_{e\lambda}^o(\lambda) \frac{A_{\text{об}} A_{\text{ист}}}{\pi \cdot a^2} = \varepsilon(\lambda) \tau(\lambda) M_{e\lambda}^o(\lambda) \frac{A_{\text{ист}} A_{\text{об}}}{\pi \cdot l^2}, \quad (2.31)$$

где  $\varepsilon(\lambda)$  - спектральный коэффициент теплового излучения объекта;  $M_{e\lambda}^o(\lambda)$  - спектральная плотность энергетической светимости черного тела при температуре объекта.

Рассмотрим второй случай ( $D_{\text{ПД}} < D_{\text{из}}$ ).

В этом случае угловое поле прибора  $2\omega$  меньше углового размера ИИ:

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{\text{ПД}}}{a'} < \frac{D_{\text{ист}}}{a} = \frac{D_{\text{ист}}}{l}. \quad (2.32)$$

Из (2.20) и (2.23) следует, что спектральная плотность потока излучения от равнояркого ИИ:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = E_{e\lambda}(\lambda) A_{\text{ПД}} = \tau(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda) \frac{A_{\text{об}} A_{\text{ПД}}}{(a')^2}. \quad (2.33)$$

При  $a \gg f'$  и  $a' \approx f'$  получим:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda) \frac{A_{\text{об}} A_{\text{ПД}}}{(f')^2}. \quad (2.34)$$

Если излучатель ламбертовский, то:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda) M_{e\lambda}(\lambda) \frac{A_{\text{об}} A_{\text{ПД}}}{\pi \cdot (f')^2}. \quad (2.35)$$

Для тепловых ИИ:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \varepsilon_{\lambda}(\lambda) \tau_{\lambda}(\lambda) M_{e\lambda}^o(\lambda) \frac{A_{об} A_{пд}}{\pi \cdot (f')^2} . \quad (2.36)$$

## 2.2 Расчет интегральной чувствительности приемника оптического излучения к излучению источника

При использовании приведенных в литературе [1, 3, 9] значений параметров ПОИ следует обратить внимание на вид ИИ, по которому производилась аттестация ПОИ. Если сведения о паспортном ИИ не приведены, то можно считать, что ПОИ аттестован по источнику типа А.

Спектральное распределение энергетической светимости источника типа А считать совпадающим с излучением ЧТ с температурой  $T = 2856$  К.

Порядок выполнения расчётов:

1. Построить на миллиметровой бумаге (1 лист) графики следующих зависимостей (рекомендуется масштаб по оси абсцисс 1 мкм – 10 см, масштаб по оси ординат – 1...10 мм):

а) относительного спектрального распределения энергетической светимости  $m_{e,\lambda}^I(\lambda)$  паспортного ИИ в диапазоне от 0 до  $3\lambda_{max}$ ; при расчёте воспользоваться единой изотермической кривой (приведенной функцией Планка) [Приложение 1];

б) относительного спектрального распределения энергетической светимости  $m_{e,\lambda}^{II}(\lambda)$  заданного ИИ - ЧТ в диапазоне от 0 до  $3\lambda_{max}$  или светодиода [2, 9];

в) относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения  $V(\lambda)$  [Приложение 2];

г) относительной спектральной характеристики чувствительности заданного ПОИ  $S(\lambda)$  [3, 9].

2. Рассчитать величины коэффициентов использования  $\kappa^I$  и  $\kappa^{II}$  излучения паспортного (I) и заданного (II) ИИ заданным ПОИ, а также коэффициенты использования  $\kappa_{г}^I$  и  $\kappa_{г}^{II}$  излучения паспортного и заданного ИИ глазом (к.п.д. глаза), если параметры ПОИ заданы в световых величинах [3]:

$$\kappa^I = \frac{\int_0^{\infty} m_{e,\lambda}^I(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} m_{e,\lambda}^I(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^I \cdot S_{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^I} ; \quad (2.37)$$

$$\kappa^{II} = \frac{\int_0^{\infty} m_{e,\lambda}^{II}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} m_{e,\lambda}^{II}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^{II} \cdot S_{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^{II}} ; \quad (2.38)$$



$$\kappa_{\Gamma}^I = \frac{\int_{0.38}^{0.78} m_{e,\lambda}^I(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} m_{e,\lambda}^I(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^I \cdot V_{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^I}; \quad (2.39)$$

$$\kappa_{\Gamma}^{\text{II}} = \frac{\int_{0.38}^{0.78} m_{e,\lambda}^{\text{II}}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} m_{e,\lambda}^{\text{II}}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^{\text{II}} \cdot V_{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^{\text{II}}}. \quad (2.40)$$

Шаг интегрирования принять не менее 0,1 мкм. Ход расчёта отразить в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – К расчёту коэффициентов использования излучения паспортного (I) и заданного (II) ИИ заданным ПОИ

$\lambda_i$ , мкм	$m_{e\lambda_i}^I$	$m_{e\lambda_i}^{\text{II}}$	$S_{\lambda_i}$	$V_{\lambda_i}$	$m_{e\lambda_i}^I S_{\lambda_i}$	$m_{e\lambda_i}^{\text{II}} S_{\lambda_i}$	$m_{e\lambda_i}^I V_{\lambda_i}$	$m_{e\lambda_i}^{\text{II}} V_{\lambda_i}$
$\lambda_1$								
$\lambda_2$								
...								
$\lambda_k$								
	$\sum_{i=1}^k$	$\sum_{i=1}^k$			$\sum_{i=1}^k$	$\sum_{i=1}^k$	$\sum_{i=1}^k$	$\sum_{i=1}^k$

3. Рассчитать величину интегральной токовой или вольтовой чувствительности заданного ПОИ к излучению заданного ИИ в энергетических величинах (А/Вт, В/Вт) [1, 2, 3, 9]:

$$S_{\text{инт},e}^{\text{II}} = S_{\text{инт},v}^I \cdot 683 \cdot \kappa_{\Gamma}^I \cdot \frac{\kappa^{\text{II}}}{\kappa^I} \quad (2.41)$$

или

$$S_{\text{инт},e}^{\text{II}} = S_{\text{инт},e}^I \cdot \frac{\kappa^{\text{II}}}{\kappa^I}, \quad (2.42)$$

где  $S_{\text{инт},v}^I$  – интегральная чувствительность ПОИ к излучению паспортного ИИ в световых величинах;  $S_{\text{инт},e}^I$  – интегральная чувствительность ПОИ к излучению паспортного ИИ в энергетических величинах.

4. Если параметры ИИ были заданы в световых величинах и был рассчитан световой поток  $\Phi_v$ , падающий на ПОИ, то необходимо рассчитать соответствующий поток излучения:

$$\Phi_e = \frac{\Phi_v}{683 \cdot \kappa_{\Gamma}^{\text{II}}}. \quad (2.43)$$

### 2.3 Расчет приемной составляющей сигнала и величины постоянной составляющей тока на выходе приемника оптического излучения

При синусоидальной модуляции поток излучения, падающий на ПОИ, описывается выражением:

$$\Phi_{\text{ПОИ}} = \Phi_{\text{=}} + \Phi_{\text{~}} \cdot \sin \omega t, \quad (2.44)$$

где  $\Phi_{\text{=}}$  – постоянная составляющая потока излучения;  $\Phi_{\text{~}}$  – амплитуда переменной составляющей потока излучения (рис. 2.2).

Постоянная составляющая потока излучения может быть обусловлена наличием фоновых засветок от окружающих объектов  $\Phi_{\text{фона}}$ , а также средним значением потока излучения исследуемого ИИ  $\Phi_{\text{с=}}$ .

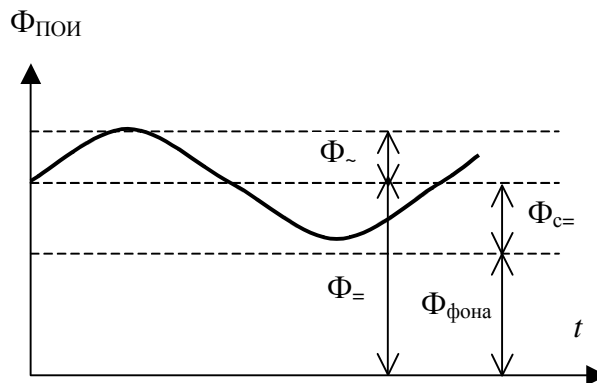


Рисунок 2.2 – Составляющие потока излучения на входе ПОИ

Если излучение фона отсутствует или пренебрежимо мало, а глубина модуляции исследуемого излучения составляет 100%, то

$$\Phi_{\text{с=}} = \Phi_{\text{~}} = \Phi_{\text{ПОИ}} / 2. \quad (2.45)$$

Поток излучения, падающий на ПОИ, обуславливает возникновение тока, проходящего через ПОИ и называемого фототоком:

$$I_{\text{ф}} = \Phi_{\text{ПОИ}} \cdot S_I, \quad (2.46)$$

где  $S_I$  – токовая чувствительность ПОИ.

Фототок  $I_{\text{ф}}$  складывается с темновым током ПОИ  $I_{\text{т}}$ , а обе эти составляющие образуют общий ток ПОИ (рис. 2.3):

$$I_{\text{общ}} = I_{\text{т}} + I_{\text{ф}}. \quad (2.47)$$

При синусоидальной модуляции потока излучения с круговой частотой  $\omega_m$

$$I_{\text{общ}}(t) = I_{\text{т}} + \Phi_{\text{=}} \cdot S_I + \Phi_{\text{~}} \cdot S_I \cdot \sin \omega_m t. \quad (2.48)$$

Темновой ток  $I_{\text{т}}$  и постоянная составляющая фототока  $I_{\text{=}} = \Phi_{\text{=}} \cdot S_I$  образуют постоянную составляющую тока:

$$I = I_{\text{т}} + I_{\text{=}} = I_{\text{т}} + \Phi_{\text{=}} \cdot S_I. \quad (2.49)$$

Амплитуда переменных составляющих фототока и напряжения фотосигнала:

$$I_{\sim} = \Phi_{\sim} \cdot S_{\Gamma} ; U_{\sim} = \Phi_{\sim} \cdot S_u = \Phi_{\sim} S_{\Gamma} R_n , \quad (2.50)$$

где  $S_u$  – вольтовая чувствительность ПОИ;  $R_n$  – сопротивление нагрузки ПОИ.

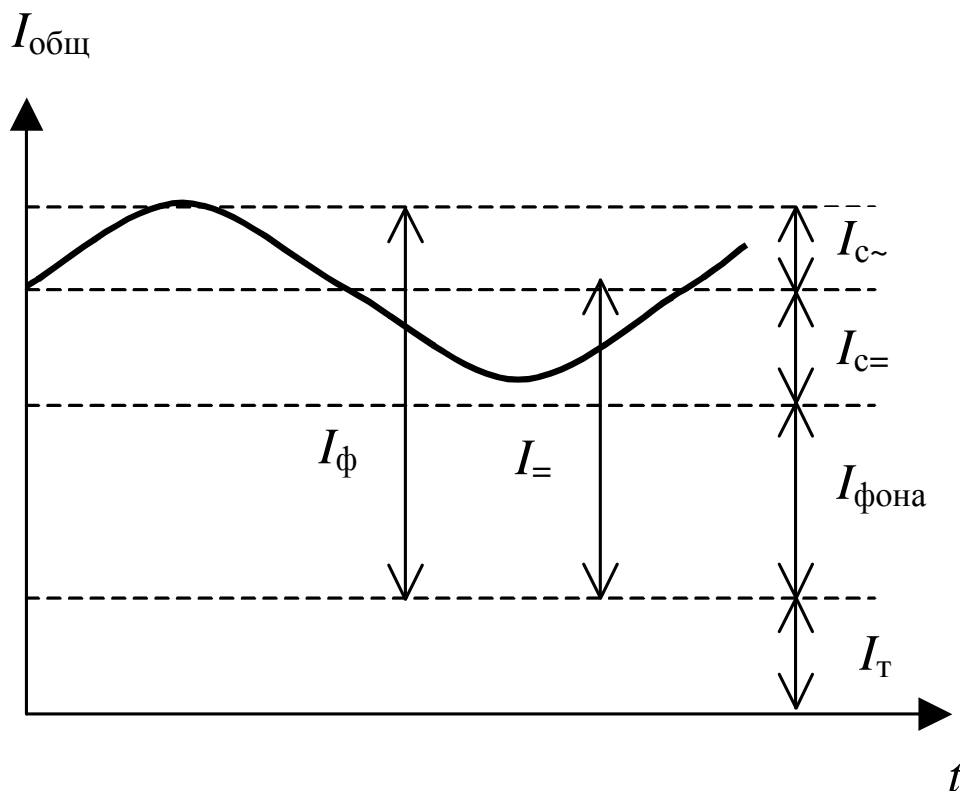


Рисунок 2.3 – К расчету тока на выходе ПОИ

Амплитуда переменной составляющей сигнала (напряжения или тока) определяется только излучением ИИ, а величина постоянной составляющей общего тока  $\bar{I}$  зависит от множества внешних факторов: изменения уровня фона, изменений темнового тока, которые могут быть обусловлены изменением температуры ПОИ и т. д. Исходя из изложенного, для передачи информации в ОЭП используются, как правило, только модулированные потоки излучения, либо осуществляется модуляция исследуемых потоков излучения.

При полихроматическом ИИ (черное или серое тело) или квазимонохроматическом ИИ (полупроводниковый излучающий диод) и селективном ПОИ ток сигнала на его выходе будет определяться формулой:

$$I_{с=} = \int_{\lambda=0}^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot S_{\lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda , \quad (2.51)$$

где  $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$  – спектральное распределение потока излучения на ПОИ;  $S_{\lambda}(\lambda)$  – абсолютная спектральная характеристика чувствительности ПОИ;  $\tau(\lambda)$  –

спектральный коэффициент пропускания среды распространения и оптической системы.

## 2.4 Расчет напряжения и тока шума приемника оптического излучения в заданной полосе частот электронного тракта

Кроме переменной составляющей фототока на выходе ПОИ всегда присутствуют флюктуации общего тока, называемые шумами. Шумы существуют как при наличии, так и при отсутствии фотосигнала, так как они обусловлены физическими процессами, происходящими в ПОИ.

Наличие шумов затрудняет обнаружение слабых сигналов, а также приводит к погрешности измерения параметров сигнала: амплитуды, частоты, фазы, времени появления импульсов излучения.

Шумы характеризуются средними квадратическими значениями (СКЗ) флюктуации общего тока ПОИ в заданной полосе частот  $I_{ш}$  или СКЗ флюктуации напряжения  $U_{ш}$  на заданной нагрузке в цепи ПОИ в заданной полосе частот.

В справочной литературе и в паспортах ПОИ приводят один из следующих параметров, характеризующих шумы ПОИ: порог чувствительности  $\Phi_n$  в заданной полосе частот; порог чувствительности в единичной полосе частот  $\Phi_{n1}$ ; удельный порог чувствительности  $\Phi_n^*$ ; обнаружительную способность  $D$ ; удельную обнаружительную способность  $D^*$ .

Из определений перечисленных параметров следует, что СКЗ напряжения или тока шума ПОИ в заданной полосе частот  $\Delta f_{эфф}$  электронного тракта на частоте  $f_{пасп}$ , на которой проводилась аттестация ПОИ, может быть найдено с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} U_{ш ПОИ \Delta f_{эфф}} &= \Phi_n \cdot S_{U_{инт}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{эфф}}{\Delta f_{эфф пасп}}} = \frac{1}{D} \cdot S_{U_{инт}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{эфф}}{\Delta f_{эфф пасп}}} = \\ &= \Phi_n^* \cdot S_{U_{инт}} \cdot \sqrt{A_{фч} \cdot \Delta f_{эфф}} = \frac{1}{D^*} \cdot S_{U_{инт}} \cdot \sqrt{A_{фч} \cdot \Delta f_{эфф}} = \\ &= \Phi_{n1} \cdot S_{U_{инт}} \cdot \sqrt{\Delta f_{эфф}}, \end{aligned} \quad (2.52)$$

$$\begin{aligned} I_{ш ПОИ \Delta f_{эфф}} &= \Phi_n \cdot S_{I_{инт}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{эфф}}{\Delta f_{эфф пасп}}} = \frac{1}{D} \cdot S_{I_{инт}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{эфф}}{\Delta f_{эфф пасп}}} = \\ &= \Phi_n^* \cdot S_{I_{инт}} \cdot \sqrt{A_{фч} \cdot \Delta f_{эфф}} = \frac{1}{D^*} \cdot S_{I_{инт}} \cdot \sqrt{A_{фч} \cdot \Delta f_{эфф}} = \\ &= \Phi_{n1} \cdot S_{I_{инт}} \cdot \sqrt{\Delta f_{эфф}}, \end{aligned} \quad (2.53)$$

где  $\Delta f_{эфф}$  – эффективная шумовая полоса частот электронного тракта разрабатываемого прибора;  $\Delta f_{эфф пасп}$  – эффективная шумовая полоса частот

электронного тракта установки, на которой производилась аттестация ПОИ;  $A_{фч}$  – геометрическая фоточувствительная площадь ПОИ.

Стандарты рекомендуют производить аттестацию ПОИ на внутреннем фотоэффекте при частоте модуляции сигнала  $f_{\text{мод}} = 800$  Гц, а ПОИ на внешнем фотоэффекте – при  $f_{\text{мод}} = 1000$  Гц. Рекомендуется выбирать  $\Delta f_{\text{эфф пасп}} = 0,2 \cdot f_{\text{мод}}$ . Эти рекомендации действуют в тех случаях, когда ТУ на конкретные типы ПОИ не предусматривает иных значений  $f_{\text{мод}}$  и  $\Delta f_{\text{эфф пасп}}$ .

При использовании выражений (2.52) и (2.53) следует подставлять значения интегральной вольтовой  $S_{U_{\text{инт}}}$  и токовой  $S_{I_{\text{инт}}}$  чувствительности, а также шумовых параметров ПОИ по отношению к излучению одного, например, паспортного ИИ.

В справочниках отсутствуют сведения о шумовых параметрах некоторых ПОИ. Приблизительную их оценку можно получить, воспользовавшись известными теоретическими формулами для расчёта составляющих шумов соответствующих типов ПОИ.

Основными составляющими шумов фоторезисторов является токовый, генерационно-рекомбинационный и тепловой шум.

Токовый шум ( $1/f$ -шум) обусловлен технологией изготовления фоточувствительного слоя, состоянием поверхности, качеством контактов и токами утечки. СКЗ тока и напряжения токового шума в узкой области частот  $\Delta f$  описываются выражениями [3]:

$$I_{ш I \text{ ПОИ } \Delta f} = \sqrt{\frac{A \cdot \bar{I}^2}{f} \cdot \Delta f}, U_{ш I \text{ ПОИ } \Delta f} = \sqrt{\frac{A \cdot \bar{I}^2 \cdot R_{\text{ПОИ}}^2}{f} \cdot \Delta f}, \quad (2.54)$$

где  $A$  - постоянная, зависящая от материала ПОИ ( $A = 3 \cdot 10^{-12} \dots 3 \cdot 10^{-7}$ ; для сернисто-свинцовых фоторезисторов  $A \approx 10^{-11}$ );  $\bar{I}$  – среднее значение тока ПОИ;  $f$  – среднее значение частоты в полосе частот;  $R_{\text{ПОИ}}$  – сопротивление ПОИ.

Теоретический расчёт генерационно-рекомбинационного шума не представляется возможным, так как не известны такие параметры, как время жизни носителей  $\tau_n$ , концентрация носителей  $n$ , объём фотослоя  $V$  для конкретных типов ПОИ.

Тепловой шум возникает вследствие хаотического движения свободных электронов в ПОИ. Спектр теплового шума – равномерный (белый). СКЗ шума в полосе частот  $\Delta f_{\text{эфф}}$  можно рассчитать по формуле Найквиста [3]:

$$I_{ш.т. \text{ ПОИ } \Delta f. \text{ эфф}} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T_{\text{ПОИ}}}{R_{\text{ПОИ}}} \cdot \Delta f_{\text{эфф}}}, \\ U_{ш.т. \text{ ПОИ } \Delta f. \text{ эфф}} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T_{\text{ПОИ}} \cdot R_{\text{ПОИ}} \cdot \Delta f_{\text{эфф}}}, \quad (2.55)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>);  $T_{\text{ПОИ}}$  – температура ПОИ;  $R_{\text{ПОИ}}$  – сопротивление ПОИ.

Основными составляющими шума фотодиода являются токовый, дробовый и тепловой шумы.

Токовый шум сказывается в основном на низких частотах ( $f \approx 1$  кГц).

Дробовый шум возникает вследствие флюктуаций во времени числа электронов, образующих электрический ток. СКЗ дробового шума в полосе частот  $\Delta f_{\text{эфф}}$ :

$$\begin{aligned} I_{\text{ш др ПОИ } \Delta f_{\text{эфф}}} &= \sqrt{2 \cdot e \cdot \bar{I} \cdot \Delta f_{\text{эфф}}}, \\ U_{\text{ш др ПОИ } \Delta f_{\text{эфф}}} &= \sqrt{2 \cdot e \cdot \bar{I} \cdot R_n^2 \cdot \Delta f_{\text{эфф}}}, \end{aligned} \quad (2.56)$$

где  $e$  – заряд электрона ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл);  $\bar{I}$  – среднее значение тока ПОИ.

Основной составляющей шума электронов вакуумных фотоэлементов и фотоумножителей является дробовый шум, который для электровакуумных фотоэлементов рассчитывается по формуле (4.5), а для фотоумножителей, с учётом влияния динодов:

$$I_{\text{ш др ФУ } \Delta f_{\text{эфф}}} = \sqrt{2 \cdot e \cdot \bar{I}_{\text{ФК}} \cdot M_{\text{ФУ}}^2 \cdot (1 + B) \cdot \Delta f_{\text{эфф}}}, \quad (2.57)$$

где  $I_{\text{ФК}}$  – суммарный ток фотокатода;  $M_{\text{ФУ}}$  – коэффициент усиления фотоумножителя по току;  $(1 + B)$  – коэффициент, учитывающий увеличение дробового шума за счёт динодного умножения ( $B = 0,3 \dots 4$ , а для фотоумножителей с электростатической фокусировкой  $B = 1,5$ ).

## 2.5 Расчет порога чувствительности и обнаружительной способности приемника оптического излучения по отношению и излучению заданного источника

Шумовые параметры ПОИ приводятся в паспортах и справочниках, как правило, по отношению к излучению того же ИИ, что и чувствительность.

Величины порога чувствительности или обнаружительной способности заданного ПОИ к излучению заданного ИИ в полосе частот, при которой производилась аттестация ПОИ, в энергетических величинах (Вт, Вт<sup>-1</sup>) равны [3]:

$$\Phi_{\text{пе}}^{\text{II}} = \Phi_{\text{пв}}^{\text{I}} \frac{\kappa^{\text{I}}}{683 \cdot \kappa_{\text{r}}^{\text{I}} \cdot \kappa^{\text{II}}}, \quad \Phi_{\text{пе}}^{\text{II}} = \Phi_{\text{пе}}^{\text{I}} \frac{\kappa^{\text{I}}}{\kappa^{\text{II}}}, \quad (2.58)$$

$$D_e^{\text{II}} = D_v^{\text{I}} 683 \kappa_{\text{r}}^{\text{I}} (\kappa^{\text{II}}/\kappa^{\text{I}}); \quad D_e^{\text{II}} = D_e^{\text{I}} (\kappa^{\text{II}}/\kappa^{\text{I}}),$$

где  $\Phi_{\text{пв}}^{\text{I}}$  и  $\Phi_{\text{пе}}^{\text{I}}$  – порог чувствительности ПОИ к излучению паспортного ИИ в полосе частот, при которой производилась аттестация ПОИ, в световых (лм) и энергетических (Вт) величинах соответственно;  $D_v^{\text{I}}$  и  $D_e^{\text{I}}$  – обнаружительная способность ПОИ к излучению паспортного ИИ в полосе частот, при которой производилась аттестация ПОИ, в световых (лм<sup>-1</sup>) и

энергетических ( $\text{Вт}^{-1}$ ) величинах соответственно. Аналогично выглядят формулы для расчёта порога чувствительности в единичной полосе частот  $\Phi_{\text{н1e}}^{\text{II}}$  ( $\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ ), удельного порога чувствительности  $\Phi_{\text{не}}^{*\text{II}}$  ( $\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2} \cdot \text{см}^{-1}$ ), а также удельной обнаружительной способности  $D_e^{*\text{II}}$  ( $\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2} \cdot \text{см}^{-1}$ ).

Порог чувствительности ПОИ по отношению к излучению заданного ИИ в заданной полосе частот электронного тракта может быть найден из соотношений:

$$\Phi_{\text{не } \Delta f_{\text{эфф}}}^{\text{II}} = \Phi_{\text{не}}^{\text{II}} (\Delta f_{\text{эфф}}^r / \Delta f_{\text{эфф пасп}}^r)^{1/2} = (1 / D_e^{\text{II}}) (\Delta f_{\text{эфф}}^r / \Delta f_{\text{эфф пасп}}^r)^{1/2} \quad (2.59)$$

## 2.6 Расчет основных составляющих шумовой погрешности оптико-электронного прибора и отношения сигнал/шум в заданной полосе частот электронного тракта

Шумовая погрешность ОЭП определяется не только собственными шумами ПОИ, но и наличием внешних засветок, схемой включения ПОИ, шумами сопротивления нагрузки и первых каскадов предварительного усилителя.

В качестве примера рассмотрим схемы включения ПОИ и предварительный усилитель на основе полевого транзистора, представленный на рисунке 2.5.

Сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$ , как правило, выбирают равным темновому сопротивлению ПОИ  $R_{\text{т}}$ , если  $R_{\text{т}} \leq 2 \text{ МОм}$ , или принимают  $R_{\text{н}} = 2 \text{ МОм}$ , если  $R_{\text{т}} > 2 \text{ МОм}$  (для фотодиодов, фотоэлементов, фотоумножителей). Пирозлектрические ПОИ и полупроводниковые болометры включаются в цепь с сопротивлением нагрузки до 50...200 МОм.

При выборе сопротивления нагрузки следует учитывать также постоянную времени  $T_{\text{к}}$  инерционного контура, образованного сопротивлением нагрузки  $R_{\text{н}}$  и ёмкостью инерционного контура  $C_{\text{к}}$ , образованного ёмкостью ПОИ  $C_{\text{п}}$ , ёмкостью монтажа  $C_{\text{м}}$  и входной ёмкостью предварительного усилителя  $C_{\text{в}}$ :

$$T_{\text{г}} = R_{\text{у}} C_{\text{г}} = R_{\text{у}} (C_{\text{г}} + C_{\text{м}} + C_{\text{в}}) \quad (2.4)$$

Ёмкость монтажа  $C_{\text{м}} = (1...5) \text{ пФ}$ , ёмкость полевого транзистора  $C_{\text{в}} = (2...10) \text{ пФ}$ . При таких параметрах и невысокой частоте модуляции ( $f_{\text{м}} < 10 \text{ кГц}$ ) инерционность системы в ряде случаев определяется временем установления нормированной переходной характеристики (постоянной времени) ПОИ  $\tau_{\text{пои}}$ .

Постоянные времени фоторезисторов и фотодиодов приводятся в справочной литературе [1, 3], а постоянные времени фотоумножителей ( $\tau_{\text{фy}} \approx 1...5 \text{ нс}$ ) и фотоэлементов ( $\tau_{\text{фy}} \approx 10^{-12} \text{ с}$ ) пренебрежимо малы.

С учётом изложенных соображений сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$  и постоянная времени  $\tau_{\text{пои}}$  должны удовлетворять условиям:

$$R_{\text{н}} \leq 0,1 / (C_{\text{к}} f_{\text{м}}), \quad \tau_{\text{пои}} \leq 0,1 / f_{\text{м}} \quad (2.60)$$

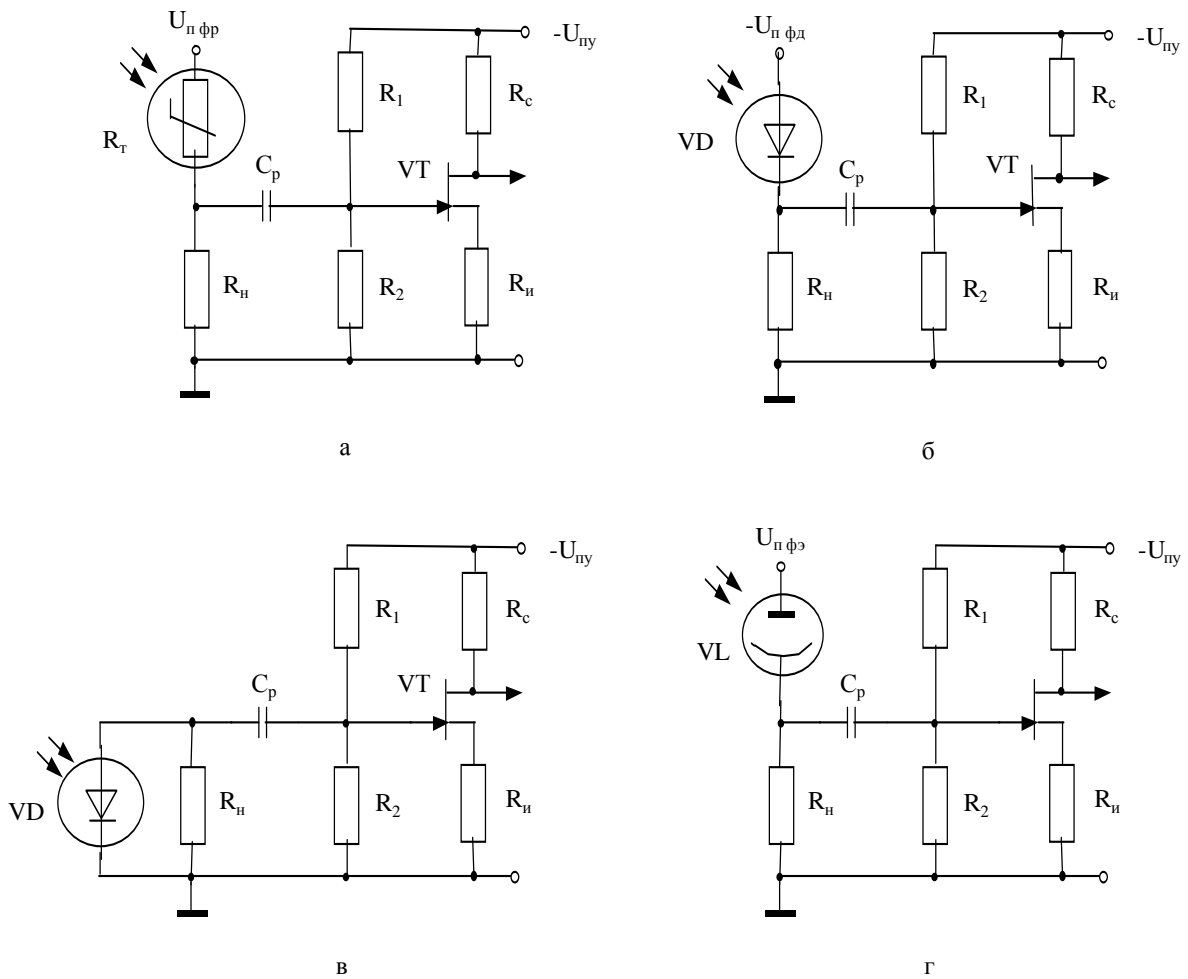


Рисунок 2.5 – Схемы включения ПОИ и предварительный усилитель на полевом транзисторе: а - фоторезистор; б - фотодиод в фотодиодном режиме; в - фотодиод в фотогальваническом режиме; г - фотоэлемент

Шумовые параметры ПОИ, приведённые в паспортах и справочниках, не учитывают тех составляющих шума, которые обусловлены конкретными условиями работы ПОИ в ОЭП. В частности, паспортные параметры не содержат величину дробового шума фототока. Дробовой шум фототока фотодиодов и электровакуумных фотоэлементов:

$$I_{ш.др.ПОИ.\Delta f.\text{эфф}.I} = \sqrt{2eI = \Delta f_{\text{эфф}}} = \sqrt{2e\Phi = S_{I,инт}'' \Delta f_{\text{эфф}}} \quad ; \quad (2.61)$$

$$U_{ш.др.ПОИ.\Delta f.\text{эфф}.I} = \sqrt{2eI = R_n^2 \Delta f_{\text{эфф}}} = \sqrt{2e\Phi = S_{I,инт}'' R_n^2 \Delta f_{\text{эфф}}} \quad , \quad (2.62)$$

где  $e$  – заряд электрона ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл);  $R_n$  – сопротивление нагрузки ПОИ. Здесь следует использовать величину чувствительности ПОИ  $S_{I,инт}''$  к падающему на него в данном ОЭП излучению заданного ИИ.



Суммарные значения тока и напряжения шума ПОИ с учетом дробового шума фототока:

$$I_{ш.ПОИ.\Delta f.\text{эфф}.\Sigma} = \sqrt{I_{ш.ПОИ.\Delta f.\text{эфф}}^2 + I_{ш.др.ПОИ.\Delta f.\text{эфф}.I}^2} ; \quad (2.63)$$

$$U_{ш.ПОИ.\Delta f.\text{эфф}.\Sigma} = \sqrt{U_{ш.ПОИ.\Delta f.\text{эфф}}^2 + U_{ш.др.ПОИ.\Delta f.\text{эфф}.I}^2} . \quad (2.64)$$

Аналогично можно учесть и другие составляющие шума для условий конкретной задачи.

Кроме собственных шумов ПОИ при расчете ОЭП следует учитывать тепловой шум резистора нагрузки  $R_n$  и шум активного элемента предварительного усилителя.

СКЗ теплового шума резистора нагрузки в полосе частот  $\Delta f_{\text{эфф}}$ :

$$I_{ш.т.R_n.\Delta f.\text{эфф}} = \sqrt{\frac{4kT_n}{R_n} \Delta f_{\text{эфф}}} ; U_{ш.т.R_n.\Delta f.\text{эфф}} = \sqrt{4kT_n R_n \Delta f_{\text{эфф}}} , \quad (2.65)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>);  $T_n$  – температура резистора нагрузки;  $R_n$  – сопротивление резистора нагрузки.

Величина шума активного элемента предварительного усилителя  $I_{ш.ПУ.\Delta f.\text{эфф}}$  может быть взята в справочниках на соответствующие элементы электронной техники. При этом следует учитывать схему его включения.

Для полевых транзисторов характерной составляющей является тепловой шум канала, который характеризуется эквивалентным шумовым сопротивлением:

$$R_{ш} = 2/(3S_{ПТ}) , \quad (2.66)$$

где  $S_{ПТ}$  – крутизна вольтамперной характеристики полевого транзистора (типичное ее значение –  $S_{ПТ} = (1...3) \cdot 10^{-3}$  А/В).

СКЗ напряжения шума полевого транзистора в полосе частот  $\Delta f_{\text{эфф}}$ , приведенное к его входу:

$$I_{ш.ПТ.\Delta f.\text{эфф}} = \sqrt{\frac{4kT_{ПТ} R_{ш}}{R_n^2} \Delta f_{\text{эфф}}} ; U_{ш.ПТ.\Delta f.\text{эфф}} = \sqrt{4kT_{ПТ} R_{ш} \Delta f_{\text{эфф}}} , \quad (2.67)$$

где  $T_{ПТ}$  – температура полевого транзистора.

Суммарное значение тока и напряжения шума ПОИ, входной цепи и предварительного усилителя в эффективной полосе частот  $\Delta f_{\text{эфф}}$  электронного тракта:

$$I_{ш.\Sigma.\Delta f.\text{эфф}} = \sqrt{I_{ш.ПОИ.\Delta f.\text{эфф}.\Sigma}^2 + I_{ш.т.R_n.\Delta f.\text{эфф}}^2 + I_{ш.ПУ.\Delta f.\text{эфф}}^2} ; \quad (2.68)$$

$$U_{ш.\Sigma.\Delta f.\text{эфф}} = \sqrt{U_{ш.ПОИ.\Delta f.\text{эфф}.\Sigma}^2 + U_{ш.т.R_n.\Delta f.\text{эфф}}^2 + U_{ш.ПУ.\Delta f.\text{эфф}}^2} . \quad (2.69)$$

Пользуясь рассчитанными ранее значениями амплитуд переменных составляющих потока излучения  $\Phi_{\sim}$ , фототока  $I_{\sim}$  и напряжения фотосигнала  $U_{\sim}$ , а также порога чувствительности ПОИ  $\Phi_{пс.\Delta f.\text{эфф}}^{\text{II}}$  по отношению к излучению заданного ИИ в заданной полосе частот электронного тракта и

тока шума  $I_{ш \Sigma \Delta f \text{ эфф}}$  или напряжения шума  $U_{ш \Sigma \Delta f \text{ эфф}}$ , можно рассчитать отношения сигнал/шум без учета ( $\mu_{\text{ПОИ}}$ ) и с учетом ( $\mu_{\Sigma}$ ) влияния шумов входной цепи и предварительного усилителя:

$$\mu_{\text{ПОИ}} = \frac{\Phi_{\sim}}{\Phi_{\text{не } \Delta f \text{ эфф}}^{\text{II}}} ; \mu_{\Sigma} = \frac{I_{\sim}}{I_{ш \Sigma \Delta f \text{ эфф}}} = \frac{U_{\sim}}{U_{ш \Sigma \Delta f \text{ эфф}}} . \quad (2.70)$$

Спектральная плотность мощности (дисперсия) белого шума ПОИ, входной цепи и предварительного усилителя в полосе частот  $\Delta f_{\text{эфф}}$ :

$$N = \frac{\bar{I}_{ш \Sigma \Delta f \text{ эфф}}^2}{\Delta f_{\text{эфф}}} . \quad (2.71)$$

При оптимальной по критерию максимума правдоподобия обработке сигнала средняя квадратическая погрешность измерения амплитуды сигнала с детерминированной начальной фазой на фоне нормального белого шума:

$$\sigma_{ш} = \sqrt{\frac{N_0}{2e_0}} , \quad (2.72)$$

где  $e_0$  – удельная энергия сигнала за время измерения  $T_{\text{и}}$ ;

$$e_0 = \int_0^{\infty} f^2(t) dt ; \quad (2.73)$$

$f(t)$  – нормированный закон модуляции сигнала. При синусоидальной модуляции

$$e_0 = T_{\text{и}} / 2 ; \sigma_{ш} = \sqrt{\frac{N_0}{T_{\text{и}}}} . \quad (2.74)$$

При модуляции в виде прямоугольных импульсов со скважностью, равной 2:

$$e_0 = T_{\text{и}} ; \sigma_{ш} = \sqrt{\frac{N_0}{2T_{\text{и}}}} . \quad (2.75)$$

## 2.7 Расчет шумовой погрешности оптико-электронных систем измерения температуры

Ток сигнала на выходе ПОИ в оптико-электронной системе измерения температуры (ОЭСИТ) в соответствии с (2.18):

$$\begin{aligned} I_c &= \int_{\lambda=0}^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot S_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda = \\ &= M_{e\lambda_{\text{max}}}^o \cdot \frac{A_{\text{об}} A_{\text{пл}}}{\pi \cdot (a')^2} \cdot S_{\lambda_{\text{max}}} \cdot \int_{\lambda=0}^{\infty} m_{e\lambda}^o(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s_{\lambda}(\lambda) d\lambda , \end{aligned} \quad (2.76)$$

где  $S_{\lambda}(\lambda)$ ,  $s_{\lambda}(\lambda)$  и  $S_{\lambda_{\text{max}}}$  – абсолютная спектральная характеристика чувствительности, относительная спектральная характеристика чувствительности и максимальное значение спектральной

чувствительности соответственно;  $S_\lambda(\lambda) = S_{\lambda_{\max}} s_\lambda(\lambda)$ ;  $m_{e\lambda}^0(\lambda)$ ,  $M_{e\lambda}^0 \max$  – относительная спектральная плотность энергетической светимости ЧТ и максимальное значение ее спектральной плотности соответственно;  $T$  – температура объекта.

Здесь полагалось, что температура объекта не влияет на его коэффициент теплового излучения. В противном случае следует рассматривать зависимость  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ .

Из выражения (2.76) следует, что особенностью ОЭСИТ, то есть пирометров, тепловизоров и т. д., является существенно нелинейная зависимость величины сигнала  $I_c$  от измеряемого параметра – температуры  $T$ .

Для определения шумовой погрешности измерения температуры продифференцируем формулу (2.76) по температуре:

$$\frac{\partial I_c}{\partial T} = \frac{A_{об} A_{пд}}{\pi \cdot (a')^2} \cdot S_{\lambda_{\max}} \cdot \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{\partial M_{e\lambda}^0(\lambda, T)}{\partial T} \cdot \varepsilon_\lambda(\lambda) \cdot \tau_\lambda(\lambda) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (2.77)$$

Для упрощения расчетов заменим формулу Планка формулой Вина, что справедливо для  $\lambda T < 5000$  мкм·К с погрешностью, не превышающей 5%:

$$M_{e\lambda}^0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right), \quad (2.78)$$

где  $C_1 = 3,7415 \cdot 10^{16}$  Вт·м<sup>2</sup>;  $C_2 = 1,43879 \cdot 10^{-2}$  м·К.

При такой аппроксимации:

$$\frac{\partial M_{e\lambda}^0(\lambda, T)}{\partial T} = \frac{C_2 M_{e\lambda}^0(\lambda, T)}{\lambda T^2}. \quad (2.79)$$

Используя второй закон Вина ( $M_{e\lambda, \max}^0 = C'_\lambda \cdot T^5$ , где  $C'_\lambda = 1,315 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м<sup>3</sup>·К<sup>5</sup>) =  $1,315 \cdot 10^{-15}$  Вт/(см<sup>2</sup>·мкм·К<sup>5</sup>)), получим, что ток сигнала на выходе ПОИ:

$$I_c = C'_\lambda \cdot T^5 \cdot \frac{A_{об} A_{пд}}{\pi \cdot (a')^2} \cdot S_{\lambda_{\max}} \cdot \int_{\lambda=0}^{\infty} m_{e\lambda}(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda. \quad (2.80)$$

Максимальное значение монохроматической чувствительности ПОИ:

$$S_{\lambda_{\max}} = \frac{S_{инт}^I}{\kappa_{ПОИ}^I}, \quad (2.81)$$

где  $S_{инт}^I$  – интегральная чувствительность ПОИ к излучению паспортного (эталонного) ИИ;  $\kappa_{ПОИ}^I$  – коэффициент использования ПОИ излучения паспортного ИИ;

$$\kappa_{ПОИ}^I = \frac{\int_0^{\infty} \varphi^I_{e\lambda}(\lambda) s_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi^I_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}; \quad (2.82)$$

$\Phi_{e\lambda}^I(\lambda)$  - относительное спектральное распределение потока излучения паспортного ИИ.

Для серого излучателя ( $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon = \text{const}$ ) и неселективной оптики ( $\tau(\lambda) = \tau = \text{const}$ ) из (7.5) получим:

$$I_c = C'_\lambda T^5 \cdot \varepsilon \cdot \tau \cdot \frac{A_{об} A_{ПД}}{\pi \cdot (a')^2} \cdot S_{\lambda_{\max}} \cdot \int_{\lambda=0}^{\infty} m_{e\lambda}(\lambda, T) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda. \quad (2.83)$$

Изменение сигнала на выходе ПОИ, обусловленное малым изменением температуры:

$$\Delta I_c = \left( \frac{\partial I_c}{\partial T} \right) \Delta T = \left\{ \left[ \frac{C_2}{T^2} M_{e,\lambda,\max}^0 \right] \frac{A_{об} A_{ПД}}{\pi (a')^2} S_{\lambda_{\max}} \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{m_{e,\lambda}^0(\lambda, T)}{\lambda} \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda \right\} \Delta T = \quad (2.84)$$

$$= \left\{ \left[ \frac{C_2}{T^2} C'_\lambda T^5 \right] \frac{A_{об} A_{ПД}}{\pi (a')^2} S_{\lambda_{\max}} \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{m_{e,\lambda}^0(\lambda, T)}{\lambda} \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda \right\} \Delta T$$

Если коэффициенты  $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon = \text{const}$  и  $\tau(\lambda) = \tau = \text{const}$ , то:

$$\Delta I_c = \left\{ \varepsilon \tau \left[ C_2 C'_\lambda T^3 \right] \frac{A_{об} A_{ПД}}{\pi (a')^2} S_{\lambda_{\max}} \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{m_{e,\lambda}^0(\lambda, T)}{\lambda} s_\lambda(\lambda) d\lambda \right\} \Delta T. \quad (2.85)$$

Произведение в формуле (2.85):

$$C_2 C'_\lambda = 1,44 \cdot 10^4 \text{ [мкм} \cdot \text{К]} \cdot 1,315 \cdot 10^{-15} \text{ [Вт/(см}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{К}^5)]} = 18,936 \cdot 10^{-12} \text{ [Вт/см}^2 \cdot \text{К}^4]} = 0,835 \cdot (4\sigma), \quad (2.86)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Интеграл в выражении (2.85)

$$(\Delta \ln \lambda)_{эф} = \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{m_{e,\lambda}^0(\lambda) s_\lambda(\lambda)}{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} m_{e,\lambda}^0(\lambda) s_\lambda(\lambda) d(\ln \lambda) \quad (2.87)$$

называется **относительной или логарифмической спектральной шириной полосы пропускания ПОИ**, а произведение

$$\xi_{АЧТ} = 0,835 (\Delta \ln \lambda)_{эф} \quad (2.88)$$

называется **коэффициентом использования контрастного черного излучателя**.

Следовательно, выражение (2.85) можно представить в виде:

$$\xi_{АЧТ} = \left\{ \varepsilon \tau \left[ 0,835 (4\sigma T^3) \right] \frac{A_{об} A_{ПД}}{\pi (a')^2} S_{\lambda_{\max}} (\Delta \ln \lambda)_{эф} \right\} \Delta T. \quad (2.89)$$

На основании изложенного СКЗ шумовой составляющей погрешности измерения температуры:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{u,i}}{K_n K_f \frac{A_{об} A_{ПД}}{\pi (a')^2} [C_2 C'_\lambda T^3] S_{\lambda_{\max}} \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{m_{e,\lambda}^0(\lambda) \varepsilon(\lambda) \tau(\lambda) s_\lambda(\lambda)}{\lambda} d\lambda}, \quad (2.90)$$

или для серого излучателя ( $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon = \text{const}$ ) и неселективной оптики ( $\tau(\lambda) = \tau = \text{const}$ ):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{шi}}{\left[0,835(4\sigma T^3)\right] \varepsilon \tau \frac{A_{об} A_{ПД}}{\pi(a')^2} S_{\lambda_{\max}} \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{m_{e\lambda}^o(\lambda) s_{\lambda}(\lambda)}{\lambda} d\lambda}, \quad (2.91)$$

а с учетом введенных обозначений (2.87):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{шi}}{\left[0,82(4\sigma T^3)\right] \varepsilon \tau \frac{A_{об} A_{ПД}}{\pi(a')^2} S_{\lambda_{\max}} (\Delta \ln \lambda)_{эф}}, \quad (2.92)$$

где  $\sigma_{ш.i}$  – СКЗ шумовой погрешности измерения фототока.

## Литература

1. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приёмники оптического излучения. Справочник. – М. : Радио и связь, 1987.
2. Ишанин Г.Г., Козлов В.В. Источники оптического излучения : Учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов/ Г.Г. Ишанин, В.В. Козлов. СПб.: Политехника, 2009, - 415с.
3. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приёмники излучения: Уч. пособие для студентов вузов. – СПб. : Папирус, 2003.
4. Коротаев В.В., Мусяков В.Л. Энергетический расчет ОЭП: Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию. - СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006.
5. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М. : Сов. радио, 1978.
6. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – СПб. : Лань, 2010.
7. Теория оптических систем. Учебник для вузов / Б.Н. Бегунов, Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. – М. : Машиностроение, 1992.
8. Эпштейн М.И. Измерения оптического излучения в электронике. – М. : Энергаториздат, 1990.
9. Юшин А.М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги : Справочник: В 5-ти т. – М. : РадиоСофт, 2003.
10. Якушенков Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов. – М.: Логос, 2000.
11. Якушенков Ю.Г. Теория и расчёт оптико-электронных приборов: Учебник – 6-е изд., перераб. и доп.– М. : Логос, 2011, 568с.:ил.



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

---

## **КАФЕДРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

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

- с 1938 по 1958 год - кафедра военных оптических приборов;
- с 1958 по 1967 год - кафедра специальных оптических приборов;
- с 1967 по 1992 год - кафедра оптико-электронных приборов;
- с 1992 года - кафедра оптико-электронных приборов и систем.

Кафедру возглавляли:

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

История кафедры началась в 1937-38 годах с организации в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) кафедры военных оптических приборов. Первым заведующим кафедрой был К.Е. Солодилов, до этого возглавлявший Центральное конструкторское бюро (ЦКБ) Всесоюзного объединения оптико-механической

промышленности (ВООМП). Преподавателями кафедры стали сотрудники этого ЦКБ - М.А. Резунов, М.Я. Кругер, С.Т. Цуккерман, В.А. Егоров, Б.М. Кулежнов.

В годы Великой Отечественной войны кафедра была эвакуирована в Черепаново, где обязанности заведующего кафедрой выполнял профессор А.И. Захарьевский. Преподавателями кафедры по состоянию на 01.04.1945 г были профессор Чулановский, доцент Кругер, ст. преподаватель Гриневич, ассистенты Дедюлин и Погарев. После возвращения в Ленинград кафедрой в 1945-46 годах по совместительству заведовал начальник конструкторского бюро (КБ) Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ГОИ) М.А. Резунов.

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

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

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

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

Значительное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре выдающегося специалиста в области оптико-электронного приборостроения, члена-корреспондента Российской академии наук (РАН), Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской премии профессора М.М. Мирошникова, который, работая на кафедре ОЭП с 1969 года по 1976



год в должности профессора по совместительству, поставил и читал курс «Теория оптико-электронных приборов».

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

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

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

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

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

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

С 1975 года, после увольнения в запас, из Ленинградской военной инженерной Краснознаменной академии (ЛВИКА) им. А.Ф. Можайского на кафедру пришел работать в должности профессора С.П. Авдеев, известный

специалист в области ОЭПиС космических аппаратов. Он поставил курсы и читал лекции по учебным дисциплинам «Оптико-электронные приборы», «Оптико-электронные приборы систем управления», «Оптико-электронные приборы для научных исследований».

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

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

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

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

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

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

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

В то же время доцентом В.В. Коротаевым разработан ряд поляризационных приборов и измерительных установок. Теоретическим результатом работ явилась разработка методологии анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов. По результатам указанных работ В.В. Коротаев (в 1997 г.) и

И.А. Коняхин (в 1998г.) защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

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

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

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

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

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

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

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

- разработаны принципы построения военных оптико-механических приборов;
- разработаны принципы построения точных механизмов;

- разработаны принципы построения оптико-электронных приборов с оптической равносигнальной зоной;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения оптико-электронных приборов;
- разработаны методы описания импульсных сигналов, идентификации и классификации объектов в системах нестационарной лазерной локации;
- разработаны теория, принципы построения и методы расчета импульсных телевизионных систем наблюдения быстро движущихся объектов;
- обнаружен термоупругий эффект в кристаллическом кварце и создан новый тип приемников оптического излучения;
- разработана теория построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- разработана методология анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения измерительных систем на основе матричных фотопреобразователей;
- разработаны основы построения ОЭС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах.

Основоположники научной школы:

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

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

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

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

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

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

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

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

### **Направления научных исследований кафедры ОЭПиС в 2007-2011 годах.**

Развитие теоретических основ и принципов построения оптико-электронных приборов и систем, в том числе:

- видеоинформационных измерительных систем;
- видеоинформационных систем наблюдения;
- видеоинформационных импульсных систем наблюдения быстро движущихся объектов;
- комплексированных телевизионно-тепловизионных систем наблюдения,
- ОЭПиС обеспечения техносферной безопасности;
- ОЭПиС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах;
- автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- ОЭПиС цветового и спектрального анализа объектов;
- фотометрических систем аттестации ОЭПиС, источников и приемников оптического излучения;
- систем лазерной локации с нестационарным облучением;
- ОЭС сепарации полезных ископаемых.

По результатам исследований в этот период на кафедре были защищены 14 диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

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

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

- системотехническое проектирование,

- разработка (выбор) оптической системы,
- разработка конструкции,
- разработка (выбор) электроники и средств обработки информации,
- разработка программного обеспечения,
- сборка, юстировка, настройка и испытания.

*Заказчикам мы сдаем законченное изделие.*

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

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

**Валерий Викторович Кортаев**

**РАСЧЕТ ШУМОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

**Методические указания**

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

В.В. Кортаев

Н.Ф. Гусарова

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

