**В. В. Коротаев, В. Л. Мусяков**

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОЭП

*УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ*
*ПО КУРСОВОМУ И ДИПЛОМНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

**2006**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Кафедра оптико-электронных приборов и систем

**В. В. Коротаев, В. Л. Мусяков**

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОЭП

**Учебное пособие
по курсовому и дипломному проектированию**

Санкт-Петербург
2006

УДК 621.383

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

Пособие предназначено для студентов факультета оптико-информационных систем и технологий СПб ГУ ИТМО, обучающихся по специальности 200203 – «Оптико-электронные приборы и системы» и выполняющих курсовые работы, курсовые проекты, УИРС и ВКР, а также бакалавров и магистров по направлению 200200 – «Оптотехника», выполняющих УИРС и НИРС.

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 для желающих более глубоко ознакомиться с излагаемыми сведениями.

Список литературы - 11 наименований.

Утверждено к печати Советом факультета оптико-информационных систем и технологий, протокол №6 от 13.06.06.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

# ВВЕДЕНИЕ

Основные принципы и методика энергетического расчета оптико-электронного прибора (ОЭП) излагаются в нескольких дисциплинах, читаемых студентам специальности 200203 «Оптико-электронные приборы и системы», а также бакалаврам по направлению «Оптотехника»: «Оптические и оптико-электронные приборы и системы», «Источники и приемники излучения», «Измерительные ОЭС».

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.

# СОКРАЩЕНИЯ

ИД – излучающий диод
ИИ – источник излучения
ОЭП – оптико-электронный прибор
ОЭСИТ – оптико-электронная система измерения температуры
ПОИ – приемник оптического излучения
СД – синхронный детектор
СКЗ – среднее квадратическое значение
ФЧЭ – фоточувствительный элемент
ЧТ – черное тело

## ТЕРМИНЫ И ИХ ОБОЗНАЧЕНИЯ

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 – $A_{фч}$
Диаметр входного зрачка объектива – $D_{\text{об}}$
Диаметр выходного зрачка объектива – $D'_{\text{об}}$
Диаметр зрачка объектива – $D_{об}$
Диаметр излучающей поверхности ИИ - $D_{ист}$
Диаметр изображения излучающей поверхности ИИ - $D_{из}$
Диаметр области пространства изображений с постоянной облученностью – $D_п$
Диаметр полевой диафрагмы – $D_{\text{ПД}}$
Дистанция формирования пучка – $p_0'$
Длина волны – $\lambda$
Емкость инерционного контура – $C_{\text{к}}$
Емкость монтажа – $C_{\text{м}}$
Емкость ПОИ – $C_{\text{п}}$
Заднее фокусное расстояние объектива – $f'$
Задний апертурный угол объектива – $\sigma'_{A'}$
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 – $S^{\text{I}}_{\text{инт},\,v}$
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 – $\tau_А$
Коэффициент пропускания оптической системы коллиматора – $\tau_К$
Коэффициент пропускания оптической системы приёмного устройства – $\tau_п$
Коэффициент теплового излучения – $\varepsilon_\lambda(\lambda,T)$
Относительное спектральное распределение потока излучения паспортного ИИ – $\varphi^I_{e.\lambda}(\lambda)$
Коэффициент усиления фотоумножителя по току – $M_{ФУ}$
Круговая частота модуляции – $\omega_м$
Максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости ЧТ – $M^o_{e.\lambda.max}$
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 – $U_{ш.I.ПОИ.\Delta f}$
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 – $D^I_v$
Обнаружительная способность ПОИ к излучению паспортного ИИ в энергетических величинах – $D^I_e$
Общий ток ПОИ – $I_{общ}$
Относительная спектральная плотность энергетической светимости ЧТ – $m^o_{e.\lambda}(\lambda)$
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 – $\varphi^I_{e.\lambda}(\lambda)$
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 – $A_{из}$
Пощадь излучающей поверхности ЧТ – $A_{ЧТ}$

Площадь полевой диафрагмы – $А_{ПД}$
Порог чувствительности ПОИ в единичной полосе частот – $Ф_{п1}$
Порог чувствительности ПОИ в заданной полосе частот – $\Phi_п$
Порог чувствительности ПОИ к излучению паспортного ИИ в заданной полосе частот в световых величинах – $\Phi^I_{п.v}$
Порог чувствительности ПОИ к излучению паспортного ИИ в заданной полосе частот энергетических (Вт) величинах – $\Phi^I_{п.e}$
Постоянная времени инерционного контура – $\tau_к$
Постоянная составляющая потока излучения – $Ф_=$
Постоянная составляющая тока – $\bar{I}$
Постоянная Стефана-Больцмана – σ
Поток излучения от фоновых засветок от окружающих объектов – $Ф_{фона}$
Поток излучения, падающий на ПОИ - $Ф_{ПОИ}$
Поток излучения – $Ф_e$
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 – $Ф_v$
Сила света или излучения ИД – $I_{ИД}$
СКЗ шумовой погрешности измерения фототока – $\sigma_{ш.i}$
СКЗ шумовой составляющей погрешности измерения температуры – $\sigma_т$
Сопротивление нагрузки – $R_н$
Сопротивление ПОИ – $R_{ПОИ}$
Спектральная плотность мощности (дисперсия) белого шума – $N$
Спектральная плотность облученности – $E_{e.\lambda}$
Спектральная плотность потока излучения – $Ф_{e.\lambda}$
Спектральная плотность энергетической светимости – $M_{e\lambda}$
Спектральная плотность энергетической светимости черного тела – $M^o_{e.\lambda}$
Спектральная плотность энергетической яркости – $L_{e.\lambda}$
Спектральное распределение потока излучения – $Ф_{e.\lambda}(\lambda)$
Спектральный коэффициент пропускания – $\tau(\lambda)$
Спектральный коэффициент теплового излучения объекта – $\varepsilon(\lambda)$
Среднее значение потока излучения – $Ф_{с=}$
Средняя квадратическая погрешность измерения амплитуды сигнала – $\sigma_ш$
Суммарный ток шума ПОИ с учетом дробового шума фототока – $I_{ш.ПОИ.\Delta f эфф.\Sigma}$
Суммарное напряжение шума ПОИ с учетом дробового шума фототока – $U_{ш.ПОИ.\Delta f эфф.\Sigma}$
Темновой ток – $I_т$
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 - $I_с$
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 $T$ – $M_e^{\,o}$
Энергетическая яркость источника – $L_e$
Эффективная шумовая полоса частот - $\Delta f_{эфф}$
Эффективная шумовая полоса частот, при которой производилась аттестация ПОИ – $\Delta f_{эфф\ пасп}$
Яркость излучающего диода – $L_{ИД}$

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

Рассматривается два типа оптических схем.

В первом случае источник излучения (ИИ) удалён на значительное расстояние (рис. 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 приемник опорного сигнала (ПОИ ОС).

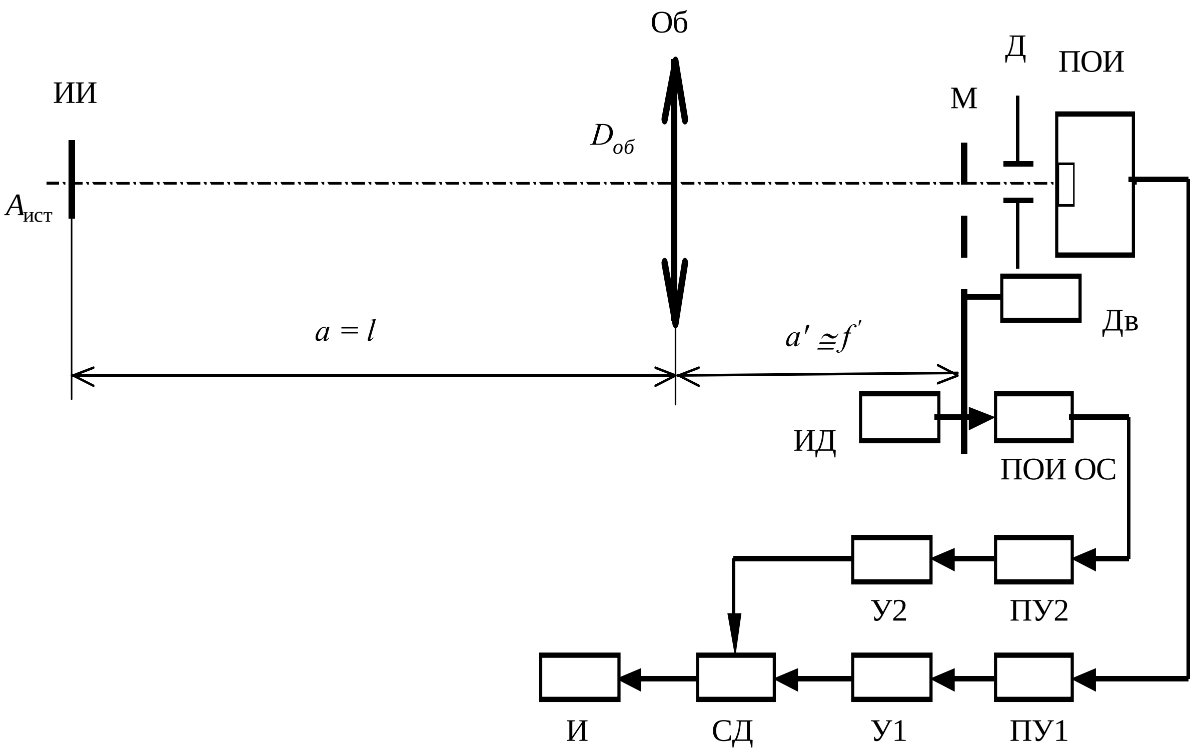


*Рис. 1. Структурная схема пирометра (фотометра):*
*ИИ – источник излучения; Об – объектив; М – модулятор;*
*Дв – двигатель; Д – диафрагма; ПОИ – приемник оптического излучения;*
*ИД – излучающий диод; ПОИ ОС – приемник опорного сигнала;*
*ПУ – предварительные усилители; У – усилители мощности;*
*СД – 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. 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.

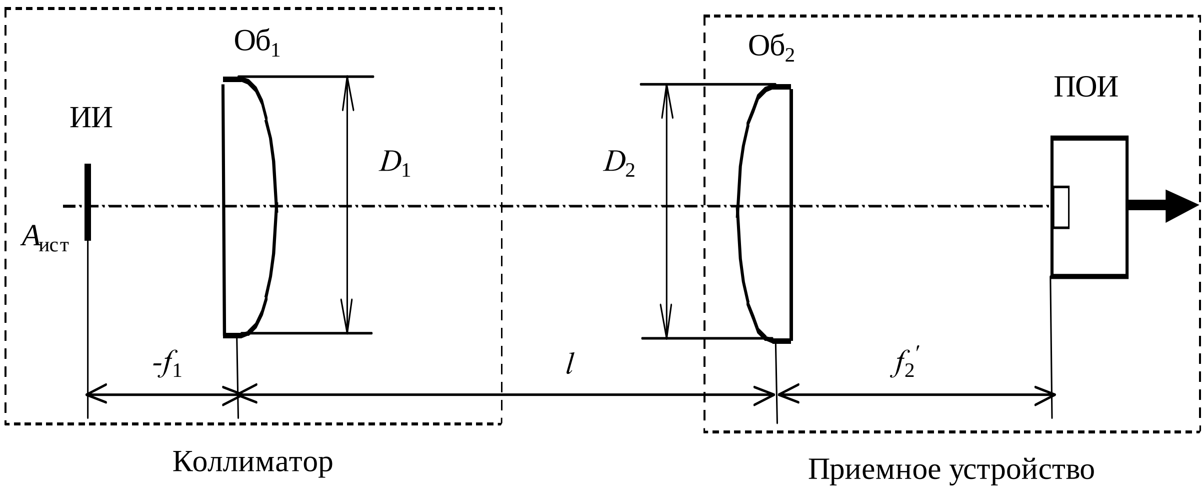


*Рис. 2. Схема коллиматора и приемного устройства:*
*ИИ - источник излучения; Об$_1$ , Об$_2$ - объективы коллиматора и приемного устройства; ПОИ - приемник оптического излучения; Аист - площадь излучающей поверхности ИИ; $-f_1$ , $f_2'$ - переднее и заднее фокусные расстояния объективов коллиматора и приемного устройства; $l$ - расстояние между коллиматором и приемным устройством ($l >> -f_1$ ; $l >> f_2'$); $D_1$ , $D_2$ - 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 табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1.

| № вар. | ИИ | | | ПОИ | Оптическая схема по рисунку |
|---|---|---|---|---|---|
| | ЧТ с Т, К | | ИД | | |
| | 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 |

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 (продолжение).

| № вар. | Параметры оптической системы | | | | Дистанция $l$, м | | Диаметр $D_{ист}$ или площадь $A_{ист}$ 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$^2$ |
| 1 | - | - | 90 | 40 | 900 | 200 | 200 мм |
| 2 | 150 | 60 | 100 | 50 | 6 | - | 3 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 110 | 50 | 800 | 300 | 250 мм |
| 2 | 200 | 80 | 120 | 60 | 7 | - | 3 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 130 | 60 | 700 | 400 | 400 мм |
| 2 | 300 | 100 | 140 | 50 | 8 | - | 3 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 150 | 70 | 600 | 500 | 150 мм |
| 2 | 100 | 50 | 50 | 20 | 9 | - | 12 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 60 | 20 | 5000 | 600 | 1000 мм |
| 2 | 150 | 70 | 70 | 30 | 10 | - | 3 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 80 | 40 | 6000 | 700 | 200 мм |
| 2 | 200 | 100 | 90 | 40 | 12 | - | 0,3×0,3 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 100 | 40 | 7000 | 800 | 300 мм |
| 2 | 300 | 150 | 110 | 50 | 14 | - | 12 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 120 | 50 | 8000 | 900 | 300 мм |
| 2 | 100 | 40 | 130 | 50 | 16 | - | 12 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 140 | 50 | 9000 | 1000 | 200 мм |
| 2 | 150 | 80 | 150 | 60 | 20 | - | 12 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 100 | 60 | 10000 | 1100 | 100 мм |
| 2 | 200 | 120 | 170 | 60 | 24 | - | 0,3×0,3 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 180 | 60 | 11000 | 1200 | 50 мм |
| 2 | 300 | 170 | 60 | 30 | 30 | - | 3 мм$^2$ |
| 1 | - | - | 100 | 30 | 12000 | 1300 | 100 мм |

Таблица 2.

| № вар. | Диапазон температур, °С. | ПОИ | $D_{вх}$, 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 $P = D_{ПД}/s'$, где $D_{ПД}$ – 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 2 (продолжение).

| № вар. | $t_{атм}$, °C | Влажность $f$, % | Метеорологическая дальность видимости, м | Примечания |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 70 | 200 | Материал оптической |
| 2 | 10 | 80 | 50 | системы выбрать: |
| 3 | 20 | 90 | 400 | 1) для t от 100 до 600 °C - |
| 4 | 30 | 70 | 50 | флюорит ($CaF_2$); |
| 5 | 0 | 80 | 1000 | спектральный диапазон |
| 6 | 10 | 90 | 50 | пропускания - |
| 7 | 20 | 70 | 500 | $\Delta\lambda$ = 0,4...9,0 мкм; |
| 8 | 30 | 80 | 50 | при толщине d = 2 мм |
| 9 | 0 | 90 | 4000 | $\tau$ = 0,92; |
| 10 | 10 | 70 | 50 | |
| 11 | 20 | 80 | 1500 | 2) для t от 400 до 2000 °C - |
| 12 | 30 | 90 | 50 | кварцевое стекло КИ; |
| 13 | 0 | 70 | 1500 | спектральный диапазон |
| 14 | 10 | 80 | 50 | пропускания - |
| 15 | 20 | 90 | 2000 | $\Delta\lambda$ = 0,4...3,5 мкм; |
| 16 | 30 | 70 | 50 | |
| 17 | 0 | 80 | 2500 | 3) для t от 900 до 3500 °C - |
| 18 | 10 | 90 | 50 | оптическое стекло К8; |
| 19 | 20 | 70 | 1500 | спектральный диапазон |
| 20 | 30 | 80 | 50 | пропускания - |
| 21 | 0 | 90 | 2000 | $\Delta\lambda$ = 0,4...2,5 мкм. |
| 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 $f_{мод}$ и эффективную шумовую полосу частот электронного тракта приемного устройства $\Delta f_{эфф}$ считать равными: для тепловых ПОИ $f_{мод}$ = 12 Гц и $\Delta f_{эфф}$ = = 2 Гц, для ПОИ на основе фотоэффекта $f_{мод}$ = 1000 Гц и $\Delta f_{эфф}$ = 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.

# ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

## *1. Расчет потока излучения, падающего на фоточувствительный элемент приемника оптического излучения*

### 1.1. Оптическая схема коллиматора (прожектора)

На рис. 3. показана структура пучка лучей коллиматора (прожектора), выполненного в виде объектива Об$_1$ и ИИ, расположенного в его фокальной плоскости [10].

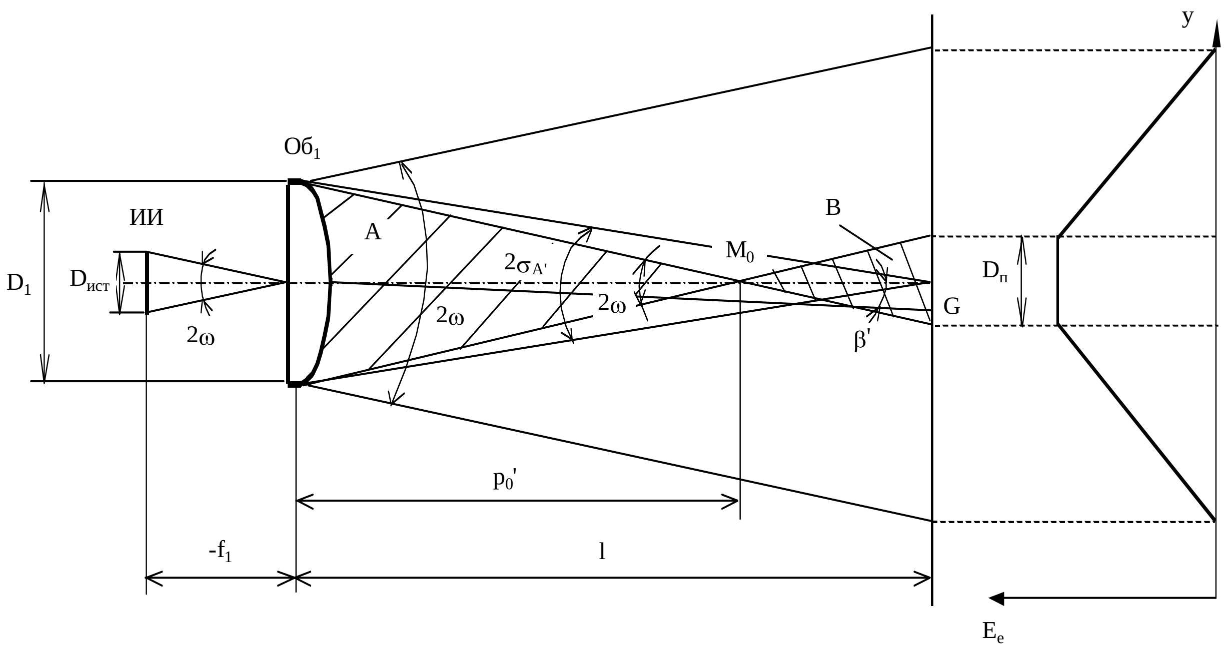


*Рис. 3. Структура пучка лучей коллиматора (прожектора):*

*ИИ - источник излучения; Об$_1$ - объектив коллиматора (прожектора); $l$ - расстояние от выходного зрачка объектива до рассматриваемого сечения пучка; $D_1$ - диаметр выходного зрачка объектива; ПОИ - приемник оптического излучения; $D_{ист}$ - диаметр излучающей поверхности ИИ; $-f_1$ - переднее фокусное расстояние объектива; $p_0'$ - дистанция формирования пучка; $M_0$ - точка формирования пучка; $D_n$ - 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, аберрации оптической системы отсутствуют, дисперсия объектива не влияет на световой пучок. Пусть диаметр излучающей поверхности равен $D_{ист}$, фокусное расстояние объектива коллиматора (прожектора) – ($-f_1$), диаметр выходного зрачка объектива – $D_1$. Тогда угловое поле объектива и расходимость пучка лучей коллиматора (прожектора) при $D_{ист} << (-f_1)$:

$$2\cdot\omega = 2\cdot\mathrm{arctg}\left(\frac{D_{ист}}{-2\cdot f_1}\right) \approx \frac{D_{ист}}{-f_1}\ , \qquad (1.1)$$

а дистанция формирования пучка лучей коллиматора (прожектора):

$$p_0' = \frac{D_1}{2\cdot\mathrm{tg}\,\omega} \approx \frac{D_1}{D_{ист}}\cdot(-f_1)\ . \qquad (1.2)$$

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]:

$$E_{e0} = \pi\cdot L_e\cdot\tau_К\cdot\tau_А\cdot\sin^2\sigma'_{А'}\ , \qquad (1.3)$$

где $L_e$ – энергетическая яркость ИИ; $\tau_К$ , $\tau_А$ – коэффициенты пропускания оптической системы коллиматора (прожектора) и атмосферы; $\sigma'_{А'}$ – 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:

при $l > p'_0$
$$\sigma'_А = \mathrm{arctg}\frac{D_1}{2\cdot l}\ , \qquad (1.4)$$

при $l \le p'_0$
$$\sigma'_А = \omega = \mathrm{arctg}\frac{D_{ист}}{-2\cdot f_1} \approx \frac{D_{ист}}{-2\cdot f_1}\ . \qquad (1.5)$$

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

$$E_{e\beta'} = E_{e0} \cdot \cos^4 \beta' , \qquad (1.6)$$

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 (1.3) и (1.5) следует, что в зоне $A$:

$$E_{e0} \approx \pi \cdot \tau_{\text{К}} \cdot \tau_{\text{А}} \cdot L_e \cdot \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} \right)^2 . \qquad (1.7)$$

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 $B$:

$$E_{e0} \approx \pi \cdot \tau_{\text{К}} \cdot \tau_{\text{А}} \cdot L_e \cdot \left( \frac{D_1}{2 \cdot l} \right)^2 . \qquad (1.8)$$

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 $B$:

$$D_{\text{ПА}} = D_1 - \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-f_1} \right) \cdot l , \qquad D_{\text{ПВ}} = \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-f_1} \right) \cdot l - D_1 . \qquad (1.9)$$

Определим поток излучения, падающий на ПОИ в оптической системе, изображенной на рис. 2.

Рассмотрим случай, когда входной зрачок объектива приемного устройства находится в заштрихованной зоне $A$ в пределах пятна равномерной облученности (рис. 3).

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

$$\Phi_e = \pi \cdot \tau_{\text{К}} \cdot \tau_{\text{А}} \cdot \tau_{\text{П}} \cdot L_e \cdot \left( \frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} \right)^2 \cdot A_2 = \tau \cdot L_e \cdot \frac{A_{\text{ист}} \cdot A_2}{f_1^2}, \qquad (1.10)$$

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. 3).

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

$$\Phi_e = \pi \cdot \tau_{\text{К}} \cdot \tau_{\text{А}} \cdot \tau_{\text{П}} \cdot L_e \cdot \left( \frac{D_1}{2 \cdot l} \right)^2 \cdot A_2 = \tau \cdot L_e \cdot \frac{A_1 \cdot A_2}{l^2}, \qquad (1.11)$$

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]:

$$L_e = \frac{M_e^{\circ}}{\pi} = \frac{\Phi_e}{\pi \cdot A_{чт}} \ , \qquad (1.12)$$

где $M_e^{\circ}$ – энергетическая светимость ЧТ при данной температуре $T$; $\Phi_e$ – поток излучения ЧТ; $A_{чт}$ – 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 $L_{ИД}$ равна нулю [2, 9]. Тогда яркость ИД в пределах угла $\Theta$ :

$$L_{ИД} = \frac{M_{ИД}}{\pi \cdot \sin^2 \Theta} = \frac{P_{ИД}}{\pi \cdot A_{ИД} \cdot \sin^2 \Theta}; \qquad L_{ИД} = \frac{I_{ИД}}{A_{ИД}}, \qquad (1.13)$$

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

### 1.2. Оптическая схема пирометра (фотометра)

Рассмотрим особенности расчета потока излучения, падающего на фоточувствительный элемент ПОИ, для оптической схемы пирометра или фотометра (рис. 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:

$$E_{e_\lambda} = \tau(\lambda) \pi L_{e_\lambda}(\lambda) \sin^2 \sigma'_{A'} \ , \qquad (1.14)$$

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:

$$\sin\sigma_{A'}' \approx \sigma'_{A'} = tg\sigma'_{A'} = \frac{D'_{об}}{2a'} \cong \frac{D_{об}}{2a'} \ , \qquad (1.15)$$

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 $l >> f'$, где $f'$ – фокусное расстояние объектива, то $a' \approx f'$.

Для ламбертовского излучателя (черного тела) по следствию из закона Ламберта (1.12) получаем из (1.15) и (1.16), что спектральная плотность облученности в точке изображения:

$$E_{e_\lambda} \approx \tau(\lambda)\varepsilon(\lambda)(\lambda)M^o_{e\lambda}(\lambda,T)\frac{D^2_{об}}{4(a')^2} = \tau(\lambda)\varepsilon(\lambda)M^o_{e\lambda}(\lambda,T)\frac{A_{об}}{\pi(a')^2} \ , \qquad (1.16)$$

где $\varepsilon(\lambda)$ – спектральный коэффициент теплового излучения объекта; $M^o_{e\lambda}$ – 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:

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{ПД}}{a'} < \frac{D_{ист}}{a} = \frac{D_{ист}}{l} \ , \qquad (1.17)$$

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 равнояркого объекта (ЧТ) в пределах линейного поля пирометра в пространстве изображений из (1.16):

$$\Phi_{e\lambda} = E_{e\lambda}(\lambda)A_{ПД} = M^o_{e\lambda}(\lambda,T)\varepsilon(\lambda)\tau(\lambda)\frac{A_{об}A_{ПД}}{\pi(a')^2}, \qquad (1.18)$$

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

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

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{ПД}}{a'} > \frac{D_{ист}}{a} = \frac{D_{ист}}{l} \ , \qquad (1.19)$$

то диаметр изображения источника:

$$D_{из} = D_{ист}\frac{a'}{a}, \qquad (1.20)$$

а соотношение площадей источника и его изображения:

$$A_{из} = A_{ист}\left(\frac{a'}{a}\right)^2. \qquad (1.21)$$

В этом случае спектральная плотность потока излучения, создающего изображение равнояркого по площади объекта из (1.16) и (1.21):

$$\Phi_{e\lambda} = E_{e\lambda}(\lambda)A_{из} = \tau(\lambda)L_{e\lambda}(\lambda,T)\frac{A_{ист}A_{об}}{a^2} \ . \qquad (1.22)$$

Для серого ламбертовского излучателя по следствию из закона Ламберта (1.12) формула (1.22) примет вид:

$$\Phi_{e\lambda} = \varepsilon(\lambda)\tau(\lambda)M^{o}_{e\lambda}(\lambda,T)\frac{A_{ист}A_{об}}{\pi a^2} \ . \qquad (1.23)$$

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

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

$$D_{из} = D_{ист}\frac{a'}{a} \ . \qquad (1.24)$$

Соотношение площадей ИИ и его изображения имеет вид:

$$A_{из} = A_{ист}\left(\frac{a'}{a}\right)^2 , \qquad (1.25)$$

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 $D_{\text{ПД}}$ больше диаметра изображения ИИ $D_{\text{из}}$ ($D_{\text{ПД}} >> D_{\text{из}}$), то есть угловое поле прибора больше углового размера ИИ;

2) диаметр полевой диафрагмы $D_{\text{ПД}}$ меньше диаметра изображения ИИ $D_{\text{из}}$ ($D_{\text{ПД}} << D_{\text{из}}$), то есть угловое поле прибора меньше углового размера ИИ.

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

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

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{\text{пд}}}{a'} > \frac{D_{\text{ист}}}{a} = \frac{D_{\text{ист}}}{l}, \qquad (1.26)$$

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

Из (1.20) и (1.21) следует, что спектральная плотность потока излучения от равнояркого ИИ:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = E_{e\lambda}(\lambda)\, A_{\text{из}} = \tau(\lambda)\, L_{e\lambda}(\lambda)\, \frac{A_{\text{об}} A_{\text{из}}}{(a')^2}, \qquad (1.27)$$

Из (1.21) следует, что

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda)\, L_{e\lambda}(\lambda)\, \frac{A_{\text{об}} A_{\text{ист}}}{a^2} = \tau(\lambda)\, L_{e\lambda}(\lambda)\, \frac{A_{\text{ист}} A_{\text{об}}}{l^2}. \qquad (1.28)$$

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

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda)\, I_{e\lambda}(\lambda)\, \frac{A_{\text{об}}}{l^2}. \qquad (1.29)$$

Если излучатель ламбертовский, то из (1.28):

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda)\, M_{e\lambda}(\lambda)\, \frac{A_{\text{об}} A_{\text{ист}}}{\pi \cdot a^2} = \tau(\lambda)\, M_{e\lambda}(\lambda)\, \frac{A_{\text{ист}} A_{\text{об}}}{\pi \cdot l^2}, \qquad (1.30)$$

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

Для тепловых ИИ:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \varepsilon(\lambda)\ \tau(\lambda)\ M^{o}_{e\lambda}(\lambda)\ \frac{A_{об}A_{ист}}{\pi \cdot a^2} = \varepsilon(\lambda)\ \tau(\lambda)\ M^{o}_{e\lambda}(\lambda)\ \frac{A_{ист}A_{об}}{\pi \cdot l^2}\ , \qquad (1.31)$$

где ε(λ) – спектральный коэффициент теплового излучения объекта; $M^{o}_{e\lambda}(\lambda)$ - спектральная плотность энергетической светимости черного тела при температуре объекта.

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

В этом случае угловое поле прибора 2ω меньше углового размера ИИ:

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{ПД}}{a'} < \frac{D_{ист}}{a} = \frac{D_{ист}}{l}\ . \qquad (1.32)$$

Из (1.20) и (1.23) следует, что спектральная плотность потока излучения от равнояркого ИИ:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = E_{e\lambda}(\lambda)\ A_{ПД} = \tau(\lambda)\ L_{e\lambda}(\lambda)\ \frac{A_{об}A_{ПД}}{(a')^2}\ . \qquad (1.33)$$

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

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda)\ \frac{A_{об}A_{пд}}{(f')^2}\ . \qquad (1.34)$$

Если излучатель ламбертовский, то:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \tau(\lambda)\ M_{e\lambda}(\lambda)\ \frac{A_{об}A_{пд}}{\pi \cdot (f')^2}\ . \qquad (1.35)$$

Для тепловых ИИ:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \varepsilon_{\lambda}(\lambda)\ \tau_{\lambda}(\lambda)\ M^{o}_{e\lambda}(\lambda)\ \frac{A_{об}A_{пд}}{\pi \cdot (f')^2}\ . \qquad (1.36)$$

## *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 $m^{\mathrm{I}}_{e,\lambda}(\lambda)$ 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 $m^{\mathrm{II}}_{e,\lambda}(\lambda)$ 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 $\kappa^{\mathrm{I}}$ и $\kappa^{\mathrm{II}}$ излучения паспортного (I) и заданного (II) ИИ заданным ПОИ, а также коэффициенты использования $\kappa^{\mathrm{I}}_{\text{г}}$ и $\kappa^{\mathrm{II}}_{\text{г}}$ излучения паспортного и заданного ИИ глазом (к.п.д. глаза), если параметры ПОИ заданы в световых величинах [3]:

$$\kappa^{\mathrm{I}} = \frac{\int_0^{\infty} m^{\mathrm{I}}_{e,\lambda}(\lambda)\cdot\tau(\lambda)\cdot S(\lambda)\cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} m^{\mathrm{I}}_{e,\lambda}(\lambda)\cdot\tau(\lambda)\cdot d\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^{k} m^{\mathrm{I}}_{e,\lambda_i}\cdot S_{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^{k} m^{\mathrm{I}}_{e,\lambda_i}}\;; \qquad (2.1)$$

$$\kappa^{\mathrm{II}} = \frac{\int_0^{\infty} m^{\mathrm{II}}_{e,\lambda}(\lambda)\cdot\tau(\lambda)\cdot S(\lambda)\cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} m^{\mathrm{II}}_{e,\lambda}(\lambda)\cdot\tau(\lambda)\cdot d\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^{k} m^{\mathrm{II}}_{e,\lambda_i}\cdot S_{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^{k} m^{\mathrm{II}}_{e,\lambda_i}}\;; \qquad (2.2)$$

$$\kappa^{\mathrm{I}}_{\text{г}} = \frac{\int_{0.38}^{0.78} m^{\mathrm{I}}_{e,\lambda}(\lambda)\cdot\tau(\lambda)\cdot V(\lambda)\cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} m^{\mathrm{I}}_{e,\lambda}(\lambda)\cdot\tau(\lambda)\cdot d\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^{k} m^{\mathrm{I}}_{e,\lambda_i}\cdot V_{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^{k} m^{\mathrm{I}}_{e,\lambda_i}}\;; \qquad (2.3)$$

$$\kappa_{г}^{II}=\frac{\int\limits_{0.38}^{0.78} m_{e,\lambda}^{II}(\lambda)\cdot\tau(\lambda)\cdot V(\lambda)\cdot d\lambda}{\int\limits_{0}^{\infty} m_{e,\lambda}^{II}(\lambda)\cdot\tau(\lambda)\cdot d\lambda}=\frac{\sum\limits_{i=1}^{k} m_{e,\lambda_i}^{II}\cdot V_{\lambda_i}}{\sum\limits_{i=1}^{k} m_{e,\lambda_i}^{II}}\ . \qquad (2.4)$$

Шаг интегрирования принять не менее 0,1мкм. Ход расчёта отразить в табл. 3.

Таблица 3

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

| $\lambda_i$, мкм | $m^{I}_{e\lambda i}$ | $m^{II}_{e\lambda i}$ | $S_{\lambda i}$ | $V_{\lambda i}$ | $m^{I}_{e\lambda i}\ S_{\lambda i}$ | $m^{II}_{e\lambda i}\ S_{\lambda i}$ | $m^{I}_{e\lambda i}\ V_{\lambda i}$ | $m^{II}_{e\lambda i}\ V_{\lambda I}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\lambda_1$<br>$\lambda_2$<br>...<br>$\lambda_k$ | | | | | | | | |
| | $\sum\limits_{i=1}^{k}$ | $\sum\limits_{i=1}^{k}$ | | | $\sum\limits_{i=1}^{k}$ | $\sum\limits_{i=1}^{k}$ | $\sum\limits_{i=1}^{k}$ | $\sum\limits_{i=1}^{k}$ |

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]:

$$S_{инт,e}^{II}=S_{инт,v}^{I}\cdot 683\cdot\kappa_{г}^{I}\cdot\frac{\kappa^{II}}{\kappa^{I}} \qquad (2.5)$$

или

$$S_{инт,e}^{II}=S_{инт,e}^{I}\cdot\frac{\kappa^{II}}{\kappa^{I}}, \qquad (2.6)$$

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

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

$$Ф_e=\frac{Ф_v}{683\cdot\kappa_{г}^{II}}. \qquad (2.7)$$

### 3. Расчет переменной составляющей сигнала и величины постоянной составляющей тока на выходе приемника оптического излучения

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

$$\Phi_{ПОИ} = \Phi_{=} + \Phi_{\sim} \cdot \sin \omega t, \qquad (3.1)$$

где $\Phi_{=}$ – постоянная составляющая потока излучения; $\Phi_{\sim}$ – амплитуда переменной составляющей потока излучения (рис. 4).

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

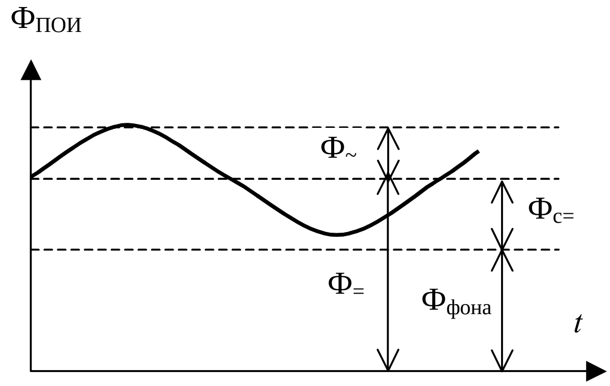


*Рис. 4. Составляющие потока излучения на входе ПОИ*

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

$$\Phi_{c=} = \Phi_{\sim} = \Phi_{ПОИ}/2 \ . \qquad (3.2)$$

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

$$I_{ф} = \Phi_{ПОИ} \cdot S_I \ , \qquad (3.3)$$

где $S_I$ – токовая чувствительность ПОИ.

Фототок $I_ф$ складывается с темновым током ПОИ $I_т$, а обе эти составляющие образуют общий ток ПОИ (рис. 5):

$$I_{общ} = I_т + I_ф\ . \qquad (3.4)$$

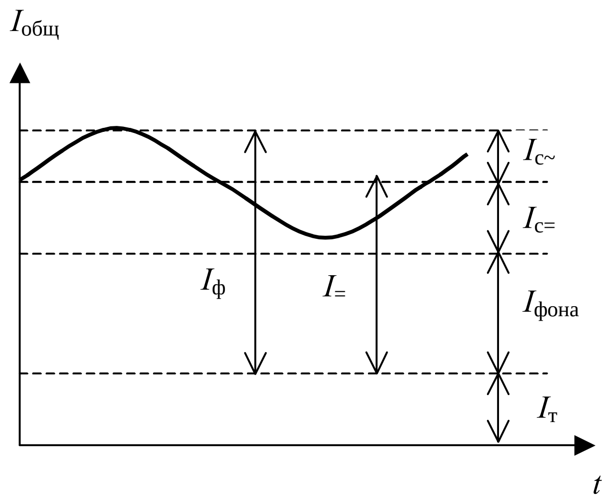


*Рис. 5. К расчету тока на выходе ПОИ*

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

$$I_{общ}(t) = I_т + Ф_=\cdot S_I + Ф_\sim\cdot S_I\cdot\sin\,\omega_м t\ . \qquad (3.5)$$

Темновой ток $I_т$ и постоянная составляющая фототока $I_= = Ф_=\cdot S_I$ образуют постоянную составляющую тока:

$$\overline{I} = I_т + I_= = I_т + Ф_=\cdot S_I\ . \qquad (3.6)$$

Амплитуда переменных составляющих фототока и напряжения фотосигнала:

$$I_\sim = Ф_\sim\cdot S_I\ ; \qquad U_\sim = Ф_\sim\cdot S_u = Ф_\sim\, S_I\cdot R_н\ , \qquad (3.7)$$

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

Амплитуда переменной составляющей сигнала (напряжения или тока) определяется только излучением ИИ, а величина постоянной составляющей общего тока $\overline{I}$ 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:

$$I_{\text{с}}= \int\limits_{\lambda=0}^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot S_{\lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda\,, \qquad (3.8)$$

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.

## 4. Расчёт 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) флуктуации общего тока ПОИ в заданной полосе частот $I_{\text{ш}}$ или СКЗ флуктуации напряжения $U_{\text{ш}}$ 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 $\Phi_{\text{п}}$ в заданной полосе частот; порог чувствительности в единичной полосе частот $\Phi_{\text{п1}}$; удельный порог чувствительности $\Phi_{\text{п}}^{*}$; обнаружительную способность $D$; удельную обнаружительную способность $D^{*}$.

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

$$U_{Ш\ ПОИ\Delta f\ эфф} = \Phi_{п} \cdot S_{U\ инт} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{эфф}}{\Delta f_{эфф\ пасп}}} = \frac{1}{D} \cdot S_{U\ инт} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{эфф}}{\Delta f_{эфф\ пасп}}} =$$

$$= \Phi_{п}^{*} \cdot S_{U\ инт} \cdot \sqrt{A_{фч} \cdot \Delta f_{эфф}} = \frac{1}{D^{*}} \cdot S_{U\ инт} \cdot \sqrt{A_{фч} \cdot \Delta f_{эфф}} = \qquad (4.1)$$

$$= \Phi_{п1} \cdot S_{U\ инт} \cdot \sqrt{\Delta f_{эфф}}\,,$$

$$I_{Ш\ ПОИ\Delta f\ эфф} = \Phi_п \cdot S_{I,\,инт} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{эфф}}{\Delta f_{эфф\ пасп}}} = \frac{1}{D} \cdot S_{I,\,инт} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{эфф}}{\Delta f_{эфф\ пасп}}} =$$
$$= \Phi_п^* \cdot S_{I,\,инт} \cdot \sqrt{A_{фч} \cdot \Delta f_{эфф}} = \frac{1}{D^*} \cdot S_{I,\,инт} \cdot \sqrt{A_{фч} \cdot \Delta f_{эфф}} = \qquad (4.2)$$
$$= \Phi_{п1} \cdot S_{I,\,инт} \cdot \sqrt{\Delta f_{эфф}}\ ,$$

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

При использовании выражений (4.1) и (4.2) следует подставлять значения интегральной вольтовой $S_{U\ инт}$ и токовой $S_{I\ инт}$ 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 шумы.

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]:

$$I_{ш\ I\ ПОИ\ \Delta f} = \sqrt{\frac{A \cdot \bar{I}^2}{f} \cdot \Delta f}\ , \qquad U_{ш\ I\ ПОИ\ \Delta f} = \sqrt{\frac{A \cdot \bar{I}^2 \cdot R_{ПОИ}^2}{f} \cdot \Delta f}\ , \qquad (4.3)$$

где $A$ - постоянная, зависящая от материала ПОИ ($A = 3 \cdot 10^{-12} \ldots 3 \cdot 10^{-7}$; для сернисто-свинцовых фоторезисторов $A \approx 10^{-11}$); $\bar{I}$ – среднее значение тока ПОИ, определяемое формулой (27-3.6); $f$ – среднее значение частоты в полосе частот; $R_{ПОИ}$ – сопротивление ПОИ.

Теоретический расчёт генерационно-рекомбинационного шума не представляется возможным, так как не известны такие параметры, как время жизни носителей $\tau_н$, 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 $\Delta f_{эфф}$ можно рассчитать по формуле Найквиста [3]:

$$I_{ш.т.ПОИ.\Delta f.эфф} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T_{ПОИ}}{R_{ПОИ}} \cdot \Delta f_{эфф}} \,,$$

$$U_{ш.т.ПОИ.\Delta f.эфф} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T_{ПОИ} \cdot R_{ПОИ} \cdot \Delta f_{эфф}} \,, \qquad (4.4)$$

где $k$ – постоянная Больцмана ($k$ = 1,38·10$^{-23}$ Дж·К$^{-1}$); $T_{ПОИ}$ – температура ПОИ; $R_{ПОИ}$ – 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 $\Delta f_{эфф}$:

$$I_{ш\,др\,ПОИ\,\Delta f\,эфф} = \sqrt{2 \cdot e \cdot \bar{I} \cdot \Delta f_{эфф}} \,,$$

$$U_{ш\,др\,ПОИ\,\Delta f\,эфф} = \sqrt{2 \cdot e \cdot \bar{I} \cdot R_н^2 \cdot \Delta f_{эфф}} \,, \qquad (4.5)$$

где $e$ – заряд электрона ($e$ = 1,6·10$^{-19}$ 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:

$$I_{ш\,др\,ФУ\,\Delta f\,эфф} = \sqrt{2 \cdot e \cdot \bar{I}_{ФК} \cdot M_{ФУ}^2 \cdot (1 + B) \cdot \Delta f_{эфф}} \,, \qquad (4.6)$$

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

## 5. *Расчёт порога чувствительности и обнаружительной способности приемника оптического излучения по отношению к 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, $Вт^{-1}$) равны [3]:

$$\Phi^{\text{II}}_{\text{п}e} = \Phi^{\text{I}}_{\text{п}v} \frac{\kappa^{\text{I}}}{683 \cdot \kappa^{\text{I}}_{\text{г}} \cdot \kappa^{\text{II}}}\ , \qquad \Phi^{\text{II}}_{\text{п}e} = \Phi^{\text{I}}_{\text{п}e} \frac{\kappa^{\text{I}}}{\kappa^{\text{II}}}\ , \tag{5.1}$$

$$D_{\text{e}}^{\text{II}} = D_{\text{v}}^{\text{I}}\, 683\, \kappa_{\text{г}}^{\text{I}} (\kappa^{\text{II}}/\kappa^{\text{I}})\ ; \qquad D_{\text{e}}^{\text{II}} = D_{\text{e}}^{\text{I}} (\kappa^{\text{II}}/\kappa^{\text{I}})\ ,$$

где $\Phi^{\text{I}}_{\text{п}v}$ и $\Phi^{\text{I}}_{\text{п}e}$ – порог чувствительности ПОИ к излучению паспортного ИИ в полосе частот, при которой производилась аттестация ПОИ, в световых (лм) и энергетических (Вт) величинах соответственно; $D^{I}_{v}$ и $D^{\text{I}}_{e}$ – обнаружительная способность ПОИ к излучению паспортного ИИ в полосе частот, при которой производилась аттестация ПОИ, в световых ($лм^{-1}$) и энергетических ($Вт^{-1}$) величинах соответственно. Аналогично выглядят формулы для расчёта порога чувствительности в единичной полосе частот $\Phi^{\text{II}}_{\text{п}1e}$ ($Вт{\cdot}Гц^{-1/2}$), удельного порога чувствительности $\Phi^{*\text{II}}_{\text{п}e}$ ($Вт{\cdot}Гц^{-1/2}{\cdot}см^{-1}$), а также удельной обнаружительной способности $D^{*\text{II}}_{e}$ ($Вт{\cdot}Гц^{-1/2}{\cdot}см^{-1}$).

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

$$\Phi^{\text{II}}_{\text{п}e\ \Delta f'\text{эфф}} = \Phi^{\text{II}}_{\text{п}e}\, (\Delta f'_{\text{эфф}} / \Delta f'_{\text{эфф пасп}})^{1/2} = (1/D^{\text{II}}_{\text{e}})\, (\Delta f'_{\text{эфф}} / \Delta f'_{\text{эфф пасп}})^{1/2}\ . \tag{5.2}$$

## *6. Расчёт 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 рис. 6.

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

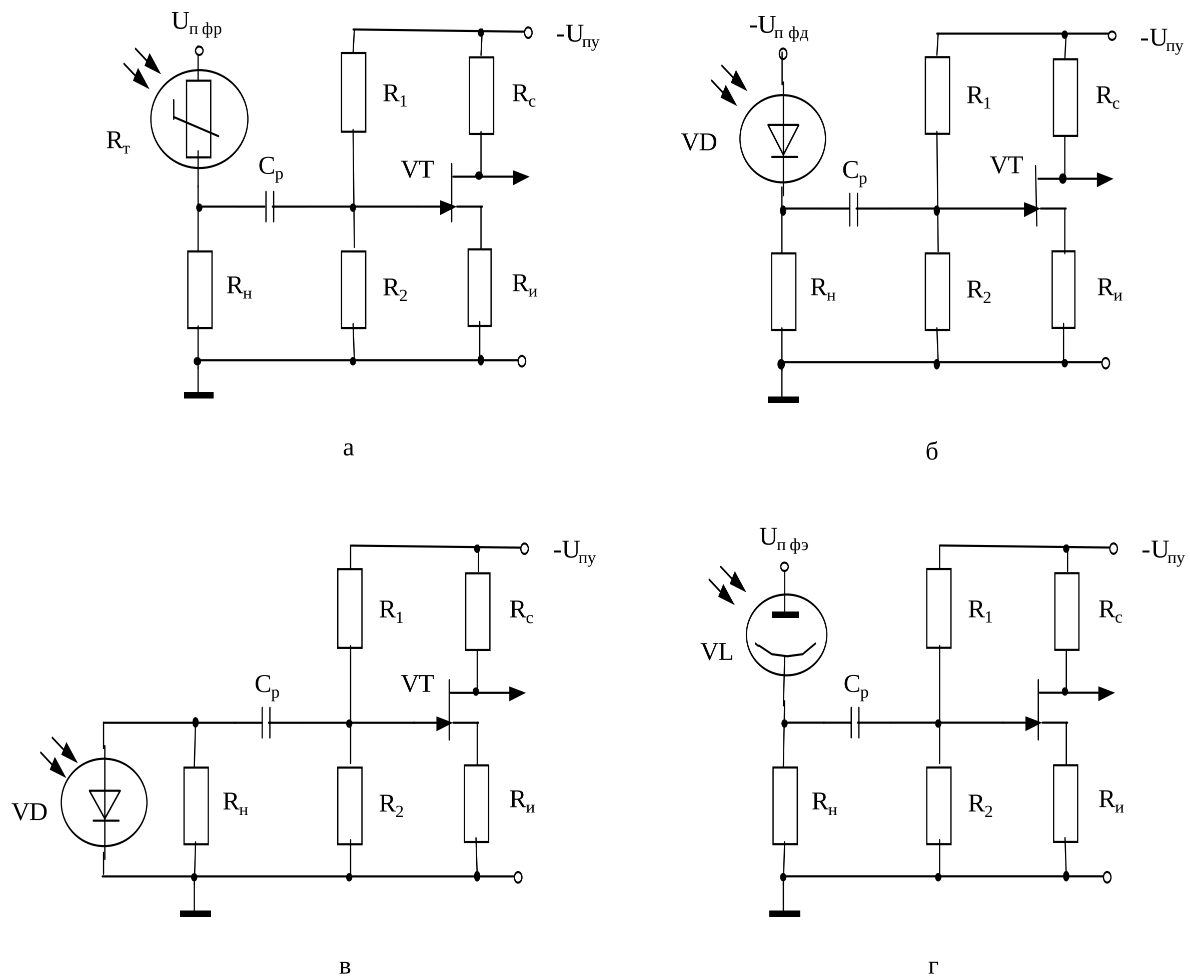


*Рис. 6. Схемы включения ПОИ и предварительный усилитель на полевом транзисторе:*
*а - фоторезистор; б - фотодиод в фотодиодном режиме;*
*в - фотодиод в фотогальваническом режиме; г - фотоэлемент*

При выборе сопротивления нагрузки следует учитывать также постоянную времени $T_к$ инерционного контура, образованного сопротивлением нагрузки $R_н$ и ёмкостью инерционного контура $C_к$ , образованного ёмкостью ПОИ $C_п$ , ёмкостью монтажа $C_м$ и входной ёмкостью предварительного усилителя $C_в$:

$$T_г = R_у C_г = R_у(C_g + C_g + C_d) \quad . \tag{6.1}$$

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

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

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

$$R_н \le 0{,}1/(C_к f_м)\ , \quad \tau_{ПОИ} \le 0{,}1/f_м\ . \qquad (6.2)$$

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. Дробовый шум фототока фотодиодов и электровакуумных фотоэлементов:

$$I_{ш.др.ПОИ.\Delta f.эфф.I} = \sqrt{2eI_{=}\Delta f_{эфф}} = \sqrt{2e\Phi_{=}S^{II}_{I.инт}\Delta f_{эфф}}\ ; \qquad (6.3)$$

$$U_{ш.др.ПОИ.\Delta f.эфф.I} = \sqrt{2eI_{=}R_н^2\Delta f_{эфф}} = \sqrt{2e\Phi_{=}S^{II}_{I.инт}R_н^2\Delta f_{эфф}}\ , \qquad (6.4)$$

где $e$ – заряд электрона ($e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл); $R_н$ – сопротивление нагрузки ПОИ. Здесь следует использовать величину чувствительности ПОИ $S^{II}_{I,\ инт}$ к падающему на него в данном ОЭП излучению заданного ИИ.

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

$$I_{ш.ПОИ.\Delta f.эфф.\Sigma} = \sqrt{I^2_{ш.ПОИ.\Delta f.эфф} + I^2_{ш.др.ПОИ.\Delta f.эфф.I}}\ ; \qquad (6.5)$$

$$U_{ш.ПОИ.\Delta f.эфф.\Sigma} = \sqrt{U^2_{ш.ПОИ.\Delta f.эфф} + U^2_{ш.др.ПОИ.\Delta f.эфф.I}}\ . \qquad (6.6)$$

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

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

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

$$I_{ш\ т\ Rн\ \Delta f\ эфф} = \sqrt{\frac{4kT_н}{R_н}\Delta f_{эфф}}\ ;\ U_{ш\ т\ Rн\ \Delta f\ эфф} = \sqrt{4kT_н R_н \Delta f_{эфф}}\ , \qquad (6.7)$$

где $k$ - постоянная Больцмана ($k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$); $T_н$ – температура резистора нагрузки; $R_н$ – сопротивление резистора нагрузки.

Величина шума активного элемента предварительного усилителя $I_{\text{ш ПУ } \Delta\text{f эфф}}$ 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:

$$R_{\text{ш}} = 2/(3S_{\text{ПТ}}) , \qquad (6.8)$$

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

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

$$I_{\text{ш ПТ } \Delta\text{f эфф}} = \sqrt{\frac{4kT_{ПТ}R_{ш}}{R_{н}^{2}}\Delta f_{эфф}} \;; \qquad U_{\text{ш ПТ } \Delta\text{f эфф}} = \sqrt{4kT_{ПТ}R_{ш}\Delta f_{эфф}} \;, \qquad (6.9)$$

где $T_{\text{ПТ}}$ – 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:

$$I_{\text{ш } \Sigma \, \Delta\text{f эфф}} = \sqrt{I^2_{\text{ш ПОИ } \Delta\text{f эфф } \Sigma} + I^2_{\text{ш т Rн } \Delta\text{f эфф}} + I^2_{\text{ш ПУ } \Delta\text{f эфф}}} \;; \qquad (6.10)$$

$$U_{\text{ш } \Sigma \, \Delta\text{f эфф}} = \sqrt{U^2_{\text{ш ПОИ } \Delta\text{f эфф } \Sigma} + U^2_{\text{ш т Rн } \Delta\text{f эфф}} + U^2_{\text{ш ПУ } \Delta\text{f эфф}}} \;. \qquad (6.11)$$

Пользуясь рассчитанными ранее значениями амплитуд переменных составляющих потока излучения $\Phi_{\sim}$ , фототока $I_{\sim}$ и напряжения фотосигнала $U_{\sim}$ , а также порога чувствительности ПОИ $\Phi^{\text{II}}_{\text{пе } \Delta\text{f эфф}}$ по отношению к излучению заданного ИИ в заданной полосе частот электронного тракта и тока шума $I_{\text{ш } \Sigma \, \Delta\text{f эфф}}$ или напряжения шума $U_{\text{ш } \Sigma \, \Delta\text{f эфф}}$ , можно рассчитать отношения сигнал/шум без учета ($\mu_{\text{пои}}$) и с учетом ($\mu_{\Sigma}$) влияния шумов входной цепи и предварительного усилителя:

$$\mu_{ПОИ} = \frac{\Phi_{\sim}}{\Phi^{II}_{\text{пе } \Delta\text{f эфф}}} \;; \qquad \mu_{\Sigma} = \frac{I_{\sim}}{I_{\text{ш } \Sigma \, \Delta\text{f эфф}}} = \frac{U_{\sim}}{U_{\text{ш } \Sigma \, \Delta\text{f эфф}}} \;. \qquad (6.12)$$

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

$$N = \frac{\bar{I}^2_{\text{ш } \Sigma \, \Delta\text{f эфф}}}{\Delta f_{'эфф}} \;. \qquad (6.13)$$

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

$$\sigma_{ш} = \sqrt{\frac{N_0}{2e_0}}\ , \tag{6.14}$$

где $e_0$ – удельная энергия сигнала за время измерения $T_и$;

$$e_0 = \int_0^{\infty} f^2(t)dt\ ; \tag{6.15}$$

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

$$e_0 = T_и / 2\ ;\ \ \sigma_{ш} = \sqrt{\frac{N_0}{T_и}}\ . \tag{6.16}$$

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

$$e_0 = T_и\ ;\ \ \sigma_{ш} = \sqrt{\frac{N_0}{2T_и}}\ . \tag{6.17}$$

## 7. Расчет шумовой погрешности оптико-электронных систем измерения температуры

Ток сигнала на выходе ПОИ в оптико-электронной системе измерения температуры (ОЭСИТ) в соответствии с (1.18):

$$I_с = \int_{\lambda=0}^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda)\cdot S_{\lambda}(\lambda)\cdot d\lambda\ =$$

$$= M^{о}_{e\lambda\max}\cdot\frac{A_{об}A_{пд}}{\pi\cdot(a')^2}\cdot S_{\lambda\max}\cdot\int_{\lambda=0}^{\infty} m^{o}_{e\lambda}(\lambda,T)\cdot\varepsilon(\lambda)\cdot\tau(\lambda)\cdot s_{\lambda}(\lambda)d\lambda\,, \tag{7.1}$$

где $S_\lambda(\lambda)$, $s_\lambda(\lambda)$ и $S_{\lambda\max}$ – абсолютная спектральная характеристика чувствительности, относительная спектральная характеристика чувствительности и максимальное значение спектральной чувствительности соответственно; $S_\lambda(\lambda) = S_{\lambda\max}\ s_\lambda(\lambda)$; $m^{о}_{e\lambda}(\lambda)$, $M^{о}_{e\lambda\ \max}$ – 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 (7.1) следует, что особенностью ОЭСИТ, то есть пирометров, тепловизоров и т. д., является существенно нелинейная зависимость величины сигнала $I_с$ от измеряемого параметра – температуры $T$.

Для определения шумовой погрешности измерения температуры продифференцируем формулу (7.1) по температуре:

$$\frac{\partial I_с}{\partial T} = \frac{A_{об} A_{ПД}}{\pi \cdot (a')^2} \cdot S_{\lambda \max} \cdot \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{\partial M^{о}_{e\lambda}(\lambda,T)}{\partial T} \cdot \varepsilon_\lambda(\lambda) \cdot \tau_\lambda(\lambda) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda \,, \qquad (7.2)$$

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

$$M^{o}_{e\lambda}(\lambda,T) = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) , \qquad (7.3)$$

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

При такой аппроксимации:

$$\frac{\partial M^{o}_{e\lambda}(\lambda,T)}{\partial T} = \frac{C_2 M^{o}_{e\lambda}(\lambda T)}{\lambda T^2} \,. \qquad (7.4)$$

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

$$I_с = C'_\lambda \cdot T^5 \cdot \frac{A_{об} A_{пд}}{\pi \cdot (a')^2} \cdot S_{\lambda \max} \cdot \int_{\lambda=0}^{\infty} m_{e\lambda}(\lambda,T) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda \,. \qquad (7.5)$$

Максимальное значение монохроматической чувствительности ПОИ:

$$S_{\lambda \max} = \frac{S^{I}_{инт}}{\kappa^{I}_{ПОИ}} \,, \qquad (7.6)$$

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

$$\kappa^{I}_{ПОИ} = \frac{\int_0^\infty \varphi^I{}_{e\lambda}(\lambda) s_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi^I{}_{e\lambda}(\lambda) d\lambda} \;; \qquad (7.7)$$

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

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

$$I_с = C'_\lambda \cdot T^5 \cdot \varepsilon \cdot \tau \cdot \frac{A_{об} A_{пд}}{\pi \cdot (a')^2} \cdot S_{\lambda \max} \cdot \int_{\lambda=0}^{\infty} m_{e\lambda}(\lambda, T) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda \,. \qquad (7.8)$$

Изменение сигнала на выходе ПОИ, обусловленное малым изменением температуры:

$$\Delta I_c = \left(\frac{\partial I_c}{\partial T}\right) \Delta T =$$

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

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

, (7.9)

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

$$\Delta I_c = \left\{ \varepsilon \tau \left[ C_2 C'_\lambda T^3 \right] \frac{A_{об} A_{ПД}}{\pi (a')^2} S_{\lambda.\max} \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{m^0_{e.\lambda}(\lambda, T)}{\lambda} s_\lambda(\lambda) d\lambda \right\} \Delta T \;. \qquad (7.10)$$

.

Произведение в формуле (7.10):

$C_2 C'_\lambda$ = 1,44·10$^4$ [мкм·К]·1,315·10$^{-15}$ [Вт/(см$^2$·мкм·К$^5$] =
= 18,936·10$^{-12}$ [Вт/см$^2$·К$^4$] = 0,835·(4σ) , (7.11)

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

Интеграл в выражении (7.10)

$$(\Delta \ln \lambda)_{эф} = \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{m^o_{e\lambda}(\lambda) s_\lambda(\lambda)}{\lambda} d\lambda = \int_0^\infty m^o_{e\lambda}(\lambda) s_\lambda(\lambda) d(\ln \lambda) \qquad (7.12)$$

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

$$\xi_{ЧТ} = 0{,}835\left(\Delta \ln \lambda\right)_{эф} \tag{7.13}$$

называется **коэффициентом использования контрастного черного излучателя**.

Следовательно, выражение (7.10) можно представить в виде:

$$\xi_{АЧТ} = \left\{ \varepsilon\tau\left[0{,}835\left(4\sigma T^3\right)\right]\frac{A_{об}A_{ПД}}{\pi\left(a'\right)^2} S_{\lambda\max}\left(\Delta\ln\lambda\right)_{эф}\right\}\Delta T\ . \tag{7.14}$$

На основании изложенного СКЗ шумовой составляющей погрешности измерения температуры:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{ш.i}}{K_n K_f \dfrac{A_{об}A_{ПД}}{\pi(a')^2}\left[C_2 C_\lambda^{'} T^3\right] S_{\lambda.\max}\int\limits_{\lambda=0}^{\infty}\dfrac{m^0_{e.\lambda}(\lambda)\varepsilon(\lambda)\tau(\lambda)s_\lambda(\lambda)}{\lambda}d\lambda}\ , \tag{7.15}$$

или для серого излучателя (ε(λ) = ε = const) и неселективной оптики (τ(λ) = = τ = const):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{шi}}{\left[0{,}835\left(4\sigma T^3\right)\right]\varepsilon\tau\dfrac{A_{об}A_{ПД}}{\pi\left(a'\right)^2}S_{\lambda\max}\int\limits_{\lambda=0}^{\infty}\dfrac{m^o_{e\lambda}(\lambda)s_\lambda(\lambda)}{\lambda}d\lambda}, \tag{7.16}$$

а с учетом введенных обозначений (35-7.12):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{шi}}{\left[0{,}82\left(4\sigma T^3\right)\right]\varepsilon\tau\dfrac{A_{об}A_{ПД}}{\pi\left(a'\right)^2}S_{\lambda\max}\left(\Delta\ln\lambda\right)_{эф}}, \tag{7.17}$$

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 излучения : Уч. пособие. – СПб. : СпбГУ ИТМО, 2004.
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. Методические указания к курсовой работе по курсу "Источники и приемники излучения". - Л. : ЛИТМО, 1991. - 26 с.
5. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М. : Сов. радио, 1978.
6. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л. : Машиностроение, 1977.
7. Теория оптических систем. Учебник для вузов / Б.Н. Бегунов, Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. – М. : Машиностроение, 1981.
8. Эпштейн М.И. Измерения оптического излучения в электронике. – М. : Энергатомиздат, 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 для вузов. – М. : Логос, 2004.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 1.** ЗНАЧЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЛАНКА y = f(x)

| *x* | *y* | *x* | *y* | *x* | *y* | *x* | *y* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,10 | $4{,}70 \cdot 10^{-15}$ | 0,66 | 0,615 | 1,29 | 0,867 | 1,94 | 0,434 |
| 0,15 | $7{,}91 \cdot 10^{-9}$ | 0,67 | 0,638 | 1,30 | 0,860 | 1,96 | 0,424 |
| 0,20 | $7{,}37 \cdot 10^{-6}$ | 0,68 | 0,661 | 1,31 | 0,852 | 1,98 | 0,415 |
| 0,21 | $1{,}88 \cdot 10^{-5}$ | 0,69 | 0,683 | 1,32 | 0,845 | 2,00 | 0,405 |
| 0,22 | $4{,}37 \cdot 10^{-5}$ | 0,70 | 0,704 | 1,33 | 0,838 | 2,05 | 0,383 |
| 0,23 | $9{,}31 \cdot 10^{-5}$ | 0,71 | 0,725 | 1,34 | 0,830 | 2,10 | 0,362 |
| 0,24 | $1{,}85 \cdot 10^{-4}$ | 0,72 | 0,745 | 1,35 | 0,820 | 2,15 | 0,341 |
| 0,25 | $3{,}45 \cdot 10^{-4}$ | 0,73 | 0,764 | 1,36 | 0,815 | 2,20 | 0,323 |
| 0,26 | $6{,}10 \cdot 10^{-4}$ | 0,74 | 0,783 | 1,37 | 0,808 | 2,25 | 0,305 |
| 0,27 | $1{,}02 \cdot 10^{-3}$ | 0,75 | 0,801 | 1,38 | 0,800 | 2,30 | 0,289 |
| 0,28 | $1{,}62 \cdot 10^{-3}$ | 0,76 | 0,817 | 1,39 | 0,793 | 2,35 | 0,273 |
| 0,29 | $2{,}54 \cdot 10^{-3}$ | 0,77 | 0,834 | 1,40 | 0,785 | 2,40 | 0,258 |
| 0,30 | $3{,}80 \cdot 10^{-3}$ | 0,78 | 0,849 | 1,41 | 0,778 | 2,45 | 0,245 |
| 0,31 | $5{,}50 \cdot 10^{-3}$ | 0,79 | 0,862 | 1,42 | 0,770 | 2,50 | 0,232 |
| 0,32 | $7{,}74 \cdot 10^{-3}$ | 0,80 | 0,877 | 1,43 | 0,763 | 2,55 | 0,220 |
| 0,33 | 0,0106 | 0,81 | 0,890 | 1,44 | 0,755 | 2,60 | 0,208 |
| 0,34 | 0,0142 | 0,82 | 0,903 | 1,45 | 0,748 | 2,65 | 0,198 |
| 0,35 | 0,0187 | 0,83 | 0,914 | 1,46 | 0,740 | 2,70 | 0,187 |
| 0,36 | 0,0241 | 0,84 | 0,925 | 1,47 | 0,733 | 2,75 | 0,178 |
| 0,37 | 0,0305 | 0,85 | 0,934 | 1,48 | 0,725 | 2,80 | 0,169 |
| 0,38 | 0,0380 | 0,86 | 0,943 | 1,49 | 0,718 | 2,85 | 0,161 |
| 0,39 | 0,0467 | 0,87 | 0,952 | 1,50 | 0,710 | 2,90 | 0,153 |
| 0,40 | 0,0565 | 0,88 | 0,959 | 1,51 | 0,703 | 3,00 | 0,138 |
| 0,41 | 0,0665 | 0,89 | 0,966 | 1,52 | 0,696 | 3,10 | 0,126 |
| 0,42 | 0,0800 | 0,90 | 0,972 | 1,53 | 0,688 | 3,20 | 0,114 |
| 0,43 | 0,0936 | 0,92 | 0,983 | 1,54 | 0,681 | 3,30 | 0,104 |
| 0,44 | 0,108 | 0,94 | 0,990 | 1,55 | 0,674 | 3,40 | 0,0947 |
| 0,45 | 0,124 | 0,96 | 0,996 | 1,56 | 0,667 | 3,50 | 0,0866 |
| 0,46 | 0, 142 | 0,98 | 0,999 | 1,57 | 0,659 | 3,60 | 0,0797 |
| 0,47 | 0,160 | 1,00 | 1,000 | 1,58 | 0,652 | 3,70 | 0,0726 |
| 0,48 | 0,180 | 1,02 | 0,999 | 1,59 | 0,645 | 3,80 | 0,0667 |
| 0,49 | 0,200 | 1,04 | 0,996 | 1,60 | 0,638 | 3,90 | 0,0614 |
| 0,50 | 0,222 | 1,06 | 0,992 | 1,62 | 0,624 | 4,00 | 0,0565 |
| 0,51 | 0,244 | 1,08 | 0,986 | 1,64 | 0,610 | 4,50 | 0,0383 |
| 0,52 | 0,267 | 1,10 | 0,979 | 1,66 | 0,597 | 5,00 | 0,0268 |
| 0,53 | 0,291 | 1,12 | 0,970 | 1,68 | 0,580 | 6,00 | 0,0142 |
| 0,54 | 0,315 | 1,14 | 0,961 | 1,70 | 0,571 | 7,00 | $8{,}20 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,55 | 0,339 | 1,16 | 0,951 | 1,72 | 0,558 | 8,00 | $5{,}05 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,56 | 0,365 | 1,18 | 0,940 | 1,74 | 0,546 | 9,00 | $3{,}27 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,57 | 0,390 | 1,20 | 0,928 | 1,76 | 0,534 | 10,0 | $2{,}20 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,58 | 0,415 | 1,21 | 0,921 | 1,78 | 0,522 | 20,0 | $1{,}6 \cdot 10^{-4}$ |
| 0,59 | 0,441 | 1,22 | 0,915 | 1,80 | 0,510 | 30,0 | $3{,}2 \cdot 10^{-5}$ |
| 0,60 | 0,466 | 1,23 | 0,908 | 1,82 | 0,498 | 40,0 | $1{,}0 \cdot 10^{-5}$ |
| 0,61 | 0,492 | 1,24 | 0,902 | 1,84 | 0,487 | 50,0 | $4{,}3 \cdot 10^{-6}$ |
| 0,62 | 0,517 | 1,25 | 0,895 | 1,86 | 0,476 | $\infty$ | 0 |
| 0,63 | 0,542 | 1,26 | 0,888 | 1,88 | 0,465 | - | - |
| 0,64 | 0,567 | 1,27 | 0,881 | 1,90 | 0,455 | - | - |
| 0,65 | 0,615 | 1,28 | 0,874 | 1,92 | 0,444 | - | - |

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2.** ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ СВЕТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДНЕВНОГО ЗРЕНИЯ

| λ, нм | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
|---|---|---|---|---|---|
| **0** | - | 0,0004 | 0,323 | 0,631 | 0,0041 |
| **10** | - | 0012 | 503 | 503 | 0021 |
| **20** | - | 0040 | 710 | 381 | 00105 |
| **30** | - | 0116 | 862 | 265 | 00052 |
| **40** | - | 023 | 954 | 175 | 00025 |
| **50** | - | 038 | 995 | 107 | 00012 |
| **60** | - | 060 | 995 | 061 | 00006 |
| **70** | - | 091 | 952 | 032 | 00003 |
| **80** | 0,000039 | 139 | 870 | 017 | 000015 |
| **90** | 00012 | 208 | 757 | 0082 | - |

История кафедры оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС) началась в 1936 году с организации в ЛИТМО кафедры военных оптических приборов. Первым заведующим кафедрой стал профессор К.Е. Солодилов.

Кафедра существовала под следующими названиями:

- с 1936 по 1958 год - кафедра военных оптических приборов (в годы Великой Отечественной войны кафедра была эвакуирована и временно объединена с кафедрой оптико-механических 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 1936 по 1942 год - профессор К.Е. Солодилов;
- 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 года по настоящее время - заслуженный деятель науки РФ, профессор Э.Д. Панков.

Трудом нескольких поколений сотрудников кафедры ОЭПиС в результате большой научно-исследовательской и научно-методической работы сформировалась современная система подготовки дипломированных специалистов по специальности 200203 - "Оптико-электронные приборы и системы" по специализациям:

200203.01 – оптико-электронные информационно-измерительные и следящие приборы и системы;

200203.02 – оптико-электронные методы и средства экологического мониторинга;

200203.27 – оптико-электронные приборы и системы обработки видеоинфрмации.

Сегодня кафедра ОЭПиС - это 7 учебных лабораторий, компьютерный класс с выходом в Internet и, прежде всего, высококвалифицированный преподавательский коллектив, в котором 6 профессоров, докторов наук и 7 доцентов, кандидатов наук.

По результатам научных работ сотрудниками кафедры ОЭПиС выпущено в свет 15 монографий, 25 учебников и учебных пособий. На кафедре подготовлено 14 докторов наук, а также более 115 кандидатов наук. На разработки кафедры получены авторские свидетельства СССР и патенты Российской Федерации на более чем 200 изобретений. За все время существования кафедры подготовлено более 3000 инженеров.