

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.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| СОКРАЩЕНИЯ..... | 5 |
| ТЕРМИНЫ И ИХ ОБОЗНАЧЕНИЯ..... | 6 |
| ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ..... | 10 |
| ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА..... | 17 |
| 1. РАСЧЕТ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ, ПАДАЮЩЕГО НА ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ПРИЕМНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ..... | |
| 1.1. Оптическая схема коллиматора (прожектора)..... | 17 |
| 1.2. Оптическая схема пирометра (фотометра)..... | 21 |
| 2. РАСЧЕТ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ К ИЗЛУЧЕНИЮ ИСТОЧНИКА | |
| 3. РАСЧЕТ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛА И ВЕЛИЧИНЫ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА НА ВЫХОДЕ ПРИЕМНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ..... | |
| 4. РАСЧЁТ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА ШУМА ПРИЕМНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАННОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТА | |
| 5. РАСЧЁТ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ОБНАРУЖИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПРИЕМНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ОТНОШЕНИЮ К ИЗЛУЧЕНИЮ ЗАДАННОГО ИСТОЧНИКА..... | |
| 6. РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ШУМОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА И ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ В ЗАДАННОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТА | |
| 7. РАСЧЕТ ШУМОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ..... | |
| ЛИТЕРАТУРА | 41 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ЗНАЧЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЛАНКА $Y = F(X)$ | |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ СВЕТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДНЕВНОГО ЗРЕНИЯ | |

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 – Φ_\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_b
Геометрическая фоточувствительная площадь ПОИ – A_{ϕ^4}
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_{ucm}
Диаметр изображения излучающей поверхности ИИ - D_{uz}
Диаметр области пространства изображений с постоянной облученностью – D_n
Диаметр полевой диафрагмы – $D_{\text{ПД}}$,
Дистанция формирования пучка – p_0
Длина волны – λ
Емкость инерционного контура – C_k
Емкость монтажа – C_m
Емкость ПОИ – C_p
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 – $S_{\text{инт}, v}^l$
Интегральная чувствительность ПОИ к излучению паспортного ИИ в энергетических величинах – $S_{\text{инт}, e}^l$
Коэффициент использования излучения заданного ИИ глазом (к.п.д. глаза) – K_g^{II}
Коэффициент использования излучения заданного ИИ заданным ПОИ – K^{II}
Коэффициент использования излучения паспортного ИИ глазом (к.п.д. глаза) – K_g^I
Коэффициент использования излучения паспортного ИИ заданным ПОИ – K^I
Коэффициент использования контрастного черного излучателя – $\xi_{\text{чт}}$

Коэффициент пропускания атмосферы – τ_A
 Коэффициент пропускания оптической системы коллиматора – τ_K
 Коэффициент пропускания оптической системы приёмного устройства
 – τ_p
 Коэффициент теплового излучения – $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$
 Относительное спектральное распределение потока излучения паспортного ИИ – $\varphi_{e,\lambda}^I(\lambda)$
 Коэффициент усиления фотоумножителя по току – $M_{\Phi U}$
 Круговая частота модуляции – ω_m
 Максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости ЧТ – $M_{e,\lambda,max}^0$
 Максимальное значение спектральной чувствительности – $S_{\lambda,max}$
 Мощность излучения ИД – P_{ID}
 Напряжение дробового шума ПОИ в заданной полосе частот – $U_{\text{ш.др.ПОИ.дф}}$
 Напряжение дробового шума фототока ПОИ – $U_{\text{ш.др.ПОИ.}\Delta f\text{.эфф.1}}$
 Напряжение теплового шума ПОИ в заданной полосе частот – $U_{\text{ш.т.ПОИ.дф}}$
 Напряжение токового шума ПОИ в заданной полосе частот – $U_{\text{ш.т.ПОИ.дф}}$
 Напряжение шума ПОИ – $U_{\text{ш}}$
 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 – $m_{e,\lambda}^0(\lambda)$
 Относительная спектральная характеристика чувствительности – $s_\lambda(\lambda)$
 Относительная или логарифмическая спектральная ширина полосы пропускания ПОИ – $(\Delta \ln \lambda)_{\text{ш}}$
 Относительное спектральное распределение потока излучения паспортного ИИ – $\varphi_{e,\lambda}^I(\lambda)$
 Отношение сигнал/шум - μ
 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_{ID}
 Площадь излучающей поверхности ИИ – A_{uclm}
 Площадь изображения излучающей поверхности ИИ – A_{uz}
 Площадь излучающей поверхности ЧТ – A_{cht}

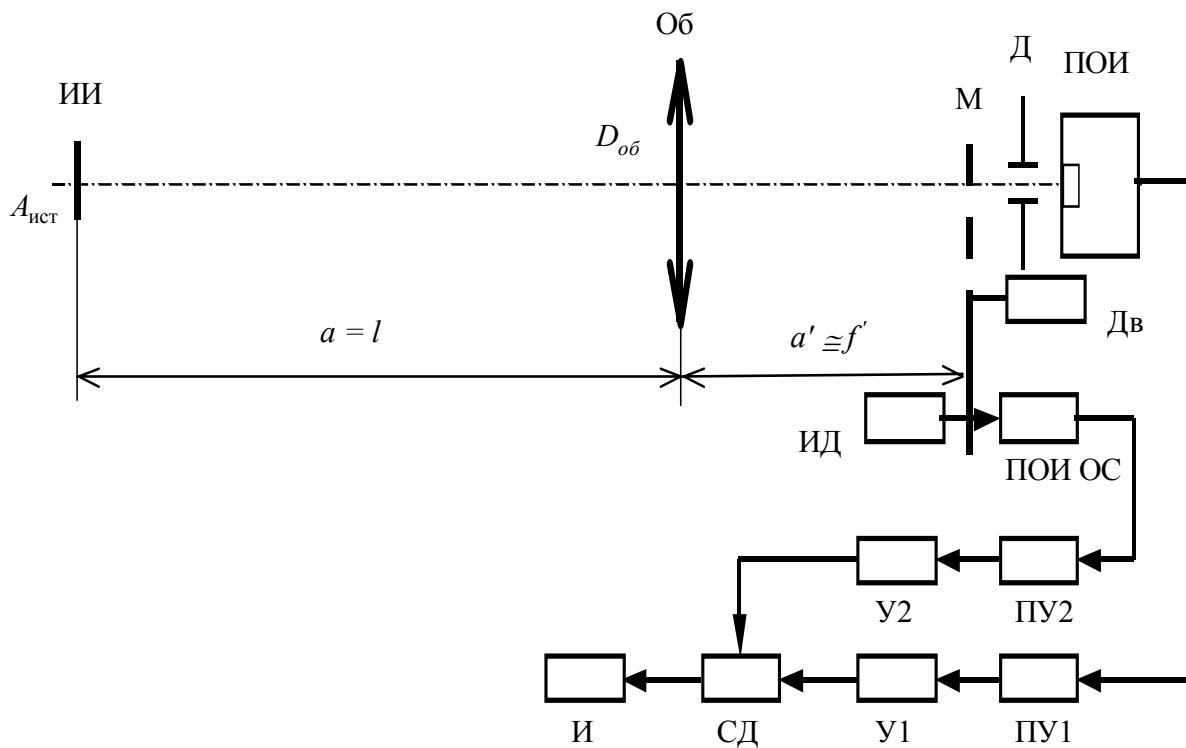
Площадь полевой диафрагмы – $A_{\text{ПД}}$
 Порог чувствительности ПОИ в единичной полосе частот – $\Phi_{\text{п1}}$
 Порог чувствительности ПОИ в заданной полосе частот – $\Phi_{\text{п}}$
 Порог чувствительности ПОИ к излучению паспортного ИИ в заданной полосе частот в световых величинах – $\Phi_{\text{п.в}}^I$
 Порог чувствительности ПОИ к излучению паспортного ИИ в заданной полосе частот энергетических (Вт) величинах – $\Phi_{\text{п.е}}^I$
 Постоянная времени инерционного контура – τ_k
 Постоянная составляющая потока излучения – Φ_{c}
 Постоянная составляющая тока – \bar{I}
 Постоянная Стефана-Больцмана – σ
 Поток излучения от фоновых засветок от окружающих объектов – $\Phi_{\text{фона}}$
 Поток излучения, падающий на ПОИ - $\Phi_{\text{ПОИ}}$
 Поток излучения – Φ_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 – $M_{\text{ид}}$
 Световой поток – Φ_v
 Сила света или излучения ИД – $I_{\text{ид}}$
 СКЗ шумовой погрешности измерения фототока – $\sigma_{\text{ш.и}}$
 СКЗ шумовой составляющей погрешности измерения температуры – σ_t
 Сопротивление нагрузки – R_h
 Сопротивление ПОИ – $R_{\text{ПОИ}}$
 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 – $\Phi_{\text{c=}}$
 Средняя квадратическая погрешность измерения амплитуды сигнала – $\sigma_{\text{ш}}$
 Суммарный ток шума ПОИ с учетом дробового шума фототока – $I_{\text{ш.ПОИ.ДФФ.Σ}}$
 Суммарное напряжение шума ПОИ с учетом дробового шума фототока – $U_{\text{ш.ПОИ.ДФФ.Σ}}$
 Темновой ток – I_t
 Температура объекта – T
 Ток дробового шума ПОИ в заданной полосе частот – $I_{\text{ш.др.ПОИ.ДФ}}$

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

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

Рассматриваются 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). Для изменения положения модулятора (М) используется двигатель (Дв).



*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 (проектора) и приёмного устройства (рис. 2). Коллиматор (проектор) 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.

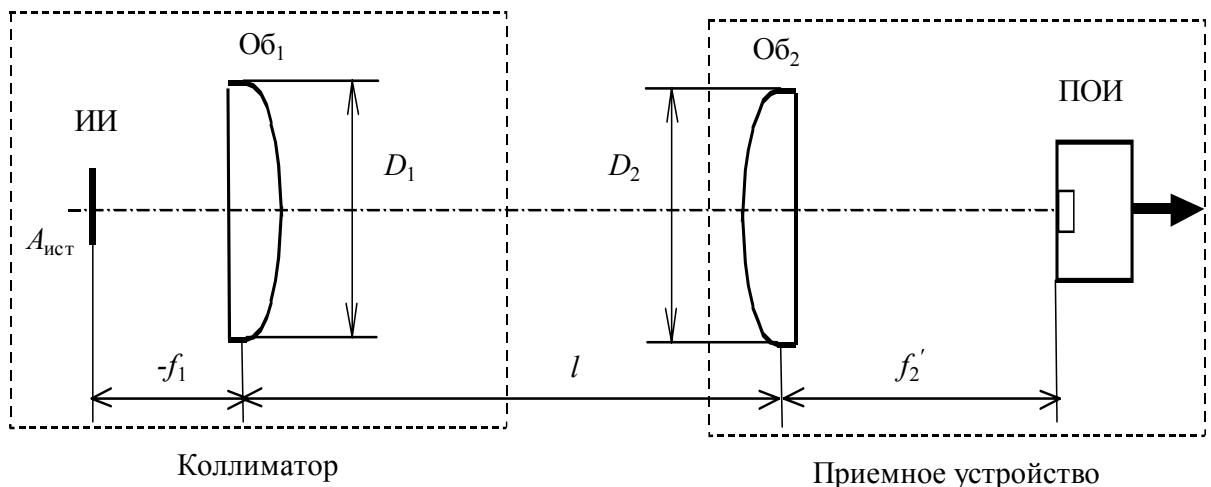


Рис. 2. Схема коллиматора и приемного устройства:
 ИИ - источник излучения; $Об_1$, $Об_2$ - объективы коллиматора и приемного устройства; ПОИ - приемник оптического излучения; $A_{ист}$ - площадь излучающей поверхности ИИ; $-f_1$, f_2' - переднее и заднее фокусные расстояния объективов коллиматора и 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 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, °C. | 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 $P = D_{\text{ПД}}/s'$, где $D_{\text{ПД}}$ – диаметр полевой диафрагмы, 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. | $t_{\text{атм}}, ^\circ\text{C}$ | Влажность f , % | Метеорологическая дальность видимости, м | Примечания |
|--------|----------------------------------|-------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 0 | 70 | 200 | |
| 2 | 10 | 80 | 50 | |
| 3 | 20 | 90 | 400 | |
| 4 | 30 | 70 | 50 | 1) для t от 100 до 600 $^\circ\text{C}$ - флюорит (Ca F_2); |
| 5 | 0 | 80 | 1000 | спектральный диапазон пропускания - |
| 6 | 10 | 90 | 50 | |
| 7 | 20 | 70 | 500 | $\Delta\lambda = 0,4...9,0 \text{ мкм};$ |
| 8 | 30 | 80 | 50 | при толщине $d = 2 \text{ мм}$ |
| 9 | 0 | 90 | 4000 | $\tau = 0,92;$ |
| 10 | 10 | 70 | 50 | |
| 11 | 20 | 80 | 1500 | 2) для t от 400 до 2000 $^\circ\text{C}$ - |
| 12 | 30 | 90 | 50 | кварцевое стекло КИ; |
| 13 | 0 | 70 | 1500 | спектральный диапазон пропускания - |
| 14 | 10 | 80 | 50 | $\Delta\lambda = 0,4...3,5 \text{ мкм};$ |
| 15 | 20 | 90 | 2000 | |
| 16 | 30 | 70 | 50 | |
| 17 | 0 | 80 | 2500 | 3) для t от 900 до 3500 $^\circ\text{C}$ - |
| 18 | 10 | 90 | 50 | оптическое стекло К8; |
| 19 | 20 | 70 | 1500 | спектральный диапазон пропускания - |
| 20 | 30 | 80 | 50 | $\Delta\lambda = 0,4...2,5 \text{ мкм}.$ |
| 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 $f_{\text{мод}} = 12 \text{ Гц}$ и $\Delta f_{\text{эфф}} = 2 \text{ Гц}$, для ПОИ на основе фотоэффекта $f_{\text{мод}} = 1000 \text{ Гц}$ и $\Delta f_{\text{эфф}} = 200 \text{ Гц}$.

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].

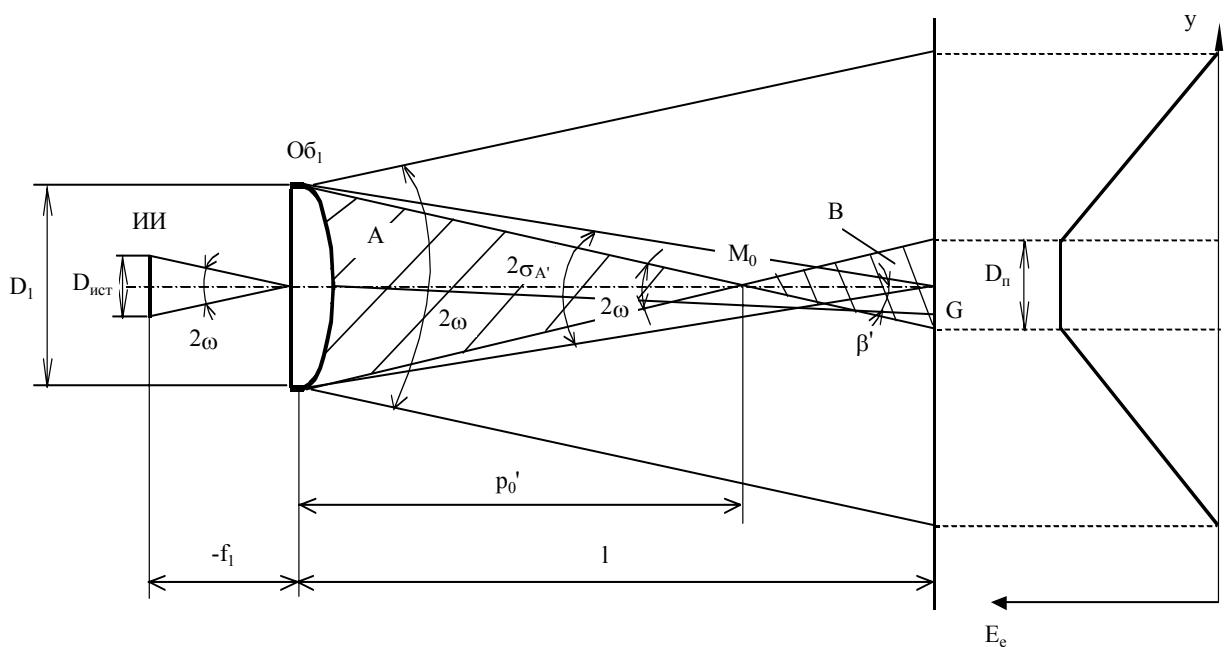


Рис. 3. Структура пучка лучей коллиматора (прожектора):
ИИ - источник излучения; $Об_1$ - объектив коллиматора (прожектора); l - расстояние от выходного зрачка объектива до рассматриваемого сечения пучка; D_1 - диаметр выходного зрачка объектива; ПОИ - приемник оптического излучения; $D_{ист}$ - диаметр 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; 2ω - 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 $D_{\text{ист}} \ll (-f_1)$:

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

а дистанция формирования пучка лучей коллиматора (прожектора):

$$p'_0 = \frac{D_1}{2 \cdot \tg \omega} \approx \frac{D_1}{D_{\text{ист}}} \cdot (-f_1) . \quad (1.2)$$

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]:

$$E_{e0} = \pi \cdot L_e \cdot \tau_K \cdot \tau_A \cdot \sin^2 \sigma'_{A'} , \quad (1.3)$$

где L_e – энергетическая яркость ИИ; τ_K , τ_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:

$$\text{при } l > p'_0 \quad \sigma'_{A'} = \arctg \frac{D_1}{2 \cdot l} , \quad (1.4)$$

$$\text{при } l \leq p'_0 \quad \sigma'_{A'} = \omega = \arctg \frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} \approx \frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} . \quad (1.5)$$

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

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

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

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 :

$$E_{e0} \approx \pi \cdot \tau_K \cdot \tau_A \cdot L_e \cdot \left(\frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} \right)^2. \quad (1.7)$$

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 :

$$E_{e0} \approx \pi \cdot \tau_K \cdot \tau_A \cdot L_e \cdot \left(\frac{D_1}{2 \cdot l} \right)^2. \quad (1.8)$$

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 :

$$D_{\text{пA}} = D_1 - \left(\frac{D_{\text{ист}}}{-f_1} \right) \cdot l, \quad D_{\text{пB}} = \left(\frac{D_{\text{ист}}}{-f_1} \right) \cdot l - D_1. \quad (1.9)$$

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:

$$\Phi_e = \pi \cdot \tau_K \cdot \tau_A \cdot \tau_{\Pi} \cdot L_e \cdot \left(\frac{D_{\text{ист}}}{-2 \cdot f_1} \right)^2 \cdot A_2 = \tau \cdot L_e \cdot \frac{A_{\text{ист}} \cdot A_2}{f_1^2}, \quad (1.10)$$

где τ_{Π} – коэффициент пропускания оптической системы приемного устройства; τ – коэффициент пропускания среды и оптических систем; $A_{\text{ист}}$ – площадь излучающей поверхности ИИ; A_2 – площадь входного зрачка объектива приемного 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:

$$\Phi_e = \pi \cdot \tau_K \cdot \tau_A \cdot \tau_{\Pi} \cdot L_e \cdot \left(\frac{D_1}{2 \cdot l} \right)^2 \cdot A_2 = \tau \cdot L_e \cdot \frac{A_1 \cdot A_2}{l^2}, \quad (1.11)$$

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]:

$$L_e = \frac{M_e^o}{\pi} = \frac{\Phi_e}{\pi \cdot A_{\text{чт}}} , \quad (1.12)$$

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

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

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

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.

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:

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

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:

$$\sin \sigma_{A'}' \approx \sigma_{A'}' = \operatorname{tg} \sigma_{A'}' = \frac{D'_{ob}}{2a'} \cong \frac{D_{ob}}{2a'}, \quad (1.15)$$

где D'_{ob} и D_{ob} - диаметры выходного и входного зрачков объектива (при линейном увеличении в зрачках $\beta_p = 1$ их диаметры равны: $D_{ob} = D'_{ob}$); 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 ЛамBERTA (1.12) получаем из (1.15) и (1.16), что спектральная плотность облученности в точке изображения:

$$E_{e\lambda} \approx \tau(\lambda) \varepsilon(\lambda) M_{e\lambda}^o(\lambda, T) \frac{D_{ob}^2}{4(a')^2} = \tau(\lambda) \varepsilon(\lambda) M_{e\lambda}^o(\lambda, T) \frac{A_{ob}}{\pi(a')^2}, \quad (1.16)$$

где $\varepsilon(\lambda)$ – спектральный коэффициент теплового излучения объекта; $M_{e\lambda}^o$ – спектральная плотность энергетической светимости черного тела при температуре объекта; A_{ob} – 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 2ω должно быть меньше углового размера объекта:

$$2\omega = 2\omega' \approx \frac{D_{PD}}{a'} < \frac{D_{ucm}}{a} = \frac{D_{ucm}}{l}, \quad (1.17)$$

где D_{PD} – диаметр полевой диафрагмы, установленной перед фоточувствительным элементом (ФЧЭ) ПОИ, или (при отсутствии диафрагмы) диаметр ФЧЭ; D_{ucm} – диаметр излучающей поверхности ИИ.

Спектральная плотность потока излучения от равнояркого объекта (ЧТ) в пределах линейного поля пирометра в пространстве изображений из (1.16):

$$\Phi_{e\lambda} = E_{e\lambda}(\lambda) A_{PD} = M_{e\lambda}^o(\lambda, T) \varepsilon(\lambda) \tau(\lambda) \frac{A_{ob} A_{PD}}{\pi(a')^2}, \quad (1.18)$$

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

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

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

то диаметр изображения источника:

$$D_{uz} = D_{ucm} \frac{a'}{a}, \quad (1.20)$$

а соотношение площадей источника и его изображения:

$$A_{uz} = A_{ucm} \left(\frac{a'}{a} \right)^2. \quad (1.21)$$

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

$$\Phi_{e\lambda} = E_{e\lambda}(\lambda) A_{uz} = \tau(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda, T) \frac{A_{ucm} A_{ob}}{a^2}. \quad (1.22)$$

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

$$\Phi_{e\lambda} = \varepsilon(\lambda) \tau(\lambda) M_{e\lambda}^o(\lambda, T) \frac{A_{ucm} A_{ob}}{\pi a^2}. \quad (1.23)$$

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

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

Соотношение площадей ИИ и его изображения имеет вид:

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

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 2ω больше углового размера ИИ:

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

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

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

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

Из (1.21) следует, что

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

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

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

Если излучатель ламбертовский, то из (1.28):

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

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

Для тепловых ИИ:

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

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 2ω меньше углового размера ИИ:

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

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

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

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

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

Если излучатель ламбертовский, то:

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

Для тепловых ИИ:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \varepsilon_\lambda(\lambda) \tau_\lambda(\lambda) M_{e\lambda}^o(\lambda) \frac{A_{\text{об}} A_{\text{ПД}}}{\pi \cdot (f')^2}. \quad (1.36)$$

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 $m_{e,\lambda}^I(\lambda)$ 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 κ^I и κ^{II} излучения паспортного (I) и заданного (II) ИИ заданным ПОИ, а также коэффициенты использования κ_g^I и κ_g^{II} излучения паспортного и заданного ИИ глазом (к.п.д. глаза), если параметры ПОИ заданы в световых величинах [3]:

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

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

$$\kappa_g^I = \frac{0.38 \int_0^{0.78} m_{e,\lambda}^I(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty m_{e,\lambda}^I(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^I \cdot V_{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^I}; \quad (2.3)$$

$$\kappa_{\Gamma}^{\text{II}} = \frac{\int_0^{0.78} m_{e,\lambda}^{\text{II}}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} m_{e,\lambda}^{\text{II}}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^{\text{II}} \cdot V_{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^k m_{e,\lambda_i}^{\text{II}}} . \quad (2.4)$$

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

Таблица 3

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

| λ_i , мкм | $m_{e\lambda i}^{\text{I}}$ | $m_{e\lambda i}^{\text{II}}$ | $S_{\lambda i}$ | $V_{\lambda i}$ | $m_{e\lambda i}^{\text{I}} S_{\lambda i}$ | $m_{e\lambda i}^{\text{II}} S_{\lambda i}$ | $m_{e\lambda i}^{\text{I}} V_{\lambda i}$ | $m_{e\lambda i}^{\text{II}} V_{\lambda i}$ |
|-------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| λ_1 | | | | | | | | |
| λ_2 | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| λ_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]:

$$S_{\text{инт},e}^{\text{II}} = S_{\text{инт},v}^{\text{I}} \cdot 683 \cdot \kappa_{\Gamma}^{\text{I}} \cdot \frac{\kappa_{\Gamma}^{\text{II}}}{\kappa_{\Gamma}^{\text{I}}} \quad (2.5)$$

или

$$S_{\text{инт},e}^{\text{II}} = S_{\text{инт},e}^{\text{I}} \cdot \frac{\kappa_{\Gamma}^{\text{II}}}{\kappa_{\Gamma}^{\text{I}}} , \quad (2.6)$$

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

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

$$\Phi_e = \frac{\Phi_v}{683 \cdot \kappa_{\Gamma}^{\text{II}}} . \quad (2.7)$$

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:

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

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

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

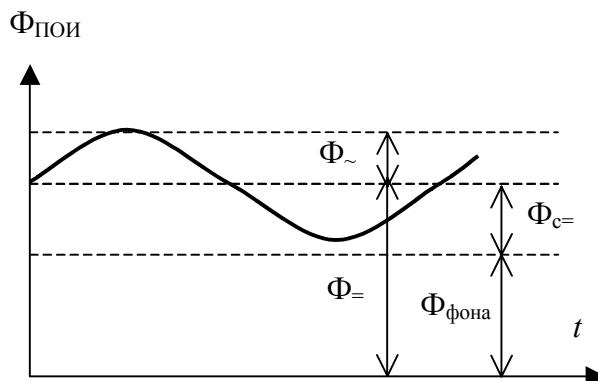


Рис. 4. Составляющие потока излучения на выходе ПОИ

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

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

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

$$I_{\phi} = \Phi_{\text{ПОИ}} \cdot S_I , \quad (3.3)$$

где S_I – токовая чувствительность ПОИ.

Фототок I_{ϕ} складывается с темновым током ПОИ I_t , а обе эти составляющие образуют общий ток ПОИ (рис. 5):

$$I_{\text{общ}} = I_{\text{т}} + I_{\phi} . \quad (3.4)$$

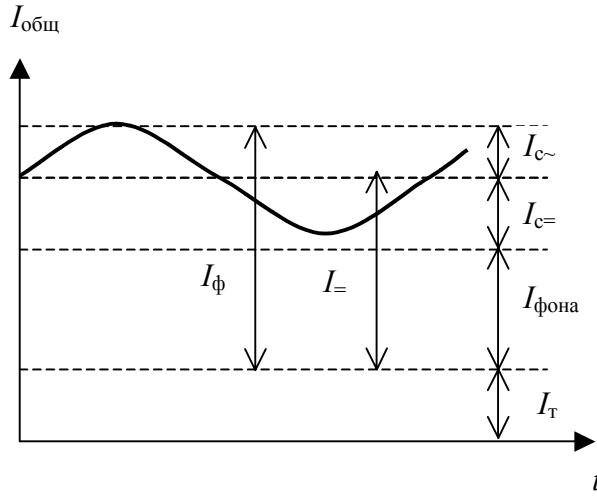


Рис. 5. К расчету тока на выходе ПОИ

При синусоидальной модуляции потока излучения с круговой частотой ω_m

$$I_{\text{общ}}(t) = I_{\text{т}} + \Phi_{=} \cdot S_{\text{I}} + \Phi_{\sim} \cdot S_{\text{I}} \cdot \sin \omega_m t . \quad (3.5)$$

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

$$\bar{I} = I_{\text{т}} + I_{=} = I_{\text{т}} + \Phi_{=} \cdot S_{\text{I}} . \quad (3.6)$$

Амплитуда переменных составляющих фототока и напряжения фотосигнала:

$$I_{\sim} = \Phi_{\sim} \cdot S_{\text{I}} ; \quad U_{\sim} = \Phi_{\sim} \cdot S_{\text{u}} = \Phi_{\sim} S_{\text{I}} R_{\text{h}} , \quad (3.7)$$

где S_{u} – вольтовая чувствительность ПОИ; R_{h} – сопротивление нагрузки 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:

$$I_c = \int_{\lambda=0}^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot S_{\lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (3.8)$$

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) 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 Φ_n в заданной полосе частот; порог чувствительности в единичной полосе частот Φ_{n1} ; удельный порог чувствительности Φ_n^* ; обнаружительную способность D ; удельную обнаружительную способность D^* .

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

$$\begin{aligned} U_{ш ПОИ \Delta f \text{эфф}} &= \Phi_n \cdot S_{U \text{ инт}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{эфф}}}{\Delta f_{\text{эфф насн}}}} = \frac{1}{D} \cdot S_{U \text{ инт}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{эфф}}}{\Delta f_{\text{эфф насн}}}} = \\ &= \Phi_n^* \cdot S_{U \text{ инт}} \cdot \sqrt{A_{\phi^u} \cdot \Delta f_{\text{эфф}}} = \frac{1}{D^*} \cdot S_{U \text{ инт}} \cdot \sqrt{A_{\phi^u} \cdot \Delta f_{\text{эфф}}} = \\ &= \Phi_{n1} \cdot S_{U \text{ инт}} \cdot \sqrt{\Delta f_{\text{эфф}}}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}
I_{ш пои \Delta f \text{ эфф}} &= \Phi_n \cdot S_{I, \text{инт}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{эфф}}}{\Delta f_{\text{эфф пасп}}}} = \frac{1}{D} \cdot S_{I, \text{инт}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{\text{эфф}}}{\Delta f_{\text{эфф пасп}}}} = \\
&= \Phi_n^* \cdot S_{I, \text{инт}} \cdot \sqrt{A_{\phi u} \cdot \Delta f_{\text{эфф}}} = \frac{1}{D^*} \cdot S_{I, \text{инт}} \cdot \sqrt{A_{\phi u} \cdot \Delta f_{\text{эфф}}} = \\
&= \Phi_{nI} \cdot S_{I, \text{инт}} \cdot \sqrt{\Delta f_{\text{эфф}}},
\end{aligned} \tag{4.2}$$

где $\Delta f_{\text{эфф}}$ – эффективная шумовая полоса частот электронного тракта разрабатываемого прибора; $\Delta f_{\text{эфф пасп}}$ – эффективная шумовая полоса частот электронного тракта установки, на которой производилась аттестация ПОИ; $A_{\phi u}$ – 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 (4.1) и (4.2) 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 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 Δf описываются выражениями [3]:

$$I_{ш I \text{ пои } \Delta f} = \sqrt{\frac{A \cdot \bar{I}^2}{f} \cdot \Delta f}, \quad U_{ш I \text{ пои } \Delta f} = \sqrt{\frac{A \cdot \bar{I}^2 \cdot R_{\text{пои}}^2}{f} \cdot \Delta f}, \tag{4.3}$$

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, определяемое формулой (27-3.6); 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 τ_h , 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]:

$$\begin{aligned} I_{\text{ш.т.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф}}} &= \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T_{\text{ПОИ}}}{R_{\text{ПОИ}}} \cdot \Delta f_{\text{эфф}}}, \\ U_{\text{ш.т.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф}}} &= \sqrt{4 \cdot k \cdot T_{\text{ПОИ}} \cdot R_{\text{ПОИ}} \cdot \Delta f_{\text{эфф}}}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

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

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

Токовый шум оказывается 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 $\Delta f_{\text{эфф}}$:

$$\begin{aligned} I_{\text{ш.др.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф}}} &= \sqrt{2 \cdot e \cdot \bar{I} \cdot \Delta f_{\text{эфф}}}, \\ U_{\text{ш.др.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф}}} &= \sqrt{2 \cdot e \cdot \bar{I} \cdot R_{\text{H}}^2 \cdot \Delta f_{\text{эфф}}}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

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:

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

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 $B = 1,5$).

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]:

$$\Phi_{\text{пв}}^{\text{II}} = \Phi_{\text{пв}}^{\text{I}} \frac{\kappa^{\text{I}}}{683 \cdot \kappa_{\text{г}}^{\text{I}} \cdot \kappa^{\text{II}}} , \quad \Phi_{\text{пe}}^{\text{II}} = \Phi_{\text{пe}}^{\text{I}} \frac{\kappa^{\text{I}}}{\kappa^{\text{II}}} , \quad (5.1)$$

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

где $\Phi_{\text{пв}}^{\text{I}}$ и $\Phi_{\text{пe}}^{\text{I}}$ – 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}^{I} и D_{e}^{I} – 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 $\Phi_{\text{пe}}^{\text{II}}$ ($\text{Вт}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$), удельного порога чувствительности $\Phi_{\text{пe}}^{*\text{II}}$ ($\text{Вт}\cdot\text{Гц}^{-1/2}\cdot\text{см}^{-1}$), а также удельной обнаружительной способности $D_{\text{e}}^{*\text{II}}$ ($\text{Вт}\cdot\text{Гц}^{-1/2}\cdot\text{см}^{-1}$).

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

$$\Phi_{\text{пe} \Delta f_{\text{эфф}}}^{\text{II}} = \Phi_{\text{пe}}^{\text{II}} (\Delta f_{\text{эфф}} / \Delta f_{\text{эфф пасп}})^{1/2} = (1 / D_{\text{e}}^{\text{II}}) (\Delta f_{\text{эфф}} / \Delta f_{\text{эфф пасп}})^{1/2} . \quad (5.2)$$

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

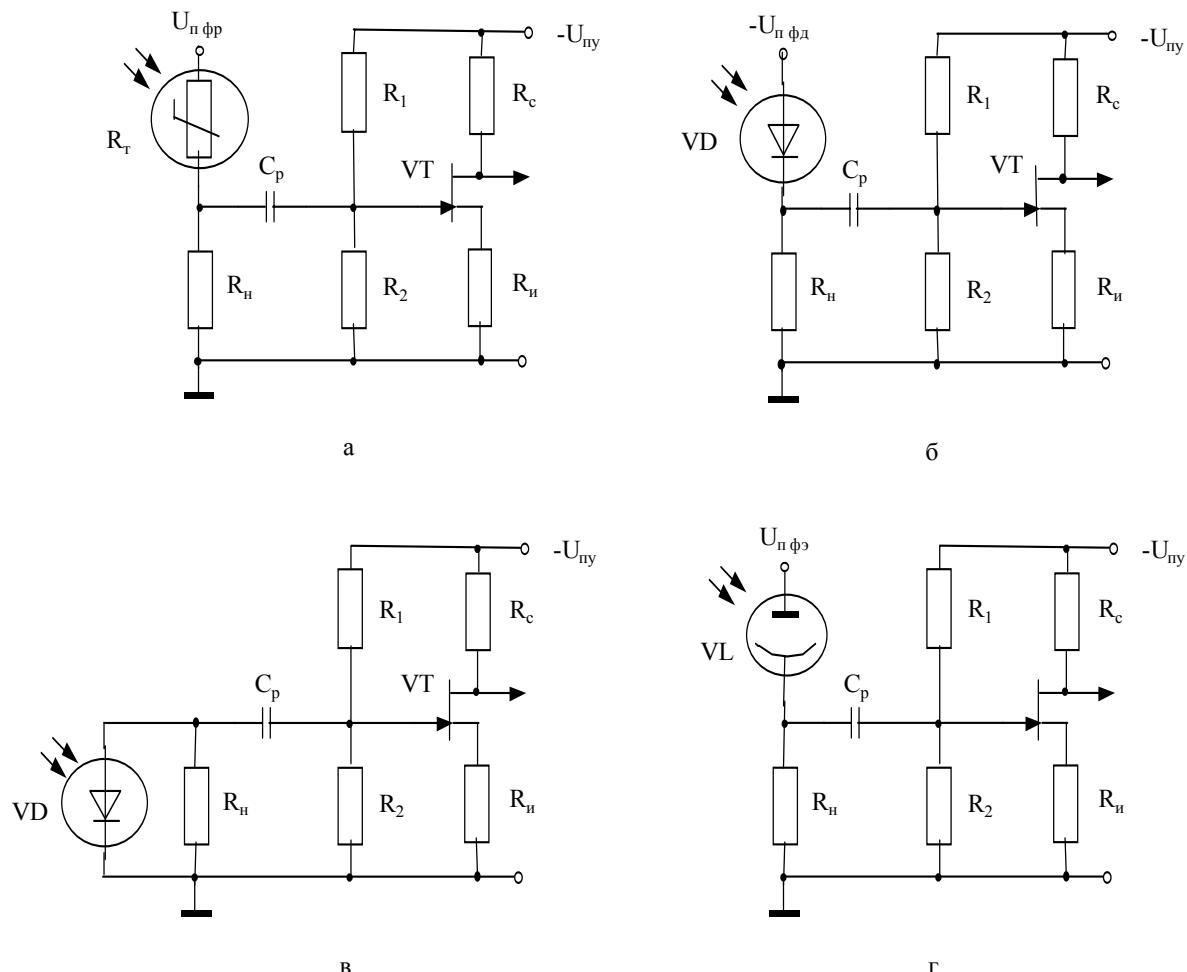


Рис. 6. Схемы включения ПОИ и предварительный усилитель на полевом транзисторе:

а - фотодиод в фотодиодном режиме;
в - фотодиод в фотогальваническом режиме; г - фотоэлемент

При выборе сопротивления нагрузки следует учитывать также постоянную времени T_k инерционного контура, образованного сопротивлением нагрузки R_h и ёмкостью инерционного контура C_k , образованного ёмкостью ПОИ C_p , ёмкостью монтажа C_m и входной ёмкостью предварительного усилителя C_b :

$$T_r = R_y C_r = R_y(C_g + C_p + C_d) . \quad (6.1)$$

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

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

С учётом изложенных соображений сопротивление нагрузки R_h и постоянная времени $\tau_{\text{ПОИ}}$ должны удовлетворять условиям:

$$R_h \leq 0,1/(C_{\text{к}} f_m), \quad \tau_{\text{ПОИ}} \leq 0,1/f_m . \quad (6.2)$$

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:

$$I_{\text{ш.др.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф.}I}} = \sqrt{2eI_{\text{=}}\Delta f_{\text{эфф}}} = \sqrt{2e\Phi_{\text{=}}S_{I,\text{инт}}^{\text{II}}\Delta f_{\text{эфф}}} ; \quad (6.3)$$

$$U_{\text{ш.др.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф.}I}} = \sqrt{2eI_{\text{=}}R_h^2\Delta f_{\text{эфф}}} = \sqrt{2e\Phi_{\text{=}}S_{I,\text{инт}}^{\text{II}}R_h^2\Delta f_{\text{эфф}}} , \quad (6.4)$$

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

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

$$I_{\text{ш.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф.}\Sigma}} = \sqrt{I_{\text{ш.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф}}}^2 + I_{\text{ш.др.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф.}I}}^2} ; \quad (6.5)$$

$$U_{\text{ш.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф.}\Sigma}} = \sqrt{U_{\text{ш.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф}}}^2 + U_{\text{ш.др.ПОИ.}\Delta f_{\text{эфф.}I}}^2} . \quad (6.6)$$

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_h и шум активного элемента предварительного усилителя.

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

$$I_{\text{ш.т.}R_h\Delta f_{\text{эфф}}} = \sqrt{\frac{4kT_h}{R_h}\Delta f_{\text{эфф}}} ; \quad U_{\text{ш.т.}R_h\Delta f_{\text{эфф}}} = \sqrt{4kT_hR_h\Delta f_{\text{эфф}}} , \quad (6.7)$$

где k - постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹); T_h – температура резистора нагрузки; R_h – 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:

$$R_{ш} = 2/(3S_{ПТ}) , \quad (6.8)$$

где $S_{ПТ}$ – крутизна вольтамперной характеристики полевого транзистора (типовое 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:

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

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:

$$I_{ш \Sigma \Delta f \text{ эфф}} = \sqrt{I_{ш ПОИ \Delta f \text{ эфф} \Sigma}^2 + I_{ш Т R_H \Delta f \text{ эфф}}^2 + I_{ш ПУ \Delta f \text{ эфф}}^2} ; \quad (6.10)$$

$$U_{ш \Sigma \Delta f \text{ эфф}} = \sqrt{U_{ш ПОИ \Delta f \text{ эфф} \Sigma}^2 + U_{ш Т R_H \Delta f \text{ эфф}}^2 + U_{ш ПУ \Delta f \text{ эфф}}^2} . \quad (6.11)$$

Пользуясь рассчитанными ранее значениями амплитуд переменных составляющих потока излучения Φ_{\sim} , фототока I_{\sim} и напряжения фотосигнала U_{\sim} , а также порога чувствительности ПОИ $\Phi_{\text{пе} \Delta f \text{ эфф}}^{\text{II}}$ 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 ($\mu_{\text{пое}}$) и с учетом (μ_{Σ}) влияния шумов входной цепи и предварительного усилителя:

$$\mu_{\text{пое}} = \frac{\Phi_{\sim}}{\Phi_{\text{пе} \Delta f \text{ эфф}}^{\text{II}}} ; \quad \mu_{\Sigma} = \frac{I_{\sim}}{I_{ш \Sigma \Delta f \text{ эфф}}} = \frac{U_{\sim}}{U_{ш \Sigma \Delta f \text{ эфф}}} . \quad (6.12)$$

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

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

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

$$\sigma_{ш} = \sqrt{\frac{N_0}{2e_0}} , \quad (6.14)$$

где e_0 – удельная энергия сигнала за время измерения T_u ;

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

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

$$e_0 = T_u / 2 ; \quad \sigma_{ш} = \sqrt{\frac{N_0}{T_u}} . \quad (6.16)$$

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

$$e_0 = T_u ; \quad \sigma_{ш} = \sqrt{\frac{N_0}{2T_u}} . \quad (6.17)$$

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):

$$I_c = \int_{\lambda=0}^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot S_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda = \\ = M_{e\lambda_{max}}^o \cdot \frac{A_{об} A_{пд}}{\pi \cdot (a')^2} \cdot S_{\lambda_{max}} \cdot \int_{\lambda=0}^{\infty} m_{e\lambda}^o(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s_{\lambda}(\lambda) d\lambda , \quad (7.1)$$

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; $S_{\lambda}(\lambda) = S_{\lambda_{max}} s_{\lambda}(\lambda)$; $m_{e\lambda}^o(\lambda)$, $M_{e\lambda_{max}}^o$ – 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 пиromетров, 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 (7.1) по температуре:

$$\frac{\partial I_c}{\partial T} = \frac{A_{\text{об}} A_{\text{ПД}}}{\pi \cdot (a')^2} \cdot S_{\lambda_{\max}} \cdot \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{\partial M_{e\lambda}^o(\lambda, T)}{\partial T} \cdot \varepsilon_\lambda(\lambda) \cdot \tau_\lambda(\lambda) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda, \quad (7.2)$$

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

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

где $C_1 = 3,7415 \cdot 10^{16}$ Вт·м²; $C_2 = 1,43879 \cdot 10^{-2}$ м·К.

При такой аппроксимации:

$$\frac{\partial M_{e\lambda}^o(\lambda, T)}{\partial T} = \frac{C_2 M_{e\lambda}^o(\lambda T)}{\lambda T^2}. \quad (7.4)$$

Используя второй закон Вина ($M_{e\lambda_{\max}}^0 = C'_\lambda T^5$, где $C'_\lambda = 1,315 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м³·К⁵) = $1,315 \cdot 10^{-15}$ Вт/(см²·мкм·К⁵)), получим, что ток сигнала на выходе ПОИ:

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

Максимальное значение монохроматической чувствительности ПОИ:

$$S_{\lambda_{\max}} = \frac{S_{\text{инт}}^I}{\kappa_{\text{ПОИ}}^I}, \quad (7.6)$$

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

$$\kappa_{POI}^I = \frac{\int_0^\infty \varphi^I_{e\lambda}(\lambda) s_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi^I_{e\lambda}(\lambda) d\lambda}, \quad (7.7)$$

$\varphi^I_{e\lambda}(\lambda)$ - 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:

$$I_c = C'_\lambda \cdot T^5 \cdot \varepsilon \cdot \tau \cdot \frac{A_{ob} A_{pd}}{\pi \cdot (a')^2} \cdot S_{\lambda_{max}} \cdot \int_{\lambda=0}^\infty m_{e\lambda}(\lambda, T) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda. \quad (7.8)$$

Изменение сигнала на выходе ПОИ, обусловленное малым изменением температуры:

$$\begin{aligned} \Delta I_c &= \left(\frac{\partial I_c}{\partial T} \right) \Delta T = \\ &= \left\{ \left[\frac{C_2}{T^2} M_{e,\lambda_{max}}^0 \right] \frac{A_{ob} A_{pd}}{\pi (a')^2} S_{\lambda_{max}} \int_{\lambda=0}^\infty \frac{m_{e,\lambda}^0(\lambda, T)}{\lambda} \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda \right\} \Delta T = \\ &= \left\{ \left[\frac{C_2}{T^2} C'_\lambda T^5 \right] \frac{A_{ob} A_{pd}}{\pi (a')^2} S_{\lambda_{max}} \int_{\lambda=0}^\infty \frac{m_{e,\lambda}^0(\lambda, T)}{\lambda} \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s_\lambda(\lambda) d\lambda \right\} \Delta T \end{aligned}, \quad (7.9)$$

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

$$\Delta I_c = \left\{ \varepsilon \tau [C_2 C'_\lambda T^3] \frac{A_{ob} A_{pd}}{\pi (a')^2} S_{\lambda_{max}} \int_{\lambda=0}^\infty \frac{m_{e,\lambda}^0(\lambda, T)}{\lambda} s_\lambda(\lambda) d\lambda \right\} \Delta T. \quad (7.10)$$

Произведение в формуле (7.10):

$$\begin{aligned} C_2 C'_\lambda &= 1,44 \cdot 10^4 [\text{мкм} \cdot \text{К}] \cdot 1,315 \cdot 10^{-15} [\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{К}^5)] = \\ &= 18,936 \cdot 10^{-12} [\text{Вт}/\text{см}^2 \cdot \text{К}^4] = 0,835 \cdot (4\sigma), \end{aligned} \quad (7.11)$$

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

Интеграл в выражении (7.10)

$$(\Delta \ln \lambda)_{\phi} = \int_{\lambda=0}^\infty \frac{m_{e\lambda}^o(\lambda) s_\lambda(\lambda)}{\lambda} d\lambda = \int_0^\infty m_{e\lambda}^o(\lambda) s_\lambda(\lambda) d(\ln \lambda) \quad (7.12)$$

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

$$\xi_{\text{ЧТ}} = 0,835(\Delta \ln \lambda)_{\text{эф}} \quad (7.13)$$

называется **коэффициентом использования контрастного черного излучателя**.

Следовательно, выражение (7.10) можно представить в виде:

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

На основании изложенного СКЗ шумовой составляющей погрешности измерения температуры:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{ui}}{K_n K_f \frac{A_{\text{oб}} A_{\text{ПД}}}{\pi(a')^2} [C_2 C_{\lambda} T^3] S_{\lambda_{\max}} \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{m_{e,\lambda}^0(\lambda) \varepsilon(\lambda) \tau(\lambda) s_{\lambda}(\lambda)}{\lambda} d\lambda} , \quad (7.15)$$

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

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{ui}}{[0,835(4\sigma T^3)] \varepsilon \tau \frac{A_{\text{oб}} A_{\text{ПД}}}{\pi(a')^2} S_{\lambda_{\max}} \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{m_{e,\lambda}^o(\lambda) s_{\lambda}(\lambda)}{\lambda} d\lambda} , \quad (7.16)$$

а с учетом введенных обозначений (35-7.12):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{ui}}{[0,82(4\sigma T^3)] \varepsilon \tau \frac{A_{\text{oб}} A_{\text{ПД}}}{\pi(a')^2} S_{\lambda_{\max}} (\Delta \ln \lambda)_{\text{эф}}} , \quad (7.17)$$

где σ_{ui} – 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 | ∞ | 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 | - |