

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ КОНТРОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОМЕХ

С. А. Лисаков, А. И. Сидоренко, А. Н. Павлов, Е. В. Сыпин, Г. В. Леонов

Приведены результаты исследования по определению оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени при использовании компенсационного метода подавления оптических помех. Разработана методика определения оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени при горении метано-воздушных смесей. Сформулирован критерий оптимальности по определению оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени с учетом технической реализации компенсационного метода подавления оптических помех. Выбраны фотоприемники и проанализирована их применимость для контроля излучения пламени с использованием компенсационного метода подавления оптических помех.

**Ключевые слова:** Излучение пламени, компенсационный метод, спектральный диапазон, оптическая помеха, фотодиод

### Введение

Для решения задач контроля пожаро-взрывоопасных объектов с помощью быстродействующих оптико-электронных приборов обнаружения пламени необходимо проведение исследований по определению оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени [1].

Обнаружение пламени может выполняться на фоне оптических помех, что может привести к пропуску пламени или возникновению ложного срабатывания оптико-электронного прибора [2].

Определение оптимальных спектральных диапазонов контроля выполняется на основе данных о спектральной энергетической светимости пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития, полученных на первом этапе работ [3], а также данных о спектрах излучения оптических помех. При этом необходимо учитывать особенности применения компенсационного метода подавления оптических помех [4, 5].

Компенсационный метод позволяет повысить чувствительность по сравнению с оптико-электронными приборами спектрального отношения при сохранении высокого быстродействия [2].

В связи с вышеизложенным была сформулирована цель – определить оптимальные спектральные диапазоны контроля излучения пламени при использовании компенсационного метода подавления оптических помех.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать методику определения оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени при горении метано-воздушных смесей;

– сформулировать критерий оптимальности по определению оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени с учетом технической реализации компенсационного метода подавления оптических помех;

– выбрать фотоприемники и проанализировать их применимость для контроля излучения пламени с использованием компенсационного метода подавления оптических помех.

### Методика определения оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени метано-воздушных смесей

Методика определения оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени метано-воздушных смесей разработана на основе рекомендаций, приведенных в работах [4, 5], с учетом применения компенсационного метода подавления оптических помех.

Методика включает выполнение следующих действий:

1. Проанализировать спектральные характеристики излучения пламени (цели) и оптических помех. По результатам анализа опреде-

лить оптические помехи, при воздействии которых необходимо обеспечить помехоустойчивость оптико-электронных приборов обнаружения пламени. Спектры полезного сигнала и оптической помехи представить в относительных единицах (в диапазоне от 0 до 1).

2. Определить границы спектральных диапазонов контроля пламени  $\lambda_1... \lambda_2$  и оптической помехи  $\lambda_3... \lambda_4$  на основе критерия оптимальной спектральной селекции. Выбор диапазонов является предварительным без учета технической реализации (параметры фотоприемников не учитываются).

3. Проанализировать параметры и характеристики выпускаемых фотоприемников, которые могут быть использованы для технической реализации прибора, с учетом границ спектральных диапазонов контроля пламени  $\lambda_1... \lambda_2$  и оптической помехи  $\lambda_3... \lambda_4$ . По результатам анализа сформировать совокупность наиболее подходящих пар фотоприемников для контроля излучения пламени и оптической помехи.

4. Выполнить уравнивание выходных сигналов при воздействии излучения оптической помехи в спектральных диапазонах  $\lambda_1... \lambda_2$  и  $\lambda_3... \lambda_4$  путем расчета коэффициентов преобразования сигналов с фотоприемников в электронном тракте.

5. Проверить условие выделения сигнала цели (излучения пламени) на фоне оптической помехи после выполнения уравнивания сигналов. Рассчитать критерий оптимальности – коэффициент потерь сигнала цели при компенсации воздействия помехи. Поскольку сигнал цели пропорционален разности сигналов, формируемых в двух диапазонах, то при регистрации пламени наличие сигнала в диапазоне контроля оптической помехи  $\lambda_3... \lambda_4$  приводит к потерям. Снижение потерь позволяет наилучшим образом выделить сигнал цели на фоне оптических помех, и таким образом повысить помехоустойчивость прибора.

6. Оценить критерий оптимальности – отношение сигнал-шум для фотоприемников, регистрирующих излучение пламени.

7. Сформулировать обобщенный критерий оптимальности определить частные критерии оптимальности. На основе частных критериев оптимальности рассчитать обобщенный критерий оптимальности для совокупности пар фотоприемников. Проанализировать результаты исследования и определить оптимальную пару фотоприемников для контроля излучения пламени и оптической помехи.

### Анализ спектральных характеристик излучения пламени и источников оптических помех

Определение оптимальных спектральных диапазонов контроля должно осуществляться на основе данных о спектральном распределении излучения продуктов горения и излучения оптических помех – источников естественного и искусственного освещения.

Спектральная энергетическая светимость пламенного горения метано-воздушной смеси, которое является изотермическим по объему и имеет форму шара, получена в работе [3], и представлена на рисунке 1 для огненных шаров с диаметрами  $D$  0,2, 1 и 3 м (температура –  $T=2206$  К).

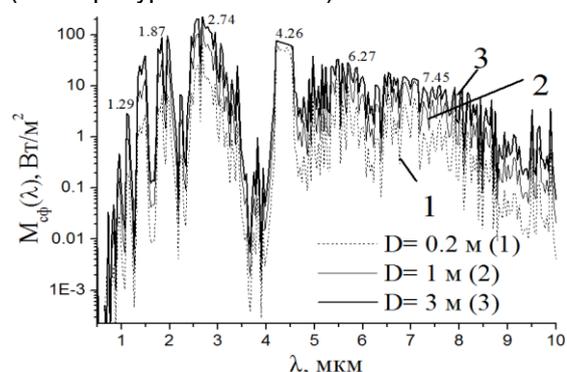


Рисунок 1 – Спектральная энергетическая светимость огненного шара с диаметрами 0,2, 1 и 3 м

Излучение пламени сосредоточено в полосах поглощения паров воды и двуокиси углерода. Максимумы энергии излучения соответствуют следующим длинам волн для углекислого газа – 1,34, 4,26, 7,45 мкм, для паров воды – 1,29, 1,87, 2,66, 2,74 и 6,27 мкм.

Согласно ГОСТ Р 53325 – 2012 [6] приборы обнаружения пламени (извещатели пламени) должны сохранять устойчивость к воздействию оптических помех в виде ламп накаливания 60 и 100 Вт (фоновая освещенность чувствительных элементов прибора 250 лк) и люминесцентных ламп 20 и 40 Вт (фоновая освещенность 2500 лк).

Для определенных условий эксплуатации необходимо также обеспечивать помехозащищенность от оптических помех в виде солнечного излучения и инфракрасного излучения нагретых объектов [2, 7].

Данные о спектрах излучения ламп накаливания различной мощности приведены в работах [8, 9]. Лампа накаливания представляет собой спираль из вольфрама, разогреваемая электрическим током до температуры

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ КОНТРОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОМЕХ

примерно 2800 К. Оптическое излучение тела накала лампы сосредоточено в видимой и инфракрасной областях спектра (от 380 до 4000 нм). Кроме того, монокроматическая излучательная способность вольфрама изменяется в зависимости от длины волны [9]. Таким образом, расчет спектра излучения лампы накаливания можно выполнить на основе закона Планка с учетом излучательной способности вольфрама.

Данные о спектрах солнечного излучения приведены в работах [10, 11]. В качестве солнечного спектра AM0 (без учета влияния ослабления атмосферой), используется спектр ASTM E-490 [10, 11]. Однако при прохождении сквозь атмосферу солнечное излучение ослабляется за счет поглощения и рассеивания фотонов атомами и молекулами атмосферных газов, а также содержащимися в ней аэрозолями. В результате исходный спектр AM0 существенно искажается (рисунок 2).

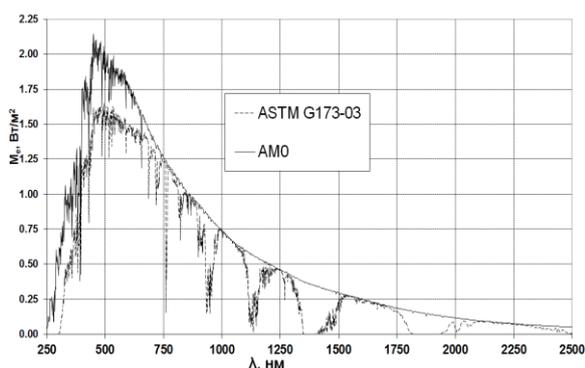


Рисунок 2 – Спектры солнечного излучения

В настоящей работе в качестве спектра солнечного излучения с учетом ослабления, может быть использован спектр ASTM G173-03 на базе модели SMARTS2 [11].

Наибольшее влияние на работу оптико-электронных приборов будут оказывать помехи, спектр излучения которых близок к спектру излучения продуктов горения ( $H_2O$  и  $CO_2$ ). Это излучение от лампы накаливания, прямой или рассеянный солнечный свет, излучение нагретых тел. Люминесцентные лампы оказывают значительно меньшее влияние, так как основная доля излучения таких ламп соответствует видимой области спектра [2].

### Предварительное определение границ спектральных диапазонов контроля пламени и оптической помехи на базе оптимальной спектральной селекции

Компенсационный метод подавления оптических помех основан на использовании различия спектральных характеристик излучения обнаруживаемого пламени и оптических помех. Компенсационный метод применяется в совокупности со спектральной селекцией (фильтрацией) и позволяет существенно повысить помехозащищенность оптико-электронных приборов от оптических помех [4, 5].

Сущность компенсационного метода подавления оптических помех заключается в том, что оптическое излучение регистрируется с помощью двух селективных приемников в различных спектральных диапазонах. Спектральный диапазон для первого приемника ( $\lambda_1 \dots \lambda_2$ ) соответствует типичному спектру излучения цели, а для второго приемника ( $\lambda_3 \dots \lambda_4$ ) – типичному спектру излучения оптической помехи. При дальнейшей обработке сигнал второго приемника вычитается из сигнала первого приемника [4, 5].

Оптимальная спектральная селекция выполняется, как правило, с помощью оптических фильтров. В работах [5, 12] используется следующий критерий для оценки качества спектральной селекции с помощью оптических фильтров:

$$q_{cc} = \frac{M_{ПС} + M_{МС}}{M_{МС}};$$

$$M_{ПС} = \int_0^{\infty} M_{ПС}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda;$$

$$M_{МС} = \int_0^{\infty} M_{МС}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda,$$

где  $M_{ПС}$  – интегральная энергетическая светимость полезного сигнала, Вт/м<sup>2</sup>;  $M_{МС}$  – интегральная энергетическая светимость мешающего сигнала, Вт/м<sup>2</sup>;  $M_{ПС}(\lambda)$  – спектральная энергетическая светимость полезного сигнала, Вт/(м<sup>2</sup>·нм);  $M_{МС}(\lambda)$  – спектральная энергетическая светимость мешающего сигнала, Вт/(м<sup>2</sup>·нм);  $\tau(\lambda)$  – спектральная характеристика фильтра, с пропусканием в диапазонах  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  или  $\lambda_3 \dots \lambda_4$ . Максимальное значение величины  $q_{cc}$  достигается при использовании фильтра с характеристикой пропускания  $\tau(\lambda)$  представляющей собой П-образную полосу пропускания с коэффициентом пропускания изменяющимся от 0 до 1.

При определении границ спектральных диапазонов контроля пламени  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  полезным сигналом является излучение пламени, а мешающим сигналом – излучение помехи (лампа накаливания или солнце). Критерием оценки качества спектральной селекции в данном случае принимается величина  $q_{cc1}$ . При расчете, из практических соображений: значение границы  $\lambda_2$  является фиксированным и принималось равным 5000 нм (поскольку основная доля энергии пламени сосредоточена в диапазоне 1–5 мкм); значение границы диапазона  $\lambda_1$  изменялось от 500 до 5000 нм и в зависимости от нее выполнялся расчет величины  $q_{cc1}(\lambda_1)$ . Граница диапазона  $\lambda_1$  определяется длиной волны, соответствующей 50% от максимальной величины  $q_{cc1}$  (рисунок 3).

При определении границ спектральных диапазонов контроля оптической помехи  $\lambda_3 \dots \lambda_4$ , рассматривается обратная ситуация: полезный сигнал – излучение помехи, мешающий сигнал – излучение пламени. Критерием оценки качества спектральной селекции в данном случае принимается величина  $q_{cc2}$ . При расчете из практических соображений установлены следующие ограничения: значение границы  $\lambda_3$  является фиксированным и равно 780 нм (для исключения влияния излучения большого количества оптических помех в виде источников излучения в видимой области спектра); значение границы диапазона  $\lambda_4$  изменялось от 500 до 5000 нм и в зависимости от нее выполнялся расчет величины  $q_{cc2}(\lambda_4)$ . Граница диапазона  $\lambda_4$  определяется длиной волны, соответствующей 50% от максимальной величины  $q_{cc2}(\lambda_4)$  (рисунок 3).

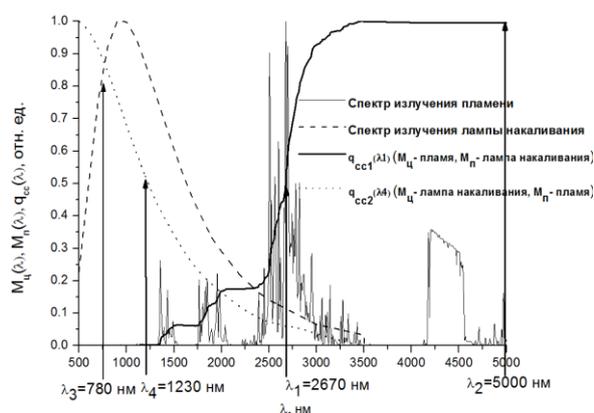


Рисунок 3 – К определению границы спектральных диапазонов контроля пламени и оптической помехи (лампа накаливания)

В результате исследований были предварительно определены границы спектральных диапазонов контроля пламени  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  и оптической помехи в виде лампы накаливания  $\lambda_3 \dots \lambda_4$ . Для лампы накаливания:  $\lambda_1 = 2670$  нм,  $\lambda_2 = 5000$  нм,  $\lambda_3 = 780$  нм,  $\lambda_4 = 1230$  нм. Для оптической помехи в виде солнечного излучения границы спектральных диапазонов контроля составили  $\lambda_1 = 2675$  нм,  $\lambda_2 = 5000$  нм,  $\lambda_3 = 780$  нм,  $\lambda_4 = 840$  нм.

### Выбор фотоприемников для контроля излучения пламени и оптических помех

По результатам предварительного определения границ спектральных диапазонов контроля пламени и оптической помехи были выбраны фотоприемники с соответствующими спектральными диапазонами чувствительности.

В качестве фотоприемников, применяемых в приборах контроля пламени, как правило, используются фотодиоды, включенные в фотогальваническом режиме. Преимуществами фотодиодов является линейная зависимость фототока от потока излучения и стабильность параметров при изменении температуры, влажности и давления окружающей среды [2].

В таблице 1 приведены данные о спектральных диапазонах чувствительности импортных и отечественных фотодиодов, которые могут использоваться для контроля пламени и оптических помех.

Все фотодиоды разделены на две группы по конструктивному исполнению: с широким угловым полем 140 град. и узким угловым полем 15 град. В первом случае излучение поступает непосредственно на чувствительную площадку фотодиода, во втором случае в конструкции фотодиода дополнительно устанавливается линза, увеличивающая обнаружительную способность фотодиода. Конструктивные особенности фотодиодов необходимо учитывать для корректного расчета.

Фотодиоды BPW34F, ФД Призма 5, SFH 203 FA ДФД2000ТО можно использовать для контроля излучения оптических помех в виде ламп накаливания, Солнца. Фотодиоды PD24-28, PD36-10, PD48, ФЭ722, ФЭ723, ФЭ724, PD27, PD38, PD42, PD24-20, Lms36, Lms43 можно использовать для излучения пламени в характерных полосах излучения.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ КОНТРОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОМЕХ**

Таблица 1 – Спектральные диапазоны чувствительности фотодиодов

Фото-диод	Спектральный диапазон чувствительности, мкм	Длина волны в максимуме чувствительности, мкм	Производитель
Угловое поле 140 град.			
BPW34F	0,75-1,1	0,95	OSRAM Opto Semiconductors [13]
ФД Призма 5	0,8-1,8	1,5	ОАО "ЦКБ Ритм"[14]
PD24-28	0,9-2,5	2,1	ООО «АИБИ» [15]
PD36-10	1,0-3,8	3,4	ООО «АИБИ»
PD48	2,5-4,9	4	ООО «АИБИ»
ФЭ722	1–3,5	2,6	ОАО «НИИ "ГИРИКОНД"» [16]
ФЭ723	1–4,2	3,2	ОАО «НИИ "ГИРИКОНД"»
ФЭ724	1–4,7	3,7	ОАО «НИИ "ГИРИКОНД"»
Угловое поле 15 град.			
SFH 203 FA	0,75-1,1	0,95	OSRAM Opto Semiconductors
ДФД200ТО	0.95-1.7	1,5	НПФ «Ди-лаз» [17]
PD27	2,5-3,5	2,7	ООО «Иоф-фелеД» [18]
PD38	3-4	3,8	ООО «Иоф-фелеД»
PD42	3,15-4,75	4,2	ООО «Иоф-фелеД»
PD24-20-TEC-PR	0,9-2,5	2,1	ООО «АИБИ»
Lms36 PD-05-CG	2-4	3,8	ООО «ЛЕД Микросенсор НТ» [19]
Lms43 PD-05-CG	3,5-4,8	4,3	ООО «ЛЕД Микросенсор НТ»

**Критерий оптимальности при определении спектральных диапазонов контроля излучения пламени на базе компенсационного метода подавления оптических помех**

Границы двух спектральных диапазонов  $\lambda_1... \lambda_2$  и  $\lambda_3... \lambda_4$  выбираются исходя из следующих условий:

- уравнивание выходных сигналов при воздействии излучения оптической помехи в каждом спектральном диапазоне, что и предопределяет возможность компенсации сигнала помехи;

- существенное различие энергий излучения цели (пламени) в каждом оптическом диапазоне, что позволяет выделить сигнал цели после вычитания [4, 5].

Уравнивание выходных сигналов при воздействии излучения оптической помехи в спектральных диапазонах  $\lambda_1... \lambda_2$  и  $\lambda_3... \lambda_4$ , выполняется на основе условия:

$$k_{n1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_n(\lambda) s_1(\lambda) \tau_1(\lambda) d\lambda = k_{n2} \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} M_n(\lambda) s_2(\lambda) \tau_2(\lambda) d\lambda,$$

где  $M_n(\lambda)$  – спектральная энергетическая светимость помехи, Вт/(м<sup>2</sup>·нм);  $s_1(\lambda)$ ,  $s_2(\lambda)$  – спектральные характеристики приемников излучения, А/Вт;  $\tau_1(\lambda)$ ,  $\tau_2(\lambda)$  – спектральные коэффициенты пропускания светофильтров;  $k_{n1}$ ,  $k_{n2}$  – коэффициенты преобразования сигналов с фотоприемников в электронном тракте оптико-электронного прибора, В/А [5].

Уравнивание энергий излучения помехи выполняется с учетом возможности технической реализации, т.е. с учетом спектральной чувствительности фотоприемников, спектральных коэффициентов пропускания оптических фильтров [5]. Это может быть достигнуто за счет применения следующих подходов [4, 5]:

- выбор границ двух спектральных диапазонов  $\lambda_1... \lambda_2$  и  $\lambda_3... \lambda_4$  осуществляется путем задания границ пропускания излучения оптическими фильтрами;

- выбор коэффициентов пропускания светофильтров, при которых излучение ослабляется в заданное число раз;

- выбор коэффициентов преобразования сигналов с фотоприемников в электронном тракте оптико-электронного прибора.

Существенное различие энергий излучения цели в спектральных диапазонах  $\lambda_1... \lambda_2$  и  $\lambda_3... \lambda_4$  позволяет выделить сигнал цели после вычитания. Результирующий сигнал для излучения пламени пропорционален разности

сигналов, формируемых в двух диапазонах [5]:

$$\Delta \sim \left[ k_{n1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{II}(\lambda) s_1(\lambda) \tau_1(\lambda) d\lambda - k_{n2} \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} M_{II}(\lambda) s_2(\lambda) \tau_2(\lambda) d\lambda \right].$$

При оптимальном выборе границ двух спектральных диапазонов  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  и  $\lambda_3 \dots \lambda_4$  необходимо также обеспечить минимальные потери сигнала цели при компенсации воздействия помехи. Если принять, что спектральный диапазон  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  соответствует спектру излучения пламени, а спектральный диапазон  $\lambda_3 \dots \lambda_4$  соответствует спектру излучения оптической помехи, то необходимо выполнение условия [5]:

$$k_{n1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{II}(\lambda) s_1(\lambda) \tau_1(\lambda) d\lambda \gg k_{n2} \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} M_{II}(\lambda) s_2(\lambda) \tau_2(\lambda) d\lambda.$$

Для оценки потерь сигнала цели при компенсации используется коэффициент  $q_{пк}$ :

$$q_{пк} = \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} M_{II}(\lambda) s_2(\lambda) \tau_2(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{II}(\lambda) s_1(\lambda) \tau_1(\lambda) d\lambda},$$

который может быть использован в качестве критерия оптимальности.

При использовании компенсационного метода необходимо, чтобы характеристики и помехи, и среды были априорно известны и неизменны во времени, что редко бывает на практике. Если характеристики излучения помехи отклоняются от априорно известных, то помеха не будет компенсирована полностью [5].

Оценка чувствительности оптико-электронного прибора выполняется на основе отношения сигнал-шум, которое может быть использовано в качестве второго критерия оптимальности. Отношение сигнал-шум рассчитывается для фотодиода, контролирующего излучение пламени. Для фотодиода, контролирующего излучение оптической помехи (лампа накаливания, солнце) расчет отношения сигнал-шум не выполняется, поскольку в ближнем инфракрасном диапазоне сосредоточена основная доля энергии излучения помех, а собственные шумы фотоприемников в данном диапазоне являются низкими.

Отношение сигнал-шум на выходе усилителя оптико-электронного прибора рассчитывается по формуле:

$$\mu_{\text{вых}} = \frac{U_c}{U_{ш}}$$

где  $U_c$  – полезный сигнал на выходе преобразователя ток-напряжение (ПТН) при воздействии на вход фотодиода излучения пламени, В;  $U_{ш}$  – среднее квадратическое значение шума на выходе ПТН, определяемое шумом фотодиода и шумом ПТН, В.

Фотодиод включен в фотогальваническом режиме. Преобразование сигнала с фотодиода выполняется с помощью преобразователя ток-напряжение, выполненного на базе операционного усилителя (ОУ), величина сигнала на его выходе может быть рассчитана на основе формулы:

$$U_c = K_{ПТН} \cdot (I_T + I_\phi),$$

где  $I_T$  – темновой ток фотодиода, А;  $I_\phi$  – фототок, обусловленный внешним излучением, А;  $K_{ПТН}$  – коэффициент преобразования ПТН, В/А.

Фототок, генерируемый фотодиодами ОЭД, рассчитывается по формуле:

$$I_\phi = \frac{r^2 \Delta A}{l^2} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_I(\lambda) \tau_c(\lambda) \tau_1(\lambda) \cdot M_u(\lambda) \Delta \lambda,$$

где  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  – спектральный диапазон, в котором происходит прием излучения пламени фотодиодом;  $\tau_c(\lambda)$  – спектральный коэффициент пропускания промежуточной среды;  $S_I(\lambda)$  – спектральная токовая чувствительность фотоприёмника, А/Вт;  $\Delta A$  – площадь чувствительной площадки фотоприемника, м<sup>2</sup>;  $l$  – расстояние от фотоприемника до пламени (огненного шара), м;  $r$  – радиус огненного шара, м [4].

Величина сигнала шума на выходе ПТН определяется суммой собственного шума фотодиода и шумов, вносимых электронной схемой преобразования сигнала. Собственные шумы средневолновых фотодиодов за счет их низкого дифференциального сопротивления (от десятков Ом до сотен кОм) вносят существенный вклад в суммарный шум [20].

Эквивалентная шумовая схема при преобразовании сигнала с фотодиода с помощью ПТН представлена на рисунке 4 [7].

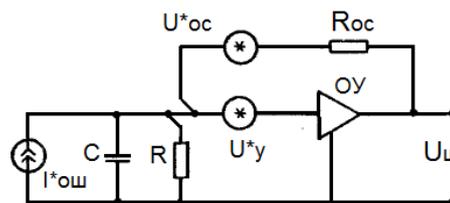


Рисунок 4 – Эквивалентная шумовая схема ПТН с подключенным фотодиодом

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ КОНТРОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОМЕХ

Среднее квадратическое значение шума на выходе ПТН  $U_{ш}$  описывается выражением:

$$U_{ш} = \sqrt{\left\{ (U_y^*)^2 \left[ \left( 1 + \frac{R_{oc}}{R} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} (\Delta f)^2 C^2 R_{oc}^2 \right] + R_{oc}^2 (I_{ош}^*)^2 + 4kTR_{oc} \right\} \cdot \Delta f},$$

где  $(U_y^*)^2$  – спектральная плотность шума по напряжению ОУ, В<sup>2</sup>/Гц; R – эквивалентное сопротивление, определяемое входным сопротивлением ОУ и дифференциальным сопротивлением фотодиода, Ом;  $R_{oc}$  – сопротивление обратной связи, Ом; C – эквивалентная емкость, определяемая входной емкостью ОУ и емкостью фотодиода, Ф;  $(I_{ош}^*)^2$  – общая спектральная плотность шума тока (источник общего шумового тока  $I_{ош}$  учитывает шум тока ОУ и тепловой шум эквивалентного сопротивления R), А<sup>2</sup>/Гц; k – постоянная Больцмана,  $1,38064852 \cdot 10^{-23}$ , Дж·К<sup>-1</sup>, T – температура фотодиода, К,  $\Delta f$  – ширина полосы частот схемы, Гц [21].

Для проведения расчетов были определены следующие исходные данные. Диаметр огненного шара (зона горения) равен 0,25 м – данный диаметр соответствует начальной стадии развития горения метано-воздушной смеси через 45 мс после зажигания для видимой скорости распространения пламени 2,82 м/с [3]. Расстояние от огненного шара до чувствительного элемента фотодиода равно 25 м и определяется техническими требованиями к приборам контроля пламени [6]. Коэффициент пропускания промежуточной среды  $\tau_c$  рассчитывался для запыленности с концентрацией угольной пыли 0,5 г/м<sup>3</sup>.

Значение сопротивления  $R_{oc}$  определяет коэффициент преобразования преобразователя ток-напряжение  $K_{птн}$ , который при выполнении расчета изначально принимается равным  $10^6$ .

Согласно рекомендациям, приведенным в работе [20], при реализации усилителя для фотодиодов среднего ИК диапазона рекомендуется выбирать малошумящие операционные усилители, например, AD797 на биполярных транзисторах фирмы Analog Device. Шумы операционного усилителя составляют  $U_y^* = 0,9$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ,  $I_y^* = 2$  пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Входное сопротивление операционного усилителя  $R_{вх}$  равно 100 МОм. Входная емкость операционного усилителя составляет 5 пФ.

Параметры фотодиодов, используемые при расчете отношения сигнал-шум, берутся из документации на фотодиоды.

Значение ширины полосы частот схемы  $\Delta f$  при расчете принимается равной 1 МГц, исходя из требований к быстродействию приборов.

Таким образом, при определении оптимальных спектральных диапазонов контроля в качестве критериев оптимальности принимаются коэффициент потерь при компенсации  $q_{пк}$  и отношение сигнал-шум  $\mu_{вых}$ . Коэффициент потерь сигнала цели при компенсации  $q_{пк}$  характеризует возможность выделения сигнала цели после вычитания, что в результате определяет помехоустойчивость прибора. Коэффициент потерь должен стремиться к минимальному значению. Отношение сигнал-шум прибора характеризует чувствительность прибора контроля пламени. Отношение сигнал-шум прибора должно стремиться к максимальному значению.

Повышение помехоустойчивости прибора может привести к снижению его чувствительности. Поэтому необходим выбор такой конфигурации прибора (совокупность фотоприемников), обеспечивающей оптимальную помехоустойчивость и чувствительность. Для этого необходимо ввести обобщенный критерий оптимальности.

Обобщенный критерий оптимальности определяется исходя из равноценности частных критериев. В качестве обобщенного критерия используется сумма относительных отклонений частных критериев от их оптимальных значений:

$$Q(\Lambda) = \sum_{i=1}^2 [Q_i(\Lambda) - Q_i^*] / Q_i^*,$$

где  $\Lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]$  – переменная, определяющая спектральные диапазоны чувствительности пар фотоприемников;  $Q_i(\Lambda)$  – частный критерий оптимальности для заданной пары фотоприемников;  $Q_i^*$  – оптимальное значение значения частного критерия [22].

Для определенности задача оптимизации сводится к минимизации оптимального обобщенного критерия  $Q(\Lambda)$ , поэтому при расчете обобщенного критерия все критерии оптимальности должны быть приведены к минимуму.

Оптимальное значение коэффициента потерь при компенсации изначально определяется как минимальное по диапазонам чувствительности пар фотоприемников, откуда частный критерий оптимальности  $Q1(\Lambda) = q_{пк}$ .

Оптимальное отношение сигнал-шум изначально определяется как максимальное, поэтому в качестве второго частного критерия рассматривается обратное отношение  $Q2(\Lambda) = 1/\mu_{вых}$  для приведения к задаче поиска минимума.

**Результаты определения оптимальных спектральных диапазонов контроля**

**излучения пламени при горении метано-воздушных смесей**

Для автоматизированного расчета оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени метано-воздушных смесей в соответствии с рассмотренной методикой была разработана специальная программа для ЭВМ, позволяющая учитывать спектральные чувствительности фотоприемников и спектральные коэффициенты пропускания светофильтров.

Результаты определения оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени при воздействии помехи в виде излучения лампы накаливания представлены в таблице 2. Результаты приведены для четырех значений  $Q(\lambda)$  для пар фотоприемников, показавших наилучшие результаты.

Таблица 2 – Результаты определения оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени при воздействии помехи в виде излучения лампы накаливания

Фотодиод для контроля помехи (лампа накаливания)	Фотодиод для контроля пламени	$Q_{пк}$	$\mu_{вых}$	$Q(\lambda)$
Угловое поле 140 град.				
BPW34F	PD36-10	$7,6 \cdot 10^{-4}$	16,4	8,3
BPW34F	ФЭ722	$8 \cdot 10^{-4}$	68,6	1,7
BPW34F	ФЭ723	$7,6 \cdot 10^{-4}$	33,2	3,9
BPW34F	ФЭ724	$4,7 \cdot 10^{-4}$	16,8	7,5
Угловое поле 15 град.				
SFH 203 FA	PD27	$2,4 \cdot 10^{-4}$	41,8	2,9
SFH 203 FA	PD38	$3,8 \cdot 10^{-4}$	44,1	3,9
SFH 203 FA	PD42	$1,1 \cdot 10^{-4}$	14,1	7,4
SFH 203 FA	Lms36P D-05-CG	$6,2 \cdot 10^{-4}$	119	4,2

Результаты определения оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени при воздействии помехи в виде солнечного излучения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения оптимальных спектральных диапазонов контроля

излучения пламени при воздействии помехи в виде солнечного излучения

Фотодиоды для контроля помехи (солнце)	Фотодиоды для контроля пламени	$Q_{пк}$	$\mu_{вых}$	$Q(\lambda)$
Угловое поле 140 град.				
BPW34F	PD36-10	$1,9 \cdot 10^{-4}$	16,4	8,2
BPW34F	ФЭ722	$2 \cdot 10^{-4}$	68,6	1,64
BPW34F	ФЭ723	$1,9 \cdot 10^{-4}$	33,2	3,78
BPW34F	ФЭ724	$1,3 \cdot 10^{-4}$	16,8	7,56
Угловое поле 15 град.				
SFH 203 FA	PD27	$2,6 \cdot 10^{-6}$	41,8	1,85
SFH 203 FA	PD38	$8,5 \cdot 10^{-5}$	44,1	32,5
SFH 203 FA	PD42	$4,9 \cdot 10^{-5}$	14,1	24,8
SFH 203 FA	Lms43 PD-05-CG	$5,3 \cdot 10^{-5}$	13,4	26,6

Оптимальные значения при влиянии помех, как в виде излучения лампы накаливания, так и в виде солнечного излучения для фотодиодов с широким угловым полем получены для пары фотодиодов BPW34F и ФЭ722 со спектральными диапазонами чувствительности 0,75-1,1 (максимум чувствительности на длине волны 0,95 мкм) и 1–3,5 (максимум чувствительности на длине волны 2,6 мкм) соответственно.

Оптимальные значения при влиянии помех, как в виде излучения лампы накаливания, так и солнечного излучения для фотодиодов с узким угловым полем получены для пары фотодиодов SFH 203 FA и PD27 со спектральными диапазонами чувствительности 0,75-1,1 (максимум чувствительности на длине волны 0,95 мкм) и 2,5-3,5 (максимум чувствительности на длине волны 2,7 мкм) соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-06719, а «Разработка научных основ построения системы предотвращения и локализации взрывов на потенциально опасных промышленных объектах».

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ КОНТРОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОМЕХ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальное исследование компенсационного метода для повышения помехоустойчивости ОЭП обнаружения взрывов / А.И. Сидоренко, С.А. Лисаков, Е.В. Сыпин // Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 102–108.
2. High-speed Flame Detector with the Reduction of Optical Noise by the Compensation Method / S.A. Lisakov, E.V. Sypin, A.N. Pavlov, 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2015. – P. 297–301.
3. Моделирование излучения пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития / С.А. Лисаков, А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, Г.В. Леонов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Воронеж: Издательство «Научно-исследовательские публикации». – 2016. – С. 86–88.
4. Якушенков Ю.Г. Теория и расчёт оптико-электронных приборов: Учебник для студентов вузов [Текст] / Ю.Г. Якушенков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 1999. – 480 с.
5. Якушенков, Ю.Г. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах [Текст] / Ю.Г. Якушенков, В.Н. Луканцев, М.П. Колосов. – М.: Радио и связь, 1981. – 180 с.
6. ГОСТ Р 53325 – 2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования. Методы испытаний [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2012. – 270 с.
7. Кулагов В.Б. Пожарные извещатели со спектральной селекцией пламени // Датчики и системы. № 7. – 2015. С. 49–55.
8. Maclsaac D., Kanner G., Anderson G. Basic Physics of the Incandescent Lamp (Lightbulb). The Physics Teacher, Vol. 37, no. 10, 1999. – P. 520–525.
9. Излучательные свойства твердых материалов [Текст] / Справочник. Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. – М.: "Энергия", 1974. – 472 с.
10. Gueymard C. SMARTS2: A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: algorithms and performance assessment, 1995, <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-PF-270-95.pdf>.
11. Shanmugam, P., Ahn, Y. H. Reference solar irradiance spectra and consequences of their disparities in remote sensing of the ocean colour, Ann. Geophys., 25, 2007, P. 1235–1252.
12. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах: учебник / Порфирьев Л.Ф. – Изд. 2-е, стер. – СПб. [и др.] : Лань, 2013. – 386 с.
13. BPW 34 F. Silicon PIN Photodiode with Daylight Blocking Filter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic2/00215978\\_0.pdf/BPW%2034%20F.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic2/00215978_0.pdf/BPW%2034%20F.pdf)
14. ОАО "ЦКБ Ритм" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ckb-rhythm.narod.ru>
15. Оптоэлектронные приборы для ближней и средней ИК области спектра 0.7 - 5.0 мкм. Каталог ООО «АИБИ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ibsg.ru/catalogue\\_2015.pdf](http://www.ibsg.ru/catalogue_2015.pdf)
16. ОАО «НИИ «Гириконд». Фотоэлектрические и оптоэлектронные приборы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.giricond.ru/production/photoelectric/>
17. НПФ «Дилаз». Фотодиоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dilas.ru/fd/>
18. ИоффелеД. Светить и видеть в темнокрасном [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ioffeled.com/>
19. ООО «ЛЕД Микросенсор НТ». Оптоэлектронные приборы среднего инфракрасного диапазона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.lmsnt.com>
20. Предельная чувствительность фотоприемного устройства на основе фотодиодов  $A_{\{3\}B_{\{5\}}$  среднего ИК-диапазона спектра [Текст] / Г. А. Гаврилов, Б. А. Матвеев, Г. Ю. Сотникова // Письма в "Журнал технической физики". - 2011. – Т. 37, вып. 18. – С. 50-57.
21. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с: ил.
22. Батищев Д.И. Поисквые методы оптимального проектирования. – М.: «Сов. Радио», 1975. – 216 с.

**Лисаков Сергей Анатольевич**, инженер  
каф. МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, E-mail: [foxlsa@mail.ru](mailto:foxlsa@mail.ru)

**Сидоренко Антон Игоревич**, канд. техн. наук, доцент каф. МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, E-mail: [pan@bti.secna.ru](mailto:pan@bti.secna.ru)

**Павлов Андрей Николаевич**, канд. техн. наук, доцент каф. МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, E-mail: [pan@bti.secna.ru](mailto:pan@bti.secna.ru)

**Сыпин Евгений Викторович**, канд. техн. наук, профессор каф. МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, E-mail: [sev@bti.secna.ru](mailto:sev@bti.secna.ru)

**Леонов Геннадий Валентинович**, доктор. техн. наук, профессор, БТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, E-mail: [sev@bti.secna.ru](mailto:sev@bti.secna.ru)