

## ТРЕХКАНАЛЬНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР ДВУХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ

Н.Ю. Тупикина, Е.В. Сыпин, С.А. Лисаков, Е.С. Повернов, А.Н. Павлов

*В статье описывается трёхканальный оптико-электронный прибор двух спектральных отношений. Сформулированы теоретические принципы построения прибора. По результатам проведенного компьютерного моделирования прибора выработаны технические решения для его реализации. Итогом работы стало проведение испытаний разработанного прибора.*

*Ключевые слова: оптико-электронный прибор, очаг возгорания, помеха.*

### ВВЕДЕНИЕ

Наличие горючей газодисперсной атмосферы характерно для многих промышленных предприятий, где используются методы тонкого измельчения материалов (нефтегазовая и горнодобывающая промышленность, деревообрабатывающая промышленность, элеваторы, мукомольное производство и др.). Особенностью таких газодисперсных атмосфер является способность к возгоранию и последующему взрыву, что может привести к трагическим последствиям на производстве [1, 2]. Поэтому разработки технических средств обнаружения очага возгорания на ранней стадии являются актуальной задачей.

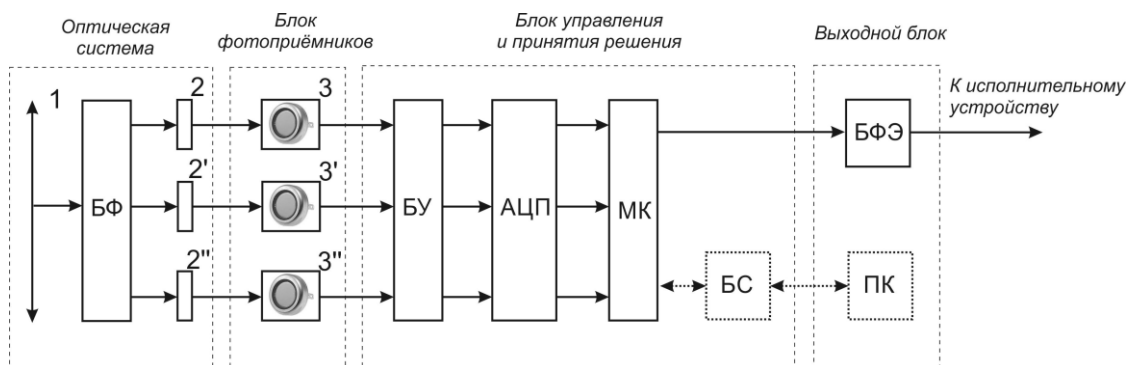
Типичным видом предприятий, где присутствует горючая газодисперсная атмосфера, являются горнодобывающие предприятия. Для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы предложен оптико-электронный прибор двух спектральных отношений (ОЭП ДСО). Отличие прибора от разработанных и используемых оптико-электронных приборов [3–5] состо-

ит в использовании программной и аппаратной избыточности. Аппаратная избыточность реализуется включением в прибор дополнительного (третьего) спектрального канала, а программная избыточность – введением дополнительных алгоритмов обработки информационных сигналов.

### РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ПРИБОРА

На основе обобщенной схемы построения оптико-электронных приборов [6, 7] предложена структурная схема ОЭП ДСО (рисунок 1).

Блок формирования информационных сигналов БФ оптической системы ОЭП ДСО осуществляет выделение из исходного потока излучения трёх информационных сигналов, т.е. в результате образуются три канала в приборе. Каждый из информационных сигналов проходит через соответствующий светофильтр 2, 2', 2'' и фокусируется на чувствительных площадках фотоприёмников 3, 3', 3''.



1 – объектив; 2, 2', 2'' – светофильтры; 3, 3', 3'' – фотоприёмники; БФ – блок формирования информационных сигналов; БУ – трёхканальный блок усиления; АЦП – трёхканальный блок аналого-цифрового преобразования сигналов; МК – блок микроконтроллера; БФЭ – блок формирования электроимпульса; БС – блок связи с персональным компьютером; ПК – персональный компьютер

Рисунок 1 – Структурная схема ОЭП ДСО

Выход каждого фотоприёмника соединяется с соответствующим входом блока усиления, оцифровывается с помощью блока аналого-цифрового преобразования сигналов и обрабатывается посредством микроконтроллерного блока. Обработка сигналов микроконтроллером в простейшем случае состоит в усреднении по времени сигналов каналов и расчёте двух отношений, например,  $U_1/U_2$  и  $U_1/U_3$ . Таким образом, реализуется метод двух спектральных отношений для трёх каналов.

По результатам сравнения полученных спектральных отношений с заранее заданными значениями микроконтроллерный блок принимает решение о возникновении (или отсутствии) очага возгорания в угловом поле прибора. В случае возникновения возгорания блок формирования электроимпульса БФЭ формирует сигнал активации устройства взрывоподавления.

Для реализации ОЭП ДСО выбрана оптическая система с использованием для каждого канала отдельного объектива, которая представляет собой три взаимно-независимых объектива, расположенных определенным образом на лицевой панели прибора

Для того чтобы выбрать рабочие спектральные диапазоны каналов прибора и кон-

структивные параметры оптической системы необходимо выполнить её компьютерное моделирование. Компьютерную модель ОЭП ДСО можно представить в виде схемы, показанной на рисунке 2.

В качестве основы для модели источника излучения и энергетической подмодели функционирования оптико-электронного прибора могут быть приняты зависимости, приведенные в источнике [6].

Поскольку каждый канал прибора содержит оптический фильтр, имеющий центральную длину волны  $\lambda_i$  и полосу пропускания  $\Delta\lambda_i$ , и фотоприёмник со спектральной чувствительностью  $S_i(\lambda)$  выходные сигналы фотоприёмника будут находиться в соответствии с формулой:

$$I_i = \int_{\lambda_i - \frac{\Delta\lambda_i}{2}}^{\lambda_i + \frac{\Delta\lambda_i}{2}} S_i(\lambda) \cdot \Delta\Phi_e(\lambda) d\lambda,$$

где  $S_i(\lambda)$  – функция спектральной чувствительности фотоприёмника,  $\Delta\Phi_e(\lambda)$  – поток излучения, приходящий на фотоприёмник.

Итогом построения энергетической подмодели функционирования ОЭП ДСО является решение основного энергетического уравнения.

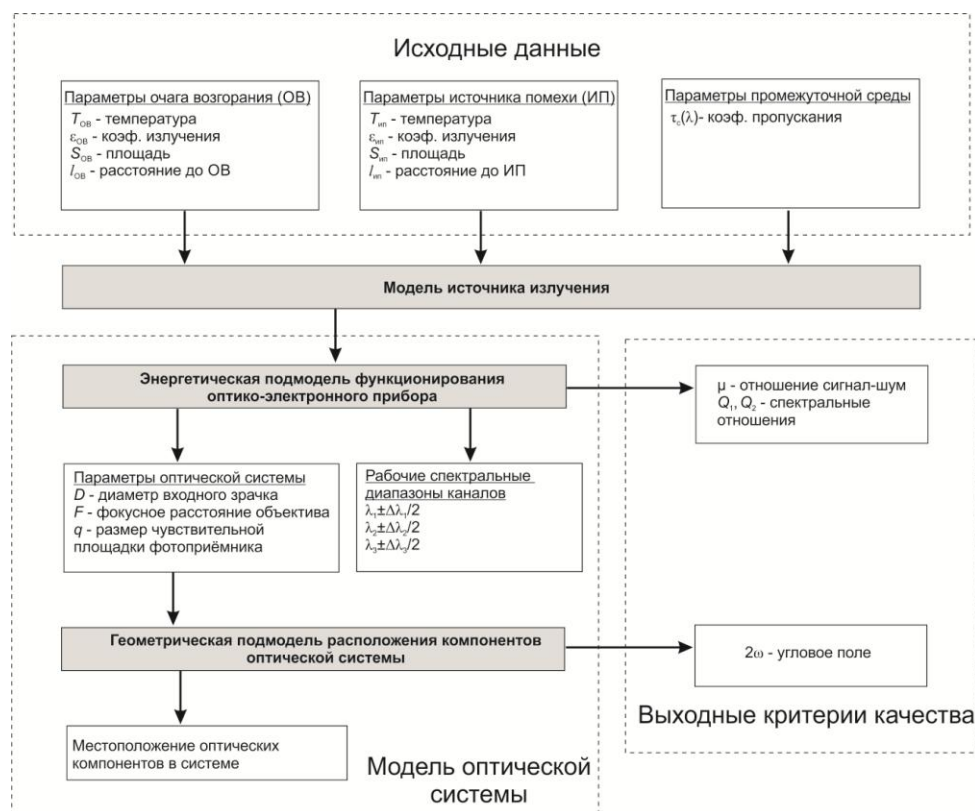


Рисунок 2 – Схема компьютерной модели оптической системы ОЭП ДСО

## ТРЕХКАНАЛЬНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР ДВУХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ

Поскольку в качестве критерия качества при построении энергетической подмодели выбрано отношение сигнал-шум на выходе оптико-электронного прибора  $\mu_{\text{вых}}$ , основное энергетическое уравнение запишется как

$$\mu_{\text{вых}} \geq \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{шум}}}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{вых}}$  – ток, протекающий через фотоприёмник и соответствующий полезному сигналу;  $I_{\text{шум}}$  – ток, протекающий через фотоприёмник и соответствующий сигналу шума.

Положенный в основу прибора метод спектрального отношения требует введение в качестве критерия качества оптической системы спектральных отношений:

$$Q_1 = \frac{I_2}{I_1} \quad (2)$$

и

$$Q_2 = \frac{I_3}{I_1}, \quad (3)$$

при этом необходимо обеспечить отличие спектральных отношений  $Q_1$  и  $Q_2$  при воздействии на входной зрачок прибора различных видов сигналов (очаг возгорания, источник оптической засветки, смесь сигналов).

В результате решения основного энергетического уравнения (1) для каждого канала прибора и выражений для определения спектральных отношений (2) и (3) выбраны спектральные диапазоны каналов:  $750 \pm 40$  нм;  $950 \pm 40$  нм;  $1550 \pm 10$  нм. Диаметр входных зрачков принят равным 30 мм.

Выходным критерием качества при построении геометрической подмодели расположения компонентов оптической системы является угловое поле  $2\omega$ , которое определяется площадью охраняемой зоны:

$$2\omega = 2\arctg\left(\frac{1}{l}\sqrt{\frac{S_{\text{оз}}}{\pi}}\right),$$

где  $l$  – расстояние до входного зрачка прибора,  $S_{\text{оз}}$  – площадь охраняемой зоны.

В результате построения геометрической модели получены выражения для определения площади охраняемой зоны  $S_{\text{оз}}$  на заданном расстоянии  $l$  от входного зрачка прибора и определено положение входных зрачков, при котором площадь  $S_{\text{оз}}$  имеет максимальное значение (рисунок 3) [8, 9]. Входные зрачки объективов следует располагать в одной плоскости с центрами в вершинах равностороннего треугольника, при этом они касаются друг друга и направлены на источник возгорания, а оптические оси каналов параллельны.

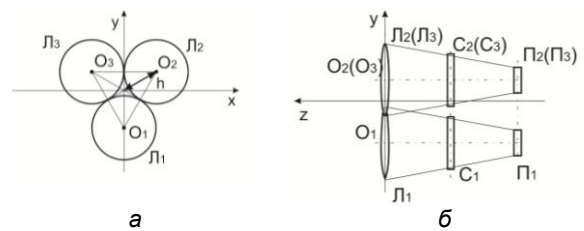


Рисунок 3 – Оптическая система оптико-электронного прибора двух спектральных отношений

Результаты геометрического моделирования положения входных зрачков оптической системы показали, что значение площади охраняемой зоны в основном определяется угловым полем одного канала  $2\omega_1$ .

Электронная часть ОЭП ДСО обеспечивает выполнение следующих функций:

1) преобразование сигналов с фотоприёмников (токов) в напряжение, их усиление и оцифровку;

2) нахождение спектральных отношений  $Q_1$  и  $Q_2$ ;

3) определение вида поступающего сигнала (полезный сигнал или помеха) и принятие решения о возникновении очага возгорания;

4) формирование сигнала на активацию взрывоподавляющего устройства в случае принятия решения о возгорании;

5) подключение к персональному компьютеру по стандартному интерфейсу RS-232.

При этом первую функцию выполняет блок приёма и усиления, остальные – блок управления и принятия решения (см. рисунок 1).

Блок приёма и усиления строится на основе микросхем операционных усилителей. Для реализации блока выбрана микросхема AD8610 [10], имеющая малую входную ёмкость, высокое входное сопротивление и широкую полосу пропускания. Блок преобразования и усиления включает три микросхемы AD8610 (по одной на каждый канал).

Основным элементом блока управления и принятия решения является микроконтроллер. Использование микроконтроллера позволяет достаточно просто реализовать алгоритмы по принятию прибором решения, появляется возможность накопления и хранения информации о контролируемом объекте, а также возможность адаптивной настройки прибора на конкретный объект контроля. Для реализации блока управления и принятия решения выбран микроконтроллер ATmega8L [11].

## ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В результате компьютерного моделирования ОЭП ДСО были определены конструктивные параметры компонентов оптической системы прибора и их взаимное расположение, что позволило выбрать конкретные оптические компоненты. Выбор оптических компонентов, за исключением фотоприёмников, осуществлялся по каталогу Edmund Optics Inc. [12]. Для использования в приборе выбраны:

– двояковыпуклые оптические линзы имеющие диаметр и фокусное расстояние равные 30 мм;

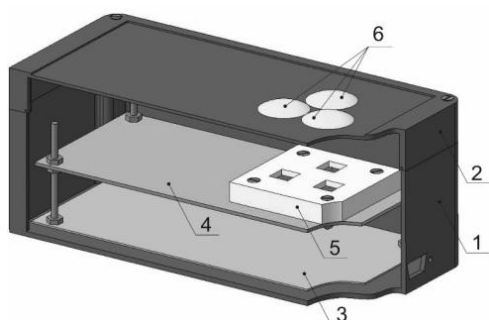
– светофильтр для канала 1, имеющий центральную длину волны 750 нм и ширину полосы пропускания 40 нм;

– светофильтр для канала 2, имеющий центральную длину волны 950 нм и ширину полосы пропускания 50 нм;

– светофильтр для канала 3, имеющий центральную длину волны 1550 нм и ширину полосы пропускания 12 нм.

В приборе используются приёмники излучения S1227-1010BR и S1337-1010BR, фирмы Hamamatsu [13] и фотоприёмник ФД «Призма-5» [14].

На рисунке 4 показана разработанная трёхмерная модель прибора. Для того чтобы показать детали, установленные внутри корпуса на рисунке 4 не показана боковая стенка.



1 – корпус, 2 – крышка корпуса, 3 – основание, 4 – печатная плата, 5 – крепление светофильтров, 6 – линзы

Рисунок 4 – Трёхмерная модель прибора

Следующим этапом работы является непосредственная реализация прибора и проведение испытаний.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытания ОЭП ДСО проводились с помощью лабораторного стенда для исследования оптико-электронных приборов обнаружения начальной стадии возгорания [15].

С помощью указанного стенда проводились следующие виды испытаний:

– определение вероятности обнаружения очага возгорания и вероятности ложного срабатывания;

– определения зависимости напряжения сигналов в каналах прибора от температуры;

– определения порога чувствительности по температуре;

– определения углового поля.

Лабораторные испытания проводились без учёта ряда факторов, в частности не учитывалось влияние промежуточной среды, поэтому следует провести испытания разработанного прибора в условиях приближенных к реальным условиям его эксплуатации. Исходя из особенностей эксплуатации ОЭП ДСО, большое значение имеет значение вероятности обнаружения очага возгорания и время обнаружения очага возгорания. Поэтому эти два параметра были определены в условиях близким к реальным с помощью установки для исследования параметров оптико-электронных приборов обнаружения взрывов газопылевоздушных смесей [16].

Для проведения испытаний были разработаны соответствующие методики [17].

Проведенные исследования показали, что прибор обеспечивает:

– угловое поле:  $10 \pm 1$  градус;

– дальность действия: 10 м;

– порог чувствительности по температуре:  $755 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

– время обнаружения очага возгорания:  $2,9 \pm 0,7$  мс;

– вероятность обнаружения очага возгорания в отсутствии/присутствии внешних оптических помех: не менее 0,95;

– вероятность ложного срабатывания: не более 0,05.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения настоящей работы выполнено проектирование и техническая реализация оптико-электронного прибора двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы. Для указанного прибора разработаны теоретические принципы построения и выполнена их техническая реализация, заключительным этапом стало проведение испытаний разработанного прибора. В ходе испытаний установлено, что прибор имеет вероятность обнаружения очага возгорания в присутствии внешних помех 0,95, что является лучшим значением среди аналогичных оптико-электронных приборов для контроля взрыво-

опасной пылегазовой атмосферы. Остальные параметры разработанного прибора сопоставимы с параметрами приборов-аналогов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нецепляев, М. И. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М. И. Нецепляев [и др.]. – М. : Недра, 1992. – 298 с.

2. Котляревский, В. А. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : учебное пособие в 3 книгах: кн. 1 / под ред. К. Е. Кочеткова, В. А. Котляревского, А. В. Забегаева. – М. : Издательство АСВ, 1995. – 320 с.

3. Terentiev, S. A. Designing of Laboratory Sample of the Pyrometric Gauge with Cylindrical Lenses / S. A. Terentiev, D. A. Gerasimov, A. I. Sidorenko, A. N. Pavlov, E. V. Sypin // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2012: Conference proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2012. – P. 257–259.

4. Sidorenko, A. I. Laboratory Pattern of Position Pyrometric Detector of Explosion With Field Stop / A. I. Sidorenko, A. N. Pavlov, E. V. Sypin // 14th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2013: Proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2013. – P. 229–233.

5. Повернов, Е. С. Лабораторный образец быстродействующего многопорогового прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций во взрывоопасной атмосфере / Е. С. Повернов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 172–178.

6. Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов : учебник / Ю. Г. Якушенков. – М. : Логос, 2011. – 568 с.

7. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов : учебное пособие / М. М. Мирошников. – 3-е изд., исп. и доп. – СПб : Издательство «Лань», 2010. – 704 с.

8. Tupikina, N. Y. Investigation of the Three-Channel Optical System with Separated Lenses of the Channels / N. Y. Tupikina, E. V. Sypin // 14th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2013: Proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2013. – P. 240–245.

9. Тупикина, Н. Ю. Методика расчёта параметров оптической системы трёхканального пирометрического прибора с отдельными объективами каналов / Н. Ю. Тупикина, Е. В. Сыпин, Е. Я. Кулявцев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 1. – С. 36–42.

10. AD8610 | datasheet and product info Precision, Low Input Bias Current, Wide BW JFET Single Op Amp | Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/en/products/amplifiers/operational-amplifiers/high-voltage-amplifiers-greaterthanequalto-12v/ad8610.html#product-overvie>.

11. ATmega8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atmel.com/devices/atmega8.aspx>.

12. Online Catalog of Precision Optical Components | Edmund Optics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.edmundoptics.co.uk/products/>.

13. Si photodiodes:Si photodiodes | Hamamatsu Photonics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/category/3100/4001/4103/index.html>.

14. Германиевые фотодиоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ckb-rhythm.narod.ru/tablGe.htm>.

15. Тупикина, Н. Ю. Разработка стенда для исследования параметров оптико-электронных приборов обнаружения начальной стадии возгорания / Н. Ю. Тупикина, Е. В. Сыпин // Датчики и системы. – 2013. – № 10 (173). – С. 32–35.

16. Sidorenko, A. I. Automated Control System of Experimental Unit For Exercise of Dust-Gas-Air Mixture Explosions / A. I. Sidorenko, I. S. Zorin, A. N. Pavlov, E. V. Sypin // 14th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2013: Proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2013. – P. 249–252.

17. Tupikina, N. Y. Development of the Testing Technique of Main Parameters for Two Spectral Ratios Optical-Electronic Device / N. Y. Tupikina, E. V. Sypin, S. A. Lisakov, A. N. Pavlov, G. V. Leonov // 16th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2015: Conference proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2015. – P. 325–329.

**Тупикина Н.Ю.**, старший преподаватель кафедры МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, e-mail: [tnu@bti.secna.ru](mailto:tnu@bti.secna.ru).

**Сыпин Е.В.**, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВО «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).

**Лисаков С.А.**, инженер кафедры МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, e-mail: [foxlsa@mail.ru](mailto:foxlsa@mail.ru).

**Повернов Е.С.**, начальник центра ВСОУП, БТИ (филиал) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Россия, 659305, Бийск, ул. Трофимова 27, тел.: (3854) 432450, e-mail: [evgeniy@bti.secna.ru](mailto:evgeniy@bti.secna.ru).

**Павлов А.Н.**, канд. техн. наук, доцент кафедры МСИА, БТИ (филиал) ФГБОУ ВО «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).