

## ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ФОТОДИОДА В СХЕМНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АНАЛОГОВОГО БЛОКА ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ

Соломичев, Р.И., аспирант

(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина)

**Общая постановка проблемы.** Непрерывная интенсификация добычи угля ежегодно ставит все новые задачи повышения безопасности проводимых горных работ в шахтах. Дальнейшая разработка комплекса технических, а так же организационных мер по профилактике взрывов пылегазовых смесей в рудничной атмосфере должна быть направлена на обеспечение стабильного показателя безаварийности и безопасности труда горнорабочих. Существующие измерители и методы определения уровня запыленности не соответствуют современным требованиям по быстродействию, точности и надежности, что повышает риск возникновения взрывоопасной ситуации в угольной шахте.

При анализе методов измерения был выбран оптический метод светового поглощения зондирующего излучения, как наиболее эффективный, который лишен перечисленных выше недостатков по быстродействию и точности, так как скорость измерений определяется в основном производительностью вычислительной техники и временными параметрами оптоэлектронных компонент – фото- и светодиода. В свою очередь точность измерения данным методом определяется не только характеристиками, но и выбором режима работы светодиода.

**Постановка цели и задач исследования.** Целью данной работы является обоснование и выбор такого режима работы светодиода, который будет максимально эффективно преобразовывать интенсивность прошедшего через оптический канал (ОК) зондирующего излучения в информативный электрический параметр (ток или сопротивление).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие способы включения светодиода в электронную схему и выбрать режим его работы;
- поставить требования к аналоговому блоку (предварительному и нормирующему усилителям) канала измерения концентрации пыли.

**Решение задач и результаты исследований.** Существует два режима работы светодиода: гальванический и светодиодный. В фотогальваническом режиме сам диод является источником ЭДС с большим внутренним сопротивлением, при этом к нему ни какое напряжение не прикладывается. Недостаток фотогальванического режима заключается в ослаблении полезного сигнала с ростом уровня паразитной засветки, но уровень шумов остается постоянным и не растет. В светодиодном режиме р-п переход смещается обратным напряжением, величина которого зависит от конкретного светодиода (от единиц до сотни вольт) – чем больше смещение, тем быстрее он будет работать, и больше токи через него будут течь. Недостаток светодиодного режима в том, что с ростом обратного тока, в последствии увеличения напряжения или освещения, увеличивается уровень шумов, а уровень полезного сигнала в целом остается постоянным, но в этом режиме диод имеет меньшую постоянную времени.

Анализируя способы включения и их недостатки, можно прийти к выводу, что основным критерием выбора режима работы светодиода будет отношение сигнал-шум, при этом фотогальванический режим обладает неизменным его уровнем, а от паразитной засветки можно избавиться при использовании импульсного режима работы.

Выбранный оптический метод основан на явлении поглощения света, при прохождении его через пылегазовую среду. Согласно закону Бугера-Ламберта-Бера оптическая плотность  $\tau_\lambda$  пылегазовой среды толщиной  $l$  прямо пропорциональна  $K(\lambda, C_n)$  – спектральному показателю ослабления, который характеризует ослабление единичным объемом среды зондиру-

ющего излучения и содержащий независимо рассеивающие частицы пыли с концентрацией  $C_{П}$  [1]:

$$\tau_{\lambda} = \ln T_{\lambda} = \ln \frac{I_{изл0}(\lambda)}{I_{изл}(\lambda)} = K(\lambda, C_{П}) \cdot \ell, \quad (1)$$

где  $T_{\lambda}$  – спектральный коэффициент пропускания;  $I_{изл0}(\lambda)$  – начальная интенсивность излучения источника излучения, Вт/м<sup>2</sup>,  $I_{изл}(\lambda)$  – интенсивность излучения, прошедшая сквозь пылегазовый слой, Вт/м<sup>2</sup>,  $\lambda$  – длина волны излучения, м.

Анализируя характеристики взрывчатости угольной пыли и функцию распределения частиц по размерам в зоне проведения измерений [1,2], были установлены предельные размеры фракций пыли: от  $D_{min} = 1$  до  $D_{max} = 5$  мкм. В таком случае диапазон длин волн оптического излучения, который необходимо использовать при измерении концентраций пыли с учетом ограничений снизу (сверху), составит:  $\lambda_{min} > (\pi \cdot D_{32}) / 30$ ,  $\lambda_{min} > 0,351$  мкм;  $\lambda_{max} < 0,1 \cdot \pi \cdot D_{32}$ ,  $\lambda_{max} < 1,055$  мкм, где  $D_{32}$  – средний объемно-поверхностный диаметр частиц,  $D_{32} = 3,36$  мкм.

Функциональная схема канала измерения на основе данного метода приведена на рисунке 1, состоит из оптоэлектронного и аналогового блоков. Входной световой поток с интенсивностью оптического излучения  $I_{изл0\lambda}$ , формируемый источником излучения (ИИ) – светоизлучающим диодом (СИД), поступает в открытый оптический канал (ОК). Интенсивность потока ослабляется вследствие его поглощения и рассеяния частицами пыли в ОК с длиной трассы  $l$  и концентрацией  $C_{П}$ , после чего он попадает на приемник светового излучения (ПИ) – фотодиод (ФД). Интенсивность выходного излучения  $I_{изл\lambda}(C_{П}, l)$  преобразуется в электрический ток  $I_{ФД\lambda}(C_{П}, l)$  фотодиодом, после чего в аналоговом блоке сигнал преобразуется из тока в напряжение, частично усиливается предварительным усилителем (ПУ) и приводится к унифицированному сигналу с диапазоном изменения от 0 до 5 В нормирующим преобразователем (НП) для дальнейшей обработки в микропроцессорной системе.

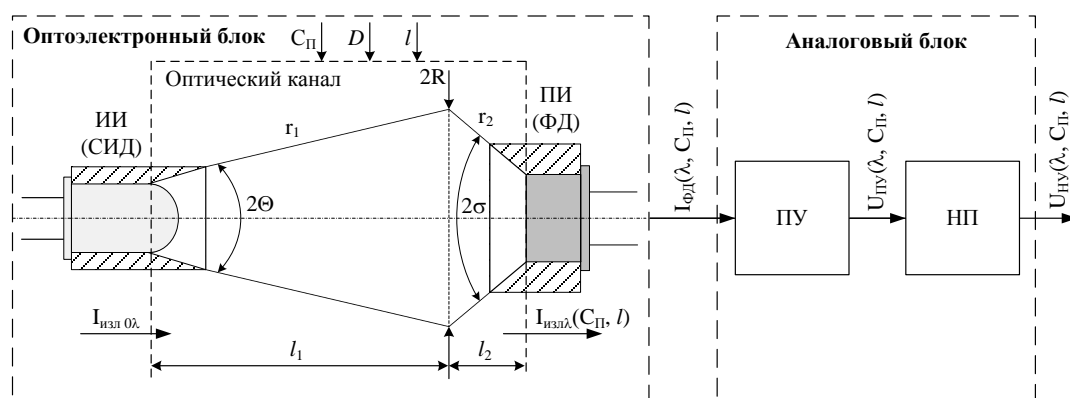


Рисунок 1 – Функциональная схема измерительного канала концентрации пыли

На приведенной схеме ОК (рисунок 1) обозначено:  $\Theta$  – половинный угол интенсивности излучения СИД;  $\sigma$  – половинный угол чувствительности ФД;  $l_1 + l_2 = l$  – длина трассы ОК;  $2R$  – диаметр пятна рассеяния потока светового излучения СИД с учетом угла обзора ФД. Для того, чтобы не применять дополнительное оптическое оборудование (концентрические линзы, коллиматоры), которое собирает и направляет излучение в окно ПИ, необходимо использовать СИД с узкой диаграммой направленности (минимальный угол  $\Theta$ ) и высокой величиной силы излучения.

Современная промышленность предоставляет широкий выбор образцов электронных компонент, а именно свето- и фотодиодов с различными характеристиками спектра, мощности, чувствительности, углов излучения и приема светового излучения. Так, исходя из диапазона длин волн излучения, от  $\lambda_{min}$  до  $\lambda_{max}$ , на основе разработанной математической модели

измерителя концентрации пыли предложено использовать фотодиод фирмы Vishay Semiconductors – BPW21R. Данный ФД имеет высокую интегральную чувствительность ( $s_{инт}(\lambda)=0,0131$  А/Вт) к спектру излучения с длинами волн от  $\lambda_1 = 0,347$  мкм до  $\lambda_2 = 0,813$  мкм при высоких показателях быстродействия (время нарастания импульса  $t_{нар} = 3,1$  мкс, время спада  $t_{пад} = 3,0$  мкс). Так же предложено использовать ультра яркие СИД с минимальным углом расхождения излучения ( $15^\circ$ ) C503-BAN (длина волны 470 нм), C503-GAN (527 нм), C503-RAN (624 нм) и силой света от 8600 до 46100 мкд, тогда как другие СИД имеют угол расхождения  $\Theta$  от  $20^\circ$  до  $80^\circ$  и силу света не более 3000 мкд.

В то же время поток излучения СИД, проходя через ОК, попадает на чувствительную поверхность фотодиода, который имеет определенную характеристику спектральной чувствительности  $s_{ФД}(\lambda)$ , отличную от спектра СИД. Параметром, описывающим данное несоответствие, является интегральная чувствительность ФД к сигналу СИД ( $s_{синт}$ ) [3]:

$$s_{синт} = s_{инт} \cdot \frac{\int_{\lambda_{мин}}^{\lambda_{макс}} s_{СИДнорм}(\lambda) \cdot s_{ФД}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{мин}}^{\lambda_{макс}} s_{СИДнорм}(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где  $s_{СИДнорм}(\lambda)$  – нормированная спектральная плотность потока зондирующего излучения;  $s_{ФД}(\lambda)$  – нормированная спектральная чувствительность ФД;  $s_{инт}(\lambda)$  – интегральная чувствительность фотоприемника, А/Вт;  $(\lambda_{мин} \div \lambda_{макс})$ , мкм – диапазон спектральной чувствительности ФД.

В оговоренной выше оптической схеме измерения, не предусматривающей фокусировки зондирующего излучения СИД, необходимо учитывать рассеяние светового потока, связанное с геометрическими параметрами ИИ, ПИ и длиной базы ОК, а именно его долю, которая попадает в окно ФД. Данный фактор учитывает коэффициент ввода оптического излучения  $K_{ВВ}(l)$ , связанный с пространственными характеристиками излучения СИД и приема ФД, описывается выражением:

$$K_{ВВ}(l) = \frac{S_{окна ФД}}{S_{пят на СИД}(l) + S_{излуч СИД}} \cdot \frac{S_{излуч СИД}}{S_{окна ФД}}, \quad (3)$$

где  $S_{окна ФД}$  – площадь окна фотодиода;  $S_{пят на СИД}(l)$  – площадь пятна расхождения луча на расстоянии  $l$  от СИД;  $S_{излуч СИД}$  – площадь излучающей поверхности СИД.

Согласно проведенному математическому моделированию канала измерения концентрации пыли, поток излучения, измеряемый фотодиодом, который прошел через ОК с расстоянием  $l$  будет равен:

$$\Phi_{ФД\lambda}(\lambda, l, C_{П}) = T_{\lambda}(\lambda, l, C_{П}) \cdot K_{ВВ}(l) \cdot \frac{1}{k_2} \cdot \int_{\lambda_{мин}}^{\lambda_{макс}} S_{0СИД}(I_{изл0\lambda}) \cdot s_{ФД}(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где  $k_2$  – коэффициент использования излучения оптической системой (принимается за эталон зрение человека-оператора),  $T_{\lambda}(\lambda, l, C_{П})$  – спектральный коэффициент пропускания зондирующего излучения в ОК, определяется уравнением Ми при решении задачи рассеяния и поглощения света [1],  $S_{0СИД}(I_{изл0})$  – абсолютное значение спектральной плотности мощности излучения СИД, определяется выражением [3]:

$$S_{0СИД}(I_{изл0}) = \frac{\Phi_{e0СИД\lambda} \cdot 2\sqrt{\ln(2)}}{\Delta\lambda \cdot \sqrt{\pi}}, \quad (5)$$

где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра оптического излучения СИД.

Выражение для выходного тока фотодиода, в зависимости от длины волны излучения, длины базы ОК и концентрации пыли определяется соотношением:

$$I_{\text{ФД}}(\lambda, l, C_{\text{П}}) = \Phi_{\text{ФД}}(\lambda, l, C_{\text{П}}) \cdot S_{\text{сигн}}. \quad (6)$$

Имея необходимые конструктивные параметры выбранных оптоэлектронных компонент, получена зависимость коэффициента ввода (в процентах) от длины базы ОК от 5 до 15 см при углах расхождения  $15^\circ$  (зависимость 1, система СИД С503 – ФД ВРW21R),  $20^\circ$  и  $30^\circ$  (зависимости 2 и 3 соответственно, система СИД иного типа – ФД ВРW21R) приведены на рисунке 1. При добавлении пыли происходит ослабление светового потока, характеризующееся показателем ослабления излучения (1), который определяется с помощью разработанного итерационного алгоритма вычисления коэффициентов уравнения Ми по рекуррентным соотношениям [4]. В этой связи, изменение выходного тока ФД по формуле (6) от концентрации пыли ( $0..3 \text{ г/м}^3$ ) будет иметь вид, как показано на рисунке 2 (при  $l = 0,1 \text{ м}$ ).

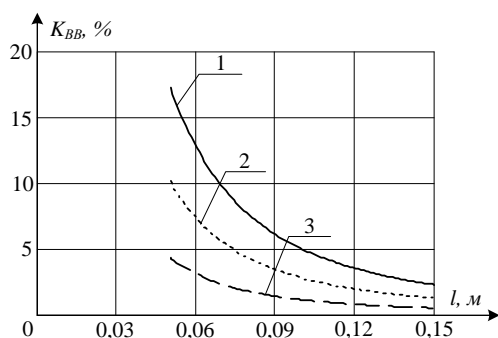


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента ввода от длины базы ОК

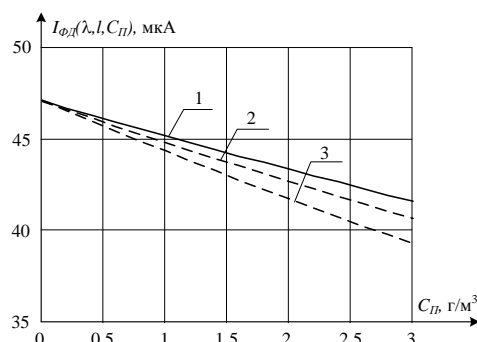


Рисунок 2 – Зависимость тока ФД от концентрации пыли

Из зависимостей, приведенных на рисунке 1, следует, что наибольший коэффициент ввода достигается с применением узконаправленного излучения СИД (при  $\Theta = 15^\circ$  и  $l = 10 \text{ см}$   $K_{\text{ВВ}}(l) = 5\%$ ), а при увеличении  $\Theta$  до  $30^\circ$  и  $l = 10 \text{ см}$   $K_{\text{ВВ}}(l)$  снижается примерно в пять раз и составляет  $1,1\%$ .

На рисунке 2 обозначено: 1 – зависимость тока ФД от концентрации пыли при  $\lambda_{\text{СИД}} = 470 \text{ нм}$ ,  $\Delta\lambda_{\text{СИД}} = 44 \text{ нм}$ ; 2 –  $\lambda_{\text{СИД}} = 527 \text{ нм}$ ,  $\Delta\lambda_{\text{СИД}} = 40 \text{ нм}$ ; 3 –  $\lambda_{\text{СИД}} = 624 \text{ нм}$ ,  $\Delta\lambda_{\text{СИД}} = 38 \text{ нм}$ . В начальной точке ( $C_{\text{П}} = 0$ ) ток ФД нормируется к единому значению на различных длинах волн СИД за счет изменения его интенсивности излучения. При повышении концентрации пыли и за счет отношения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц к длине волн наклон характеристик изменяется от  $13,0 \text{ мкА}/(\text{г/м}^3)$  (зависимость 3) до  $13,9 \text{ мкА}/(\text{г/м}^3)$  (зависимость 1), что дает основание утверждать о возможности решения обратной задачи: установление дисперсного состава исследуемого объема пыли на основе измеренного ослабления светового излучения на различных длинах волн.

Для последующей обработки информационный сигнал – ток ФД, необходимо преобразовать в напряжение с помощью ПУ, выполненного на основе операционного усилителя (ОУ) по инвертирующей схеме включения согласно зависимости:

$$U_{\text{ПУ}}(\lambda, l, C_{\text{П}}) = -I_{\text{ФД}}(\lambda, l, C_{\text{П}}) \cdot R_1, \quad (7)$$

где  $R_1$  – сопротивление, которое преобразует ток ФД в напряжение, выбирается в зависимости емкости р-п перехода ФД.

Приведение сигнала напряжения с выхода ПУ к унифицированному диапазону от 0 до 5 В, осуществляется с помощью НУ, который необходимо выполнить в виде не инвертирующего сумматора на основе ОУ. На не инвертирующий вход подается сигнал с выхода

ПУ, который суммируется с напряжением смещения  $U_{смещ}$ , что позволяет устанавливать ноль на выходе НУ, когда концентрация пыли равна нулю согласно выражению:

$$U_{НУ}(\lambda, l, C_{П}) = \left(1 + \frac{R_{OC}}{R}\right) \cdot (U_{ПУ}(\lambda, l, C_{П}) + U_{смещ}). \quad (8)$$

Зависимости напряжений на выходе ПУ и НУ от концентрации пыли в ОК ( $C_{П} = 0..3 \text{ г/м}^3$ ) приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

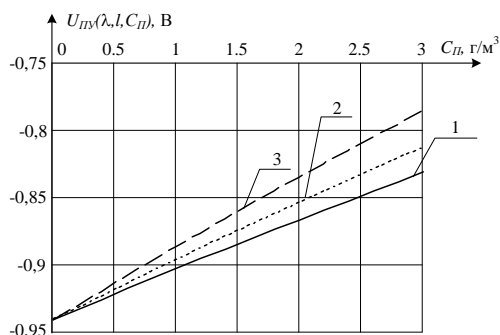


Рисунок 3 – Зависимость выходного напряжения ПУ от концентрации пыли

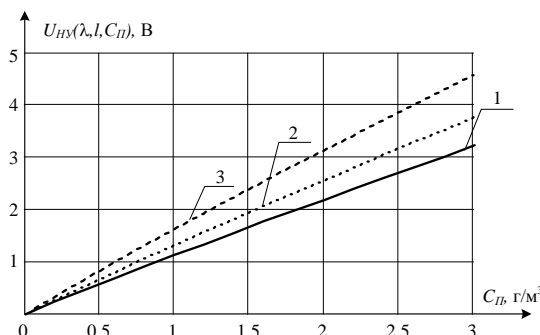


Рисунок 4 – Зависимость выходного напряжения НУ от концентрации пыли

На рисунках 3 и 4 обозначены зависимости: 1 – при  $\lambda_{СИД} = 470 \text{ нм}$ ,  $\Delta\lambda_{СИД} = 44 \text{ нм}$ ; 2 –  $\lambda_{СИД} = 527 \text{ нм}$ ,  $\Delta\lambda_{СИД} = 40 \text{ нм}$ ; 3 –  $\lambda_{СИД} = 624 \text{ нм}$ ,  $\Delta\lambda_{СИД} = 38 \text{ нм}$ . Из зависимости на рисунке 4 видно, что НУ должен иметь коэффициент усиления равный 5 и выполнять смещение начальной точки в ноль. При повышении объемной концентрации пыли в ОК выходное напряжение аналогового блока линейно возрастает. В зависимости от длины волны зондирующего излучения наклон характеристик различный, что способствует определению дисперсности пыли в ОК.

### Выводы

1. На основе анализа режимов работы фотодиода был выбран фотогальванический режим, который при измерениях обладает наибольшим соотношением сигнал-шум, в отличие от фотодиодного режима.

2. Составлена математическая модель канала измерения концентрации пыли, которая учитывает пространственные характеристики излучения и приема светового излучения (коэффициент ввода), позволила получить зависимость преобразования интенсивности зондирующего излучения в выходной ток фотодиода (в диапазоне от 38 до 47 мкА) при изменении концентрации пыли в оптическом канале измерения от 0 до 3 г/м<sup>3</sup>.

3. Поставлены требования к аналоговому блоку канала измерения концентрации пыли на основе полученной его математической модели: предварительный усилитель необходимо выполнить по инвертирующей схеме, а нормирующий усилитель – в виде не инвертирующего сумматора с коэффициентом усиления не менее 5 со смещением нуля, что в совокупности даст возможность реализовать макетный образец аналогового блока измерителя концентрации пыли.

### Перечень ссылок

1. Архипов В.А., Шереметьева У.М. Аэрозольные системы и их влияние на жизнедеятельность: Учебное пособие. – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета. 2007. – 136 с.

2. Ващенко В.И. Пыль угольных шахт. / В.И. Ващенко, А.К. Носач, В.В. Яворович. // Вести Донецкого горного института, 2011. – Выпуск 11. – С. 35-44.

3. Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К., Мусяков В.Л. Источники и приёмники излучения. Пособие по решению задач. – СПб.: СБГУ ИТМО, 2006. – 85 с.