



DOI: 10.5862/JPM.218.6

УДК 537.86:519.2, 581.785.4, 681.883.63

В.Д. Купцов, В.П. Валухов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ФОТОИНТЕГРАТОР ДЕТЕКТОРА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЯДЕР КОНДЕНСАЦИИ

В статье представлены результаты разработки фотометра детектора молекулярных ядер конденсации (MCN) и исследования его пороговой чувствительности к оптическому сигналу. На основе обобщения прежних исследований фотоприемных устройств оптико-электронных систем определен наиболее рациональный прием расчета чувствительности этих систем — через создание эквивалентных шумовых схем и интегрирование временных зависимостей импульсной функции интегратора. Проведенный расчетный анализ позволил внести ряд усовершенствований в разработанный фотоинтегратор.

ИНТЕГРАТОР, ПОРОГОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, ФОТОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО, ФОТОМЕТР, ДЕТЕКТОР МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЯДЕР КОНДЕНСАЦИИ.

Введение

Интеграторы фототока (фотоинтеграторы) составляют основу оптических фотометров, позволяющих прецизионно измерять чрезвычайно малые световые потоки. Такие фотометры используются в физическом эксперименте в том случае, если необходимо получить предельно достижимую чувствительность оптической измерительной системы при относительно невысоких скоростях протекания физического процесса. Применяются фотометры в самых разных областях жизнедеятельности человека, начиная с медицины (например, в системах измерения оптических плотностей растворов и аэрозолей) и заканчивая (в качестве примера) горно-обогачительными технологиями (в рентгеновских сцинтилляционных детекторах). Актуальной проблемой создания высокочувствительных фотометров является снижение порогового значения оптической мощности, регистрируемой фотоприемным устройством. В данной статье представлены результаты разработки фотометра детектора молекулярных ядер конденсации (MCN — Molecular Condensation Nuclei), отвечающего современным требованиям.

Цель настоящей статьи — провести рациональный анализ пороговой чувстви-

тельности разработанного детектора к оптическому сигналу и на этой основе максимально усовершенствовать это фотоприемное устройство.

Фотометр детектора молекулярных ядер конденсации

Фотометр — один из основных элементов высокочувствительных газоанализаторов на основе явления конденсации молекулярных ядер (MCN). Принцип работы таких газоанализаторов заключается в ряде последовательных физико-химических воздействий на непрерывный поток газа, содержащий примеси, подлежащие идентификации и количественному анализу [1, 2]. В результате указанных воздействий на молекулы детектируемого вещества образуется монодисперсный аэрозоль с размерами частиц 0,23 — 0,25 мкм [3]. Светорассеяние каждой частицы имеет интерференционный немонотонный характер [4]. На заключительной стадии образования аэрозоля измеряется его светорассеяние нефелометрическим методом. Сигнал фотоприемного устройства нефелометра пропорционален концентрации определяемой примеси на входе в детектор. При этом размер частиц аэрозоля, полученного в результате воздействия, оказывается примерно в 1000 раз больше размера исходной молекулы детектируемо-

го вещества. Соответственно способность детектируемой частицы аэрозоля отражать падающий свет увеличивается примерно в $10^{14} - 10^{16}$ раз, по сравнению с таковой для исходной молекулы, и это позволяет надежно обнаруживать молекулы исходного вещества, заключенные в аэрозоль, по светорассеянию частиц аэрозоля [5].

Механизм физико-химического воздействия пересыщенного пара на MCN исследован в работах [6, 7]. В первой из них рассмотрены вопросы о работе, затраченной на образование кластеров, и об их равновесных концентрациях. Выведено уравнение, связывающее работу по переносу молекулярного ядра конденсации из газовой фазы в гомогенный кластер с работой по разрыву отдельных контактов. В работе [7] представлены модельные расчеты нуклеации пересыщенного пара ди(2-этилгексил)себагината (DEHS) на молекулах оксида железа FeO, выполненные с использованием простейших структурных моделей кластеров. Установлено, что большую роль в нуклеации DEHS на молекулах FeO играет взаимодействие электрических зарядов молекулярных ионов оксида железа с эфирными группами молекулы DEHS. Выявлено принципиальное значение прочности контакта MCN с первой молекулой конденсата. Прочность этого контакта существенно

влияет как на коэффициент превращения MCN в аэрозольные частицы, так и на характер зависимости этой величины от фона спонтанной конденсации.

Как уже отмечалось, измерение светорассеяния полученного аэрозоля производится нефелометрическим методом. Для этого внутреннюю полость аэрозольного фотометра освещают через специальное отверстие лампой или лазером и измеряют светорассеяние под некоторым углом к падающему свету. Фототок приемного устройства аэрозольного фотометра пропорционален счетной концентрации аэрозоля и, в конечном счете, концентрации молекул детектируемой примеси на входе в детектор MCN.

Разработанная конструкция аэрозольного фотометра для исследования светорассеяния детектора MCN представлена на рис. 1 [3].

Фотометр выполнен по нефелометрической схеме, т. е. в нем измеряется рассеянное оптическое излучение под углами, отличными от нулевого значения. Поток газа-носителя (воздуха) с аэрозольными частицами поступает в камеру нефелометра через верхнее сопло 1 входа газа-носителя, освещается световым потоком от излучателя 4 (лазер, светодиод или лампа накаливания). Рассеянное излучение попадает на коллимирующую линзу и детектируется фотоприемным устройством 6, расположенным под углом 40° по отношению к падающему свету. Для защиты от попадания на детектор паразитных засветок от достаточно мощного источника света, фотоприемное устройство расположено в длинном тубусе 7, а напротив излучателя и фотоприемного устройства расположены ловушки 8 и 3 со светопоглотителями. Выводится поток газаносителя через штуцер 2. Фотометрируемый объем внутри камеры фотометра составляет $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, что представляет собой значительную величину по сравнению с аналогичными объемами фотометров в существующих спектроанализаторах. Выходным сигналом фотодетектора фотометра является ток, изменяющийся пропорционально световому потоку в пределах от $1 \cdot 10^{-15}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ А. На выходе фотоприемного устройства интегри-

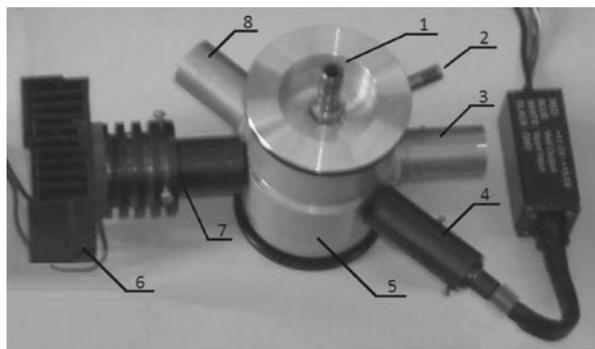


Рис. 1. Внешний вид малогабаритного аэрозольного фотометра:

- 1, 2 – входное и выходное отверстия газа-носителя;
- 3 – светопоглотитель фотоприемного устройства;
- 4 – лазер; 5 – фотометрируемый объем;
- 6 – фотоприемное устройство; 7 – тубус фотоприемного устройства; 8 – светопоглотитель лазера

рующего типа формируется электрический сигнал, пропорциональный концентрации детектируемого вещества.

Аэрозольные частицы в фотометрируемом объеме имеют радиус рассеивающих частиц примерно 0,25 мкм и незначительный разброс величины вокруг этого значения [8]. Поэтому светорассеяние аэрозольными частицами исследовано в работах [5, 9] на основе теории Ми, которая рассматривает это явление на сферических частицах с размерами, сравнимыми с длиной световой волны λ . Установлено [5], что интенсивность светорассеяния для аэрозольной частицы (при оптимальном угле наблюдения) приблизительно в три раза больше таковой для воздуха в фотометрируемом объеме аэрозольной камеры нефелометра и превышает примерно в 10^{15} раз эту интенсивность для самой молекулы детектируемой примеси. Экспериментально измеренные значения мощности светорассеяния аэрозольными частицами и воздухом в фотометрируемом объеме малогабаритного

аэрозольного фотометра превышают теоретически рассчитанные всего на 8 – 10 %, что для этих величин является удовлетворительным результатом. Оптимизация конструкции камеры аэрозольного фотометра и его опико-электронной части позволили достигнуть предела обнаружения целевого компонента газоанализатора на уровне фона спонтанной конденсации, а не предельной чувствительности ФПУ детектора. Использование фотоэлектронного умножителя и интегратора в составе фотоприемного устройства фотометра детектора MCN позволяет калибровать газоанализатор по светорассеянию воздуха в фотометрируемом объеме камеры фотометра.

Светорассеяние воздухом внутри фотометрируемого объема представляет собой паразитную фоновую засветку при измерении светорассеяния аэрозольными частицами. Расчет светорассеяния воздухом был проведен на основе теории Рэля [9].

Разработаны малогабаритный аэрозольный фотометр, микропроцессорный блок

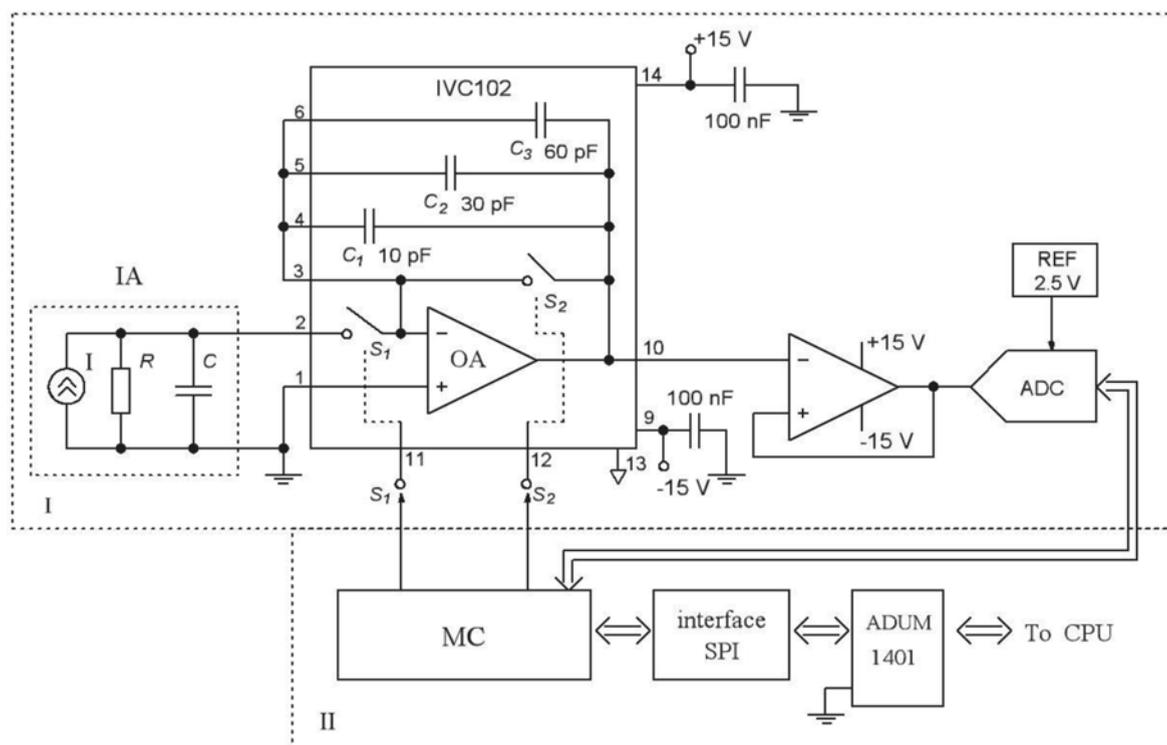


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема фотоинтегратора (I) с контроллером фотометра (II): IA – фотоприемник (фотодиод или фотоэлектронный умножитель); REF – опорный уровень, ADC – аналого-цифровой преобразователь, MC – микроконтроллер, To CPU – на центральный процессор

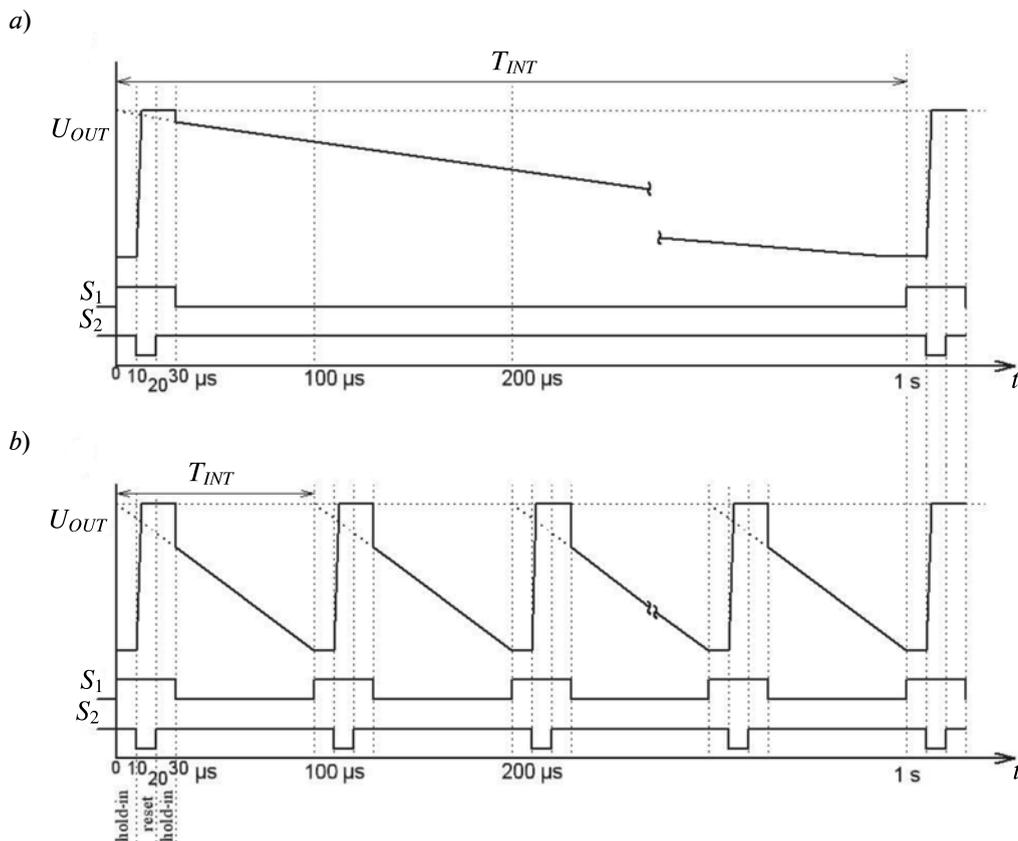


Рис. 3. Временные диаграммы фотоинтегратора для малых (а) и больших (б) концентраций детектируемых веществ в пробе; T_{INT} – время интегрирования; S_1, S_2 – сигналы управления ключами; hold-in, reset – удержание и сброс, соответственно

управления, регистрации и обработки информации [10], позволившие создать высокочувствительные газоанализаторы на основе эффекта МСН для анализа загрязнений воздуха различными вредными веществами [2]. Среди них можно выделить серийные изделия «Каскад-Г» и «Каскад-5» на отравляющие вещества [10], опытные образцы газоанализаторов на карбонилы металлов, на взрывчатые вещества, а также газоанализаторов выдыхаемого воздуха для диагностики заболеваний [11]; были также разработаны течеискатели теплообменников ядерных реакторов, устройства для контроля средств индивидуальной защиты органов дыхания [1].

Для обеспечения высокой чувствительности по фототоку светорассеяния в фотометре применено фотоприемное устройство на основе интегратора входного тока (ми-

кросхема IVC102 фирмы Texas Instruments) [10]. Упрощенная принципиальная схема фотоинтегратора с контроллером приведена на рис. 2, временные рабочие диаграммы – на рис. 3.

Выходной сигнал интегратора определяется выражением

$$U_{OUT} = -\frac{1}{C_{INT}} \int I_{INT}(t) dt,$$

где I_{INT} , C_{INT} – входной ток и емкость интегратора.

Для случая медленно меняющегося фототока за время интегрирования выражение для выходного напряжения упрощается:

$$U_{OUT} = -\frac{I_{INT} \cdot T_{INT}}{C_{INT}},$$

где T_{INT} – время интегрирования.

Контроллер, выполненный на основе

микропроцессора ATmega 88, формирует сигналы управления ключами S_1, S_2 , принимает цифровой код фототока с аналого-цифрового преобразователя (ADC) и передает его по шине SPI на центральный процессор (CPU).

При малых концентрациях детектируемых веществ в пробе (рис. 3, а), соответствующих малым уровням рассеянной оптической мощности в нефелометре, за время измерения $T_{INT} = 1$ с выходной сигнал фотоинтегратора изменяется от 0 до уровня $\pm U_{OUT(MAX)}$. Частота оцифровки фототока в ADC установлена 100 кГц, соответственно за время в 1 с осуществляется 10^5 цифровых отсчетов. При поступлении в процессор цифрового кода, соответствующего $\pm U_{OUT(MAX)}$, процессор сбрасывает фотоинтегратор в начальное (нулевое) состояние. Для больших значений концентраций в пробе (рис. 3, б), соответствующих значительным уровням рассеянной оптической мощности в нефелометре, цифровой код ADC, соответствующий $\pm U_{OUT(MAX)}$, формируется за время, значительно меньшее 1 с.

Верхняя граница динамического диапазона измеряемого фототока соответствует минимальной длительности интегрирования $T_{INT} = 100$ мкс. За это время формируется всего 5–6 отсчетов, но зато количество циклов интегратора (сбросов в нулевое значение) за 1 с достигнет значения 10^4 .

Центральный процессор при получении каждого отсчета определяет тангенс угла наклона зависимости фототока от времени и рассчитывает фототок в соответствии с выражением

$$I_{IN} = - \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta T_d} \cdot C_{INT},$$

где ΔT_d – интервал дискретизации по времени, равный 10 мкс; ΔU_{OUT} – приращение выходного напряжения за один интервал дискретизации.

Применение метода наименьших квадратов для всех отсчетов позволяет существенно увеличить точность измерения. Среднеквадратичное отклонение измеряемого фототока при многократных измерениях уменьшается пропорционально $1/\sqrt{N}$, где N – количество измерений.

За время интегрирования 1 с выполняется 10^4 измерений, соответственно среднеквадратичное отклонение измеряемого фототока уменьшается в 100 раз. Максимальное значение измеряемого фототока определяется приращением выходного напряжения на величину $U_{OUT(MAX)}$ за время 100 мкс и составляет

$$I_{IN_MAX} = \frac{10 \text{ В}}{100 \text{ мкс}} \cdot 100 \text{ пФ} = 10 \text{ мкА}.$$

Минимальное значение измеряемого фототока определяется как приращение вы-

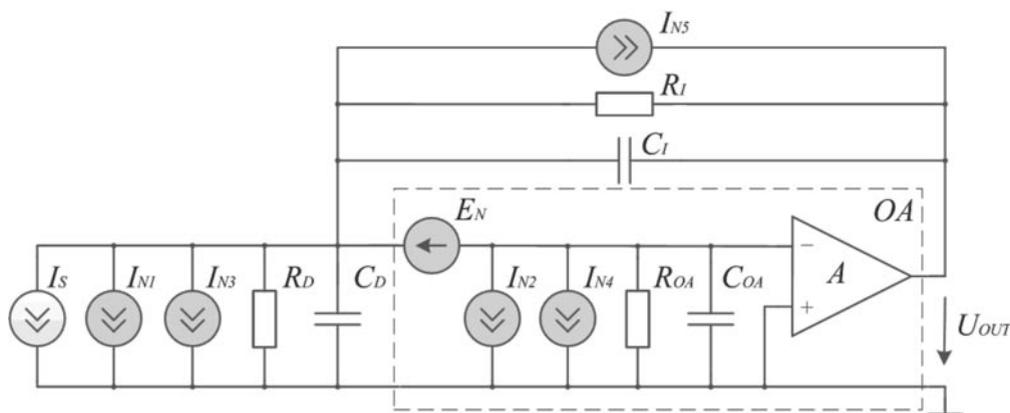


Рис. 4. Эквивалентная шумовая схема фотоинтегратора:

R_D – динамическое сопротивление фотодиода; C_D – емкость $p-n$ -перехода фотодиода; R_{OA}, C_{OA} – входные сопротивление и емкость операционного усилителя, C_I – емкость интегратора, R_I – сопротивление разомкнутого ключа интегратора, I_S – фототок фотодиода

ходного напряжения в один уровень квантования ADC за время 1 с и составляет

$$I_{IN_MIN} = -\frac{10 \text{ В}}{2^{N-1} \cdot 1\text{с}} \cdot 100 \text{ пФ},$$

где N – разрядность ADC.

При 14-разрядном ADC $I_{IN_MIN} = -60$ фА и динамический диапазон фотоинтегратора равен

$$D = \frac{I_{IN_MAX}}{I_{IN_MIN}} \approx 160 \cdot 10^6 \approx 160 \text{ дБ}.$$

При 20-разрядном ADC минимальное значение измеряемого фототока $I_{IN_MIN} = -1,9$ фА, но нижняя граница динамического диапазона определяется не шумами квантования ADC, а тепловыми и дробовыми шумами фотоинтегратора.

Шумовая модель фотоинтегратора

Эквивалентная шумовая схема фотоинтегратора приведена на рис. 4.

К параметрам операционного усилителя (ОА) относятся: постоянная времени T_0 , коэффициент передачи $A = A_0/(1 + pT_0)$, частота единичного усиления $\omega_1 = A_0/T_0$. Входное сопротивление операционного усилителя в эквивалентной схеме вынесено за пределы четырехполюсника А.

Эквивалентные шумовые генераторы токов $I_{N1}, I_{N2}, \dots, I_{N5}$ и эдс e_N описывают случайные шумовые процессы и имеют спектральные плотности мощности [12]: I_{N1} – дробовые шумы тока фотодиода, $S_{N1} = 2qI_S$; I_{N2} – дробовые шумы входного тока ОА, $S_{N2} = 2qI_{OA}$; I_{N3} – тепловые шумы динамического сопротивления фотодиода, $S_{N3} = 4kT/R_D$; I_{N4} – тепловые шумы входного сопротивления ОА, $S_{N4} = 4kT/R_{OA}$; I_{N5} – тепловые шумы сопротивления разомкнутого ключа интегратора, $S_{N5} = 4kT/R_I$; E_N – тепловые шумы ОА, $S_E = 4kTR_n$.

Эквивалентные шумовые генераторы в эквивалентной схеме можно считать некоррелированными, их спектральная плотность в рабочем диапазоне частот постоянна (белый шум). Суммарную спектральную плотность источников шумового тока мож-

но определить простым суммированием:

$$S_{N\Sigma_I} = S_{N1} + S_{N2} + S_{N3} + S_{N4} + S_{N5}.$$

После подстановки значений спектральных плотностей шумовых источников тока получаем:

$$S_{N\Sigma_I} = 2q \left(I_S + I_{OA} + 2\varphi_T \times \left(\frac{1}{R_{OA}} + \frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_I} \right) \right), \quad (1)$$

где q – заряд электрона, $\varphi_T = kT/q$ – тепловой потенциал.

Средний квадрат шумового тока на входе ОА:

$$\begin{aligned} \overline{I_{N\Sigma_I}^2} &= \int_0^\infty S_{N\Sigma_I}(f) df = \\ &= S_{N\Sigma_I} \int_0^\infty df = S_{N\Sigma_I} \cdot \Delta f. \end{aligned} \quad (2)$$

Для определения среднеквадратичного значения шумового напряжения на выходе ФПУ $U_{N_I}^2$, вызванного шумовыми токами, необходимо определить дисперсию случайного процесса на выходе линейной системы при условии, что на ее вход в момент времени $t = 0$ подается случайный стационарный сигнал в виде белого шума со спектральной плотностью $S_{N\Sigma_I}$ [13]:

$$\overline{U_{N_I}^2} = \overline{I_{N\Sigma_I}^2} \int_0^t h^2(\tau_1) dt_1, \quad (3)$$

где $h(\tau_1)$ – импульсная характеристика исследуемой линейной цепи.

В статье [14] рассмотрено три вида приближений:

(а) некоррелированные шумовые генераторы (с белым шумом), что соответствует эквивалентной схеме рис. 4;

(б) конденсатор и ключ сброса интегратора – идеальные устройства (использовано допущение вида $R_I \rightarrow \infty$);

(в) идеальный фотоинтегратор (приняты допущения вида $R_I \rightarrow \infty$, $R_D \rightarrow \infty$, $R_{OA} \rightarrow \infty$, $C_{OA} \rightarrow 0$).

Расчетные выражения для приближений (а) и (б) приведены в статье [14], в настоящей статье рассматривается только приближение (в).

Импульсную характеристику источников тока фотоинтегратора можно получить обратным преобразованием Лапласа от передаточной характеристики. Такое преобразование выражается как

$$\begin{aligned} \overline{U_{N-I}^2} &= \overline{I_{N\Sigma-I}^2} \cdot \int_0^{T_{INT}} h_I^2(\tau_1) dt = \\ &= \overline{I_{N\Sigma-I}^2} \cdot \int_0^{T_{INT}} \frac{1}{C_I^2} dt = \overline{I_{N\Sigma-I}^2} \cdot \frac{T_{INT}}{C_I^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Эквивалентная шумовая схема фотоинтегратора для расчета вклада шумовой эдс в средний квадрат шумового напряжения на выходе представлена на рис. 5.

Коэффициент передачи интегратора в операторной форме для шумовой эдс следует выражению

$$H_E(p) = \frac{\varpi_1}{\varpi_1 + p}.$$

Импульсную характеристику источника эдс получаем обратным преобразованием Лапласа от передаточной характеристики $h_E(t) = \varpi_1 \cdot e^{-\varpi_1 t}$:

$$\overline{U_{N-E}^2} = \overline{e_N^2} \cdot \int_0^{T_{INT}} h_N^2(t) dt = \frac{\overline{e_N^2} \varpi_1}{2} [1 - e^{-2\varpi_1 T_{INT}}].$$

Анализ полученного результата показывает, что расчет, который использует приближение идеального фотоинтегратора, существенно занижает вклад шумового источника эдс в средний квадрат шумового напряжения на выходе.

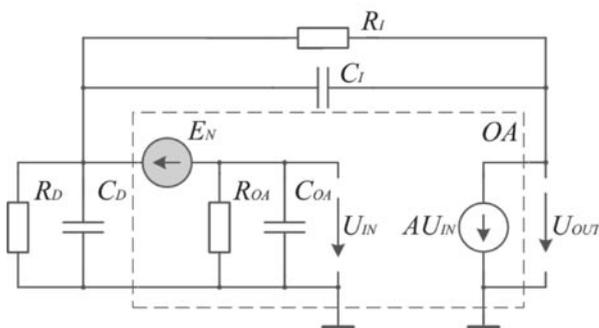


Рис. 5. Эквивалентная шумовая схема фотоинтегратора для расчета вклада шумовой эдс в средний квадрат шумового напряжения на выходе

Пороговая чувствительность фотоинтегратора на основе фотодиода

Пороговой чувствительностью фотоинтегратора $P_0 = I_0/S$ называется значение мощности оптического сигнала на входе интегратора, при которой на выходе электронной части фотоинтегратора среднеквадратичное напряжение сигнала равно среднеквадратичному значению общего шума [15]. В математической форме это выражается как условие

$$U_{OUT-S}^2 = \overline{U_{N-\Sigma}^2} = \overline{U_{N-I}^2} + \overline{U_{N-E}^2},$$

необходимое для нахождения величины порогового входного тока I_0 ; S — чувствительность фотодетектора (фотодиода) к световому потоку.

Для составления уравнения $U_{OUT-S}^2 = \overline{U_{N-\Sigma}^2}$ необходимо квадрат переходной функции приравнять к суммарному среднеквадратичному напряжению шума на выходе.

Выходной сигнал фотоинтегратора при воздействии на входе скачка фототока I_0 определяется следующим выражением (переходная функция):

$$\begin{aligned} U_{OUT}(T_{INT}) &= \int_0^{T_{INT}} I_0(T_{INT} - t) \cdot h_I(t) dt = \\ &= I_0 \cdot \int_0^{T_{INT}} h_I(t) dt = I_0 \cdot \frac{1}{C_I} \cdot T_{INT}. \end{aligned} \quad (5)$$

Определим теперь пороговый ток фотоинтегратора I_0 , при котором на выходе электронной части фотоинтегратора среднеквадратичное напряжение сигнала равно среднеквадратичному напряжению общего шума. Пороговый ток при малых временах интегрирования рассчитан для приближений (а) и (б) в работах [3, 14] и здесь не приведен ввиду громоздкого вида полученных выражений.

При выполнении условия

$$T_{INT} \gg \frac{C_I + C_D + C_{OA}}{\frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_{OA}} + \varpi_1 C_I}$$

пороговый ток определяется следующим выражением:

$$I_0 \approx \frac{1}{T_{INT}} \left[\overline{I_{N\Sigma-I}^2} \cdot T_{INT} + \frac{e_N^2 \overline{\varpi_1} C_I (C_I + C_D)}{2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

Шумовые генераторы тока дают больший вклад с увеличением времени интегрирования. При временах интегрирования, несколько больших, чем

$$\frac{e_N^2 \overline{\varpi_1} C_I (C_I + C_D)}{2 \cdot \overline{I_{N\Sigma-I}^2}},$$

вкладом шумовой эдс в величину порогового тока можно пренебречь.

Подстановка спектральной плотности шумовых источников тока фотоинтегратора в (6) приводит к выражению:

$$I_0 = \frac{1}{T_{INT}} \left[2q \left(I_S + I_{OA} + 2q_T \left(\frac{1}{R_{OA}} + \frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_I} \right) \right) T_{INT} + \frac{e_N^2 \overline{\varpi_1} C_I (C_I + C_D)}{2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Как правило, дробовые шумы фототока $2qI_S$ необходимо учитывать для некоторых фотоприборов с усилением, в частности для лавинных фотодиодов и фотоэлектронных умножителей.

Часто бывает удобно использовать величины спектральной плотности шумового источника тока $\sqrt{S_{I-OA}^2}$ ($A \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{-1/2}$) и шумового источника напряжения $\sqrt{S_{U-OA}^2}$ ($B \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{-1/2}$),

Таблица

Основные характеристики фотоинтегратора на микросхеме IVC102 фирмы Texas Instruments

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение параметра
Емкость интегрирования	C_I	пФ	100
Входной ток ОА	I_{OA}	А	$\pm 1 \cdot 10^{-13}$
Входная емкость ОА	C_{OA}	пФ	50
Спектральная плотность шумовой эдс ОА при $f = 1$ кГц	$S_{U_{OA}}$	нВ \cdot Гц $^{-1/2}$	10
Частота единичного усиления ОА	f_1	МГц	2
Интегральная токовая чувствительность фотодиода	S	А/ Вт	0,5
Темновой ток фотодиода	I_D	А	10^{-11}
Емкость фотодиода	C_D	пФ	600
Сопротивление фотодиода	R_D	ГОм	1
Сопротивление закрытого ключа	R_I	ГОм	1
Динамический диапазон фотоинтегратора	D	дБ	186

приведенных ко входу операционного усилителя. Именно эти шумовые параметры измеряются экспериментально и приводятся фирмами-изготовителями в справочных данных. В этом случае дробовый шум входного тока и тепловой шум входного сопротивления операционного усилителя включаются в спектральную плотность шумового источника тока, и выражение для порогового тока приобретает следующий вид:

$$I_0 = \frac{1}{T_{INT}} \left[\left(2q \left(I_S + \frac{2\varphi_T}{R_D} + \frac{2\varphi_T}{R_I} \right) + \overline{S_{I_OA}^2} \right) T_{INT} + \frac{\overline{S_{U_OA}^2} \varpi_1 C_I (C_I + C_D)}{2} \right]^{1/2} \quad (8)$$

Иногда для электронных устройств вводят специальную характеристику NEP (Noise Equivalent Power – эквивалентная шумовая мощность). Такая величина определяется как мощность входного сигнала, при которой отношение сигнал/шум на выходе равно единице в полосе частот 1 Гц. NEP-характеристика эквивалентна спектральной плотности источника шумового тока, приведенного ко входу усилителя (которая измеряется в $A \cdot Гц^{-1/2}$), но делится на крутизну преобразования фотодетектора S (А/Вт); соответственно NEP измеряется в $(Вт \cdot Гц^{-1/2})$. Пороговая чувствительность фотоинтегратора P_0 представляет собой интегральную характеристику NEP, т. е. учитывается вся полоса частот фотоприемного устройства.

Параметры фотоинтегратора, реализованного на кремниевом $p-i-n$ -фотодиоде, прецизионном интегральном малошумящем усилителе с полевым транзистором на входе, интегрирующем конденсаторе и ключе с малыми потерями на полевом транзисторе (микросхема IVC102 фирмы Texas Instruments), представлены в таблице.

Рассчитанное значение пороговой чувствительности фотоприемного устройства на основе фотодиода с интегратором при времени интегрирования 1 с составило $P_{0_FD} = 0,9 \cdot 10^{-14}$ Вт. Динамический диапазон фотоинтегратора был найден по формуле

$$D = \frac{I_{IN_MAX}}{I_{IN_MIN}} \approx 2,2 \cdot 10^9 \approx 186 \text{ дБ.}$$

При этом ADC должен иметь более двадцати разрядов.

Пороговая чувствительность фотоинтегратора на основе фотоэлектронного умножителя (PMT)

С целью повышения чувствительности фотоинтегратора допустимо применять в качестве фоточувствительного элемента фотоэлектронный умножитель (PMT – photomultiplier tube). Последний обладает высокой крутизной преобразования S_A оптической мощности в электрический ток (для PMT она достигает значения 10^6 А/Вт, для фотодиода – $0,5$ А/Вт), однако PMT имеет и ряд недостатков: значительно большую стоимость, меньший срок эксплуатации и требует высоковольтного источника питания.

Для того чтобы полностью учесть шумовые источники FMP, к вышеописанным следует добавить еще два источника дробовых шумов: от сигнального тока I_S и от темнового анодного тока I_{DA} .

Спектральная плотность дробового шума термоэмиссионного тока катода I_{CATH} рассчитывается по известной формуле Шоттки:

$$S_{CATH} = 2qI_{CATH}$$

а средний квадрат шумового термоэмиссионного тока – по формуле

$$\overline{i_{TE}^2} = 2qI_{CATH}\Delta f.$$

Спектральная плотность среднего квадрата дробового шума сигнального и темнового анодных токов PMT определяется выражением

$$S_N = 2q(I_A + I_{DA})\mu. \quad (9)$$

Средний квадрат суммарного шумового напряжения на выходе PMT-интегратор определяется выражением

$$\overline{U_{N\Sigma}^2} = 2q \left((I_A + I_{DA})\mu + I_{OA} + 2 \frac{kT}{q} \left(\frac{1}{R_{OA}} + \frac{1}{R_{FMP}} \right) \right) \cdot \frac{T_{INT}}{C_I^2} + \quad (10)$$

$$+ \frac{\overline{e_N^2} \varpi_1 (C_I + C_{FMP})}{2C_I}, \quad (10)$$

где введены новые обозначения C_{FMP} и R_{FMP} – входные емкость и сопротивление РМТ.

Вследствие большого внутреннего усиления РМТ, выходное напряжение можно определять по переходной характеристике идеального интегратора:

$$\bar{U}_{OUT}^2 = \bar{I}_A^2 \cdot \frac{T_{INT}^2}{C_I^2}.$$

Расчет пороговой чувствительности фотоинтегратора с РМТ проведен в работе [14], где получено выражение

$$P_0 = \frac{1}{S_A} \sqrt{\frac{2qI_{DA}\mu}{T_{INT}}}. \quad (11)$$

Дробовые шумы РМТ следует учитывать лишь при временах интегрирования, меньших десятых долей секунды.

Пороговая чувствительность фотоинтегратора на РМТ зависит от анодного напряжения последнего. Для расчета указанной чувствительности необходимо подставлять в выражение (11) значения S_A , μ и I_{DA} для различных анодных напряжений РМТ (они даются в его технической характеристике). Расчет, проведенный для фотосенсорного модуля H6780 фирмы Hamamatsu с заданным временем интегрирования в 1 с, позволил определить минимальное значение пороговой чувствительности:

$$P_{0_FMP} = 0,48 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}$$

при анодном напряжении 700 В.

Таким образом, реально достигается выигрыш в чувствительности в 18 – 30 раз при использовании РМТ, по сравнению с аналогичным использованием фотоинтегратора на фотодиоде.

Пороговая чувствительность детектора MCN

Измеренная пороговая чувствительность $P_{0_EXP} = 6,6 \cdot 10^{-16}$ Вт при анодном напряжении 600 В, тогда как ее рассчитанное значение $P_{0_THEOR} = 5,9 \cdot 10^{-16}$ Вт. Отличие измеренного значения от теоретического

хотя и составило 10 %, но при уровнях регистрируемой мощности в доли фемтоватт в экспериментальной установке очень трудно избавиться от столь малых значений побочных отражений оптического излучения. Этим и объясняется некоторое превышение экспериментального значения чувствительности над рассчитанным.

Использование РМТ совместно с прецизионным малошумящим усилителем в составе фотоинтегратора, а также большие времена интегрирования (порядка 1 с), позволили существенным образом упростить выражения для расчета чувствительности фотоприемного устройства детектора MCN. Однако такие условия встречаются далеко не всегда. На практике часто применяются позиционно-чувствительные датчики оптического излучения, что требует использования фотодиодов, а характерное время измерения достигает долей миллисекунд и менее. В этом случае для расчета чувствительности фотоприемного устройства следует использовать выражения, полученные для приближений (а) и (б).

В качестве примера иных расчетных условий можно привести позиционно-чувствительный датчик проникающего рентгеновского излучения в рентгено-абсорбционной технологии обогащения минералов [16]. Фотоприемное устройство содержит сцинтиллятор, нанесенный на линейку фотодиодов; он преобразует рентгеновское в видимое оптическое излучение, и при этом каждый фотодиод снабжен интегрирующим усилителем. Время интегрирования определяет скорость движения конвейера с минералами и не превышает долей миллисекунд.

Заключение

Чувствительность к световому потоку фотоприемных устройств оптико-электронных систем интегрирующего типа (фотоинтеграторов) можно определять методом эквивалентных шумовых схем путем интегрирования временных зависимостей импульсной функции фотоинтегратора.

Интегратор фототока, основанный на

измерении зависимости фототока от времени (с последующим усреднением тангенса угла наклона относительно временной оси), а также усреднении результатов измерений, позволяет регистрировать фототоки светорассеяния аэрозольными частицами на уровне долей фемтоампер.

Столь малые значения регистрируемых мощностей позволили внести ряд усовершенствований в детектор молекулярных ядер конденсации (MCN):

обеспечить чувствительность к детектируемым веществам ниже уровней предельно допустимых концентраций;

калибровать газоанализатор по светорассеянию воздуха непосредственно в фотометрическом объеме камеры нефелометра;

достигнуть предела обнаружения целевого компонента газоанализатора на уровне спонтанной нуклеации ядрообразования, а не предельной чувствительности оптико-электронной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Кянджециан Р.А., Кателевский В.Я., Валюхов В.П., Купцов В.Д., Демин С.В.** Высокочувствительные газоанализаторы на базе детектора молекулярных ядер конденсации для экологического мониторинга и контроля высокоэффективных фильтров // *Альтернативная энергетика и экология*. 2011. № 10 (102). С. 32–42.
- [2] **Купцов В.Д., Кянджециан Р.А., Кателевский В.Я., Валюхов В.П.** Газоанализаторы на основе эффекта молекулярных ядер конденсации // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2010. № 6 (113). С. 145–150.
- [3] **Купцов В.Д., Кателевский В.Я., Валюхов В.П.** Оптико-электронные устройства газоанализаторов на основе эффекта проявления молекулярных ядер конденсации. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2012. 142 с.
- [4] **Купцов В.Д., Кянджециан Р.А., Кателевский В.Я., Валюхов В.П.** Светорассеяние аэрозольными частицами в газоанализаторах на молекулярных ядрах конденсации // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2011. № 1(115). С. 178–186.
- [5] **Купцов В.Д., Кателевский В.Я., Валюхов В.П., Рыбин Е.Н.** Оптико-электронная система аэрозольного фотометра детектора молекулярных ядер конденсации // *Журнал технической физики*. 2013. Т. 83. № 8. С. 127–134.
- [6] **Рыбин Е.Н., Валюхов В.П., Купцов В.Д.** Термодинамика нуклеации пересыщенного пара на молекулярных ядрах конденсации // *Журнал технической физики*. 2012. Т. 82. № 8. С. 22–27.
- [7] **Рыбин Е.Н., Валюхов В.П., Купцов В.Д.** Моделирование нуклеации пересыщенного пара на молекулярных ядрах конденсации // *Журнал технической физики*. 2012. Т. 82. № 8. С. 28–34.
- [8] **Коган Я.И., Бурнашева З.А.** Укрупнение и измерение ядер конденсации в непрерывном потоке // *Журнал физической химии*. 1960. Т. 34. № 12. С. 2630–2639.
- [9] **Kuptsov V.D., Katelevsky V.Y., Valyukhov V.P., Rybin E.N.** Light scattering by aerosol particles and air in the molecular condensation nuclei (MCN) detector // *Proceedings of SPIE*. 2014. Vol. 9205(0Q). Pp. 92050Q1–92050Q11.
- [10] **Демин С.В., Купцов В.Д., Валюхов В.П., Кателевский В.Я.** Газоанализаторы на молекулярных ядрах конденсации для определения концентрации отравляющих веществ // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2011. № 2 (120). С. 183–190.
- [11] **Kuptsov V.D., Katelevsky V.Y., Valyukhov V.P.** Optical sensors based on the molecular condensation nuclei detector // *Proceedings of SPIE*. 2015. Vol. 9506. Pp. 950620-1–950620-8.
- [12] **Чернов Е.И.** Прецизионные фотоприемные устройства на основе фотодиодов. Ч. II // *Обзоры по электронной технике. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы*. 1989. № 1420. С. 52.
- [13] **Заездный А.М.** Основы расчетов по статистической радиотехнике. М: Связь, 1969. 448 с.
- [14] **Купцов В.Д., Валюхов В.П.** Чувствительность фотоприемного устройства на основе интегратора фототока // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2014. Т. 19. № 7. С. 16–23.
- [15] **Купцов В.Д., Валюхов В.П.** Чувствительность фотоприемных устройств волоконно-оптических линий связи // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2010. № 6(113). С. 31–36.

[16] Новиков В.В., Рудаков В.В., Злобин М.Н. и др. Способ сепарации минералов. Пат. 2472595. Российская Федерация, МПК В07С 5/346.; за-

явитель и патентообладатель Новиков Владлен Васильевич. № 2011150666/12; заявл.14.12. 2011; опубл. 20.01. 2013, Бюл. № 2. 11 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУПЦОВ Владимир Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоп физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
kuptsov@yandex.ru

ВАЛЮХОВ Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры радиоп физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
Valyukhov@yandex.ru

Kuptsov V.D., Valyukhov V.P. A PHOTOINTEGRATOR OF THE MOLECULAR CONDENSATION NUCLEI DETECTOR.

The problem of calculating the threshold sensitivity of an integrating photoreceiver (photocurrent integrator) is investigated. Photocurrent integrators are used in scientific instruments to achieve high sensitivity of an optical measurement system in case of relatively slow physical processes. Noise model of a photointegrator is used to develop equivalent noise circuits and to calculate the RMS value of the voltage across the output of the photoreceiver. Among all the models of the real photointegrator it is conceivable that the approximation by an ideal photointegrator may be used. The threshold sensitivity of a photointegrator is defined as the power at the input of a photointegrator at which the root mean squared (RMS) voltage across its output is equal to the RMS voltage of total noise i.e. the signal to noise ratio is equal to one. A photomultiplier tube (PMT) can be used to increase the sensitivity. Formulae for calculation of the sensitivity of PMT based on photointegrator are given. The increase in sensitivity due to the use of PMT can be up to 18-30 times.

Experimental study of a photometer of a molecular condensation nuclei (MCN) detector that forms a base of highly sensitive MCN gas analyzers was conducted. Measured sensitivity differed from calculated one by 10%, however, at femtowatt power levels it is very difficult to get rid of parasitic optical signals that are responsible for a small decrease in sensitivity compared to the theoretical prediction. It is noted that in many practical applications, for example in X-ray absorption method of mineral extraction using position sensitive photodiode X-ray receivers, an approximation of a real photointegrator must be used.

PHOTOCURRENT INTEGRATOR, THRESHOLD SENSITIVITY OF PHOTOINTEGRATOR, PHOTOMETER OF MOLECULAR CONDENSATION NUCLEI (MCN) DETECTOR.

REFERENCES

[1] R.A. Kyandzhetsian, V.Ya. Katelevsky, V.P. Valyukhov, V.D. Kuptsov, S.V. Demin, Highly sensitive gas analyzers based on molecular condensation nuclei detector for ecological monitoring and testing of highly effective filters, Int. J. Alternative Energy Ecol, 10 (102) (2011) 32–42.

[2] V.D. Kuptsov, R.A. Kyandzhetsian, V.Ya. Katelevsky, V.P. Valyukhov, Gas analyzers based on the molecular condensation nuclei effect, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems, 6 (113) (2010) 145–150.

[3] V.D. Kuptsov, V.Ya. Katelevsky, V.P. Valyukhov, Optoelectronic devices for molecular condensation nuclei effect gas analyzers, SPbSPU Pub-

lishing House, St. Petersburg, 2012.

[4] V.D. Kuptsov, R.A. Kyandzhetsian, V.Ya. Katelevsky, V.P. Valyukhov, Light scattering by aerosol particles in gas analyzers based on molecular condensation nuclei, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems, 1 (115) (2011) 178–186.

[5] V.D. Kuptsov, V.Y. Katelevskii, V.P. Valyukhov, E.N. Rybin, Optoelectronic system of the aerosol photometer in the detector of molecular condensation nuclei, Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics, 58(8) (2013) 1211–1218.

[6] E.N. Rybin, V.P. Valyukhov, V.D. Kuptsov, Thermodynamics of supersaturated vapor nucleation

on molecular condensation nuclei, Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics, 57 (8) (2012) 1062–1067.

[7] **E.N. Rybin, V.P. Valyukhov, V.D. Kuptsov**, Simulation of supersaturated vapor nucleation on molecular condensation nuclei, Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics, 57 (8) (2012) 1068–1074.

[8] **Y.I. Kogan, Z.A. Burnasheva**, Enlargement and measurement of condensation nuclei in a continuous flow, Russian Journal of Physical Chemistry, 34(12) (1960) 2630–2639.

[9] **V.D. Kuptsov, V.Y. Katelevsky, V.P. Valyukhov, E.N. Rybin**, Light scattering by aerosol particles and air in the molecular condensation nuclei (MCN) detector, Proceedings of SPIE Vol. 9205(0Q) (2014) 92050Q1–92050Q11.

[10] **S.V. Demin, V.D. Kuptsov, V.P. Valyukhov, V.Ya. Katelevsky**, Gas analyzers based on molecular condensation nuclei for detection of poisonous substances, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems, 2(120) (2011) 183–190.

[11] **V.D. Kuptsov, V.Y. Katelevsky, V.P.**

Valyukhov, Optical sensors based on the molecular condensation nuclei detector, Proceedings of SPIE Vol. 9506 (2015) 950620-1–950620-8.

[12] **E.I. Chernov**, Precizionnyye fotopriemnye ustrojstva na osnove fotodiodov Chast' II, Obzory po jelektronnoj tehnikе. Serija 4: Jelektrovakuumnye i gazorazjadnye pribory, CNII "Jelektronika", Moscow, No 1420, 1989.

[13] **A.M. Zaezdnyj**, Osnovy raschetov po statisticheskoj radiotehnikе, Svjaz', Moscow, 1969.

[14] **V.D. Kuptsov, V.P. Valyukhov**, The sensitivity of a photoreceiver based on a photocurrent integrator, Elektromagnitnye Volny i Elektronnyye Systemy (Electromagnetic Waves and Electronic Systems), 19(7) (2014) 16–23.

[15] **V.D. Kuptsov, V.P. Valyukhov**, Sensitivity of fiber optic communication lines photoreceivers, St. Petersburg State Polytechnic University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems, 6(113) (2010) 31–36.

[16] **V.V. Novikov, V.V. Rudakov, M.N. Zlobin, V.I. Malakhovsky, V.D. Kuptsov, V.P. Valyukhov, M.V. Kuptsov, V.A. Olchovoj**, The method of separation of minerals, Russian Federation Patent, No. 2472595 C1 (2013).

THE AUTHORS

KUPTSOV Vladimir D.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
vdkuptsov@yandex.ru

VALYUKHOV Vladimir P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
valyukhov@yandex.ru