

УДК 535.376; 621.928

Е. Н. Владимиров, П. И. Колков  
АО НПП «Буревестник» (Санкт-Петербург)

Н. Е. Староверов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Фотоприемник для регистрации люминесценции в сепараторах алмазов

Рассмотрен подход к построению фотоприемного устройства для регистрации сигналов рентгенолюминесценции в расширенном амплитудном диапазоне, требования к которому определяются существенными (на 4–5 порядков) различиями яркости люминесценции различных алмазов.

### Рентгенолюминесценция, импульсное возбуждение, компоненты

Рентгенолюминесцентная сепарация – широко применяемый технологический процесс при добыче природных алмазов. Технологические установки для обогащения алмазосодержащих материалов носят название рентгеновских сепараторов. Принцип действия сепараторов основан на облучении потока алмазосодержащего материала рентгеновским излучением с одновременной регистрацией оптического отклика – люминесценции алмазов и сопутствующих минералов, последующем цифровом преобразовании и компьютерной обработке цифровых образов.

Российская технология обогащения базируется на использовании для возбуждения люминесценции импульсного рентгеновского излучения. При этом процесс сепарации носит циклический характер, где каждый цикл соответствует периоду следования импульсов возбуждения. Характер сигнала

возбуждения и регистрации проиллюстрирован на рис. 1. Импульсы возбуждения постоянной длительности  $T_{\text{имп}} = 0.5$  мс следуют с периодом 4 мс (рис. 1, а). Возникающая в облучаемом материале рентгенолюминесценция в общем случае содержит суперпозицию двух компонент [1]. Одна – «короткоживущая» или быстрая компонента (БК), время существования которой соответствует длительности импульса возбуждения, а другая – «долгоживущая» или медленная компонента (МК), которая разгорается во время импульса возбуждения и затухает после его окончания (рис. 1, б). В реальном сепараторе на БК накладывается люминесценция воздуха в рабочем объеме, которая требует учета при обработке сигналов. На рис. 1 обозначены:  $T_{\text{имп}}$  – длительность импульса возбуждения;  $T_{\text{пор}}$  – временная задержка после окончания импульса возбуждения сигнала фотопри-

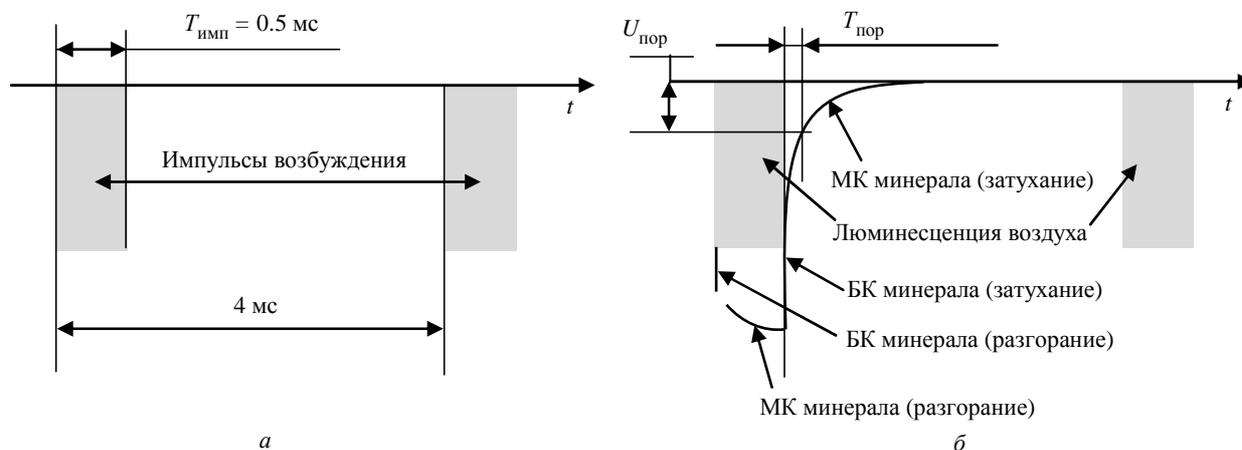


Рис. 1

емного устройства (ФПУ);  $U_{\text{пор}}$  – превышение уровня выходного сигнала ФПУ по истечении  $T_{\text{пор}}$ , запускающее процедуру анализа сигнала люминесценции МК.

**Математическая модель сигнала.** Упрощенное математическое описание сигналов для цикла, где наблюдается люминесценция минерала (алмаза), удобно дать раздельно в двух интервалах:

$$u_1(t) = U_{\text{в}} + U_{\text{БК}} + U_{\text{МК}} (1 - e^{-t/\tau}), \quad (1)$$

при  $0 < t < T_{\text{имп}}$ ;

$$u_2(t) = U_{\text{МК}} e^{-t/\tau} + U_{\text{ш}}, \quad \text{при } t > T_{\text{имп}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{в}}$  – амплитуда люминесценции воздуха;  $U_{\text{БК}}$  – амплитуда БК;  $U_{\text{МК}}$  – амплитуда МК;  $U_{\text{ш}}$  – среднее значение электронных шумов;  $t$  – текущее время;  $\tau$  – постоянная времени экспоненты разгорания/затухания МК люминесценции.

Для цикла, где люминесцирующих минералов в зоне регистрации нет, соответственно, из (1) и (2) получаем

$$u_1(t) = U_{\text{в}}; \quad u_2(t) = U_{\text{ш}}.$$

Для перехода к цифровой обработке сигнал в каждом цикле преобразуется в числовой массив  $\{S_k\}$ , где индекс  $k$  – текущий номер цикла. Число элементов массива соответствует числу преобразований аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Для упорядочения процедуры обнаружения предложено сформировать набор описателей, характеризующих интенсивность и кинетику люминесценции алмазов и сопутствующих минералов [2]. Задавая критерии – границы областей описателей, соответствующие алмазу, можно программно выделять алмазы из потока минералов.

Набор описателей с учетом вышеотмеченных критериев выглядит следующим образом:

$$u_2(t) = U_{\text{МК}}; \quad t = T_{\text{имп}} + T_{\text{пор}}; \quad u_{\text{МК}} > U_{\text{п}}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{п}}$  – минимальное значимое напряжение сигнала – порог чувствительности;

$$\text{ОТН} = (U_{\text{БК}} + U_{\text{МК}}) / U_{\text{МК}}; \quad (4)$$

$$\text{ОТН}_{\text{min}} < \text{ОТН} < \text{ОТН}_{\text{max}},$$

где ОТН – отношение компонент сигнала люминесценции, для алмаза отношение должно лежать в заданном интервале;

$$\tau = \Delta t / \ln(u^* / \Delta t); \quad \tau_{\text{min}} < \tau < \tau_{\text{max}}, \quad (5)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени, на котором сигнал изменяется от  $u_{\text{МК}}$  до некоторого значения  $u^*$ , для алмаза значение  $\tau$  должно лежать в заданном диапазоне;

$$Z = \frac{\int (f_c(t) f(t - t_{\text{св}})) dt}{\int (f_c(t) f_c(t)) dt}; \quad Z > Z_{\text{min}}, \quad (6)$$

где  $Z$  – математическая свертка функции сигнала  $f_c(t) = u_1(t) + u_2(t)$ , нормированная на квадрат функции сигнала;  $t_{\text{св}}$  – параметр свертки.

Сопоставив выражения (3)–(6) с графиком, приведенном на рис. 1, можно заметить, что они верны только в диапазоне, где сохраняется линейность преобразования сигнала в числовой массив  $\{S_k\}$ . Большинство типичных АЦП имеют максимальный амплитудный диапазон 10 В. Если принять порог чувствительности системы регистрации из условия  $U_{\text{ш}} < U_{\text{п}} = 100$  мВ, получим перекрытие диапазона 100. Ранее было отмечено, что по различным причинам интенсивность люминесценции алмазов в сепараторе может различаться на 4–5 порядков. В то же время нижнюю границу, определяемую оптическими и электронными шумами, существенно понизить нельзя; АЦП с большим верхним пределом преобразования отсутствуют. Следовательно, необходимо отыскать другие способы расширения рабочего диапазона.

#### Расширение динамического диапазона.

Рассмотрим структурную схему системы регистрации (рис. 2). Ее базовым элементом служит фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), выполняющий преобразование оптического сигнала люминесценции в электрический. В промышленном рентгеновском сепараторе ФЭУ вместе с усилителем и малогабаритным высоковольтным источником питания образует ФПУ. Типичный сепаратор содержит от 2 до 16 ФПУ, число которых определяется рентгеновской оптикой.

На рынке устройств сбора данных предлагается множество многоканальных АЦП с входным мультиплексором и малым временем преобразования. На базе таких устройств можно предложить схему ФПУ с двумя выходами с соотношением выходных сигналов 1:10 или 1:100 [2] (рис. 2). Причем ФПУ строится таким образом, что реальный амплитудный диапазон на его выходе и, соответственно, на входе АЦП не изменяется.

Еще один схемотехнический прием для расширения динамического диапазона системы регистрации показан на рис. 3 ( $a$  – входной диапазон 0...10 В;  $b$  – расширенный диапазон). Он может состоять в использовании двухполярного диапазона АЦП (например,  $\pm 10$  В) с «привязкой» нулевого уровня сигнала к верхней границе диа-

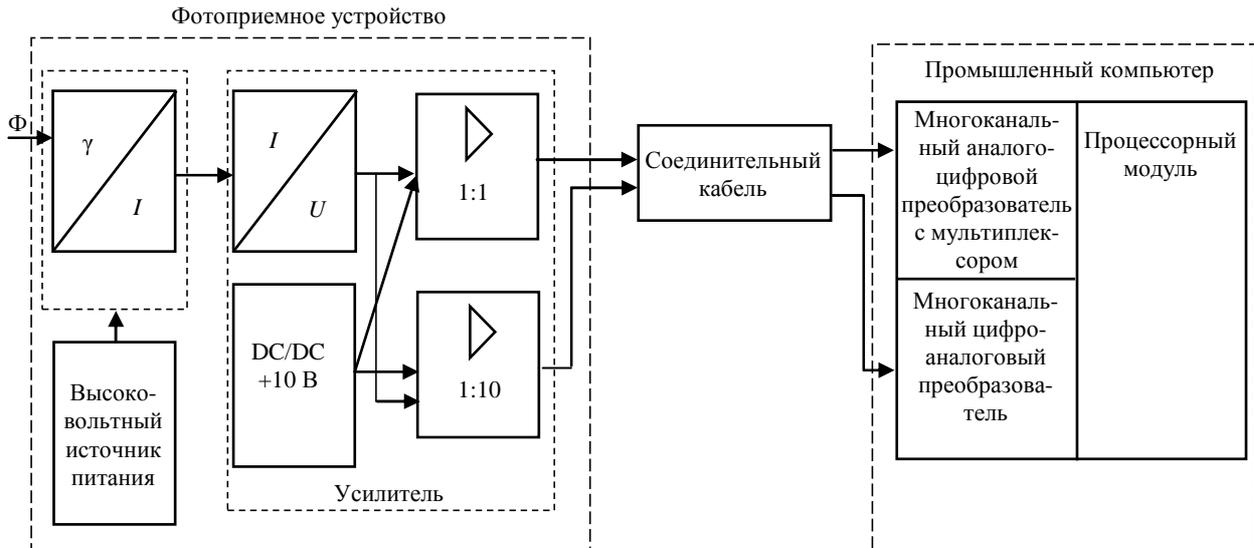


Рис. 2

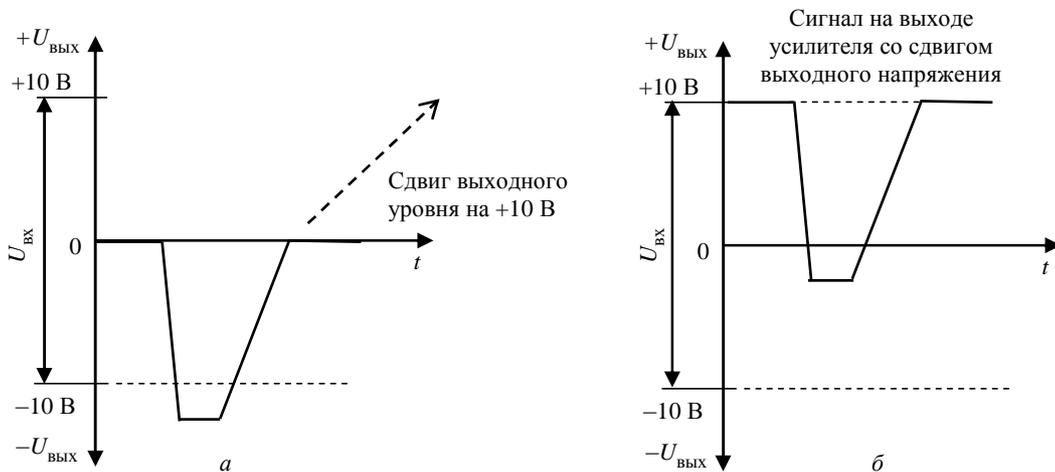


Рис. 3

пазона +10 В. Для этого в состав ФПУ вводится DC/DC-преобразователь, выход которого суммируется с сигналом на входе каждого из двух выходных каскадов ФПУ. Физическое значение напряжения сигнала формируется как размах между условным нулем и максимальным значением. В приведенном примере диапазон с выхода 1:1 составит 20 В, а виртуальный диапазон с выхода 1:10 составит 200 В.

Данные приемы будут эффективны только в том случае, если ограничение сигнала отсутствует в первом каскаде – преобразователе выходного тока ФЭУ в напряжение, схема которого приведена на рис. 4. В данной схеме  $R1 - 100 \text{ Ом}$ ,  $0,25 \text{ Вт}$ ;  $R4 - 1,82 \text{ МОм}$ ,  $0,25 \text{ Вт}$ ;  $R5 - 47 \text{ кОм}$ ,  $0,25 \text{ Вт}$ ;  $R6 - 4,7 \text{ кОм}$ ,  $0,25 \text{ Вт}$ ;  $C5 - 4,7 \text{ пФ}$ ;  $C6, C7 - 47 \text{ мкФ}$ ;  $VD3, VD4 - \text{диоды BAS116}$ ;  $VD5 - \text{стабилитрон BZX84-C11}$ .

Как показали измерения на ФПУ с ФЭУ типа R6094 с анодной чувствительностью  $200 \text{ А/Вт}$ , при пороговом сигнале  $1,5 \cdot 10^{-11} \text{ (Вт/см)} \cdot \text{(см/с)}^{-1}$ , соответствующем минимальному обнаруживаемо-

му алмазу, выходной ток ФЭУ составил  $20...40 \text{ нА}$  (зависит от напряжения питания ФЭУ), напряжение на выходе преобразователя около  $40 \text{ мВ}$ , а напряжение на входе усилителя (1:1)  $120...150 \text{ мВ}$ . Из оценочных измерений следует вывод, что сигнал от алмаза с интенсивностью на 4 порядка выше порогового не вызовет ограничения в первом каскаде.

**Усилитель с логарифмической характеристикой.** Специфическая форма сигнала люминесценции алмаза, которая содержит экспоненциальную составляющую (2), и выбранные критерии обнаружения алмазов, использующие соотношение компонент (4) и параметры экспоненты (5), естественным образом указывают на возможный эффект использования логарифмической выходной характеристики усилителя вместо линейной. В этом случае соотношение БК/МК отобразится разностью логарифмов  $\log \text{ОГН} = \log \text{БК} - \log \text{МК}$ , а параметр экспоненты – тангенсом угла наклона прямой логарифмической характеристики затухания.

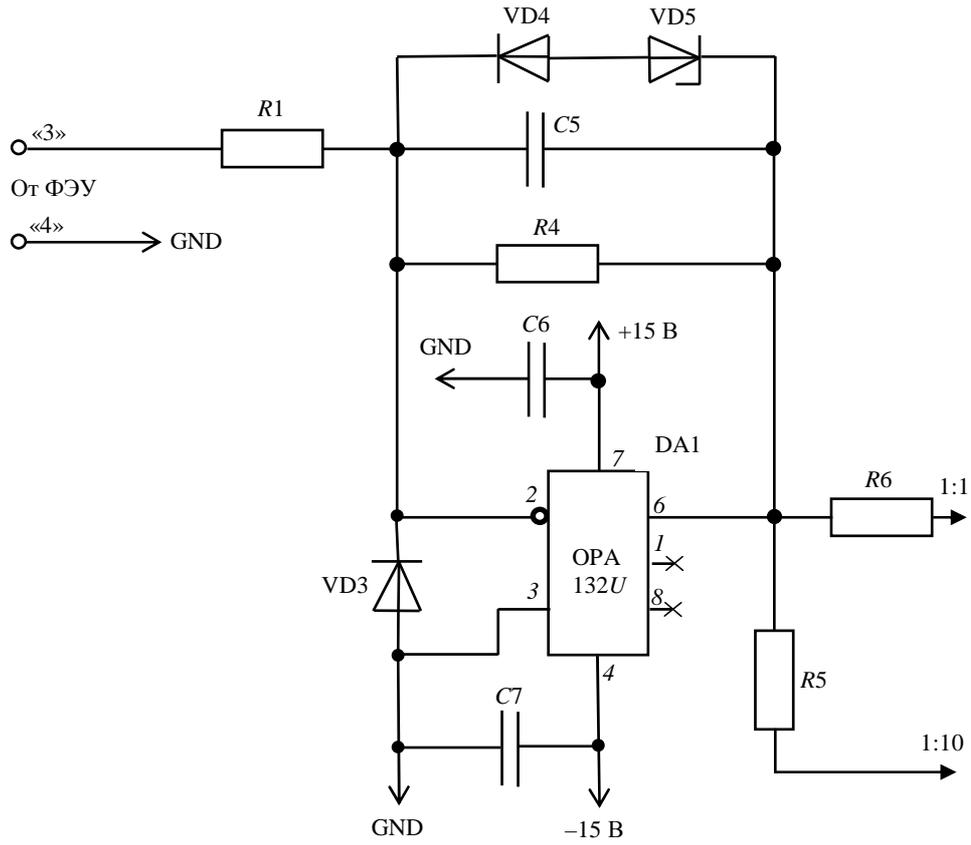


Рис. 4

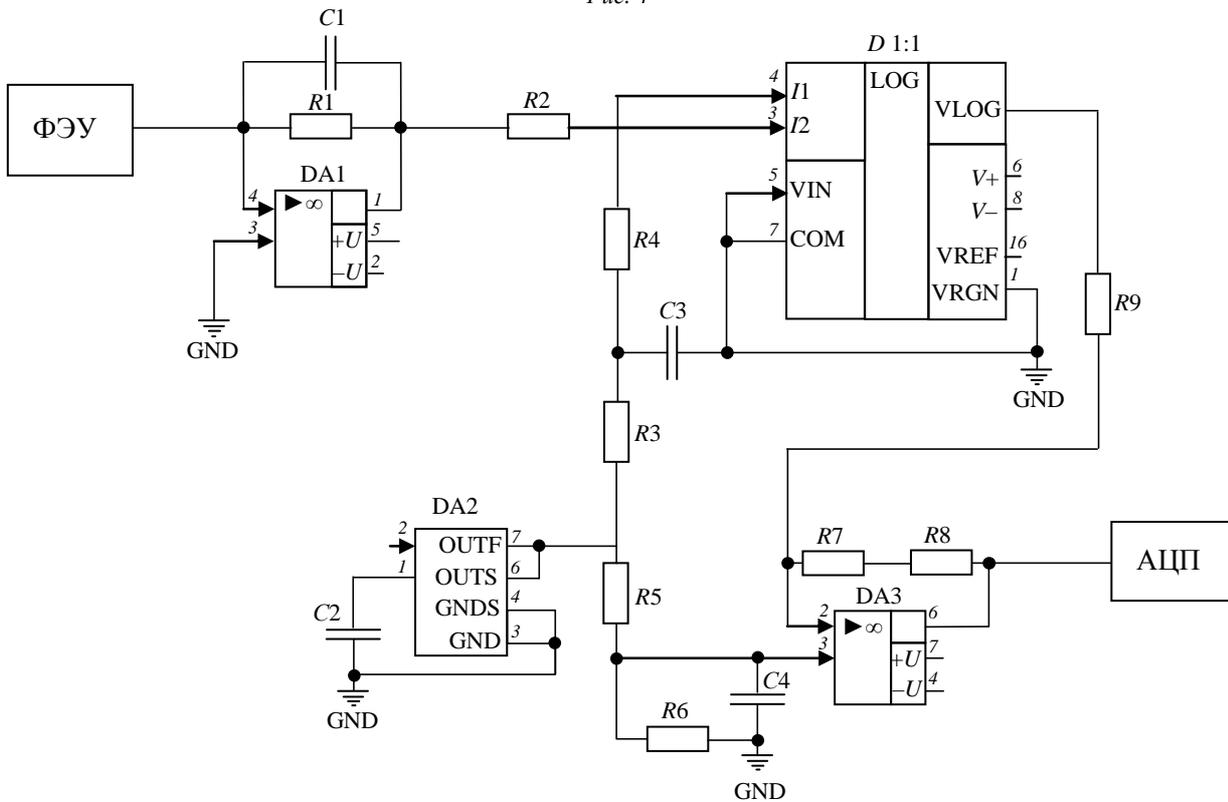


Рис. 5

На рис. 5 представлена схема логарифмического усилителя. Суммарная передаточная характеристика:

$$U_{\text{out}} = -0.79875 \cdot \log(I_1/I_2) + 3.257;$$

$$U_{\text{out}} = 0.062 \dots 4.614 \text{ В,}$$

при  $I_2 = 10^{-9} \dots 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$

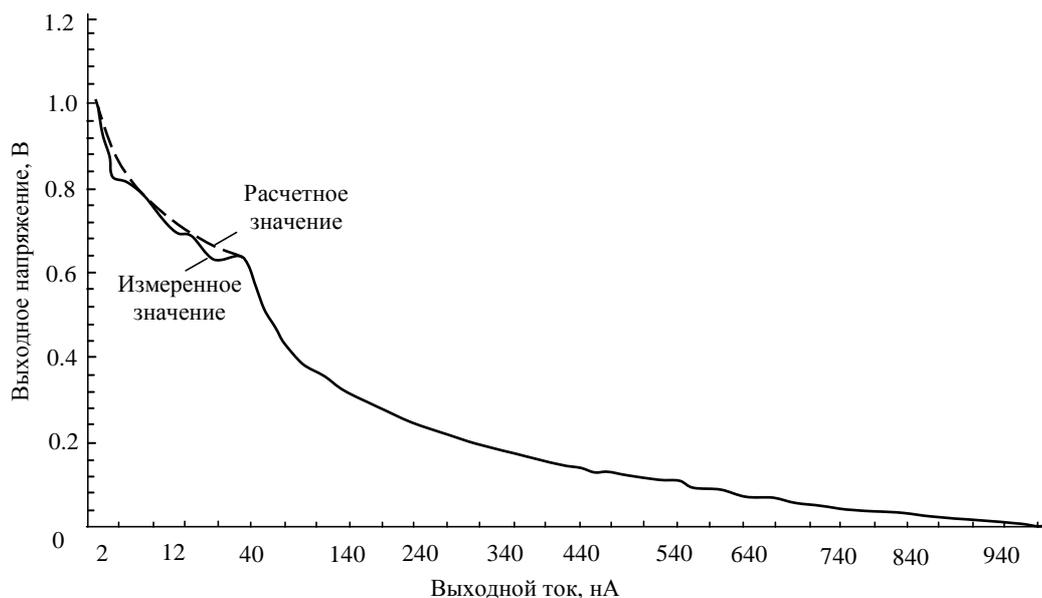


Рис. 6

Основой логарифмического усилителя служит микросхема DD1 LOG114 (Texas Instruments) [3]. Вид выходной логарифмической характеристики  $U_{\text{out}} = 0.375 \cdot \log(I_{\text{ref}}/I_{\text{вх}})$  определяется соотношением измеряемого и опорного ( $I_{\text{ref}}$ ) тока, задаваемого резисторами  $R3 + R4$ . Входной элемент – преобразователь  $I/U$  аналогичен линейному усилителю (рис. 4), а выходной нормирующий усилитель служит для «привязки» к диапазону АЦП. Кроме адаптации к форме сигнала люминесценции, другое преимущество логарифмического усилителя – уменьшение вдвое числа сигнальных цепей от фотоприемников к АЦП.

Определенная «издержки» логарифмической шкалы – переменное, нелинейное разрешение

[мВ/лм]. Насколько это существенно при обработке сигналов реальных алмазов, необходимо проверить при работе ФПУ в сепараторе с представительным набором алмазов.

К сожалению, этот вариант усилителя требует частичной переработки программного обеспечения сепараторов, что неудобно в условиях серийного производства, и внедрение его отложено.

В статье рассмотрены структурные и схемотехнические решения, используемые в рентгенолюминесцентных сепараторах алмазов, разработанных и выпускаемых АО НПП «Буревестник». Приводимые решения иллюстрируют гармоничную комбинацию аналоговой схемотехники и цифровой математической обработки, направленной на селективное обогащение алмазосодержащего материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубырь Е. В., Владимиров Е. Н. Регистрация и цифровая обработка сигналов люминесценции в сепараторах алмазов // Современная электроника. 2014. № 2. С. 68–73.

2. Пат. RU 66234. Люминесцентный сепаратор минералов / Е. Н. Владимиров, Л. В. Казаков, Б. Г. Зеленский и др.; опубл. 16.04.2007. Бюл. № 11.

3. Техническая документация фирмы «Texas Instruments» на микросхему LOG114. URL: <http://www.ti.com/product/LOG114> (дата обращения: 27.03.2016).

E. N. Vladimirov, P. I. Kolkov

Research and Production Enterprise «Bourestnik» (Saint Petersburg)

N. E. Staroverov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

## PHOTORECEIVER FOR REGISTRATION OF LUMINESCENCE IN DIAMOND SORTERS

An approach to the construction of photoreceiver to record X-Ray luminescence signals in the extended amplitude range, the requirements for which are determined by essential (by 4–5 orders) luminescence brightness differences of various diamonds.

X-Ray luminescence, pulsed excitation, components