

## ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 543.423 : 519.6

МЕТОД ЭЛЕКТРОННОЙ КАЛИБРОВКИ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ АНАЛИЗАТОРОВ МАЭС\*Д. О. Селюнин<sup>1, 2</sup>, В. А. Лабусов<sup>1, 2</sup>, Д. В. Петроченко<sup>2</sup>,  
В. Л. Мирошниченко<sup>3</sup>, О. А. Неклюдов<sup>2</sup>, Г. В. Речкин<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук*Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*<sup>2</sup> ООО «ВМК-Оптоэлектроника»,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*E-mail: labusov@vmtk.ru*<sup>3</sup> Учреждение Российской академии наук*Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 4*

Разработан метод электронной калибровки измерительных каналов многоканальных анализаторов атомно-эмиссионных спектров в целях снижения нелинейности зависимости фотоотклика каждого канала от интенсивности входного излучения, что достигается путём получения характеристик измерительных каналов, их аппроксимации полиномами Чебышёва и последующего использования вычисленных коэффициентов полиномов для коррекции выходного сигнала. Созданы специализированный блок электронной регистрации и программное обеспечение, реализующие такую калибровку. Экспериментальным путём показано, что за счёт электронной калибровки нелинейность измерительного канала может быть существенно снижена. В этом случае остаточная нелинейность зависимости фотоотклика от количества падающих на фотодиод фотонов за время экспозиции не превышает 1 %.

*Ключевые слова:* спектроскопия, многоэлементные твердотельные детекторы, нелинейность фотоотклика, полиномы Чебышёва.

**Введение.** В настоящее время для измерения интенсивности спектральных линий широко применяются многоканальные анализаторы атомно-эмиссионных спектров (анализаторы МАЭС), созданные на основе многокристальныхборок линеек фотодиодов (ФД) [1–3]. При этом базовой является линейка БЛПП-369 с количеством фотодиодов 2580, имеющих шаг размещения 12,5 мкм, высоту 1 мм, динамический диапазон  $10^4$  и спектральную чувствительность в диапазоне 160–1100 нм. На их основе созданы плоские, вогнутые и многострочные сборки с различным количеством линеек (до 24) взамен фотопластинок и фотоэлектронных умножителей для существующих спектральных приборов типов МФС, ДФС, ИСП, СТЭ и других.

Измерительный канал анализатора МАЭС — совокупность взаимосвязанных элементов его фотоэлектронной системы, обеспечивающая преобразование интенсивности входного излучения, падающего на одну фотоячейку, в выходной электрический сигнал  $U_{\text{вых}}$  в цифровой форме. Реально наблюдаемая зависимость выходного сигнала от интенсивности излучения является нелинейной и индивидуальной для каждого измерительного канала,

\*Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта Сибирского отделения РАН № 2009-81 (Постановление Президиума СО РАН № 9 от 15.01.2009 г.).

что приводит к погрешности измерения интенсивности и к разбросу выходных сигналов соответственно. Значения нелинейности достигают 10 %.

Обычно при регистрации атомно-эмиссионного спектра за фотоотклик измерительного канала принимается разность выходных сигналов:

$$\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} - U_{\text{вых}}(0), \quad (1)$$

где  $U_{\text{вых}}(0)$  — выходной сигнал при отсутствии излучения. Перед проведением количественного атомно-эмиссионного спектрального анализа проводится градуировка спектрального комплекса (источник возбуждения спектра + спектральный прибор + анализатор МАЭС), суть которой состоит в построении графика зависимости интенсивности аналитической спектральной линии  $I$  от концентрации  $C$  для каждого из определяемых элементов. Для этих целей применяются стандартные образцы с известными концентрациями определяемых элементов. Построенный путём предъявления стандартных образцов график  $I(C)$ , названный градуировочным, используется далее при количественном анализе содержания определяемого элемента. Исходным в этом случае является значение интенсивности его спектральных линий.

Градуировка спектрального комплекса и последующая его работа проводятся при использовании одних и тех же измерительных каналов анализатора МАЭС. Их нелинейность и разброс учтены при построении градуировочных графиков. Однако в случае дрейфа спектральной линии или наличия спектрального фона с переменной амплитудой нелинейность и разброс характеристик измерительных каналов могут привести к существенным погрешностям результатов анализа. Поэтому перед использованием анализатора МАЭС требуется провести калибровку его измерительных каналов в целях снижения их нелинейности и разброса.

Необходимо отметить корректность использования термина «калибровка» в данном случае. Действительно, схему линеек фотодиодов БЛПП-369 можно разделить на две функциональные части: схему преобразования распределения интенсивности излучения вдоль поверхности фотоячеек в набор напряжений и схему измерения значений этих напряжений, вносящую основной вклад в нелинейность измерительных каналов. Структура линеек фотодиодов БЛПП-369 позволяет электронным способом (в отсутствие излучения) получить соотношение между значением выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$  и напряжением на входе схемы измерения  $U$ , т. е. осуществить её калибровку.

Цель данной работы — информировать специалистов о создании метода электронной калибровки измерительных каналов анализатора МАЭС для снижения нелинейности зависимости их фотоотклика от интенсивности входного излучения, а также специализированного блока электронной регистрации и программного обеспечения, реализующих электронную калибровку.

**Измерительные каналы анализатора МАЭС.** Схема фотоячейки линейки фотодиодов БЛПП-369 показана на рис. 1, *a*. В состав фотоячейки входят: фотодиод; трёхзатворный ПЗС-интегратор, где  $U_{\text{ref}}$  — электрод, задающий напряжение смещения ФД,  $F_{\text{int}}$  — электрод интегратора, под которым происходит накопление фотогенерированного заряда,  $F_{\text{tr}}$  — электрод, изолирующий интегратор от диффузионной области с плавающим потенциалом (ПДО); транзистор  $T_0$  для подзарядки ПДО и схема  $A$  измерения напряжения на ПДО (усилитель и коммутатор на шину выхода). Распределение потенциалов в режимах накопления и переноса в ПДО фотогенерированного заряда показано на рис. 1, *b*.

Накопление фотогенерированного заряда фотоячейки осуществляется под электродом  $F_{\text{int}}$  при постоянном напряжении смещения фотодиода, задаваемого напряжением  $U_{\text{ref}}$ . При

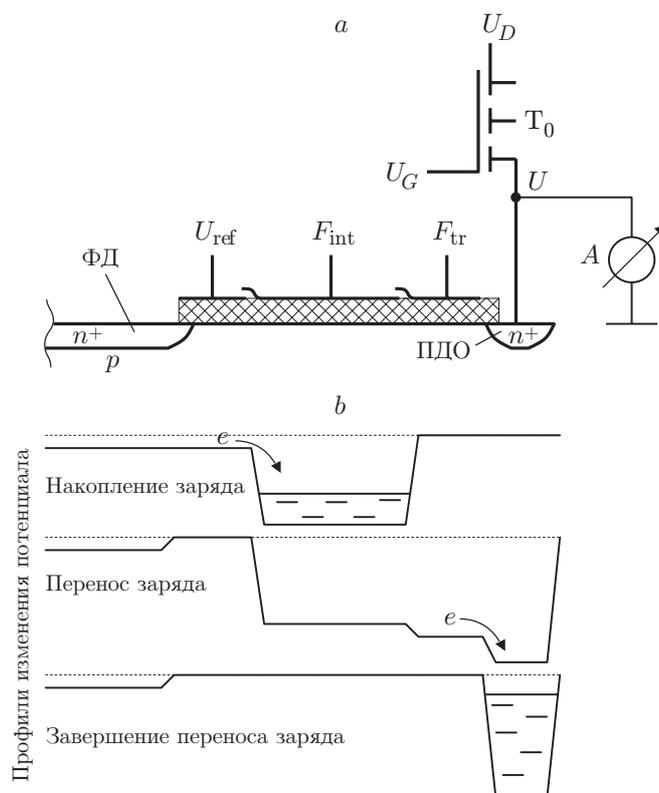


Рис. 1. Фотоячейка линейки фотодиодов БЛПП-369: схема (а) и принцип её работы в режимах накопления и переноса фотогенерированного заряда в диффузионную область с плавающим потенциалом (b)

этом спектральная чувствительность  $S(\lambda)$  фотодиода не зависит от накопленного заряда, поэтому фототок

$$J_{\Phi}(t) = (\Delta x \times \Delta y) \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) I(\lambda, t) d\lambda, \quad (2)$$

где  $\Delta x \times \Delta y$  — площадь входного окна фотодиода;  $I(\lambda, t)$  — интенсивность излучения на длине волны  $\lambda$  в момент времени  $t$ ;  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  — границы спектрального интервала, в котором значения  $I(\lambda, t) \neq 0$ . Накопленный под электродом интегратора за время экспозиции  $t_{\text{н}}$  фотогенерированный заряд

$$\Delta Q = \int_0^{t_{\text{н}}} J_{\Phi}(t) dt + J_d t_{\text{н}}, \quad (3)$$

где  $J_d$  — темновой ток фотодиода. После окончания экспозиции заряд  $\Delta Q$  переносится на выходную ёмкость  $C_{\text{ПДО}}$  путём изменения напряжений на электродах трёхзатворного ПЗС-интегратора ( $U_{\text{ref}}, F_{\text{int}}, F_{\text{tr}}$ ). Напряжение на ёмкости  $C_{\text{ПДО}}$ , предварительно заряженной до напряжения  $U_D$  путём подачи на затвор транзистора  $T_0$  напряжения  $U_G$ , станет

$$U = U_D - \Delta U, \quad (4)$$

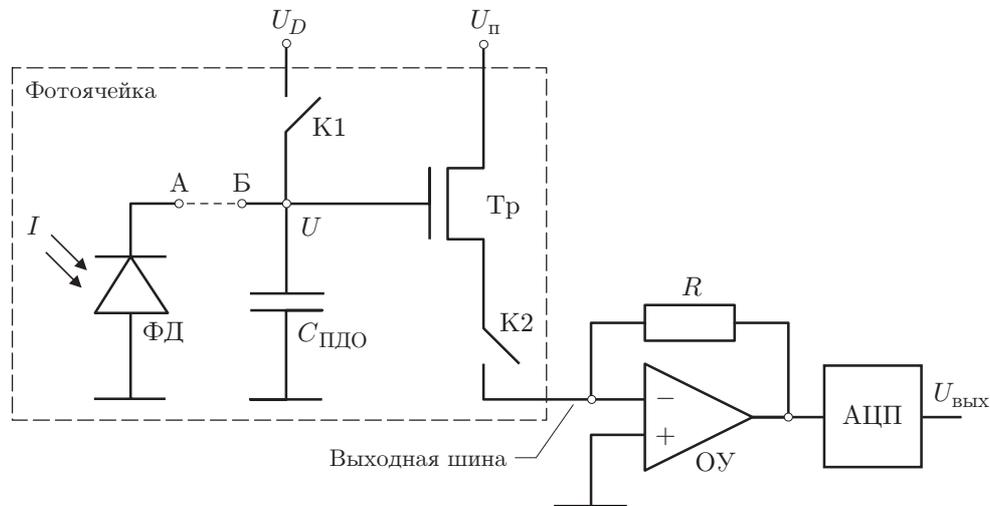


Рис. 2. Схема измерительного канала анализатора МАЭС

при этом изменение напряжения на этой ёмкости

$$\Delta U = \Delta Q / C_{\text{ПДО}}. \quad (5)$$

Можно показать, что такая фотодиодная ячейка позволяет проводить накопление фотогенерированного заряда без изменения напряжения смещения ФД и получать требуемую вольт-ваттную чувствительность  $a_1 \sim 1/C_{\text{ПДО}}$  путём формирования нужного значения ёмкости  $C_{\text{ПДО}}$ .

Эквивалентная схема измерительного канала анализатора МАЭС показана на рис. 2. В его состав входят одиночная фотоячейка линейки фотодиодов, внешний операционный усилитель (ОУ) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП). При замыкании ключа (К2) ток, протекающий через транзистор (Тр) (определяется напряжением  $U$  на ёмкости  $C_{\text{ПДО}}$ ), с помощью ОУ преобразуется в напряжение. После аналого-цифрового преобразования числовое значение напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  вводится в компьютер. На рисунке  $U_D$  — напряжение зарядки ёмкости,  $U_П$  — напряжение питания выходного транзистора. Нелинейность зависимости выходных сигналов  $U_{\text{ВЫХ}}$  измерительных каналов анализатора МАЭС от интенсивности  $I$  падающего на фотодиоды излучения в основном определяется характеристиками транзисторов, а разброс значений  $U_{\text{ВЫХ}}$  этих каналов при равномерном освещении — разбросом спектральной чувствительности ФД  $S(\lambda)$  и значений ёмкостей  $C_{\text{ПДО}}$ .

Для примера на рис. 3, а показаны графики зависимости выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$  от напряжения  $U$  на ёмкости  $C_{\text{ПДО}}$  для фотоячеек с номерами 125 и 2473 одной из линеек. Значение  $U_{\text{ВЫХ}}$  измерялось в процентах полной шкалы АЦП ( $2^{16}$ ). Обычно при настройке анализатора МАЭС границы рабочего диапазона зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}(U)$  выбираются при значениях  $U_{\text{ВЫХ}}$  и  $U$ , меньших на 5 % (и более) максимальных уровней насыщения. Эти значения отмечены пунктирной линией. Разброс зависимостей  $U_{\text{ВЫХ}}(U)$  у разных фотоячеек говорит о том, что одно и то же значение выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$  может быть получено при различных напряжениях на ёмкостях  $C_{\text{ПДО}}$  или, наоборот, при одном и том же значении напряжения на ёмкостях  $C_{\text{ПДО}}$  значения  $U_{\text{ВЫХ}}$  будут различными.

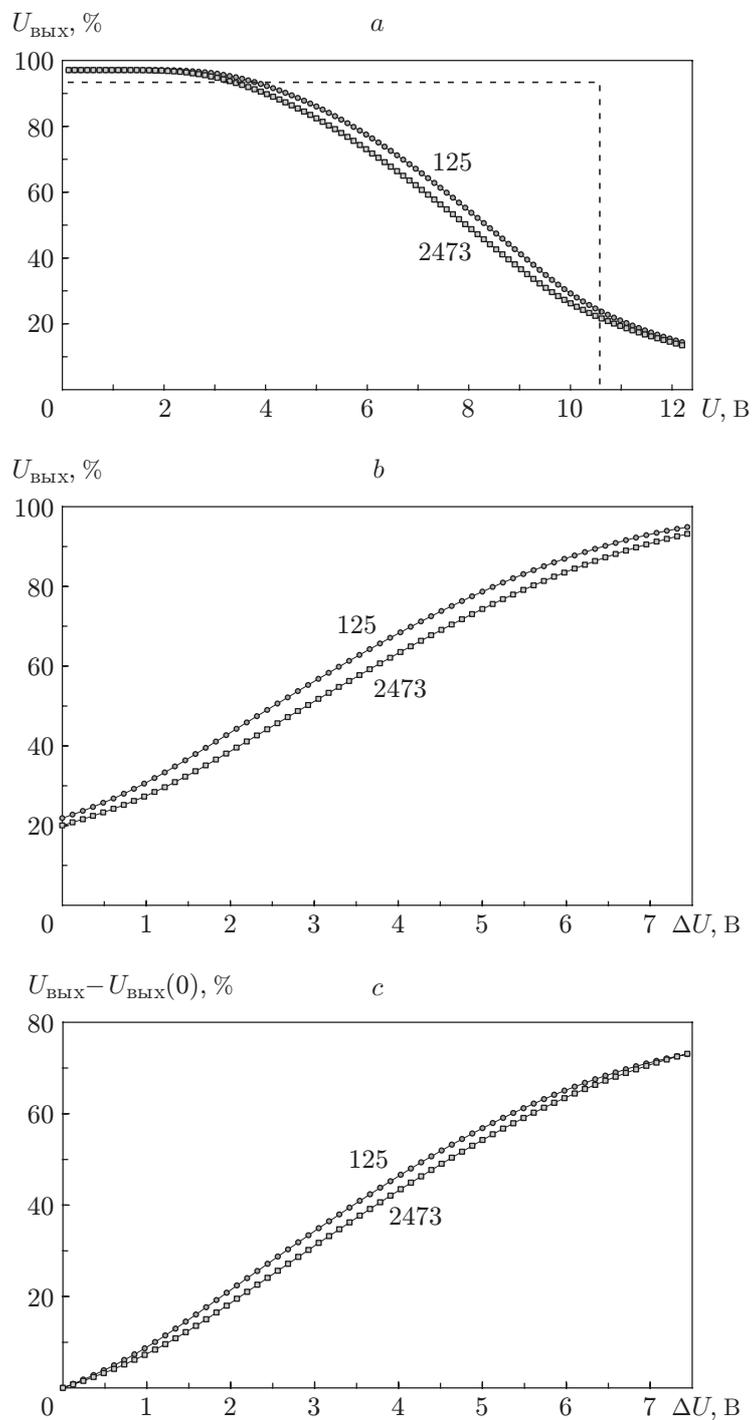


Рис. 3. Зависимости выходных сигналов двух измерительных каналов линейки БЛПП-369: от напряжения на ёмкости  $C_{\text{ПДО}}$  (a), от изменения напряжения  $\Delta U$  на этой ёмкости (b) и зависимость разности выходного и темнового сигналов этих каналов от изменения напряжения  $\Delta U$  (c)

В свою очередь, зависимости выходного сигнала фотоячеек  $U_{\text{ВЫХ}}$  от изменения напряжения  $\Delta U$  на ёмкости  $C_{\text{ПДО}}$  имеют вид, показанный на рис. 3, *b*. Они получены при условиях, что границы рабочих участков зависимостей  $U_{\text{ВЫХ}}(U)$  определены в соответствии с ранее указанной методикой, в частности напряжение  $U_{D0} = 10,6$  В. Заслуживает внимания разброс значений выходных сигналов фотоячеек при  $\Delta U = 0$ . Такие сигналы принято называть темновыми. Зависимости сигналов, вычисленные по формуле (1), от изменения напряжения  $\Delta U$  показаны на рис. 3, *c*. Можно заметить нелинейность и разброс этих зависимостей представленных измерительных каналов.

Наличие ключа К1 позволяет получить характеристики части схемы измерительного канала от транзистора до АЦП включительно путём установки с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП) напряжения  $U$  на затворе транзистора и измерения соответствующего значения  $U_{\text{ВЫХ}}$  (см. рис. 2). При этом достаточно отключить фотодиод, установив  $U_{\text{ref}} = F_{\text{int}} = F_{\text{tr}} = 0$  (см. рис. 1).

**Метод электронной калибровки измерительных каналов** состоит в следующем. Для каждого измерительного канала анализатора МАЭС при отключённом фотодиоде измеряются  $U_{\text{ВЫХ}}(U)$  при напряжениях  $U$ , пробегающих значения в диапазоне от 0 до  $U_{\text{max}}$  с шагом  $U_{\text{max}}/M$ , где  $U_{\text{max}}$  — максимально возможное  $U$ , а  $M$  — количество разбиений диапазона  $U$ . Значения  $U = U_D$  задаются с помощью ЦАП.

Границы рабочего диапазона определяются следующим образом. Находится максимальное по модулю значение производной зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}(U)$ . Левая  ${}^iU_{\text{gr}}$  и правая  ${}^iU_{D0}$  границы выбираются таким образом, чтобы значения модуля их производной в этих точках были равны половине от максимального. Так как для всех каналов может быть выбрана только одна рабочая точка  $U_{D0}$ , то она есть минимальное из всех  ${}^iU_{D0}$ . Приведённый критерий выбора границ рабочего диапазона, как показал эксперимент, повышает случайную погрешность измерения на краях диапазона не более чем на 20 % относительно центра.

Полученные зависимости  $U_{\text{ВЫХ}}(U)$  пересчитываются в изменение напряжения на выходной ёмкости фотоячейки  $\Delta U(U_{\text{ВЫХ}})$ , где  $\Delta U = U_{D0} - U$  при  $U \leq U_{D0}$ . Далее для каждого измерительного канала зависимость  $\Delta U(U_{\text{ВЫХ}})$  аппроксимируется по методу наименьших квадратов полиномом  $P_K(U_{\text{ВЫХ}})$  степени  $K$ , представленным в виде разложения по базису из полиномов Чебышёва [4, 5]:

$$\Delta U = P_K(U_{\text{ВЫХ}}) = a_0 + a_1 T_1(U_{\text{ВЫХ}}) + a_2 T_2(U_{\text{ВЫХ}}) + \dots + a_K T_K(U_{\text{ВЫХ}}), \quad (6)$$

где полиномы Чебышёва  $T_L(x)$  определяются рекуррентной формулой

$$T_{L+1}(x) = 2xT_L(x) - T_{L-1}(x), \quad L = 2, \dots; \quad T_0(x) = 1; \quad T_1(x) = x.$$

Затем полученные коэффициенты полиномов используются для вычисления точных значений  $\Delta U$  по измеряемым  $U_{\text{ВЫХ}}$ .

Представление полинома в базисе Чебышёва выбрано из-за того, что для снижения погрешности аппроксимации зависимости  $\Delta U$  до приемлемого уровня требуется высокая степень полинома. Однако построение полинома по методу наименьших квадратов с использованием традиционного степенного базиса приводит к тому, что с ростом степени полинома задача (вычисление коэффициентов полинома) становится плохо обусловленной и, как следствие, построение полиномов выше 7-й степени становится практически невозможным. Полином в базисе Чебышёва лишён этого недостатка ввиду ортогональности базисных функций. На рис. 4 для сравнения показаны ошибки аппроксимации полиномом

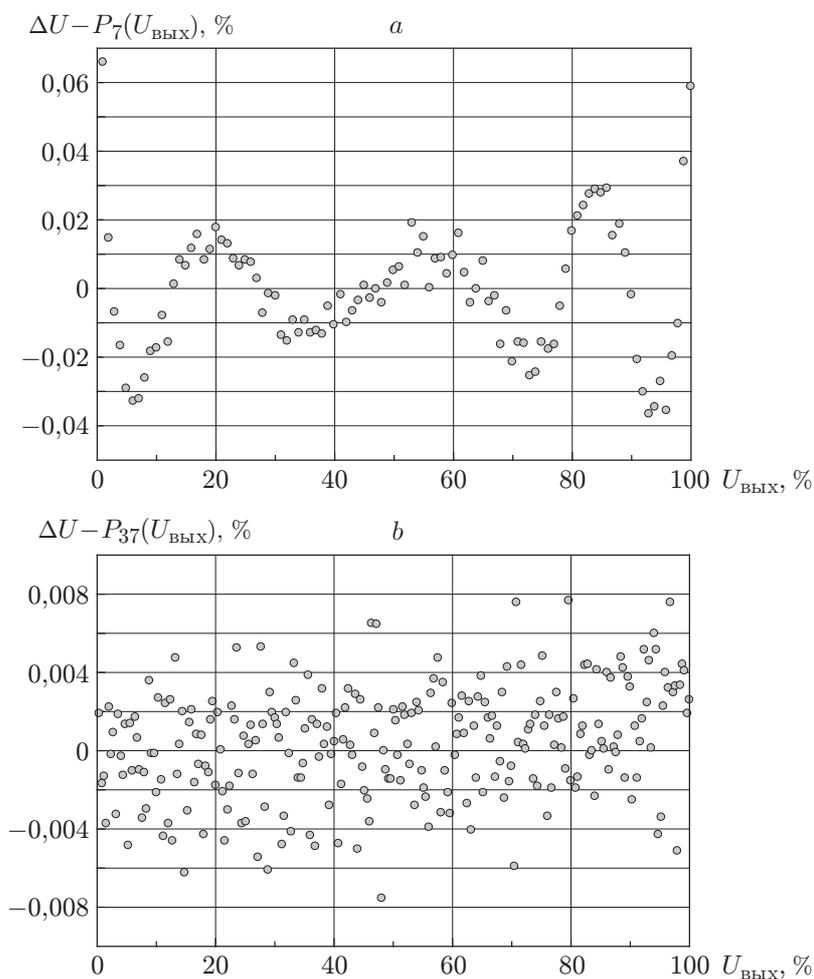


Рис. 4. Погрешность аппроксимации полиномами: степенным (а), Чебышёва (b)

7-й степени (фактически это максимум, что можно «выжать» из степенного представления полинома) и полиномом в базисе Чебышёва 37-й степени. Видно, что на рис. 4, а ошибка аппроксимации составляет величину  $\pm 0,05\%$ , которая на порядок выше случайной погрешности измерения одного узла аппроксимации, и имеет ярко выраженный синусоидальный характер. Ошибка аппроксимации, приведённая на рис. 4, b, составляет  $\pm 0,008\%$ , что лежит в пределах случайной погрешности.

Для автоматического (без участия пользователя) получения значений коэффициентов полинома  $P_K(U_{\text{вых}})$  разработан специализированный блок электронной регистрации и соответствующее программное обеспечение.

На рис. 5 показаны зависимости выходных сигналов фотоячеек анализатора МАЭС, содержащего одну линейку фотодиодов, при целых значениях напряжений  $U_D$  от 4 до 12 В включительно. Видно резкое снижение разброса выходных сигналов фотоячеек.

**Измерение остаточной нелинейности измерительных каналов.** Нелинейность зависимости фотоотклика от количества падающих на фотодиод фотонов за время экспозиции  $Y(X)$  будем характеризовать относительным отклонением этой зависимости от прямой  $F = \beta X$ :

$$\Delta Y(X) = \frac{Y(X) - \beta X}{Y(X)} \cdot 100\%, \quad (7)$$

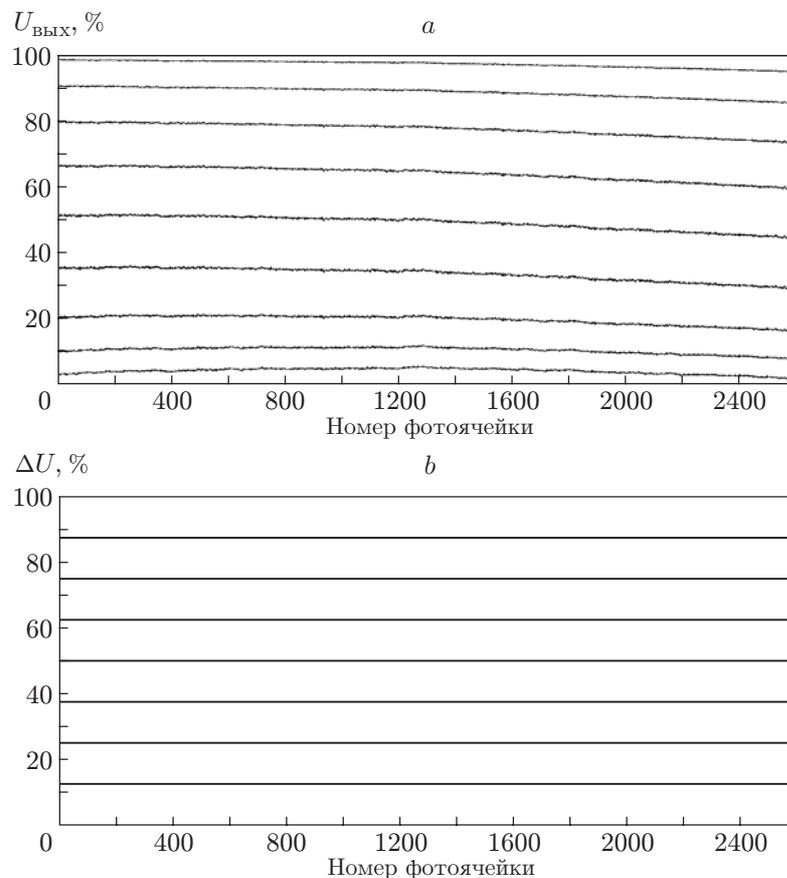


Рис. 5. Зависимости выходных сигналов от номера измерительного канала при разных значениях напряжения  $U_D$ : до (а) и после (б) калибровки

где  $\beta$  — константа, выбираемая из условия минимума максимального значения функции  $|\Delta Y(X)|$ .

Экспериментальная установка состояла из анализатора МАЭС с многокристальной сборкой из 12 линеек фотодиодов и светодиода со светорассеивающим (молочного цвета) стеклом МС19 для выравнивания диаграммы направленности. Работа анализатора МАЭС осуществлялась под управлением программы «Атом» [6]. Количество падающих на ФД фотонов при постоянной интенсивности излучения за время экспозиции  $T$  равно  $X = \alpha T$ , где  $\alpha$  — константа. Оно варьировалось 10 раз путём изменения времени экспозиции в пределах от 100 до 1000 мс. Фотоотклик измерялся в относительных единицах (процентах). Относительная случайная погрешность его измерения не превышала 0,3 %.

На рис. 6 представлены зависимости фотоотклика и его нелинейности от времени экспозиции для произвольно выбранного измерительного канала без использования электронной калибровки (а, с), а также с её использованием (б, д). Видно, что электронная калибровка снижает нелинейность измерительного канала более чем в 10 раз. Его остаточная нелинейность не превышает 1 %.

**Заключение.** В представленной работе создан метод электронной калибровки измерительных каналов анализаторов МАЭС с целью снижения нелинейности зависимости фотоотклика каждого канала от интенсивности входного излучения. Разработаны специализированный блок электронной регистрации и программное обеспечение, реализующие электронную калибровку в автоматическом режиме. Электронная калибровка снижает

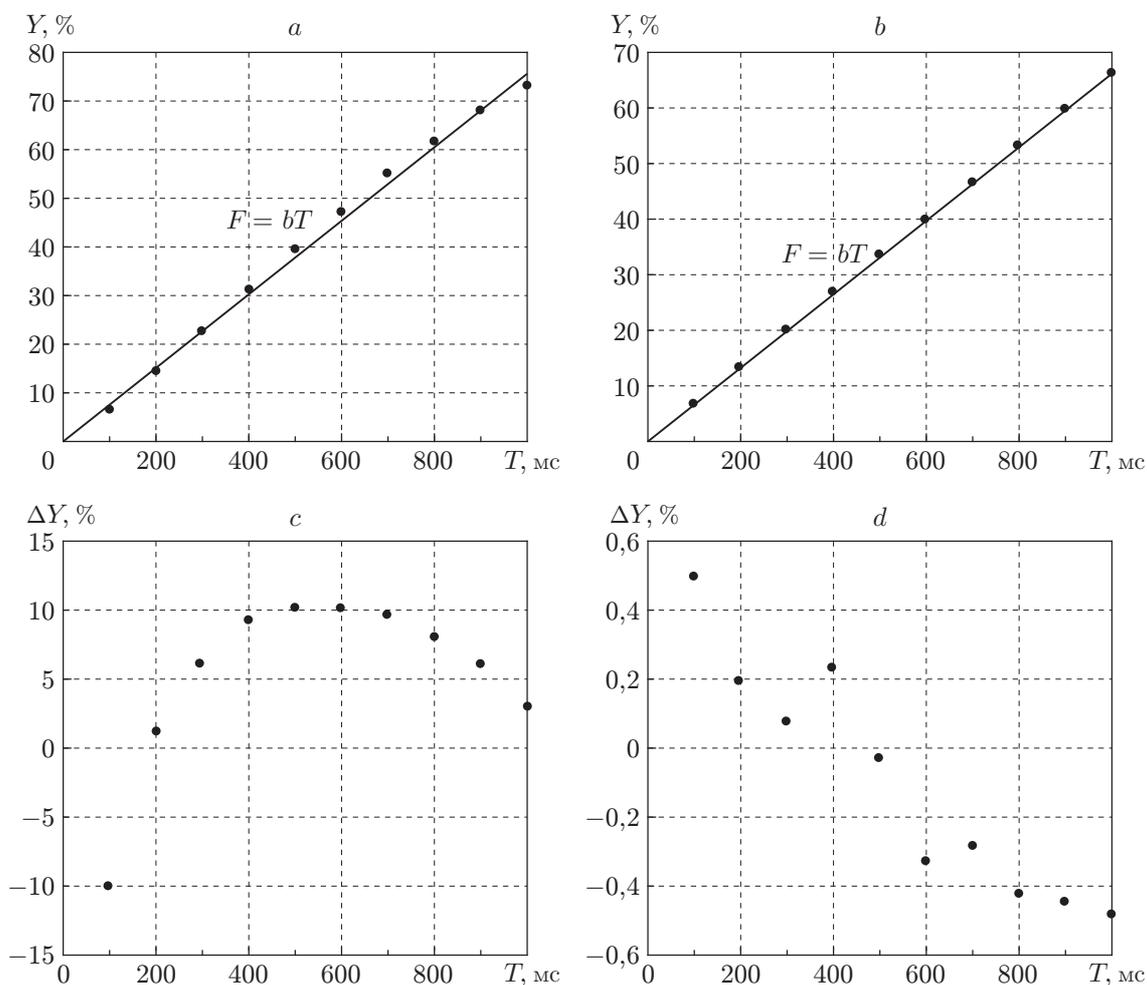


Рис. 6. Зависимости фотоотклика и его нелинейности от времени экспозиции для измерительного канала № 11782: без использования электронной калибровки (a, c) и с её использованием (b, d)

нелинейность каждого измерительного канала более чем в 10 раз. Остаточная нелинейность зависимости фотоотклика от количества падающих на фотодиод фотонов за время экспозиции не превышает 1 %. Применение метода электронной калибровки измерительных каналов анализатора МАЭС приведёт к существенному снижению погрешности результатов атомно-эмиссионного спектрального анализа веществ и материалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабусов В. А., Бехтерев А. В. Линейки фотодиодов — базовые элементы многоканальных анализаторов атомно-эмиссионных спектров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Специальный выпуск. 2007. **73**. С. 7–12.
2. Лабусов В. А. Многокристальные сборки многоканальных анализаторов атомно-эмиссионных спектров // Там же. С. 13–17.
3. Лабусов В. А., Попов В. И., Путьмаков А. Н. и др. Анализаторы МАЭС и их использование в качестве систем регистрации и обработки атомно-эмиссионных спектров // Аналитика и контроль. 2005. **9**, № 2. С. 110–115.

4. **Мирошниченко В. Л., Селюнин Д. О.** О современных методах аппроксимации экспериментальных данных // Матер. X Междунар. симп. «Применение анализаторов МАЭС в промышленности». Новосибирск, 2009. С. 22–28.  
URL: <http://www.vmk.ru/symposium/2009-X-symposium.pdf> (дата обращения: 1.09.2010).
5. **Калиткин Н. Н.** Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
6. **Гаранин В. Г., Неклюдов О. А., Петроченко Д. В.** Программное обеспечение для автоматизации атомно-эмиссионного спектрального анализа — пакет «Атом» // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Специальный выпуск. 2007. **73**. С. 18–25.

*Поступила в редакцию 28 августа 2010 г.*

---