

Таким образом, практически для всех реальных ситуаций первый внутренний контур электропривода с подчиненным управлением можно представлять аperiodическим звеном с достаточно малой постоянной времени.

Перейдем к рассмотрению второго контура. Если исходное звено второго контура является интегрирующим с передаточной функцией $W_2(s) = \frac{1}{T_2 \cdot s}$, то общая передаточная функция первого и ис-

ходного второго звена будет равна $W_{раз2}(s) = \frac{1}{(T_0 \cdot s + 1) \cdot T_2 \cdot s}$ [2].

На основе результатов моделирования можно сделать вывод о непосредственной связи между электрическими параметрами электрооборудования прокатного стана и физическими и химическими процессами, протекающими в самом стане в процессе прокатки стальной полосы, что позволяет контролировать процесс прокатки. Для элементов электропривода прокатного стана существует однозначная связь между видом дефекта и относительных чувствительностей передаточных функций, что позволит сформулировать требования к необходимому диапазону изменения электрических параметров электрооборудования стана, выделить наиболее информативные координаты автоматизированного электропривода, которые характеризуются максимальной чувствительностью к изменению состояния автоматизированного электропривода при дефекте.

Список литературы

1. Железнов Ю.Д., Коцарь С.Л., Абиев А.Г. Статические исследования точности тонколистовой прокатки. — М.: Металлургия, 1974. — 240 с.
2. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. — СПб.: Энергоатомиздат, 1994. — 496 с.

УДК 543.422.8

С.А.Ефименко¹, В.С.Портнов², А.К.Турсунбаева², А.Д.Маусымбаева²

¹ТОО «Корпорация Казахмыс», Жезказган;

²Карагандинский государственный технический университет

РЕНТГЕНРАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕДНЫХ РУД ФИЛЬТРАМИ РОССА

Жезказган кен орны мыс-мырышты кендерді рентгенорадиометриялық талдау үшін Росс сүзгілерін сұрыптау әдістемесі теориялық негізделінді. Сүзгілер стандартты әдістемемен салыстырылды. Мыстың аналитикалық сызықтарының гамма-сәулелену ағындық өлшеу қателігі 8 есе кеміді. «Никель-алюминий» фильтрлерін буындық қолдануы ұсынылды. Бұл әдістен кейін метрологиялық көрсеткіштер әлдеқайда өсті.

Theoretically substantiated method of selection of Ross filters for X-ray radiometric analysis of copper-zinc ore deposit Zhezkazgan. Compared with the standard method. While the measurement error of gamma-ray analysis of copper lines has decreased by 8 times. Proposed to use a pair of filters «nickel-aluminum». After that method increased metrological characteristics.

Дифференциальным фильтрам Росса, несмотря на очевидные преимущества, свойственны и существенные недостатки, как то: зависимость точности рентгенорадиометрического анализа (РРА) от стабильности усилительных свойств энергодисперсного спектрометра; концентрационное вырождение чувствительности; низкая точность РРА в области низких содержаний определяемого элемента.

Известно, что фильтры Росса балансируются на пробе руды, в которой отсутствует определяемый элемент, но представлены все остальные рудные компоненты данного месторождения. Подбором поверхностной плотности фильтров добиваются равенства замеров плотности потока рентгеновской флуоресценции в дифференциальном окне спектрометра, как после поглощающего, так и после пропускающего фильтра.

Аппроксимируя форму линий вторичного спектра кривой Гаусса, это условие можно записать в виде

$$N_p = N_a; \quad (1)$$

$$N_p = \frac{N'_o}{\sigma_p \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(E_i - E_p)^2}{2\sigma_p^2}}; \quad (2)$$

$$N_a = \frac{N''_o}{\sigma_a \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(E_i - E_a)^2}{2\sigma_a^2}}; \quad (3)$$

$$N'_o = \frac{K_p M_p N_o}{\mu_o^p - \mu_p} \cdot (e^{-\mu_p m_p} - e^{-\mu_o^p m_p}); \quad (4)$$

$$N''_o = \frac{K_a M_a N_o}{\mu_o^a - \mu_a} \cdot (e^{-\mu_a m_a} - e^{-\mu_o^a m_a}); \quad (5)$$

где N_p и N_a — плотность потоков гамма-излучения аналитической линии определяемого элемента для пропускающего (p) и поглощающего (a) фильтров соответственно; N_o — плотность потока излучения от пробы, падающего на фильтры; K_p, M_p, K_a, M_a — коэффициенты, зависящие от геометрических условий измерений и атомных констант, соответственно для пропускающего и поглощающего фильтров; m_p, m_a, μ_p, μ_a — поверхностные плотности и массовые коэффициенты ослабления для аналитических линий пропускающего и поглощающего фильтров соответственно; μ_o^p, μ_o^a — массовые коэффициенты ослабления пропускающего и поглощающего фильтров для излучения «пустой» пробы; $\sigma = RE/\sqrt{8 \ln 2}$ — параметр разброса линий приборного спектра с энергией E ; E_p, E_a, E_i — энергии аналитических линий фильтров и анализируемого элемента.

Из условий балансировки фильтров (2) и (3) видно, что измерение плотности потока аналитической линии определяемого элемента производится на склонах пиков собственных линий фильтров, что указывает на значительную зависимость результатов анализа от стабильности рабочих характеристик аппаратуры вообще, и на низких концентрациях определяемого элемента в особенности. Для оценки этой погрешности, дифференцируя уравнения (2) и (3) по dE , предположив, что параметр разброса линий σ не меняется при смещении линий (пиков) на величину dE , получим:

$$dN_p = N_p \cdot \frac{(E_i - E_p)}{\sigma_p^2} dE_p; \quad (6)$$

$$dN_a = N_a \cdot \left(\frac{E_i - E_a}{\sigma_a^2} \right) \cdot dE_a. \quad (7)$$

Полагая, что для линий фильтров $\sigma_p = \sigma_a = \sigma$, а величина смещения линий в обоих случаях одинакова $dE_p = dE_a = dE$, с учетом условия (1) получим:

$$dN_a = \left(\frac{E_i - E_a}{E_i - E_p} \right) \cdot dN_p. \quad (8)$$

Из выражения (8) очевидно, что смещение dN_a для линии поглощающего фильтра в точке $E = E_i$ в $(E_i - E_a) / (E_i - E_p)$ раз превышает смещение dN_p для линии пропускающего фильтра в той же точке, причем абсолютное смещение пиков, как следует из (7) и (8), прямо пропорционально интенсивности данных линий, энергетическому расстоянию между линиями фильтра и определяемого элемента, величине энергетического смещения dE (аппаратурной нестабильности) и обратно пропорционально величине амплитудного разрешения детектора. Для снижения влияния аппаратурной нестабильности следует увеличивать величину разрешения детектора, что неминуемо приведет к ухудшению чувствительности РРА.

Для повышения точности выделения аналитической линии анализируемого элемента на фоне аналитической линии мешающего элемента с близким (соседним), но обязательно большим, атомным номером, при низких содержаниях анализируемого элемента в пробе авторами предложена новая методика, по которой анализ на медь порошковой пробы медно-цинковой руды осуществляется в следующей последовательности: производится замер флуоресцентного излучения от пробы, прошедшего

через «пропускающий» никелевый фильтр (рис. 1а); затем выполняется замер флуоресцентного излучения от пробы, прошедшего через «поглощающий» алюминиевый фильтр ($K\alpha$ -линия фильтра полностью разделяется детектором с $K\alpha$ -линией меди), и от мишени из никеля (рис. 1б). По разностному спектру можно судить о содержании меди в анализируемой пробе.

При проведении работ использовалась измерительная установка РРК-103 «Поиск» с датчиком БВД-П. Детектор — пропорциональный счетчик с ксеноновым наполнением СИ-13Р и разрешением в диапазоне энергий от 7 до 10 кэВ порядка 17%. Радионуклид — кадмий-109. Прежде чем рассматривать технологию балансировки предлагаемой пары фильтров Росса, остановимся на некоторых аспектах балансировки «классической» пары фильтров на медь в присутствии цинка: никель (пропускающий) — кобальт (поглощающий):

1. Поверхностную плотность никелевого фильтра $m(\text{Ni})$ выбирают из условия ослабления этим фильтром потока рентгеновской флуоресценции линии $\text{Cu } K\alpha$ примерно в два раза:

$$N_{\text{Cu}}^{\text{Ni}} = N_{\text{Cu}} \cdot e^{-\mu_{\text{Cu}}^{\text{Ni}} m(\text{Ni})} = 0,5 N_{\text{Cu}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{Cu}}, N_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$ — плотность потока рентгеновской флуоресценции линии $\text{Cu } K\alpha$ до и после никелевого фильтра; $\mu_{\text{Cu}}^{\text{Ni}}$ — массовый коэффициент ослабления линии $\text{Cu } K\alpha$ никелевым фильтром, равный $48,5 \text{ см}^2/\text{г}$.

Из условия (9) находим $m(\text{Ni}) = \ln 2 / \mu_{\text{Cu}}^{\text{Ni}} = 0,0143 \text{ г}/\text{см}^2$.

2. Находим степень ослабления никелевым фильтром потока рентгеновской флуоресценции линии $\text{Zn } K\alpha$ мешающего элемента

$$K_{\text{Zn}}^{\text{Ni}} = N_{\text{Zn}}^{\text{Ni}} / N_{\text{Zn}}^{\text{Ni}} = N_{\text{Zn}} / N_{\text{Zn}} \cdot e^{-\mu_{\text{Zn}}^{\text{Ni}} m(\text{Ni})} = e^{\mu_{\text{Zn}}^{\text{Ni}} m(\text{Ni})} \approx 80 \text{ раз},$$

где $N_{\text{Zn}}, N_{\text{Zn}}^{\text{Ni}}$ — плотность потока линии $\text{Zn } K\alpha$ до и после никелевого фильтра; $\mu_{\text{Zn}}^{\text{Ni}}$ — массовый коэффициент ослабления линии $\text{Zn } K\alpha$ в никелевом фильтре, равный $306 \text{ см}^2/\text{г}$.

3. Находим поверхностную плотность кобальтового фильтра $m(\text{Co})$ при балансировке фильтров по линии $\text{As } K\alpha$, для чего добьемся равенства потоков излучения этой линии, прошедшей как через никелевый, так и через кобальтовый фильтры:

$$N_{\text{As}}^{\text{Ni}} = N_{\text{As}}^{\text{Co}}; \quad (10)$$

$$N_{\text{As}}^{\text{Ni}} = N_{\text{As}} \cdot e^{-\mu_{\text{As}}^{\text{Ni}} m(\text{Ni})}; \quad (11)$$

$$N_{\text{As}}^{\text{Co}} = N_{\text{As}} \cdot e^{-\mu_{\text{As}}^{\text{Co}} m(\text{Co})}, \quad (12)$$

где $N_{\text{As}}, N_{\text{As}}^{\text{Ni}}, N_{\text{As}}^{\text{Co}}$ — плотность потока линии $\text{As } K\alpha$ до и после прохождения никелевого и кобальтового фильтров; $\mu_{\text{As}}^{\text{Ni}}, \mu_{\text{As}}^{\text{Co}}$ — массовые коэффициенты поглощения линии $\text{As } K\alpha$ в никелевом и кобальтовом фильтрах (равны соответственно 180 и $165 \text{ см}^2/\text{г}$).

$$m(\text{Co}) = N_{\text{As}}^{\text{Ni}} \cdot m(\text{Ni}) / N_{\text{As}}^{\text{Co}} = 0,0156 \text{ г}/\text{см}^2.$$

4. Определим степень ослабления линии $\text{Cu } K\alpha$ при $\mu_{\text{Cu}}^{\text{Co}} = 338 \text{ см}^2/\text{г}$

$$K_{\text{Cu}}^{\text{Co}} = \frac{N_{\text{Cu}}}{N_{\text{Cu}} \cdot e^{-\mu_{\text{Cu}}^{\text{Co}} m(\text{Co})}} = \frac{N_{\text{Cu}}}{N_{\text{Cu}} \cdot e^{-\mu_{\text{Cu}}^{\text{Co}} m(\text{Co})}} = e^{\mu_{\text{Cu}}^{\text{Co}} m(\text{Co})} = 195 \text{ раз}.$$

В режиме измерений с амплитудной селекцией импульсов порядок балансировки дифференциальных фильтров аналогичен описанному выше. Разница лишь в том, что измерительный канал анализатора настраивается на максимум линии $\text{As } K\alpha$. При этом разница замеров с фильтрами при переводе анализатора в рабочий режим (настройка на максимум фотопика линии $\text{Cu } K\alpha$) согласно теории должна оставаться постоянной и отличной от нуля при промере пробы, содержащей цинк. Однако из-за временной нестабильности аппаратуры эти условия не выполняются, так как «полоса вырезания» анализатора скользит по склонам собственных фотопиков фильтров, которые сдвинуты относительно друг друга [1].

Именно это обстоятельство является основной причиной значительных погрешностей РРА в области низких содержаний определяемых элементов.

Для устранения этого обстоятельства авторами предлагается к применению:

1) другая, отличная от «классической», пара дифференциальных фильтров Росса: алюминий (пропускающий) — никель (поглощающий);

2) дополнительная никелевая мишень, устанавливаемая над вторым окном детектора СИ-13Р тогда, когда под первым окном детектора находится алюминиевый фильтр (рис. 1).

Для пары фильтров «никель–алюминий» параметры балансировки, рассчитанные по методике, приведенной выше, следующие:

а) поверхностные плотности фильтров: $m(\text{Ni}) = 0,0143 \text{ г/см}^2$; $m(\text{Al}) = 0,1082 \text{ г/см}^2$;

б) коэффициенты ослабления линии $\text{ZnK}\alpha$ фильтрами: никелевым — 80 раз, алюминиевым ($\mu_{\text{Zn}}^{\text{Al}} = 41,5 \text{ см}^2/\text{г}$) — 89 раз;

в) коэффициенты ослабления линии $\text{CuK}\alpha$ фильтрами: кобальтовым — 195 раз, алюминиевым ($\mu_{\text{Cu}}^{\text{Al}} = 50,7 \text{ см}^2/\text{г}$) — 241 раз.

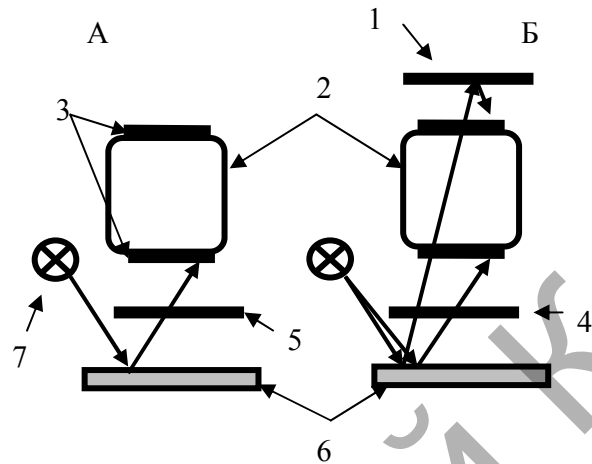


Рис. 1. Принцип возбуждения и регистрации потоков излучений в модифицированном варианте дифференциальных фильтров Росса. Фазы работы фильтров: первая (А) и вторая (Б); 1 — никелевая мишень; 2 — пропорциональный детектор излучений; 3 — входные окна детектора; 4 — алюминиевый фильтр; 5 — никелевый фильтр; 6 — проба; 7 — радионуклид кадмий-109

Таким образом, пара фильтров «никель–алюминий» имеет практически те же показатели ослабления линий $\text{CuK}\alpha$ и $\text{ZnK}\alpha$, что и классическая пара фильтров «никель–кобальт».

«Никелевая» мишень используется для компенсации влияния на результаты ПРА фотопика собственной рентгеновской флуоресценции никелевого фильтра. С ее помощью во вторичном гамма-спектре формируется фотопик никеля, идентичный тому, что формируется от никелевого фильтра. Источником возбуждающего излучения может быть либо рассеянное излучение основного радионуклида кадмий-109, либо прямое излучение от дополнительного радионуклида кадмий-109, установленного со стороны второго окна детектора. С помощью такого методического приема удалось изъять из спектра фотопик линии $\text{NiK}\alpha$ от никелевого фильтра и тем самым значительно повысить чувствительность ПРА на медь.

Для расчета поверхностной плотности никелевой мишени воспользуемся следующей схемой:

1) плотность потока рентгеновской флуоресценции никелевого фильтра N_{Ni}^{ϕ} при возбуждении фильтра рассеянным излучением радионуклида с плотностью потока N_s определим из выражения

$$N_{\text{Ni}}^{\phi} = \frac{K_1 N_s}{\mu_{\text{Ni}}^{\text{Ni}} - \mu_s^{\text{Ni}}} \cdot \left(e^{-\mu_s^{\text{Ni}} n(\text{Ni})} - e^{-\mu_{\text{Ni}}^{\text{Ni}} m(\text{Ni})} \right), \quad (13)$$

где $\mu_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$, μ_s^{Ni} — массовые коэффициенты ослабления линии $\text{NiK}\alpha$ и рассеянного излучения радионуклида в никелевом фильтре;

2) плотность потока рентгеновской флуоресценции никелевой мишени N_{Ni}^m , возбуждаемой рассеянным излучением радионуклида после прохождения алюминиевого фильтра и газа-наполнителя детектора, определим из выражения

$$N_{\text{Ni}}^m = \frac{K_2 N_s'}{\mu_{\text{Ni}}^{\text{Ni}} - \mu_s^{\text{Ni}}} \cdot \left[1 - e^{-(\mu_{\text{Ni}}^{\text{Ni}} + \mu_s^{\text{Ni}}) m_{\text{Ni}}^m} \right]; \quad (14)$$

$$N_s' = N_s \cdot e^{-\mu_s^{\text{Al}} m^{\text{Al}}} \cdot e^{-\mu_s^c d}, \quad (15)$$

где μ_s^{Al} , μ_s^c — массовые коэффициенты ослабления рассеянного излучения радионуклида в алюминиевом фильтре и газе-наполнителе детектора; K_1 и K_2 — постоянные коэффициенты, зависящие от

атомных констант и геометрии измерений; ρ_z — условная плотность газа-наполнителя; d — диаметр детектора (см);

3) поверхностную плотность никелевой мишени находим из выражения

$$N_{\text{Ni}}^m = \frac{1}{\mu_{\text{S}}^{\text{Ni}} + \mu_{\text{Ni}}^{\text{Nu}}} \cdot \ln \left[1 - \frac{(\mu_{\text{S}}^{\text{Ni}} \mu_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}) K_1 N_{\text{S}} \cdot (e^{-\mu_{\text{S}}^{\text{Ni}} m(\text{Ni})} - e^{-\mu_{\text{Ni}}^{\text{Ni}} m(\text{Ni})})}{(\mu_{\text{S}}^{\text{Ni}} - \mu_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}) K_2 N_{\text{S}} e^{-\mu_{\text{S}}^{\text{Al}} m(\text{Al})} \cdot e^{-\mu_{\text{S}}^z \rho_z d}} \right]; \quad (16)$$

4) подставляя в (16) численные значения величин: $d = 3,5$ см; $\rho(\text{аргон}) = 0,001784$ г/см³; $\mu_{\text{S}}^{\text{Al}}, \mu_{\text{S}}^{\text{Ni}}, \mu_{\text{Ni}}^{\text{Nu}}, \mu_{\text{S}}^z = \mu_{\text{S}}^{\text{Ar}}$ равны соответственно: 2,95; 28,3; 59,1 и 7,52 см²/г при условии, что $N_{\text{Ni}}^{\text{ф}} = N_{\text{Ni}}^m$ и $K_1 = K_2$, получим значение величины $m_{\text{Ni}}^m = 0,0384$ г/см² (аналогичные расчеты можно сделать для детектора с ксеноновым и криптоновым газом-наполнителем).

На рисунке 2 приведены фрагменты спектров вторичного излучения проб медной руды после прохождения никелевого (а) и алюминиевого плюс никелевая мишень (б) фильтров, а также разностный спектр (в). Спектр после алюминиевого фильтра плюс никелевая мишень представлен фотопиком линии NiK α от никелевой мишени. Амплитуда пика постоянна и не зависит от концентрации меди в пробе. На этот фотопик практически не накладывается фотопик линии CuK α , целиком поглощаемой на алюминиевом фильтре. В энергетический интервал (7,75–8,35 кэВ), вырезаемый из вторичного спектра дифференциальным окном амплитудного анализатора импульсов, не попадает и приведенный на спектре фотопик линии СтK α (рис. 1а). Следует ожидать, что в указанный интервал не попадут и линии элементов с $Z < 28$.

В случае использования классической пары фильтров «никель–кобальт» измерения рентгеновской флуоресценции меди производят на правых склонах фотопиков линий NiK α и CoK α . При этом одновременность измерений с фильтрами является одной из причин существенных ошибок определений содержаний меди в случае, если спектры сдвигаются вследствие флуктуаций, либо напряжения питающей сети, либо коэффициента передачи усилительного тракта аппаратуры, либо чрезмерной импульсной загрузки детектора.

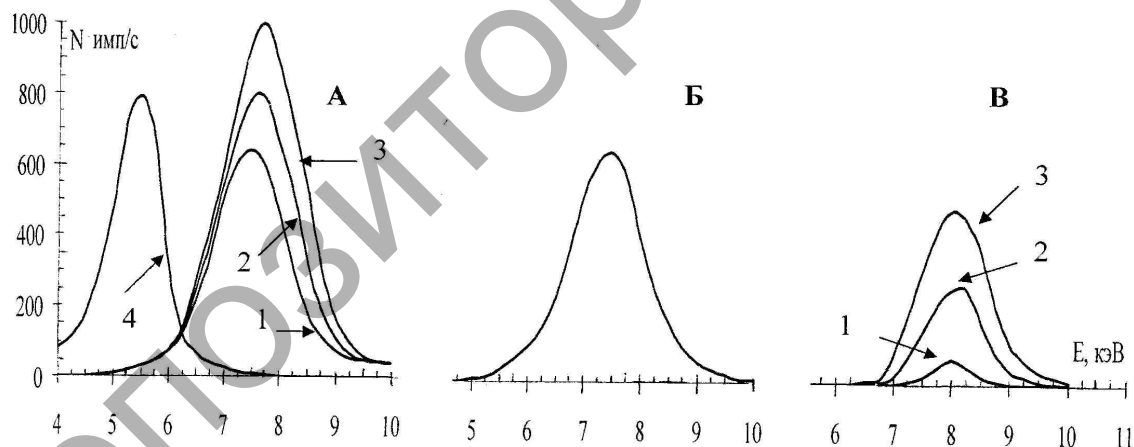


Рис. 2. Спектры РРА проб медной руды с фильтрами Росса по предложенному способу: 1 — 0,10 % Cu; 2 — 1,6 % Cu; 3 — 3,50 % Cu; 4 — СтK α

Оценка стабильности аналитических параметров у обеих методик реализации РРА с помощью дифференциальных фильтров Росса показала преимущество предложенной методики, разброс параметра $\Delta N_{\text{Cu}} = N_{\text{Ni}} - N_{\text{Al+Ni}}$ составил всего 1,7 % против 12,1 % в традиционной методике.

Изложенная выше методика в течение ряда лет успешно апробирована на медно-цинковых рудах Жезказганского месторождения, причем метрологические характеристики РРА оказались значительно лучше, чем при использовании классической пары дифференциальных фильтров Росса.

Список литературы

1. Бахтияров А.В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ в геологии и геохимии. — Л.: Недра, 1985. — 257 с.