

УДК 5.50.504.5

Математическое моделирование дозиметрических систем контроля

Mathematical modeling of dosimetric control systems

*И.Ю. Сергеев¹,
канд.техн.наук
С.А. Гарелина²,
канд.техн. наук
К.П. Латышенко²,
д-р техн.наук
Н.П. Валуев²,
д-р техн. наук*

*¹ФГБОУ ВО Сибирская
пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России
²ФГБОУ ВО Академия
гражданской защиты
МЧС России*

*I.Y. Sergeev¹,
Ph.D. of Engineering Sciences,
S.A. Garelina²,
Ph.D. of Engineering Sciences,
K.P. Latyshenko²,
Holder of an Advanced
Doctorate in Engineering
Sciences,
N.P. Valuev²,
Holder of an Advanced
Doctorate in Engineering
Sciences*

*¹FSBEI HE Siberian Fire
and Rescue Academy
EMERCOM of Russia
²FSBMEI HE Academy
of Civil Protection of the
Ministry of Emergencies
of Russia*

Аннотация:

В статье излагаются результаты математического моделирования систем дозиметрического контроля. На основе математической модели проведена оценка параметров систем и обосновываются оптимальные решения. Получены математические модели метрологических характеристик (чувствительности, погрешности) систем прямого и дифференциального измерений. Предпочтительно использование систем дифференциального измерения.

Ключевые слова: дозиметрическая система, математическая модель, функция отклика, статическая характеристика, погрешность измерения.

Abstract:

The article presents the results of mathematical modeling of dosimetric control systems. On the basis of mathematical model the estimation of parameters of systems is carried out and optimum decisions are proved. Mathematical models of metrological characteristics (sensitivity, error) of direct and differential measurement systems are obtained. The use of differential measurement systems is preferred.

Key words: dosimetric system, mathematical model, response function, static characteristic, measurement error.

В настоящее время достаточно широко применяют системы дозиметрического контроля вторичного сырья, поступающего на переработку в транспортных средствах [1, 2]. Существует значимая вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций радиационного характера [3] при переработке больших объемов сырья, в особенности металлолома, что характерно для металлургических предприятий.

Повышения эффективности радиационного мониторинга объектов и прилегающих к ним территорий можно добиться за счет увеличения экспрессности, вероятности обнаружения радиационных аномалий и расширения функциональных возможностей, существующих систем комплексной безопасности и мониторинга [4-12].

Дозиметрические системы представляют собой один или несколько крупногабаритных (0,5 – 1,5 м) сцинтилляционных детекторов, подключенных к регистрирующему устройству. Детекторы устанавливают в зоне контроля, через которую следуют транспортные средства с сырьем, поступающим на переработку (рис. 1).



Рис. 1 - Система дозиметрического контроля транспорта с сырьем

Качество дозиметрических систем определяется минимальной величиной активности (мощности) радиоактивных источников или минимальной концентрацией радиоактивных веществ в сырье, надежно обнаруживаемых системой контроля. Для построения качественных систем важно иметь их математическую модель, на основании которой можно оценивать основные параметры систем и выбирать оптимальные решения. В литературе этому вопросу не уделяется должного внимания, что в известной степени сдерживает развитие и применение дозиметрических систем контроля. В связи с этим целью данной работы является построение математической модели дозиметрических систем.

Дозиметрическая система, являющаяся разновидностью средства измерений, основана на преобразовании измеряемой величины X (обычно концентрации определяемого компонента) или величины, являющейся функцией X , в выходной сигнал W (рис. 2).

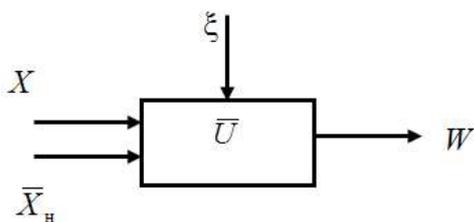


Рис. 2 - Принципиальная схема квазистатического измерения

Выходной сигнал W является функцией не только информативного параметра объекта контроля X , но также параметров и условий работы ИП – , неинформативных параметров анализируемого сырья и собственных шумов дозиметрической системы ξ . Тогда математическая модель дозиметра в квазистатическом режиме имеет вид

$$W = f(X, \bar{X}_n, \bar{U}, \xi). \quad (1)$$

Вид функции f определяется в основном выбранным методом и схемой измерения. В общем случае величины \bar{X}_n , \bar{U} и ξ являются случайными, что обуславливает вероятностный характер отклика W даже при фиксированном, но не известном значении X .

При номинальных значениях параметров \bar{X}_n , \bar{U} и $\bar{\xi}$, когда

$$\hat{\bar{X}}_n = \langle \bar{X}_n \rangle, \quad \hat{\bar{U}} = \langle \bar{U} \rangle, \quad \hat{\bar{\xi}} = \langle \bar{\xi} \rangle = 0, \quad (1)$$

соотношение (1) определяет номинальную статическую характеристику дозиметрической системы

$$\hat{W} = f(X, \hat{\bar{X}}_n, \hat{\bar{U}}), \quad (2)$$

где $\hat{}$ – символ номинального значения величины; $\langle \dots \rangle$ – символ математического усреднения соответствующего параметра.

Выражение (2) позволяет получить абсолютную ΔX и относительную δX погрешность системы и ее среднеквадратическое отклонение (СКО) σ .

Структурную схему измерительного канала дозиметрической системы можно представить следующим образом.

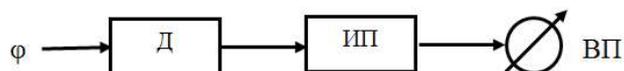


Рис. 3 - Блок-схема измерительного канала дозиметрической системы: Д – детектор; ИП – измерительный преобразователь; ВП – вторичный прибор (регистрирующее устройство).

Входным (информативным) параметром измерительного канала является плотность потока энергии ионизирующих частиц ϕ . Тогда сигнал, генерируемый детектором площадью S , равен

$$X = \phi S, \quad (3)$$

В этом случае математическая модель измерительного канала прямого измерения примет вид

$$W = \phi SK + \xi, \quad (4)$$

где K – коэффициент усиления, под которым понимается совокупность собственно усилителя, нормирующего преобразователя, АЦП, ЦАП и пр.

В этом случае статическая характеристика дозиметра прямолинейна (рис. 4).

Чувствительность измерительного канала дозиметрической системы S равна

$$S = \frac{dW}{d\varphi} = SK, \quad (5)$$

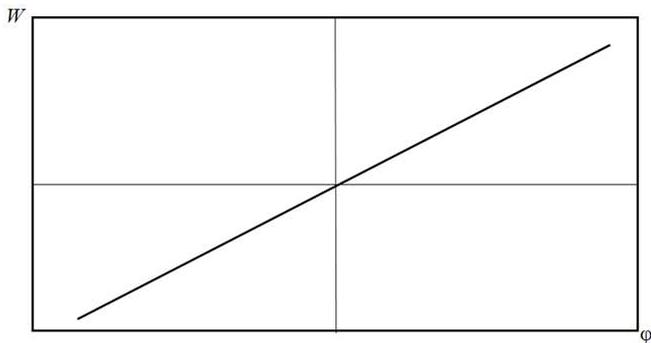


Рис. 4 - Статическая характеристика измерительного канала дозиметрической системы

Из формулы (5) можно сделать следующие выводы:

- чувствительность измерительного канала S постоянна на всём диапазоне изменения φ (рис. 5);
- для увеличения чувствительности необходимы большие значения S и K .

Абсолютная погрешность системы $\Delta\varphi$ равна:

$$\Delta\varphi = \Sigma \frac{\partial W}{\partial \varphi} = \varphi K \Delta S + \varphi S \Delta K + \xi, \quad (6)$$

где ΔS и ΔK – абсолютные изменения параметров S и K соответственно.

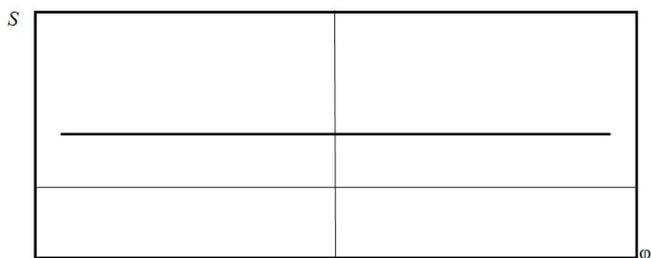


Рис. 5 - Чувствительность измерительного канала дозиметрической системы

Из анализа формулы (6) можно сделать следующие выводы:

- абсолютная погрешность измерительного канала является аддитивной величиной;
- для уменьшения погрешности необходимо уменьшать значения φ , S и K , а также минимизировать отклонения ΔS и ΔK .

Относительна погрешность измерительного канала дозиметрической системы $\delta\varphi$ равна:

$$\delta\varphi = \frac{\Delta W}{W(\varphi)} = \delta S + \delta K + \xi, \quad (7)$$

Из анализа формулы (7) можно сделать следующие выводы:

- относительная погрешность измерительного канала также является аддитивной величиной;
- для уменьшения погрешности необходимо минимизировать отклонения ΔS и ΔK .

СКО равно:

$$\sigma = \{\sigma_s^2 + \sigma_k^2 + \sigma_\xi^2\}^{1/2}, \quad (8)$$

Из анализа формулы (8) следует, что для уменьшения величины СКО, надо минимизировать σ_s , σ_k и σ_ξ .

Рассмотрим теперь дифференциальную схему измерительного канала дозиметрической системы, которая позволяет отстроиться от значения фона.

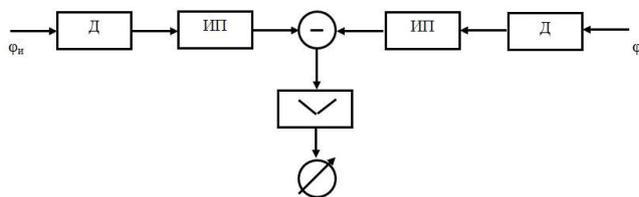


Рис. 6. Дифференциальная схема измерительного канала дозиметрической системы

Математическая модель статической характеристики измерительного канала дозиметрической системы имеет следующий вид:

$$W_d = \varphi_1 SK - \varphi_2 SK + \xi = SK(\varphi_1 - \varphi_2) + \xi = SK(\varphi_n + \varphi_0 - \varphi_0) + \xi = SK\varphi_n + \xi, \quad (9)$$

где φ_n – информативная составляющая входного сигнала измерительного канала; φ_0 – сигнал фона.

Как следует из формулы (9), выходной сигнал W_d измерительного канала пропорционален разности сигналов двух детекторов, измеряющих информативный φ_n и фоновый φ_0 параметры излучения, т.е. не имеет фоновой составляющей φ_0 .

В этом случае статическая характеристика дифференциальной схемы измерительного канала дозиметрической системы прямолинейна (рис. 7).

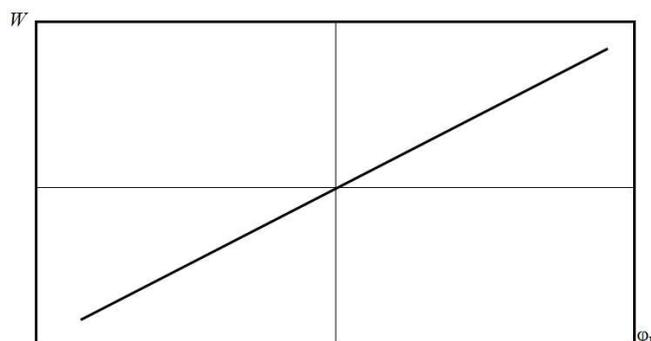


Рис. 7 - Статическая характеристика дифференциальной системы измерительного канала дозиметрической системы

Чувствительность дифференциальной схемы измерительного канала дозиметрической системы S_d равна

$$S_d = \frac{dW}{d\varphi_n} = SK, \quad (10)$$

Из анализа формулы (10) можно сделать следующие выводы:

- чувствительность S дифференциальной схемы измерительного канала постоянна на всём диапазоне изменения φ_n (рис. 7);
- для увеличения чувствительности необходимы большие значения S и K .

Абсолютная погрешность дифференциальной схемы $\Delta\varphi_n$ измерительного канала дозиметрической системы равна:

$$\Delta\varphi_n = \sum \frac{\partial W}{\partial \varphi_n} = \varphi_n K \Delta S + \varphi_n S \Delta K + \xi, \quad (11)$$

где ΔS и ΔK – абсолютные изменения параметров S и K соответственно.

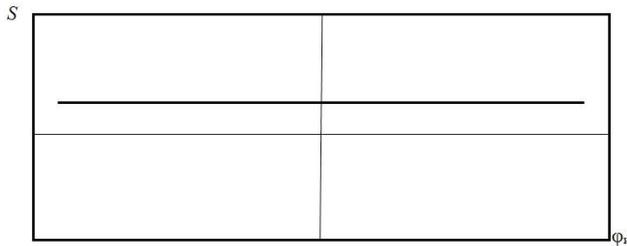


Рис. 8 - Чувствительность дифференциальной схемы измерительного канала дозиметрической системы

Из анализа формулы (11) можно сделать следующие выводы:

- абсолютная погрешность измерительного канала является аддитивной величиной;
- для уменьшения погрешности необходимо уменьшать значения φ_n , S и K , а также минимизировать отклонения ΔS и ΔK .

Относительная погрешность дифференциальной схемы $\delta\varphi_n$ измерительного канала дозиметрической системы равна:

$$\Delta\varphi_n = \frac{\Delta W}{S(\varphi_n)} = \delta S + \delta K + \xi. \quad (12)$$

Из анализа формулы (12) можно сделать следующие выводы:

- относительная погрешность измерительного канала также является аддитивной величиной;
- для уменьшения погрешности необходимо минимизировать отклонения ΔS и ΔK .

СКО дифференциального дозиметра σ_n равно:

$$\sigma_n = \{\sigma_S^2 + \sigma_K^2 + \sigma_\xi^2\}^{1/2}, \quad (13)$$

Из анализа формулы (13) следует, что для уменьшения величины СКО, надо минимизировать σ_S , σ_K и σ_ξ .

Выводы.

Получены статические характеристики (функции преобразования) дозиметрических систем прямого и дифференциального измерений. В обоих случаях статические характеристики линейные.

Найдены математические модели чувствительности обеих систем. В обоих случаях они оказались равными и постоянными (неизменными) по всему диапазону измерений.

Получены математические модели погрешностей (абсолютной, относительной и СКО) дозиметрических систем прямого и дифференциального измерений. Показано, что они имеют аддитивные составляющие и не содержат мультипликативную составляющую.

Полученные математические модели метрологических характеристик могут служить количественной мерой для сравнения и оптимизации метрологических характеристик дозиметрических систем.

Выходной сигнал дифференциальной схемы измерительного канала дозиметрической системы пропорционален только информативной составляющей сигнала φ_n , в то время как выходной сигнал измерительного канала прямого измерения зависит от информативного φ_n и фонового φ_0 сигналов.

При прочих равных условиях система прямого измерения и дифференциальная система имеют сравнимую погрешность измерения.

Таким образом, предпочтительнее использовать дифференциальную систему дозиметрического контроля.

Литература

1. Валуев Н.П., Мойш Ю.В., Качалов В.М., Николенков Н.В. Автоматизированные системы радиационного контроля сырья и металлолома. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2009. – № 3 – С. 107 – 110.
2. Валуев Н.П., Пушкин И.А., Стасишин Л.А. Повышение эффективности контроля наземных транспортных средств высокочувствительных дозиметрических систем // Грузовик. – 2013, № 8. – С. 44 – 48.

3. Валуев Н.П., Лысова О.В., Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов // «Научные и образовательные проблемы гражданской защиты». – 2015, № 3. – С.47 – 50.
4. Латышенко, К.П. Экологический мониторинг. Учебник и практикум // К.П. Латышенко. – М.: Юрайт, 2019. – 375 с.
5. Сергеев И.Ю. Повышение эффективности радиационного мониторинга закрытого административного территориального образования с объектами атомной промышленности и прилегающих территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2018. № 3 (10). С. 9-12.
6. Сергеев И.Ю. Определение параметров динамического радиационного контроля грузов в транспортных средствах // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2019. № 2 (41). С. 94-98
7. Сергеев И.Ю. Выбор методики определения вероятности обнаружения радиационной аномалии при динамическом контроле радиационной обстановки // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. № 1 (12). С. 8-11.
8. Сергеев И.Ю. Выбор параметров динамического радиационного мониторинга территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. № 2 (13). С. 45-48.
9. Сергеев И.Ю. Способы контроля радиационной обстановки для систем комплексной безопасности территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2018. № 4 (11). С. 8-10.
10. Валуев Н.П., Лысова О.В., Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов // В книге: Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий XX Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций // Тезисы докладов. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2015. С. 169-171.
11. Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов // В сборнике: Безопасность и живучесть технических систем // Материалы и доклады: в 3-х томах. 2015. С. 95-99.
12. Валуев Н.П., Никоненков Н.В., Сергеев И.Ю., Сташишин Л.А. Радиационный контроль транспортных средств с помощью переносных приборов и стационарных систем // Грузовик. 2015. № 9. С. 35-39.