

УДК 539.1.074:389

**ВЛИЯНИЕ МЕРТВОГО ВРЕМЕНИ НА ПОГРЕШНОСТЬ ПРИ
ИЗМЕРЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ****С.А. Душкин, В.А. Одинец, А.Н. Орбинский**

Национальный научный центр «Институт метрологии», 42, ул. Мироносицкая, г. Харьков, 61002, Украина

E-mail: orobin@mail.ru

Поступила в редакцию 9 июня 2008 г.

Представлены модели мертвого времени: продлевающее и непродлевающее; приведены погрешности при измерении характеристик ионизирующих излучений за счет влияния мертвого времени; определены верхняя граница диапазона и погрешность при измерении характеристики с учетом влияния мертвого времени, установлена зависимость времени измерения характеристики от погрешности при измерении мертвого времени с учетом верхней границы диапазона и погрешности при измерении характеристики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мертвое время, продлевающее, непродлевающее, диапазон измерений, погрешность при измерении.

С целью увеличения верхней границы диапазона и уменьшения погрешности при измерении характеристик ионизирующих излучений при работе в импульсном (счетном) режиме в уравнении измерений необходимо учитывать влияние мертвого времени: знать модель мертвого времени – продлевающее или непродлевающее; знать погрешность при его измерении, от чего зависит время измерения характеристики.

Несмотря на большое количество работ о влиянии мертвого времени при измерении характеристик ионизирующих излучений (например, [1-3]), в литературе отсутствуют данные исследований, которые бы учитывали влияние мертвого времени на диапазон и погрешность при измерении характеристик ионизирующих излучений с учетом модели мертвого времени и погрешности при его измерении; также отсутствуют исследования зависимости времени измерения характеристики от погрешности при измерении мертвого времени с учетом верхней границы диапазона и погрешности при измерении характеристики.

Необходимость написания данной работы возникла с тем, что многие разработчики средств измерительной техники (СИТ) в области ионизирующих излучений в широком диапазоне измерений не всегда корректно учитывают влияние мертвого времени с учетом его модели, погрешности при его измерении и времени измерения характеристики, что приводит к увеличению погрешности при измерении характеристики.

Цель работы – определить диапазон измерений характеристики ионизирующего излучения и погрешность при ее измерении с учетом модели мертвого времени, погрешности при его измерении и времени измерения характеристики.

**ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК
ЗА СЧЕТ ВЛИЯНИЯ МЕРТВОГО ВРЕМЕНИ**

Скорость счета импульсов на выходе первичных преобразователей (под первичным преобразователем понимаем часть СИТ, которая включает в себя детектор и все блоки до устройства обработки данных (УОД)) определяется выражениями [4]

$$n = n_0 \cdot e^{-n_0 \cdot \tau} \quad \text{или} \quad \Theta = \Theta_0 \cdot e^{-\Theta_0}, \quad (1)$$

где n_0 - истинная скорость счета при $\tau = 0$; τ - мертвое время;

$\Theta = n \cdot \tau$ и $\Theta_0 = n_0 \cdot \tau$ - обобщенные параметры, характеризующие скорость счета и мертвое время.

Из выражений (1) можно получить, что $n_{max} = \frac{1}{e \cdot \tau}$ при $n_0 = \frac{1}{\tau}$ (или $\Theta_{max} = \frac{1}{e}$ при $\Theta_0 = 1$), т. е. (1) можно применять для однозначного определения n_0 при $n \leq \frac{1}{e \cdot \tau}$ и $n_0 \leq \frac{1}{\tau}$; $\lim_{n_0 \rightarrow \infty} (n) = 0$.

Выражения (1) представим как $n_0 = n \cdot e^{n_0 \cdot \tau}$ или $\Theta_0 = n \cdot e^{\Theta_0}$. Последние два выражения при $\Theta_0 \ll 1$ разложим в ряд и запишем в виде

$$n \cong \frac{n_0}{1 + n_0 \cdot \tau} \quad \text{или} \quad \Theta \cong \frac{\Theta_0}{1 + \Theta_0}. \quad (2)$$

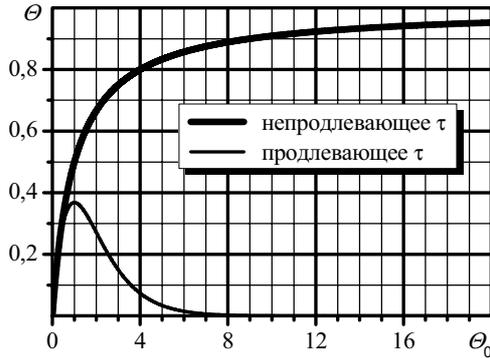


Рис. 1. Зависимости $\theta = f(\theta_0)$.

Из выражений (2) можно получить, что максимальное значение скорости счета $n_{max} = \lim_{n_0 \rightarrow \infty} (n) = \frac{1}{\tau}$ (или $\theta_{max} = \lim_{\theta_0 \rightarrow \infty} (\theta) = 1$), т.е. (2) можно применять для однозначного определения n_0 при $n < \frac{1}{\tau}$ и $n_0 \rightarrow \infty$.

Выражения (1) и (2) характеризуют модели мертвого времени: продлевающее и непродлевающее мертвое время, соответственно [4].

Продлевающее мертвое время или непродлевающее определяется физикой процессов в детекторах и схемными решениями электронной части СИТ после детектора до УОД.

Влияние продлевающего мертвого времени можно учесть выражениями [5]

$$n_0 = \frac{n}{1 - \frac{\alpha_1 \cdot n \cdot \tau}{1 - \frac{\alpha_2 \cdot n \cdot \tau}{1 - \frac{\alpha_3 \cdot n \cdot \tau}{1 - \frac{\alpha_4 \cdot n \cdot \tau}{1 - \frac{\alpha_5 \cdot n \cdot \tau}{1 - \alpha_6 \cdot n \cdot \tau}}}}} \quad \text{или} \quad \theta_0 = \frac{\theta}{1 - \frac{\alpha_1 \cdot \theta}{1 - \frac{\alpha_2 \cdot \theta}{1 - \frac{\alpha_3 \cdot \theta}{1 - \frac{\alpha_4 \cdot \theta}{1 - \frac{\alpha_5 \cdot \theta}{1 - \alpha_6 \cdot \theta}}}}}, \quad (3)$$

где $\alpha_1 = \alpha_5 = \alpha_6 = 1$; $\alpha_2 = \alpha_3 = 0,5$; $\alpha_4 = 0,76$.

Приведенные коэффициенты α_i были уточнены авторами настоящей статьи.

На рис. 2 приведены зависимости $\theta_{01} = f(\theta)$ и $\theta_{03} = f(\theta)$, полученные из (1) и (3), соответственно.

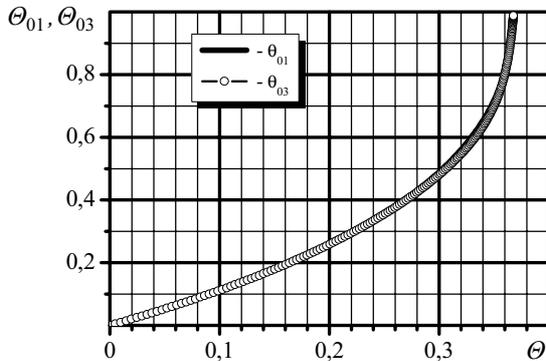


Рис. 2. Зависимости $\theta_{01} = f(\theta)$ и $\theta_{03} = f(\theta)$.

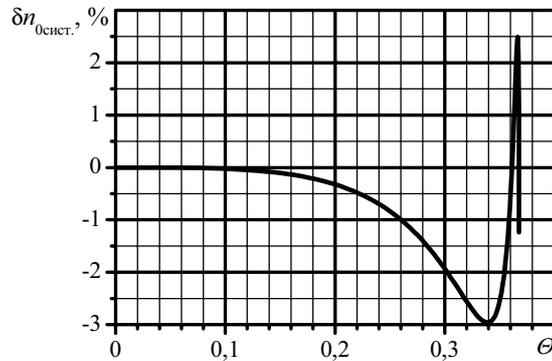


Рис. 3. Зависимость $\delta n_{0_{сист.}} = f(\theta)$ при измерении скорости счета с учетом продлевающего мертвого времени.

Относительная систематическая погрешность при вычислении скорости счета по формуле (3), определенная как $\delta n_{0_{сист.}} = \frac{\theta_{03} - \theta_{01}}{\theta_{01}} = f(\theta)$, приведена на рис. 3.

Относительную погрешность при определении n_0 из выражения (3) (рис. 4) представим в виде

$$\delta n_0 = \frac{\Delta n_0}{n_0} = \frac{f(n + \Delta n, \tau + \Delta \tau) - f(n, \tau)}{n_0}. \quad (4)$$

Влияние непродлевающего мертвого времени можно учесть выражениями [4]

$$n_0 = \frac{n}{1 - n \cdot \tau} = \frac{n}{1 - \theta} \quad \text{или} \quad \theta_0 = \frac{\theta}{1 - \theta}. \quad (5)$$

Относительную погрешность при определении n_0 из выражения (5) (рис. 5) представим в виде

$$\delta n_0 = \frac{\sqrt{\Theta^2 \cdot (\delta\tau)^2 + (\delta n)^2}}{1 - \Theta}. \quad (6)$$

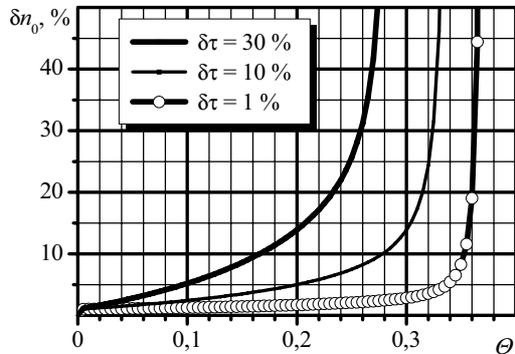


Рис. 4 Зависимость $\delta n_0 = f(\Theta)$ при измерении скорости счета с учетом продлевающего мертвого времени при $\delta n = 1\%$.

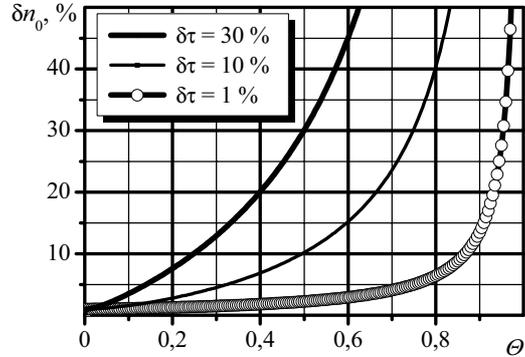


Рис. 5. Зависимость $\delta n_0 = f(\Theta)$ при измерении скорости счета с учетом непродлевающего мертвого времени при $\delta n = 1\%$.

Зависимости относительных систематических погрешностей при измерении скорости счета без учета влияния мертвого времени, определенные как $\delta n_{0\text{сисст.}} = \frac{n - n_0}{n_0}$, приведены на рис. 6. Зависимости относительных систематических погрешностей при измерении n_{0n} для продлевающего мертвого времени при условии, что τ определено как непродлевающее и n_{0n} вычисляется по (5) – $\delta n_{0\text{нсисст.}} = \frac{n_{0n} - n_0}{n_{0n}}$, приведены на рис. 7.

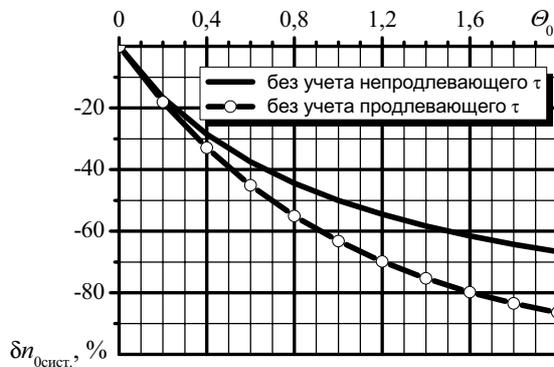


Рис. 6. Зависимости $\delta n_{0\text{сисст.}} = f(\Theta_0)$ при измерении скорости счета без учета влияния мертвого времени:

$$- \delta n_{0\text{сисст.}} = -\frac{\Theta_0}{1 + \Theta_0} = -\Theta \quad \text{для непродлевающего } \tau;$$

$$- \delta n_{0\text{сисст.}} = e^{-\Theta_0} - 1 \quad \text{для продлевающего } \tau.$$

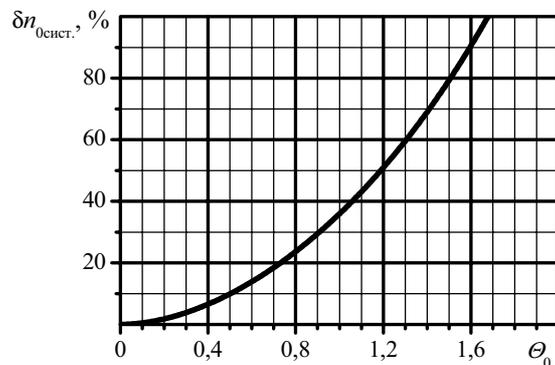


Рис. 7. Зависимости $\delta n_{0\text{нсисст.}} = f(\Theta_0)$ при измерении скорости счета для продлевающего мертвого времени при условии, что τ определено, как непродлевающее.

В общем случае, суммарная погрешность при измерении n_0 ($\delta n_{0\Sigma}$) состоит из систематической погрешности, обусловленной погрешностью при измерении мертвого времени, неправильным выбором модели мертвого времени и погрешностью уравнения измерений (3) для продлевающего мертвого времени и случайной погрешности, обусловленной погрешностью измерения скорости счета n , т.е. $\delta n_{0\Sigma} = \delta n_{0\text{сисст.}} + K_P \cdot \sigma_n$, где K_P - коэффициент, зависящий от доверительной вероятности; σ - среднее квадратическое отклонение [6].

Относительную погрешность при измерении n_0 с учетом (5) и того, что радиоактивный распад подчиняется распределению Пуассона, запишем в виде

$$\delta n_0 = K_P \cdot \sigma_{n_0} = \delta N = \frac{K_P \cdot \sigma_N}{\langle N \rangle} = \frac{K_P}{\sqrt{\langle N \rangle}} = \frac{K_P}{\sqrt{\langle n_0 \rangle \cdot t}} = K_P \cdot \sqrt{\frac{(1-\Theta)}{\langle n \rangle \cdot t}}, \tag{7}$$

где $N = n_0 \cdot t$ - количество импульсов, измеренное за время t ; $\sigma_N = \sqrt{\langle N \rangle}$ - среднее квадратическое отклонение N ; $\langle N \rangle$ - математическое ожидание N .

Из (7) с учетом (6) найдем время измерения при заданном значении δn_0 :

$$t \geq \frac{K_P^2}{(\delta n_0)^2 \cdot \langle n_0 \rangle} = \frac{K_P^2 \cdot (1-\Theta)^2}{[\Theta^2 \cdot (\delta\tau)^2 + (\delta n)^2] \cdot \langle n \rangle}. \tag{8}$$

Зависимости $t = f(\Theta)$ (8) приведены на рис. 8, из которого видно, что, если выполняется неравенство (8), то для определения времени измерения при $\tau = 0$ ($n = n_0$) справедливо неравенство

$$t \geq \frac{K_P^2}{(\delta n)^2 \cdot \langle n \rangle}. \tag{9}$$

Поэтому можно считать, что $\delta n = \frac{K_P}{\sqrt{\langle n \rangle \cdot t}}$. Зависимости $\delta n = f(n)$ приведены на рис. 9.

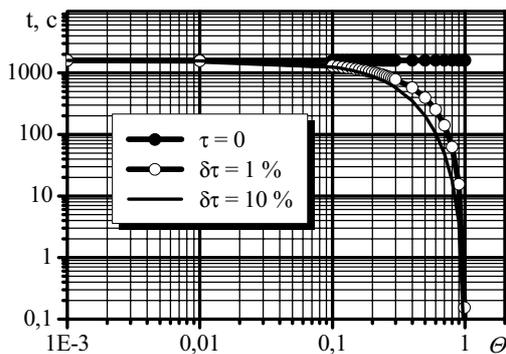


Рис. 8. Зависимости $t = f(\Theta)$ при $n = 1 \text{ с}^{-1}$ и $\delta n = 5\%$.

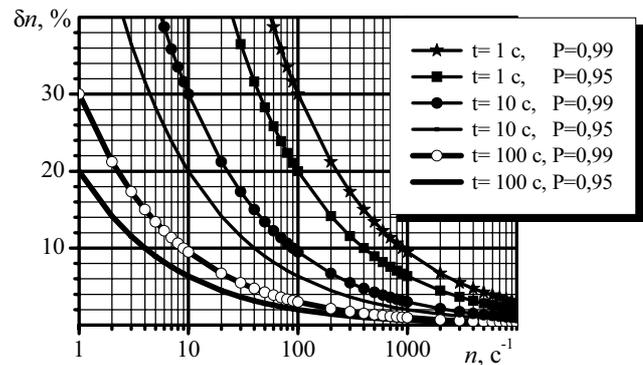


Рис. 9. Зависимости $\delta n = f(n)$ при $t = \text{var}$ и $P = \text{var}$.

Зная скорость счета n_0 , можно вычислить значение характеристики ионизирующих излучений $\left(X = \frac{n_0}{S} \right)$ через чувствительность S : активность, поток, плотность потока, дозу, мощность дозы и т.д. α -, β -, γ -, рентгеновского и нейтронного излучений.

Относительную погрешность при измерении X представим в виде

$$\delta X = \sqrt{(\delta n_0)^2 + (\delta S)^2}, \tag{10}$$

где δn_0 вычисляется по (4) с учетом (3) или по (6); $\delta S = \sqrt{(\delta n)^2 + (\delta X_s)^2}$, если $X_s \gg X_\phi$.

Индекс «э» здесь и далее обозначает, что измерения выполняются на эталонных установках.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ И ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В общем случае, $n = n_\Sigma - n_\phi$, где n_Σ - суммарная скорость счета; n_ϕ - скорость счета при фоновых значениях характеристики X .

Чтобы можно было пренебречь погрешностью Δn_ϕ , должны выполняться неравенства [7]

$$\Delta n_\Sigma \geq 3 \cdot \Delta n_\phi \text{ или } \frac{n_\Sigma}{n_\phi} \geq 3 \cdot \frac{\delta n_\phi}{\delta n_\Sigma}. \tag{11}$$

Из (10) при условии $\delta n \leq \frac{\delta X_s}{3}$ следует, что

$$\delta S \cong \delta X_{\phi}, \quad (12)$$

Из (10) с учетом (12) получим, что при заданных значениях δX и δX_{ϕ}

$$\delta n_0 = \sqrt{(\delta X)^2 - (\delta X_{\phi})^2}. \quad (13)$$

Рассмотрим непродлевающее мертвое время.

Приравняв (13) и (6), найдем Θ (рис. 10):

$$\Theta = \frac{1 - \sqrt{1 - \eta_1 \cdot \eta_2}}{\eta_1}, \quad (14)$$

$$\text{где } \eta_1 = 1 - \frac{(\delta\tau)^2}{(\delta X)^2 - (\delta X_{\phi})^2}; \quad \eta_2 = 1 - \frac{(\delta n)^2}{(\delta X)^2 - (\delta X_{\phi})^2}.$$

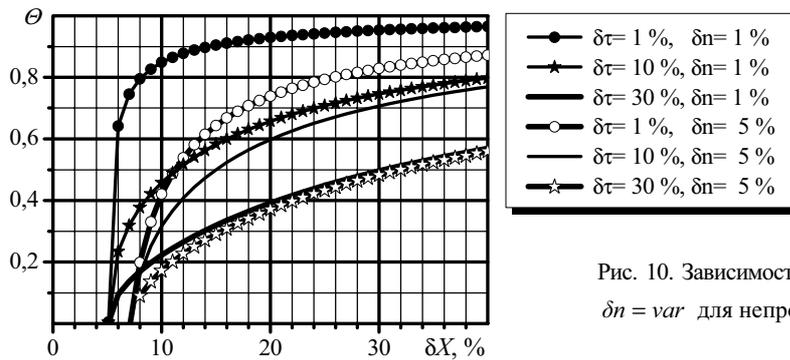


Рис. 10. Зависимости $\Theta = f(\delta X)$ при $\delta X_{\phi} = 5\%$, $\delta\tau = \text{var}$ и $\delta n = \text{var}$ для непродлевающего мертвого времени.

Верхнюю границу диапазона при измерении характеристики X при условии, если $X_{max} \gg X_{\phi}$, определим как

$$X_{max} = \frac{\Theta_{max}}{S \cdot \tau \cdot (1 - \Theta_{max})}, \quad (15)$$

где Θ_{max} - обобщенный параметр для заданной погрешности при измерении характеристики X .

Зная погрешности δX_{ϕ} , $\delta\tau$ и δn , по выражению (14) определим Θ_{max} при заданном значении δX . Подставив Θ_{max} в (15), определим X_{max} при заданных значениях S и τ .

Из (9) с учетом (14) найдем зависимость времени измерения характеристики от погрешности при измерении непродлевающего мертвого времени (рис. 11):

$$t \geq \frac{K_P^2 \cdot \tau}{[\chi^2 \cdot (1 - \Theta)^2 - \Theta^2 \cdot (\delta\tau)^2] \cdot \Theta}, \quad (16)$$

где $\chi^2 = (\delta X)^2 - (\delta X_{\phi})^2$.

Из неравенства (16) видно, что $\chi^2 \cdot (1 - \Theta)^2 - \Theta^2 \cdot (\delta\tau)^2 > 0$, откуда следует, что при заданных значениях δX и δX_{ϕ} значения Θ и $\delta\tau$ связаны между собой неравенством $0 \leq \Theta < \frac{\chi}{\chi + \delta\tau}$.

Анализ зависимостей (рис. 10 и рис. 11) позволяет сделать следующие выводы:

- на погрешность при измерении характеристики влияет погрешность при измерении мертвого времени;
- с ростом погрешности $\delta\tau$ при $P = \text{Const}$, $\delta X_{\phi} = \text{Const}$ и $\delta X = \text{Const}$ возрастает время измерения и уменьшается верхняя граница диапазона измерений.

При продлевающем мертвом времени верхнюю границу диапазона при измерении характеристики X при условии, если $X_{max} \gg X_{\phi}$, можно найти из уравнения

$$S \cdot \tau \cdot X_{max} = \Theta_{max} \cdot e^{S \cdot \tau \cdot X_{max}}. \quad (17)$$

Алгоритм определения X_{max} для продлевающего мертвого времени следующий:

- по выражению (13) определить δn_0 при заданных значениях δX и δX_{ϕ} ;

- при помощи выражений (4) и (3) построить зависимость $\delta n_0 = f(\theta)$ (рис. 4) при заданных значениях $\delta\tau$ и δn , по которой определить θ_{max} ;
- численным методом из трансцендентного уравнения (17) определить X_{max} при θ_{max} при заданных значениях S и τ .

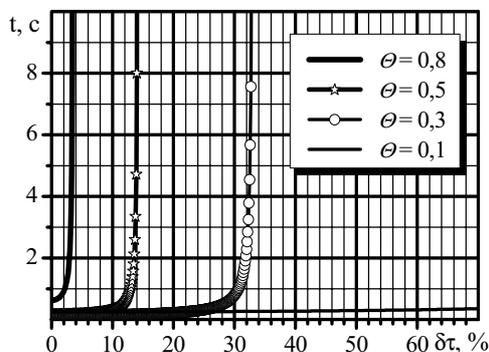


Рис. 11. Зависимости $t = f(\delta\tau)$ при $P = 0,95$, $\delta X_s = 5\%$, $\delta X = 15\%$, $\tau = 100$ мкс и $\theta = var$ для непродлевающего мертвого времени.

ВЫВОДЫ

1. Чтобы правильно учесть влияние мертвого времени, необходимо определить модель мертвого времени: продлевающее или непродлевающее, иначе погрешность при измерении характеристик ионизирующих излучений может быть до 50 и более процентов.
2. Суммарная погрешность при измерении истинной скорости счета состоит из систематической погрешности, обусловленной погрешностью при измерении мертвого времени, неправильным выбором модели мертвого времени и погрешностью уравнения измерений для продлевающего мертвого времени; и случайной погрешности, обусловленной погрешностью измерения скорости счета.
3. Получены выражения для определения диапазона измерений характеристики ионизирующего излучения и погрешности при ее измерении с учетом модели мертвого времени, погрешности при его измерении и времени измерения характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muller J.W. Some remarks on the Galushka method // Rapport BIPM-93/2. Bureau International des Poids et Mesures. – 1993. – P. 1 – 7.
2. Галушка А.М., Каденко І.М., Ермоленко Р.В. Застосування диференційного підходу для оцінки характеристик пуассонівських потоків // Вісник Київського університету. Серія: фіз.-мат. науки. – 1999. – Вип. 3. – С. 369 – 377.
3. Каденко І.Н., Галушка А.Н., Ермоленко Р.В. и др. Дозиметр-радиометр β - γ -излучения с расширенным динамическим диапазоном // ПТЭ. – 2001. – № 3. – С. 122 – 125.
4. Справочник по ядерной физике: Справочник / Немец О.Ф., Гофман Ю.В. – Киев: «Наукова думка», 1975. – 416 с.
5. Мохон М.С. The effect of dead times. January 2003 // www.ancient-charm.neutron-eu.net/FILES/DEADTwp.doc.
6. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – Введ. 01.01.86. – М.: Изд-во стандартов. – 1985. – 42 с.
7. ГОСТ 25935-83. Приборы дозиметрические. Методы измерения основных параметров. – Введ. 01.01.85. – М.: Изд-во стандартов. – 1984. – 40 с.

INFLUENCE OF DEAD TIME ON INACCURACY AT MEASUREMENT OF CHARACTERISTICS OF IONIZING RADIATIONS

S.A. Dushkin, V.A. Odinets, A.N. Orobinskiy

National Scientific Centre «Institute of Metrology», 42, Mironosickaya Str., Kharkov, 61002, Ukraine
E-mail: orobin@mail.ru

Extended and non-extended models of dead time are described; errors due to the influence of dead time when measuring characteristics of ionizing radiation are given; the upper border of the range and the error of measuring the characteristic are determined taking into account the influence of dead time; the dependence of the time of measuring characteristic on the error when measuring dead time is determined taking into the upper border of the range and the measurement error.

KEY WORDS: dead time, extended model, non-extended model, measurement range, measurement error.