

## Эксплуатационная надежность радиоизотопных приборов в системах автоматического контроля и регулирования доменных печей

В.А. СМОЛЯК

Днепродзержинский государственный технический университет

С применением математического моделирования определены критерии эксплуатационной надежности радиоизотопных приборов в системах автоматического контроля и регулирования доменных печей.

З застосуванням математичного моделювання визначені критерії експлуатаційної надійності радіонуклідних приладів у системах автоматичного контролю та регулювання доменних печей.

Using mathematical modeling there are determined criteria of reliability of control and measuring devices in the systems of automation of blast furnaces.

Радиоизотопные приборы (РИП) эффективно применяются в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическим процессом доменной плавки [1]. Для автоматического экспрессного контроля влажности доменного кокса применяются нейтронные влагомеры [2]. Уровень и профиль поверхности засыпи шихты в доменных печах измеряется радиометрическим уровнемером и профилемером, которые перспективны для АСУТЦДП [3]. Служба огнеупорной футеровки и кладки доменных печей контролируется с применением радионуклидных источников ионизирующего излучения [4].

Метрологические характеристики, введенные для оценки качества контрольно-измерительных приборов (КИП) всех общетехнических видов, применяются и для специфических радиоизотопных приборов (РИП). Однако даже в пределах параметров этих характеристик РИП имеют определенную специфику, учет которой необходим при их конструировании и, особенно, при их эксплуатации в системах автоматизации металлургических агрегатов, в частности – доменных печей.

Известно, что показания любого КИП из-за воздействия различных факторов отличаются от действительной величины контролируемого (измеряемого) технологического параметра получаемой информации [5]. Поэтому основное требование, предъявляемое к РИП, состоит в его необходимой надежности, т.е. чтобы при его эксплуатации погрешность показаний с заданной вероятностью не превосходила заданных пределов, т.е. выполнялись условия:

$$A_{\bar{A}} \leq \dot{A} \leq A_{\bar{A}}^+ \quad (1a)$$

при

$$D_{\bar{N}} \geq D_{\bar{N}C} \quad (1b)$$

где

$$A_{\bar{A}}^{\pm} = \frac{\pm \Delta \psi_{\bar{A}}}{\psi_{i\bar{a}e\bar{n}} - \psi_{i\bar{e}i}}; \dot{A} = \frac{\Delta \psi}{\psi_{i\bar{a}e\bar{n}} - \psi_{i\bar{e}i}}; \Delta \psi = \psi - \psi_{\bar{A}} \quad (1b)$$

и  $A$  – приведенная погрешность прибора;  $A_{\bar{A}}^{\pm}$  – допустимая погрешность, т.е. наибольшие значения приведенной погрешности, допустимые нормами, например ТУ на прибор;  $\psi_{\max}$  и  $\psi_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значение шкалы прибора;  $\psi$  – показание прибора;  $\psi_d$  – действительное значение контролируемого технологического параметра;  $\Delta \psi$  – абсолютная погрешность прибора;  $\Delta \psi_d$  – ее наибольшее допустимое значение;  $P_c$  – вероятность выполнения условия (1a);  $P_{c3}$  – ее заданное

допустимое значение. Условие (1a) может быть представлено в виде:

$$\Delta \psi_{\bar{A}}^- \leq \Delta \psi \leq \Delta \psi_{\bar{A}}^+ \quad (2)$$

У нерадиоизотопных приборов случайная погрешность называется аппаратурной и определяется совместным воздействием множества аппаратурных причин: случайными отклонениями режимов работы узлов, случайными изменениями характеристик деталей и т.д., причем резко доминирующие причины устраняются путем стабилизации соответствующих элементов прибора. Вследствие многочисленности причин, в соответствии с теоремой Ляпунова, случайная аппаратурная погрешность  $A_a$  считается распределенной по закону нормального распределения. Вероятность  $P_{c3}$  принимается для всех нерадиоизотопных приборов одинаковой и равной 0,9972, вследствие чего в явном виде в характеристиках приборов не указывается. Величина допустимой погрешности  $A_d$  у нерадиоизотопных приборов даже без принятия специальных мер снижения случайной погрешности не превосходят нескольких процентов и для приборов технологического контроля задается в основном в диапазоне 1-2,5 %.

В настоящее время имеется тенденция перехода от значения  $P_{c3}=0,9972$  к значению  $P_{c3}=0,954$ , что еще более усугубляет указанные недостатки канонизированного задания вероятности  $P_{c3}$  всех приборов.

У радиоизотопных приборов наряду с аппаратурой есть еще радиационная составляющая случайной погрешности  $A_p$ . Она обусловлена фундаментальными причинами: отсутствием корреляции между актами распада возбужденных ядер источника излучения с минимально возможной плотностью частиц или квантов, случайными во времени и пространстве, взаимодействием частиц или квантов с веществом. Если не принимать специальных мер при конструировании и монтаже аппаратуры, на объекте эти причины могут вызвать весьма вероятные погрешности в десятки процентов, т.е. снизить их надежность.

Таким образом, для радиоизотопных приборов справедливо соотношение:

$$\dot{A} = \dot{A}_a + \dot{A}_p \quad (3)$$

где знак «+» является лишь оператором, указывающим на совместное действие обоих составляющих. Вследствие этого при конструировании радиоизотопных приборов возникает необходимость решения двух дополнительных задач: оценки величины  $A_p$  с целью определе-

ния условий снижения ее до допустимого значения и оценки совокупного влияния обеих составляющих на характеристики прибора. При этом следует учитывать два обстоятельства. Одно из них состоит в том, что первая основная характеристика надежности радиоизотопных приборов – точность – может быть, также как и у нерадиоизотопных приборов, охарактеризована величиной допустимой погрешности  $A_d$ , и, следовательно, ее определение не имеет какой-либо специфики, кроме необходимости дополнительного решения указанных двух задач. Временные интервалы, в течение которых выполняется условие (1а), являются интервалами точной работы прибора (а, рис. 1).

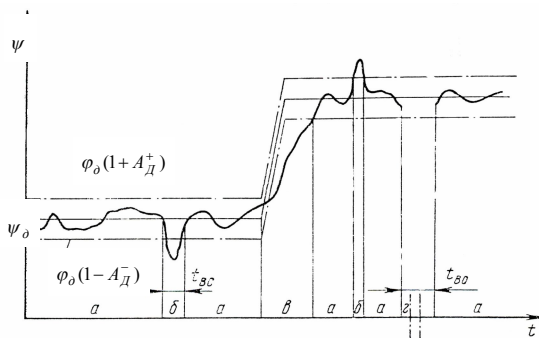


Рис. 1. Изменение контролируемого технологического параметра  $\psi_d$  и выходного сигнала радиоизотопного прибора  $\psi$ .

Второе обстоятельство состоит в том, что заданное одинаковой величины допустимой вероятности  $P_{с3}=0,9972$  для всех типов радиоизотопных приборов недопустимо. Для многих контролируемых и управляющих приборов требуется индивидуальное задание величины  $P_{с3}$ , существенно большее 0,9972. Таким образом, возникает необходимость учитывать их величину  $P_{с3}$  в основных характеристиках прибора. С тем чтобы не изменять традиционного определения точности прибора, значение  $P_{с3}$  необходимо учитывать в другой основной характеристике – надежности работы, где учет  $P_{с3}$  представляется более удобным и логичным.

Рассмотрим случаи нарушения условия (1а). Всякий реальный прибор имеет определенную инерционность, вследствие чего условие (1а) нарушается при резких изменениях величины контролируемого технологического параметра (в, рис.1). Длительность возникающих при этом в приборе переходных процессов оценивается с помощью положений теории автоматического регулирования. Специфической особенностью радиоизотопных приборов в этом отношении является только то, что для уменьшения радиационной составляющей погрешности  $A_p$  в приборе необходимо инерционное звено: счетчик импульсов или интегрирующая ячейка. Увеличение инерционности этого звена уменьшает радиационную составляющую  $A_p$ , но уменьшает и быстродействие прибора. Поэтому вторая основная характеристика надежности радиоизотопного прибора – быстродействие, – характеризуется временем переходного процесса  $T_6$ , которое должно быть выбрано не минимальным, а оптимальным в каждом конкретном случае его применения.

Нарушения условия (1а) возникают также вследствие выхода из строя различных существенных узлов и деталей прибора. Такие нарушения называются отказами. Для восстановления работоспособности прибора после отказа необходим ремонт прибора, на что затрачивается некоторое время восстановления  $t_{во}$  (г, рис.1). Влияние отказов, на работу прибора, оценивается с помощью закономерностей теории надежности, например, величиной среднего времени безотказной работы прибора (наработкой на отказ)  $t_0$  и коэффициентом готовности прибора по отказам:

$$\hat{E}_{\bar{A}i} = \frac{t_0}{t_0 + \bar{t}_{\bar{A}i}} \quad (4)$$

Кроме отказов при работе прибора происходят сбои (область б, рис.1). Сбой принципиально отличается от отказов. Они не связаны с выходом из строя каких-либо элементов прибора, и возникают из-за неблагоприятного сочетания значений составляющих случайной погрешности  $A$ . Просуществовав некоторое время  $t_{сб}$ , сбой исчезает, как только сочетание составляющих случайной погрешности становится настолько благоприятным, что вновь начинает выполняться условие (1а). При этом никакого ремонта не требуется. Как процесс возникновения и ликвидации сбоев, так и процесс возникновения и ликвидации отказов являются стохастическими процессами. Для оценки влияния сбоев на работу прибора используется положения теории надежности. Замена вероятности отказа  $P_0$  на вероятность сбоя  $P'_с = 1 - P_с$  позволяет вычислить такие характеристики влияния сбоев, как среднее время работы прибора без сбоя (неработка на сбой)  $t_c$  и коэффициент готовности по сбоям:

$$\hat{E}_{\bar{A}i} = \frac{t_0}{t_0 + \bar{t}_{\bar{A}i}} \quad (4 а)$$

Обе эти величины учитывают вероятность  $P_с$  выполнения условия (1а), но имеют существенно более ясный технический смысл.

Таким образом, в метрологическом отношении величины, характеризующее влияние отказов и сбоев, однотипны. Вследствие этого их целесообразно считать численными оценками основной характеристики радиоизотопных приборов – надежности работы прибора.

Из рисунка 1 следует, что указанные характеристики оценивают любое возможное состояние прибора при его эксплуатации. В заключение рассмотрения характеристик отметим их роль в оценке возможности применения РИП в системах контроля и регулирования доменной печи. Поскольку производительность агрегата в значительной степени зависит от того, насколько точно, быстро и надежно функционируют его системы управления, прибор может быть применен в них только при условии, что его основные характеристики отвечают условиям:

$$\bar{A}_{\bar{A}} \leq \bar{A}_{\bar{A}C} (5 а); t_0 \geq t_{0C} (5 в); t_{\bar{N}} \geq t_{\bar{N}C} (5 д)$$

$$\bar{O}_{\bar{A}} \leq \bar{O}_{\bar{A}C} (5 б); \hat{E}_{\bar{A}i} \geq \hat{E}_{\bar{A}iC} (5 г); \hat{E}_{\bar{A}N} \geq \hat{E}_{\bar{A}NC} (5 е)$$

где  $A_{дз}$ ,  $T_{6з}$ ,  $t_{0з}$ ,  $K_{т0з}$ ,  $t_{сз}$  и  $K_{тсз}$  – значения соответствующих величин, заданные, исходя из особенностей технологического процесса и условий достижения максимальной производительности агрегата.

В радиоизотопном приборе сигнал подвергается различным преобразованиям, одно из которых (так называемое усредняющее) является весьма специфиче-

ским и выполняется инерционным элементом – счетчиком импульсов или аperiodическим звеном, например интригующей RC-ячейкой. Усредняющее преобразование предназначено для уменьшения радиационной составляющей погрешности  $A_p$ , но оказывает существенное влияние и на другие компоненты основных характеристик.

Известно три способа осуществления усредняющего преобразования, позволяющих преобразовать интенсивность  $I$  в код  $N$ , амплитуду  $U$  или длительность импульса (паузы)  $T$  выходного сигнала. Значениям этих величин, которые были бы получены при регулярном  $(N, t) \rightarrow \infty$  преобразовании, присвоим индекс 0:  $N_0, U_0, T_0$ . Зададим допустимые значения радиационной погрешности на выходе усредняющего преобразователя равными  $A_{pд}^{\pm}$ , т.е. зададим условия:

$$N_0(1 - A_{D\bar{A}}^-) \leq N \leq N_0(1 + A_{D\bar{A}}^+) \quad (6 а)$$

$$U_0(1 - A_{D\bar{A}}^-) \leq U \leq U_0(1 + A_{D\bar{A}}^+) \quad (6 б)$$

$$T_0(1 - A_{D\bar{A}}^-) \leq T \leq T_0(1 + A_{D\bar{A}}^+) \quad (6 в)$$

и определим вероятности  $P_c$  выполнения этих условий, а затем по значениям  $P_c$  определим значения  $t_3$  и  $K_{гс}$ .

Число – импульсно усредняющее преобразование  $I \rightarrow N$  – выполняется счетчиком импульсов, работающим в течение заданного интервала времени  $t_3$ . Число импульсов, закодированное в его выходном сигнале  $N = It_3$ , подчиняется условию (6а) с вероятностью:

$$(P_C)_{\times \dot{E}} \equiv D(I, t_3, A_{D\bar{A}}^{\pm}) = F(z_1, \delta_{\times \dot{E}}) - F(z_2, \delta_{\times \dot{E}}) \quad (7)$$

Функция распределения  $F(z)$  подчиняется закону Пуассона, который в данном случае удобнее представить в виде ряда:

$$F(z, \delta_{\times \dot{E}}) = \dot{O}(z) - \frac{1}{6} \cdot \varphi^{(2)}(z) \delta_{\times \dot{E}} + \frac{1}{24} \cdot \left[ \varphi^{(3)}(z) + \frac{1}{3} \cdot \varphi^{(5)}(z) \right] \delta_{\times \dot{E}}^2 - \dots \quad (8)$$

где  $\Phi(z)$  – интегральная функция нормального распределения, а  $\varphi^{(2)}(z)$  и т.д. – вторая и последующие производные дифференциальной функции нормального распределения и

$$z_1 = \frac{A_{D\bar{A}}^+}{\delta_{\times \dot{E}}}; \quad z_2 = \frac{-A_{D\bar{A}}^-}{\delta_{\times \dot{E}}}; \quad \delta_{\times \dot{E}} = N^{-0.5}. \quad (8 а)$$

Замеры производятся непрерывно в течении некоторого времени  $t'$ . При этом ожидаемое число сбоев, т.е. замеров с нарушением условий (1а):

$$n_C = \frac{t'}{t_C} \cdot [1 - (D_{\bar{N}})_{\times \dot{E}}] \quad (8 б)$$

и, следовательно, среднее время бессбойной работы (наработка на сбой):

$$(t_C)_{\times \dot{E}} = \frac{t'}{n_C} = \frac{t_C}{1 - (D_{\bar{N}})_{\times \dot{E}}} \quad (9)$$

а коэффициент готовности по сбоям

$$(E_{\bar{A}\bar{N}})_{\times \dot{E}} = (D_{\bar{N}})_{\times \dot{E}} \quad (10)$$

Токовое усредняющее преобразование  $I \rightarrow U$  осуществляется аperiodическим звеном – интегрирующей RC-ячейкой. При этом выходной сигнал звена подчиняется (6б) с вероятностью:

$$(P_C)_{\times \dot{E}} \equiv D(I, \tau, A_{D\bar{A}}^{\pm}) = F(z_1, \delta_T) - F(z_2, \delta_T) \quad (11)$$

где  $\tau$  – постоянная времени звена. Функция  $F(z_2, \delta_T)$  при однозвенной RC-ячейке представляется в виде ряда:

$$F(z, \delta) = \Phi(z) - \frac{2}{9} \varphi^{(2)}(z) \delta_T + \left[ \frac{1}{12} \varphi^{(3)}(z) + \frac{2}{81} \varphi^{(5)}(z) \right] \delta_T^2 - \left[ \frac{2}{75} \varphi^{(4)}(z) + \frac{1}{54} \varphi^{(6)}(z) + \frac{4}{2187} \varphi^{(8)}(z) \right] \delta_T^3 + \dots \quad (12)$$

где

$$z_1 = \frac{A_{D\bar{A}}^+}{\delta_O}; \quad z_2 = \frac{-A_{D\bar{A}}^-}{\delta_O}; \quad \delta_O = (2I\tau)^{-0.5}, \quad (12 а)$$

Для определения среднего числа «выбросов» потенциала на выходе токового преобразователя за заданные пределы, происходящих в единицу времени, принимаем за величины заданных пределов значения  $U_0(1 \pm A_{D\bar{A}}^{\pm})$ , при которых указанные «выбросы» являются сбоями, и учитывая условие  $t_{вс} \ll t_c$ , определим среднее время бессбойной работы (наработку на сбой) по выражению:

$$(t_C)_T = \frac{\tau \delta_T}{\frac{g(z_1, \delta_T)}{2 + z_1 \delta_T} + \frac{g(z_2, \delta_T)}{2 + z_2 \delta_T}} \cdot \frac{1}{1 + z_1 \delta_T} \cdot \frac{1}{1 + z_2 \delta_T} \quad (13)$$

где  $g(z_2, \delta_T)$  – плотность распределения функций (12). При часто реализующихся условиях  $z_1 = |z_2| = z_0$  и  $\delta_T \ll A_{pд}^{\pm} \ll 1$  зависимость упрощается:

$$(t_C)_{\times \dot{E}} = \frac{f(z_0)}{\tau \delta_T} \quad (13 а)$$

где  $f(z_0)$  – плотность вероятности при нормальном законе распределения.

Коэффициент готовности по сбоям при токовом усредняющем преобразовании:

$$(K_{\bar{A}\bar{N}})_{\dot{O}} = (D_{\bar{N}})_{\dot{O}} \quad (14)$$

Время – импульсное усредняющее преобразование  $I \rightarrow T$  осуществляется счетчиком импульсов и связанным с ним каскадом, отрабатывающим импульсы (паузы) длительностью  $T$ , в течение которого счетчик регистрирует заданное число импульсов  $N_3$ . Длительность каждого выходного импульса (паузы)  $T = N_3 T^1$ . При этом длительность интервала подчиняется условию (1в) с вероятностью:

$$(D_{\bar{N}})_{\dot{O}} \equiv D(N_3, A_{D\bar{A}}^{\pm}) = F(z_1, \delta_{\dot{A}\dot{E}}) - F(z_2, \delta_{\dot{A}\dot{E}}) \quad (15)$$

где  $F(z, \delta_{\dot{A}\dot{E}})$  – неполная гамма-функция, которую удобно разложить в ряд Шарлье. Выполнение этой операции позволяет получить зависимость:

$$F(z, \delta_{\dot{A}\dot{E}}) = \Phi(z) - \frac{1}{3} \varphi^{(2)}(z) \delta_{\dot{A}\dot{E}} + \left[ \frac{1}{4} \varphi^{(3)}(z) + \frac{1}{18} \varphi^{(5)}(z) \right] \delta_{\dot{A}\dot{E}}^2 - \left[ \frac{1}{15} \varphi^{(4)}(z) + \frac{1}{12} \varphi^{(6)}(z) + \frac{1}{162} \varphi^{(8)}(z) \right] \delta_{\dot{A}\dot{E}}^3 + \dots \quad (16)$$

где аналогично предыдущим случаям:

$$z_1 = \frac{A_{D\bar{A}}^+}{\delta_{\dot{A}\dot{E}}}; \quad z_2 = \frac{-A_{D\bar{A}}^-}{\delta_{\dot{A}\dot{E}}}; \quad \delta_{\dot{A}\dot{E}} = N_0^{-0.5}. \quad (16 а)$$

За время работы  $t'$  среднее количество произведенных замеров  $n = t' T^{-1}$ , из которых удовлетворяют условию (1в)  $n_n = n[1 - (P_c)_{вн}]$ . Исходя из этого среднее время бессбойной работы прибора с времяимпульсным преобразованием:

$$(t_C)_{\dot{A}\dot{E}} = \frac{\bar{O}}{1 - (D_N)_{\dot{A}\dot{E}}} \quad (17)$$

Коэффициент готовности по сбоям:

$$(\dot{E}_{\dot{A}\dot{N}})_{\dot{A}\dot{E}} = (D_N)_{\dot{A}\dot{E}} \quad (17 \text{ a})$$

При применении радиоизотопных приборов влиянием случайной аппаратурной составляющей погрешности нельзя пренебречь, и, следовательно, возникает необходимость решения второй из указанных задач – определения совместного влияния обеих составляющих. Решение уравнения основано на определении плотности вероятности полной погрешности  $\varphi(A)$  путем проведения операции свертки функции плотности вероятности аппаратурной составляющей  $\varphi_1(A_a)$  и функции плотности вероятности радиационной составляющей  $\varphi_2(A_p)$ :

$$\varphi(A) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(A_a) \varphi_2(A - A_a) dA_a = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(A - A_p) \varphi_2(A_p) dA_p \quad (18)$$

Принимая, как указано выше, величину  $\varphi_1(A_a)$  распределенной по закону нормального распределения, а величину  $\varphi_2(A_p)$  распределенной в соответствии с закономерностями (7), (12) или (16), можно с помощью характеристических функций осуществить свертку, получив следующие ряды для интегральных функций распределения:

$$\left. \begin{aligned} F(z, \delta_{\times \dot{E}}) &= \Phi(z) - \frac{1}{6} \varphi^{(2)}(z) \delta_{\times \dot{E}} + \left[ \frac{1}{24} \varphi^{(3)}(z) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{72} \varphi^{(5)}(z) - \right] \delta_{\times \dot{E}}^2 - \dots; \\ F(z, \delta_{\dot{O}}) &= \Phi(z) - \frac{2}{9} \varphi^{(2)}(z) \delta_{\dot{O}} + \left[ \frac{1}{12} \varphi^{(3)}(z) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{2}{81} \varphi^{(5)}(z) - \right] \delta_{\dot{O}}^2 - \dots; \\ F(z, \delta_{\dot{A}\dot{E}}) &= \Phi(z) - \frac{1}{3} \varphi^{(2)}(z) \delta_{\dot{A}\dot{E}} + \left[ \frac{1}{4} \varphi^{(3)}(z) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{18} \varphi^{(5)}(z) - \right] \delta_{\dot{A}\dot{E}}^2 - \dots \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Вероятность отсутствия сбоя  $P_{ск}$  при учете полной погрешности также определяется как разность значений соответствующей функции (19), но при

$$z_1 = \frac{\dot{A}_{\dot{A}}^+}{\delta}; \quad z_2 = \frac{-\dot{A}_{\dot{A}}^-}{\delta}; \quad (20)$$

где соответственно

$$\delta = \sqrt{\delta_{\times \dot{E}}^2 + \left( \frac{\sigma_{\dot{a}}}{N_0} \right)^2}, \quad \text{è è è} \quad \delta = \sqrt{\delta_{\dot{O}}^2 + \left( \frac{\sigma_{\dot{a}}}{U_0} \right)^2}, \quad \text{или} \\ \delta = \sqrt{\delta_{\dot{A}\dot{E}}^2 + \left( \frac{\sigma_{\dot{a}}}{\dot{O}_0} \right)^2} \quad (21)$$

## Выводы

Таким образом, учет аппаратурной составляющей погрешности приводит лишь к тому, что в определение величин  $z_1$  и  $z_2$  входит полное относительное среднеквадратическое отклонение  $\delta$ , а разложение в ряд сохраняется по величинам  $\delta_{\text{чи}}$ ,  $\delta_{\text{т}}$  или  $\delta_{\text{ви}}$ .

Наработка на сбой  $t_c$  и коэффициент готовности прибора по сбоям  $K_{гс}$  при учете полной погрешности в зависимости от способа усредняющего преобразования также определяются соотношениями (9), (10), (13), (14), (17), (17a), но вероятности  $(P_c)_{\text{чи}}$ ,  $(P_c)_{\text{т}}$ ,  $g(z, \delta_{\text{т}})$ ,  $P_c$  должны быть заменены на вероятности  $P_{ск}$ , или ее плотность в (13), и значения нормализованной переменной  $z$  должны определяться согласно соотношениям (20).

Используя различные оценки, нужно ограничиться только первым членом рядов (19) и считать полную случайную погрешность распределенной по нормальному закону. При этом вероятность отсутствия сбоя определяется соотношением:

$$P_{СК} = \Phi(z_1) - \Phi(z_2)$$

$$\text{Или при } z_1 = |z_2| = z_0 \quad (22)$$

$$P_{СК} = 2\Phi(z_0) - 1 \quad \text{è} \quad \dot{A}_{\dot{A}}^{\pm} = z_0 \delta.$$

С помощью этих соотношений целесообразно оценивать случайные погрешности показаний РИП, работающих в системах автоматического контроля и регулирования металлургических агрегатов.

Дополнив оценку надежности работы РИП оценкой влияния сбоев в работе необходимо распространить на них определения и методики оценки основных характеристик нерадиоизотопных КИП.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Смоляк, Б.В. Щербицкий. Автоматизация и оптимизация процесса доменной плавки. Москва. «Металлургия», 1974, с.152.
2. В.А. Смоляк. Моделирование корректирования массы кокса по его влажности при загрузке в доменную печь. «Математичне моделювання». «Науковий журнал», №2(14), 2005, с.38-42.
3. В.А. Смоляк. Моделирование информации из радиоизотопных технических средств автоматизации доменной печи. «Математичне моделювання». «Науковий журнал», №2(14), 2005, с.68-73.
4. В.А. Смоляк, Л.М. Дехтярева. Контроль огнеупорной футеровки металлургических агрегатов. Москва. «Металлургия», 1977, с.104.
5. В.А. Смоляк. Моделирование стабилизации железорудной нагрузки на кокс при изменении его влагосодержания с целью эффективного управления тепловым режимом доменной печи. «Математичне моделювання». «Науковий журнал», №1,2(15), 2006, С. 50-53.