

УДК 681.51 (075.4)

## ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПРОИЗВОДЯЩИХ ФУНКЦИЙ

**В.Н. Яшин**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы, связанные с оценкой метрологической надежности средств измерений с использованием метода производящих функций. Метрологическая надежность средств измерений является важнейшей характеристикой, определяющей точность и достоверность производимых ими измерений физических величин. В предлагаемой статье в качестве оценки метрологической надежности предложен показатель достоверности, количественное значение которого может быть найдено с использованием метода производящих функций, что является научной новизной работы. В работе обосновывается актуальность проблемы оценки метрологической надежности средств измерений, поскольку существующая тенденция, направленная на структурное и функциональное усложнение средств измерений, может приводить к снижению их надежности, и в частности метрологической надежности. Основная цель работы связана с систематизацией вопросов надежности средств измерений и оценкой их метрологической надежности с применением метода производящих функций. Применение метода производящих функций позволяет на основе выбранной математической модели процесса эволюции погрешности средств измерений и предложенного показателя метрологической надежности осуществить метрологический прогноз поведения погрешности средств измерения во времени. В качестве модели эволюции погрешности средств измерений была выбрана модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени, которая характерна для определенного класса средств измерений, например средств измерений интервалов времени. Метод производящих функций, используемый для оценки метрологической надежности средств измерений, позволил повысить эффективность алгоритма количественной оценки метрологической надежности средств измерений за счет упрощения математических операций, лежащих в его основе.

**Ключевые слова:** средства измерений, метрологическая надежность, оценка, производящие функции, показатель достоверности.

### Введение

Оценка надежности различных технических средств, в том числе и средств измерений (СИ) физических величин, была и остается одной из актуальных проблем, стоящих перед разработчиками таких устройств и теми, кто занимается их эксплуатацией. Актуальность этой проблемы повышается, поскольку существующая тенденция, направленная на структурное и функциональное усложнение технических устройств, может приводить к снижению их надежности. Решение этой проблемы в значительной степени зависит как от предварительного расчета

---

Яшин Владимир Николаевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные технологии».

надежности в процессе разработки технического устройства или системы с целью определения прогнозируемых характеристик надежности, так и их периодической оценки в процессе эксплуатации. В соответствии с межгосударственным стандартом по надежности в технике [1] под надежностью понимается свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. При этом в качестве показателей надежности выступают стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость [1].

### **Постановка задачи**

Целью работы является систематизация вопросов, связанных с оценкой надежности СИ, и оценка метрологической надежности СИ на основе предлагаемого показателя метрологической надежности с использованием метода производящих функций.

### **Систематизация вопросов, связанных с оценкой надежности СИ**

В теории надежности принято различать функциональную и метрологическую надежность.

Функциональная надежность технического средства определяется функциональными (внезапными) отказами, которые носят явный характер, проявляются внезапно и могут быть обнаружены без проведения его поверки.

Функциональные отказы приводят к прекращению работоспособности технического устройства, системы в целом или их отдельных узлов. Если речь идет о СИ физических величин, то в них также могут возникать внезапные отказы, характеризующиеся скачкообразным изменением одной или нескольких метрологических характеристик (МХ), т. е. характеристик, определяющих основное назначение СИ. Эти отказы в силу их случайного проявления невозможно прогнозировать. Последствия этих отказов, например внезапный выход из строя блоков питания, измерительных датчиков или потеря их чувствительности и т. д., легко обнаруживаются в ходе эксплуатации СИ и носят явный характер. Особенностью таких отказов является постоянство во времени их интенсивности, что позволяет применять для их анализа классическую теорию надежности. С интенсивностью отказов СИ связаны и другие характеристики, определяющие функциональную надежность СИ: вероятность безотказной работы СИ и среднее время безотказной работы (наработка на отказ). Поскольку случайный отказ может произойти в любой момент времени независимо от того, сколько времени проработало СИ, интенсивность внезапных отказов от времени не зависит; соответственно, формулы и алгоритмы для нахождения вероятностей безотказной работы и среднего времени безотказной работы СИ значительно упрощаются.

Метрологическая надежность относится прежде всего к характеристикам СИ и определяется как вероятность сохранения МХ СИ внутри области допусков на эти характеристики за некоторый интервал времени. Здесь следует также отметить, что если вопросы оценки функциональной надежности СИ освещены достаточно хорошо в отечественной и зарубежной литературе, то вопросы, связанные с оценкой метрологической надежности, освещены весьма скупо. Это обусловлено сложностью алгоритма оценки метрологической надежности СИ, а также тем, что в настоящее время не существует универсальной математической модели метро-

логических отказов СИ. Метрологическая надежность СИ связана с таким понятием, как метрологическая характеристика. В соответствии с межгосударственным стандартом «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» [2] метрологические характеристики – это такие характеристики, которые предназначены для оценки технического уровня и качества измерений, для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной погрешности измерений. Стандартом установлен комплекс нормируемых характеристик МХ СИ, которые разбиты на группы: характеристики, предназначенные для определения результатов измерения; характеристики погрешностей СИ; характеристики чувствительности СИ к влияющим величинам; динамические характеристики СИ; неинформативные параметры выходного сигнала СИ.

Метрологическая надежность тесно связана с таким понятием, как метрологический отказ, который идентифицируется как выход МХ СИ из установленных допустимых границ. Как показывают проведенные исследования, метрологические отказы СИ происходят значительно чаще, чем функциональные, что обуславливает необходимость разработки специальных методов их прогнозирования и обнаружения [3].

Метрологические отказы, в свою очередь, можно подразделить на внезапные и постепенные [3, 4].

Внезапными называются отказы, которые характеризуются внезапными (скачкообразными) изменениями одной или нескольких МХ СИ и которые достаточно трудно прогнозировать по причине их случайного характера.

Постепенными называются отказы, являющиеся следствием монотонного изменения одной или нескольких МХ СИ. По характеру проявления они являются скрытыми. Эти отказы могут быть выявлены только по результатам периодических измерений или контроля СИ.

Понятие метрологического отказа является в известной степени условным, поскольку определяется допуском на МХ, который в общем случае может меняться в зависимости от конкретных условий [5]. Кроме того, зафиксировать точное время наступления метрологических отказов ввиду их скрытого характера проявления невозможно, в то время как явные отказы, которыми оперирует классическая теория надежности, могут быть обнаружены в момент их возникновения [5].

В качестве показателей метрологической надежности СИ могут выступать и показатели, которые упоминались ранее в стандарте [1]: стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Среди указанных показателей наибольшее влияние на метрологическую надежность оказывают показатели стабильности и долговечности, поскольку они напрямую зависят от МХ. Так, стабильность СИ, являясь показателем, отражающим неизменность во времени его МХ, описывается временными зависимостями параметров закона распределения погрешностей СИ, т. е. в первую очередь стабильность определяется такой МХ, как погрешность СИ. Как отмечено в [5], стабильность и метрологическая надежность в целом являются различными свойствами одного и того же процесса старения СИ. Показателем, который также зависит от МХ, является и долговечность, под которым понимается свойство СИ сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния, т. е. это такое состояние СИ, при котором все его МХ соответствуют нормированным значениям, а предельным называется состояние СИ, при котором его применение недопустимо [1].

Таким образом, метрологическая надежность СИ зависит от МХ, среди которых важнейшей характеристикой является погрешность СИ. Погрешность СИ может изменяться в процессе его эксплуатации, при этом необходимо отметить, что не все составляющие погрешности подвержены изменению во времени, например методические погрешности, которые зависят только от используемой методики измерения. Однако большая часть составляющих погрешности СИ обусловлена процессами старения в измерительных блоках и элементах, вызванными неблагоприятными влияниями внешней окружающей среды. Эти процессы протекают в основном на молекулярном уровне и не зависят от того, находится ли СИ в эксплуатации или на консервации. Поэтому основным фактором, определяющим старение СИ, является время, прошедшее с момента их изготовления. Скорость старения СИ зависит прежде всего от используемых материалов и технологий [5]. Исследования показали, что необратимые процессы, изменяющие погрешность, протекают очень медленно и зафиксировать эти изменения в ходе эксперимента в большинстве случаев невозможно. В связи с этим большое значение приобретают различные математические методы, на основе которых строятся модели эволюции погрешностей СИ с целью прогнозирования метрологических отказов. Следовательно, важнейшая задача, решаемая при определении метрологической надежности СИ, состоит в нахождении начальных изменений МХ, построении математических моделей эволюции МХ и определении показателей метрологической надежности во времени с последующей экстраполяцией полученных результатов на интервал времени, равный среднему времени эксплуатации СИ [6]. Как показали многочисленные исследования [3–11] в области эволюции МХ СИ во времени, многие из них, например погрешность, представляют собой случайный нестационарный процесс, плотность распределения вероятностей которого близка к нормальному закону распределения, а математическое ожидание и дисперсия могут быть представлены в виде соответствующих полиномов. Анализ таких процессов основан на теории случайных процессов. Нестационарный случайный процесс эволюции погрешности СИ может быть представлен в виде множества его реализаций (кривых) погрешности  $\Delta_i$ . Поскольку нестационарные случайные процессы в отличие от стационарных не обладают свойством эргодичности, т. е. статистические характеристики таких процессов (математическое ожидание, дисперсия, корреляционная функция и пр.) нельзя усреднять во времени для получения их оценок, то для анализа таких процессов были разработаны и разрабатываются соответствующие этим особенностям нестационарных случайных процессов математические методы. Среди этих методов довольно широкое применение получили методы, основанные на идентификации нестационарных случайных процессов в рамках некоторых специальных классов нестационарных процессов, например нестационарных случайных процессов со стационарными приращениями СПСП [11]. Однако какие бы методы ни использовались для анализа нестационарных случайных процессов, в их основе лежат различные модели эволюции погрешности СИ: линейные, экспоненциальные, логистические, модели, основанные на спектральном описании эволюции погрешности СИ, полиномиальные модели, диффузионные марковские модели, модели на основе процессов авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего и т. д. Перечисленные выше модели эволюции погрешности СИ имеют свои достоинства и недостатки [12–16], которые необходимо учитывать при выборе той или иной модели. Однако при выборе

конкретной модели важно также учитывать результаты проверки ее на адекватность реальному процессу эволюции погрешности СИ на основе полученных экспериментальных данных для определенного вида СИ.

### Оценка метрологической надежности СИ с использованием метода производящих функций

В статье предложен метод оценки метрологической надежности СИ с использованием метода производящих функций, позволяющий на основе выбранной математической модели процесса эволюции погрешности СИ и предложенного показателя метрологической надежности осуществить метрологический прогноз СИ. В качестве модели эволюции погрешности СИ была выбрана модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени, которая характерна для определенного класса СИ, например измерителей интервалов времени и пр. Траектории эволюции (изменения) погрешностей в такой модели представлены на рис. 1.

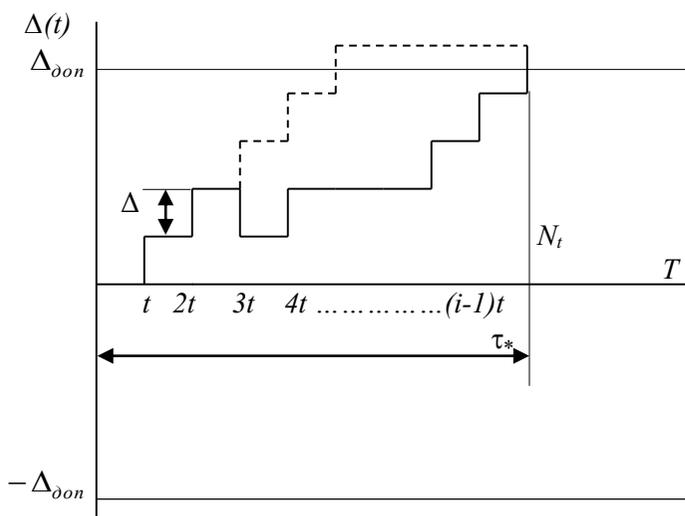


Рис. 1. Траектории эволюции погрешности СИ с дискретными изменениями абсолютных погрешностей во времени

Показателем метрологической надежности для указанного класса СИ был выбран показатель достоверности, который в данном случае выступает мерой метрологической надежности и определяется как вероятность сохранения погрешности СИ внутри области допусков на эти характеристики за интервал измерения. Показатель достоверности может быть записан в следующем виде:

$$D = P \left\{ |\Delta(t)| \leq \Delta_{дон} \right\}_{t \in \tau_*}, \quad (1)$$

- где  $P$  – вероятность метрологического отказа;  
 $\Delta(t)$  – абсолютная погрешность СИ, характеризующая процесс эволюции погрешности во времени  $t$ ;  
 $\Delta_{дон}$  – область допусков;  
 $\tau_*$  – интервал времени измерения.

Из теории цепей Маркова известно, что вероятность  $P$  конечна и может быть соответствующим образом определена. На рис. 1 приведены возможные (ограничимся двумя реализациями) траектории эволюции погрешности для модели постепенного отказа с дискретным изменением погрешности во времени. Пересечение траекториями границ допустимой абсолютной погрешности  $\pm \Delta_{don}$  идентифицируется как метрологический отказ.

С учетом выражения (1) показатель достоверности может быть определен из соотношения

$$D = 1 - (P^- + P^+), \quad (2)$$

где  $P^-$ ,  $P^+$  – вероятности достижения или превышения абсолютной погрешностью соответственно нижней и верхней границ поля допуска за время  $\tau_*$ .

Вероятности метрологических отказов  $P^-$  и  $P^+$  можно представить в виде следующих сумм:

$$P^- = \sum_{h=1}^{N_t} U_{x_0, h}; \quad P^+ = \sum_{h=1}^{N_t} V_{x_0, h}, \quad (3)$$

где  $U_{x_0, h}$  и  $V_{x_0, h}$  – вероятности достижения на  $h$ -м шаге соответственно нижней и верхней границ поля допуска;

$N_t = \tau_* / t$  – интервал сохранения накопленной погрешности в пределах поля допуска  $\pm \Delta_{don}$ , выраженный через параметр  $t$ .

Выражение для показателя достоверности можно представить в виде

$$D = 1 - \sum_{h=1}^{N_t} (U_{x_0, h} + V_{x_0, h}). \quad (4)$$

Вероятности  $U_{x_0, h}$  и  $V_{x_0, h}$  могут быть определены из разностных уравнений двух переменных  $x_0$  и  $h$  вида

$$U_{x_0, h+1} = P_+ U_{x_0+1, h} + P_- U_{x_0-1, h}; \quad (5)$$

$$V_{k_t - x_0, h+1} = P_+ U_{k_t - x_0 - 1, h} + P_- U_{k_t - x_0 + 1, h}, \quad (6)$$

где  $k_t = \frac{2(\Delta_{don})}{\Delta}$  – величина поля допуска, выраженная в приращениях величины  $\Delta$ ;

$x_0 = \frac{(\Delta_0)}{\Delta}$  – начальное значение погрешности, выраженное в приращениях величины  $\Delta$ ;

$P_+$  – вероятность приращения «положительной» погрешности на величину  $\Delta$ ;

$P_-$  – вероятность приращения «отрицательной» погрешности на величину  $\Delta$ .

Для решения уравнений (5) и (6) воспользуемся методом производящих функций, который позволит значительно упростить решения указанных уравнений и в дальнейшем применить для нахождения показателя достоверности более эффективный вычислительный алгоритм. Метод производящих функций был впервые предложен выдающимся ученым Л. Эйлером. Метод применялся и применяется

для компактной записи информации о различных последовательностях, нахождения зависимостей для последовательности чисел, заданных рекуррентным соотношением (например, для чисел Фибоначчи), исследования асимптотического поведения последовательностей, представления дискретных законов распределения дискретной случайной величины и композиций законов распределений, вычисления моментов дискретных законов случайной величины и пр. Достаточно широкое применение этого метода обусловлено возможностью построения на его основе эффективных вычислительных алгоритмов решения определенных задач, что при современном уровне развития информационных технологий является актуальным. В общем виде производящая функция представляет собой формальный степенной ряд вида

$$\varphi(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k z^k, \quad (7)$$

порождающий (производящий) последовательность коэффициентов  $P_0, P_1, P_2, \dots$ , при этом  $\sum_{k=0}^{\infty} P_k = 1; 0 \leq z \leq 1$ .

Термин «формальный» означает, что для данного ряда не определяется область сходимости ряда. Каждый коэффициент  $P_k$  численно равен вероятности появления такого числа событий, число которых равняется показателю степени  $z$ . Укажем здесь основные свойства производящих функций:

$\varphi(z), \varphi'(z) \dots$  ряды сходятся абсолютно;

$$\varphi(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k z^k; \quad \varphi(1) = 1; \quad \varphi'(1) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k = m_1;$$

$$\varphi'(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k z^{k-1}; \quad \varphi''(1) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k(k-1) = m_2 - m_1$$

$$\varphi''(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k(k-1) z^{k-2}; \quad \varphi''(1) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k(k-1) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k k^2 - \sum_{k=0}^{\infty} P_k k = m_2 - m_1$$

$$\varphi'(1) + \varphi''(1) = m_2.$$

Используя метод производящих функций, представим производящую функцию в виде

$$V_{x_0}(z) = \sum_{h=0}^{\infty} U_{x_0,h} z^h. \quad (8)$$

Умножим уравнение (5) на  $z^{h+1}$  и, суммируя его по  $h$ , получим новое разностное уравнение одного параметра  $z$ :

$$U_{x_0}(z) = P_+ z V_{x_0} + 1(z) + P_- z V_{x_0-1}(z). \quad (9)$$

Для полученного уравнения обязательными являются граничные условия вида

$$V_0(z) = 1; \quad V_k(z) = 0.$$

Частные решения уравнения (9) будут иметь вид

$$V_{x_0}(z) = \beta^{x_0}(z).$$

Подставляя частные решения в уравнение (9), получаем для нахождения  $\beta(z)$  квадратное характеристическое уравнение, имеющее следующие корни:

$$\beta_{1,2}(z) = \frac{1 + \sqrt{1 - 4P_+P_-z^2}}{2P_+z},$$

что позволяет при любых произвольных функциях  $A(z)$  и  $B(z)$  записать общее решение уравнения (9) в виде

$$V_{x_0}(z) = A(z)\beta_1^{x_0}(z) + B(z)\beta_2^{x_0}(z).$$

С учетом наложенных граничных условий последнее выражение запишем в следующем виде:

$$V_{x_0}(z) = \frac{\beta_1^{k_t}(z)\beta_2^{x_0}(z) - \beta_1^{x_0}(z)\beta_2^{k_t}(z)}{\beta_1^{k_t}(z) - \beta_2^{k_t}(z)}. \quad (10)$$

Учитывая, что  $\beta_1(z)\beta_2(z) = P_-P_+^{-1}$ , выражение (10) можно записать следующим образом:

$$V_{x_0}(z) = \left(\frac{P_-}{P_+}\right)^{x_0} \frac{\beta_1^{k_t-x_0}(z) - \beta_2^{k_t-x_0}(z)}{\beta_1^{k_t}(z) - \beta_2^{k_t}(z)}. \quad (11)$$

Производящая функция  $V_{x_0}(z)$  вероятности  $V_{x_0,n}$  превышения погрешностью нижней границы поля допуска может быть теперь определена без решения разностного уравнения (6) путем замены в выражении (11)  $P_+, P_-, x_0$  на  $P_+, P_-, k_t - x_0$ :

$$V_{x_0}(z) = \left(\frac{P_-}{P_+}\right)^{k_t-x_0} \frac{\beta_1^{x_0}(z) - \beta_2^{x_0}(z)}{\beta_1^{k_t}(z) - \beta_2^{k_t}(z)}. \quad (12)$$

Теперь для того, чтобы найти выражения для условных вероятностей  $U_{x_0,h}$  и  $V_{x_0,h}$ , определяющие вероятности метрологических отказов  $P^+, P^-$  и величину показателя достоверности  $D$ , необходимо определить коэффициенты при  $z^h$  в разложении соответствующих производящих функций.

С целью упрощения последующих математических преобразований примем начальное значение погрешности СИ равным половине поля допуска, т. е.  $x_0 = \frac{k_t}{2}$ , и окончательно получим для показателя достоверности следующее выражение:

$$D = 1 - \frac{2}{k_t} \sqrt{P_+P_-} \left[ \left(\frac{P_+}{P_-}\right)^{\frac{k_t}{4}} + \left(\frac{P_-}{P_+}\right)^{\frac{k_t}{4}} \right] \sum_{i=1}^{k_t-1} \frac{1 - (2\sqrt{P_+P_-} \cos \frac{\pi i}{k_t})^{N_i}}{1 - 2\sqrt{P_+P_-} \cos \frac{\pi i}{k_t}} \sin \frac{\pi i}{k_t} \sin \frac{\pi i}{2}, \quad (13)$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots$ .

Выражение (13) представляет собой математическую зависимость, в которой показатель достоверности  $D$  будет зависеть от четырех переменных:

$$D = f(P_+, P_-, k_t, N_t).$$

Для анализа полученной оценки построим графики показателя достоверности  $D$  от соответствующих аргументов  $P_+, P_-, k_t, N_t$ . Для этого преобразуем выражение (13) к следующему виду:

$$D = 1 - Z \cdot \sum_{i=1}^{k_t-1} \frac{1 - L^{N_t}}{1 - L} \cdot F, \quad (14)$$

где  $Z = \frac{2}{k_t} \sqrt{P_+ P_-} \cdot \left[ \left( \frac{P_+}{P_-} \right)^{\frac{k_t}{4}} + \left( \frac{P_-}{P_+} \right)^{\frac{k_t}{4}} \right]$ ;  $L = 2\sqrt{P_+ P_-} \cdot \cos \frac{\pi i}{k_t}$ ;  $F = \sin \frac{\pi i}{k_t} \cdot \sin \frac{\pi i}{2}$ .

В таблице проведены расчеты показателя достоверности  $D$  в зависимости от интервала сохранения накопленной погрешности в пределах поля допуска  $\pm \Delta_{доп}$  при значениях  $k_t$ , равных соответственно 20, 10, 5, 4, 3 и вероятностях приращения «положительной» и «отрицательной» погрешности, равных 0,5.

**Значения показателя достоверности  $D$  от интервала  $N_t$**

$N_t$	$D_1 (k_t=20)$	$D_2 (k_t=10)$	$D_3 (k_t=5)$	$D_4 (k_t=4)$	$D_5 (k_t=3)$
0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10,0	1,00	0,78	0,21	0,03	0,00
20,0	0,95	0,47	0,08	0,00	0,00
30,0	0,86	0,29	0,06	0,00	0,00
40,0	0,77	0,17	0,06	0,00	0,00
50,0	0,68	0,11	0,06	0,00	0,00
60,0	0,60	0,06	0,06	0,00	0,00
70,0	0,53	0,04	0,06	0,00	0,00
80,0	0,47	0,02	0,06	0,00	0,00
90,0	0,41	0,01	0,06	0,00	0,00

По полученным расчетам были построены графики, представленные на рис. 2.

Из графиков видно, что величина показателя достоверности при фиксированных значениях  $P_+$  и  $P_-$  падает с увеличением требуемого интервала эволюции погрешности ( $N_t$ ) и уменьшением величины поля допуска  $k_t$ . В то же время при фиксированных значениях  $k_t$  и  $N_t$  величина показателя достоверности зависит от соотношения вероятностей  $P_+$  и  $P_-$ , принимая максимальное значение при их равных значениях, т. е. когда  $P_+ = P_- = 0,5$ . В этом случае процесс эволюции погрешности носит характер симметричного случайного процесса и падает при  $P_+ \neq P_-$ , т. е. при этом появляется преобладающее направление в процессе эволюции погрешности.

Оценка метрологической надежности СИ с использованием производящих функций была произведена для модели постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени. Эта оценка метрологической надежности может быть обобщена и для СИ с непрерывным изменением погрешности во времени. В этом случае выражение (4) принимает вид

$$D = 1 - \int_0^{\tau_*} [U(x_0 t) + V(x_0 t)] dt, \quad (15)$$

где  $U(x_0 t)$ ,  $V(x_0 t)$  – асимптотические приближения к вероятностям  $U_{x_0, h}$  и  $V_{x_0, h}$ .

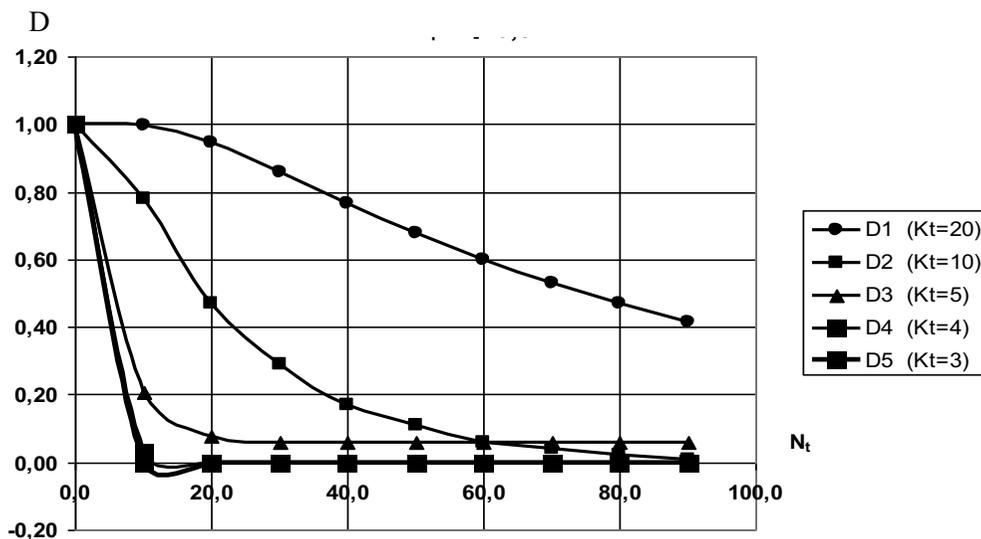


Рис. 2. Графики зависимостей  $D = f(N_t)$  при  $P_+ = P_- = 0,5$

Однако вопрос получения обобщенной оценки метрологической надежности для СИ с непрерывным изменением погрешности во времени выходит за рамки данной статьи.

Полученное значение показателя достоверности с использованием производящих функций можно принять в качестве оценки метрологической надежности СИ и на его основе реализовать эффективный алгоритм оценки метрологической надежности СИ средствами информационных технологий.

Данный подход актуален, как отмечалось ранее, для СИ, в которых в качестве модели эволюции погрешности представлена модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени, которая характерна для определенного класса СИ, например для класса технических средств хронометрии. Этим и определяются ограничения по его применению.

## Выводы

1. Систематизированы вопросы, связанные с оценкой надежности СИ. Оценка надежности производится по различным показателям, при этом важнейшими показателями для СИ являются показатели метрологической надежности.

2. Для СИ, имеющих модель постепенных отказов с дискретным изменением погрешности во времени, предложен в качестве основного показателя метрологической надежности СИ показатель достоверности, позволяющий с заданной вероятностью прогнозировать метрологические отказы СИ.

3. Для аналитического определения показателя достоверности используется метод производящих функций, позволяющий значительно упростить его нахождение, что в дальнейшем создаст условия для автоматизации процесса нахождения

показателя достоверности с помощью информационных технологий, в которых может быть реализован эффективный алгоритм на основе производящих функций.

4. Полученные в статье результаты могут быть распространены и на другие виды СИ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.002-2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения. Дата введения 2017.03.01.
2. ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
3. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие для студ. вузов по спец. напр. подг. «Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы» и «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования»; доп. УМО / А.И. Аристов [и др.]. М.: Инфра-М, 2014. 256 с. (Высшее образование) (Бакалавриат).
4. Метрология, стандартизация и сертификация в машиностроении: учебник для ср. проф. образования; рек. ФИРО / С.А. Зайцев [и др.]. 3-е изд. М.: Академия, 2012. 288 с. (Среднее проф. образование. Машиностроение).
5. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов / А.Г. Сергеев, В.В. Терегеря. М.: Юрайт, 2011. 820 с. (Основы наук).
6. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
7. Прикладной анализ случайных процессов / под ред. С.А. Прохорова. СНЦ РАН, 2007. 582 с.
8. *Прохоров С.А.* Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум. СНЦ РАН, 2002. 277 с.
9. *Прохоров С.А., Графкин В.В.* Структурно-спектральный анализ случайных процессов. СНЦ РАН, 2010. 128 с.
10. *Яшин В.Н.* Методологические подходы при измерении и контроле основных метрологических характеристик технических средств хронометрии // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2014. Вып. 43. С. 63–72.
11. *Яшин В.Н.* Информационно-измерительные подходы для оценки технических средств хронометрии: монография. М.: ИНФРА-М, 2017. 120 с.
12. *Яшин В.Н.* Повышение помехозащищенности канала измерения метрологических характеристик технических средств хронометрии // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндские чтения – 2016». Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. С. 125–128.
13. *Якимов В.Н.* Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 7. С. 1346–1353.
14. *Якимов В.Н., Батищев В.И., Машиков А.В.* Модульный подход к разработке информационно-измерительной системы цифрового оценивания спектральной плотности мощности // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндские чтения – 2016». Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. С. 84–86.
15. *Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V.* Modern approaches to risk situation modeling in creation of complex technical systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 875. Pp. 209–217.
16. *Kolodenkova A.E., Dolgiy A.I.* Diagnosing of devices of railway automatic equipment on the basis of methods of diverse data fusion // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 875. Pp. 277–283.

*Статья поступила в редакцию 10 марта 2020 г.*

# EVALUATION OF METROLOGICAL RELIABILITY OF MEASURING INSTRUMENTS BY METHOD OF GENERATING FUNCTIONS

*V.N. Yashin*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *An article deals with problems related to the assessment of metrological reliability of measuring instruments by method of generating functions. Metrological reliability of measuring instruments is the most important characteristic that determines the accuracy and reliability of physical quantities measurements. In the suggested article, a confidence indicator is proposed as an evaluation of metrological reliability. The quantitative value of confidence indicator can be estimated by means of the method of generating functions. This is a scientific novelty of the work. Relevance of the problem of assessing the measuring instruments metrological reliability evaluation is substantiated in this paper since the current trend towards structural and functional complexity of measuring instruments may lead to decreasing of their reliability and, in particular, metrological reliability. The main goal of this work is to systematize the problems of reliability of measuring instruments and evaluate their metrological reliability using the method of generating functions. On the base of selected mathematical model of the evolution of error of measurement and proposed indicator of metrological reliability means of the method of generating functions allow to carry out metrological forecast of variability of the error of measurement depending on time. The model of gradual failures with a discrete change of the error over time, which is typical for a certain class of measuring instruments, for example, measuring time intervals, was chosen as a model for the evolution of the error of measuring instruments. The method of generating functions used for evaluating the metrological reliability of measuring instruments has made it possible to increase the efficiency of the algorithm for quantitative evaluation of metrological reliability of measuring instruments by simplifying the mathematical operations that underlie it.*

**Keywords:** *measuring instruments, metrological reliability, evaluation, generating functions, confidence index.*

## REFERENCES

1. GOST 27.002-2015. Interstate standard reliability in engineering. Terms and definitions. Date of introduction 2017.03.01.
2. GOST 8.009-84. Normalized metrological characteristics of measuring instruments.
3. Metrology, standardization and certification: textbook for students. Higher education institutions on spec. eg. prep. "Transport machines and transport and technological complexes" and "Operation of ground transport and transport equipment"; additional UMO / A.I. Aristov [et al.]. Moscow: Infra-M, 2014. 256 p. (Higher education) (Bachelor's degree).
4. Metrology, standardization and certification in mechanical engineering: a textbook for students of professional education; REC. FIRO / S.A. Zaitsev [et al.]. 3rd ed. Moscow: Akademiya, 2012. 288 p. (Secondary vocational education. Engineering).
5. Metrology, standardization and certification: textbook for universities / A.G. Sergeev, V.V. Therehere. Moscow: Yurait, 2011. 820 p. (Fundamentals of science).
6. *Tikhonov V.I.* Statistical radio engineering. Moscow: Radio and communication, 1982. 624 p.
7. Applied analysis of random processes. Edited by Prokhorov S.A. / scientific centre of RAS, 2007. 582 p.
8. *Prokhorov S.A.* Modeling and analysis of random processes. Laboratory practice. SNC RAS, 2002. 277 p.
9. *Prokhorov S.A., Grafkin V.V.* Structural-spectral analysis of random processes. SNC RAS, 2010. 128 p.

---

*Vladimir N. Yashin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

10. *Yashin V.N.* Methodological approaches for measuring and control of major metrological characteristics of technical means of timekeeping // Vestnik of Samara State Technical University. Ser. Technical science. 2014. Issue 43. Pp. 63–72.
11. *Yashin V.N.* Information-measuring approaches for chronometer technical means estimation: monograph. Moscow: INFRA-M, 2017. 120 p.
12. *Yashin V.N.* Increase of noise immunity channel of measurement of metrological characteristics of technical means of chronometry. Methods, means and technologies of receiving and processing of measuring information: proceedings of International. Science-tech. Conf. "Shlyandinskie readings – 2016". Penza: publishing house of PSU, 2016. Pp. 125–128.
13. *Yakimov V.N.* Digital integrated statistical analysis based on the symbolic representation of random processes // proceedings of the Samara scientific center of RAS. 2016. Vol. 18. No. 7. Pp. 1346–1353.
14. *Yakimov V.N., Batishchev V.I., Mashkov A.V.* A modular approach to the development of information-measuring system for digital estimation of power spectral density. Methods, means and technologies of receiving and processing of measuring information: proceedings of International. Science-tech. Conf. "Shlyandinskie readings – 2016". Penza: publishing house of PSU, 2016. P. 84–86.
15. *Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V.* Modern approaches to risk situation modeling in creation of complex technical systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 875. Pp. 209–217.
16. *Kolodenkova A.E., Dolgiy A.I.* Diagnosing of devices of railway automatic equipment on the basis of methods of diverse data fusion // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 875. Pp. 277–283.