

9. Домнин Ю. И. и др. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2 // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 26—30; Domnin Yu. S. e. a. The MTsR-F2 fountain-type cesium frequency standard // Measurement Techniques. 2012. V. 55. № 10. P. 1155—1162.

10. Bodart Q. e. a. Cold atom pyramidal gravimeter with a single laser beam // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 134101.

11. Le Gouet J. e. a. Limits to the sensitivity of a low noise compact atomic gravimeter // Appl. Phys. B. 2008. V. 92. P. 133—144.

12. Santarelli G. e. a. Quantum Projection Noise in an Atomic Fountain: A High Stability Cesium Frequency Standard // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. № 23. P. 4619—4622.

Дата принятия 04.09.2014 г.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

621.3.088

Анализ достоверности измерительного контроля энергопроизводительности фотоэлектрических модулей

С. А. БОГОМОЛОВА*, Ю. Е. ЛУКАШОВ**, М. З. ШВАРЦ***

* Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чебоксары, Россия, e-mail: s_bogomolova@mail.ru

** Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, e-mail: luksh103@vniims.ru

*** Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия, e-mail: shvarts@scell.ioffe.ru

Представлена методика анализа результатов измерений нормируемых выходных характеристик фотоэлектрических модулей при описании системы контроля их энергопроизводительности. Определены статистические характеристики распределений вероятностей нормируемых параметров и погрешностей оценок их значений. Сформирована математическая модель описания вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода в зависимости от стандартных неопределенностей трех основных нормируемых фотоэлектрических параметров. При заданном показателе достоверности контроля (суммарном риске потребителя) определены стандартные неопределенности фотоэлектрических параметров.

Ключевые слова: измерительный контроль, достоверность, фотоэлектрический модуль, энергопроизводительность, фотоэлектрические параметры.

A procedure of data analysis at description of the system of measuring control of photoelectric module power generation — is presented. The statistical characteristics of probability distributions for normalized parameters and for errors of their values estimation have been determined. A mathematical model for describing the probabilities of I and II type errors depending on standard uncertainties for three basic photoelectric parameters has been formed. At the preset value of control reliability indicator (consumer total risk) the values of standard uncertainties of photoelectric parameters have been determined.

Key words: measuring control, reliability, photoelectric module, power generation, photoelectric characteristics.

Целью контроля качества фотоэлектрических приборов, равно как и любых других технических устройств, является получение информации для принятия решения об их соответствии требованиям, установленным технической документацией на изделия. При этом результат оценки установленного параметра или определенной характеристики изделия сравнивается с заранее определенными допусковыми границами. Рекомендации по организации и проведению подобных процедур контроля рассмотрены в ряде нацио-

нальных и международных документов [1—4]. Очевидно, что если все значения оцененных характеристик изделия лежат в допустимых пределах, изделие считается годным, в противном случае — бракованным. Решение о соответствии или несоответствии изделия установленным требованиям принимает оператор или автоматическое решающее устройство. В любом случае результат оценки обусловлен как разбросом действительных значений контролируемой величины, так и погрешностью (неопределенностью) измерений.

При проектировании систем контроля и их эксплуатации необходимо знать достоверность полученных результатов, т. е. вероятность принятия ошибочных решений.

В простейшем случае при контроле качества изделий и их сортировке по определенному критерию (результатам оценки одного значимого параметра) часть годных изделий с истинным значением параметра внутри поля допуска может быть забракована из-за неопределенности результатов оценки его действительного значения. В то же время часть негодных изделий будет признана годной, хотя истинное значение оцениваемого параметра находится за пределами поля допуска. Показатели достоверности контроля определяются результатами разбраковки и зависят от распределения плотности вероятностей для контролируемого параметра и неопределенности измерений, а также допуска на контролируемый параметр [5, 6].

В случае сортировки фотоэлектрических модулей (ФЭМ) производитель может предлагать изделия более высокого качества, когда их энергетическая эффективность превышает заявленный уровень, по цене изделий из стандартного номенклатурного ряда, что приводит к финансовым потерям (риск изготовителя). Аналогично существует риск получения потребителем низкоэффективных (бракованных) ФЭМ, которые по результатам проверки были признаны производителем годными к поставке конечному пользователю (риск потребителя). В случае предоставления потребителю в качестве кондиционной продукции высокоэффективных модулей, истинные энергетические параметры которых лежат за верхним пределом стандартного номенклатурного ряда, прямые финансовые потери не возникают. Однако в этом случае существует некоторый риск неконтролируемого превышения генерируемой ФЭМ мощности с угрозой повреждения аппаратуры регулирования и преобразования, а также перераспределения мощности при работе модулей в составе солнечной станции.

В данной статье проведен анализ достоверности измерительного контроля нормируемых выходных характеристик полноразмерных ($1,3 \times 1,1$ м) тонкопленочных ФЭМ тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, максимальной мощности. Оценены риски изготовителя и потребителя при выходном контроле энергопроизводительности ФЭМ, произведенных на экспериментальной линии Научно-технического центра тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН (С.-Петербург).

Методики измерений нормируемых фотоэлектрических параметров тонкопленочных модулей применительно к процедуре контроля на имитаторе солнечного излучения типа PVS1114i Nisshinbo Mechatronics Inc. (Япония) и анализ источников неопределенностей измерений тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и максимальной мощности приведены в [7, 8].

Методика расчета показателей достоверности измерительного контроля. Для оценки достоверности измерительного контроля в [4, 6] рекомендовано использовать следующие показатели: $P_{г-б}$ — вероятность признания объекта контроля не удовлетворяющим установленным требованиям при условии, что в действительности он этим требованиям удовлетворяет (риск изготовителя, т. е. годное изделие признается бракованным); $P_{б-г}$ — вероятность признания объекта контроля удовлетворяющим установленным требованиям при условии, что в действительности он этим требованиям

не удовлетворяет (риск потребителя, т. е. бракованное признается годным).

В случае однопараметрического двухальтернативного контроля выходного фотоэлектрического параметра с заданной нижней границей поля допуска ($a \leq x$) применяют следующие выражения для вычислений [4, 5]:

$$P_{г-б} = \int_a^{\infty} f(x) \int_{-\infty}^{a-x} \varphi(\xi) d\xi dx; \quad (1)$$

$$P_{б-г} = \int_{-\infty}^a f(x) \int_{a-x}^{\infty} \varphi(\xi) d\xi dx, \quad (2)$$

где $f(x)$ — плотность вероятности распределения выходного фотоэлектрического параметра x ; $\varphi(\xi)$ — плотность вероятности распределения погрешности (неопределенности) оценки величины x .

Следует отметить, что вероятности $P_{г-б}$, $P_{б-г}$ являются зависимыми. Вместе с событиями $P_{г-г}$ (годное признается годным) и $P_{б-б}$ (бракованное признается бракованным) указанные вероятности составляют полную группу событий

$$P_{г-г} + P_{г-б} + P_{б-г} + P_{б-б} = 1.$$

Для вычисления условной вероятности $P_{г-г}$ признания объекта контроля удовлетворяющим установленным требованиям при условии, что он соответствует данным требованиям, используют формулу

$$P_{г-г} = \int_a^{\infty} f(x) \int_{a-x}^{\infty} \varphi(\xi) d\xi dx. \quad (3)$$

Таким образом, для оценки показателей достоверности контроля (рисков изготовителя и потребителя) необходимо знать: закон распределения вероятностей контролируемого параметра (числовые характеристики закона распределения); границы поля допуска контролируемого параметра; закон распределения вероятностей погрешности (неопределенности) оценки значения контролируемого параметра.

Закон распределения вероятностей для фотоэлектрических параметров ФЭМ. Измерение фотоэлектрических параметров тонкопленочных ФЭМ происходит таким образом, что ток $I_{к.з}$ короткого замыкания и напряжение $U_{х.х}$ холостого хода оказываются независимыми величинами, в то время как выходная максимальная мощность P_{max} имеет прямую зависимость от измеренных значений силы тока и напряжения в соответствии с выражением

$$P_{max} = I_{max} U_{max} = I_{к.з} U_{х.х} FF,$$

где I_{max} — сила тока при оптимальной нагрузке; U_{max} — напряжение при оптимальной нагрузке; $I_{к.з}$ — ток короткого замыкания; $U_{х.х}$ — напряжение холостого хода; FF — коэффициент заполнения вольтамперной характеристики, определяющий соотношение максимальной выходной мощности P_{max} и фиктивной мощности, рассчитанной из $I_{к.з}$, $U_{х.х}$.

При анализе результатов измерений рассматриваемых выходных фотоэлектрических параметров x в качестве априорного принимается нормальный закон распределения вероятностей (закон Гаусса). Функция плотности распределения вероятностей при гауссовом законе описывается как [9]:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где μ — математическое ожидание; σ — среднее квадратическое отклонение (СКО).

Для оценки характеристик одномерного нормального распределения был проведен статистический анализ результатов измерений параметров 40 тонкопленочных ФЭМ из одной партии (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики нормального закона распределения вероятностей фотоэлектрических параметров ФЭМ

Параметры распределения	$I_{к.з}, A$	$U_{х.х}, B$	$P_{max}, Bт$
μ	2,65	73,0	130
σ	0,023	1,3	2,6

Определение границ поля допуска для фотоэлектрических параметров тонкопленочных ФЭМ. Фотоэлектрические модули предназначены для выработки электрической энергии в составе солнечных станций, при проектировании которых необходима информация о номинальных значениях фотоэлектрических параметров и соответствующих границах полей допусков. Данные сведения обязан представлять изготовитель фотоэлектрической продукции.

Обзор предлагаемых производителями тонкопленочных ФЭМ показывает, что для конкурентоспособности продукции на рынке номинальная выходная мощность единичного полноразмерного модуля (площадь ФЭМ порядка 1,43 м²) должна быть не ниже 120 Вт. Кроме того, в целях обеспечения технической совместимости и взаимозаменяемости ФЭМ допустимое отклонение выходной мощности от номинального значения не должно превышать $\pm 2\%$, а границы поля допуска для $I_{к.з}$, $U_{х.х}$ должны быть установлены таким образом, чтобы обеспечить выработку мощности в заданных пределах. С учетом указанных ограничений рассчитаны границы поля допуска для фотоэлектрических параметров тонкопленочных ФЭМ, номинальное экспериментальное значение выходной мощности которых составляет 130 Вт (табл. 2) [7].

Таблица 2

Границы поля допуска для фотоэлектрических параметров тонкопленочных ФЭМ

Фотоэлектрический параметр	Номинальное значение	Границы поля допуска
$I_{к.з}, A$	2,65	[2,58; 2,72]
$U_{х.х}, B$	73	[71; 75]
$P_{max}, Bт$	130	[127,5; 132,5]

Определение закона распределения погрешности (неопределенности) оценки фотоэлектрических параметров ФЭМ. Значения стандартных неопределенностей фотоэлектрических параметров (по типу А) [10] получены на основе статистического анализа 60 результатов измерений единичного ФЭМ в условиях повторяемости. Гистограммы многократных измерений тока $I_{к.з}$ и напряжения $U_{х.х}$ с аппроксимирующими кривыми нормального распределения представлены на рис. 1.

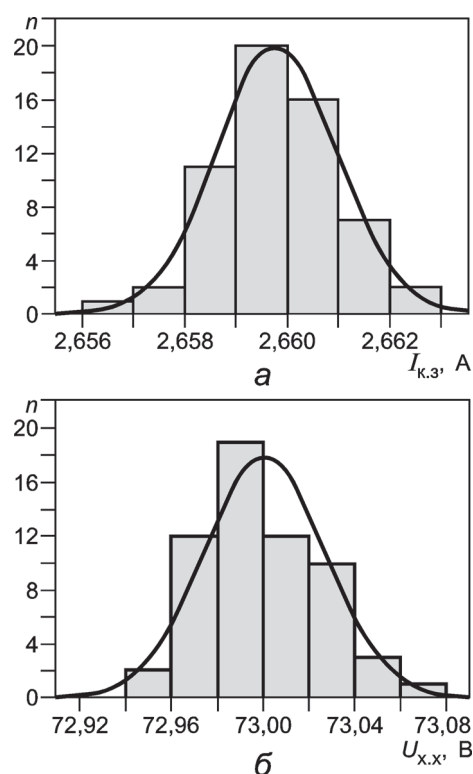


Рис. 1. Гистограммы многократных измерений тока короткого замыкания $I_{к.з}$ (а) и напряжения холостого хода $U_{х.х}$ (б) с аппроксимирующими кривыми нормального распределения; n — число измерений

Проверку гипотезы о нормальности распределений проводили с использованием D-статистики Колмогорова—Смирнова и при вычислении вероятности Лиллиефорса с применением программного кода STATISTICA [11]. Полученные результаты подтвердили справедливость предположения о нормальности закона распределения анализируемых величин.

Бюджет суммарной стандартной неопределенности для фотоэлектрического параметра формировали на основании стандартных неопределенностей, вычисленных экспериментально (тип А) и оцененных на основании данных из нормативно-технической документации на средства измерений силы тока и напряжения (тип В) в соответствии с [10]. Суммарные стандартные неопределенности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Суммарная стандартная неопределенность измерений фотоэлектрических параметров тонкопленочных ФЭМ

Фотоэлектрический параметр	Суммарная стандартная неопределенность
$I_{к.з}, A$	0,0074
$U_{х.х}, B$	0,2400
$P_{max}, Bт$	0,3500

Оценка показателей достоверности контроля фотоэлектрических параметров ФЭМ. Оценка соответствия фотоэлектрических параметров модулей проводили по трем параметрам (трехмерный контроль). Значения суммарных рисков изготовителя α и потребителя β определяли как

$$\alpha = P_{г-6}^I P_{г-г}^U P_{г-г}^{P_{\max}} + P_{г-6}^U P_{г-г}^I P_{г-г}^{P_{\max}} + P_{г-6}^{P_{\max}} P_{г-г}^I P_{г-г}^U +$$

$$+ P_{г-6}^I P_{г-6}^U P_{г-г}^{P_{\max}} + P_{г-6}^I P_{г-6}^{P_{\max}} P_{г-г}^U + P_{г-6}^U P_{г-6}^{P_{\max}} P_{г-г}^I +$$

$$+ P_{г-6}^I P_{г-6}^U P_{г-г}^{P_{\max}} ;$$

$$\beta = P_{6-г}^I P_{г-г}^U P_{г-г}^{P_{\max}} + P_{6-г}^U P_{г-г}^I P_{г-г}^{P_{\max}} + P_{6-г}^{P_{\max}} P_{г-г}^I P_{г-г}^U +$$

$$+ P_{6-г}^I P_{6-г}^U P_{г-г}^{P_{\max}} + P_{6-г}^I P_{6-г}^{P_{\max}} P_{г-г}^U + P_{6-г}^U P_{6-г}^{P_{\max}} P_{г-г}^I +$$

$$+ P_{6-г}^I P_{6-г}^U P_{г-г}^{P_{\max}} ,$$

где $P_{г-6}^I, P_{г-6}^U, P_{г-6}^{P_{\max}}$ — вероятности признания ФЭМ не удовлетворяющим установленным требованиям по значению соответствующего фотоэлектрического параметра при условии, что в действительности он этим требованиям удовлетворяет;

$P_{6-г}^I, P_{6-г}^U, P_{6-г}^{P_{\max}}$ — вероятности признания ФЭМ удовлетворяющим установленным требованиям по значению определенного фотоэлектрического параметра при условии, что в действительности он этим требованиям не удовлетворяет;

$P_{г-г}^I, P_{г-г}^U, P_{г-г}^{P_{\max}}$ — вероятности признания ФЭМ удовлетворяющим установленным требованиям по значению определенного фотоэлектрического параметра при условии, что в действительности он этим требованиям удовлетворяет.

Для вычисления условных вероятностей используют выражения (1)–(3). В качестве закона распределения вероятностей контролируемого параметра (тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, максимальной мощности), а также погрешности (неопределенности) оценки значения измеряемой величины принимается нормальный (Гаусса) закон.

Учитывая, что условные вероятности $P_{г-6}, P_{6-г}$ примерно на два порядка меньше, чем $P_{г-г}$, то третьим и последующими слагаемыми в выражениях (4), (5) можно пренебречь:

$$\alpha \approx P_{г-6}^I P_{г-г}^U P_{г-г}^{P_{\max}} + P_{г-6}^U P_{г-г}^I P_{г-г}^{P_{\max}} + P_{г-6}^{P_{\max}} P_{г-г}^I P_{г-г}^U ,$$

$$\beta \approx P_{6-г}^I P_{г-г}^U P_{г-г}^{P_{\max}} + P_{6-г}^U P_{г-г}^I P_{г-г}^{P_{\max}} + P_{6-г}^{P_{\max}} P_{г-г}^I P_{г-г}^U .$$

В результате вычислений получены следующие значения показателей достоверности измерительного контроля: $\alpha = 0,0227, \beta = 0,0177$.

При проектировании и эксплуатации систем контроля необходимо определять показатели достоверности при заданных погрешностях (неопределенности) и полях допуска. Для анализа системы измерительного контроля фотоэлектрических параметров была сформирована математическая модель зависимости вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода от стандартной неопределенности с использованием программного обеспечения MATLAB. Основная задача построения данной модели — определение стандартной неопределенности при заданном $\beta = 0,01$.

Для удобства расчета и анализа числовые характеристики законов распределений вероятностей фотоэлектрического параметра и границы поля допуска были представлены в относительных величинах к СКО погрешности (табл. 4).

Таблица 4

Математическое ожидание μ и СКО σ функций плотности распределения вероятностей выходных фотоэлектрических параметров $f(x_i)$ и погрешностей их оценки $\varphi(\xi_i)$ при определении рисков изготовителя и потребителя, отн. ед.

Фотоэлектрический параметр	$\varphi(\xi_i)$		$f(x_i)$		Границы поля допуска $[a_i; b_i]$
	μ	σ	μ	σ	
$I_{к.з}$	0	1	0	3,1	$[-10; 10]$
$U_{х.х}$	0	1	0	5,3	$[-8,3; 8,3]$
$P_{\max}$	0	1	0	7,4	$[-7,1; 7,1]$

Стандартная неопределенность принята условно за единицу, а СКО фотоэлектрического параметра и границы поля допуска определены в долях от нее. В качестве закона распределения вероятностей фотоэлектрического параметра принят нормированный нормальный закон.

На рис. 2 показаны зависимости вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода от стандартной неопределенности для соответствующего фотоэлектрического параметра. Полученные зависимости позволяют установить, что вероятность ошибок при контроле наименьшая для тока $I_{к.з}$, т. е. суммарные риски изготовителя и потребителя, преимущественно определяются вероятностью ошибочных решений о соответствии (несоответствии) максимальной мощности и напряжения $U_{х.х}$ установленным требованиям. Для достижения заданного риска потребителя ($\beta = 0,01$) необходимо уменьшение стандартной неопределенности в два раза.

Таким образом, для удовлетворения запросов потребителей интервалы допустимых значений (при доверительной вероятности $P = 95\%$) для фотоэлектрических параметров должны быть следующие: $I_{к.з} = \pm 0,008$ А, $U_{х.х} = \pm 0,24$ В, $P_{\max} = \pm 0,35$ Вт. Следует отметить, что предложенная модель также была использована для оценки вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода при стандартных неопределенностях фотоэлектрических параметров, оцененных расчетным методом в [7, 8]: $u(I_{к.з}) = 0,066$ А, $u(U_{х.х}) = 0,38$ В, $u(P_{\max}) = 3,3$ Вт. Полученные значения рисков изготовителя и потребителя $\alpha = 0,2814, \beta = 0,0513$ свидетельствуют о завышенной оценке неопределенности при контроле фотоэлектрических параметров и необходимости уточнения методики ее оценки.

Заключение. Для анализа достоверности измерительного контроля нормируемых выходных фотоэлектрических параметров тонкопленочных ФЭМ сформирована математическая модель зависимости вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода от стандартной неопределенности. Данная модель позволила оценить доверительный интервал для тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, максимальной мощности при заданном показателе достоверности (суммарном риске потребителя). Также представленная математическая модель позволяет решать обратную задачу — предсказывать вероятность ошибок 1-го и 2-го рода при определенной стандартной неопределенности для фотоэлектрического параметра, что представляет практическую зна-

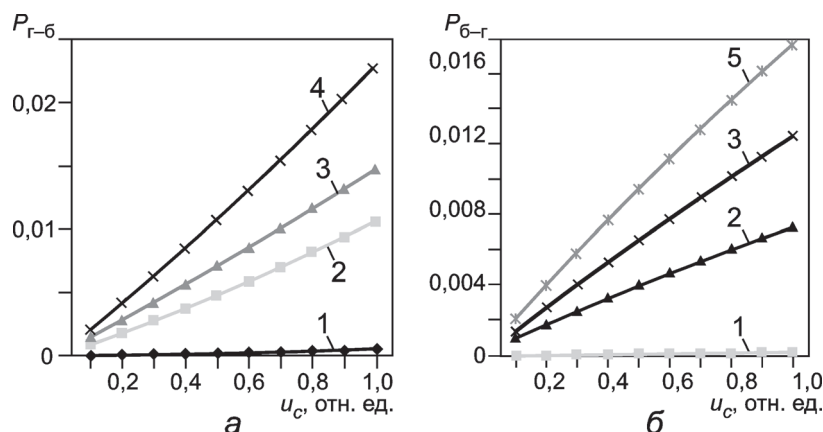


Рис. 2. Зависимости вероятностей ошибок 1-го $P_{г-б}$ (а) и 2-го рода $P_{б-г}$ (б) от стандартной неопределенности u_c при контроле фотоэлектрических параметров:

1 — $I_{к,з}$; 2 — $U_{х,х}$; 3 — P_{max} ; 4 — α ; 5 — β

чимость модели при ее использовании в системах многомерного контроля применительно к реальным условиям крупносерийного производства.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-29-00178).

Литература

1. **JCGM 106.** Оценивание данных измерений. Роль неопределенности измерения в оценке соответствия
2. **ГОСТ Р ИСО 10576-1—2006.** Статистические методы. Руководство по оценке соответствия установленным требованиям. Часть 1. Общие принципы.

3. **Руководство МЭК 115:2007.** Применение неопределенности измерения в деятельности по оценке соответствия в электротехнике.

4. **ГОСТ Р 8.731—2010.** ГСИ. Системы допускового контроля. Основные положения

5. **Дунаев Б. Б.** Точность измерений при контроле качества. К.: Техніка, 1981.

6. **МИ 1317—2004.** ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

7. **Богомолова С. А., Лукашов Ю. Е., Шварц М. З.** Оценка расширенной неопределенности результата измерения тока короткого замыкания тонкопленочных фотоэлектрических модулей // Измерительная техника. 2013. № 11. С. 7—12; **Bogomolova S. A., Lukashov Yu. E., Shvarts M. Z.** Estimate of the Expanded Uncertainty in the Result of Measuring the Short Circuit Current of Thin-Film Photovoltaic Modules // Measurement Techniques. 2014. V. 56. N. 11. P. 1209—1215.

8. **Bogomolova S. A., Gudovskikh A. S., Shvarts M. Z.** Evaluation of the Uncertainty in Measuring IV Characteristics of the Thin-Film Modules // Proc. 28th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition. Paris (France), 2013. P. 3527—353.

9. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1999.

10. **Руководство** по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. СПб.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999.

11. **StatSoft** [Офиц. сайт]. <http://www.statsoft.com> (дата обращения 08.08.2014 г.)

Дата принятия 08.10.2014 г.

006:519.216.3

Оценка длительности межповерочных интервалов средств измерений методами теории массового обслуживания

Ю. С. СЫСОВЕВ, Н. А. СИМАКОВА

Волгодонский инженерно-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Россия,
e-mail: sysoev2004@mail.ru

Представлена формальная методика стохастических оценок длительности межповерочных интервалов средств измерений, основанная на теории массового обслуживания. Методику можно использовать и для прогнозирования процесса случайного дрейфа параметров других технических объектов.

Ключевые слова: прогнозирование, межповерочный интервал, дрейф параметров, стохастическая экстраполяция.

The formal procedure of stochastic estimates of measuring instruments verification intervals is presented. The procedure can also be for prediction of the process of random drift of other technical objects parameters.

Key words: forecasting, verification interval, parameters drift, stochastic extrapolation.

В [1—3] обоснована необходимость развития методов оценок длительности межповерочных интервалов средств измерений (СИ), основанных на стохастической экстрапо-

ляции. Межповерочные интервалы определены по результатам наблюдений за погрешностями этих устройств в некотором временном промежутке в процессе их эксплуатации