

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕЖПОВЕРОЧНОГО ИНТЕРВАЛА ГАЗОАНАЛИЗАТОРА ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЗАПАСА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ

Л. В. ЕФРЕМОВ¹, В. А. СМИРНОВ², О. Г. ЗВЕРЕВ²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: levlefr@mail.ru

²Электронстандарт-прибор, 188301, Гатчина, Ленинградская область, Россия

Представлены результаты ускоренных ресурсных испытаний газоанализатора ССС-903МТ, выполненных с целью прогнозирования возможности увеличения интервала между поверками прибора от одного до трех лет непрерывной работы. Подтверждена эффективность применения критерия, называемого запасом метрологической надежности.

Ключевые слова: вероятность, газоанализатор, метрологическая надежность, испытания, погрешность, прибор, коэффициент корреляции

Прогнозирование межповерочных интервалов (МПИ) средств измерений является сложной проблемой, которую, однако, как показано в работах [1—3] и др., допустимо решать на основе критерия, называемого запасом метрологической надежности (ЗМН). В настоящей статье исследуется эффективность критерия ЗМН по результатам уникальных ускоренных ресурсных испытаний газоанализатора типа ССС-903МТ (рис. 1) с целью проверки возможности увеличения МПИ подобных приборов от одного до трех лет непрерывной работы.



Рис. 1

Газоанализатор ССС-903МТ является продукцией АО „Электронстандарт-прибор“ (Санкт-Петербург). Рассматриваемая модель представляет собой стационарный взрывозащищенный одноканальный газоанализатор со сменными сенсорами, предназначенный для непрерывного контроля загазованности воздуха рабочей зоны объектов газовой, химической, нефтяной и других промышленных отраслей и обеспечения высокого уровня противоаварийной защиты. Сменные сенсоры позволяют оценивать концентрации таких газов, как метан, пропан, этан, бутан, изобутан, пентан и др., в том числе сложных углеводородов. Для испытаний была поставлена большая выборка (80 шт.) однотипных образцов инфракрасного сен-

сора оптического принципа действия для измерения концентрации метана в эталонной порции газовой смеси.

Периодические сеансы измерений погрешности каждого из приборов выборки выполнялись по принятой методике поверок. Обработка и анализ результатов каждого сеанса измерений позволили, в конечном счете, оценить вероятность недостижения предела погрешности (ВНПП) сенсора по тренду изменения ЗМН в течение заданного срока МПИ (например, три года).

В основе решения задачи лежит экспериментальное определение вектора выборки (объемом N) абсолютной погрешности измерений h_i :

$$h_i = H_i - H_{\text{эт}}, \quad (1)$$

где i — номер измерения, $H_{\text{эт}}$ — тестовая (эталонная) концентрация газа, H_i — результат i -го измерения концентрации газа.

Векторы, определяемые для каждого j -го сеанса поверки выборки приборов, характеризуются известными статистическими параметрами — математическим ожиданием (МО) M и среднеквадратическим отклонением (СКО) σ :

$$M = \sum_{i=1}^N h_i / N, \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - M)^2}{N - 1}}. \quad (3)$$

Эти параметры необходимы для расчета основного диагностического параметра выборки — запаса метрологической надежности Z , который представляет собой квантиль нормального распределения. В формулу для расчета ЗМН входит также предел погрешности h_d , устанавливаемый правилами поверки прибора для заданной концентрации тестовой пробы газа $H_{\text{эт}}$:

$$Z = \frac{h_d - |M|}{\sigma}. \quad (4)$$

Напомним, что по данным о квантиле Z всегда можно определить соответствующую одностороннюю доверительную ВНПП γ . В редакторе электронных таблиц для этого имеется оператор $\gamma = \text{НОРМ.СТ.РАСП}(Z; \text{ИСТИНА})$, а в редакторе MathCAD — оператор $\gamma = \text{=snorm}(Z)$. В частности, при $Z = 2$ вероятность $\gamma = 0,977$ (обычно округляют до 0,975).

Необходимым условием решения поставленной задачи является назначение следующих допустимых критериев: тип компонентов эталона газа для испытаний, концентрация эталонного образца газа, предел погрешности и допустимые значения ЗМН и ВНПП. В соответствии с правилами поверки при испытаниях прибора применялась смесь метана при $H_{\text{эт}} = 47,95\%$ и $h_d = 5\%$ (что соответствует 10% относительной погрешности). На основании данных работы [2] был выбран вариант допустимого значения ЗМН $Z_n = 2$ при вероятности $\gamma_d = 0,975$, поскольку эта величина обычно применяется в метрологии.

Для выборки объемом $N = 80$ был назначен срок испытаний 2250 ч с учетом стабилизации тренда изменения параметра Z на уровне 5,3—5,5. При этом одновременно испытывались две партии образцов — при нормальной температуре среды и при повышенной до 85 °С в климатической камере. Указанный объем выборки удовлетворяет требованиям к достоверности испытаний, поскольку минимальный допустимый объем — 30 единиц [3]. Для учета так называемого человеческого фактора рекомендованы трехразовые измерения при каждом сеансе. Таким образом, объем выборки для обработки измерений составил 240 событий.

Результаты измерений при каждом очередном сеансе фиксируются в электронной таблице EXCEL по согласованной форме (рис. 2, а). Для каждого сеанса предусмотрена графа с двумя ячейками: в первой ячейке для каждого из 240 измерений записываются фактические концентрации H_i , а в соседней ячейке — погрешность h_i , которая рассчитывается автоматически по формуле (1) и встроенной программе. При этом постоянный параметр $H_{эт}$ заранее закреплен во внешней ячейке G1. После заполнения граф для конкретного сеанса в нижней части таблицы (рис. 2, б) рассчитываются абсолютное значение МО по формуле (2), СКО по формуле (3) и ЗМН по формуле (4).

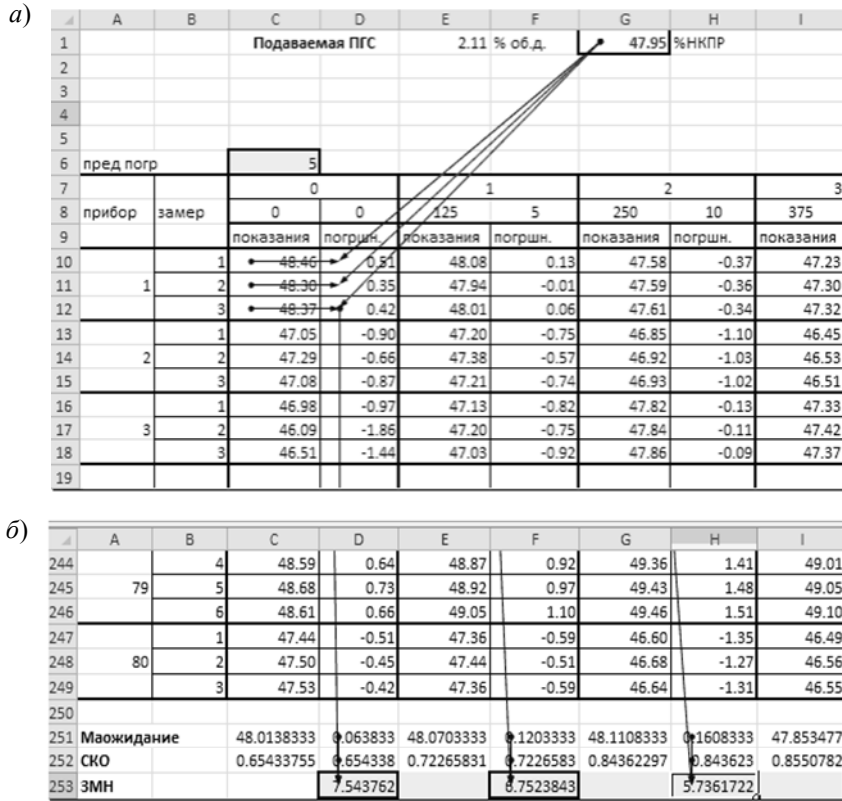


Рис. 2

Дальнейший анализ полученных данных выполняется в редакторе MathCAD. На рис. 3, а и в табл. 1 приведены зависимость изменения ЗМН от времени испытаний и экспериментальные характеристики прибора ССС-903МТ при обычной и повышенной температуре.

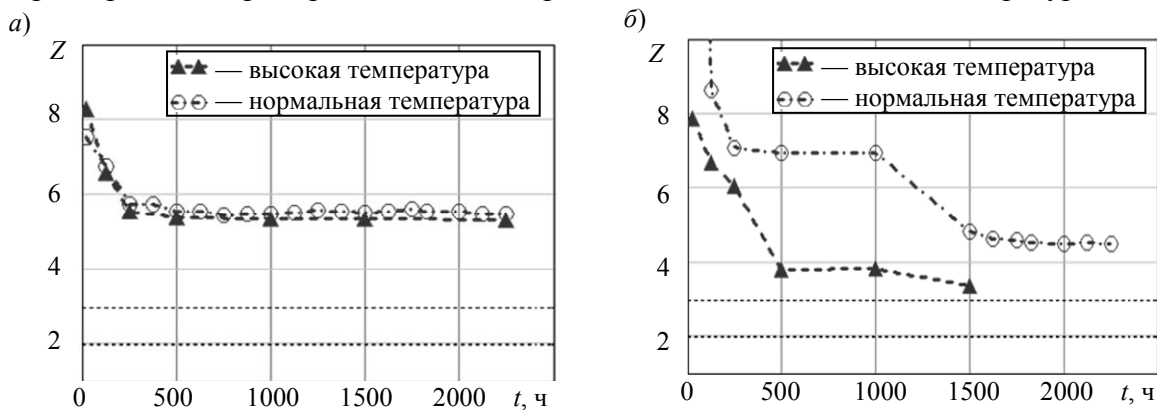


Рис. 3

На основе анализа рис. 3, а и табл. 1 можно сделать заключение о высокой и стабильной надежности данного прибора, поскольку в период испытаний от 500 до 2250 ч величина $Z = 5,3...5,5$ ($\gamma \rightarrow 1$), что значительно больше допустимого значения $Z_H = 2$ при вероятности

$\gamma_d = 0,975$. При этом результаты испытаний образцов при нормальной и повышенной температуре практически совпадают.

Таблица 1

Условия	Наработка t , ч	M , %	σ , %	Z
Нормальная температура	24	0,064	0,654	7,544
	125	0,12	0,723	6,752
	250	0,161	0,844	5,736
	375	-0,097	0,855	5,734
	500	-0,124	0,877	5,562
	625	-0,127	0,876	5,565
	750	-0,144	0,892	5,443
	875	-0,14	0,888	5,473
	1000	-0,136	0,888	5,476
	1125	-0,131	0,883	5,512
	1250	-0,145	0,871	5,575
	1375	-0,147	0,876	5,537
	1500	-0,154	0,879	5,511
	1625	-0,153	0,873	5,555
	1750	-0,151	0,866	5,6
	Повышенная температура	1825	-0,157	0,875
2000		-0,153	0,875	5,538
2125		-0,153	0,883	5,488
2250		-0,155	0,883	5,486
24		-0,009	0,604	8,264
125		-0,078	0,748	6,585
250		-0,037	0,892	5,562
500		-0,16	0,896	5,4
1000	-0,171	0,901	5,359	
1500	-0,179	0,904	5,336	
2250	-0,184	0,906	5,318	

Это позволяет сделать субъективное предположение о возможности назначения трехлетнего периода МПИ для данного прибора с учетом сведений об опыте его эксплуатации. Для проверки этого предположения была поставлена задача обоснования расчетной функции характера изменения ЗМН от времени эксплуатации прибора.

В связи с отсутствием в настоящее время общих правил прогнозирования МПИ методика решения этой задачи зависит от опыта и интуиции исследователя. В данном случае был применен традиционный подход к аппроксимации экспериментальных точек степенной функцией вида

$$Z(t) = Ct^m,$$

где C и m — постоянные величины.

Постоянные величины C и m , приведенные в табл. 2, определяются методом наименьших квадратов для линейного уравнения регрессии логарифмов экспериментальных данных:

$$\ln(Z) = A + B \ln(t), \text{ откуда } C = \exp(A), m = B.$$

Условное решение о допуске прибора к эксплуатации при назначенном (трехлетнем) МПИ принимается путем сравнения расчетного ЗМН $Z(t)$ (при наработке $t = 3 \cdot 24 \cdot 365 = 26280$ ч) с допустимым значением Z_n . Поскольку значения ЗМН (4,54 и 3,91) существенно превышают норму $Z_n = 2$, то принятое выше предположение о назначении трехлетнего МПИ для рассматриваемого прибора с некоторыми допущениями представляется справедливым.

На рис. 3, б для сравнения показаны графики для газоанализатора другого типа (с условным названием ГА2), испытания которого проводились одновременно с испытаниями газоанализатора ССС-903МТ. Как показывают результаты расчета (см. табл. 2), прибор ГА2

имеет низкую надежность и ему нельзя присваивать трехлетний МПИ. Такое сравнение подтверждает эффективность представленной методики.

Таблица 2

Прибор	Температура	C	m	Z
ССС-903МТ	Нормальная	8,735	-0,064	4,54 > 2 (отлично)
	Повышенная	10,524	-0,097	3,91 > 2 (отлично)
ГА2	Нормальная	72,84	-0,37	1,40 < 2 (плохо)
	Повышенная	17,34	-0,22	1,54 < 2 (плохо)

Результаты испытаний двух типов газоанализаторов позволяют проверить другой (новый) вариант методики прогнозирования МПИ, который основан на совместном применении двух законов распределения вероятностей — нормального закона для неопределенности ЗМН и закона Вейбулла для неопределенности времени испытаний.

Реализация предлагаемого метода включает следующие процедуры (на примере испытаний прибора СССР-903МТ при высокой температуре).

1. Среди векторов наработки и ЗМН (см. табл. 1) выбираются два крайних значения t (например, $t_1 = 125$ ч и $t_2 = 2250$ ч) и Z (например, $Z_1 = 6,752$ и $Z_2 = 5,318$) с расчетом вероятности $P_1 = \text{snorm}(Z_1)$ и $P_2 = \text{snorm}(Z_2)$.

2. По этим данным вычисляются параметры формы b и масштаба a закона распределения Вейбулла по формулам

$$b = \ln\left(\frac{-\ln P_1}{-\ln P_2}\right) / \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right), \quad a = t_2 / (-\ln P_2)^{1/b}.$$

3. На основе 2-й процедуры выводятся формулы для расчета вероятности безотказной работы $P(t)$, ЗМН $Z'(t)$ и гамма-процентного ресурса $R(\gamma)$:

$$P(t) = \exp\left[-(t/a)^b\right];$$

$$Z'(t) = \text{qnorm}(P(t), 0, 1);$$

$$R(\gamma) = \frac{a}{24 \cdot 365} (-\ln \gamma)^{1/b},$$

которые позволяют построить экспериментальный и расчетный графики (рис. 4), а затем оценить ЗМН при назначенном МПИ и условный максимальный срок службы изделия R_{\max} при заданной вероятности $\gamma_d = 0,975$ (табл. 3; для сравнения приведены показатели прибора ГА2).

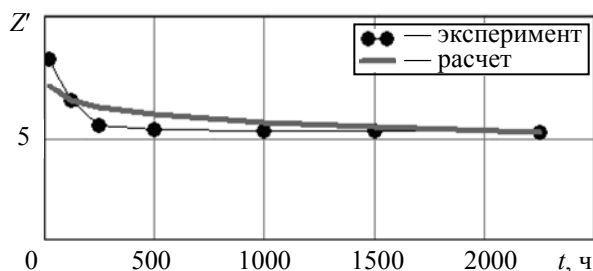


Рис. 4

Таблица 3

Прибор	Температура	b	a	МПИ, лет	Z'	R_{\max} , лет
ССС-903МТ	Нормальная	3,019	$7,912 \cdot 10^{-5}$	3	4,13 > 2	42
	Повышенная	2,679	$1,174 \cdot 10^{-6}$	3	3,95 > 2	34
ГА2	Нормальная	6,974	$1,369 \cdot 10^{-4}$	1	1,70 < 2	0,9
	Повышенная	6,92	$4,703 \cdot 10^{-3}$	0,5	0,11 < 2	0,3

Сравнительный анализ табл. 2 и 3 подтверждает не только более высокую надежность газоанализатора ССС-903МТ по сравнению с прибором ГА2, но и эффективность критерия ЗМН для решения проблем подобного рода.

Представленные в статье результаты испытаний большой выборки однотипных экземпляров газоанализаторов в течение 2250 ч подтверждают высокую надежность прибора ССС-903МТ и справедливость предположения о назначении для него трехлетнего МПИ. Решение этого вопроса зависит от природы процессов изменения погрешности прибора и статистики его отказов при эксплуатации. С этим вопросом связана и более общая проблема совершенствования методов прогнозирования МПИ в приборостроении путем организации долговременных лабораторных и эксплуатационных испытаний приборов в целях уточнения вероятностных моделей долговечности на основе критерия ЗМН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефремов Л. В.* Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 51—54.
2. *Ефремов Л. В.* Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: алгоритмы и программы. СПб: Изд-во „Нестор-История“, 2011.
3. *Ефремов Л. В.* Вероятностные проблемы ресурсных испытаний. СПб: Art-Xpress, 2014.

Сведения об авторах

- Леонид Владимирович Ефремов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский политехнический университет, кафедра машиноведения и основ конструирования; E-mail: levlefr@mail.ru
- Виталий Анатольевич Смирнов** — Электронстандарт-прибор; начальник информационного центра; E-mail: velsmirnyi@mail.ru
- Олег Григорьевич Зверев** — Электронстандарт-прибор; зам. генерального директора; E-mail: zverev_esp@mail.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники Университета ИТМО

Поступила в редакцию
05.04.16 г.

Ссылка для цитирования: *Ефремов Л. В., Смирнов В. А., Зверев О. Г.* Прогнозирование межповерочного интервала газоанализатора по изменению запаса метрологической надежности // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8. С. 664—670.

**FORECASTING OF VERIFICATION INTERVAL FOR GAS ANALYZER
BY THE CHANGE IN THE STOCK OF THE METROLOGICAL RELIABILITY**

L. V. Efremov¹, V. A. Smirnov², O. G. Zverev²

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195521, St. Petersburg, Russia
E-mail: levlefr@mail.ru*

²*JSC Electronstandart-Pribor, 188301, Gatchina, Leningrad region, Russia*

Results of accelerated life testing of gas analyzer SSS-903MT were performed to predict the possibility of increasing the interval between verifications of the instrument from one to three years of continuous operation. The effectiveness of applying the proposed criterion, called metrological reliability, is confirmed.

Keywords: probability, gas analyzer, metrological reliability, testing, error, instrument, correlation coefficient

Data on authors

Leonid V. Efremov — Dr. Sci., Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Department of Mechanical Engineering and Design; E-mail: levlefr@mail.ru

- Vitaliy A. Smirnov** — JSC Electronstandart-Pribor; Head of the Information Center;
E-mail: velmirnyi@mail.ru
- Oleg G. Zverev** — JSC Electronstandart-Pribor; Deputy General Director;
E-mail: zverev_esp@mail.ru

For citation: *Efremov L. V., Smirnov V. A., Zverev O. G.* Forecasting of verification interval for gas analyzer by the change in the stock of the metrological reliability // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 8. P. 664—670 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-664-670