

---

---

# ДИАГНОСТИКА И ТОЧНОСТЬ МЕХАНИЗМОВ И ПРИБОРОВ

---

---

УДК 921.01

Л. В. ЕФРЕМОВ

## ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИБОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГРУППОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Представлены алгоритмы оценки вероятностных характеристик метрологической надежности по данным групповых испытаний приборов. В основе алгоритмов лежит эффективный критерий, названный „запас метрологической надежности“.

*Ключевые слова:* вероятность, деградация, метрологическая надежность, испытания, погрешность, прибор, циклы, тренд, корреляция.

Большинство национальных и международных документов по стандартизации в метрологии посвящено обеспечению точности (правильности и прецизионности) результатов измерений путем оценки характеристик рассеяния выборки измерений при исключенной систематической погрешности. Так поступают, например, при сличении эталонов, когда принимаются меры по устранению систематической погрешности с целью оценки истинной эталонной величины в пределах доверительных границ, определяемых по правилам теории неопределенностей.

В настоящей статье рассматривается один из способов решения не менее актуальной задачи приборостроения — прогнозирования и контроля метрологической надежности средств измерений (СИ) по результатам групповых испытаний.

В основе решения вероятностных задач лежат принципы, используемые при оценке надежности машин [1]. Отличие заключается в том, что в качестве диагностического параметра применяются систематическая погрешность измерений и зависящие от нее характеристики. В частности, наиболее информативной характеристикой можно считать так называемый запас метрологической надежности (ЗМН) [2—5]. Он представляет собой квантиль двухпараметрического нормального распределения  $Z$  вероятности недостижения  $\beta$  предела погрешности  $h_a$ , учитывающий в общем случае изменение как систематической  $h_{сп}$ , так и случайной  $\sigma_{сл}$  погрешности прибора:

$$Z = \frac{h_a - h_{сп}}{\sigma_{сл}} \Rightarrow \beta = \text{snorm}(Z). \quad (1)$$

Значение  $h_a$  определяет поставщик прибора, а систематическая  $h_{сп}$  и случайная  $\sigma_{сл}$  погрешности рассчитываются по выборке многократных измерений погрешности  $h_i$  объемом  $N$ , получаемой в процессе поверки:

$$h_{\text{ср}} = |h_{\text{ср}}|, \quad h_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^N h_i / N, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{сл}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - h_{\text{ср}})^2}{N-1}}, \quad (3)$$

где  $h_{\text{ср}}$  — среднее значение погрешности.

В формуле (1) используются модули  $h_a$  и  $h_{\text{ср}}$ , для того чтобы корректно учесть их возможное зеркальное нахождение в отрицательной зоне поля разброса величин.

Указанная методика расчета ЗМН может быть использована, когда исходный вектор погрешности образуется в результате многократных измерений при индивидуальных испытаниях конкретного прибора. Обычно такая задача решается при первичных или периодических поверках с целью допуска прибора к работе. Вместе с тем для решения некоторых задач оценки ЗМН требуются испытания не одного образца, а группы однотипных приборов.

Рассмотрим предлагаемую методику решения одной задачи по результатам групповых испытаний для подтверждения типа прибора. Задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо проверить возможности сокращения объема испытаний приборов, предназначенных для работы в различных климатических условиях.

В этом случае для подтверждения типа прибора устанавливается основной режим испытаний при минимальной систематической погрешности ( $h_a \approx 0$ ) после юстировки прибора. При этом известно, что погрешность зависит от изменения условий работы прибора (например, при повышении температуры). Требуется определить, следует ли поверять прибор при различных условиях работы или можно ограничиться испытаниями на основном режиме. При этом критерием исправности прибора является соблюдение правила трех сигм, когда для ЗМН соблюдается следующее условие

$$Z \geq Z_{\text{доп}} = 3, \quad (4)$$

где  $Z_{\text{доп}}$  — допустимый уровень ЗМН.

Объектом испытаний являются  $m$  однотипных приборов (примем  $m = 5$ ). Решение задачи разбито на два этапа. На первом задан предел погрешности  $h_a = 10$ . Для каждого  $j$ -го прибора выполняются многократные измерения абсолютной или относительной погрешности  $h_i$  объемом выборки  $N$  (например,  $N=10$ ). Таким образом, получают 5 выборок измерений объемом по 10 циклов. Для каждого из них рассчитываются систематическая и случайная погрешность по формулам (2) и (3), а затем ЗМН по формуле (1). Для повышения достоверности оценки все пять векторов следует объединить в выборку объемом  $mN = 5 \cdot 10 = 50$  элементов, затем рассчитываются систематическая и случайная погрешности объединенной (об) выборки. При этом можно применить формулы:

$$h_{\text{об.ср}} = |h_{\text{об.ср}}|, \quad h_{\text{об.ср}} = \sum_{j=1}^m h_{\text{ср}.j} / m, \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{об.сл}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \left[ \sigma_{\text{сл}.j}^2 (N-1) + N h_{\text{ср}.j}^2 \right] - m N h_{\text{об.ср}}^2}{m N - 1}}. \quad (6)$$

В заключение для объединенной выборки рассчитывается ЗМН по формуле (1), который должен отвечать условию (4).

На втором этапе испытаний для жестких условий (в климатической камере) расчеты выполняются по приведенным выше формулам, но со следующими условиями. Во-первых, перед выполнением измерений приборы, испытанные на первом этапе, не должны подвергаться регулировке и юстировке. Во-вторых, для них должен быть назначен повышенный предел погрешности, например,  $h_a = 16$ . Однако алгоритм и программа расчета остаются без изменений и при этом должно быть проверено условие (4). Если результаты проверки этого условия на обоих этапах совпадут, то можно принять решение о выполнении проверок прибора только на основном режиме испытаний при нормальных условиях.

Для выполнения расчетов была разработана программа в редакторе MathCad. Более простая программа составлена в электронных таблицах EXCEL (см. рис. 1). Содержание расчетов в EXCEL можно пояснить на примере некоторых операторов.

	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	Ж	К	Л	М	Н
2	<b>Допустимый ЗМН</b>		<b>3</b>		<b>бета =</b>	<b>0.9987</b>							
3													
4	<b>Внести результаты расчета относительной погрешности в таблицу 1 для нормальных условий и табл 2 - для климатических камер</b>												
5													
6		Пред Погр	<b>10</b>		табл 1			Пред Погр	<b>16</b>		табл 2		
7	№	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	№	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	
8	1	-2.809	-1.741	-1.205	-4.835	-1.123	1	3.867	3.309	2.615	1.266	3.703	
9	2	-1.586	-1.259	-1.176	-3.595	-0.682	2	3.994	4.073	3.648	3.811	4.323	
10	3	-1.132	-1.074	-0.861	-1.996	-0.22	3	4.272	4.859	3.791	4.073	4.455	
11	4	-0.789	-0.303	-0.408	-1.274	-0.027	4	4.841	5.968	5.007	4.158	4.537	
12	5	-0.732	0.115	0.0031	-1.026	0.27	5	5.208	6.053	5.14	4.161	5.33	
13	6	-0.201	1.122	0.149	0.019	0.301	6	5.345	6.397	5.449	5.321	6.238	
14	7	0.073	1.161	0.93	0.165	0.465	7	5.523	6.442	5.466	6.364	6.463	
15	8	0.927	1.437	1.488	0.343	0.856	8	6.714	6.819	6.103	6.675	6.634	
16	9	1.348	1.526	1.846	0.51	1.233	9	7.266	7.619	6.24	6.899	7.319	
17	10	3.653	1.642	2.103	1.285	1.697	10	11.08	8.352	8.829	8.127	8.17	
18	Сист погр	-0.1248	0.2626	0.2869	-1.0404	0.2770	Сист погр	5.8110	5.9891	5.2286	5.0855	5.7172	
19	Сл погр	1.7875	1.2859	1.2406	1.9492	0.8512	Сл погр	2.1538	1.5433	1.7097	1.9919	1.4677	
20	ЗМН	5.5246	7.5725	7.8295	4.5966	11.4229	ЗМН	4.7308	6.4867	6.3001	5.4794	7.0062	
21	ВНДПС	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	ВНДПС	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
22													
23					<b>По всей группе приборов</b>			<b>АНАЛИЗ</b>					
24													
25					Условия	Норм	Камера		<b>Оценка нормальных условий</b>			<b>5</b>	
26					Пр Погр	<b>10</b>	<b>16</b>		<b>Оценка условий с камерой</b>			<b>5</b>	
27					Сист погр	<b>-0.0677</b>	<b>5.5663</b>						
28					Сл погр	<b>1.5067</b>	<b>1.7535</b>		<b>Заключение - измерять</b>			<b>без камер</b>	
29					ЗМН	<b>6.5922</b>	<b>5.9504</b>						
30					ВНДПС	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>						

Рис. 1

Расчеты выполнены для нормальных условий в диапазоне ячеек В6:G21. Ввод чисел: ячейка D2 =  $Z_{\text{доп}} = 3$ , ячейка D6 =  $h_a = 10$ , строка С7:G7 — нумерация приборов, выборка В8:В17 — нумерация циклов, выборка С8:С17 — опытные погрешности по циклам.

Результаты вычислений для первого прибора: С18=СРЗНАЧ(С8:С17) = -0,1248 — систематическая погрешность, С19 =СТАНДОТКЛОН(С8:С17) = 1,7875 — случайная погрешность, С20 =(ABS(\$D\$6)-ABS(С18))/С19 = 5,5246 — ЗМН, С21 =НОРМСТРАСП(С20) = 1 — вероятность недостижения предельного состояния (ВНДПС).

Расчеты для жестких условий испытаний выполнены для ячеек Н25:М21 по тем же формулам.

Формулы для вычислений метрологических характеристик для объединенных выборок обоих вариантов испытаний приведены в диапазоне ячеек F25:H30 (рис. 2).

Следует обратить внимание на простой способ вычисления случайной погрешности (стандартного отклонения) для объединенных выборок путем обозначения диапазона вычислений от первой верхней до последней нижней ячейки. Расчеты в редакторе MathCad совпали с результатами расчетов в редакторе EXCEL.

В заключение результаты вычисления ЗМН сравниваются с допустимым значением по условию (4). Для этого в ячейках М26 и М27 записаны логические операторы М26=ЕСЛИ(G29>=\$D\$2;5;4) = 5 и М27=ЕСЛИ(Н29>=\$D\$2;5;4) = 5. Основное заключение

содержится в ячейке M28=ЕСЛИ(M25=M26; „без камер“; „с камерой“). Ответ „без камер“ означает, что проводить поверку приборов в жестких условиях не требуется.

Ячейки	F	G	H
25	Условия	Нормальные	Жесткие (Камера)
26	Предел Погр	=D\$6	=J\$6
27	Сист. погр	=CPЗНАЧ(C18:G18)	=CPЗНАЧ(I18:M18)
28	Случ. погр	=СТАНДОТКЛОН(C8:G17)	=СТАНДОТКЛОН(I8:M17)
29	ЗМН	=(ABS(D\$6)-ABS(G27))/G28	=(ABS(J\$6)-ABS(H27))/H28
30	ВНДПС	=НОРМСТРАСП(G29)	=НОРМСТРАСП(H29)

Рис. 2

Такой результат можно объяснить физической сущностью ЗМН. Из формулы (1) следует, что причина увеличения предела погрешности для жестких условий заключается в возникновении дополнительной систематической погрешности после испытаний в нормальных условиях без корректировки показаний прибора. Поэтому запас надежности (т.е.  $h_a - h_{сп}$ ) не должен существенно измениться по сравнению с нормальными условиями. Это лишний раз подтверждает эффективность критерия, названного запасом метрологической надежности [5].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Госстандарт, 1989.
2. Ефремов Л. В. Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 51—54.
3. Ефремов Л. В. Моделирование трендов погрешности диагностических приборов // Там же. № 2. С. 38—43.
4. Ефремов Л. В. Оценка интервалов между калибровками с учетом запаса метрологической надежности средств измерений // Там же. № 12. С. 34—40
5. Ефремов Л. В. Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: алгоритмы и программы. СПб: Нестор-История, 2011. 200 с.

#### Сведения об авторе

**Леонид Владимирович Ефремов** — д-р техн. наук, профессор; Петербургский институт машиностроения, кафедра триботехники, Санкт-Петербург; E-mail: levlefr@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
29.02.12 г.