

Л. В. ЕФРЕМОВ

ОЦЕНКА ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ КАЛИБРОВКАМИ С УЧЕТОМ ЗАПАСА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Демонстрируется метод прогнозирования интервалов между поверками и калибровками средств измерений с учетом запаса их метрологической надежности. Метод позволяет гарантировать безотказную работу приборов при эксплуатации и может быть положен в основу стандартов о поверке средств измерений.

Ключевые слова: вероятность, запас метрологической надежности, исправность, калибровка, квантиль, поверка, погрешность, средство измерения.

Обычно приборы и другие средства измерения (СИ) считаются исправными и допускаются к работе, если при поверке их фактическая погрешность Δ не выходит за пределы допустимого значения Δ_a (далее — предел погрешности). Но правильность принятия такого решения во многом зависит от корректности оценки погрешности Δ . В инструкциях по поверкам ряда СИ указаны такие варианты расчета Δ : по одноразовому измерению, по средней величине трех или пяти измерений, по максимальной величине трех измерений и др.

Общим недостатком рассмотренных способов оценки Δ является то, что с их помощью учитывается лишь факт превышения или не превышения предела погрешности. Поэтому СИ может признаваться исправным даже в случае совпадения погрешности с ее пределом или близости к нему, хотя это состояние может быть нарушено сразу же после проведения поверки со всеми вытекающими отсюда негативными, а иногда и трагическими, последствиями.

К нормативным документам, где эта проблема решается на высоком уровне корректности, можно отнести стандарты и методики поверки лабораторных весов [1], предусматривающие расчет размаха и среднего квадратического отклонения (СКО) по результатам многократных измерений. При этом СКО не должно превышать $1/3$ предела погрешности, что обеспечивает соблюдение правила „трех сигм“ при высокой вероятности безотказной работы (99,87 %). Важно, что назначаются два уровня предела погрешности — для первичной поверки Δ_p и для эксплуатации (для периодических поверок) Δ_s . При этом норма предела погрешности для эксплуатации $\Delta_s = 2\Delta_p$, что учитывает возможный тренд погрешности СИ в период между поверками в допустимых пределах.

Применение методики поверки весов с учетом СКО измерений обусловлено строгими требованиями к условиям проведения первичных поверок, направленных на исключение систематической погрешности. Однако одной из главных задач периодических поверок как раз и является обнаружение таких погрешностей, но в этом случае нарушается основное условие применения правила „трех сигм“ — отсутствие учета систематической погрешности.

Рассматриваемая методика направлена на устранение указанных недостатков, что особенно актуально для приборов контроля безопасности жизнедеятельности. В ее основу положен критерий, условно названный запасом метрологической надежности Z (далее — запас надежности), который был предложен в статье [4]. Этот критерий рассчитывается по следующей формуле:

$$Z = \frac{|\Delta_a| - |\Delta_{cp}|}{\sigma} = \frac{1 - |\Delta_{cp}|/|\Delta_a|}{\sigma/|\Delta_a|} = \frac{1 - \delta_{САП}}{\delta_{СКО}}, \quad (1)$$

он представляет собой квантиль нормального двухпараметрического распределения вероятности не достижения предела погрешности (далее — вероятность β). В редакторе MathCAD вероятность β оценивается оператором (2), а в электронных таблицах EXCEL — оператором НОРМСТРАСП [ячейка с квантилем Z]

$$\beta(Z) = snorm(Z) = snorm\left(\frac{|\Delta_a| - |\Delta_{cp}|}{\sigma}\right). \quad (2)$$

где Δ_{cp} — средняя арифметическая погрешность, которая характеризует систематическую погрешность и в общем случае не равна нулю.

В формулу (1) введены два простых показателя — относительная систематическая, или средняя арифметическая, погрешность $\delta_{САП} = |\Delta_{cp}|/|\Delta_a|$ и относительное случайное или среднее квадратическое отклонение $\delta_{СКО} = \sigma/|\Delta_a|$.

Из формулы (1) видно, что оценка погрешности по правилу „трех сигм“ является частным случаем методики анализа запаса надежности при $\Delta_{cp} = 0$. В общем случае для рассматриваемого СИ должен быть установлен минимально допустимый запас надежности Z_{min} . Вопрос о выборе этого критерия должен решаться поставщиком СИ с учетом класса точности, назначения прибора и опыта применения данной методики. Значение $Z_{min} = 3$ при $\beta = 99,87\%$ соответствует правилу „трех сигм“. Однако не исключено установление других норм, например, $Z_{min} = 2$ при $\beta = 97,77\%$ или $Z_{min} = 1$ при $\beta = 84,10\%$ для учебных или бытовых приборов.

Используя понятие „запас надежности“, можно решать многие проблемы и, в частности, прогнозировать интервалы между поверками или калибровками (МПИ). В настоящей работе основное внимание уделяется алгоритму и программе обоснования МПИ по результатам первичной и периодических поверок конкретного экземпляра СИ. В теории диагностики эта задача соответствует прогнозированию остаточного ресурса объекта. Правомерность постановки

такой задачи вытекает из руководящих принципов Международной организации по законодательной метрологии OIML [2].

В предлагаемом варианте методики по аналогии с правилами поверок весов были введены два уровня предела погрешности — для первичной поверки Δ_p и для эксплуатации $\Delta_3 = 2\Delta_p$. При этом значение базового СКО определяется как $\sigma_0 = \Delta_p / Z_{\min}$. Текущий запас надежности, обычно рассчитываемый относительно Δ_3 , может со временем уменьшаться, но не должен опускаться ниже допустимого уровня Z_{\min} .

Далее представлены программы в редакторах MathCAD и EXCEL, разработанные применительно к периодической системе поверок и калибровок (рис. 1). Следует обратить внимание на содержание операций первичной и каждой периодической поверки. Целью первичной поверки следует считать не только оценку качества исследуемого СИ, но и обоснование исходных (базовых) метрологических характеристик этого прибора при нахождении его в исправном состоянии. В этой связи первичная поверка должна выполняться с высокой тщательностью при соблюдении всех требований к проведению испытаний. Перед первичной поверкой целесообразно выполнять калибровку прибора. Обязательной операцией должно быть многократное измерение погрешности (не менее 15 измерений) с оценкой базовой сигмы σ_0 , верхнего $Z_{\max} = \sigma_0 \Delta_3$ и нижнего Z_{\min} уровней запасов надежности.

Основные задачи периодических поверок заключаются в оценке технического состояния и скорости тренда погрешности при эксплуатации, а также — в принятии решения о калибровке и допуске СИ к дальнейшей работе. Первой и обязательной операцией первичной поверки должно быть многократное измерение погрешности (ИП) и оценка запаса надежности перед выполнением калибровки, которая рассматривается как операция по корректировке показаний СИ. На основании анализа этих измерений и принимается решение о калибровке. Затем СИ калибруется (по необходимости) и выполняются обязательные повторные измерения погрешности с целью выбора одного из следующих вариантов дальнейшего использования прибора: отправка его в ремонт или допуск к эксплуатации до следующей поверки.



Рис. 1

Каждая i -я периодическая поверка перед калибровкой начинается с регистрации постоянных исходных данных: Δ_p , Δ_3 , Z_{\max} , Z_{\min} и σ_0 . К переменным исходным данным относится вектор результатов многократных измерений m (в рассматриваемом примере $m = 25$ циклов, хотя можно использовать и меньшее число циклов, но желательно не менее 5—10). Для этого

вектора автоматически рассчитываются систематическая Δ_{ci} и случайная погрешность σ_i с использованием операторов редактора MathCAD:

$$\Delta_{ci} := \text{mean}(\Delta_i) \text{ и } \sigma_i := \sqrt{\text{Var}(\Delta_i)}. \quad (3)$$

Для расчета σ_i в алгоритм программы включена небольшая подпрограмма для защиты от появления чрезмерно малых значений СКО (вплоть до нуля):

$$\sigma_i = \text{if} \left(\sigma_i \leq \frac{\Delta_{\beta}}{Z_{\beta}}, \frac{\Delta_{\beta}}{Z_{\beta}}, \sigma_i \right). \quad (4)$$

Условие (4) позволяет выявлять систематические погрешности даже при СКО=0 путем замены $Z \rightarrow \infty$ на $Z=12$, когда $\beta = 0,999\ 999\ 999 \dots \rightarrow 1$!!

В предлагаемом варианте программы для каждой i -й поверки предусмотрен расчет следующих метрологических показателей: фактический запас надежности Z_i , тренд погрешности относительно предыдущей поверки M_i , скорость деградации тренда V_i и прогнозируемый запас надежности Z_{i+1} при последующей $(i + 1)$ -й поверке

$$Z_i = \frac{|\Delta_a| - |\Delta_{cpi}|}{\sigma_i}, \quad (5)$$

$$M_i = |Z_{i-1} - Z_i|, \quad (6)$$

$$V_i = M_i / T_i, \quad (7)$$

$$Z_{i+1} = Z_i - T_k V_i. \quad (8)$$

Для решения вопроса о необходимости выполнения калибровки значение Z_{i+1} следует сравнить с допустимым пределом погрешности Z_{\min} . Калибровка должна выполняться в случае, если $Z_{i+1} \leq Z_{\min}$. После выполнения калибровки все расчеты по формулам (5)—(8) рекомендуется повторить. Тогда СИ допускается к эксплуатации при условии $Z_{i+1} \geq Z_{\min}$. Этот вопрос можно решить и по-иному — путем расчета остаточного ресурса $T_{\text{ост}}$

$$T_{\text{ост}} = \begin{cases} (Z_i - Z_{\min}) / V_i, & \text{если } V_i \neq 0, \\ 2T_k, & \text{если } V_i = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Если $T_{\text{ост}} \geq T_k$, то СИ допускается к работе в течение следующего МПИ. В противном случае СИ надо отправить в ремонт либо разрешить работу при меньшей, но согласованной величине Z_{\min} .

Результаты всех поверок рекомендуется регистрировать в специальном паспорте СИ на листе электронной таблицы EXCEL (рис. 2, а), который одновременно является рабочей программой для расчета рассмотренных показателей. В ячейках рабочего листа EXCEL фиксируются не только исходные данные и результаты расчета, но и выполняются логические операции для автоматических заключений об исправности и остаточном ресурсе СИ (см. рис. 2, б). По результатам поверок в таком паспорте можно формировать тренд деградации и прогнозировать фактический срок службы СИ до ремонта или списания. В данном примере (см. рис. 2, а) после трех лет эксплуатации СИ было направлено в ремонт.

Каждый тип СИ имеет свои особенности накопления систематических погрешностей. Для некоторых СИ (например, часов) это вообще неактуально, поскольку для них разработаны системы обеспечения качества продукции. Возможно, у некоторых СИ скорость тренда будет столь малой, что поверки не выявят необходимости калибровки в течение многих лет.

В других случаях, наоборот, потребуется корректировка МПИ с учетом влияния условий работы на тренд погрешности [6]. Для таких СИ может быть разработана программа ускоренных или полевых испытаний.

а)

Год пост	2006	Эталон	480	Доп ЗМН	3		
ПДПЭ	48	ПДПП	24	ВНДП	0.99865	НМПИ	1

Проверка первич №	0	Дата	12.05.2014	МПИ, лет	1.00		
Этап	m	СКП	СиП	ЗМН	Тренд 1	Прогноз	Вывод
До калибр	25	8	0	6.00	0.00	6	Исправен
После кал	25	8	0	6.00	0.00	6	Исправен
Скорость	0.000	Ост. Рес	2.000	Решение	МПИ, лет	1	

Проверка период №	1	Дата	12.05.2011	МПИ, лет	0.80		
Этап	m	СКП	СиП	ЗМН	Тренд 1	Прогноз	Вывод
До калибр	25	8	15.2	4.10	1.90	1.725	калибровка
После кал	25	8.1	-1.2	5.78	1.90	3.40	Исправен
Скорость	2.375	Ост. Рес	1.170	Решение	МПИ, лет	1	

Проверка период №	2	Дата	12.05.2012	МПИ, лет	1.10		
Этап	m	СКП	СиП	ЗМН	Тренд 1	Прогноз	Вывод
До калибр	25	8	18	3.75	2.03	1.907	калибровка
После кал	25	8.1	2	5.68	2.03	3.836	Исправен
Скорость	1.843	Ост. Рес	1.453	Решение	МПИ, лет	1	

Проверка период №	3	Дата	12.05.2013	МПИ, лет	1.00		
Этап	m	СКП	СиП	ЗМН	Тренд 1	Прогноз	Вывод
До калибр	25	9	20	3.11	2.57	0.543	калибровка
После кал	25	9	2	5.11	2.57	2.543	Ремонт
Скорость	2.568	Ост. Рес	0.822	Решение	МПИ, лет	Ремонт	

После ремонта

Проверка период №	4	Дата	12.05.2014	МПИ, лет	1.00		
Этап	m	СКП	СиП	ЗМН	Тренд 1	Прогноз	Вывод
До калибр	25	8	0	6.00	0.00	6	Исправен
После кал	25	8	0	6.00	0.00	6	Исправен
Скорость	0.000	Ост. Рес	2.000	Решение	МПИ, лет	1	

б)

```
=ЕСЛИ(J23<$I$6;"калибровка";"Исправен")
=ЕСЛИ(J24<$I$6;"Ремонт";"Исправен")
=ЕСЛИ(E31=0;2;(H30-$I$6)/E31)
```

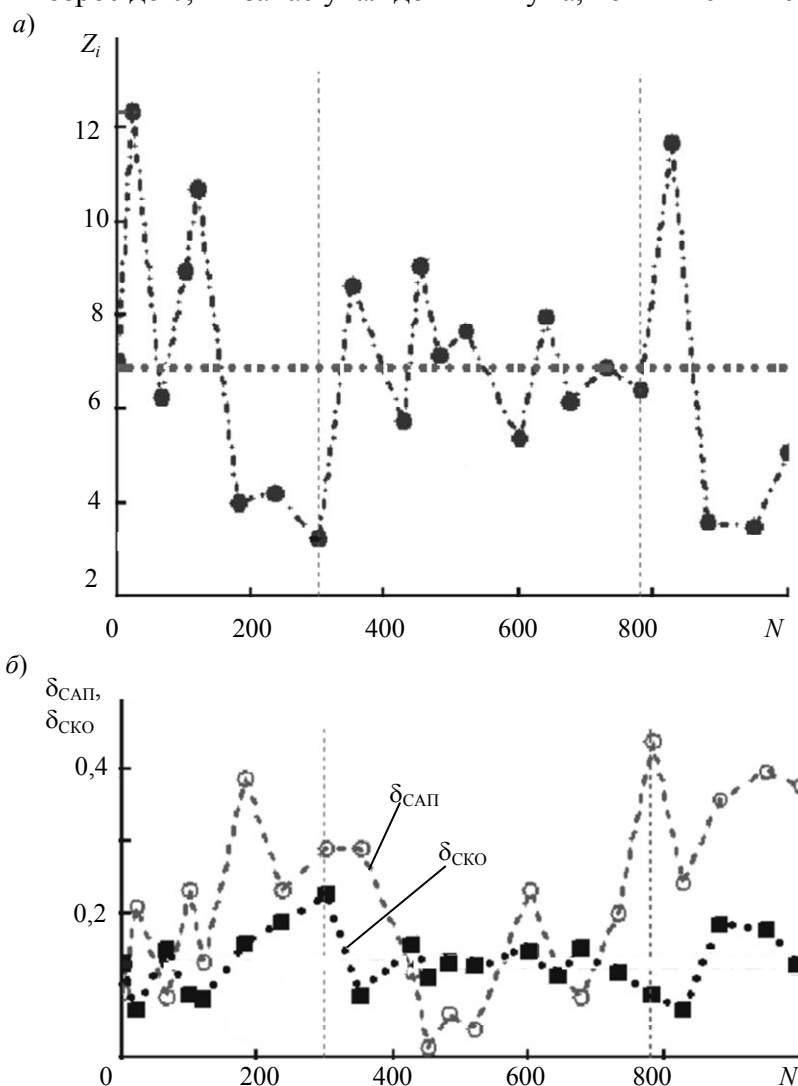
Рис. 2

Корректность и эффективность предлагаемой методики подтверждаются обработкой с ее помощью достоверной информации о трехлетних испытаниях пяти образцов приборов, имеющих предел погрешности, равный 0,1. На рис. 3, а приведен статистический график запаса надежности прибора, рассчитанного по формуле (5). Важно отметить, что этот показатель за все время испытаний N (1000 суток) находился в диапазоне значений от 12,3 до 3,17. Среднее и наиболее вероятное значение составило 6,7 (пунктир), что выше допустимого значения $Z \geq 6$ при эксплуатации и минимально допустимом запасе надежности $Z_{\min} = 3$.

На рис. 3, а видны два этапа испытаний прибора. За первый год (до 300 суток) наблюдается четкий тренд снижения Z от 12 до 3,17. После калибровки или ремонта через 350 суток работы запас надежности поднялся до 8 и затем в течение полутора лет (530 суток) находился на высоком уровне — от 6 до 12. После 880 суток запас надежности опять упал до 3,2.

Для объяснения трендов деградации этого показателя на рис. 3, б приведены графики для относительных значений $\delta_{САП}$ и $\delta_{СКО}$. Видно, что запас надежности зависит от изменения как случайной, так и систематической погрешности, что дает основание для вывода об универсальности методики расчета запаса надежности и ее преимуществах по сравнению с частным случаем — способом оценки погрешности по правилу „трех сигм“.

В данном примере снижение запаса надежности от 12 до 3,17 в первые 300 суток объясняется повышением $\delta_{САП}$ от 0,1 до 0,4 и $\delta_{СКО}$ от 0,08 до 0,22. При дальнейшей эксплуатации значение Z находилось в допустимых пределах. В конце испытаний модуль систематической погрешности вновь возрос до 0,4 и запас упал до минимума, хотя и не ниже 3.



Рассмотренная методика позволяет объективно оценивать запас надежности СИ вне зависимости от знака погрешности и ее предела (плюс или минус) поскольку в формулах (1) и (5) применяются их модули. Для того чтобы иметь представление о поведении погрешности за весь период наблюдения с учетом знака погрешности, можно выполнить общий корреляционный анализ его тренда по методике [3].

Полученная нами информация о поверках реального прибора снимает возможные сомнения о корректности и эффективности предложенного метода. Тем не менее в заключение представляется целесообразным еще раз подчеркнуть некоторые ее принципиальные положения. Прежде всего отметим, что предназначение методики заключается в обеспечении высокой надежности СИ, а не в оценке точности измерений, что актуально для совсем других задач метрологии по сличению эталонов. В ГОСТ 8.207-76 [5] указано, что „За результат измерения принимают среднее арифметическое результатов наблюдений, в которые предварительно введены поправки для исключения систематических погрешностей“. С математической точки зрения такое положение вполне корректно, но оно не относится к решению рассматриваемой проблемы, поскольку нами определяется среднее значение не измеряемой

величины, а самой погрешности относительно эталона, который при поверках характеризует истинную величину измеряемого признака. В методике за основную метрологическую характеристику случайной погрешности принимается σ в знаменателе формул (1) и (5), а не средняя квадратическая ошибка $\sigma_{\text{ср}}$, которая относится к задаче оценки доверительных границ диапазона, накрывающего среднюю величину

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}.$$

Правомерность применения в методике нормального распределения подтверждается не только классическим правилом „трех сигм“, но и неоднократной проверкой согласия теоретического и эмпирического распределения вероятностей при очень больших выборках (объемом более 500 циклов), тем более что погрешности являются относительно малыми величинами по сравнению с измеряемым признаком. Теоретически СИ могут иметь $\sigma \rightarrow 0$, что позволяет сокращать число циклов измерений. Но даже в таких случаях поправка, определяемая по формуле (4), позволяет достоверно оценивать тренд деградации запаса метрологической надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межгосударственный стандарт ГОСТ 24104-2001. Весы лабораторные. Общие технические требования [Электронный ресурс]: <<http://www.complexdoc.ru/lib/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%2024104-2001>>.
2. OIML D10. Guidelines for the Determination of Recalibration Intervals of Measuring Equipment Used in Testing Laboratories. International Organization of Legal Metrology [Electronic resource]: <www.ilac.org/documents/ILAC_G24_2007.pdf>.
3. Ефремов Л. В. Моделирование трендов погрешности диагностических приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 2. С. 38—43.
4. Ефремов Л. В. Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 52—54.
5. ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения [Электронный ресурс]: <<http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=160916>>.
6. Мольков В. Ф. Межповерочный интервал приборов учета энергоресурсов — показатель региональный // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. 2004. Вып. 4.

Сведения об авторе

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

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
21.06.10 г.