

---

---

# ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

---

---

УДК 921.01

Л. В. ЕФРЕМОВ, Ж. В. КУМОВА

## МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МЕРИТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА УЧЕБНОГО И НАУЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

На примере проверки технического состояния ряда мерительных инструментов, используемых в учебной и научной работе, демонстрируется эффективность нового критерия „запас метрологической надежности“. Приводятся рекомендации по совершенствованию методов обучения правилам измерений при освоении новых приборов.

*Ключевые слова:* вероятность, метрологическая надежность, погрешность, прибор, человеческий фактор.

В последнее время в приборостроении получает распространение методика оценивания исправности средств измерений, основанная на критерии, названном запасом метрологической надежности [1—3]. Этот критерий представляет собой квантиль двухпараметрического нормального распределения  $Z$  вероятности  $\beta$  недостижения предела погрешности  $h_a$  с учетом в общем случае изменения как систематической  $h_c$ , так и случайной  $\sigma_{сл}$  погрешностей прибора:

$$Z = \frac{h_a - h_c}{\sigma_{сл}} \Rightarrow \beta = \text{snorm}(Z), \quad (1)$$

где  $\text{snorm}$  — оператор в программе MathCad.

В настоящей статье представлены новые результаты метрологических исследований, проводимых на кафедре технологии металлов и судоремонта Мурманского государственного технического университета и направленных на совершенствование учебного процесса и научной деятельности университетских кафедр технологического профиля. Приведены примеры решения ряда задач, связанных с оценкой влияния различных факторов на достоверность измерений линейных размеров такими инструментами, как штангенциркули, микрометры, нутромеры и др., с регистрацией результатов по нониусу, электронному дисплею или индикаторной круговой шкале. Выбор для исследования этих относительно простых средств измерений обусловлен с тем, что величина их случайной погрешности, как правило, мала по сравнению с другими более сложными приборами. Поэтому на примере таких средств измерений было проще решать рассматриваемые задачи.

Постоянными исходными данными для решения задач являются паспортные характеристики средств измерений, включая предел погрешности  $h_a$  для заданного размера эталона  $H_a$  (концевой меры длины или опорного размера). Переменные исходные данные (результаты измерений) оформляются в редакторе EXCEL в виде матрицы выборки погрешности измерений  $h_i = H_i - H_a$  объемом  $N = 25$ , где  $H_i$  — измеряемый размер. Затем осуществляется перенос вектора погрешности  $h_i$  в редактор MathCad, где вычисляются запас метрологической надеж-

ности  $Z$  и вероятность  $\beta$  по формуле (1), а также систематическая  $h_c$  и случайная (средняя квадратическая)  $\sigma_{сл}$  погрешности по следующим формулам:

$$h_c = |h_{cp}|, \quad h_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N}, \quad \sigma_{сл} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - h_{cp})^2}{N-1}}. \quad (2)$$

Расчеты по формуле (1) выполнялись в двух вариантах. Кроме основного расчета с учетом систематической погрешности, проводился расчет при  $h_c = 0$  для исправленной выборки измерений.

Запас метрологической надежности является основным критерием оценки качества измерений, его допустимые значения  $Z_d$  могут составлять 1,5 ( $\beta = 0,93319$ ), 2 ( $\beta = 0,97725$ ), 3 ( $\beta = 0,99865$ ) или 6 ( $\beta = 1$ ) в зависимости от постановки задачи и назначения средства измерений (подробнее — см. работу [1]). Кроме того, алгоритмы расчета содержат построение графиков распределений вероятностей, „ящиков с усами“ и итоговых таблиц.

Рассмотрим примеры решения некоторых задач.

**Первая задача.** *О влиянии человеческого фактора на достоверность поверки измерительного прибора.* Для решения этой задачи был выбран штангенциркуль ШЦ-I-200-0,02 с пределом погрешности 0,02 мм. Измерения выполнялись тремя операторами — условно, студентами Дмитрием, Ильей и Сергеем, которые не имели специального опыта (I этап измерений). Испытывались концевые меры (эталон)  $H_a = 30, 45$  и 50 мм. Результаты расчета исследуемых показателей для  $H_a = 30$  мм при разнице (размахе) между максимальным и минимальным членами выборки, составляющей 0,04, приведены в табл. 1, где  $Z_1$  и  $Z_2$  — запасы метрологической надежности с учетом и без учета систематической погрешности,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — вероятности, соответствующие  $Z_1$  и  $Z_2$ .

Таблица 1

Исполнитель		$H_a$ , мм	$h_c$ , мм	$\sigma_{сл}$ , мм	$h_a$ , мм	$Z_1$	$\beta_1$	$Z_2$	$\beta_2$
Дмитрий	I этап	30	0,0264	0,0099	0,02	-0,643	0,26	2,0101	0,9778
Илья		30	0,0144	0,0169	0,02	0,332	0,6302	1,1868	0,8823
Сергей		30	0,0132	0,0141	0,02	0,484	0,6857	1,4225	0,9226
Группа		30	0,018	0,015	0,02	0,134	0,553	1,335	0,909
Дмитрий	II этап	30	0,0264	0,013	0,08	4,02	1	6	1
Илья		30	0,0144	0,017	0,08	3,893	1	4,747	1
Сергей		30	0,0132	0,014	0,08	4,751	1	5,69	1

Анализ таблицы подтверждает существенное влияние человеческого фактора на достоверность проверки. При выполнении одинаковых замеров одного и того же эталона одним и тем же инструментом, но разными людьми были получены разные результаты расчета при недопустимо низком значении  $Z_1$  и соответствующей ему вероятности  $\beta_1$  недостижения предела погрешности. Исключение систематической погрешности позволило несколько увеличить эти показатели, но они все равно оказались ниже нормы. Причина ошибочности измерений объясняется известной субъективностью прочтения точных результатов по нониусу, разной силой сближения губок штангенциркуля, неопытностью их установки к поверхности эталона и другими субъективными факторами.






Для окончательного определения степени влияния человеческого фактора на достоверность измерений этими же студентами после обучения были повторены измерения с помощью штангенциркуля ШЦ-III-160-0,05 с пределом погрешности 0,05. Обучение дало разные результаты: так, Дмитрий лучше всех освоил измерения, получив высокое значение  $Z$  (более 4) за счет малой систематической и случайной погрешностей.

**Вторая задача.** *О влиянии конструкции мерительного инструмента на достоверность поверки по концевым мерам.* Эта задача решалась путем выполнения измерений одних и тех

же опорных размеров (концевой меры или детали) разными инструментами, но одним и тем же оператором. Примеры расчета метрологических характеристик пяти вариантов приборов приведены в табл. 2.

Для штангенциркулей с отсчетом показаний по нониусу получены высокие значения  $Z_1$  и  $Z_2$  (от 4 до 6) вследствие малых значений  $h_c$  и  $\sigma_{сл}$  относительно умеренных требований к  $h_a$  (0,05...0,08). Высокая надежность этих инструментов позволяет использовать их не только в ходе учебного процесса и научных работ, но и на производстве при техническом контроле деталей с соответствующими качествами.

Таблица 2

Прибор	Марка	$H_a$ , мм	$h_a$ , мм	$h_c$ , мм	$\sigma_{сл}$ , мм	Размах	$Z_1$	$Z_2$
 Штангенциркуль с нониусом	ШЦ-III-160-0,05	40	0,05	0,004	0,011	0,05	4,167	4,49
	ШЦ-II-250-0,1	30	0,08	-0,002	0,013	0,01	5,88	6
 Штангенциркуль цифровой	ШЦЦ-I-150	30	0,03	-0,016	0,038	0,11	0,382	0,797
 Микрометр гладкий	МК 50-1	30	0,004	0,001	0,003	0,01	1,156	1,445
		40	0,004	0	0,001	0	6	6
 Микрометр цифровой	МКЦ 50	30	0,002	0,001	0,001	0,003	1,17	2,25
 Микрометр рычажный	МР-50-1	30	0,002	-0,0055	0,001	0,004	-3,463	1,99

Более осторожные выводы можно сделать относительно метрологической надежности штангенциркуля ШЦЦ -I-150 с цифровым дисплеем. Для него получены совершенно недопустимые значения  $Z_1 = 0,382$  ( $\beta_1=0,649$ ) и  $Z_2 = 0,797$  ( $\beta_2=0,787$ ), что связано с большим значением  $\sigma_{сл} = 0,038$  мм. При этом был выявлен необычный характер изменения погрешности  $h_i$  (рис. 1): из 25 измерений в четырех случаях значение отклонилось от нуля на очень большую величину — 0,1 мм! По-видимому, это явление связано со сбоем передачи сигнала при перемещении каретки на цифровой дисплей.

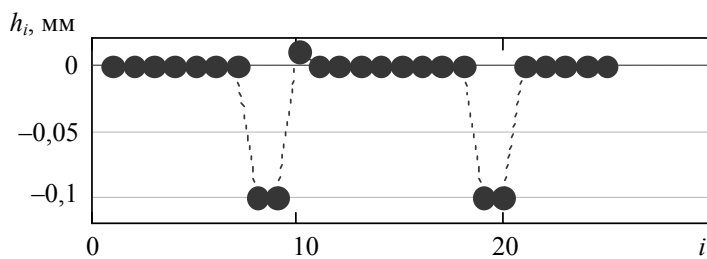


Рис. 1

Такое резкое, хотя и редкое отклонение погрешности от нуля можно назвать „выбросами“, которые следует отсеивать специальными методами [1] при многократных измерениях.

Метрологическую надежность микрометров в целом можно оценить как достаточно хорошую, учитывая жесткие требования к их пределам погрешности (от 0,002 до 0,004 мм). Наиболее надежным оказался простейший микрометр с нониусом, для которого получено  $\sigma_{сл} = 0$  и наивысшее значение  $Z = 6$ . Микрометр с электронным дисплеем и рычажный микрометр со



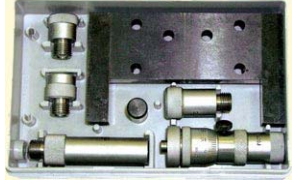

стрелочным индикатором имеют небольшую систематическую и случайную погрешности (0,001 мм), что обеспечивает допустимое значение  $Z = 2$ .

**Третья задача.** *О влиянии конструкции мерительного инструмента на достоверность измерения диаметра отверстия.* Объектом исследования в этой задаче были специально изготовленные детали с отверстиями диаметром 27, 45 и 80 мм при  $R_a = 6,3$  мкм. Цель работы заключалась в отработке методики измерений диаметров отверстий и выборе более точного типа прибора для внутренних измерений.

Исследования были разбиты на два этапа. На первом предварительном этапе операторы выполняли измерения диаметров цифровым штангенциркулем и индикаторным нутромером без четких указаний по выбору точек и направлений измерений. Были получены очень низкие показатели метрологической надежности цифрового штангенциркуля ШЦЦ-I-150 (например  $Z_2 = 0,44$  при диаметре 80 мм) из-за большого рассеяния ( $\sigma_{сл} = 0,068$  мм и размах 0,3) при относительно малом  $h_c = 0,05$  мм. Такой результат объясняется двумя причинами — указанной выше особенностью передачи сигнала на дисплей и случайным выбором точек замера по окружности отверстия. Несколько лучшие характеристики получены для нутромера НИ-20-200. В этом случае наблюдается относительно малая случайная погрешность ( $\sigma_{сл} = 0,005$  мм), но очень большая положительная систематическая погрешность ( $h_c = +0,206$  мм), что привело к снижению  $Z_1$ .

Перед вторым этапом работы была выполнена более тщательная подготовка к испытаниям путем четкой разметки точек и направлений измерений отверстия. Применялись приборы четырех типов (табл. 3) при одинаковой позиции измерений детали.

Таблица 3

Прибор	Марка	$H_a$ , мм	$h_a$ , мм	$h_c$ , мм	$\sigma_{сл}$ , мм	Размах	$Z_1$	$Z_2$
 Штангенциркуль цифровой	ШЦЦ-I-150	80	0,03	-0,007	0,014	0,05	1,689	2,208
 Штангенциркуль с нониусом	ШЦ-I-130	80	0,07	0	0,012	0	6	6
 Нутромер метрический	НМ-75-600	80	0,015	0,026	0,02	0,07	-0,535	0,738
 Нутромер индикаторный	НИ-20-200	80	0,015	0,042	0,004	0,01	-6,256	3,431

Результаты исследований, показанные в табл. 3 и на рис. 2, позволяют сделать однозначный вывод о более высокой метрологической надежности простого штангенциркуля с нониусом, имеющего наивысшее значение  $Z = 6$ , так как  $h_c = 0$  и  $\sigma_{сл}$  мала. Для электронного штангенциркуля ШЦЦ-I-150 получены удовлетворительные результаты по сравнению с предварительными измерениями ( $Z \approx 2$  при  $h_a = 0,03$  мм). Наименее надежным ( $Z_2 = 0,738$ ) оказался метрический нутромер из-за повышенного значения  $\sigma_{сл} = 0,02$  мм, что объясняется суще-

ственным влиянием случайных факторов при установке положения элементов при измерениях. Индикаторный нутромер имеет более высокую надежность ( $Z_2 = 3,43$ ) по причине меньшего рассеяния погрешности ( $\sigma_{сл} = 0,004$  мм).

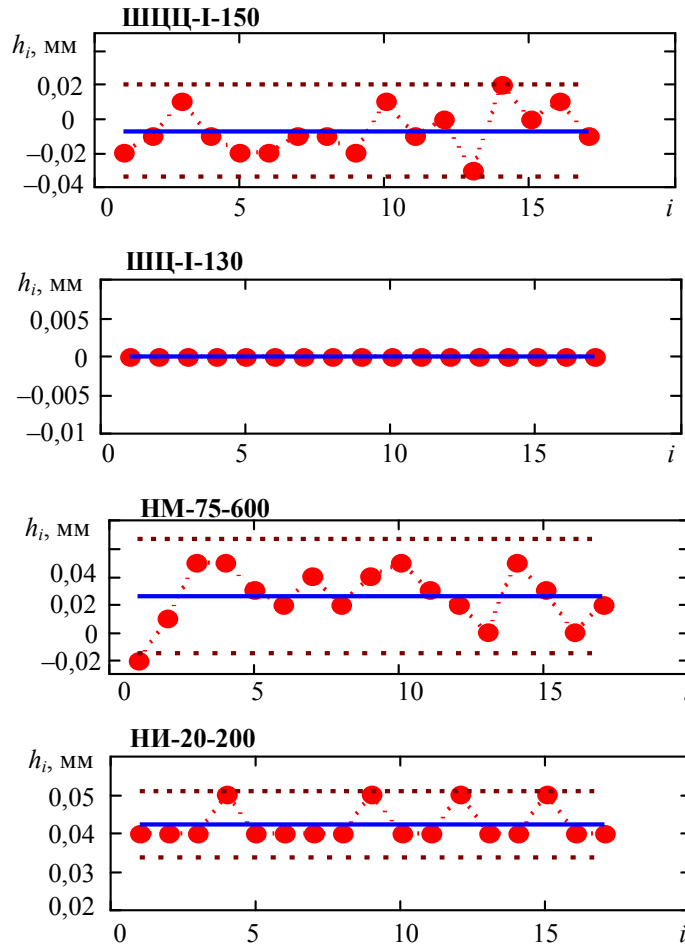


Рис. 2

Интересно отметить, что во всех случаях были выявлены заметные положительные систематические погрешности нутромеров (0,04...0,25 при  $h_a = 0,015$  мм), тогда как при измерениях того же объекта внешними губками штангенциркулей этот показатель был близок к нулю. Можно предположить, что положительное значение систематической погрешности нутромеров обусловлено созданием распорного усилия и тугой посадкой измерительной системы. Измерение внешними губками штангенциркулей сопровождается скользящей посадкой, что обеспечивает снижение этой погрешности до минимума.

**Четвертая задача.** *О влиянии нормирования предела погрешности на достоверность проверок и измерений.* Анализ формулы (1) и приведенные выше результаты исследований позволяют сделать вывод о существенном влиянии на метрологическую надежность средств измерения нормы предела погрешности, установленной поставщиком. С другой стороны, при обмерах конкретных деталей величина  $h_a$  может корректироваться в зависимости от требуемого качества. Зачастую можно применить менее жесткие требования к пределу погрешности в зависимости от назначения деталей. Например, если при решении первой задачи значение  $h_a = 0,02$  мм было бы увеличено до 0,08 мм, то даже неопытными студентами были бы получены приемлемые показатели измерений (см. табл. 1, II этап: грубые измерения „уложились“ в более грубый допуск погрешности).

Для корректировки предела погрешности можно применить формулу  $h_a = Z_d \sigma_{сл}$ , частным случаем которой является правило „трех сигм“. Например, для инструментов учебного назначения можно принять  $Z_d = 2$  (согласно теории неопределенностей), а для средств изме-

рения научного назначения  $Z_d = 3$ . Так, при  $\sigma_{сл} = 0,013$  мм в первой задаче можно было для применения инструментов в научной работе принять  $h_a = 0,04$  мм после устранения систематической погрешности.

**Пятая задача.** *О разработке методики освоения новых средств измерений.* Приведенные в настоящей статье результаты метрологических исследований не имеют своей целью заменить существующие правила поверки средств измерений геометрических размеров. Однако представленные примеры решения задач показывают актуальность организации на технологических кафедрах вузов предварительных многократных измерений для оценки запаса метрологической надежности новых приборов в целях выявления и устранения систематических и случайных погрешностей. В частности, в методике обучения особое внимание следует уделить приборам, которые имеют случайные „выбросы“ погрешностей внутреннего происхождения или систематические погрешности из-за несовершенства технологии установки измерительных датчиков (например, у нутромеров). Объективным критерием качества средств измерений в процессе обучения должен быть принят запас метрологической надежности, определяемый по алгоритмам работы [4].

#### 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.* Моделирование трендов погрешности диагностических приборов // там же. 2010. Т. 53, № 2. С. 38—43.
3. *Ефремов Л. В.* Оценка интервалов между калибровками с учетом запаса метрологической надежности средств измерений // Там же. 2010. Т. 53, № 12. С. 34—40.
4. *Ефремов Л. В.* Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: алгоритмы и программы. СПб: Нестор-История, 2011. 200 с.

#### *Сведения об авторах*

- Леонид Владимирович Ефремов** — д-р техн. наук, профессор; Мурманский государственный технический университет, кафедра технологии металлов и судоремонта; E-mail: levleft@mail.ru
- Жанна Викторовна Кумова** — аспирантка; Мурманский государственный технический университет, кафедра технологии металлов и судоремонта; E-mail: zhannakmv@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
18.07.12 г.