

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ОДНОТИПНЫХ ПРИБОРОВ ОТ ВРЕМЕНИ НАХОЖДЕНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

* Конопелько Л.А., *Фатина О.В., **Ефремов Л.В.

* ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева,

** Учреждение РАН «ИПМаш РАН», Санкт-Петербург

В соответствии с Федеральным законом [6] интервал между поверками (МПИ) средства измерения (СИ) может быть изменен только федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в области обеспечения единства измерений. Такие требования создают известные проблемы при эксплуатации приборов ввиду отсутствия права корректировки МПИ по результатам периодических проверок. Актуальность этих проблем убедительно показана в статье Нижегородского центра стандартизации, метрологии и сертификации [5], где рассмотрены статистические данные за 2001...2003 год о поверке более 5 тысяч счетчиков воды с пятилетним сроком МПИ. Установлено, что после двух лет эксплуатации погрешность превышала допускаемые пределы у 52% приборов. Аналогичная картина выявлена и для других приборов контроля расхода энергоресурсов. Это значит, что по причине неправильно установленного МПИ потребители вынуждены вносить плату за фиктивный расход воды, газа и тепла. На этом основании предложено дать право метрологическим службам корректировать МПИ исходя из условий и специфики применения СИ и при наличии документально подтвержденных статистических данных.

Для решения поставленной задачи необходимо совершенствовать порядок и методы пересмотра интервалов времени между подтверждениями исправности СИ в соответствии с требованиями международных стандартов [4], которые предусматривают контроль дрейфа систематической погрешности СИ при эксплуатации.

Настоящий доклад направлен на подтверждение актуальности и эффективности новой методики решения указанной проблемы. Доклад содержит результаты сравнительного анализа исправности девяти одноптипных приборов с датчиками химического принципа действия. Расчеты выполнены в математическом редакторе MathCAD по методике, основанной на понятии о так называемом запасе метрологической надежности (ЗМН) [1]. Исходной информацией для анализа послужили протоколы реальных измерений погрешности этих приборов при периодической поверке [3]. До момента поверки указанные приборы имели различную продолжительность использования от 2.5 до 6 лет. Это позволяет изучить вопрос о влиянии возраста СИ на его надежность. Поверки проводилась опытными специалистами в специализированной лаборатории, что гарантирует достоверность измерений.

В основу примененной методики оценки исправности СИ положены следующие принципы организации периодических проверок. Поскольку целью анализа является контроль дрейфа ЗМН из-за накопления систематической погрешности, то допустимо ограничиться трех-пяти разовым измерением погрешности с приближенной оценкой СКО с учетом величины, полученной при более тщательно проведенной первичной поверке. Второй особенностью предлагаемой системы является обязательный входной контроль исправности СИ при его поступлении на периодическую поверку (калибровку) до юстировки с повторной поверкой (калибровкой) после юстировки. Только в таком случае имеется возможность оценить скорость деградации ЗМН и рассчитать остаточный ресурс.

МИ-7. Контроль и прогнозирование исправности ряда однотипных приборов

Постоянные исходные данные

Объект исследования -9 Эталон - условный,
 Предел погрешность, отн

$a := 0.48$
 $j := 1..9$
 $h := 0.1$

Допустимые уровни ЗМН

Верхний $Z_v := 6$

Базовый

$Z_d := 2$

Допустимая ВНДП $P_d := \text{snorm}(Z_d)$

$P_d = 0.9772$

Настройка СКО

$K_s := 2$

Переменные исходные данные

$$\begin{aligned}
 x_{1,1} &:= \begin{pmatrix} 0.36 \\ 0.37 \\ 0.36 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 x_{2,1} &:= \begin{pmatrix} 0.46 \\ 0.47 \\ 0.45 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 x_{3,1} &:= \begin{pmatrix} 0.23 \\ 0.23 \\ 0.23 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 x_{4,1} &:= \begin{pmatrix} 0.47 \\ 0.46 \\ 0.48 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} \\
 x_{5,1} &:= \begin{pmatrix} 0.40 \\ 0.39 \\ 0.40 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 x_{6,1} &:= \begin{pmatrix} 0.44 \\ 0.44 \\ 0.44 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 x_{7,1} &:= \begin{pmatrix} 0.48 \\ 0.46 \\ 0.48 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 x_{8,1} &:= \begin{pmatrix} 0.46 \\ 0.45 \\ 0.46 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 x_{9,1} &:= \begin{pmatrix} 0.41 \\ 0.42 \\ 0.43 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} \\
 xx_{1,1} &:= \begin{pmatrix} 0.46 \\ 0.44 \\ 0.45 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 xx_{2,1} &:= \begin{pmatrix} 0.46 \\ 0.46 \\ 0.47 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 xx_{3,1} &:= \begin{pmatrix} 0.47 \\ 0.45 \\ 0.45 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 xx_{4,1} &:= \begin{pmatrix} 0.47 \\ 0.46 \\ 0.47 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a} &
 xx_{5,1} &:= \begin{pmatrix} 0.43 \\ 0.48 \\ 0.48 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{a}
 \end{aligned}$$

Таблица исходных данных

$$IZ := \text{augment}(x_{1,1}, x_{2,1}, x_{3,1}, x_{4,1}, x_{5,1}, x_{6,1}, x_{7,1}, x_{8,1}, x_{9,1}) - 1$$

$$CX := \begin{pmatrix} 5 & 2.5 & 6 & 2.5 & 3.5 & 2.5 & 2.5 & 2.5 & 3 \\ 101.2 & 58.2 & 99.2 & 40.2 & 158.2 & 251 & 11 & 62 & 502 \end{pmatrix}$$

$$ТАВ := \begin{pmatrix} \text{"СрСл"} \\ \text{"Циклы"} \\ \text{"№1"} \\ \text{"№2"} \\ \text{"№3"} \end{pmatrix}$$

$$ТА := \text{stack}(CX, IZ)$$

$$ТАБЛ := \text{augment}(ТАВ, ТА)$$

Исходные погрешности (относительные)

$$IZ = \begin{pmatrix} -0.25 & -0.042 & -0.521 & -0.021 & -0.167 & -0.083 & 0 & -0.042 & -0.146 \\ -0.229 & -0.021 & -0.521 & -0.042 & -0.187 & -0.083 & -0.042 & -0.062 & -0.125 \\ -0.25 & -0.062 & -0.521 & 0 & -0.167 & -0.083 & 0 & -0.042 & -0.104 \end{pmatrix}$$

Общая таблица

ТАБЛ =

"СрСл"	5	2.5	6	2.5	3.5	2.5	2.5	2.5	3
"Циклы"	202	116	198	80	316	251	11	62	502
"№1"	-0.25	-0.042	-0.521	-0.021	-0.167	-0.083	0	-0.042	-0.146
"№2"	-0.229	-0.021	-0.521	-0.042	-0.187	-0.083	-0.042	-0.062	-0.125
"№3"	-0.25	-0.062	-0.521	0	-0.167	-0.083	0	-0.042	-0.104

Требуемый МПИ	$Tr^T = (6 \ 6 \ 6 \ 6 \ 6 \ 12 \ 12 \ 12 \ 12)$		
Фактический МПИ	$Tf^T = (6 \ 6 \ 6 \ 6 \ 6 \ 12 \ 12 \ 12 \ 12)$		
Основные формулы			
Систематическая погрешность	$ss_{j,1} := \text{mean}(IZ_j^{\langle j \rangle})$		
СКО	$ss_{j,2} := \sqrt{\text{Var}(IZ_j^{\langle j \rangle})}$ $ss_{j,2} := \text{if} \left(ss_{j,2} \leq 0, \frac{h}{Ks \cdot Z_v}, ss_{j,2} \right)$ или $ss_{j,2} := \frac{h}{Ks \cdot Z_v}$		
Исходный ЗМН в предыдущей поверке в данной поверке после юстировки	$ss_{j,3} := \frac{h}{ss_{j,2}}$		
ЗМН и ВНДПП в данной поверке	$ss_{j,4} := \frac{ h - ss_{j,1} }{ss_{j,2}}$ $ss_{j,5} := \text{cnorm}(ss_{j,4})$		
Фактический МПИ	$ss_{j,7} := Tf_j$		
Скорость тренда ЗМН	$ss_{j,6} := \frac{\text{if} \left[(ss_{j,3} - ss_{j,4}) \leq 0, 0, 0,01 \cdot Tp_j, ss_{j,3} - ss_{j,4} \right]}{ss_{j,7}}$		
Прогнозируемый ЗМН	$ss_{j,8} := ss_{j,3} - ss_{j,6} \cdot ss_{j,7}$ ВНДПП $\tau_j := \text{cnorm}(ss_{j,8})$		
$ss_{j,8} := \text{if} \left(\frac{ss_{j,8}}{Z_d} \leq 0, 0, \frac{ss_{j,8}}{Z_d} \right)$	Относительный ЗМН (не выводится)		
Коррект := <table border="1" data-bbox="419 1205 619 1301"><tr><td>Да</td></tr><tr><td>Нет</td></tr></table>	Да	Нет	$Z_j := \begin{cases} ss_{j,3} & \text{if Коррект} = 1 \\ ss_{j,4} & \text{otherwise} \end{cases}$
Да			
Нет			
Относительный остаточный ресурс (относительно нормативного МПИ)			
$ss_{j,9} := \frac{1}{Tp_j} \cdot \text{if} \left(\frac{Z_j - Z_d}{ss_{j,6}} \leq 0, 0, \text{if} \left(\frac{Z_j - Z_d}{ss_{j,6}} \geq 2 \cdot Tp_j, 2 \cdot Tp_j, 1,05 \cdot \frac{Z_j - Z_d}{ss_{j,6}} \right) \right)$			
Остаточный ресурс (Не выводится)	$ss_{j,9} := Tp_j \cdot ss_{j,9}$		

Фрагмент 2

Таким образом, в качестве основного критерия в расчетах использован не только ЗМН, но и остаточный ресурс, определяемый с учетом скорости деградации погрешности прибора [2]. Примеры расчета в редакторе **MathCAD** приведены на фрагментах 1...3 программ. При этом, обозначения на фрагментах не совпадают с обозначениями величин в тексте доклада, что не имеет принципиального значения для опытных программистов в этой среде программирования.

На фрагменте 1 приведены постоянные и переменные исходные данные для оценки метрологической надежности всех девяти приборов. В частности к постоянным исходным данным относятся два допустимых уровня ЗМН. Верхний уровень Z_B характеризует максимальный запас надежности, который должен иметь исправный прибор после юстировки перед началом эксплуатации. В данном

примере $Z_B = 6$, что соответствует паспортному пределу погрешности 10% и вероятности не превышения предела погрешности $\beta \rightarrow 1$. Нижний (базовый) уровень ЗМН Z_H соответствует минимальной величине (в примере $Z_H=2$ при $\beta = 0.9772$) которая не должна быть нарушена при снижении ЗМН по мере нарастания систематической погрешности.

Фрагмент 2 содержит алгоритмы основных этапов расчета сразу для всех девяти приборов, выполняемых в следующем порядке. Сначала рассчитываются средняя погрешность, которая является систематической погрешностью. Затем определяем среднее квадратическое отклонение (СКО) с учетом корректирующей подпрограммы. После этого рассчитываются два варианта ЗМН, который представляет собой квантиль нормального распределения вероятности β . Первый вариант определяется для нулевой, а второй вариант - для фактической систематической погрешности. При этом полагаем, что ЗМН с нулевой систематической погрешностью относится к предыдущей и настоящей поверке после проведения юстировки прибора, а фактический ЗМН – к настоящей поверке перед юстировкой с учетом средней (систематической) погрешности.

Таблица 1

Лет	W	h_{cn}	σ	Z_0	Z_f	β	V	Tm	R_{ost}
2.5	11	-0.0139	0.024	4.157	3.5796	0.9998	0.048	12	2
2.5	80	-0.0208	0.021	4.8	3.8	0.9999	0.167	6	2
2.5	62	-0.0486	0.012	8.314	4.2724	1	0.337	12	1.56
2.5	116	-0.0417	0.021	4.8	2.8	0.997	0.333	6	1.4
2.5	251	-0.0833	0.0083	12	2	0.977	0.833	12	1
3	502	-0.125	0.021	4.8	-1.2	0.115	0.5	12	0.467
3.5	316	-0.1736	0.012	8.314	-6.12	0	2.406	6	0.437
5	202	-0.2431	0.012	8.314	-11.9	0	3.368	6	0.313
6	198	-0.5208	0.0083	12	-50.5	0	10.417	6	0

Условные обозначения: W - ежегодная нагрузка (цикл/год), h_{cn} - систематическая погрешность со знаком), σ - СКО, Z_0 - ЗМН без погрешности, Z_f - фактический ЗМН, β - вероятность, V - скорость деградации ЗМН, Tm - плановый МПИ, Zp - прогнозируемый ЗМН, R_{ost} - относительный остаточный ресурс (к норме)

Далее рассчитывается скорость деградации ЗМН и остаточный ресурс в относительных единицах по отношению к нормативному МПИ.

Основные результаты расчетов сведены в таблицу 1, состоящую из 10 столбцов. В первом столбце даны сроки службы приборов в порядке возрастания, а рядом указана нагрузка их работы W (циклы за год). Третий столбец содержит данные о систематической погрешности h_{cn} (со знаком). Далее следуют столбцы с информацией о σ - СКО, Z_0 - ЗМН с нулевой систематической погрешностью, Z_f – ЗМН с фактической систематической погрешностью, β - вероятности не превышения предела погрешности для квантиля Z_f .

В восьмом столбце показана очень важная характеристика для прогнозирования исправности СИ – скорость деградации ЗМН V в период предыдущего МПИ, которая позволила рассчитать относительный остаточный ресурс R_{ost} в последнем десятом столбце.

$$R_{ost} = T_{ocm} / T_k \quad (1)$$

Эту величину можно считать критерием исправности прибора после юстировки при условии $R_{ост} \geq 1$. Это значит, что СИ доработает до следующего МПИ без нарушения базового значения $Z_H = 2$ (с вероятностью $\beta = 0.9772$). Из таблицы видно, что этому условию удовлетворяют только первых пять приборов со сроком службы 2.5 года, а остальные четыре прибора возрастом от 3 до 6 лет признаны неисправными, т.к. $R_{ост} \leq 1$. Однако, эти же данные указывают на принципиальную возможность допустить некоторые приборы к работе на ограниченный срок, равный остаточному ресурсу. Например, шестому прибору со сроком службы 3 года можно было бы разрешить работать еще полгода ($12 \cdot 0.467 = 5,604 \approx 6$ мес.).

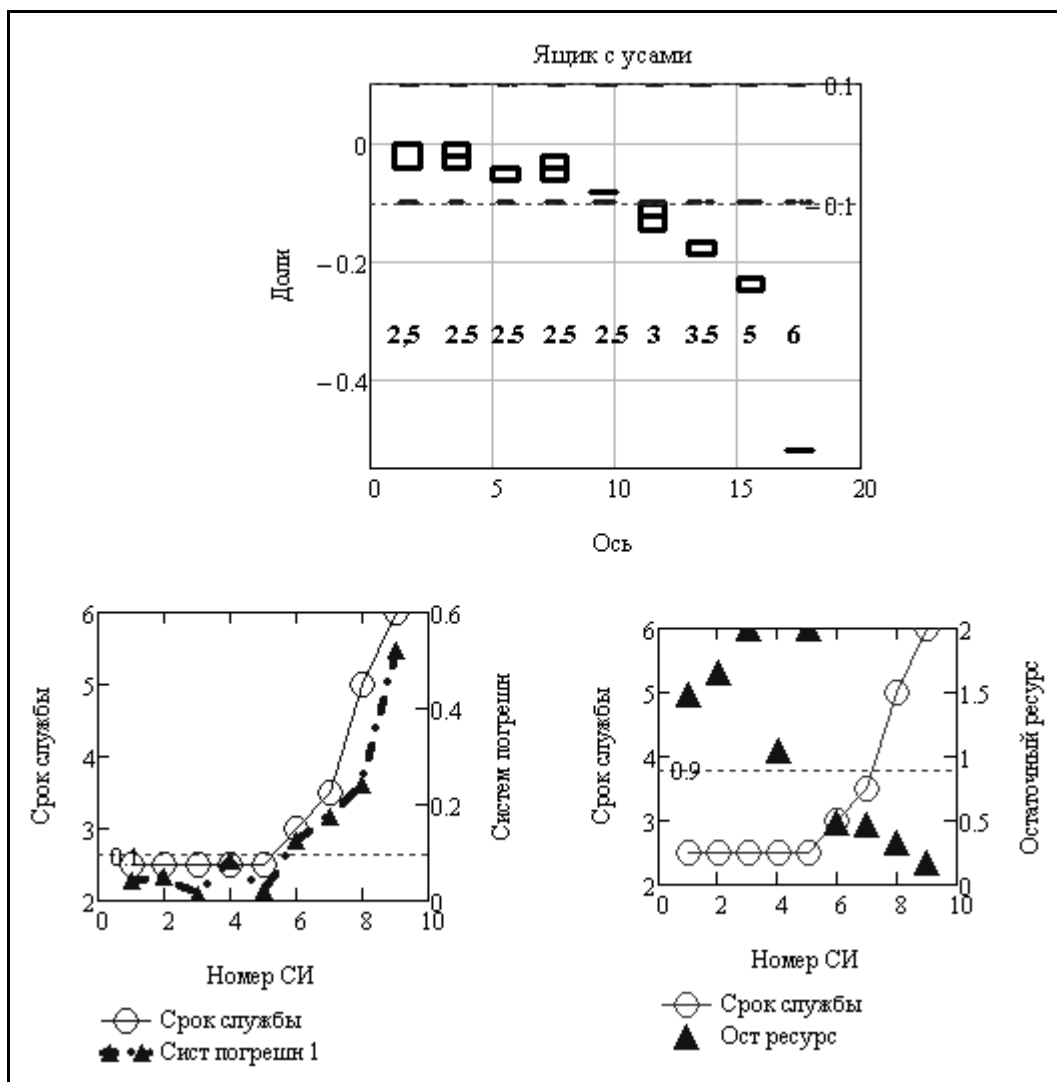
Полученный экспериментальный материал позволяет сделать дополнительные выводы о возможности применения ЗМН для контроля метрологической надежности СИ. Для этого рассмотрим графики на фрагменте 3. В его верхней части применена технология построения, так называемого ящика с усами, хотя выборки измерений состоят всего лишь из трех членов. Из этого графика видно, что выборки погрешности пяти приборов со сроком службы 2.5 года находятся внутри допустимого диапазона $\pm 10\%$, а выборки погрешности четырех приборов более высокого возраста – вне него в отрицательном поле погрешностей. Наибольшее отклонение от допустимой зоны имеет прибор с возрастом 6 лет, хотя при этом у него почти нулевое СКО.

Очень важные вероятностные закономерности вытекают из рассмотрения следующих за ящиком с усами графиков метрологических характеристик, распределенных по принципу возрастания срока службы приборов (в диапазоне от 2.5 до 6 лет). На первом графике построены совмещенные кривые срока службы приборов и их систематические погрешности. Обе кривые возрастают. При этом наблюдается относительно высокий коэффициент корреляции 0.959 между этими показателями. Принципиальное значение имеет проверка согласия графиков для СКО. Малый коэффициент корреляции (0.543) указывает на незначительное влияние СКО на процесс деградации состояния прибора по сравнению с систематической погрешностью. Графики с кривыми остаточного ресурса и ЗМН подтверждают значения этих параметров как критериев оценки исправности СИ.

Таблица 2

ЗМН	Лет	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3.5	5	6
ZH=1, ZB=6	$h_{ден}$	0.1389	0.2083	0.4861	0.4167	0.8333	1.25	1.7361	2.4306	5.2083
	β	0.9998	0.9999	1	0.9974	0.9772	0.1151	0	0	0
	$R_{ост}$	2	2	1.8097	1.9	1.1	0.6333	0.5067	0.3619	0.176
	Заключ	ОК	ОК	ОК	ОК	ОК	RPR	RPR	RPR	RPR
ZH=2, ZB=6	$h_{ден}$	0.1389	0.2083	0.4861	0.4167	0.8333	1.25	1.7361	2.4306	5.2083
	β	0.9998	0.9999	1	0.9974	0.9772	0.1151	0	0	0
	$R_{ост}$	2	2	1.5623	1.4	1	0.4667	0.4374	0.3125	0.16
	Заключ	ОК	ОК	ОК	ОК	ОК	RPR	RPR	RPR	RPR
ZH=3, ZB=6	$h_{ден}$	0.1389	0.2083	0.4861	0.4167	0.8333	1.25	1.7361	2.4306	5.2083
	β	0.9998	0.9999	1	0.9974	0.9772	0.1151	0	0	0
	$R_{ост}$	2	1.8	1.3148	0.9	0.9	0.3	0.3682	0.263	0
	Заключ	ОК	ОК	ОК	RPR	RPR	RPR	RPR	RPR	RPR

Результаты выполненных расчетов сведены в таблицу 2. Ее анализ позволяет сделать вывод, что для рассматриваемых приборов оптимальным оказалось сочетание допустимых ЗМН $Z_B = 6$ и $Z_H = 2$. При этом, после юстировки в эксплуатацию было допущено 5 из 9 приборов. При сочетании $Z_B = 6$ и $Z_H = 3$ годными признаются только 3 из 9 приборов.



Фрагмент 3

Рассмотренный пример демонстрирует возможность на основе ЗМН не только корректировать текущие МПИ, но и получать объективную информацию для назначения срока службы приборов. В данном случае имеются все основания ограничить этот срок тремя годами. Данный пример позволяет так же поставить вопрос о переменной шкале МПИ в зависимости возраста некоторых типов приборов, подобной неравномерной схеме техосмотров автомобилей.

Не меньшее значение имеет этот метод для сравнения качества однотипных приборов разных фирм для выбора наиболее надежных типов.

Литература

1. *Ефремов Л. В.* Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений// Изв. вузов. Приборостроение. 2010. т. 53, № 7.
2. *Ефремов Л.В.* Оценка интервалов между калибровками с учетом запаса метрологической надежности средств измерений Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 12. С. 34—40.
3. *Ефремов Л.В., Конопелько Л.А., Фатина О.В.* Методы прогнозирования сроков метрологических поверок алкометров. Девятая сессия

международной научной школы « Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». Сборник трудов . СПб.: ИПМАШ РАН, 2009. Электронное издание на 1 CD-R. «Информрегистр» Рег № 0320902657 от 21.12.09

4. ИСО 10012-1:1992 «Требования по обеспечению качества измерительного оборудования. Часть 1. Система метрологического подтверждения для измерительного оборудования».
5. *Мольков В. Ф.* Межповерочный интервал приборов учета энергоресурсов - показатель региональный. Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. Вып. 4. 2004. [Электронный ресурс]:< ftp://ftp.innov.ru/nice/literat/J4_04/57_58.pdf
6. Федеральный закон об обеспечении единства измерений от 26 июня 2008 года, № 102-ФЗ