

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

И. А. Кострикина, А. С. Ишков, Е. Н. Галкина

Введение

Информационно-измерительные системы (ИИС) представляют собой совокупность средств измерений (СИ), вычислительных и других устройств, функционирующих в различных режимах и условиях. Одним из основных путей совершенствования ИИС является повышение точности, надежности и стабильности метрологических и эксплуатационных характеристик, входящих в их состав СИ.

Актуальной является задача метрологического обеспечения СИ, так как расширение сфер их применения, многообразие и сложность измерительных задач приводят к необходимости улучшения их надежностных характеристик. Проблема повышения надежности связана в основном с усложнением конструкции ИИС, повышением требований к нормируемым метрологическим характеристикам, условиям эксплуатации, с наличием в составе СИ средств вычислительной техники и т.д.

Основными показателями метрологической надежности СИ являются их метрологические характеристики, которые обеспечивают возможность измерения физических величин с заданной погрешностью. Отклонение в процессе эксплуатации метрологических характеристик СИ за установленные пределы, нормируемые в технической документации, может привести к нарушению работоспособности не только СИ, но и всей ИИС.

Определение поверочного интервала

Одним из способов поддержки СИ в метрологическом исправном состоянии является их периодическая поверка. Она проводится метрологическими службами предприятий согласно установленным правилам и методикам через определенные интервалы времени. При этом возникает следующая проблема. С одной стороны, для снижения риска эксплуатации неисправных СИ и предотвращения аварийных ситуаций в работе ИИС поверка должна проводиться как можно чаще. С другой стороны, частые поверки оказываются экономически нецелесообразными и требуют значительных человеческих и аппаратных ресурсов. Следовательно, возникает задача определения оптимального временного интервала между поверками СИ.

Рекомендации по установлению значения временного интервала между поверками СИ не позволяют полностью решить данную проблему [1]. Корректировка межповерочного интервала (МПИ) СИ в процессе эксплуатации может быть проведена на основе анализа данных, полученных по результатам периодических поверок или калибровок. Однако при назначении первичного МПИ СИ сведений о результатах периодических поверок не имеется, хотя метрологическая надежность устанавливается при проектировании и разработке СИ.

Согласно [1] при назначении первичного МПИ СИ могут быть приняты во внимание:

- результаты испытаний СИ или его отдельных блоков, данные о нестабильности элементов СИ;
- показатели надежности СИ;
- данные об опыте эксплуатации аналогов СИ.

Определение временного интервала между поверками СИ по итогам длительных испытаний является дорогостоящей процедурой. Результат таких испытаний может потерять свою актуальность при последующих изменениях в технологии производства, например, при замене поставщика компонентов или материалов.

Назначение временного интервала между поверками СИ по результатам испытаний его аналогов может внести неопределенность в связи с возможным отличием в свойствах материалов и

компонентов, а также в особенностях используемой технологии производства и условиях эксплуатации. Возрастающая скорость изменения технологий и материалов усугубляет это обстоятельство.

Авторами данной статьи на основе [1–4] был проведен анализ различных методов назначения МПИ. Результаты анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Методы назначения интервалов между поверками СИ

Методы назначения интервалов между поверками	Достоинства	Недостатки
1. На основе статистически скрытых и явных отказов	Высокая достоверность результатов испытаний	Большое количество экспериментальных данных по процессам изменения во времени; исследования весьма трудоемки
2. По экономическому критерию	Минимизация расходов на эксплуатацию СИ; устранение последствий от возможных ошибок, вызванных погрешностями измерения	Применение приближенных моделей
3. Произвольное назначение первоначального интервала между поверками СИ с последующей корректировкой в течение всего срока службы СИ	Минимальные финансовые и временные затраты	Определение первого интервала между поверками СИ; не на все СИ существуют нормативные документы с рекомендациями первого интервала между поверками СИ; отсутствуют данные о надежности элементов
4. Назначение интервалов между поверками СИ по аналогам	Отсутствие финансовых и временных затрат	Результат аналогов не всегда корректно применять к новому разрабатываемому средству измерения; у приборов аналогов отсутствуют данные о параметрах надежности
5. Расчет интервалов между поверками СИ по показателям надежности (интенсивности отказов λ_t , или наработки на метрологический отказ $T_{\text{мо}}$)	Высокая достоверность результатов испытаний	Большое количество экспериментальных данных по процессам изменения во времени; исследования весьма трудоемки
6. Расчет интервалов между поверками СИ по анализу прогрессирующей составляющей погрешности СИ	Отсутствие финансовых затрат и высокая достоверность результатов испытаний	Необходимость наличия сведений о поверке за длительный промежуток времени, а также затраты на постоянный контроль необходимости проведения поверки

Результаты анализа свидетельствуют о том, что ни один из приведенных методов не дает полной информации о значении временного интервала между поверками СИ. Для получения наиболее достоверного значения временного интервала между поверками СИ необходимо проведение натурных испытаний в течение срока наработки до отказа. Однако натурные испытания целесообразно проводить при небольших значениях наработки на отказ, так как проведение натурных испытаний является трудоемким процессом и приводит к затратам финансовых и человеческих ресурсов. В связи с этим целесообразно проведение ускоренных испытаний СИ и дальнейшее прогнозирование значений выходных параметров, по которым определяется работоспособность СИ [5].

На основании вышеизложенного и с учетом рекомендаций [6] авторами предложена методика назначения временного интервала между поверками по результатам ускоренных испытаний.

В предлагаемой методике в качестве критерия нормируемого показателя используется предел допускаемого значения вероятности метрологической исправности СИ $P_{\text{ми}}^*$ в момент очередной поверки (либо предел средней доли СИ забракованных при поверке, $(\epsilon^* = 1 - P_{\text{ми}}^*)$). Рекомендуемые значения $P_{\text{ми}}^* = 0,90 \dots 0,95$ [1, 7].

Предлагаемый авторами алгоритм определения интервала между поверками по результатам ускоренных испытаний представлен на рис. 1.

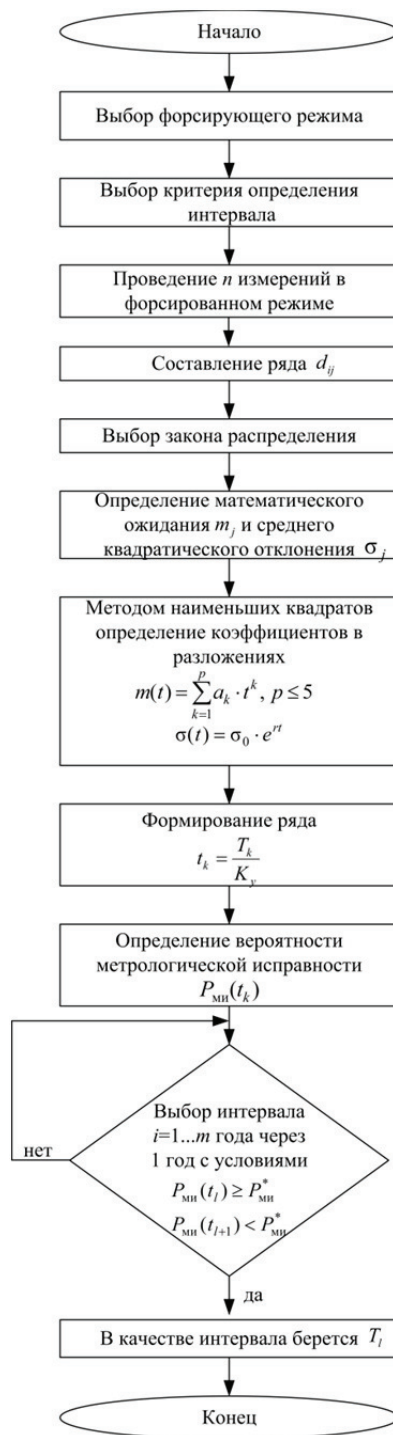


Рис. 1. Алгоритм определения интервала между поверками по результатам ускоренных испытаний

Применительно к выбранному критерию определения интервала между поверками алгоритм испытаний заключается в следующем. Проводится n измерений характеристик данного типа СИ. Составляется ряд d_{ij} , где i – номер образца компонента данного типа, j – номер измерения.

Закон распределения выбирается в результате анализа опытных данных о наработке до отказа аналогичных СИ. При выборе теоретического закона распределения необходимо учитывать информацию о характере физических процессов, вызывающих наступление отказа СИ. Предлагается использование методики определения закона распределения по коэффициентам асимметрии

и эксцесса путем проверки гипотез. Задача проверки гипотезы о законах распределения по коэффициентам асимметрии и эксцесса начинается с выбора нулевой гипотезы. По результатам экспериментов определяются статистические оценки коэффициента асимметрии $a_{\bar{x}}$ и коэффициента эксцесса $e_{\bar{x}}$. Например, для нормального закона распределения коэффициенты выглядят следующим образом:

$$a_{\bar{x}} = \frac{\mu_3[\bar{x}]}{\sigma_{\bar{x}}^3}; \quad e_{\bar{x}} = \frac{\mu_4[\bar{x}]}{\sigma_{\bar{x}}^4} - 3,$$

$$\text{где } \sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M_{\bar{x}})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n-1}}; \quad \mu_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_{\bar{x}})^3; \quad \mu_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M_{\bar{x}})^4.$$

Значения оценок $a_{\bar{x}}$ и $e_{\bar{x}}$ позволяют приблизительно определить закон распределения. Для этого по полученным значениям оценок на диаграмму наносится точка $(a_{\bar{x}}; e_{\bar{x}})$.

Задача проверки гипотезы о виде распределения происходит по критерию согласия Пирсона χ^2 . Это один из основных критериев, который можно представить как сумму отношений квадратов расхождений между теоретическими (f_T) и эмпирическими (f) частотами к теоретическим частотам

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - f_T)^2}{f_T},$$

где k – число групп, на которые разбито эмпирическое распределение; f_i – наблюдаемая частота признака в i -й группе; f_T – теоретическая частота.

Для распределения χ^2 составлены таблицы, где указано критическое значение критерия согласия χ^2 для выбранного уровня значимости α и степеней свободы df . Уровень значимости α – вероятность ошибочного отклонения выдвинутой гипотезы, т.е. вероятность того, что будет отвергнута правильная гипотеза. Вероятность P – статистическая достоверность принятия верной гипотезы. В статистике чаще всего пользуются тремя уровнями значимости: $\alpha = 0,10$, тогда $P = 0,90$; $\alpha = 0,05$, тогда $P = 0,95$; $\alpha = 0,01$, тогда $P = 0,99$.

Число степеней свободы df определяется как число групп в ряду распределения минус число связей: $df = k - z$. Под числом связей понимается число показателей эмпирического ряда, использованных при вычислении теоретических частот, т.е. показателей, связывающих эмпирические и теоретические частоты. Например, при выравнивании по кривой нормального распределения имеется три связи. Поэтому при выравнивании по кривой нормального распределения число степеней свободы определяется как $df = k - 3$. Для оценки существенности расчетное значение сравнивается с табличным $\chi_{\text{табл}}^2$.

При полном совпадении теоретического и эмпирического распределения $\chi^2 = 0$, в противном случае $\chi^2 > 0$. Если $\chi_{\text{расч}}^2 > \chi_{\text{табл}}^2$, то при заданном уровне значимости и числе степеней свободы гипотеза о несущественности (случайности) расхождений отклоняется. Если $\chi_{\text{расч}}^2 < \chi_{\text{табл}}^2$, то гипотеза принимается, и с вероятностью $P = (1 - \alpha)$ можно утверждать, что расхождение между теоретическими и эмпирическими частотами случайно. Критерий согласия Пирсона используется, если объем совокупности достаточно велик ($N > 50$), при этом частота каждой группы должна быть не менее 5.

Для каждого номера измерения j определяются математическое ожидание m_j и среднее квадратическое отклонение σ_j , например, для нормального закона распределения формулы имеют следующий вид:

$$m_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{ij},$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta_{ij} - m_j)^2.$$

Используя полученные значения m_j , σ_j , с помощью метода наименьших квадратов находятся коэффициенты в разложениях

$$m(t) = \sum_{k=1}^p a_k \cdot t^k, \quad p \leq 5,$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{rt}.$$

Формируется ряд

$$t_k = \frac{T_k}{K_y},$$

где T_k – значения интервала между поверками из ряда 1, 2, 3 и т.д. через один год; K_y – коэффициент ускорения для данного компонента.

Вероятность метрологической исправности в момент времени t_k для нормального закона распределения определяется по формуле

$$P_{\text{ми}}(t_k) = \Phi\left(\frac{\delta^* - m(t_k)}{\sigma(t_k)}\right) - \Phi\left(\frac{-\delta^* - m(t_k)}{\sigma(t_k)}\right),$$

где $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$; δ^* – предел допускаемых значений метрологической характеристики СИ.

Выбирается номер l , такой, чтобы выполнялись следующие условия:

$$P_{\text{ми}}(t_l) \geq P_{\text{ми}}^*;$$

$$P_{\text{ми}}(t_{l+1}) < P_{\text{ми}}^*.$$

В качестве интервала между поверками берется значение T_l [8].

Заключение

Таким образом, предложенный алгоритм (рис. 1) начинается с выбора форсирующего режима [9, 10]. Выбор и обоснование форсирующего режима, последовательность испытаний можно осуществить только после детального анализа объекта исследования и процессов его функционирования. Для решения поставленной задачи целесообразно использовать статистические методы планирования эксперимента. Один из возможных методов приведен для организации факторного эксперимента. При ускоренных испытаниях необходимо реализовать следующие этапы:

- 1) выбор выходного (определяющего) параметра;
- 2) выбор состава влияющих на выходной параметр факторов (внутренних параметров и внешних воздействий);
- 3) выдвижение и проверка гипотезы о виде математической модели процесса изменения выходного параметра;
- 4) выбор диапазонов варьирования всех факторов;
- 5) выбор количества опытов, т.е. определение числа узловых точек факторного пространства и числа повторений опытов в каждой точке;
- 6) построение матрицы планирования и проведение эксперимента;
- 7) вычисление коэффициентов модели;
- 8) оценка значимости коэффициентов модели и адекватности модели.

Предложенная авторами методика может применяться при разработке новых типов СИ или вводе в эксплуатацию, ввезенных в Российскую Федерацию, импортных СИ. Методика позволит более достоверно устанавливать МПИ и в целом увеличить эффективность поверочных работ. В результате оптимального установления временного интервала между поверками обеспечивается стабильность метрологических характеристик СИ, что способствует повышению метрологической надежности ИИС.

Список литературы

1. РМГ 74-2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.
2. Артемьев, Б. Г. Справочное пособие для работников метрологических служб / Б. Г. Артемьев, Ю. Е. Лукашов. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 646 с.
3. Данилов, А. А. Методы установления и корректировки межповерочных интервалов средств измерений / А. А. Данилов // Главный метролог. – 2005. – № 6. – С. 29–37.
4. МОЗМ. МД10. Руководство по определению межповерочных интервалов средств измерений, используемых в испытательных лабораториях.
5. Ишков, А. С. Методы прогнозирования показателей надежности радиоэлектронных компонентов / А. С. Ишков, И. В. Костюченков, М. К. Маркелов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2009. – Т. 2. – С. 31–32.
6. МИ 2554-99 Государственная система обеспечения единства измерений. Теплосчетчики. Методика испытаний с целью подтверждения межповерочных интервалов. Общие требования.
7. Дорохов, А. Н. Обеспечение надежности сложных технических систем : учеб. / А. Н. Дорохов, В. А. Керножицкий, А. Н. Миронов. – СПб. : Лань, 2011. – 352 с.
8. Кострикина, И. А. Применение методов планирования ускоренных испытаний СИ при определении межповерочных интервалов / И. А. Кострикина, Е. В. Мыскина // Мир измерений. – 2012. – № 11. – С. 46–48.
9. Безродный, Б. Ф. Оценка показателей надежности на основе определения объемов опытных партий изделий электроники / Б. Ф. Безродный, О. Ю. Шмелев, С. А. Майоров // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2 (6). – С. 21–26.
10. Ишков, А. С. Автоматизированная система контроля климатических испытаний радиоэлектронных компонентов / А. С. Ишков, А. И. Тарабрин, А. С. Колдов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 94–95.

УДК 621.317

Кострикина, И. А.

Применение методов ускоренных испытаний для исследований метрологической надежности информационно-измерительных систем / И. А. Кострикина, А. С. Ишков, Е. Н. Галкина // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 67–73.

Кострикина Инна Анатольевна

кандидат технических наук,
начальник лаборатории,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: tbmc2@mail.ru

Ишков Антон Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40),
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: ishkovanton@mail.ru

Kostrikina Inna Anatol'evna

candidate of technical sciences, chief of laboratory,
Scientific-research Institute
of electronic-mechanical devices
(440000, 44 Karakozov street, Penza, Russia)

Ishkov Anton Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio engineering
and radio-electronic systems,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia),
senior staff scientist,
Scientific-research Institute
of electronic-mechanical devices
(440000, 44 Karakozov street, Penza, Russia)

Галкина Екатерина Николаевна

магистрант,
кафедра метрологии и систем качества,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: katu000.92@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача повышения метрологической надежности информационно-измерительных систем и входящих в их состав средств измерений. Предложена методика установления межповерочных интервалов средств измерений. Методика основана на вычислении вероятности метрологической исправности на основе результатов ускоренных испытаний.

Ключевые слова: средство измерений, надежность, ускоренные испытания, межповерочный интервал, прогнозирование.

Galkina Ekaterina Nikolaevna

master degree student,
sub-department of metrology and quality systems,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. The problem of increase of metrological reliability of information and measuring systems and the measuring instruments which are their part is considered. The technique of establishment of calibration interval of measuring instruments is offered. The method is based on calculating the probability of metrological serviceability based on the results of accelerated tests.

Key words: measuring instrument, reliability, the accelerated tests, calibration interval, forecasting.