

Анализ методик прогнозирования межпроверочных интервалов электронных измерительных приборов

В. В. Жаднов,
канд.техн. наук, профессор
Национальный исследовательский университет
“Высшая школа экономики”

В статье рассматриваются вопросы оценки межпроверочных интервалов электронных измерительных приборов при проектировании. Приводится описание рекомендуемых методик, основанных на использовании показателей безотказности, и на примерах показано, что для электронных измерительных приборов их применение может привести к неадекватным результатам. В качестве альтернативы предложена методика, основанная на использовании показателей долговечности, и приведены примеры, подтверждающие возможность ее применения при проектной оценке первичных межпроверочных интервалов.

Введение

Межпроверочные интервалы (МПИ) являются одной из важных характеристик средств измерений (СИ), поскольку они определяют не только их технические характеристики, но и существенно влияют на стоимость их эксплуатации, так как чем больше будет МПИ, тем меньше будет поверок СИ. Поэтому требования к МПИ постоянно ужесточаются, что находит свое отражение в технических требованиях на вновь разрабатываемые и модифицируемые СИ.

На ранних этапах проектирования для подтверждения принципиальной возможности обеспечения требуемого уровня МПИ используются расчетные методы. Рекомендации по методам расчета первоначального значения межпроверочных интервалов на этапе утверждения типа СИ приведены в РМГ 74 [1]. В этом документе приведен ряд методик, основанных на использовании показателей метрологической надежности СИ, таких как вероятность того, что в течение заданной наработки метрологический отказ не возникнет или сред-

няя наработка на метрологический отказ, равная математическому ожиданию наработки до первого метрологического отказа.

Однако для электронных измерительных приборов (ЭИП), как правило, нормируются не показатели метрологической надежности, а показатели общей надежности (вероятность безотказной работы или средняя наработка на отказ), то в этом случае использование методик РМГ 74 [1], как это будет показано ниже, может привести к неадекватным результатам.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00422)

Методики расчета первичных межпроверочных интервалов

Несмотря на то, что в РМГ 74 [1] приведен целый ряд методик, на практике наиболее широкое распространение получила методика ориентировочной оценки первичного межпроверочного интервала по нормируе-

Ключевые слова: средство измерений, электронный измерительный прибор, межпроверочный интервал, надежность, долговечность, наработка, срок службы, методика расчета

Keywords: measuring instrument, electronic measuring instrument, calibration interval, dependability, durability, operating time, useful lifetime, calculation method

мым показателям надежности [2]. Это обусловлено тем, что в сравнении с другими, эта методика не требует ни громоздких вычислений, ни больших объемов исходных данных.

Как уже отмечалось выше, на ранних этапах проектирования для подтверждения показателей надежности применяются расчетные методы. Для электронных измерительных приборов, которые содержат большое число электронных модулей, предназначенных для генерирования, усиления, выпрямления, преобразования (аналого-цифрового и др.), сравнения электрических сигналов и других функций [3], и которые можно рассматривать как электронные средства (ЭС), методики расчета надежности приведены в ОСТ 4Г0.012.242 [2].

Для расчета средней наработки на отказ и вероятности безотказной работы в ОСТ 4Г0.012.242 [4] рекомендован метод “λ-характеристик”, основные расчетные соотношения которого приведены ниже:

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda}; P(t) = e^{-\Lambda \cdot t}, \quad (1)$$

где: T_0 – средняя наработка на отказ ЭИП; $P(t)$ – вероятность безотказной работы ЭИП; t – наработка (время работы) ЭИП; Λ – интенсивность отказов ЭИП.

$$\Lambda = \sum_{i=1}^I \lambda_{oi}$$

где: λ_{oi} – интенсивность отказов i -го ЭРИ в режиме работы; I – общее число ЭРИ в ЭИП.

$$\lambda_o = \lambda_b \cdot \prod_{j=1}^J K_j,$$

где: λ_b – базовая интенсивность отказов ЭРИ; K_j – j -й коэффициент математической модели интенсивностей отказов ЭРИ; J – общее число коэффициентов в математической модели.

Математические модели интенсивностей отказов ЭРИ (формулы) и численные значения их коэффициентов приведены в справочнике [5].

Эти данные используются для расчета первоначального значения МПИ по методике, приведенной в пункте А5 РМГ 74 [1]:

$$\Delta T_{\text{MPI}} = \min(T_1, T_2)$$

где: ΔT_{MPI} – первоначальное значение МПИ; T_1, T_2 – значения времени.

В случае, если рассчитано $P(t)$, значения T_1 и T_2 , определяются по формулам:

$$T_1 = t \cdot \frac{\ln\left(\frac{\Delta_3}{\chi_{P_{\text{MPI}}} \cdot \sigma_0}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta}{\chi_P \cdot \sigma_0}\right)}; T_2 = t \cdot \frac{\Delta_3 - \chi_{P_{\text{MPI}}} \cdot \sigma_0}{\Delta - \chi_P \cdot \sigma_0}, \quad (3)$$

где: σ_0 – среднеквадратичное отклонение распределения погрешности градуировки при выпуске из производства; Δ – предел допускаемой погрешности, нормируемый в технических условиях (ТУ); Δ_3 – предел допускаемой погрешности в реальных условиях эксплуатации; P_{MPI} – вероятность метрологической исправности в момент времени T_{MPI} (за время ΔT_{MPI}); $\chi_P, \chi_{P_{\text{MPI}}}$ – квантили нормированной функции Лапласа $F(\chi)$, соответствующие вероятностям $P(t)$ и P_{MPI} :

$$F(\chi) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\chi} e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

В случае, если рассчитано T_0 , значения T_1 и T_2 , определяются по формулам:

$$T_1 = T_0 \cdot \frac{\ln\left(\frac{\Delta_3}{\chi_{P_{\text{MPI}}} \cdot \sigma_0}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta}{\sigma_0} + 0,635\right)}; T_2 = T_0 \cdot \frac{\Delta_3 - \chi_{P_{\text{MPI}}} \cdot \sigma_0}{\Delta}. \quad (4)$$

Однако из (1) следует, что ΔT_{MPI} , рассчитанный по формулам (4) будет заведомо выше, чем рассчитанный по формулам (3). Покажем это на примере, для чего воспользуемся данными, приведенными в пункте А5 РМГ 74 [1]. Поскольку там приведены примеры расчета по формулам (3) и (4) для различных исходных данных, то воспользуемся исходными данными первого примера, которые сведены в табл. 1.

Результаты расчетов ΔT_{MPI} по формулам (3) и (4) сведены в табл. 2.

Как видно из таблицы 2, при одних и тех же исходных данных результаты расчетов ΔT_{MPI} отличаются в 10 раз!

Таким образом, исходя из принципа получения “нижней оценки” ΔT_{MPI} , следует пользоваться формулами (3). В то же время в ТЗ обычно нормируют T_0 , а это приводит к тому, что на практике используют формулы (4) [2] и получают завышенную оценку первоначального значения МПИ ЭИП.

АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕЖПОВЕРОЧНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Таблица 1.

Исходные данные для расчета первоначального значения МПИ

№ п/п	Обозначение	Значение	Примечание
1	2	3	4
1	σ_0	$0,2 \cdot \Delta$	
2	Δ	Δ	
3	Δ_3	$0,8 \cdot \Delta$	
4	P	0,95	$\chi_{P_{\text{мн}}} = 1,96$
5	$t, \text{ч.}$	1000	
6	$P^*_{\text{мн}}$	0,9	$\chi_{P^*_{\text{мн}}} = 1,645$
7	$T_0, \text{ч.}$	19495,7	$T_0 = \frac{t}{\ln P(t)}$

Таблица 2.

Результаты расчетов первоначального значения МПИ

№ п/п	Исходные данные	$T_1, \text{ч.}$	$T_2, \text{ч.}$	$\Delta T_{\text{мин}}, \text{лет.}$
1	2	3	4	5
1	$P(t)$	948,8	785	0,1
2	T_0	10019,1	9182,5	1,0

Одним из возможных путей выхода из этой ситуации может быть использование вместо показателей безотказности ЭИП их показателей долговечности. Исходя из классификационных признаков по ГОСТ 27.003 [6], которым отвечает большинство ЭИП, к таким показателям относятся:

- средний ресурс до ремонта/ списания;
- средний срок службы до ремонта/ списания.

Однако, исходя из смысла МПИ (время, в течение которого поверок не проводится, до конца интервала) следует нормировать и назначенные показатели долговечности. Если принять во внимание, что модель эксплуатации большинства ЭИП характеризуется циклическим режимом применения, и рассматривать поверку ЭИП как первую фазу их ремонта, нетрудно увидеть, что МПИ в терминах ГОСТ 27.003 [6] представляет собой назначенный срок службы до ремонта ($T_{\text{сл.н.р}}$). Другими словами, расчетное значение $T_{\text{сл.н.р}}$ будет численно равно $\Delta T_{\text{мин}}$.

В соответствии с ГОСТ 27.003 [6] $T_{\text{сл.н.р}}$ определяют как:

$$T_{\text{сл.н.р}} = n \cdot T_{\text{сл.yp}}, \quad (5)$$

где: n – часть, которую должен составлять $T_{\text{сл.н.р}}$ от $T_{\text{сл.yp}}$; $T_{\text{сл.yp}}$ – гамма-процентный срок службы ЭИП до ремонта; γ – доверительная вероятность.

Методики расчета показателей долговечности ЭС приведены в ОСТ 4Г0.012.242 [7]. Основные расчетные соотношения для оценки $T_{\text{сл.yp}}$ приведены ниже.

При циклическом режиме применения ЭИП значение $T_{\text{сл.yp}}$ определяется по формуле:

$$T_{\text{сл.yp}} = \frac{T_{\text{p.yp}}}{K_{\text{и.э}}},$$

где: $T_{\text{p.yp}}$ – гамма-процентный ресурс ЭИП до ремонта; $K_{\text{и.э}}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации ЭИП.

В соответствии с ОСТ 4Г0.012.242 [7] предельное состояние ЭС характеризуется снижением эффективности использования ЭС (в основном вследствие снижения их надежности) и определяется по выработке ресурса у определенного процента ЭРИ от общего числа, входящих в состав ЭС. При расчетах “назначенных” показателей долговечности ЭИП этот процент равен 0. Тогда:

$$T_{\text{p.yp}} = \min_{i=1,1} \left(T_{\text{p.y}_1}, T_{\text{p.y}_2}, \dots, T_{\text{p.y}_n} \right),$$

где: $T_{\text{p.y}_i}$ – гамма-процентный ресурс i -го ЭРИ в режиме применения ЭИП.

При циклическом и облегченном режиме применения ЭРИ значение $T_{\text{p.y}}$ определяется по формуле:

$$T_{\text{p.y}_i} = \frac{T_{\text{p.y}_i} (TY)}{K_{\text{и.э}_i} \cdot K_{\text{н}_i}},$$

где: $T_{\text{p.y}_i} (TY)$ – гамма-процентный ресурс i -го ЭРИ во всех режимах и условиях применения по техническим условиям (TY); $K_{\text{и.э}_i}$ – коэффициент интенсивности применения i -го ЭРИ в режиме эксплуатации ЭИП; $K_{\text{н}_i}$ – коэффициент нагрузки i -го ЭРИ по “критическому” параметру.

Пример использования нормируемых показателей долговечности для оценки первичного межповерочного интервала

Рассмотрим возможность применения предложенного выше метода для оценки первоначального значения МПИ по данным, приведенным в пункте А4 РМГ 74 [1] для аттенюатора типа АСО-3М:

- вероятность метрологической исправности: $P^*_{\text{мн}} = 0,9$;

- предел допускаемой погрешности, нормируемый в технических условиях: $\Delta = 0,5\%$;
- предел допускаемой погрешности в реальных условиях эксплуатации: $\Delta_3 = 0,5\%$;
- среднеквадратичное отклонение распределения погрешности градуировки при выпуске из производства: $\sigma_0 = 0,05\%$;
- количество резисторов: 19 шт.;
- средняя наработка до отказа резистора: $1 \cdot 10^6$ ч.

Оценим значение назначенного срока службы до ремонта аттенюатора типа АСО-3М для приведенных выше данных.

Поскольку для резисторов приведено только значение их средней наработки до отказа, то:

- коэффициент интенсивности эксплуатации АСО-3М: $K_{n,3} = 1$;
- коэффициент интенсивности применения резистора режиме эксплуатации АСО-3М: $K_{n,3} = 1$;
- коэффициент нагрузки резистора по "критическому" параметру: $K_{hi} = 1$.

Значение P примем равным 0,9 (см. ГОСТ 27.003 [6]), а значение гамма-процентного ресурса резистора примем равным среднегрупповому, исходя из данных справочника [5]: $T_{p,\gamma}(TY) = 50000$ ч ($\gamma = 95\%$).

Значение гамма-процентного ресурса резисторов для $\gamma_1 = P_{m,ii}^* = 0,9$ получим с использованием формулы, приведенной в ОСТ 4Г0.012.242 [7]:

$$T_{p,\gamma} = \frac{1 - 0,15 \cdot \chi_1}{1 - 0,15 \cdot \chi} \cdot T_{p,\gamma}(TY) = \frac{1 - 0,15 \cdot 1,282}{1 - 0,15 \cdot 1,645} \cdot 50000 = 53614,3 \text{ ч.}$$

где: χ, χ_1 – квантили нормированного нормального распределения $\Phi(\chi)$, соответствующие вероятностям γ и γ_1 .

Функция нормированного нормального распределения:

$$\Phi(\chi) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\chi} e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

Т.к. для всех резисторов $K_{n,3} = 1$ и $K_{hi} = 1$, то $T_{p,\gamma} = T_{p,\gamma}(TY)$ и тогда $T_{p,yp} = T_{p,\gamma}$. Кроме того для АСО-3М $K_{n,3} = 1$, и тогда $T_{p,yp} = T_{cl,yp}$. Подставив это значение в формулу (5) получим:

$$T_{cl,yp} = 0,9 \cdot \frac{53614,3}{8760} = 5,5 \text{ лет.}$$

Таким образом, расчетное первоначальное значение МПИ для аттенюатора типа АСО-3М составило 5,5 лет.

Поскольку в п. А4 РМГ 74 [1] для аттенюатора типа АСО-3М значения $\Delta T_{m,ii}$ не приведено, а приведена лишь итоговая формула для его определения:

$$P(t) = \begin{cases} \Phi[10 \cdot (1 - 0,48 \cdot t \cdot 10^{-6}) \cdot e^{-0,8 \cdot t \cdot 10^{-6}}] - \\ - \Phi[-10 \cdot (1 + 0,48 \cdot t \cdot 10^{-6}) \cdot e^{-0,8 \cdot t \cdot 10^{-6}}] & \text{при } 0 \leq t < 3,3 \cdot 10^6 \text{ ч.} \\ 0,338 - \Phi[-10 \cdot (1 + 0,48 \cdot t \cdot 10^{-6}) \cdot e^{-0,8 \cdot t \cdot 10^{-6}}] & \text{при } 3,3 \cdot 10^6 \leq t < 5,6 \cdot 10^6 \text{ ч.} \\ 0 & \text{при } t \geq 5,6 \cdot 10^6 \text{ ч.} \end{cases}$$

и сказано, что $\Delta T_{m,ii}$ находят из уравнения:

$$P(t) \geq P_{m,ii}^* = 0,9 . \quad (6)$$

Найдем значение $P(t)$ для $t = 1,31 \cdot 10^6$ ч.:

$$\chi_1 = 10 \cdot (1 - 0,48 \cdot 1,31 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}) \cdot e^{-0,8 \cdot 1,31 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1,3 ;$$

$$\chi_2 = -10 \cdot (1 + 0,48 \cdot 1,31 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}) \cdot e^{-0,8 \cdot 1,31 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = -5,71 ;$$

$$P(t) = \Phi(1,3) - \Phi(-5,71) = 0,9032.$$

Т.к. $P(t = 1,31 \cdot 10^6)$ удовлетворяет уравнению (6), то $\Delta T_{m,ii} = 1,31 \cdot 10^6$ ч. Таким образом, первоначальное значение МПИ для аттенюатора типа АСО-3М составило почти 150 лет!

Для получения сопоставимых результатов, найдем первоначальное значение МПИ при $P(t) = 0,95$.

По методике ОСТ 4Г0.012.242 [2] получим:

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{19} 1 \cdot 10^{-6}} = 52631,6 \text{ ч.}$$

$$t = -T_0 \cdot \ln P(t) = -52631,6 \cdot (-0,0513) = 2700 \text{ ч.}$$

Рассчитаем первоначальное значение МПИ по формулам (3):

$$T_1 = t \cdot \frac{\ln \left(\frac{\Delta_3}{\chi_{P_{m,ii}} \cdot \sigma_0} \right)}{\ln \left(\frac{\Delta}{\chi_P \cdot \sigma_0} \right)} = 2700 \cdot \frac{1,8}{1,63} = 2981,6 \text{ ч.};$$

$$T_2 = t \cdot \frac{\Delta_3 - \chi_{P_{m,ii}} \cdot \sigma_0}{\Delta - \chi_P \cdot \sigma_0} = 2700 \cdot \frac{0,418}{0,402} = 2807,5 \text{ ч.}$$

Таким образом, первоначальное значение МПИ для аттенюатора типа АСО-3М составило менее 4 месяцев.

АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕЖПОВЕРОЧНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Такие результаты (150 лет и 4 месяца) вызывают определенные сомнения в применимости для ЭИП методик расчета первоначальных значений МПИ, приведенных в пунктах А4 и А5 РМГ 74 [1], не только с использованием методов расчета показателей безотказности ЭС (в т.ч. и ЭИП) по ОСТ 4Г0.012.242 [2], но и специализированных методик, приведенных в РМГ 74 [1]. При этом предложенная методика, основанная на использовании показателей долговечности ЭИП позволяет получить расчетным путем, по меньшей мере, вполне адекватные значения МПИ (не сотни лет, и не единицы месяцев).

Кроме того, необходимо отметить, что, как следует из вышеизложенного, для прогнозирования первоначальных значений МПИ ЭИП используются чисто расчетные методы, точность которых трудно оценить. Поэтому полученные оценки должны быть подтверждены экспериментальными данными, которые должны быть использованы для уточнения методик расчета МПИ. Так, в РМГ 74 [1] приведены методики, позволяющие учитывать данные испытаний СИ в расчетах МПИ по показателям безотказности. Но такие данные также можно использовать и для повышения точности прогнозирования МПИ ЭИП по показателям долговечности. Например, если получены экспериментальное значение $\Delta T_{\text{мп}} \text{ для функционально-конструктивного аналога (или прототипа) ЭИП, то новое значение } n \text{ (} n^* \text{) в формуле (5) можно определить из уравнения:}$

$$n^* = k \cdot n,$$

где: k – поправочный коэффициент; n – принятая при расчете $\Delta T_{\text{мп}}$ часть, которую он составляет от $T_{\text{сл.уп.}}$.

Значение k определяют как:

$$k = \frac{\Delta T_{\text{мп}} \text{ (эксп.)}}{\Delta T_{\text{мп}} \text{ (расч.)}},$$

где: $\Delta T_{\text{мп}} \text{ (эксп.)}$ – экспериментальное значение МПИ ЭИП; $\Delta T_{\text{мп}} \text{ (расч.)}$ – расчетное значение МПИ ЭИП.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод о том, что методики расчета первоначальных значений МПИ по показателям безотказности СИ, приведенные в РМГ 74 [1], малопригодны для электронных измерительных приборов. Поэтому для ЭИП при оценке первоначальных значений МПИ можно рекомендовать методику, основанную на расчете показателей долговечности, а именно назначенного срока службы до ремонта. Такие показатели будут применяться и для обоснова-

ния выбора МПИ измерительных приборов, входящих в состав Информационно-измерительной системы, позволяющей формировать тепловые поля печатных узлов ЭС по данным, полученным от термодатчиков [8].

Вместе с тем необходимо отметить, что и методики расчета показателей долговечности, приведенные в ОСТ 4Г0.012.242 [7], не лишены недостатков. Некоторые аспекты повышения точности и достоверности этих методик рассмотрены в работах [9, 10]. Кроме того, следует иметь ввиду, что оценки первоначальных значений МПИ ЭИП, которые могут быть получены с использованием предложенной методики, основаны на чисто расчетных методах, поэтому они должны корректироваться по результатам испытаний или подконтрольной эксплуатации.

Ключевые слова: средство измерений, электронный измерительный прибор, межповерочный интервал, надежность, долговечность, наработка, срок службы, методика расчета.



Литература

1. РМГ 74–2004. Государственная система обеспечения единства измерений. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.
2. Ченцова С. В. Расчет первичного межповерочного интервала по нормируемым показателям надежности средства измерений. / Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – с. 141–142.
3. Епифанов С. В., Красных А. А. Электроизмерительные приборы. Справочно-методическое пособие. – Киров: Изд. ВятГТУ, 2005. – 42 с.
4. ОСТ 4Г0.012.242–84. Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета показателей надежности
5. Надежность ЭРИ: Справочник. – М.: МО РФ, 2006. – 641 с.
6. ГОСТ 27.003–90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
7. ОСТ 4.012.013–84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.
8. Аминев Д. А., Манохин А. И., Семененко А. Н., Увайсов С. У. Метод расчета погрешностей измерений температур электрорадиоэлементов печатного узла. / Измерительная техника. – 2015. – № 5. – с. 45–47.
9. Жаднов В. В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем. / Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2. – с. 65–73.
10. Карапузов М. А., Полесский С. Н., Жаднов В. В. Влияние внешних воздействующих факторов на долговечность СВЧ-устройств. / Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – № 12. – с. 29–31.