

ТЕОРИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ: НОВЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАРАБОТКИ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ОТКАЗ. СООБЩЕНИЕ 1

В сообщении 1 описана сущность запатентованного в Украине метода прогнозирования и определения времени наработки средства измерений на метрологический отказ. В основу данного метода положена синтезированная вероятностно-физическая модель метрологических отказов средств измерений, описываемая гибкой многопараметровой функцией распределения Кондратова – Вейбулла.

In the message 1 the essence of the method of forecasting and definitions of time of an operating time of a measuring apparatus on metrological refusal is described, which are patented in Ukraine. The synthesised is likelihood-physical model of metrological refusals of the measuring devises is put in a basis of the given method. It described by flexible multiparameter Kondratov – Weibull function of distribution.

Ключевые слова: метрологическая надежность, прогнозирование, время наработки на отказ.

Введение

Впервые теория нелинейного регрессионного анализа случайных процессов, описываемых гибкими многопараметровыми функциями распределения (ФР) и применительно к задачам метрологической надежности (МН) средств измерений (СИ), нашла свое развитие и становление в работе [1].

В частности показано, что в теории МН корректно использовать понятия «приближение многопараметровых функций распределения» и «параметрическое приближение», поскольку они более четко отражают сущность предложенной совокупности приемов по прогнозированию и определению времени наработки на МО. В чистом виде аппроксимация по ряду точек ($n > 3$) не используется, а вид аппроксимирующей функции не меняется.

Сформулирована статистическая 3ξ -гипотеза проф. Кондратова, на основе которой разработан T -метод динамической нелинейной регрессии.

Установлен $\Delta\xi$ -критерий согласия, согласно которому в задачах прогнозирования и определения времени наработки на метрологический отказ (МО) проверочной статистикой является равенство нулю разности теоретически и практически полученных средних значений погрешности в моменты времени проведения проверок, обеспечивающее проведение прогнозной кривой через три значения погрешностей, полученных в моменты времени t_{x0} , t_{xi} и t_{xi+1} .

Сформулирован вариационный принцип применительно к метрологической задаче прогнозирования и определения времени наработки средства измерений (СИ) на МО, благодаря которому устанавливаются истинные законы изучаемого явления – явления МО СИ.

В теорию МН введены такие понятия, как: «явление МО», «нелинейная регрессия» и «параметрическое приближение функций»; даны соответствующие определения.

Приведено несколько определений T -метода динамической регрессии. Отмечено, что для успешного решения задач МН каждое СИ должно содержать документ, представляющий собой индивидуальный графический портрет вероятностно-физической модели (ВФ-модели) МО СИ с использованием многопараметровых функций распределения (ФР) [2]. Такой документ представляется в объединенной системе шкал, – со шкалами «вероятность метрологического отказа $P_{\text{МО}}$ » и «нормируемая погрешность ξ_x » и отдельных или совмещенных шкал, – «интервальная шкала времени t_x » и «шкала календарного времени».

Утверждается, что генерация полного набора альтернативных сценариев вида “что, если ...” может помочь метрологам определить эффективную стратегию создания и эксплуатации высоконадежных СИ.

В настоящей статье рассматривается сущность T -метода динамической нелинейной регрессии. Описана последовательность проведения операций прогнозирования и определения времени наработки СИ на МО. Установлены особенности выбора времени проведения первой проверки и т.д.

Объект исследований – процесс динамического прогнозирования и определения времени наработки СИ на МО.

Предмет исследований – процесс прогнозирования и определения времени наработки на МО T -методом динамической нелинейной регрессии.

Целью работы является ознакомление ученых и специалистов с сущностью нового метода прогнозирования и определения времени наработки СИ на МО – T -метода динамической нелинейной регрессии.

Результаты исследований

Прогнозирование и определение времени наработки на метрологический отказ по результатам первой проверки

В установленный момент времени t_{x1} , например, 12 год. 00 мин. 07.11.2012 года, – т.е. через 2,5

года от начала эксплуатации СИ, проводится первая запланированная поверка СИ (см. рис. 1, отметка t_{x1} на шкале времени).

С помощью поверяемого СИ многократно измеряется образцовая ФВ x_0 , а полученные значения статистически обрабатываются по уравнению величин:

$$\xi_{x1} = \overline{\xi_{xi}(t_{xi})} |_{\text{при } i=1} = \overline{\xi_{x1}(t_{x1})} = \frac{n^0}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \xi_{x1i}(t_{xi}) = \frac{n^0}{x_0 n} \sum_{i=1}^{i=n} \Delta_{01i} = \overline{\Delta_{01}} / x_0, \quad (1)$$

где $\overline{\xi_{x1}(t_{x1})}$ – средняя по значению относительная погрешность результата многократных измерений; $\overline{\Delta_{01}}$ – средняя по значениям абсолютная погрешность результатов измерений при доверительной вероятности $P_{\xi 1}$; Δ_{01i} и $\xi_{x1i}(t_{x1})$ – i -я абсолютная и относительная погрешности измерения; $n^0 = 1$.

Отметим, что, при использовании в качестве нормируемой абсолютной погрешности Δ_{01i} , средняя по значению погрешность результата многократных измерений определяется согласно уравнению величин

$$\xi_{x1} = \frac{n^0}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \Delta_{01i} = \overline{\Delta_{01}}.$$

Одновременно с полученным значением нормированной погрешности (1) определяются и запоминаются значения верхней и нижней границ полосы неопределенности при заданных значениях доверительной вероятности $P_{\xi 1}$ и коэффициента запаса k_{31} . Последний выбирается в пределах $1 \leq k_{31} \leq 1,42$ в зависимости от закона распределения случайной составляющей погрешности. Индекс «1» указывает на значение данного коэффициента при первой поверке.

Отметим, что от выбора значения k_{31} зависит выбор первого и других текущих интервалов времени проверок. Это необходимо учитывать при решении задач уменьшения или оптимизации количества проверок СИ при тех же затратах.

Верхняя ($\Delta \xi_{1B}$) и нижняя ($\Delta \xi_{1H}$) полуширина полосы неопределенности относительной погрешности ξ_{x1} на момент времени t_{x1} определяется согласно уравнениям величин

$$\Delta \xi_{1B} = k_{31} \xi_{\sigma B1} = k_{31} \sigma_{B1} [\Delta_{01}] / x_0 \quad (2)$$

и

$$\Delta \xi_{1H} = k_{31} \xi_{\sigma H1} = k_{31} \sigma_{H1} [\Delta_{01}] / x_0, \quad (3)$$

где $\xi_{\sigma B1} = \sigma_{B1} [\Delta_{01}] / x_0$ и $\xi_{\sigma H1} = \sigma_{H1} [\Delta_{01}] / x_0$ – верхнее и нижнее относительные среднеквадратические отклонения результатов измерений в момент времени t_{x1} ;

$$\sigma_{B1} [\Delta_{01}] = + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left((x_{0i} - \overline{x_{01}})_{>0} \right)^2}{n(n - n^0)}}, \quad (4)$$

где $\overline{x_{01}}$ – среднее значение результатов измерений нормированной по значению ФВ x_0 ,

– при положительном знаке отклонений $x_{0i} - \overline{x_{01}}$;

$$\sigma_{H1} [\Delta_{01}] = + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left((x_{0i} - \overline{x_{01}})_{<0} \right)^2}{n(n - n^0)}}; \quad (5)$$

– при отрицательном знаке отклонений $x_{0i} - \overline{x_{01}}$.

В (4) и (5) σ_{B1} и σ_{H1} – верхнее и нижнее среднеквадратические отклонения результатов измерений, полученных в момент времени t_{x1} . На это указывает нижний индекс «1».

Затем, при заданных прогнозных значениях времени наработки на МО $T_{HO} = 30$ лет и параметра формы $k_{\phi} = 6$ (см. рис. 1, пунктирная кривая 1), определяется возможное (теоретическое) значение погрешности в момент времени t_{x1} согласно уравнению измерений

$$\xi_{T1} = \xi_T(t_{x1}) = S_{\xi} \cdot \left(\frac{t_{x1}}{T_{HO}} \right)^{k_{\phi} - k_{\phi}^0} \cdot \exp \left(- \left(\frac{t_{x1}}{T_{HO}} \right)^{k_{\phi} - k_{\phi}^0} \right) + \xi_{x0}, \quad (6)$$

где $k_{\phi}^0 = 1$; $S_{\xi} = e \cdot (\xi_{нд} - \xi_{x0}) = e \cdot \xi_{нд} \cdot (1 - \xi_{x0} / \xi_{нд}) = e \cdot \xi_{нд} \cdot (1 - 1/k_{мз})$ – параметр масштаба (или параметр чувствительности); e – действительное число Эйлера ($e = 2,71828182\dots$); $\xi_{x0} = \overline{\xi_{x0}}(t_{x0})$ – смещение функции распределения, равное по значению средней, абсолютной, приведенной или относительной погрешности результата многократных измерений нормированной по значению ФВ x_0 в момент времени t_{x0} ; $\xi_{нд}$ – нормированная по значению доверительная граница нормируемой погрешности результата измерения; $k_{мз}$ – коэффициент метрологического запаса; t_{x1} – интервальное время проведения первой поверки, в годах; $k_{\phi}^0 = 1$.

Следует отметить, что при расчетах в (6) используется не календарное, а интервальное время $t_{x1} = 2,5$ года.

Следующей операцией является определение (и запоминание) знака и числового значения разницы $\Delta \xi_{хт1}$ практически (индекс «х») и теоретически (индекс «т») полученных погрешностей результатов измерений в момент времени t_{x1} по уравнению величин

$$\Delta \xi_{хт1} = \overline{\xi_{x1}}(t_{x1}) - \xi_{т1}(t_{x1}). \quad (7)$$

Во всех поверках, кроме первой, проводятся две, повторяемые одна за другой, операции по уточнению прогнозных значений параметров ФР с целью проведения кривой прогнозной ФР по новому пути: вначале осуществляется операция подбора значения параметра формы k_{ϕ} , а затем – параметра сдвига или времени $T_{но}$ наработки на МО. Эти операции повторяются до выполнения $\Delta \xi$ -критерия согласия проф. Кондратова [1], т.е. до момента времени достижения равенства нулю значения разности (7). При достижении данной цели подтверждается гипотеза о согласии (равенстве) практически и теоретически полученных значений погрешностей в моменты времени t_{xi} . Гипотеза о согласии отвергается, если значение разности практически и теоретически полученных значений погрешностей находятся за пределами области принятия решения, т.е. при $\xi_{xi} > |\pm \xi_{нд}|$ или при $\Delta \xi_{хт1} \neq 0$.

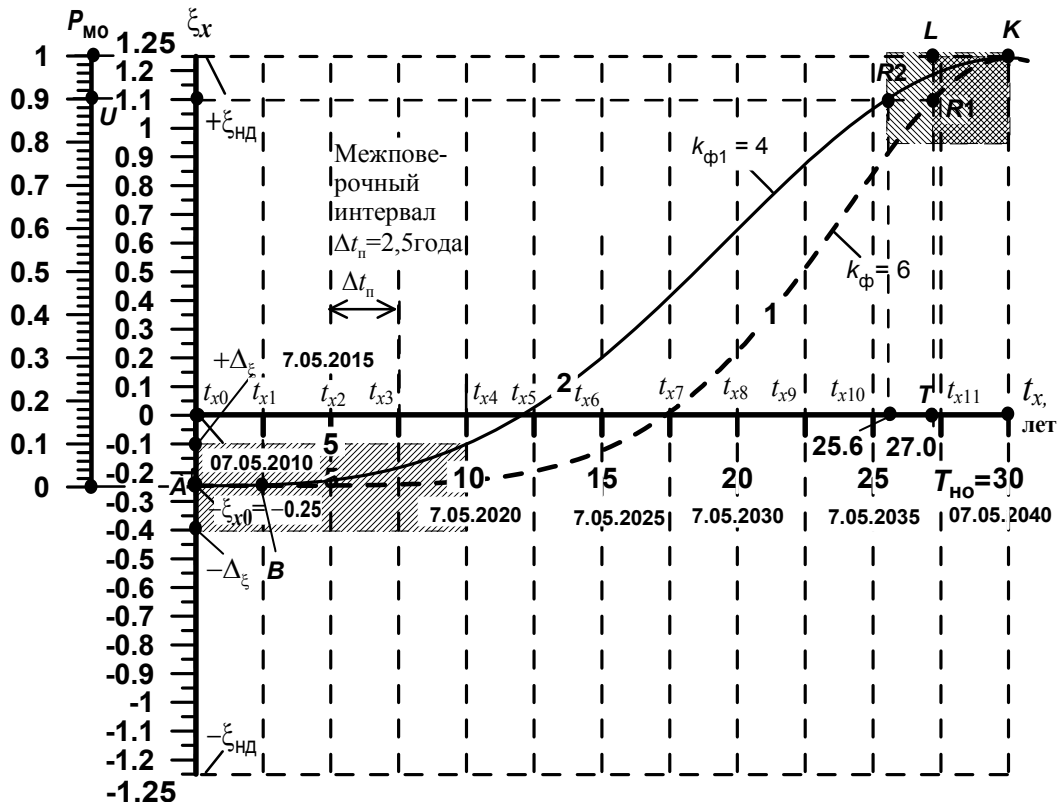


Рис. 1. Графический портрет ВФ-модели МО СИ, поясняющий суть метода определения времени наработки на МО (1-я поверка)

При первой поверке проводится только уточнение значения параметра формы k_{ϕ} , а значением параметра сдвига (или временем $T_{но}$ наработки на МО) обычно не варьируют. По результатам первой поверки получают такие значения параметра формы k_{ϕ} , при которых кривая ФР пройдет через точку B, соответствующую полученному значению погрешности (рис. 1, точка B на сплошной кривой).

Практически подбор параметров ФР осуществляет графоаналитическим методом, т.е. с использованием аналитических расчетов и графических построений. При первой поверке, путем подбора значений параметра формы ФР, изменяют значение $k_{\phi} = 6$ до, например, $k_{\phi 1} = 4$, при котором значение разницы $\Delta \xi_{x1}(7)$ погрешностей станет равным нулю. Это достигается при условии прохождения прогнозной кривой через точку В, соответствующую практически полученному значению погрешности в момент времени t_{x1} , т.е. при

$$\{\xi_{x1}\} = \{\xi_{T1}\} \quad (8)$$

или

$$\xi_{x1} = S_{\xi} \cdot \left(\frac{t_{x1}}{T_{\text{но1}}} \right)^{k_{\phi 1} - k_{\phi}^0} \exp \left[- \left(\frac{t_{x1}}{T_{\text{но1}}} \right)^{k_{\phi 1} - k_{\phi}^0} \right] + \xi_{x0}, \quad (9)$$

где $T_{\text{но1}} = T_{\text{но}} = 30$ лет.

Если за счет изменения параметра формы удалось обеспечить равенство (8) при прогнозном (первоначальном) значении времени наработки на МО ($T_{\text{но1}} = T_{\text{но}} = 30$ лет), то далее это время не уточняется. При полученных значениях параметров $k_{\phi 1} = 4$ и $T_{\text{но1}} = 30$ лет на графическом портрете ВФ-модели МО проводится (строится) прогнозная кривая ФР, с новыми значениями параметров. Она проходит через точку А, соответствующую погрешности $\xi_{x0}(t_{x0}) = -0,25$, рабочую точку В, соответствующую погрешности $\xi_{x1}(t_{x1}) = -0,24 \pm 0,15$, и заданную точку К, соответствующую моменту времени $T_{\text{но1}} = T_{\text{но}} = 30$ лет (см. рис. 1, непрерывная кривая 2). Как видно из рис. 1, точка К является точкой касания кривой 2 с прямой, характеризующей верхнее граничное значение нормируемой погрешности СИ, поскольку $T_{\text{но1}} = 30$ лет.

В то же время базовая кривая ФР с прогнозными значениями параметров не исключается, а используется для сравнения и наблюдения динамики прогнозов.

Описанная совокупность операций обеспечивает первое приближение ФР к базовой (теоретической). Новая прогнозная кривая, соответствующая состоянию МН СИ на момент времени первой поверки, дает возможность наглядно оценить тенденцию изменения и положения прогнозной кривой со временем при установленных значениях параметров ФР. В частности, например, по кривой 2, приведенной на графическом портрете, видно, что в результате изменения коэффициента формы наступление МО произойдет не после 27,0 лет использования (эксплуатации) СИ, а по истечении 25,6 года, т.е. с 9.12.2035 года (см. рис. 1, точку R2 на кривой 2, заштрихованную область неопределенности и календарное время).

Полученные данные и графики записываются на бумажном и электронном носителях, т.е. документируются с целью их использования при проведении второй поверки СИ. На момент времени окончания первой поверки графический портрет ВФ-модели МО СИ будет содержать уже две ФР, как показано на рис. 1.

Прогнозирование и определение времени наработки на метрологический отказ по результатам второй поверки

Вторая (текущая) поверка проводится 07.05.2015 года в 12 час. 00 мин. (рис. 2, отметка t_{x2} на шкале времени). Аналитически данный момент времени описывается уравнением числовых значений вида

$$\{t_{x2}\} = \{t_{xi}\} |_{\text{при } i=2} = (\{t_{x(i-1)}\} - \{t_{pi}\}) |_{\text{при } i=2} = \{t_{x1}\} + \{\Delta t_{\text{п}}\}. \quad (10)$$

Согласно (10), момент времени t_{x2} отличается от t_{x1} на интервал времени $\Delta t_{\text{п}}$. С учетом погрешностей $+\Delta t_{\text{п2в}}$, $-\Delta t_{\text{п2н}}$, верхнее и нижнее значения полуширины полосы неопределенности интервала времени поверки определяются согласно уравнениям числовых значений

$$\{\Delta t_{\text{п2в}}\} = \{\Delta t_{\text{п2}}\} + \{\Delta t_{\text{п2в}}\} \quad (11)$$

и

$$\{\Delta t_{\text{п2н}}\} = \{\Delta t_{\text{п2}}\} - \{\Delta t_{\text{п2н}}\}. \quad (12)$$

В установленный календарный момент времени t_{x2} вновь многократно измеряется образцовая ФВ x_0 . Полученные результаты статистически обрабатываются, т.е. вначале определяется и запоминается среднее значение и знак относительной погрешности

$$\xi_{x2} = \overline{\xi_{xi}(t_{xi})} |_{\text{при } i=2} = \overline{\xi_{x2}(t_{x2})} = \frac{n^0}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \xi_{x2i}(t_{xi}) = \frac{n^0}{x_0 n} \sum_{i=1}^{i=n} \Delta_{o2i} = \overline{\Delta_{o2}} / x_0, \quad (13)$$

где $\overline{\Delta_{o2}}$ – средняя по значению абсолютная погрешность результатов многократных измерений с

доверительной вероятностью P_{ξ_2} ; $\bar{\xi}_{x_2}(t_{x_2})$ – средняя по значению относительная погрешность результата измерения; Δ_{o2i} и $\xi_{x2i}(t_{x_2})$ – i -е абсолютная и относительная погрешности измерений; $n^0 = 1$.

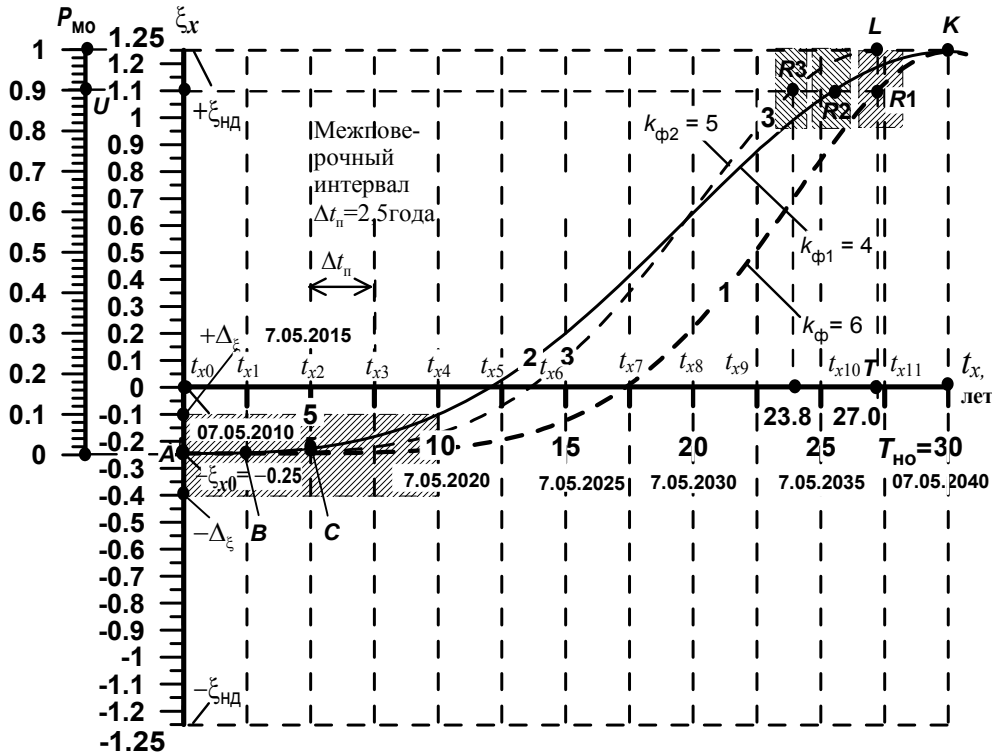


Рис. 2. Графический портрет ВФ-модели МО СИ, поясняющий суть метода определения времени наработки на МО (после первых двух проверок)

Одновременно в момент времени t_{x2} определяются и запоминаются значения верхней и нижней полуширины полосы неопределенности результатов измерений при заданных значениях доверительной вероятности P_{ξ_2} и коэффициента запаса k_{32} . Последний выбирается, как и k_{31} , в пределах $1 \leq k_{32} \leq 1,42$.

Верхняя ($\Delta \xi_{2В}$) и нижняя ($\Delta \xi_{2Н}$) полуширина полосы неопределенности погрешности ξ_{x2} на момент времени t_{x2} определяются согласно уравнениям величин

$$\Delta \xi_{2В} = k_{32} \sigma_{B2} [\Delta_{o2}] / x_0 = k_{32} \xi_{\sigma B2} \tag{14}$$

и

$$\Delta \xi_{2Н} = k_{32} \sigma_{H2} [\Delta_{o2}] / x_0 = k_{32} \xi_{\sigma H2}, \tag{15}$$

где σ_{B2} и σ_{H2} – верхнее и нижнее среднеквадратические отклонения результатов измерений на календарный момент времени t_{x2} ; $\xi_{\sigma B2} = \sigma_{B2} [\Delta_{o2}] / x_0$ и $\xi_{\sigma H2} = \sigma_{H2} [\Delta_{o2}] / x_0$ – верхнее и нижнее относительные среднеквадратические отклонения результатов измерений на тот же момент времени;

$$\sigma_{B2} [\Delta_{o2}] = + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left((x_{oi} - \bar{x}_{o2})_{>0} \right)^2}{n(n - n^0)}} = \sigma_{B2}(t_{x2}) \tag{16}$$

– среднеквадратическое отклонение результатов измерений при положительном знаке отклонений $x_{oi} - x_{o2}$;

$$\sigma_{H2} [\Delta_{o2}] = + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left((x_{oi} - \bar{x}_{o2})_{<0} \right)^2}{n(n - n^0)}} = \sigma_{H2}(t_{x2}); \tag{17}$$

– среднеквадратическое отклонение результатов измерений при отрицательном знаке отклонений $x_{oi} - x_{o2}$; \bar{x}_{o2} – среднее значение результата измерений образцовой ФВ x_0 .

Пояснения по учету знака переменной составляющей ФР Кондратова – Вейбулла

Погрешность ξ_{x2} (13) может принимать разные случайные значения и знаки. При определении

времени наработки на МО возможны случаи, когда приращение погрешности, полученной в момент времени t_{x0} , и погрешностей, полученных в момент времени t_{x1} и t_{x2} , имеют разные знаки. Поэтому, начиная с момента времени t_{x2} проведения второй поверки, определяются и запоминаются значения и знаки приращений погрешностей

$$\Delta \xi_{x10} = \overline{\xi_{x1}(t_{x1})} - \overline{\xi_{x0}(t_{x0})}, \quad (18)$$

$$\Delta \xi_{x20} = \overline{\xi_{x2}(t_{x2})} - \overline{\xi_{x0}(t_{x0})} \quad (19)$$

и

$$\Delta \xi_{x21} = \overline{\xi_{x2}(t_{x2})} - \overline{\xi_{x1}(t_{x1})}, \quad (20)$$

полученных в моменты времени t_{x0} , t_{x1} и t_{x2} поверок, последовательно осуществляемых одна за другой.

Полученные значения анализируются с целью определения знака переменной составляющей ФР. Знак переменной составляющей ФР не изменяется при следующих знаках приращений (18), (19) и (20) и соответствующих им условиях:

$$+ \Delta \xi_{x10}, + \Delta \xi_{x20}, + \Delta \xi_{x21}, \text{ при условии, что } \Delta \xi_{x20} \geq \Delta \xi_{x10}; \quad (21)$$

$$+ \Delta \xi_{x10}, + \Delta \xi_{x20}, - \Delta \xi_{x21}, \text{ при условии, что } \Delta \xi_{x20} \leq \Delta \xi_{x10} \quad (22)$$

и

$$- \Delta \xi_{x10}, + \Delta \xi_{x20}, + \Delta \xi_{x21}, \text{ при условии, что } \Delta \xi_{x21} \geq | - \Delta \xi_{x10} |. \quad (23)$$

Причем в двух последних случаях учитываются только погрешности $\overline{\xi_{x0}(t_{x0})}$ и $\overline{\xi_{x2}(t_{x2})}$, а погрешность $\overline{\xi_{x1}(t_{x1})}$ считается условным промахом¹.

Знак переменной (зависимой от времени) составляющей ФР изменяется на противоположный в следующих случаях:

$$- \Delta \xi_{x10}, - \Delta \xi_{x20}, - \Delta \xi_{x21}, \text{ при условии, что } | - \Delta \xi_{x20} | \geq | - \Delta \xi_{x10} |; \quad (24)$$

$$- \Delta \xi_{x10}, - \Delta \xi_{x20}, + \Delta \xi_{x21}; \text{ при условии, что } | - \Delta \xi_{x20} | \leq | - \Delta \xi_{x10} | \quad (25)$$

и

$$+ \Delta \xi_{x10}, - \Delta \xi_{x20}, - \Delta \xi_{x21} \text{ при условии, что } (- \Delta \xi_{x10}) - | - \Delta \xi_{x20} | \leq 0. \quad (26)$$

При этом в двух последних случаях используются только погрешности $\overline{\xi_{x0}(t_{x0})}$ и $\overline{\xi_{x2}(t_{x2})}$, а погрешность $\overline{\xi_{x1}(t_{x1})}$ также считается условным промахом.

Допустим, что знаки приращений (18), (19) и (20) соответствуют условию (21). Тогда знак переменной составляющей ФР не изменяется, т.е. остается тот же, что и при предыдущей поверке.

После измерения среднего значения и определения знака погрешности $\xi_{x2} = \overline{\xi_{xi}(t_{xi})} |_{\text{при } i=2}$ в момент времени t_{x2} , определяется и запоминается прогнозное значение погрешности ξ_{T2} по прогнозной ФР с параметрами, полученными при проведении предыдущей поверки, согласно уравнению измерений

$$\xi_{T2} = S_{\xi} \cdot \left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{но1}}} \right)^{k_{\phi1} - k_{\phi1}^0} \exp \left(- \left(\frac{t_{x2}}{T_{\text{но1}}} \right)^{k_{\phi1} - k_{\phi1}^0} \right) + \xi_{x0}, \quad (27)$$

где $T_{\text{но1}}$ – время наработки на МО в годах; $k_{\phi1}$ – параметр формы, значение которого установлено при проведении предыдущей поверки; $k_{\phi1}^0 = 1$.

Теоретически полученное значение погрешности $\xi_{T2}(t_{x2})$ сравнивается с практически полученным в момент времени t_{x2} средним значением погрешности $\overline{\xi_{x2}(t_{x2})}$ (13) (с учетом знака), т.е. определяются их разности

$$\Delta \xi_{xT2} = \overline{\xi_{x2}(t_{x2})} - \xi_{T2}(t_{x2}). \quad (28)$$

С учетом знаков значений разностей $\Delta \xi_{xT1}$ (7) и $\Delta \xi_{xT2}$ (28), значения параметра формы $k_{\phi1}$ и времени $T_{\text{но1}}$ наработки на МО поочередно изменяются до достижения наиболее вероятных числовых значений параметров $k'_{\phi1}$ и $T'_{\text{но1}}$. Критерием достоверности полученных результатов является $\Delta \xi$ -критерий согласия проф. Кондратова, согласно которому необходимо обеспечить равенство нулю значения разности (28).

Необходимо отметить, что значения разностей $\Delta \xi_{xT1}$ (10) и $\Delta \xi_{xT2}$ (28) устанавливаются равными

¹ о понятии «условный промах» будет сказано ниже

нулю в пределах теоретически заданных значений погрешностей $\pm\Delta_{\xi_{xT1}}$ и $\pm\Delta_{\xi_{xT2}}$, т.е. $\{\Delta_{\xi_{xT1}}\} \cong 0 \pm \{\Delta_{\xi_{xT1}}\}$ и $\{\Delta_{\xi_{xT2}}\} \cong 0 \pm \{\Delta_{\xi_{xT2}}\}$.

Вначале достигается равенство нулю второй разности $\Delta_{\xi_{xT2}}$ (28) ($\{\Delta_{\xi_{xT2}}\} = 0$) путем изменения, например, значения параметра $T'_{но1}$ (рис. 2, кривая 3 с новым значением параметра сдвига). Затем проверяется выполнение условия равенства нулю первой разности $\Delta_{\xi_{xT1}}$ (7) ($\{\Delta_{\xi_{xT1}}\} = 0$?). При ее невыполнении, т.е. при $\{\Delta_{\xi_{xT1}}\} \neq 0$ и при установленном значении времени наработки на МО $T'_{но1}$, изменяется значение параметра формы $k'_{\phi1}$ до наиболее вероятного (действительного) значения, например, до $k_{\phi2} = 5$, при котором значение первой разности (7) станет равным нулю. Эти две операции повторяют в разной последовательности до выполнения Δ_{ξ} -критерия согласия, т.е. до обеспечения равенства нулю как разности (7), так и разности (28). В результате обеспечивается прохождение кривой ФР через три точки, соответствующие значениям погрешностям измерений в моменты времени t_{x0} , t_{x1} и t_{x2} , с новыми значениями параметров k_{ϕ} и $T_{но}$.

Наиболее вероятное (действительное) значение времени $T_{но2}$ ($\{T_{но2}\} = \{T_{но1}\} \pm \{\Delta T_{но2}\}$) наработки на МО (на момент времени t_{x2} ($\{t_{x2}\} = \{t_{x1}\} + \{\Delta t_{п2}\}$)) определяется по полученному в неявном виде уравнению измерений

$$\begin{aligned} & \left(\frac{t_{x1} + \Delta t_{п2}}{T_{но1} \pm \Delta T_{но2}} \right)^{(k_{\phi1} - k_{\phi1}^0 \pm \Delta k_{\phi2})} - (k_{\phi1} - k_{\phi1}^0 \pm \Delta k_{\phi2}) \cdot \ln \left(\frac{t_{x1} + \Delta t_{п2}}{T_{но1} \pm \Delta T_{но2}} \right) = \\ & = \left(\frac{t_{x1}}{T_{но1}} \right)^{(k_{\phi1} - k_{\phi1}^0)} - (k_{\phi1} - k_{\phi1}^0) \ln \left(\frac{t_{x1}}{T_{но1}} \right) - \ln \frac{\xi_{x2} - \xi_{x0}}{\xi_{x1} - \xi_{x0}} \end{aligned} \quad (29)$$

или

$$\left(\frac{t_{x2}}{T_{но2}} \right)^{(k_{\phi2} - k_{\phi2}^0)} - (k_{\phi2} - k_{\phi2}^0) \cdot \ln \left(\frac{t_{x2}}{T_{но2}} \right) = \left(\frac{t_{x1}}{T_{но1}} \right)^{(k_{\phi1} - k_{\phi1}^0)} - (k_{\phi1} - k_{\phi1}^0) \ln \left(\frac{t_{x1}}{T_{но1}} \right) - \ln \frac{\xi_{x2} - \xi_{x0}}{\xi_{x1} - \xi_{x0}}. \quad (30)$$

где $T_{но2}$ – окончательно установленное время МО СИ при второй поверке; $k_{\phi1}^0 = 1$; $k_{\phi2}^0 = 1$; $\Delta t_{п2}$ – интервал времени от начала первой до начала второй поверки; $\pm \Delta k_{\phi2}$ – изменения (приращения) параметра формы относительно его значения, полученного в момент времени t_{x1} ; $\pm \Delta T_{но2}$ – приращение времени наработки на МО относительно $T_{но1}$.

Полученное по результатам двух последних поверок прогнозное значение времени наработки на МО, равное, например, $T_{но2} = 26,7$ лет, запоминается. По установленным значениям параметров $T_{но2}$ и $k_{\phi2}$ ФР на графическом портрете ВФ-модели МО окончательно проводится (строится) прогнозная кривая 3, проходящая через точки А, точку В, соответствующую погрешности $\xi_{x1}(t_{x1}) = -0,22$ и точку С, соответствующую погрешности $\xi_{x2}(t_{x2}) = -0,23 \pm 0,15$ (см. рис. 2, кривая 3 при $k_{\phi2} = 5$ и $T_{но2} = 26,7$ лет). Из полученной кривой видно, что на момент времени второй поверки наступление МО СИ произойдет не после 25,5 лет использования (эксплуатации) СИ, а после 23,8 лет, – вместо прогнозных 30 лет (см. рис. 2, область неопределенности с точкой R3 на кривой 3).

Полученные при второй поверке данные также документируются, с целью их использования при проведении третьей поверки СИ. Паспорт на СИ будет содержать уже объединенные графические портреты ВФ-модели МО СИ, полученные при первой и второй поверках.

При определении времени наработки на МО всегда необходимо помнить и учитывать, что ФР является метрологической функцией. Поэтому значение времени наработки на МО должно определяться с указанием значений верхней и нижней допустимых границ полосы неопределенности относительно установленного прогнозного значения.

Определение значений верхней и нижней допустимых границ полосы неопределенности времени наработки на МО

При проведении второй поверки значение верхней допустимой границы $T_{но2В}$ полосы неопределенности, т.е.

$$\{T_{но2В}\} = \{T_{но2}\} + \{\Delta T_{но2В}\}. \quad (31)$$

определяется с учетом знака значений абсолютных погрешностей $\Delta T_{но2В}$, $\Delta k_{\phi2В}$ и $\Delta t_{п2В}$ определения

времени наработки на МО, параметра формы и верхней границы полосы неопределенности $\Delta\xi_{дво}$ погрешности ξ_{x0} , соответственно,

Верхняя допустимая граница $T_{но2в}$ полосы неопределенности определяется по полученному в неявном виде уравнению измерений

$$\left(\frac{t_{x2} + \Delta t_{п2в}}{T_{но2в}}\right)^{(k_{\phi2} - k_{\phi1}^0 + \Delta k_{\phi2в})} - (k_{\phi2} - k_{\phi1}^0 + \Delta k_{\phi2в}) \cdot \ln\left(\frac{t_{x2} + \Delta t_{п2в}}{T_{но2в}}\right) =$$

$$= \left(\frac{t_{x1}}{T_{но1}}\right)^{k_{\phi1} - k_{\phi1}^0} - (k_{\phi1} - k_{\phi1}^0) \ln\left(\frac{t_{x1}}{T_{но1}}\right) - \ln\frac{\overline{\xi_{x2}}(t'_{x2}) - (\overline{\xi_{x0}}(t_{x0}) + \Delta\xi_{дво0})}{\overline{\xi_{x1}}(t_{x1}) - \overline{\xi_{x0}}(t_{x0})}, \quad (32)$$

где $T_{но2в} = T_{но2} + \Delta T_{но2в} = T_{но1} \pm \Delta T_{но2} + \Delta T_{но2в}$ – верхняя допустимая граница полосы неопределенности; $\overline{\xi_{x2}}(t'_{x2})$ – погрешность результата многократных измерений образцовой ФВ x_0 в момент времени t'_{x2} ($\{t'_{x2}\} = \{t_{x1}\} + (\{\Delta t_{п2}\} + \{\Delta t_{п2в}\}) = \{t_{x2}\} + \{\Delta t_{п2в}\}$).

Затем определяется значение

$$\{T_{но2н}\} = \{T_{ндг}(t_{x2})\} = \{T_{но2}\} - \{\Delta T_{но2н}\} \quad (33)$$

нижней допустимой границы $T_{но2н}$ полосы неопределенности также с учетом знака значений абсолютных погрешностей $\Delta T_{но2н}$, $\Delta k_{\phi2н}$ и $\Delta t_{п2н}$ определения времени наработки на МО, параметра формы, момента времени t_{x2} проведения второй поверки и погрешности определения значения нижней границы $\Delta\xi_{дво0}$ полосы неопределенности погрешности ξ_{x0} , соответственно.

Аналогично нижняя допустимая граница определяется согласно уравнению измерений

$$\left(\frac{t_{x2} - \Delta t_{п2н}}{T_{но2н}}\right)^{(k_{\phi2} - k_{\phi1}^0 - \Delta k_{\phi2н})} - (k_{\phi2} - k_{\phi1}^0 - \Delta k_{\phi2н}) \cdot \ln\left(\frac{t_{x2} - \Delta t_{п2н}}{T_{но2н}}\right) =$$

$$= \left(\frac{t_{x1}}{T_{но1}}\right)^{k_{\phi1} - k_{\phi1}^0} - (k_{\phi1} - k_{\phi1}^0) \ln\left(\frac{t_{x1}}{T_{но1}}\right) - \ln\frac{\overline{\xi_{x2}}(t''_{x2}) - (\overline{\xi_{x0}}(t_{x0}) - \Delta\xi_{дво0})}{\overline{\xi_{x1}}(t_{x1}) - \overline{\xi_{x0}}(t_{x0})}, \quad (34)$$

где $T_{но2н} = T_{но2} - \Delta T_{но2н} = T_{но1} \pm \Delta T_{но2} - \Delta T_{но2н}$ – нижняя допустимая граница полосы неопределенности; $\overline{\xi_{x2}}(t''_{x2})$ – относительная погрешность результата многократных измерений образцовой ФВ x_0 в момент времени t''_{x2} ($\{t''_{x2}\} = \{t_{x1}\} + (\{\Delta t_{п2}\} - \{\Delta t_{п2н}\})$).

Необходимо отметить, что при определении верхней и нижней границ полосы неопределенности можно учитывать и соответствующие (верхние и нижние) значения границ полос, полученные при первой поверке, т.е. значения $\{T_{но1в}\}$ и $\{T_{но1н}\}$, вместо $T_{но1}$ в (32) и (34). Весь смысл состоит в разных затратах времени на решение уравнений величин (32) и (34), заданных в неявном виде. Это обусловлено разными затратами времени на подбор значений приращений $\pm\Delta T_{но2}$ при определении значений $T_{но1в}$ и $T_{но1н}$.

Определение ширины полосы неопределенности значений времени наработки на МО

Ширина полосы неопределенности значений времени наработки на МО и приращения $\Delta T_{но2в}$ и $\Delta T_{но2н}$ до верхней и нижней доверительных границ определяются известным методом. Так, например, значение полосы неопределенности значений времени наработки на МО может быть определено по уравнению числовых значений

$$\{\Delta T_{но2}\} = \{T_{нов}(t_{x2})\} - \{T_{нон}(t_{x2})\}. \quad (35)$$

Приращения времени наработки на МО до верхней и нижней допустимых границ полосы неопределенности определяется, соответственно, по уравнениям числовых значений:

$$\{\Delta T_{но2в}\} = \{T_{нов}(t_{x2})\} - \{T_{но2}(t_{x2})\} \quad (36)$$

и

$$-\{\Delta T_{но2н}\} = \{T_{но2}(t_{x2})\} - \{T_{нон}(t_{x2})\}. \quad (37)$$

Полученные значения $T_{но2в}$, $T_{но2н}$, $\Delta T_{но2в}$ и $\Delta T_{но2н}$ запоминаются.

Такова сущность процессов прогнозирования и определения времени наработки на МО при первой и второй поверках СИ. Аналогичные процессы при остальных поверках будут описаны в сообщении 4.

Таким образом, T -метод динамической регрессии действительно обеспечивает прогнозирование и определение времени наработки СИ на МО путем параметрического приближения прогнозных кривых ФР от виртуального будущего к реальному настоящему. При этом определяется как параметр сдвига, так и параметр формы ФР с учетом погрешностей результатов измерений образцовой ФВ в t_{xi} -е моменты времени.

Выводы

Описана сущность процессов прогнозирования и определения времени наработки на метрологический отказ по результатам первой и второй поверках средства измерений.

Впервые описана последовательность проведения операций измерений нормированной по значению (образцовой) физической величины x_0 поверяемым средством измерений, сравнения практически и теоретически полученных данных, их обработки и использования для определения параметров прогнозной функции распределения по соответствующим уравнениям измерений и ее построения кривых данной функции с целью отображения динамики «метрологического» старения средства измерений от поверки к поверке.

Отмечается необходимость определения времени проведения первой поверки, а также преимуществе непериодических поверок средств измерений с целью экономии затрат на их проведение.

Приведены условия учета и изменения знака переменной составляющей функция распределения Кондратова – Вейбулла.

Показана необходимость определения при каждой поверке значений верхней и нижней допустимых границ и само значение полосы неопределенности прогнозного времени наработки средства измерений на метрологический отказ.

Обращается особое внимание поверителей на необходимость учета того факта, что вероятностная мера метрологического отказа является метрологическим числом и имеет свою полосу неопределенности, зависящую от полосы неопределенности погрешности измерения образцовой ФВ x_0 в моменты времени проведения каждой поверки. В этой связи погрешность определения времени наработки на метрологический отказ, может составлять от сотен часов до нескольких лет.

Литература

1. Кондратов В.Т. Теория метрологической надежности: применение нелинейного регрессионного анализа для прогнозирования и определения времени наработки на метрологический отказ / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2010. – № 4 – С. 43-55.

2. Кондратов В.Т. Метроника, вероятностно-физические модели метрологических отказов средств измерений и их графические портреты / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 1. – С. 43-55.

Надійшла 27.1.2011 р.

УДК 621.891

В.Г. ПИСАРЕНКО

КНВО "ФОРТ" МВС України, м. Вінниця

В.М. ІВАЩЕНКО, В.Г. БОРОДІН

ТОВ НВП "SINTA", м. Харків

НАНОТЕХНОЛОГІЇ ЗНОСОСТІЙКОГО ПОКРИТТЯ

Встановлено, що наноалмази, введені в електроліт при протіканні гальванічного процесу, осаджуються з хромом на струмопровідні поверхні утворюють композит, що володіє високими протизношувальними і триботехнічними характеристиками. Показано, що наноалмазне хромове покриття перевищує спосіб твердого хромування, що дозволяє істотно поліпшити технічні характеристики покриттів, а також значно розширити сфери застосування наноалмазного хромування.

It is set, that nanodiamonds entered in an electrolyte at the flowline of galvanic process, cover with a chrome on a surface and form composite material, which is has high antiwear characteristics. It is shown, that nanodiamond chromic coverage exceeds the method of hard chrome-plating, and allows to improve technical descriptions of coverages, and also it is considerably to extend purviews nanodiamond chrome-plating.

Ключові слова: наноалмази, покриття, гальванічне співосадження, зносостійкість, корозійна стійкість.

Вступ

Відомо, що введення твердих дисперсних частинок (оксидів, нітриду, бориду, карбідів, класичних алмазів) в електрохімічні покриття підвищують їх мікротвердість і зносостійкість. Причиною цього є зменшення розміру кристалів осаджуваного металу і наявність в покритті великої кількості надтвердих частинок. Мікрочастинки, осаджувані з металом, грають роль центрів кристалізації, тому, чим менші