

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

С.С. Федин, канд. техн. наук;

Н.А. Зубрецакая, канд. техн. наук;

Г.И. Войченко*, канд. техн. наук

Київський національний університет технологій та дизайну;

**Сумський державний університет*

В статье на основе теории цепей Маркова с дискретными состояниями и непрерывным временем и экспериментальных исследований стабильности прецизионных средств измерений разработана математическая модель прогнозирования и вероятностной оценки метрологической надежности электронных тахеометров. Применение разработанной модели позволило определить оптимальный межповерочный интервал электронных тахеометров класса точности 5" с учетом нормативного критерия вероятности метрологической исправности средств измерений.

Ключевые слова: *прогнозирование, вероятностная оценка, метрологическая надежность, межповерочный интервал, прецизионные средства измерений, электронный тахеометр.*

У статті на основі теорії ланцюгів Маркова з дискретними станами та безперервним часом і експериментальних досліджень стабільності прецизійних засобів вимірювань розроблено математичну модель прогнозування та імовірнісної оцінки метрологічної надійності електронних тахеометрів. Застосування розробленої моделі дозволило визначити оптимальний міжповерочний інтервал електронних тахеометрів класу точності 5" з урахуванням нормативного критерію імовірності метрологічної справності засобів вимірювань.

Ключові слова: *прогнозування, імовірнісна оцінка, метрологічна надійність, міжповерочний інтервал, прецизійні засоби вимірювань, електронний тахеометр.*

ВВЕДЕНИЕ

Проблема метрологической надежности средств измерений (СИ), сформулированная в работах А.В. Екимова [1], А.Э. Фридмана [2], П.В. Новицкого [3] и других исследователей, заключается в неправомерности основных положений классической теории надежности относительно пуассоновского характера потока отказов с постоянной во времени интенсивностью. Применение методов, основанных на этих положениях, может привести к грубым ошибкам при оценке показателей надежности СИ. Так, например, прогнозируемое значение межповерочного интервала (МПИ) может составить несколько месяцев вместо одного года [2]. В соответствии с требованиями нормативных документов РМГ 74-2004 и ГОСТ 8.565-99 для решения задачи обеспечения метрологической надежности СИ и предупреждения метрологических отказов целесообразным является применение специальных методов и моделей прогнозирования дрейфа метрологических характеристик (МХ) СИ [4, 5].

Метрологические отказы современных СИ являются следствием закономерных процессов постепенного старения и износа, протекающих в конструктивных элементах, а их доля в общем потоке отказов на этапе эксплуатации составляет, по разным оценкам, от 40 до 100% [1, 2]. При этом актуальной задачей обеспечения метрологической надежности СИ на этапе эксплуатации являются повышение качества поверки и установление оптимального МПИ.

Вопросу обоснованного выбора продолжительности МПИ посвящено большое число исследований, анализ которых показывает, что в настоящее время определение МПИ осуществляют на основе статистики отказов с учетом экономического критерия или произвольно с последующей корректировкой первоначального значения в течение всего срока службы СИ [1-3]. МПИ устанавливают в зависимости от календарного времени эксплуатации или от времени наработки СИ, изменение МХ которых обусловлено соответственно старением или износом конструктивных элементов.

Выбор конкретного метода определения МПИ зависит от способа поверки и наличия исходной информации о метрологической исправности СИ - состояния, при котором все нормируемые МХ соответствуют установленным требованиям [4]. Постепенное изменение МХ прецизионных СИ до предельно допустимых значений позволяет выделить множество работоспособных состояний с различным уровнем эффективности функционирования СИ.

Для оценки метрологической исправности прецизионных СИ при наличии множества работоспособных состояний одним из наиболее эффективных методов является применение вероятностных моделей прогнозирования дрейфа МХ СИ, разработанных на основе теории марковских случайных процессов [2, 6 – 8].

Целью статьи является разработка модели прогнозирования метрологической надежности и вероятностной оценки оптимального МПИ прецизионных средств измерений.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

В соответствии с положениями РМГ 74 – 2004 одним из основных показателей метрологической надежности является нестабильность МХ, т.е. изменение МХ за установленный промежуток времени [4]. Изменение МХ во времени представляет случайный нестационарный процесс, множества реализаций которого в общем случае могут быть представлены в виде кривых Δ_i модулей погрешности МХ (рис.1а).

В каждый момент t_i реализации случайного процесса изменения погрешности МХ во времени характеризуются некоторым законом распределения плотности вероятности $p(\Delta, t_i)$ (кривые 1 или 2 на рис. 1 а). В центре полосы погрешностей (кривая $\Delta_{cp}(t)$) наблюдается наибольшая плотность появления погрешностей, которая постепенно уменьшается к границам полосы погрешностей, теоретически стремясь к нулю при бесконечном удалении от центра. Верхняя и нижняя границы полосы погрешностей могут быть представлены лишь в виде некоторых квантильных границ $\Delta_{\Gamma}(t_i)$, внутри которых заключена большая часть погрешностей, реализуемых с доверительной вероятностью P . За пределами каждой из границ с вероятностью $(1-P)/2$ находятся погрешности, наиболее удаленные от центра реализации.

Метрологическая надежность оценивается распределением моментов времени наступления метрологических отказов, которые характеризуются плотностью вероятности $p(t)$, зависимостью интенсивности метрологических отказов от времени $\omega(t)$, вероятностью безотказной работы $P(t)$ и вероятностью отказов $Q(t)$, показанных на рисунке 1, б, в и г соответственно. Метрологический отказ наступает при пересечении кривой Δ_i прямой предельно допустимого значения - $\Delta_{пр}$. Отказы могут наступать в различные моменты времени в диапазоне значений от t_{min} до t_{max} (рис.1 а), которые являются точками пересечения 95% и 5% квантилей с линией предельно допустимого значения погрешности. При достижении кривой $\Delta_{0.95}(t)$ допустимого значения у 5% СИ наступает метрологический отказ.

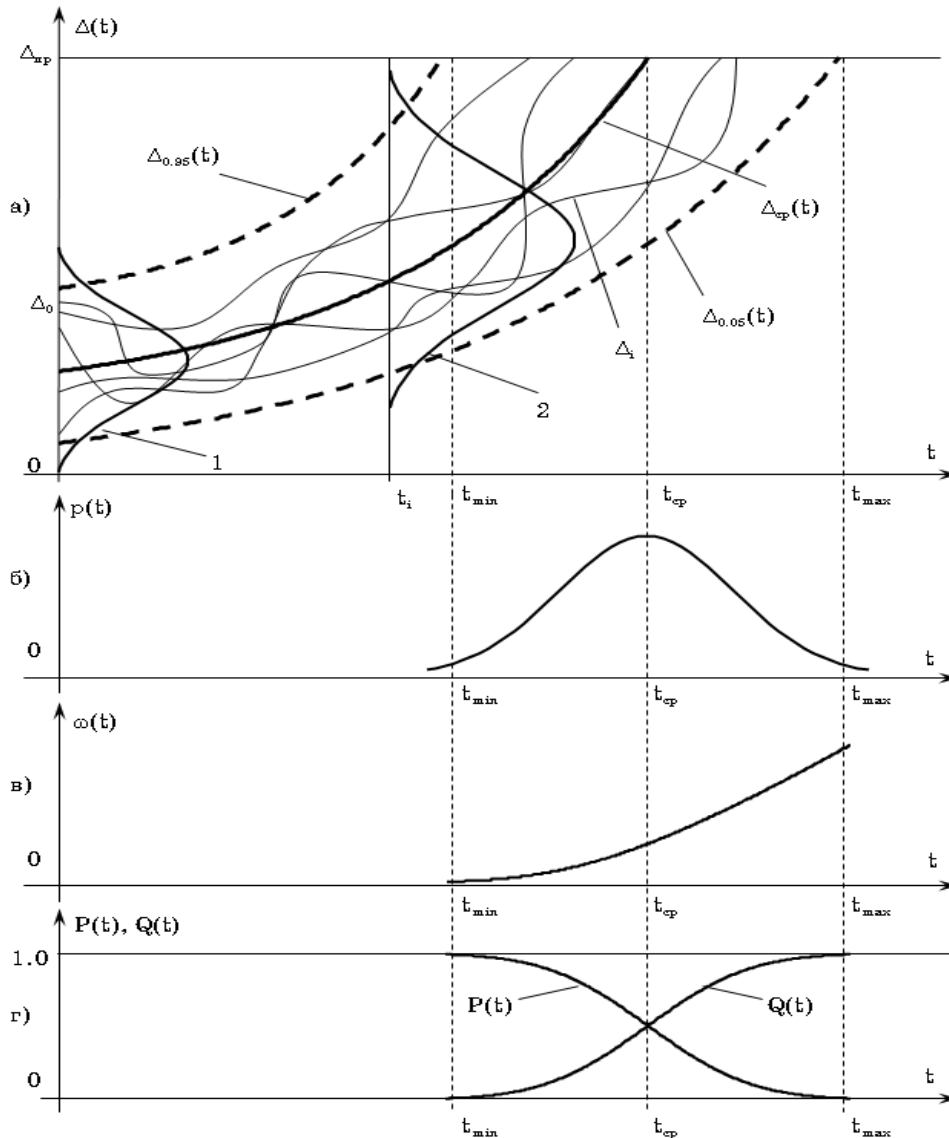


Рисунок 1 – Теоретическая модель изменения МХ СИ во времени (а), плотность распределения времени наступления метрологических отказов (б), зависимость интенсивности метрологических отказов от времени (в), вероятность безотказной работы и вероятность отказов (г)

Модель погрешности 95% квантили может быть представлена в виде зависимости (1):

$$\Delta_{0.95}(t_i) = \Delta_0 + F(t), \quad (1)$$

где Δ_0 – начальная погрешность СИ; $F(t)$ – случайная функция времени, описывающая физико-химические процессы постепенного старения и износа элементов и блоков СИ определенного класса точности. Эти процессы протекают в основном на молекулярном уровне и не зависят от того, находится ли СИ в эксплуатации или хранится на консервации и, следовательно, основным фактором, определяющим старение СИ, является календарное время, прошедшее с момента изготовления СИ. Основываясь на физических моделях процессов старения, практически не

представляется возможным получить точное выражение для функции $F(t)$, поэтому на основе экспериментальных исследований изменения погрешностей во времени функцию $F(t)$ чаще всего аппроксимируют линейной, экспоненциальной или логистической зависимостью [1, 3].

Для применения квантильного описания границ полосы погрешностей $\Delta_T(t_i)$ в каждом ее сечении t_i необходимо знать оценки математического ожидания $\Delta_{cp}(t_i)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_\Delta(t_i)$ отдельных реализаций Δ_i . Значение погрешности на границах каждого сечения t_i может быть аналитически определено в виде зависимости (2):

$$\Delta_T(t_i) = \Delta_{cp}(t_i) \pm k\sigma_\Delta(t_i), \quad (2)$$

где k – квантильный множитель, соответствующий заданной доверительной вероятности P , значение которого существенно зависит от вида закона распределения погрешностей по сечениям. В исследованиях А.В. Екимова, М.И. Ревякова [1] и П.В. Новицкого [3] было показано, что определить вид этого закона при исследовании процесса старения СИ достаточно сложно, так как законы распределения могут претерпевать значительные изменения с течением времени. Для решения этой проблемы, в случае высокоэнтропийных законов распределения, при доверительной вероятности $P=0,9$ коэффициент k полагается равным $k=1,6$, а модель 95% квантили нестационарного случайного процесса изменения погрешности МХ во времени может быть представлена зависимостью (3):

$$\Delta_{0.95}(t) = \Delta_{cp}(t) + 1.6\sigma_\Delta(t). \quad (3)$$

Распределение моментов времени наступления метрологических отказов формируется в момент начала эксплуатации и представляет собой начальное распределение погрешностей МХ, которое может соответствовать закону Гаусса, Вейбулла, логнормальному, экспоненциальному, DN-распределению или другому закону распределения. В результате воздействия внешней среды начальное распределение вероятностей с течением времени трансформируется в некоторое текущее распределение.

Таким образом, задача прогнозирования и оценки метрологической надежности прецизионных СИ состоит в нахождении начальных изменений погрешностей $\Delta_i(t)$ МХ и построении математической модели, экстраполирующей полученные результаты на большой интервал времени. В качестве модели нестационарного случайного процесса изменения во времени погрешности МХ целесообразно использовать экспериментальную зависимость изменения во времени 95% квантили этого процесса. При этом большое значение приобретают различные вероятностные методы, на основе которых разрабатываются модели изменения погрешностей и осуществляется прогнозирование метрологических отказов.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ СИ

Для разработки модели прогнозирования необходимо учитывать тот факт, что с течением времени при воздействии факторов внешней среды и различных режимов эксплуатации значение каждой МХ стремится к своему предельному состоянию - $\Delta_{пр}$, а решение задачи прогнозирования метрологической надежности СИ с учетом нестационарности процесса дрейфа погрешности МХ сводится к оценке вероятности метрологической исправности СИ. Создание модели прогнозирования и вероятностной оценки метрологической исправности по показателю неустойчивости МХ

является эффективным способом определения оптимального значения МПИ. В соответствии с РМГ 74—2004 и ГОСТ 8.565-99 одним из основных критериев нормированных показателей установления МПИ СИ является вероятность метрологической исправности СИ $P_{м.и}$ (табл. 1).

Таблица 1 – Значения вероятности метрологической исправности СИ

Область применения рабочих эталонов (образцовых СИ)	$P_{м.и}$
Поверка СИ, применяемых в здравоохранении, экологии, при учете материальных ценностей, а также СИ, метрологический отказ которых может привести к значительным экономическим потерям	0,95 - 0,99
Поверка (калибровка) СИ, не связанных со здоровьем и жизнью людей, и СИ, метрологический отказ которых не вызывает большого ущерба	0,90 - 0,95

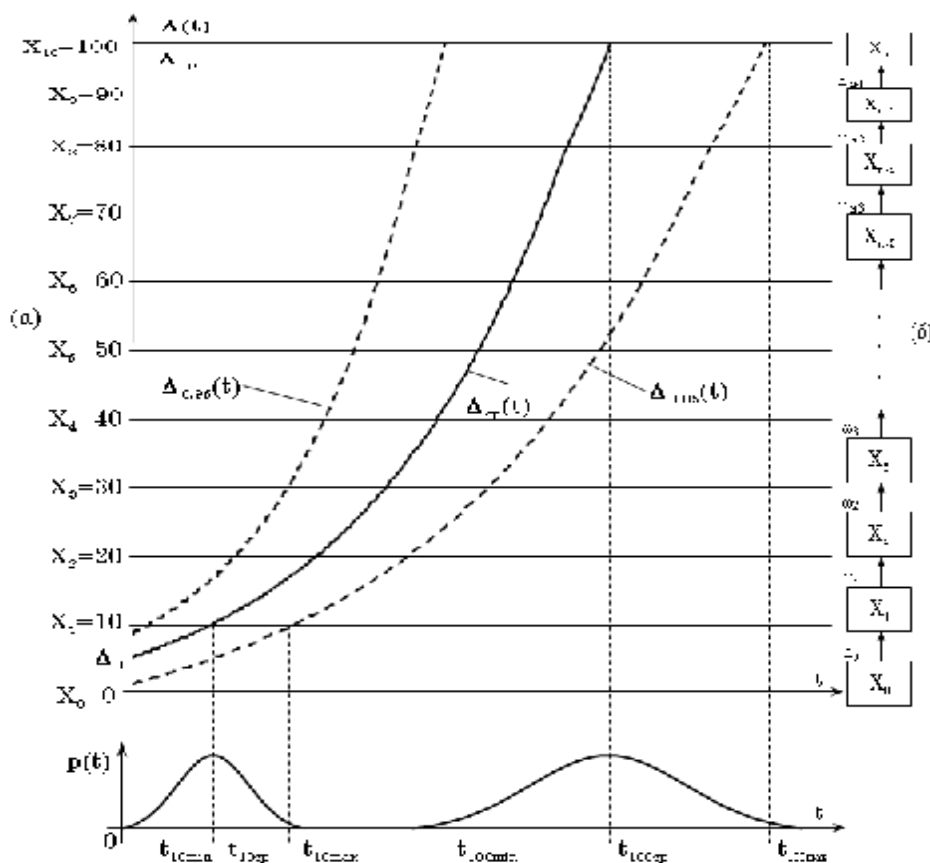


Рисунок 2 – Теоретическая модель дискретных состояний 95% и 5% квантилей МХ СИ (а), состояния X_i ($i=0,1,2,\dots,n$): состояние X_0 – 0% износа СИ; состояние X_n – 100% износ СИ; $\omega_i(t_i)$ ($i=0,1,2,\dots,n-1$) – интенсивности переходов между состояниями СИ (б)

Поскольку изменение МХ во времени – случайный процесс, то основой построения математических моделей прогнозирования метрологической надежности является теория случайных процессов. Для определения вероятности изменения значений МХ наиболее эффективными являются математические модели на основе Марковских случайных процессов с

дискретными состояниями и непрерывным временем [6,7]. Анализируемой величиной Марковской модели прогнозирования является значение 95% квантили МХ, выраженное в процентах от значения $\Delta_{пр}$. При этом, допустимый диапазон значений этой величины делится на несколько интервалов. Каждый интервал рассматривается как отдельное состояние, в котором МХ может находиться с некоторой вероятностью, переходя из одного состояния в другое по определенным правилам. Количество состояний определяется желаемой точностью оценок и объемом выборки результатов наблюдений. Например, если для типового состояния старения или износа СИ выбрать 10%-ный интервал дискретизации, то состоянию X_0 будет соответствовать интервал (0% – 10%) погрешности МХ от значения $\Delta_{пр}$, состоянию X_1 - (10% – 20%) и так далее. Состоянию X_n будет соответствовать 100% износ СИ, т.е. достижение МХ значения $\Delta_{пр}$ (рис. 2 а). Модель для описания динамики переходов между состояниями 95% квантили МХ может быть представлена ориентированным графом (рис. 2 б), в котором вершины (прямоугольники) соответствуют состояниям, а дуги (стрелки) соответствуют переходам.

Процесс дрейфа 95% квантили МХ может быть представлен случайными мгновенными переходами из одного состояния в другое по направлениям дуг при непрерывном времени. Математическое описание этих переходов характеризует влияние внешней среды на метрологическую исправность СИ. Переходы по графу возможны только в следующее состояние, каждое из которых соответствует старению или износу СИ, выраженному в процентах от значения $\Delta_{пр}$ (рис. 2 б). Параметры ω_i характеризуют интенсивности переходов между состояниями X_i . Состояние X_n соответствует полному старению или износу СИ, т.е. метрологическому отказу, и не имеет выходов.

Динамика изменения во времени вероятностей нахождения 95% квантили МХ в различных состояниях с 10% интервалом дискретизации описывается математической моделью, основанной на системе дифференциальных уравнений Колмогорова, с различными значениями ω_i (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\omega_0 p_0(t), \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = -\omega_1 p_1(t) + \omega_0 p_0(t), \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = -\omega_2 p_2(t) + \omega_1 p_1(t), \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = -\omega_3 p_3(t) + \omega_2 p_2(t), \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = -\omega_4 p_4(t) + \omega_3 p_3(t), \\ \frac{dp_5(t)}{dt} = -\omega_5 p_5(t) + \omega_4 p_4(t), \\ \frac{dp_6(t)}{dt} = -\omega_6 p_6(t) + \omega_5 p_5(t), \\ \frac{dp_7(t)}{dt} = -\omega_7 p_7(t) + \omega_6 p_6(t), \\ \frac{dp_8(t)}{dt} = -\omega_8 p_8(t) + \omega_7 p_7(t), \\ \frac{dp_9(t)}{dt} = \omega_8 p_8(t). \end{array} \right. \quad (4)$$

Для интегрирования системы дифференциальных уравнений (4) с целью нахождения вероятности метрологической исправности СИ необходимо задать начальные условия (5):

$$\begin{aligned} p_0(0) = 1, p_1(0) = 0, p_2(0) = 0, p_3(0) = 0, p_4(0) = 0, \\ p_5(0) = 0, p_6(0) = 0, p_7(0) = 0, p_8(0) = 0, p_9(0) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

а также учитывать нормализующее условие, которое должно выполняться в любой момент времени (6):

$$\sum_{i=0}^9 p_i(t) = 1. \quad (6)$$

Параметр потока отказов - ω_i или интенсивность отказов СИ в процессе эксплуатации для каждого состояния X_i можно определить на основе зависимости (7):

$$\omega_i(t_i) = \frac{n(\Delta t_i)}{N\Delta t_i}, \quad (7)$$

где $n(\Delta t_i)$ – число отказов (предельных состояний) СИ за промежуток времени между 5% и 95% квантилями МХ при достижении ими предельных значений каждого из состояний X_i ; N – количество СИ, находящихся в эксплуатации.

Экспериментальные исследования метрологической надежности электронных тахеометров.

Современные электронные тахеометры относятся к прецизионным измерительным приборам, предназначенным для высокоточных измерений расстояний, горизонтальных и вертикальных углов.

При оценке метрологической надежности электронных тахеометров практический интерес представляет исследование модели нестабильности во времени той МХ, по которой может быть достигнут наибольший процент отбраковки при поверке тахеометров определенного класса точности [4]. Допусковые значения основных МХ электронных тахеометров класса точности 5" приведены в таблице 2 [9].

Таблица 2 – Допусковые значения основных МХ электронных тахеометров класса точности 5"

Наименование МХ	Допусковые значения каждой МХ
Неперпендикулярность оси вращения трубы к оси вращения алидады	15"
Максимальное влияние эксцентриситета вертикального круга на измеряемый угол	10"
Среднеквадратическая погрешность горизонтального круга	5"
Среднеквадратическая погрешность вертикального круга	5"
Среднеквадратическая погрешность измерения расстояний	2 мм
Погрешность измерения расстояний на каждый километр	2 мм

На первом этапе экспериментальных исследований руководствовались положениями ГОСТ 8,565-99, с целью выбора той МХ, которой соответствовал наибольший процент отбраковки при поверке электронных тахеометров класса точности 5".

На втором этапе в соответствии с методикой РМГ 74-2004 испытаний на нестабильность МХ - максимального влияния эксцентриситета

вертикального круга на измеряемый угол (ЭВК) - была сформирована выборка объемом $N=30$ тахеометров для получения статистических данных.

На третьем этапе в соответствии с ДСТУ 3004-95 на основе методики планирования испытаний на надежность применительно к предельным состояниям - NMT определяли продолжительность испытаний, равную 3000-м часов эксплуатации [10]. Продолжительность испытаний определяли с доверительной вероятностью $\gamma=0.80$ и предельной относительной ошибкой $\delta=0.20$ при значении средней наработки на отказ равной 3000-м часов в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51774-2001 к надежности электронных тахеометров типов Та2, Та5 и Та20 согласно значениям ряда предпочтительных чисел R40 по ГОСТ 8032-84 [11, 12]. Для учета влияния механизмов износа и старения СИ испытания проводили на тахеометрах Та5 в нормальных условиях с интенсивностью эксплуатации 8 часов в день, что соответствует календарному времени работы, равному 9000 часов.

По результатам обработки данных протоколов испытаний для 30 единиц СИ были построены экспериментальные зависимости изменения во времени 95% и 5% квантилей, а также среднего значения ЭВК тахеометров класса точности 5" (рис.3).

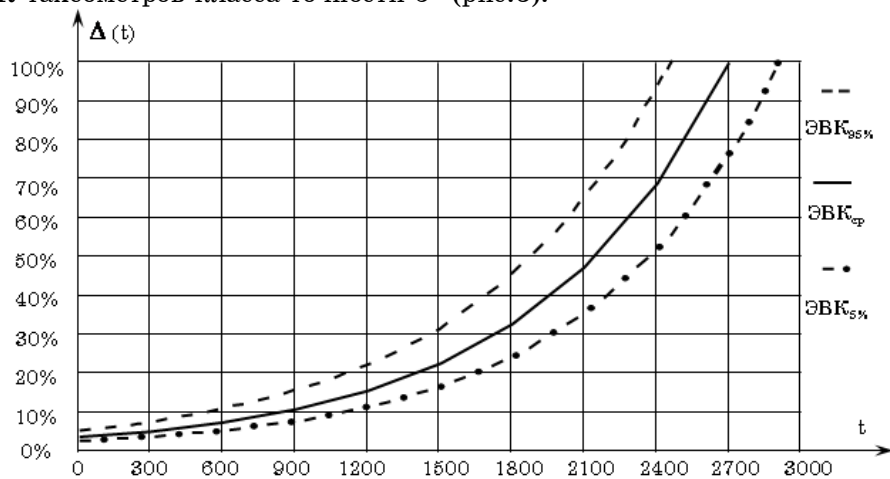


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости изменения во времени 95% и 5% квантилей, а также среднего значения ЭВК электронных тахеометров при продолжительности испытаний 3000 часов для выборки объема $N=30$

Получение оценок параметров ω_i , т.е. интенсивностей переходов между состояниями с целью определения прогнозируемых значений вероятности безотказности 95% квантили МХ тахеометров, осуществляли с использованием универсальной системы математического моделирования MathCAD. В результате вычислительных экспериментов были получены следующие значения интенсивностей переходов между состояниями 95% квантили ЭВК тахеометров (час⁻¹): $\omega_1=0,001587$, $\omega_2=0,001721$, $\omega_3=0,001811$, $\omega_4=0,001879$, $\omega_5=0,001940$, $\omega_6=0,001987$, $\omega_7=0,002036$, $\omega_8=0,002074$, $\omega_9=0,002108$.

Динамика изменения во времени вероятностей нахождения 95%-й квантили МХ в 10-ти различных состояниях, соответствующих различным уровням предельного значения погрешности - $\Delta_{пр}$, описывается системой дифференциальных уравнений (4), для решения которой были заданы начальные условия (5) и применен метод численного интегрирования Рунге-Кутты. Результаты математического

моделирования показаны в виде вероятностных графиков на рисунке 4, которые показывают суммарные вероятности достижения 95% квантилю ЭВК состояний 70%, 80% и 90% от предельно допустимого значения и позволяют принимать обоснованные решения о продолжительности оптимальных МПИ на основе оценок метрологической исправности электронных тахеометров.

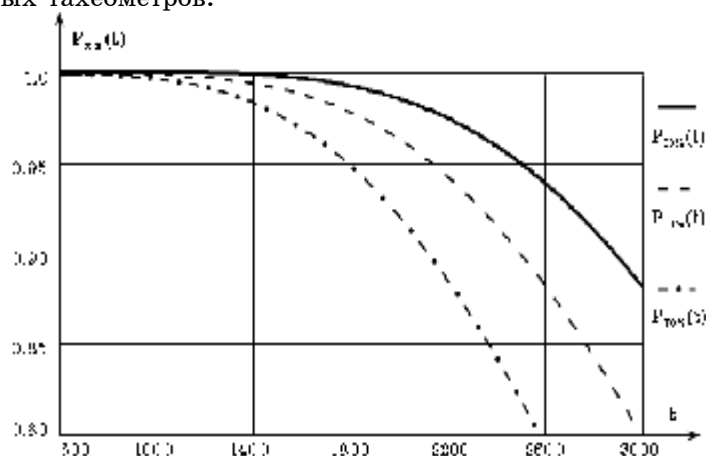


Рисунок 4 – Вероятности достижения 95% квантилю ЭВК тахеометров состояний 70%, 80% и 90% от предельно допустимого значения как функции времени для выборки объемом $N=30$

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные на рисунке 4 графики позволяют определить вероятность метрологической исправности СИ при достижении 95% квантилю ЭВК 70%, 80% и 90% состояний погрешности МХ от предельно допустимого значения. Так, например, при 2400 часах эксплуатации (7200 часах календарного времени работы) вероятность метрологической исправности тахеометров класса точности 5" составляет 0,84, 0,92 и 0,96 соответственно.

Применение вероятностных графиков (рис.4) позволило установить, что нормативным значениям вероятности метрологической исправности $P_{м.и.}$ (табл.1) соответствует диапазон времени эксплуатации тахеометров от 2870 часов при $P_{м.и.}=0,90$ до 2480 часов при $P_{м.и.}=0,95$ (табл.3).

Таблица 3 – Экспериментально определенные значения МПИ тахеометров класса точности 5"

Значение вероятности метрологической исправности	Продолжительность эксплуатации, (ч)	Значение МПИ, (месяцев)
0,90	2870	12
0,95	2480	10

Таким образом, экспериментально найденный диапазон времени эксплуатации тахеометров позволил определить оптимальные значения МПИ, равные 12 месяцам при $P_{м.и.}=0,90$ и 10 месяцам при $P_{м.и.}=0,95$, что соответствует значениям ряда предпочтительных чисел нормативных документов РМГ 74 – 2004 и ГОСТ 8,565-99, применяемых при назначении МПИ. В соответствии с РМГ 74 – 2004 оптимальное значение МПИ (Т) принимают при условии: $T=\min [T_1, T_2]$. Таким образом, значение МПИ электронных тахеометров класса точности 5" соответствует 10 месяцам.

ВЫВОДЫ

1. На основе теории цепей Маркова с дискретными состояниями и непрерывным временем и экспериментальных исследований нестабильности МХ разработана математическая модель вероятностной оценки и прогнозирования метрологической надежности электронных тахеометров.

2. Применение предлагаемого подхода к созданию моделей прогнозирования и вероятностной оценки метрологической надежности позволяет определить продолжительность оптимального МПИ прецизионных СИ. Предлагаемая методика прогнозирования отличается от известных тем, что позволяет создавать статистические модели непосредственно по экспериментальным данным и не приводит к проблемам неадекватности получаемых результатов, которые имеют место в случае создания физических моделей.

3. Применение полученных вероятностных графиков с учетом нормированного критерия вероятности метрологической исправности СИ позволило определить оптимальный МПИ электронных тахеометров класса точности 5", равный 10 месяцам.

SUMMARY

PROGNOSTICATION AND PROBABILISTIC ESTIMATION OF METROLOGY RELIABILITY OF PRECISION MEASUREMENTS FACILITIES

*S.S. Fedin, N.A. Zubreckaya, G.I. Voychenko**
Kiev National University of technologies and design.
E-mail: sergey_fedin@bigmir.net, zubr_27@mail.ru,
*Sumy State University
E-mail: info@ksu.sumdu.edu.ua

In the article on the basis of theory Markov's chains with the discrete conditions and continuous time and experimental researches of precision measuring apparatuses stability the mathematical model of forecasting and probabilistic estimation of metrology reliability of electronic takheometers is developed. Application of the developed model allowed to define the optimum interesting interval of electronic takheometers of 5" exactness class taking into account the normative criterion of probability of metrological serviceability of measuring apparatuses.

Keywords: forecasting, probabilistic estimation, metrology reliability, interesting interval, precision measuring apparatuses, electronic takheometr.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Екимов А.В. Надежность средств измерительной техники / А.В. Екимов, М.И. Реваков. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 206 с.
2. Фридман А.Э. Теория метрологической надежности средств измерений // Измерительная техника. - 1991. - №11. - С. 3-10.
3. Новицкий П.В. Динамика погрешностей средств измерений/ П.В. Новицкий, И.А. Зограф, В.С.Лабунец. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 193 с.
4. РМГ 74-2004. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. - Взамен МИ 2187-92. Введ. 01.03.2005. - М.: Госстандарт России, 2004. - 22 с.
5. ГОСТ 8.565-99. Порядок установления и корректировки межповерочных интервалов эталонов. Межгосударственный стандарт – Введ. 01.07.2000. – М.: Госстандарт России, 1999. – 13 с.
6. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Сов. радио, 1977. - 200 с.
7. Серая О.В. Оценка безотказности немарковских систем // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2009. - №1(9). - С. 132 - 136.
8. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Чинний від 01.01.96 – К.: Держстандарт України, 1996. - 32 с.
9. Методика поверки МПУ 164/01-2003. Нивелиры. Теодолиты. Тахеометры (Угломерная часть) Введ. 23.05.2003. – К.: Укрметртестстандарт, 2003. - 33 с.
10. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Чинний від 01.01.97 – К.: Держстандарт України, 1995. - 123 с.
11. ГОСТ Р 51774-2001. Тахеометры электронные. Общие технические условия. Введ. 01.07.2002. – М.: Госстандарт России, 2001. - 13 с.
12. ГОСТ 8032-84 Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел. Введ. 01.07.85. – М.: Издательство стандартов, 1987. - 18 с.

Поступила в редакцию 22 мая 2009 г.