

ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОНОМНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕЁ РЕШЕНИЯ

Юхнов В.И.¹, Безуглов Д.А.², Решетникова И.В.¹, Енгибарян И.А.¹

¹Северо-Кавказский филиал ФГБОУ ВО МТУСИ, Ростов-на-Дону, Россия (344002 Россия г. Ростов-на-Дону, ул.Серафимовича, 62) e-mail: juchnov@mail.ru;

²ФГБОУ ВО Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: bezuglovda@mail.ru

При переходе системы метрологического обеспечения на автономный принцип иерархии основным показателем является время, в течение которого метрологические органы способны обеспечить выполнение измерительных задач без участия сторонних поверочных организаций. Во многом, продолжительность метрологической автономности обусловлена возможностью средств измерений достоверно хранить, воспроизводить и передавать размер единиц величин нижестоящим средствам измерений и рабочим эталонам. Эта возможность для средств измерений гарантирована в интервале времени между периодическими поверками, т.е. в течение их межповерочного интервала. Величина межповерочного интервала должна быть оптимальной, поскольку частые поверки приводят к материальным и трудовым затратам на их организацию и проведение, а редкие — могут привести к повышению погрешности измерений из-за метрологических отказов. Проведенный анализ средств измерений, предназначенных для хранения, воспроизведения и передачи размера единиц величин в условиях метрологической автономности показал, что наиболее предпочтительным является использование групповых эталонов единиц величин и автоматизированных поверочных комплексов, созданных на основе групповых эталонов.

Ключевые слова: уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова, метрологические характеристики

THE PROBLEM OF DETERMINING THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF AUTONOMY OF MEASUREMENTS AND MAIN AREAS OF ITS DECISION

Yukhnov V.I.¹, Bezuglov D.A.², Reshetnikova I.V.¹, Engibaryan I.A.¹

¹North Caucasian branch Moscow Technical University of Communications and Informatics, Rostov-on-don, Russia (344002 Russia, Rostov-on-don, street Serafimovicha, 62) e-mail: juchnov@mail.ru

²Rostov state transport University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: bezuglovda@mail.ru

When changing the system of metrological support to the principle of hierarchy of autonomous main indicator is the time during which the metrological authorities are able to ensure the implementation of measurement tasks without the involvement of third-party verification organizations. In many ways, the duration of metrological autonomy due to the possibility of measuring reliably store, reproduce and transmit the size measurement units subordinate measuring instruments and working standards. This capability for measuring guaranteed in the time interval between periodic verification, ie during their recalibration interval. The value of recalibration interval should be optimal, since frequent calibration result in material and labor costs to their organization and conduct, and rarely - can lead to an increase in the measurement error due to the metrological failures. The analysis of measuring instruments for storage, playback and transfer of the quantities of units in a metrological autonomy showed that the most preferred is the use of group measurement standards and calibration of automated systems created on the basis of group standards.

Keywords: Fokker-Planck-Kolmogorov metrological characteristics

Время, в течение которого можно достоверно хранить, воспроизводить и передавать размер единиц величин, определяется в рамках модели «процесс – допустимая граница» [1, 2]. Данную модель можно охарактеризовать тремя основными параметрами: временем T выхода метрологической характеристики $x(t)$, характеризующей функционирование группового эталона, за пределы допуска; вероятностью U работоспособного состояния группового эталона в заданный момент времени; границами G_d допусков на параметры.

Цель работы: постановка задачи определения метрологических характеристик автономных средств измерений на основе решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова.

Рассмотрим модель на основе уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова. При использовании данной модели считается, что работоспособность групповых эталонов (возможность достоверно хранить, воспроизводить и передавать размер единицы величины) обеспечивается поддержанием их характеристик в границах допустимой области. Метрологический отказ – это выход хотя бы одного параметра за эти границы.

Состояние $x_0 = x(t_{Gd})$, при котором $x(t)$ находится в области G_d , соответствует работоспособному состоянию группового эталона, а состояние $x_m = x(m)$ – отказу, при этом условие работоспособности будет

$$P(t) = P\{x(t) \in G_d, t = [t_0, T]\}, \quad (1)$$

где $x(t)$ – вектор метрологических характеристик группового эталона;

$P\{\cdot\}$ – вероятность соответствующего события.

Для использования рассмотренной модели надежности типа «процесс – допустимая граница» задаются законом эволюции метрологических характеристик в виде диффузионного марковского процесса.

В условиях эксплуатации групповых эталонов единиц величин при нахождении межповерочных интервалов возникает необходимость учета метрологических характеристик, определяющих состояние метрологической исправности групповых эталонов. В качестве таких характеристик, как правило, используются основная погрешность, среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной составляющей погрешности и некоторые другие. Если состояние метрологической исправности определяют несколько метрологических характеристик, то из них выбирается та, по которой обеспечивается наибольший процент брака при поверках. В дальнейшем, в качестве такой характеристики воспользуемся основной погрешностью групповых эталонов. С учетом нелинейности преобразований метрологических характеристик, характеризующих функционирование групповых эталонов, определение времени выхода метрологических характеристик, за пределы допуска должно осуществляться на основе решения эволюционных уравнений (типа Фоккера-Планка-Колмогорова). При этом для обеспечения гарантированного определения необходимо обеспечить высокую точность решения эволюционных уравнений.

Так как точное решение эволюционных уравнений возможно лишь в редких случаях [5], то на практике, как правило, ограничиваются применением различных приближенных численных методов интегрирования [3]. При этом большинство из этих методов связано с необходимостью проведения численного интегрирования системы обыкновенных

дифференциальных уравнений, описывающей эволюцию во времени параметров, характеризующих априорную плотность вероятности для уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова.

Применение аппарата теории марковских процессов для анализа моделей эволюции метрологических характеристик группового эталона, описанных дифференциальными уравнениями (с указанием начальных и граничных условий) или функциональных соотношений, предполагает разработку общего подхода к анализу метрологических характеристик, описываемых эволюционными уравнениями. При этом должны соблюдаться изложенные ранее требования к моделям эволюции метрологических характеристик и последовательно выполняться следующие этапы:

- проверка соответствия рассматриваемого процесса эволюции метрологических характеристик группового эталона марковскому;

- если рассматриваемый процесс марковский, то вычисление локальных характеристик процесса: коэффициентов сноса и диффузии;

- запись уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова и указание соответствующих начальных и граничных условий для плотности вероятности $p(t, \lambda)$;

- нахождение точного или приближённого решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова тем или иным методом.

Одним из основных преимуществ аппарата марковских процессов является возможность определения метрологических характеристик группового эталона единицы величины на основе решения задачи определения времени первого достижения границы [2, 4].

Математическая постановка задачи. Пусть $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_r$ – множество r независимых основных погрешностей хранителей группового эталона, распределённых по нормальному закону

$$d\Delta_i / dt = n_i(t), \quad \Delta_i(0) = 0, \quad i = \overline{1, r}, \quad (2)$$

Согласно центральной предельной теореме совместное распределение основных погрешностей хранителей группового эталона $\Delta_i, i = \overline{1, r}$ характеризующее основную погрешность группового эталона λ также нормально [3].

В качестве основной погрешности группового эталона принимается некоторая функция от погрешностей хранителей λ . Процесс изменения которой может быть представлен в виде приближённого к винеровскому процесса, являющегося гауссовским нестационарным процессом с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, пропорциональной времени, определяемым с помощью стохастического дифференциального

уравнения

$$d\lambda / dt = n(t), \quad \lambda(0) = 0. \quad (3)$$

На рис. 1 представлена графическая модель эволюции основной погрешности группового эталона.

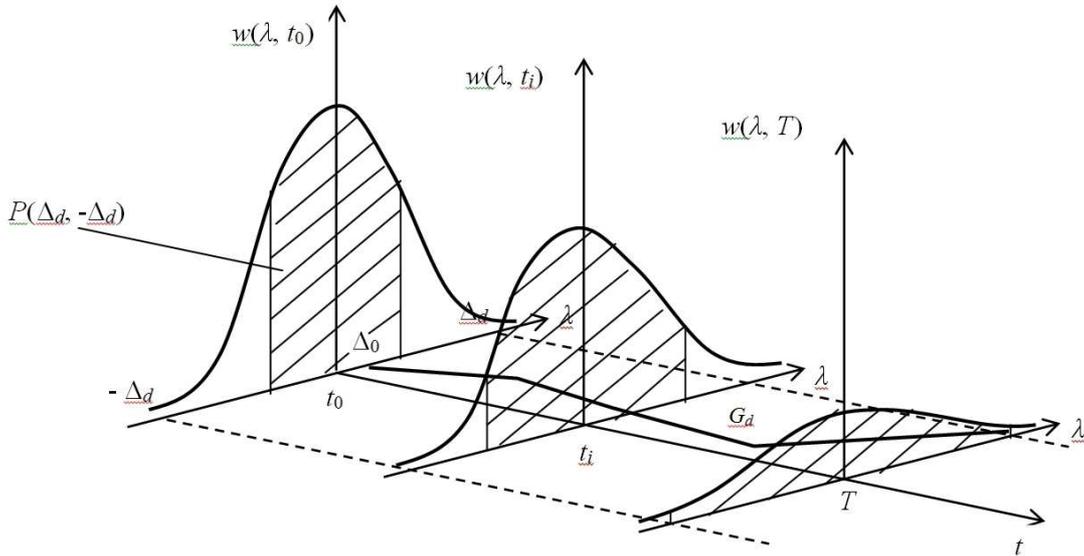


Рис.1. Эволюция основной погрешности группового эталона

В качестве метрологического отказа группового эталона принимается выход его основной погрешности λ за границу допустимых значений $-\Delta_d$ и Δ_d области G_d . Тем самым, вероятностью безотказной работы группового эталона будет вероятность $U(\lambda, t)$ не выхода процесса эволюции основной погрешности группового эталона $\lambda(t)$ из этой области

$$U(\lambda, t_0) \equiv P\{\lambda(t) \in G_d, \forall t \in [t_0, T] \mid \lambda(t_0) \in G_d\}, \quad G_d \subset [-\Delta_d, \Delta_d], \quad (4)$$

где $U(\lambda, t)$ – вероятность того, что ордината λ процесса $\lambda(t)$ ни разу не выйдет за границы допустимой области $G_d \subset [-\Delta_d, \Delta_d]$ на интервале $[t_0, T]$ при условии, что в начальный момент времени $t=t_0$ значение основной погрешности группового эталона $\lambda=\lambda_0$ находилась в допустимой области G_d .

С учетом марковских свойств приближённого к винеровскому процесса эволюция плотности распределения основной погрешности хранителя единицы величины удовлетворяет следующим дифференциальным уравнениям в частных производных (уравнению Фоккера-Планка-Кологорова) в обратном времени [4]

$$-\frac{\partial w(\Delta_1, t_0)}{\partial t_0} = \frac{1}{2} K_{2(1)} \frac{\partial^2 w(\Delta_1, t_0)}{\partial \Delta_1^2}, \quad w(\Delta_1, t_0) = w_0(\Delta_1), \quad (5)$$

где $w(\Delta_1, t_0)$ – плотности распределения основной погрешности хранителя группового эталона;

$K_{2(1)}$ - коэффициент диффузии изменения основной погрешности хранителя группового эталона $\Delta_1(t)$.

Сделав замену переменных $t = T - t_0$, получаем

$$\frac{\partial w(\Delta_1, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} K_{2(1)} \frac{\partial^2 w(\Delta_1, t)}{\partial \Delta_1^2}. \quad (6)$$

Второе (прямое) уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова запишется в виде

$$\frac{\partial w(\Delta_1, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial \Delta_1^2} [K_{2(1)} w(\Delta_1, t)], \quad w(\Delta_1, t_0) = w_0(\Delta_1). \quad (7)$$

Таким образом, при задании граничных условий, исходя из конкретной задачи, характеристики группового эталона в момент достижения границ допустимой области могут быть получены с учётом соотношений (5) – (7). Границы задаются требованиями ГОСТов, технических условий, других руководящих документов.

Для многомерного случая математическая постановка задачи определения метрологических характеристик группового эталона с использованием эволюционных уравнений выглядит следующим образом. С учетом марковских свойств приближённого к винеровскому процесса (4) плотность распределения основной погрешности группового эталона удовлетворяет следующему прямому уравнению Фоккера-Планка-Кологорова [4, 6, 7]

$$\frac{\partial w(\Delta_1, \dots, \Delta_r, t)}{\partial t} = \frac{K_{2r}}{2} \sum_{i=1}^r \frac{\partial^2 w(\Delta_1, \dots, \Delta_r, t)}{\partial \Delta_i^2} = L_t \{w(\Delta_1, \dots, \Delta_r, t)\},$$

$$w(\Delta_1, \dots, \Delta_r, t_0) = w_0(\Delta_1, \dots, \Delta_r), \Delta_i \in R^1, t \in R^1, i = \overline{1, r}, \quad (8)$$

где $w(\Delta_1, \dots, \Delta_r, t)$ - совместная плотность распределения основных погрешностей хранителей группового эталона $\Delta_i, i = \overline{1, r}$

K_{2r} – коэффициент диффузии изменения основной погрешности группового эталона.

L_t – оператор ФПК эволюционного уравнения.

Для построения эволюционного уравнения требуется определить локальные характеристики исследуемого процесса. В случае винеровского описания (8) необходимо определить коэффициент диффузии изменения основной погрешности группового эталона K_{2r} . Данная задача может быть решена на основе исследования случайной и неисключённой систематической погрешности группового эталона [6,7].

В качестве основных показателей определения метрологических характеристик группового эталона выбрана точность при условии обеспечения заданной (гарантированной) достоверности воспроизведения единицы величины.

Для определения метрологических характеристик по результатам взаимных сличений хранителей группового эталона в условиях метрологической автономности принята модель основной погрешности хранителя единицы величины вида

$$\Delta_i(t) = X_i(t) - X_0, \quad i = \overline{1, r}, \quad (9)$$

где X_i - значение единицы величины i -го хранителя группового эталона;

X_0 - значение единицы величины исходного эталона.

Система уравнений взаимных сличений хранителей группового эталона представлена выражением

$$X_j - X_i = (X_0 + \Delta_j) - (X_0 + \Delta_i) = \Delta_j - \Delta_i = \gamma_{i(j)} + n_{i(j)}, \quad j > i, \quad i, j = \overline{1, r}, \quad (10)$$

где $\gamma_{i(j)}$ - взаимная основная погрешность j -го хранителя;

$n_{i(j)}$ - шумы сличений.

Поскольку групповой эталон может быть сформирован как из равноточных так и неравноточных хранителей, необходимо ввести в систему (8) некоторые весовые коэффициенты сличений, являющиеся функцией от допустимых погрешностей соответствующих хранителей

$$W_{i(j)} = F[\Delta_{D_i}, \Delta_{D_j}], \quad i, j = \overline{1, r}. \quad (11)$$

Система весовых уравнений взаимных сличений хранителей группового эталона примет вид

$$(\Delta_j - \Delta_i) W_{i(j)} = (\gamma_{i(j)} + n_{i(j)}) W_{i(j)}, \quad j > i, \quad i, j = \overline{1, r}. \quad (12)$$

Таким образом, теоретической основой построения автономных средств измерений может являться разработка высокоточных методов определения основных метрологических характеристик группового эталона посредством решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (8) для приближенной к винеровской модели эволюции основной погрешности с совместным решением системы весовых уравнений взаимных сличений хранителей группового эталона.

Выводы

Метрологические характеристики автономных средств измерений изменяются в процессе эксплуатации. Законы эволюции метрологических характеристик, характеризуются различными математическими зависимостями, как правило, - нелинейными и являются стохастическими. Для оценки состояния любого средства измерений в будущие моменты времени необходимо выбрать адекватную модель эволюции его метрологических характеристик [8, 9]. Дрейф метрологических характеристик автономных средств измерений

представляется в виде нелинейного инерционного преобразования, описанного соответствующими дифференциальными уравнениями. Наиболее точное решение подобных уравнений получается при условии марковской аппроксимации процесса эволюции метрологических характеристик. Точное решение эволюционных уравнений возможно лишь в редких случаях, поэтому на практике, как правило, ограничиваются применением различных приближенных численных методов интегрирования. При этом большинство из этих методов связано с необходимостью проведения численного интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающей эволюцию во времени параметров, характеризующих априорную плотность вероятности для уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова. В качестве основной метрологической характеристики (погрешности) группового эталона принимается некоторая функция от погрешностей хранителей, процесс изменения которой представляется в виде приближённого к винеровскому процесса.

Список литературы

1. Безуглов Д. А., Поморцев П. М. Автономные средства измерений / монография; Ростовская акад. сервиса (фил.), Южно-российский гос. ун-т экономики и сервиса. Ростов-на-Дону, 2007. 168 с.
2. Безуглов Д.А., Поморцев П.М. Методика увеличения межповерочного интервала групповой меры //Измерительная техника. 1998. № 11. С. 3
3. Безуглов Д.А., Кузин А.П., Решетникова И.В., Юхнов В.И. Информационная технология идентификации изображений // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-16. С. 3466-3470.
4. Безуглов Д.А., Поморцев М.П., Поморцев П.М. Синтез алгоритмов субоптимального оценивания единиц физических величин групповых эталонов // Вопросы радио-электроники. 2002. № 1. С. 254.
5. Безуглов Д.А., Решетникова И.В., Юхнов В.И., Енгибарян И.А. Оптимальное оценивание сигналов в гартмановском датчике на фоне пуассоновских шумов // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-16. С. 3471-3475.
6. Безуглов Д.А., Решетникова И.В., Юхнов В.И., Ячменов А.А. Оптимальная оценка сигналов в адаптивных оптических системах передачи информации // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 1 (53). С. 30-35.
7. Безуглов Д.А., Рытиков С.Ю., Швидченко С.А. Метод вейвлет-дифференцирования в задаче выделения контуров // Успехи современной радио-электроники. 2012. № 6. С. 52-57.

8. Безуглов Д.А., Цугурян Н.О. Дифференцирование результатов измерений сглаживающими кубическими В-сплайнами // Современные информационные технологии. 2005. № 1. С. 73-78.

9. Безуглов Д.А., Юхнов В.И. Метод определения параметров движения точечного источника с использованием высокоточных алгоритмов адаптивной оптики // В сборнике: Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2014» в 4-х частях. Ростов-на-Дону, 2014. С. 23-25.

Рецензенты:

Звезда М.Ю., д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой «Радиоэлектроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону.

Габриэльян Д.Д., д.т.н., профессор, заместитель начальника научно-технического комплекса «Антенные системы» по науке, Федеральный научно-производственный центр ФГУП «РНИИРС», г. Ростов-на-Дону.