

УДК 78.21.35

Стохастическая модель функционирования эталона единицы величины в условиях поступления дополнительных средств измерений на метрологическое обслуживание

Ширямов О. А.

Постановка задачи: усложнение современных образцов вооружения и военной техники вызывают необходимость точных измерений их многочисленных параметров. Достижение и поддержание требуемого качества измерений зависит не только от точности проведения измерений, но и от мероприятий по обеспечению их единства. Важнейшим условием обеспечения единства измерений является соблюдение единообразия средств измерений, в основе которого лежит система передачи единиц величин. К настоящему времени накопился достаточно большой объем теоретических исследований по различным вопросам, связанным с построением системы передачи единиц величин в отдельных видах измерений. К сожалению, среди них отсутствуют работы по построению системы в условиях неопределенности информации о состояниях метрологических пунктов, используемых при передаче единицы величины. Указанная неопределенность связана с возможностью перехода пунктов в неработоспособное состояние вследствие воздействия различных внешних и внутренних факторов. **Целью работы** является разработка стохастической модели функционирования эталона при передаче единицы величины в условиях дополнительно поступающих нижестоящих по точности эталонов с целью обеспечения функциональной живучести системы передачи единиц величин. **Используемые методы:** предложено рассматривать процесс функционирования эталона как полумарковский процесс во временной области, основанный на принципе вероятностного баланса. Временные характеристики заменяются их изображениями в преобразовании Лапласа. Представлены условные вероятности переходов, определяющие выбор дальнейшего движения случайного процесса из состояний графа функционирования эталона единицы величины. **Результат:** использование представленного решения позволяет определить значение вероятности передачи единицы величины метрологическим пунктом при поступлении дополнительных потоков нижестоящих по точности эталонов. **Практическая значимость:** представленное решение предлагается применять в случае необходимости изменения структуры системы передачи единицы величины при переходе пунктов в неработоспособное состояние.

Ключевые слова: модель функционирования эталона единицы величины, система передачи единиц величин, граф состояний и переходов, вероятность передачи единицы величины.

Введение

В настоящее время развитие военной метрологии направлено на преодоление определенных трудностей, связанных с удорожанием и усложнением вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ). Следствием этого является многократное увеличение количества средств измерений военного назначения

Библиографическая ссылка на статью:

Ширямов О. А. Стохастическая модель функционирования эталона единицы величины в условиях поступления дополнительных средств измерений на метрологическое обслуживание // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 1. С. 95-108. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/04-Shiryamov.pdf>.

Reference for citation:

Shiryamov O. A. Stochastic Model of Functioning of a Measurement Standard in Conditions when a Additional Measuring Instruments Receipt into Metrological Maintenance. Systems of Control, Communication and Security, 2018, no. 1, pp. 95-108. Available at: URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/04-Shiryamov.pdf>.

(СИВН), необходимых для поддержания боеготовности и эффективности применения ВВСТ [1].

Необходимым условием использования СИВН является проведение мероприятий по их метрологическому обслуживанию. В связи с чем в Вооруженных Силах (ВС) Российской Федерации (РФ) создана система передачи единиц величин (СПЕВ), обеспечивающая единство измерений и передачу размера единиц величин (ЕВ) от военных эталонов (ВЭ) к СИВН [2] (рис. 1).

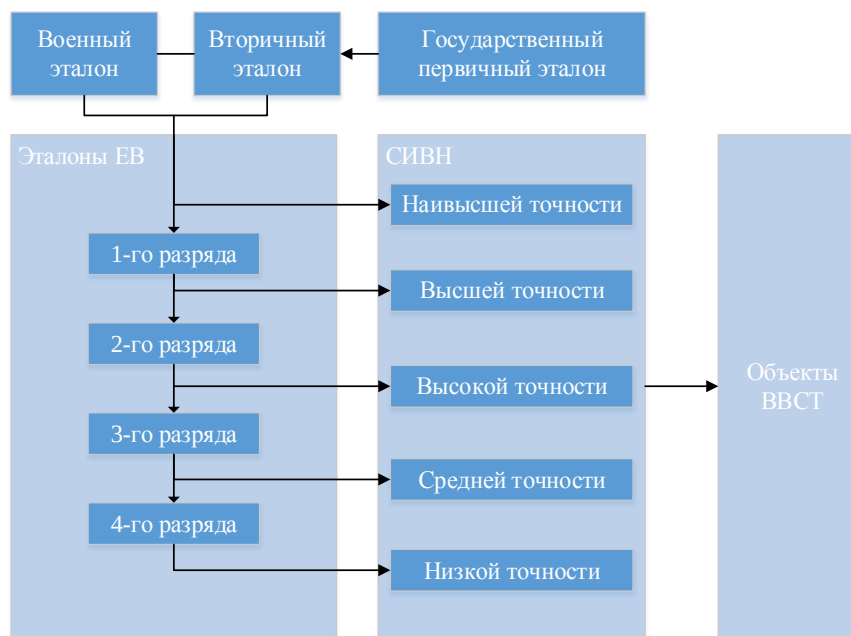


Рис. 1. Порядок передачи размера ЕВ в ВС РФ

С позиции системного подхода СПЕВ является многоуровневой системой, в которой на каждом уровне расположены поверочные установки и эталоны ЕВ (ЭЕВ), необходимые для аттестации нижестоящих по разряду ЭЕВ и поверки СИВН.

От ВЭ, находящихся в Главном научном метрологическом центре Минобороны России, значения ЕВ передаются ЭЕВ 1–2 разряда, которые являются менее точными. Далее, от ЭЕВ 1–2 разряда, значения ЕВ передаются ЭЕВ 2–3 разряда, а от тех – ЭЕВ 3–4 разряда. Затем значения ЕВ передаются к СИВН, обслуживающих ВВСТ в месте их эксплуатации. Следует отметить, что для каждой конкретной ЕВ (частоты, напряжения и т.д.) строится своя подсистема СПЕВ, которая определяется путем выбора наиболее рационального варианта поверочной схемы на основании расчета и анализа характеристик этих вариантов.

Обоснование структуры и параметров поверочных схем выполняют в соответствии с МИ 2230-92 [3]. Помимо этой методики существует немало работ, посвященных вопросу обоснования структуры СПЕВ, основными из них являются [4], [5], [6]. Однако, существующий научно-методический аппарат не учитывает особенности обеспечения единства измерений в сфере обороны и безопасности, в частности, специальные требования к ее живучести. Следовательно-

но, работы, направленные на обоснование структуры СПЕВ ВС РФ являются актуальными и имеют важные значения для обороноспособности страны.

Постановка задачи

Для формализации решаемой задачи введем следующие обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
$G(V, E)$	– множество вершин и ребер в исходном графе СПЕВ;
$V=\{v_{ij}\}$	– множество вершин в графе СПЕВ, соответствующих метрологическим пунктам в рассматриваемой СПЕВ;
M	– количество вершин на i -ом ярусе графа СПЕВ;
N	– количество ярусов графа СПЕВ;
$E=\{e_{ij}\}$	– множество ребер в графе СПЕВ, соответствующих подчиненности метрологических пунктов согласно разработанным поверочным схемам;
$\lambda(t)$	– интенсивность поступления ЭВ для аттестации;
$\mu(t)$	– интенсивность передачи ЕВ ЭВ.

В общем виде процесс передачи ЕВ является связным стохастическим ациклическим графом $G(V, E)$, представленным на рис. 2.

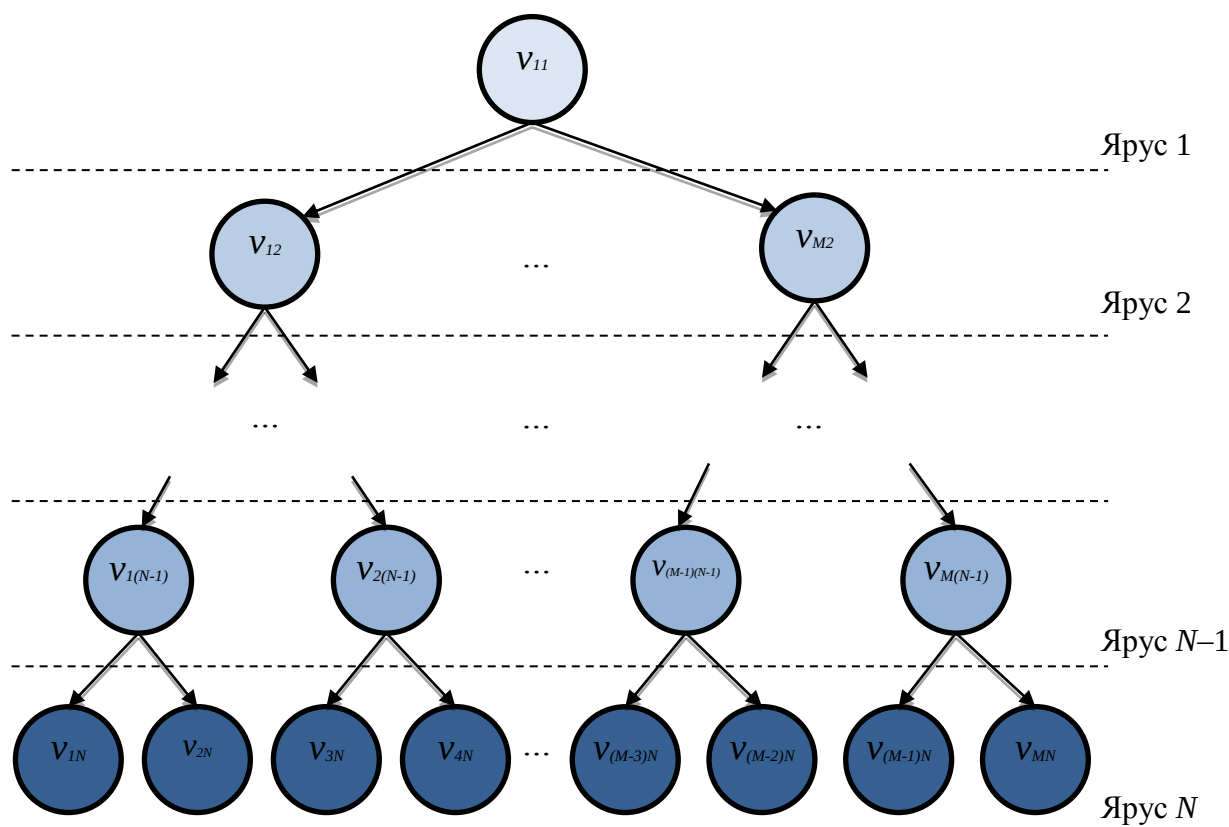


Рис. 2. Граф $G(V, E)$ передачи ЕВ

Под живучестью СПЕВ понимается способность системы обеспечить передачу ЕВ от яруса 1 до яруса N в условиях возможного перехода любой из

вершин v_{ij} графа $G(V, E)$ в неработоспособное состояние вследствие различных внутренних и внешних воздействий, в том числе дестабилизирующего воздействия противника.

В каждой из вершин v_{ij} располагается ЭЕВ. К нему в течение времени t с интенсивностью λ поступает поток нижестоящих по точности ЭЕВ, которым передается значение ЕВ с интенсивностью μ . Таким образом, граф состояний и переходов функционирования ЭЕВ можно описать следующим процессом (рис. 3).

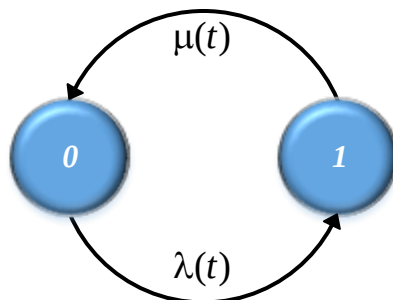


Рис. 3. Граф состояний и переходов функционирования ЭЕВ

В данном графе состоянию 0 соответствует состояние, при котором ЭЕВ выполнил передачу ЕВ, а состоянию 1 – состояние при котором производится передача ЕВ.

Однако, при переходе любой вершины v_{ij} графа $G(V, E)$ в неработоспособное состояние, нагрузка по передаче ЕВ смежных с ней вершин на нижестоящем ярусе $\Gamma(v_{ij}) = \{v_{i(j+1)} \in V: (v_{ij}, v_{i(j+1)}) \in E\}$, переходит на другие вершины v_{sk} ($s=1, M \mid s \neq i; k=\overline{1, j}$). При для поддержания функционирования СПЕВ необходимо проводить изменение ее структуры. На рис. 4 красные и зеленые стрелки показывают варианты изменения структуры СПЕВ при отказе элемента, который соответствует вершине $v_{2(N-1)}$.

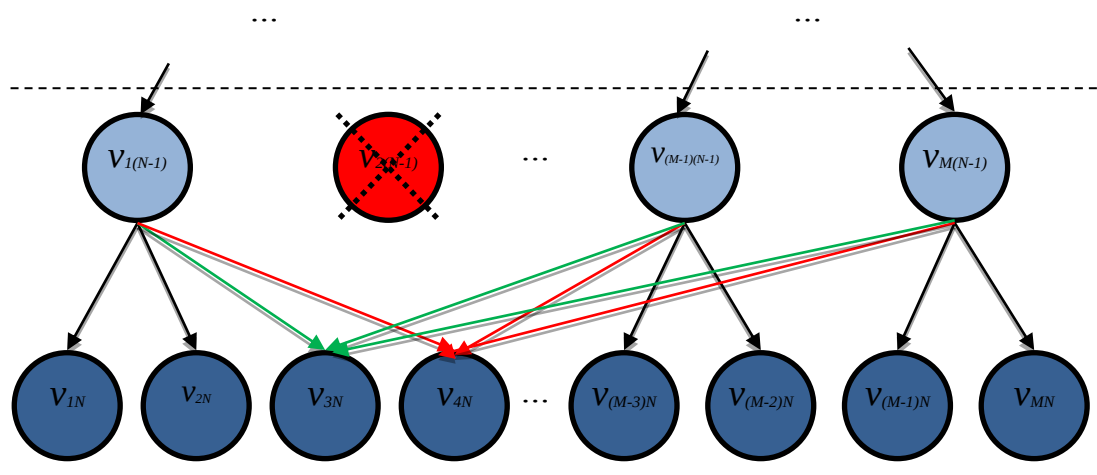


Рис. 4. Вариант изменения структуры графа $G(V, E)$ в условиях перехода вершины в неработоспособное состояние

Вследствие изменения структуры, количество состояний и переходов функционирования ЭЕВ для каждой из таких вершин будет увеличиваться в

соответствии с числом дополнительных потоков нижестоящих ЭЕВ, поступающих для передачи ЕВ (рис. 5).

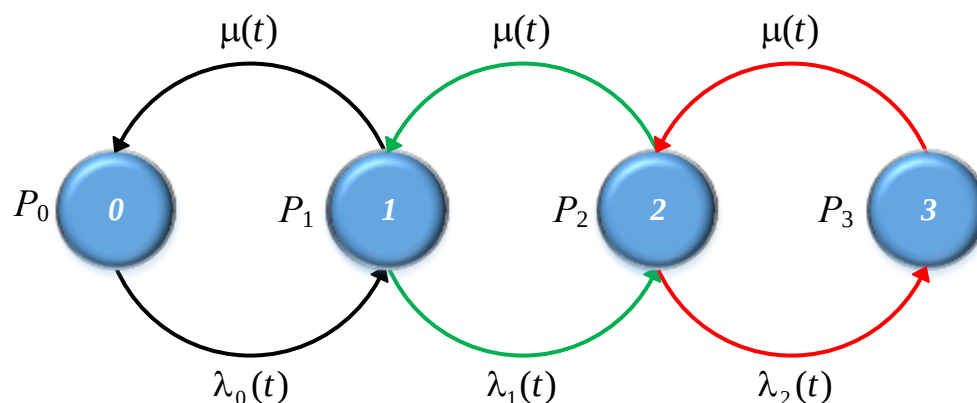


Рис. 5. Граф состояний и переходов функционирования ЭЕВ в условиях дополнительных потоков нижестоящих ЭЕВ

При изменении структуры СПЕВ необходимо определить какая из возможных вершин с наибольшей вероятностью сможет осуществить передачу ЕВ, которая соответствует вероятности нахождения ЭЕВ в состоянии 0 – P_0 .

Модель функционирования эталона при передаче единицы величины

Для определения вероятности пребывания объекта в том или ином состоянии очень большое распространение получили математические модели, в которых используются марковские процессы.

Марковский процесс является случайным процессом с дискретным временем, у которого переходы осуществляются через некоторый интервал времени Δt , а длительность пребывания в каждом из состояний равна некоторому дискретному шагу. В следствие этого, марковский процесс обладает характерными математическими свойствами:

- стационарности, т.е. его переходные вероятности и длительности пребывания в том или ином состоянии не зависят от того, в какой времени мы рассматриваем этот процесс;
- отсутствие последействия, т.е. вся последующая траектория переходов процесса из состояния зависит только от текущего состояния и не зависит от всех прошлых событий этого процесса или от любой ее части.

Однако, в процессе функционирования ЭЕВ, пребывания процесса в i -ом состоянии и перехода в него имеет временное распределение, связанное с временем доставки ЭЕВ между пунктами и временем на передачу им ЕВ, а также с предысторией их поступления. Такой процесс является частным случаем так называемого полумарковского процесса.

Полумарковский процесс задается переходными вероятностями так называемой вложенной марковской цепи p_{ij} и условными распределениями $F_{ij}(t)$

длительности пребывания процесса в состоянии i при условии, что из этого состояния произойдет переход именно в состояние j [7].

Таким образом, граф состояний и переходов процесса функционирования ЭЕВ должен содержать на дугах графа переходную вероятность и условное распределение времени пребывания в данном состоянии в случае перехода по данной дуге.

Для определения вероятности нахождения системы в каком-либо состоянии во временной области разработана модель одноканальной нестационарной системы с произвольными распределениями моментов времени поступления заявок и длительностей их обслуживания, представленная в работах [8, 9]. Модель основана на принципе вероятностного баланса при составлении уравнений состояний системы.

Под вероятностным балансом понимается состояние системы, когда среднестатистические характеристики входящих и выходящих случайных потоков взаимно уравниваются. При этом, временные характеристики, вероятности состояний, заменяются их изображениями в преобразовании Лапласа. Для составления уравнений баланса состояний необходимо использовать соответствующие произведения изображений с их последующим суммированием. Далее, применив обратное преобразование Лапласа можно определить вероятность нахождения системы в интересующем состоянии.

Стоит отметить, что в данных работах [8, 9] параметры переходов, связывающие все состояния на графе, считались идентичными. Однако, для модели функционирования ЭЕВ при передаче ЕВ прямые переходы для каждого из возможного состояния различные и будут определяться параметрами плотности распределения времени поступления потоков нижестоящих ЭЕВ. Обратные переходы будут постоянными при всех состояниях, так как является производственным возможностями ЭЕВ при передаче ЕВ.

Таким образом, граф состояний и переходов функционирования ЭЕВ в изображении Лапласа будет соответствовать рис. 6.

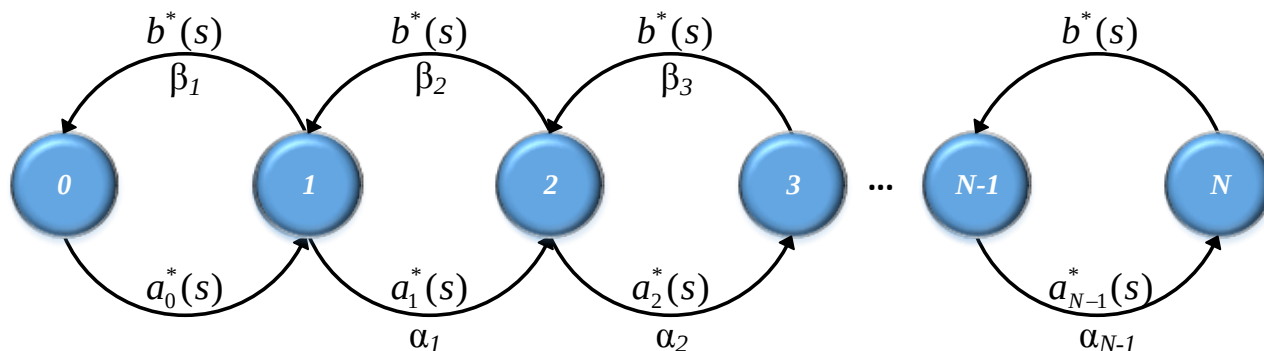


Рис. 6. Граф состояний и переходов функционирования ЭЕВ в изображении Лапласа

Граф состояния содержит переходы $a_i^*(s)$, связанные с изображениями по Лапласу плотностей вероятностей времени между поступлением дополнительных потоков и $b^*(s)$ – временем передачи им ЕВ.

Условные вероятности переходов α_i и β_i определяют выбор дальнейшего движения случайного процесса из состояний графа и определяются:

$$\alpha_i = \int_0^{\infty} \bar{B}(t) dA_i(t); \quad (1)$$

$$\beta_i = \int_0^{\infty} \bar{A}_i(t) dB(t). \quad (2)$$

При этом:

$$\bar{A}_i(t) = 1 - A_i(t);$$

$$\bar{B}(t) = 1 - B(t),$$

где $A_i(t)$ – функция распределения плотности вероятности поступления i -го потока нижестоящих ЭЕВ:

$$A_i(t) = \int_0^t a_i(z) dz;$$

$B(t)$ – функция распределения плотности вероятности передачи ЕВ эталоном:

$$B(t) = \int_0^t b(z) dz.$$

В соответствии с рисунком 7 и работами [8, 9] составим систему уравнений баланса:

$$\begin{cases} a_0^*(s)P_0^*(s) = \beta_1 b^*(s)P_1^*(s); \\ (\alpha_i a_1^*(s) + \beta_1 b^*(s))P_1^*(s) = a_0^*(s)P_0^*(s) + \beta_2 b^*(s)P_2^*(s); \\ \dots \\ b^*(s)P_N^*(s) = \alpha_{N-1} a_{N-1}^*(s)P_{N-1}^*(s). \end{cases}$$

где $P_i^*(s)$ – комплексной вероятности нахождения ЭЕВ в i -том состоянии.

Принимая во внимание условие нормирования изображений вероятностей состояний:

$$\sum_{i=0}^N P_i^*(s) = \frac{1}{s},$$

и решив систему уравнений, можно получить общую формулу для вычисления комплексной вероятности состояния 0:

$$P_0^*(s) = \frac{\left(\prod_{i=1}^{N-1} \beta_i \right) (b^*(s))^N}{s \left(\left(\prod_{i=1}^{N-1} \beta_i \right) (b^*(s))^N + \prod_{i=1}^{N-1} \alpha_i \prod_{i=0}^{N-1} a_i^*(s) + \sum_{i=0}^{N-2} \alpha_i a_i^*(s) \beta_{i+2} b^*(s) \right)},$$

где s – комплексная переменная Лапласа.

Так как временное распределение поступления нижестоящих ЭЕВ и передачи им ЕВ подчиняется нормальному закону распределения, то для перехода к не комплексной вероятности состояния P_0 , необходимо применить гипер-

дельтную аппроксимацию нормальной плотности по четырем начальным моментам [10]:

$$f_{н.ан}(t) = \frac{1}{2}(\delta(t - m - \sigma) + \delta(t - m + \sigma)),$$

где δ – дельта-функция Дирака;

m – математическое ожидание аппроксимируемого распределения;

σ – среднеквадратическое отклонение аппроксимируемого распределения.

Таким образом можно получить аппроксимационные формулы плотностей вероятностей поступления нижестоящих ЭЕВ и передачи им ЕВ:

$$a_i(t) = \frac{1}{2}(\delta(t - m_i^a - \sigma_i^a) + \delta(t - m_i^a + \sigma_i^a));$$

$$b(t) = \frac{1}{2}(\delta(t - m^b - \sigma^b) + \delta(t - m^b + \sigma^b)).$$

В изображениях Лапласа, при условии:

$$F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt,$$

они принимают вид:

$$a_i^*(s) = \frac{1}{2} \left(e^{-(m_i^a - \sigma_i^a)s} + \left(e^{-(m_i^a + \sigma_i^a)s} \right)^{\frac{m_i^a + \sigma_i^a}{m_i^a - \sigma_i^a}} \right),$$

$$b^*(s) = \frac{1}{2} \left(e^{-(m^b - \sigma^b)s} + \left(e^{-(m^b + \sigma^b)s} \right)^{\frac{m^b + \sigma^b}{m^b - \sigma^b}} \right).$$

Для получения выражения вероятностей состояний во временной области, необходимо применить приближенный способ обращения преобразования Лапласа с использованием формулы Алфрея, получаемой из формулы Уайдера [11], с учетом свойства фильтрации преобразования Лапласа с помощью дельта-функции:

$$f(t) \approx sf^*(s) \text{ при } s = \frac{1}{t}.$$

Это позволяет получить аналитическое выражение стационарного значения вероятности передачи ЕВ ЭЕВ:

$$\begin{aligned}
 P_0(t) = & \left(\prod_{i=1}^{N-1} \beta_i \right) \left(\frac{1}{2} \left(e^{-\frac{(m^b - \sigma^b)}{t}} + e^{\frac{-(m^b + \sigma^b)}{t}} \right)^{\frac{m^b + \sigma^b}{m^b - \sigma^b}} \right)^N \times \\
 & \times \left(\left(\prod_{i=1}^{N-1} \beta_i \right) \left(\frac{1}{2} \left(e^{-\frac{(m^b - \sigma^b)}{t}} + e^{\frac{-(m^b + \sigma^b)}{t}} \right)^{\frac{m^b + \sigma^b}{m^b - \sigma^b}} \right)^N + \right. \\
 & + \prod_{i=1}^{N-1} \alpha_i \prod_{i=0}^{N-1} \left(\frac{1}{2} \left(e^{-\frac{(m_i^a - \sigma_i^a)}{t}} + e^{\frac{-(m_i^a + \sigma_i^a)}{t}} \right)^{\frac{m_i^a + \sigma_i^a}{m_i^a - \sigma_i^a}} \right) + \\
 & \left. + \sum_{i=0}^{N-2} \alpha_i \left(\frac{1}{2} \left(e^{-\frac{(m_i^a - \sigma_i^a)}{t}} + e^{\frac{-(m_i^a + \sigma_i^a)}{t}} \right)^{\frac{m_i^a + \sigma_i^a}{m_i^a - \sigma_i^a}} \right) \beta_{i+2} \left(\frac{1}{2} \left(e^{-\frac{(m^b - \sigma^b)}{t}} + e^{\frac{-(m^b + \sigma^b)}{t}} \right)^{\frac{m^b + \sigma^b}{m^b - \sigma^b}} \right) \right)^{-1} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Пример

В качестве практического примера предлагается рассмотреть случай, приведенный на рис. 7.

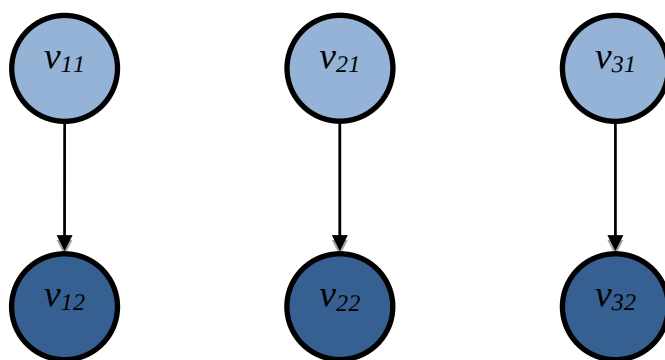


Рис. 7. Пример СПЕВ

Имеются три метрологических пункта v_{12} , v_{22} , v_{32} передающие ЕВ нижестоящим пунктам так, что $\Gamma(v_{11}) = \{v_{12}\}$, $\Gamma(v_{21}) = \{v_{22}\}$, $\Gamma(v_{31}) = \{v_{32}\}$.

Предположим, что вследствие неких дестабилизирующих воздействий пункт v_{21} перешел в неработоспособное состояние. Требуется определить какой из оставшихся пунктов с наибольшей вероятностью сможет передать ЕВ пункту v_{22} .

Параметры распределения времени поступления эталонов для передачи ЕВ имеют следующие значения: $m_{12}=5$ ч, $\sigma_{12}=0,25$ ч; $m_{22}=6$ ч, $\sigma_{22}=0,5$ ч; $m_{32}=6$ ч,

$\sigma_{32}=1$ ч. Параметры распределения времени передачи ЭВ: $m_{11}=4$ ч, $\sigma_{11}=0,5$ ч; $m_{31}=5$ ч, $\sigma_{31}=0,25$ ч.

Вычислим вероятности передачи ЭВ пунктами v_{11} и v_{31} с учетом изменения времени поступления ЭВ с метрологического пункта v_{22} , связанное с их доставкой. В пункт v_{11} время увеличится на 2 ч, а в v_{31} на 1 ч соответственно.

Используя выражения (1) и (2) определим условные вероятности переходов графа состояний:

для пункта v_{11} :

$$\alpha = \int_0^{\infty} \bar{B}(t) dA_1(t) = 0,037;$$

$$\beta = \int_0^{\infty} \bar{A}_1(t) dB(t) = 0,963;$$

для пункта v_{31} :

$$\alpha = \int_0^{\infty} \bar{B}(t) dA_1(t) = 0,166;$$

$$\beta = \int_0^{\infty} \bar{A}_1(t) dB(t) = 0,834.$$

Далее используя выражение (3), получим вероятность передачи ЭВ пунктом v_{11} дополнительному потоку ЭВ:

$$\begin{aligned} P_{11}(t) = & 0,963 \cdot \left(0,5 \cdot \left(e^{-\frac{3,5}{t}} + \left(e^{-\frac{4,5}{t}} \right)^{\frac{9}{7}} \right) \right)^2 \left(0,963 \cdot \left(0,5 \cdot \left(e^{-\frac{3,5}{t}} + \left(e^{-\frac{4,5}{t}} \right)^{\frac{9}{7}} \right) \right)^2 \right. \\ & + 0,037 \cdot \left(0,5 \cdot \left(e^{-\frac{4,75}{t}} + \left(e^{-\frac{5,25}{t}} \right)^{\frac{21}{17}} \right) \right) \left(0,5 \cdot \left(e^{-\frac{5,5}{t}} + \left(e^{-\frac{6,5}{t}} \right)^{\frac{13}{11}} \right) \right) + \\ & \left. + \left(0,5 \cdot \left(e^{-\frac{3,5}{t}} + \left(e^{-\frac{4,5}{t}} \right)^{\frac{9}{7}} \right) \right) \cdot \left(0,5 \cdot \left(e^{-\frac{4,75}{t}} + \left(e^{-\frac{5,25}{t}} \right)^{\frac{21}{17}} \right) \right) \right)^{-1} ; \end{aligned}$$

пунктом v_{31} :

$$P_{31}(t) = 0,834 \cdot \left(0,5 \cdot \left(e^{-\frac{4,25}{t}} + \left(e^{-\frac{5,25}{t}} \right)^{\frac{21}{17}} \right) \right)^2 \left(0,834 \cdot \left(0,5 \cdot \left(e^{-\frac{4,25}{t}} + \left(e^{-\frac{5,25}{t}} \right)^{\frac{21}{17}} \right) \right)^2 \right) +$$

$$+0,166 \cdot \left(0,5 \left(e^{-\frac{5}{t}} + \left(e^{-\frac{7}{t}} \right)^{\frac{7}{3}} \right) \right) \left(0,5 \left(e^{-\frac{5,5}{t}} + \left(e^{-\frac{6,5}{t}} \right)^{\frac{13}{11}} \right) \right) +$$

$$+ \left(0,5 \cdot \left(e^{-\frac{4,25}{t}} + \left(e^{-\frac{5,25}{t}} \right)^{\frac{21}{17}} \right) \right) \cdot \left(0,5 \left(e^{-\frac{3}{t}} + \left(e^{-\frac{5}{t}} \right)^{\frac{5}{3}} \right) \right)^{-1}.$$

Изменение вероятности передачи ЭЕВ во времени представлено на рис. 8, где кривой 1 соответствует вероятность $P_{11}(t)$, а кривой 2 – $P_{31}(t)$.

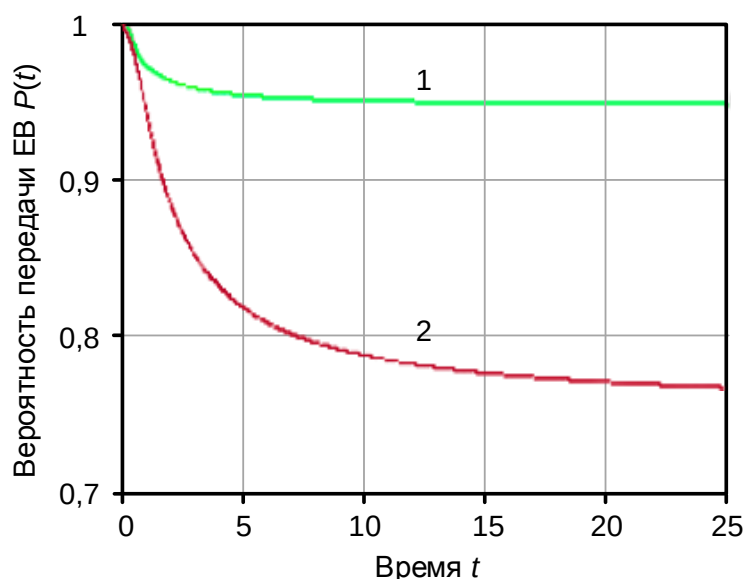


Рис. 8. График изменения вероятности передачи ЭЕВ

Стационарные значения вероятностей передачи ЭЕВ равны $P_{11}(\infty)=0,966$, $P_{31}(\infty)=0,829$. Таким образом, метрологический пункт v_{11} с большей вероятностью передаст ЭЕВ дополнительному потоку нижестоящих по точности ЭЕВ, что в свою очередь повышает вероятность выполнения задач метрологического обслуживания ВВСТ пункта v_{22} .

Заключение

Разработанная модель позволяет определить вероятность передачи ЭЕВ метрологическим пунктом при условии поступления дополнительных потоков ЭЕВ для их аттестации. Математическая формализация основана не на применении классической марковской модели, а на формальном представлении вероятностей состояний ЭЕВ в преобразовании Лапласа во временной области, то есть в комплексном виде.

Учет задержек времени поступления нижестоящих ЭЕВ, связанных с их доставкой, в модели производится путем применения изображений свертки нужных плотностей вероятностей в преобразовании Лапласа.

Полученные результаты могут быть применены при необходимости изменения структуры СПЕВ в случае, когда метрологические пункты, входящие в нее состав, перешли в неработоспособное состояние в следствие внутренних или внешних дестабилизирующих воздействий.

Литература

1. Лесун И. В. Военная метрология – научная основа метрологического обеспечения войск (сил), развития вооружения, военной и специальной техники // Оборонный комплекс Российской Федерации: состояние и перспективы развития. 2015. Т. 7. С. 421-428.
2. Харин В. Н., Чикуров В. А. Обоснование структуры системы передачи размера единиц физических величин в условиях нечеткой информации // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2010. №629. С. 109-113.
3. МИ 2230-92. ГСИ. Методика количественного обоснования поверочных схем при их разработке. – СПб.: Научно-производственное объединение «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1992. – 25 с.
4. Петров В. П., Рясный Ю. В. Вопросы построения оптимальных поверочных схем // Исследование в области радиотехнических измерений. 1976. № 204 (264). С. 25-40.
5. Кудрявцев О. А., Семенов Л. А., Фридман А. Э. Математическое моделирование систем обеспечения единства измерений // Физические проблемы точных измерений. 1984. № 34. С. 8-15.
6. Балалаев В. А., Слаев В. А., Синяков А. И. Теория систем воспроизведения единиц и передачи их размеров. – СПб.: Профессионал, 2004. – 160 с.
7. Райншке К., Ушаков И. А. Оценка надежности систем с использованием графов. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
8. Смагин В. А., Гусеница Я. Н. К вопросу моделирования одноканальных нестационарных систем с произвольными распределениями моментов времени поступления заявок и длительностей их обслуживания // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2015. № 649. С. 56-63.
9. Смагин В. А., Гусеница Я. Н. Моделирование одноканальных нестационарных систем обслуживания, представленных циклическим графом состояний // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. № 10. С. 801-806.
10. Смагин В. А., Филимонихин Г. В. О моделировании случайных процессов на основе гипердельтного распределения // Автоматика и вычислительная техника. 1990. № 5. С. 25-31.
11. Смагин В. А. Немарковские задачи теории надежности. – Л.: МО СССР, 1982. – 34 с.

References

1. Lesun I. V. Voennaja metrologija – nauchnaja osnova metrologicheskogo obespechenija vojsk (sil), razvitija vooruzhenija, voennoj i special'noj tehniki

[Military metrology is the scientific basis of metrological support for troops (forces), the development of weapons, military and special equipment]. *Oboronnyj kompleks Rossijskoj Federacii: sostojanie i perspektivy razvitiya*, 2015, vol. 7, pp. 421-428 (in Russian).

2. Harin V. N., Chikurov V. A. Obosnovanie struktury sistemy peredachi razmera edinic fizicheskikh velichin v uslovijah nechetkoj informacii [Substantiation of the structure of the system for transferring the size of units of physical quantities in conditions of fuzzy information]. *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2010, no. 629, pp. 109-113 (in Russian).

3. Methodical instruction 2230-92. State system for ensuring uniformity of measurements. Method of quantitative substantiation of verification schemes for their development. St. Petersburg, Research and production association "D.I.Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM)", 1992. 25 p. (in Russian).

4. Petrov V. P., Rjasnyj Ju. V. Voprosy postroenija optimal'nyh poverochnykh shem [The construction of optimal verification schemes]. *Issledovanie v oblasti radiotekhnicheskikh izmerenij*, 1976, vol. 264, no. 204, pp. 25-40 (in Russian).

5. Kudrjavcev O. A., Semenov L. A., Fridman A. Je. Matematicheskoe modelirovanie sistem obespechenija edinstva izmerenij [Mathematical modeling of systems for ensuring the uniformity of measurements]. *Fizicheskie problemy tochnykh izmerenij*, 1984, no. 34, pp. 8-15 (in Russian).

6. Balalaev V. A., Slaev V. A., Sinjakov A. I. Teorija sistem vosproizvedenija edinic i peredachi ih razмеров [The theory of systems of reproduction of units and transfer of their sizes]. St. Petersburg, Professional Publ, 2004. 160 p. (in Russian).

7. Rainshke K., Ushakov I. A. Ocenka nadezhnosti sistem s ispol'zovaniem grafov [The reliability of systems using graphs]. Moscow, Radio i svjaz Publ, 1988. 208 p. (in Russian).

8. Smagin V. A., Gusenica Ja. N. K voprosu modelirovanija odnokanal'nykh nestacionarnykh sistem s proizvol'nymi raspredelenijami momentov vremeni postuplenija zjavok i dlitel'nostej ih obsluzhivanija [To the problem of modeling single-channel non-stationary systems with arbitrary distributions of the time points for the receipt of applications and the duration of their servicing]. *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2015, no. 649, pp. 56-63 (in Russian).

9. Smagin V. A., Gusenica Ja. N. Modelirovanie odnokanal'nykh nestacionarnykh sistem obsluzhivanija, predstavlennykh ciklicheskim grafom sostojanij [Simulation of single-channel non-stationary service systems represented by a cyclic state graph]. *Izvestija vysshikh uchebnykh zavedenij. Priborostroenie*, 2016, vol. 59, no. 10, pp. 801-806 (in Russian).

10. Smagin V. A., Filimonihin G. V. O modelirovanii sluchajnykh processov na osnove giperdel'tnogo raspredelenija [About modeling of random processes on the basis of the hyperdelite distribution]. *Avtomatika i vychislitel'naja tehnika*, 1990, no. 5, pp. 25-31 (in Russian).

11. Smagin V. A. Nemarkovskie zadachi teorii nadezhnosti [Not Markov's problems of reliability theory]. Leningrad, The Ministry of Defence USSR Publ, 1982. 32 p. (in Russian).

Статья поступила 7 марта 2018 г.

Информация об авторе

Ширямов Олег Анатольевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: система передачи единиц величин; эталоны единиц величин. E-mail: Shiryamov_OA@mail.ru

Адрес: 197198, Россия, г. Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13.

Stochastic Model of Functioning of a Measurement Standard in Conditions when a Additional Measuring Instruments Receipt into Metrological Maintenance

O. A. Shiryamov

Purpose. The complexity of modern models of weapons and military equipment generates a need to make the precise measurements of its characteristics. The achievement and maintenance of the required level of measurements depends not only on the accuracy of the measurements but also on measures to ensure their unification. The most important factor of the unification of measurements is the observance of measuring means uniformity based on the system of scaling. By now, there are numerous theoretical researches based on various issues related to the construction of a system of scaling in individual types of measurements. Unfortunately, there are no publications among them related to the construction of the system in the conditions of uncertainty of information about the states of metrological points used in the scaling. This uncertainty is associated with the possibility of switching points to an inoperative condition due to the impact of various external and internal factors. **The purpose of the article is** to develop a stochastic model for the functioning of the measurement standard in the scaling, taking into account additionally incoming lower-order accuracy measurement standard in order to ensure the functional survivability of the system of scaling. **Methods.** The author proposed to consider the process of functioning of the measurement standard as a semi-Markov's process in the time domain based on the principle of probabilistic balance. Images in the Laplace transform replaced time characteristics. There are conditional transition probabilities that determine the choice of the further motion of the random process from the states of the graph of functioning of the measurement standard. **Results.** The use of the presented solution allows determining the value of the probability of scaling by a metrological point at the receipt of additional flows of lower accuracy measurement standard. **Practical relevance.** The author proposed the solution, which will help to restructure the system of scaling if necessary at transition of metrological points in a disabled condition.

Key words: model of functioning of the measurement standard, system of scaling, graph of states and transitions, probability of scaling.

Information about Author

Oleg Anatolievich Shiryamov - Doctoral Student. The postgraduate student of the Department of Metrological support of weapons, military and special equipment. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: system of transfer of unit of measurement; measurement standard. E-mail: Shiryamov_OA@mail.ru

Address: Russia, 197198, Saint Petersburg, Zhdanovskaja st., 13.