

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-389-402>

УДК 535.6

Комплекс методов прогнозирования метрологической исправности приборов учета электрической энергии

П. С. Серенков¹⁾, В. М. Романчук¹⁾, С. И. Богуславский¹⁾, А. А. Селятыцкий¹⁾,
П. И. Климкович¹⁾, А. В. Картавец²⁾, И. В. Старовойтов²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Филиал «Предприятие средств диспетчерского и технологического управления»

РУП «Гродноэнерго» (Гродно, Республика Беларусь)

Реферат. Рассмотрены вопросы совершенствования методов оценки и прогнозирования метрологической исправности приборов учета электрической энергии, характеризуемой значением межповерочного интервала с заданной вероятностью. Приведен анализ общепринятой методики оценки межповерочных интервалов средств измерений по РМГ 74–2004 с позиций корректности, оперативности, прозрачности. Установлено, что предложенная в РМГ 74–2004 модель дрейфа метрологических характеристик подконтрольной партии средств измерений (СИ) как модель регрессии является интерполяционной, т. е. определяет межповерочный интервал, который должен быть в период между начальной и текущей поверками, и поэтому не является прогнозной по факту. Обоснована необходимость разработки экстраполяционной модели дрейфа метрологических характеристик и соответствующая методика прогнозирования межповерочных интервалов, основанная на методах статистического анализа временных рядов. Выделены два возможных способа определения межповерочных интервалов приборов учета электрической энергии – по количественному и альтернативному признакам. Для каждого способа предложены модели экстраполяции дрейфа метрологических характеристик подконтрольной выборки средств измерений. Для прогнозирования межповерочных интервалов по количественному признаку обоснована комбинированная модель дрейфа, в которой дрейф математического ожидания погрешностей приборов учета в выборке описывается линейной моделью, а дрейф среднего квадратического отклонения погрешностей – экспоненциальной моделью. Для прогнозирования межповерочных интервалов по альтернативному признаку обосновано одновременное рассмотрение двух моделей дрейфа. Дрейф математического ожидания погрешностей приборов учета в выборке описывается моделью «линейного» случайного процесса, при этом среднее квадратическое отклонение погрешностей постоянно. Дрейф среднего квадратического отклонения погрешностей СИ в выборке описывается моделью «веерного» случайного процесса, при этом математическое ожидание погрешностей постоянно. Прогнозируемое значение межповерочного интервала определяется как меньшее значение результатов двух моделей. Предложенный подход обеспечивает достаточную достоверность прогноза межповерочного интервала приборов учета электроэнергии на основе минимум двух поверок подконтрольной партии СИ (первичной и первой периодической).

Ключевые слова: приборы учета электрической энергии, межповерочный интервал, экстраполяционная модель дрейфа

Для цитирования: Комплекс методов прогнозирования метрологической исправности приборов учета электрической энергии / П. С. Серенков [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 5. С. 389–402. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-389-402>

Адрес для переписки

Серенков Павел Степанович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-11-20
pavelserenkov@bntu.by

Address for correspondence

Serenkov Pavel S.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 331-11-20
pavelserenkov@bntu.by

A Set of Methods for Predicting the Metrological Service-ability of Electricity Meters

P. S. Serenkov¹⁾, V. M. Romanchack¹⁾, S. I. Boguslawski¹⁾, A. A. Seliatytski¹⁾,
P. I. Klimkovich¹⁾, A. V. Kartavtsev²⁾, I. V. Staravoitau²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾«Enterprise of Dispatch and Technological Control Facilities», Branch of RUE

[Republican Unitary Enterprise] «Grodnoenergo» (Grodno, Republic of Belarus)

Abstract. The issues of improving the methods for assessing and predicting the metrological serviceability of electric energy meters, characterized by the value of the inter-verification interval with a given probability, are considered. The paper presents an analysis of the generally accepted methodology for assessing inter-verification intervals of measuring instruments according to PMГ [RMG] 74–2004 from the standpoint of correctness, efficiency, and transparency. It has been established that the model of drift of metrological characteristics of a controlled batch of measuring instruments (MI) proposed in PMГ [RMG] 74–2004, as a regression model, is an interpolation model, i.e. it determines the inter-verification interval that should be in the period between the initial and current verifications, and therefore is not predictive in fact. The necessity of developing an extrapolation model of the drift of metrological characteristics and a corresponding methodology for predicting inter-verification intervals based on methods of statistical analysis of time series is substantiated. Two possible methods for determining inter-verification intervals of electricity meters have been identified: by quantitative and alternative criteria. For each method, models for extrapolating the drift of metrological characteristics of a controlled sample of measuring instruments are proposed. To predict inter-verification intervals based on a quantitative feature, a combined drift model is justified, in which the drift of the mathematical expectation of errors of metering devices in a sample is described by a linear model, and the drift of the mean square deviation of errors is described by an exponential model. To predict inter-verification intervals based on an alternative criterion, the simultaneous consideration of two drift models is justified. The drift of the mathematical expectation of errors of metering devices in the sample is described by the model of a “linear” random process, while the standard deviation of errors is constant. The drift of the standard deviation of the errors of the measuring instruments in the sample is described by the model of a “fan” random process, while the mathematical expectation of the errors is constant. The predicted value of the inter-verification interval is defined as the smaller value of the results of the two models. The proposed approach ensures sufficient reliability of the forecast of the inter-verification interval of electricity meters based on at least two verifications of the controlled batch of measuring instruments (primary and first periodic).

Keywords: electrical energy metering devices, inter-verification interval, extrapolation drift model

For citation: Serenkov P. S., Romanchack V. M., Boguslawski S. I., Seliatytski A. A., Klimkovich P. I., Kartavtsev A. V., Staravoitau I. V. (2025) A Set of Methods for Predicting the Metrological Service-ability of Electricity Meters // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (5), 389–402. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-5-389-402> (in Russian)

Введение

Объектом исследования являются приборы учета электрической энергии производства филиала «Предприятие средств диспетчерского и технологического управления» РУП «Гродноэнерго»:

– счетчики электрической энергии однофазные многофункциональные «Гран-Электро СС-101»,

– счетчики электрической энергии переменного тока статические «Гран-Электро СС-301».

Одним из ключевых показателей качества счетчиков как средств измерений (СИ) массового использования является их метрологическая надежность, важнейшей характеристикой которой выступает межповерочный интервал (МПИ), обеспечивающий метрологическую исправность СИ с заданной вероятностью $P_{\text{ми}}(t)$ [1, 2].

В сфере законодательной метрологии МПИ СИ контролирует Госстандарт Республики Беларусь в соответствии с законом об обеспечении единства измерения [1]. Методика и порядок определения и корректировки МПИ регламентированы, основаны на теории метрологической надежности Фридмана А. Э. [2–5].

Недостатки подхода, изложенного в [2], вытекают из специфической сложной процедуры:

– формирования модели аппроксимации дрейфа метрологической характеристики (МХ) средств измерений в партии как регрессионной модели $P_{\text{ми}}(t)$ от времени эксплуатации;

– итерационного решения регрессионной модели $P_{\text{ми}}(t)$ средств измерений в партии, в которой в неявном виде «защит» МПИ T , по критерию $P_{\text{ми}}(t) > P_{\text{ми}}^*$ [2–4].

Главный недостаток подхода заключается в том, что предложенная в [2] модель дрейфа МХ СИ как модель регрессии является интерполяционной, т. е. определяет МПИ, который распространяется на период между начальной и текущей поверками. Иными словами, модель отвечает корректно на вопрос, какой должен быть МПИ в период между начальной и текущей поверками, минимально соответствующий критерию метрологической надежности ($P_{\text{ми}}^*$). То есть по факту модель дрейфа (2) не является прогнозной [6].

Для этих целей необходима экстраполяционная модель дрейфа [7–10]. Для ее достижения предложена методика, альтернативная методике [2], в основу которой положены методы статистического анализа временных рядов.

По результатам анализа рекомендаций [2, 3] существуют два способа определения показателей метрологической надежности СИ и прогнозирования МПИ (рис. 1):

- по количественному признаку,
- по альтернативному признаку.

Способ оценки межповерочного интервала по количественному признаку

Показатели метрологической надежности и оценки МПИ производятся на основании данных о действительных погрешностях единиц СИ в партии, выявленных в процессе либо специальных подконтрольных испытаний, либо предыдущей поверки (поверок).

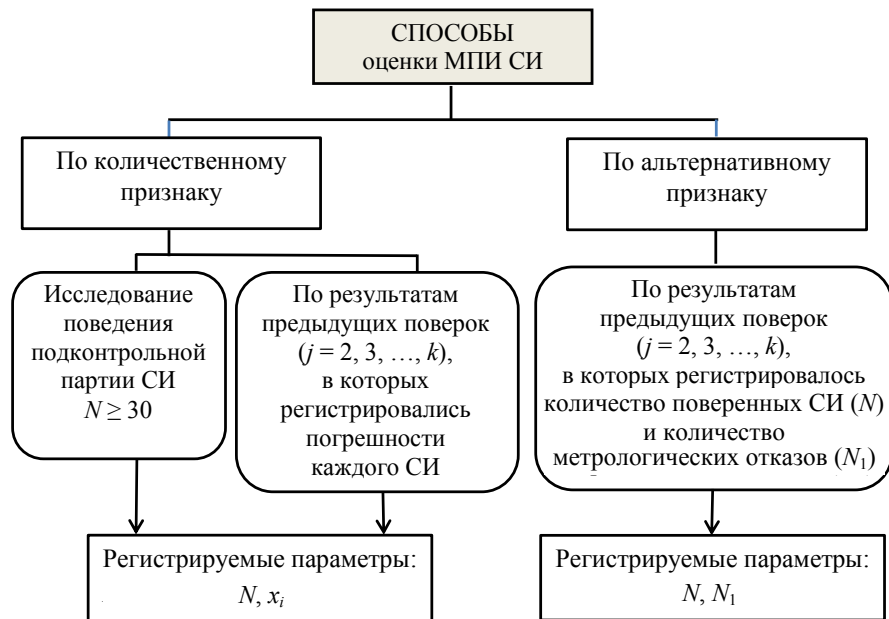


Рис. 1. Способы определения показателей метрологической надежности средств измерений и прогнозирования межповерочного интервала

Fig. 1. Methods for determining the indicators of metrological reliability of measuring instruments and predicting the inter-verification interval

Установлено, что корректнее использовать комбинированную модель дрейфа, так как в ней может быть синергетический эффект совместного проявления $m(t)$ и $\sigma(t)$.

Комбинированная модель дрейфа x_i (деградации) в подконтрольной партии СИ представляет собой математическую модель поведения верхней $V_1(t)$ и нижней $V_2(t)$ границ интервала погрешности как случайной величины с доверительной вероятностью p (примем $p = 0,95$) (рис. 2).

Прогнозируемый МПИ T соответствует ближайшей точке пересечения одной из линий $V_1(t)$ или $V_2(t)$ с линиями пределов основной погрешности средства измерения $\pm\Delta$. Для определения времени эксплуатации до выхода интервала погрешности измерений за границы поля допуска $\pm\Delta$ необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{aligned} +\Delta &= V_1(t); \\ -\Delta &= V_2(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Соответственно решениями обоих уравнений являются T_1 и T_2 – расчетные значения времени эксплуатации СИ до момента выхода x_i за верхнюю и соответственно нижнюю границы Δ с вероятностью $p = 0,95$. Искомым значением МПИ является $T = \min(T_1, T_2)$.

В общем виде модель дрейфа $V_1(t)$ или $V_2(t)$ от времени для всей подконтрольной выборки СИ может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned}
 V_1(t) &= m(t) + kv(t); \\
 V_2(t) &= m(t) - kv(t),
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

где $m(t)$ – дрейф математического ожидания погрешностей измерений x_i СИ в выборке; $v(t)$ – дрейф среднего квадратического отклонения (СКО) погрешностей измерений x_i СИ в выборке; k – коэффициент расширения для уровня доверительной вероятности p .

В результате задача прогнозирования МПИ сводится к выбору типа и определению функций дрейфов $m(t)$ и $v(t)$.

Простейшей, часто используемой моделью изменения метрологической характеристики СИ $\delta(t)$ является линейная модель типа

$$\delta(t) = x_0 + t\Delta x,$$

где x_0 – начальное значение метрологической характеристики СИ, зарегистрированное в результате первичной поверки; Δx – скорость изменения x_0 во времени (рис. 2).

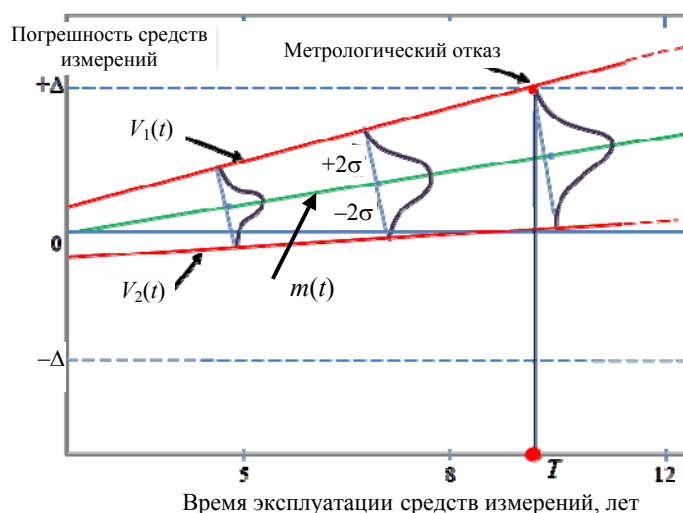


Рис. 2. Комбинированная модель линейного типа в соответствии с [2]

Fig. 2. Combined linear type model in accordance with [2]

Подобного рода линейная модель применена в РМГ 74–2004 в отношении как математического ожидания $m(t)$, так и СКО $v(t)$ погрешностей измерений x_i СИ в выборке.

Как показали проведенные исследования, линейная модель удовлетворительно описывает деградацию точностных характеристик СИ в период эксплуатации от одного до пяти лет [5, 8]. Использование ее в других временных диапазонах (более 5 лет) некорректно ввиду явного противоречия между расчетными и экспериментальными значениями частоты отказов.

Данный аспект является сегодня достаточно актуальным в силу динамического заполнения рынка электронными СИ, практически не имеющими механических узлов, МПИ которых свыше 5 лет. Примером могут служить приборы учета электрической энергии типа СС-101, СС-301, установленный МПИ для которых $T = 8$ лет.

В результате анализа литературных источников и данных о результатах поверки счетчиков типа СС-101, СС-301 за период порядка 20 лет для корректного описания поведения (дрейфа) систематической и случайной составляющей погрешности СИ во времени принята следующая концепция комбинированной экстраполяционной модели деградации СИ (рис. 3):

– дрейф математического ожидания погрешностей измерений x_i СИ в выборке линейная модель типа

$$m(t) = x_0 + \Delta x t, \quad (3)$$

где x_0 – начальное значение метрологической характеристики СИ, зарегистрированное в результате первичной поверки; Δx – скорость изменения x_0 во времени, вычисляется как

$$\Delta x = x_1 - x_0,$$

где x_1 – значение математического ожидания погрешностей x_i СИ в подконтрольной партии, зарегистрированное в результате первой периодической поверки;

– дрейф СКО погрешностей измерений x_i СИ в выборке экспоненциальная модель типа

$$v(t) = k \sigma_0 \exp(t \lambda), \quad (4)$$

где $\lambda = \ln(\Delta \sigma / \sigma_0 + 1)$; k – коэффициент расширения, зависящий от уровня доверия p ; σ_0 – СКО в начальной точке (по результатам первичной поверки); $\Delta \sigma$ – скорость изменения СКО, вычисляется как

$$\Delta \sigma = \sigma_1 - \sigma_0,$$

где σ_1 – значение метрологической характеристики СИ, зарегистрированное в результате первой периодической поверки.

Для определения значения МПИ как времени эксплуатации до выхода интервала погрешности измерений за границы поля допуска $\pm \Delta$ с вероятностью $p = 0,95$ необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{aligned} +\Delta &= V_1(t) = (x_0 + \Delta x t) + k \sigma_0 \exp(t \lambda); \\ -\Delta &= V_2(t) = (x_0 + \Delta x t) - k \sigma_0 \exp(t \lambda). \end{aligned} \quad (5)$$

Соответственно решениями обоих уравнений являются расчетные значения времени эксплуатации СИ T_1 и T_2 (рис. 3) [11–14]. Искомым значением МПИ является $T = \min(T_1, T_2)$.

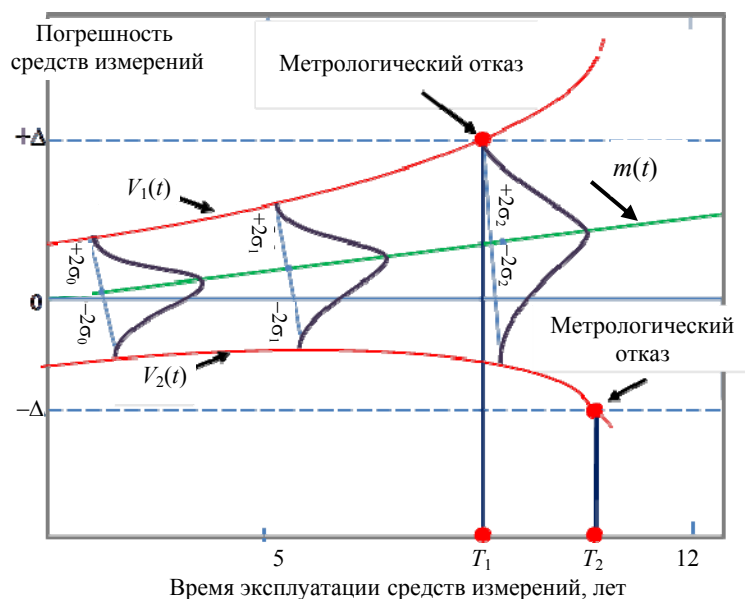


Рис. 3. Комбинированная модель типа: дрейф математического ожидания погрешностей измерений x_i в выборке линейная модель, дрейф СКО погрешностей измерений x_i в выборке экспоненциальная модель

Fig. 3. Combined model type: drift of the mathematical expectation of measurement errors x_i in a sample linear model, drift of the standard deviation of measurement errors x_i in a sample linear model

Преимущества обоснованной предлагаемой методики:

1. Методика использует корректную, понятную математическую экстраполяционную модель временного ряда, позволяющую в явном виде прогнозировать МПИ T .

2. Методика обеспечивает высокую оперативность получения информации для прогнозного расчета МПИ T . Априорно выбранный характер типов моделей $m(t)$ и $v(t)$, формирующих комбинированные модели $V_1(t)$ и $V_2(t)$, основанный на анализе и обобщении существующей теории и практики деградации технических объектов во времени, обеспечивает достаточную достоверность прогноза поведения метрологической характеристики СИ на основе минимум двух проверок подконтрольной партии СИ (первичной и первой периодической).

Примечание. Методика корректировки МПИ СИ по [2] предполагает наличие результатов минимум по трем поверкам, включая первичную.

3. Методика обеспечивает возможность малозатратного мониторинга метрологической надежности исследуемых СИ и принятия эффективных решений, связанных с конструктивными особенностями и технологией их изготовления в ближайшей перспективе (по данным двух поверок).

Например, по результатам первой периодической поверки подконтрольной выборки СИ установлено расчетное значение МПИ $T_{\text{расч}} = 15$ лет. В Республике Беларусь для данного типа СИ установлен МПИ $T_{\text{уст}} = 8$ лет.

Производитель не планирует поставки СИ на экспорт. В текущей перспективе с учетом $T_{\text{расч}} > T_{\text{уст}}$ производитель может пересмотреть систему производства с позиций максимальной эффективности:

- упростить технологические процессы производства;
- упростить конструкцию СИ;
- приобретать более доступные (дешевые) комплектующие и т. п.

При этом потребитель в пассивном режиме (от поверки к поверке) может организовать оценку и мониторинг прогнозных значений МПИ $T_{j,\text{расч}}$ после каждой очередной j -й периодической поверки и имеет возможность принимать адекватные управленческие решения в отношении коррекции системы производства в сторону как ужесточения требований, так и ослабления.

Пример оценки межповерочного интервала приборов учета электрической энергии по количественному признаку

Расчет времени эксплуатации приборов учета типа СС-301-5.1/U/M в подконтрольной выборке $N = 30$ шт. в соответствии с выражениями (5)–(7) представим графически (рис. 4). Прогнозное время поддержания метрологической надежности приборов учета СС-301-5.1/U/M составляет $T = 11$ лет, что и можно рассматривать как очередной МПИ для партии СИ.

Выборка $N = 30$; 1, 2 – пределы допустимой относительной погрешности счетчиков; $\Delta = \pm 1\%$; 3 – линейная аппроксимация дрейфа математического ожидания m_i погрешностей счетчиков в подконтрольной партии x_i ; 4, 5 – верхняя (V_1) и нижняя (V_2) границы прогнозируемой оценки интервала относительной погрешности счетчиков с вероятностью $p = 0,95$.

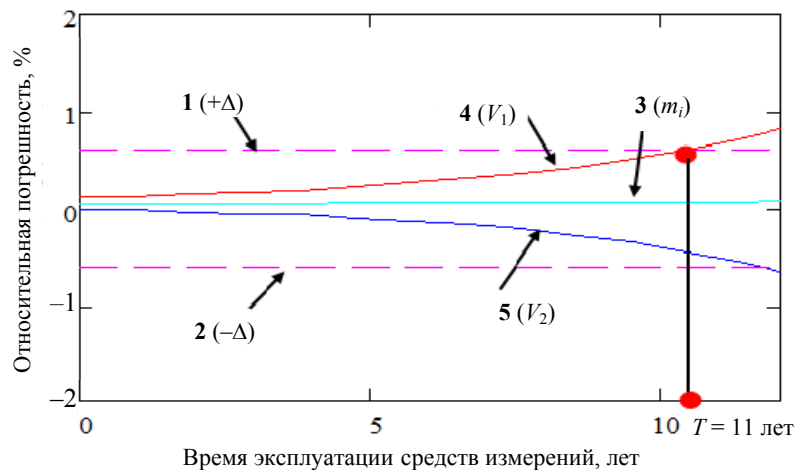


Рис. 4. Аппроксимация зависимости статистических характеристик относительной погрешности СИ выборки N от времени эксплуатации по результатам первой и второй поверок [11]

Fig. 4. Approximation of the dependence of statistical characteristics of the relative error of the measuring instrument of sample N on the operating time based on the results of the first and second checks [11]

Способ оценки межповерочного интервала по альтернативному признаку

Способ предполагает, что показатели метрологической надежности и оценки МПИ производятся на основании статистических данных о количестве СИ конкретного типа, прошедших и не прошедших плановую поверку.

Способ определения показателей метрологической надежности СИ и прогнозирования МПИ по альтернативному признаку, очевидно, менее информативный, но достаточно экономичный, так как не требует дополнительных расходов на испытания подконтрольной партии или сбор, предварительную обработку и обобщение количественной информации о действительных погрешностях СИ партии. Именно экономичность делает способ по альтернативному признаку достаточно привлекательным для мониторинга и прогнозирования значений МПИ СИ конкретного типа для целей совершенствования конструкции и (или) технологии изготовления СИ.

Для повышения доверия к способу определения показателей метрологической надежности СИ по альтернативному признаку нами на основе рекомендаций РМГ 74–2004 разработаны метод и алгоритм его реализации, обеспечивающие приемлемую достоверность результатов.

Для решения задачи об аппроксимации изменения математического ожидания и СКО погрешности СИ по статистическим данным результатов двух поверок (начальной и через промежуток времени T , лет) используются по аналогии с [2] одновременно две модели – «линейного» и «веерного» случайного процесса.

1. Модель «веерного» случайного процесса.

Предполагается, что погрешность СИ описывается нормальным распределением с нулевым математическим ожиданием $m(t)$ и линейно растущим средним квадратическим отклонением $\sigma(t)$, т. е. с течением времени эксплуатации увеличивается только разброс погрешности СИ в партии

$$m(t) = 0, \sigma(t) = \sigma(0) + bt,$$

где σ_0 – начальное СКО (на момент первичной поверки); b – коэффициент дрейфа СКО.

Для решения задачи об аппроксимации СКО погрешности СИ в партии по результатам двух поверок (начальной и через промежуток времени T , лет) выполняются следующие шаги:

1.1. Начальная (первичная) поверка ($t = 0$).

Фиксируется предел допустимой погрешности СИ Δ , заданный в технической документации. Вычисляется СКО $\sigma(0) = \Delta / 3$.

1.2. Вторая поверка через время $t = T$.

Вычисляется СКО на момент времени $t = T$

$$\sigma(T) = \frac{\Delta}{\lambda_{0.5(1+p_1)}},$$

где p_1 – доверительная вероятность для второй поверки; $\lambda_{0.5(1+p_1)} = \Phi^{-1}((p_1 + 1)/2)$ – квантиль нормального распределения для уровня вероятности $(p_1 + 1)/2$.

1.3. Расчет коэффициента дрейфа СКО b

$$b = \sigma^2(T) - \sigma^2(0).$$

1.4. Вероятность бездефектной работы $p(t)$.

Вероятность $p(t)$ того, что по истечении времени эксплуатации t погрешность СИ не превысит допустимый предел Δ , рассчитывается по формуле

$$p(t) = \Phi\left(\frac{\Delta - m(0)}{\sigma(t)}\right) - \Phi\left(\frac{-\Delta - m(0)}{\sigma(t)}\right), \quad (6)$$

где $p(t)$ – вероятность бездефектной работы в момент времени t ; t – время после выполнения первой поверки; Φ – функция стандартного нормального распределения; $m(0) = 0$; предположение о равенстве нулю математического ожидания в момент времени $t = 0$.

1.5. Расчет МПИ T_1 для риска потребителя $\beta = 0,05$.

Время T_1 , в течение которого СИ сохраняет работоспособность с вероятностью 0,95, находится из уравнения

$$p(T_1) = \beta,$$

где $p(T_1)$ рассчитывается в соответствии с (1).

Пример расчета. Исходные данные: $N_0 = 21100$ (0) – число исправных (дефектных) счетчиков на момент времени $t = 0$ (начальная поверка); $N_1 = 20908$ (192) – то же на момент времени $t = T$ (вторая поверка); $\Delta = \pm 1\%$ – предел допустимой погрешности СИ.

Вычисляем вероятности:

$$p_0 = 1; \quad p_1 = N_1 / N_0 = 0,991.$$

Вычисляем СКО:

$$\sigma(0) = \Delta / 3 = 1/3 = 0,333;$$

$$\sigma(T) = \frac{\Delta}{\lambda_{0,5(1+p_1)}} = \frac{1}{2,608} = 0,383, \quad \text{где } \lambda_{0,5(1+p_1)} = 2,608.$$

Решаем уравнение $p(T_1) = \beta$ (рис. 5), получаем: $T_{\text{назначенное}} = 9,5$ года; $T_{\text{расчетное}} = 39,5$ года.

2. Модель «линейного» случайного процесса.

Предполагается, что погрешность СИ описывается нормальным распределением с постоянным СКО $\sigma(t)$ и линейно растущим математическим ожиданием $m(t)$, т. е. с течением времени эксплуатации увеличивается только систематическая составляющая погрешности СИ в партии (дрейф среднего значения):

$$\sigma(t) = \sigma(0); \quad m(t) = m(0) + k \frac{t}{T},$$

где m_0 – начальное математическое ожидание погрешности СИ в партии (на момент первичной поверки); k – коэффициент дрейфа математического ожидания.

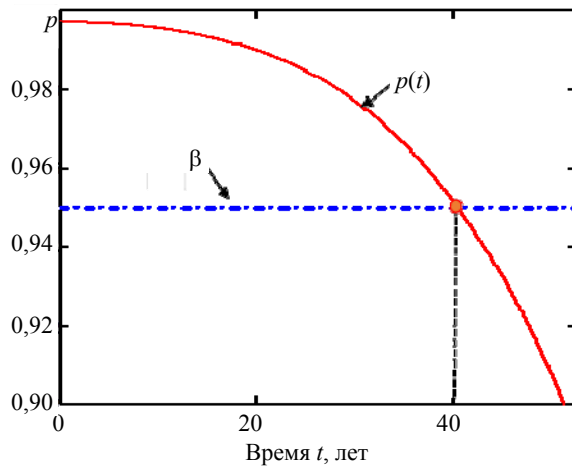


Рис. 5. Графическая интерпретация решения уравнения $p(T_1) = \beta$

Fig. 5. Graphical interpretation of the solution of the equation $p(T_1) = \beta$

Для решения задачи об аппроксимации математического ожидания погрешности СИ по результатам двух поверок (начальной и через промежуток времени T , лет) выполняются следующие шаги.

2.1. Начальная поверка ($t = 0$).

Предполагается: $m(0) = 0$; $\sigma(0) = \Delta/3$.

2.2. Вторая поверка через время $t = T$.

Находим статистические оценки параметров дрейфа погрешности СИ в партии

$$m(T) = \Delta - \lambda_{p1} \sigma(0),$$

где $\lambda_{p1} = \Phi^{-1}(p_1)$ – квантиль нормального распределения для уровня вероятности p_1 .

2.3. Расчет коэффициента дрейфа математического ожидания k

$$k = m(t).$$

2.4. Вероятность бездефектной работы $p(t)$.

Вероятность $p(t)$ того, что по истечении времени эксплуатации погрешность СИ в партии не превысит допустимый предел Δ , рассчитывается по формуле

$$p(t) = \Phi\left(\frac{\Delta - m(t)}{\sigma(0)}\right) - \Phi\left(\frac{-\Delta - m(t)}{\sigma(0)}\right), \quad (7)$$

где $p(t)$ – вероятность бездефектной работы в момент времени t ; t – время после выполнения первой поверки; Φ – функция стандартного нормального распределения; $\sigma(t) = \sigma(0)$ – предположение о постоянстве СКО.

2.5. Расчет МПИ T_2 для риска потребителя $\beta = 0,05$.

Время T_2 , в течение которого СИ сохраняет работоспособность с вероятностью 0,95, находится из уравнения

$$p(T_2) = \beta,$$

где $p(T_2)$ рассчитывается в соответствии с (2).

Пример расчета. Исходные данные: $N_0 = 21100$ (0) – число исправных (дефектных) счетчиков (начальная поверка); $N_1 = 20908$ (192) – то же, поверка через время T ; $\Delta = \pm 1\%$ – предел допустимой погрешности СИ,

Вычисляем вероятности: $p_0 = 1$; $p_1 = N_1 / N_0 = 0,991$.

Вычисляем СКО и математическое ожидание:

$$\sigma(0) = \Delta / 3 = 0,333, m(0) = 0,0.$$

$$m(T) = \Delta - \lambda_{p1}\sigma(0), \text{ где } \lambda_{p1} = 2,362.$$

Решаем уравнение $p(T_2) = \beta$ (рис. 5), получаем: $T_{2\text{назначенное}} = 9,5$ года, $T_{2\text{расчетное}} = 20,1$ года.

ВЫВОДЫ

1. Анализ общепринятых методик оценки приборов учета электроэнергии с позиций корректности, оперативности, прозрачности позволил установить, что используемая модель аппроксимации дрейфа их метрологических характеристик имеет ряд недостатков. Установлены причины возросшего в современных условиях интереса производителей и потребителей приборов учета в периодическом оценивании, мониторинге, анализе и пересмотре их межповерочных интервалов. Для двух возможных способов определения межповерочных интервалов приборов обоснованы модели экстраполяции дрейфа метрологических характеристик подконтрольной выборки и соответствующие методики оценки межповерочных интервалов с заданной вероятностью. Предложенные методы обеспечивают достаточную достоверность прогноза межповерочного интервала приборов учета электроэнергии на основе минимум двух поверок подконтрольной партии СИ (первичной и первой периодической), в то время как общепринятые методы основываются на данных минимум трех поверок.

2. По результатам двух расчетов принимаем решение: $T = \min(T_1, T_2) = 20,1$ года. Результаты прогноза МПИ альтернативным методом показывают существенное различие оценок T_1 (39 лет) и T_2 (20 лет) при $T_{\text{назначенное}} = 9,5$ года, что свидетельствует о следующем:

– деградация статических одно- и трехфазных счетчиков электроэнергии с цифровым выходом типа СС-301 и СС-101 по характеристике «СКО погрешностей в партии СИ» (модель «веерного» случайного процесса) является слабовыраженной по сравнению с характеристикой «среднее значение погрешности в партии СИ» (модель «линейного» случайного процесса).

– оценку МПИ для счетчиков данного типа можно проводить только по результатам исследования дрейфа среднего значения погрешности СИ в партии, т. е. с использованием модели «линейного» случайного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об обеспечении единства измерений: Закон Респ. Беларусь от 5 сент. 1995 г. № 3848-XII // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19503848>.
2. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений: РМГ 74–2004. Взамен МИ 2187–92. М.: Стандартинформ, 2006. 24 с.
3. Рекомендации по определению интервалов между поверками средств измерений. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения: МИ 3676–2023. Санкт-Петербург, 2023. URL: <https://39.csmrst.ru/upload/medialibrary/a43/ec1w93qqswnak7cm76dfkyil0fyjsq2g/%D0%A0%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%9C%D0%98%203676-2023.pdf>.
4. Фридман, А. Э. Основы метрологии: современный курс / А. Э. Фридман. СПб.: Профес-сионал, 2008. 279 с.
5. Ефремов, Л. В. Вероятностная оценка метрологической надежности средств измерений: Алгоритмы и программы / Л. В. Ефремов. СПб.: Нестор-История, 2011. 200 с.
6. Kalina, J. Modern approaches to statistical estimation of measurements in the location model and regression / J. Kalina, P. Vidnerová, L. Soukup // *Handbook of Metrology and Applications*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. С. 2355–2376. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2074-7_125.
7. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. М.: Наука, 1972. 550 с.
8. Барзилович, Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович. М.: Высш. шк., 1982. 306 с.
9. Шаров, Г. А. Статистическая метрология / Г. А. Шаров. М.: Горячая Линия – Телеком, 2022. 664 с.
10. Фокин, Ю. А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабже-ния / Ю. А. Фокин. М.: Энергоатомиздат, 1985. 215 с.
11. Стукач, О. В. Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством: учеб. пособие / О. В. Стукач; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. 163 с.
12. Семенихин, К. В. Двусторонняя вероятностная граница для симметричной унимодаль-ной случайной величины / К. В. Семенихин // *Автоматика и телемеханика*. 2019. №. 3. С. 103–122.
13. Доброго, К. В. Универсальная имитационная модель деградации аккумуляторных бата-рей с оптимизацией параметров по генетическому алгоритму / К. В. Доброго, И. А. Коз-начеев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 481–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498>.
14. Автоматизированный анализ срока службы воздушных линий электропередачи электро-энергетических систем / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, С. А. Абдуллаева, А. А. Назаров // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 5. С. 435–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445>.

Поступила 12.05.2025 Подписана в печать 15.07.2025 Опубликовано онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. On Ensuring the Uniformity of Measurements: Law of the Republic of Belarus of Septem-ber 5, 1995 No. 3848-XII. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=v19503848> (in Russian).
2. RMG 74–2004. *Methods for Determining Inter-Verification and Inter-Calibration Intervals of Measuring Instruments*. Moscow, Standartinform Publ., 2006 (in Russian).

3. MI 3676–2023. Recommendations for Determining Intervals between Verifications of Measuring Instruments. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Basic Provisions. Saint Petersburg, 2023. Available at: <https://39.csmrst.ru/upload/medialibrary/a43/ec1w93qqsnwak7cm76dfkyil0fyjsq2g/%D0%A0%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%9C%D0%98%203676-2023.pdf> (in Russian).
4. Fridman A. E. (2008) *Fundamentals of Metrology: Modern Course*. Saint Petersburg, Professional Publ. 279 (in Russian).
5. Efremov L. V. (2011) *Probabilistic Assessment of Metrological Reliability of Measuring Instruments: Algorithms and Programs*. Saint Petersburg, Nestor-Istoriya Publ. 200 (in Russian).
6. Kalina J., Vidnerová P., Soukup L. (2023) Modern Approaches to Statistical Estimation of Measurements in the Location Model and Regression. *Handbook of Metrology and Applications*. Singapore, Springer Nature Singapore, 2355–2376. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2074-7_125.
7. Venttsel E. S. (1972) *Probability Theory*. Moscow, Nauka Publ. 550 (in Russian).
8. Barzilovich E. Yu. (1982) *Models of Maintenance of Complex Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 306 (in Russian).
9. Sharov G. A. (2022) *Statistical Metrology*. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom Publ. 664 (in Russian).
10. Fokin Yu. A. (1985) *Probabilistic-Statistical Methods in Calculations of Power Supply Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 215 (in Russian).
11. Stukach O. V. (2011) *Statistica Software Package in Solving Quality Management Problems*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnical University. 163 (in Russian).
12. Semenikhin, K. V. (2019). Two-Sided Probability Bound for a Symmetric Unimodal Random Variable. *Automation and Remote Control*, 80 (3), 474–489. <https://doi.org/10.1134/s000511791903007x>.
13. Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2022) Universal Simulation Model of Battery Degradation with Optimization of Parameters by Genetic Algorithm. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 481–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498> (in Russian).
14. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Abdullayeva S. A., Nazarov, A. A. (2021) Automated Analysis of Service Life of Air-Lines of the Electricity Transmission of Electric Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (5), 435–445. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445> (in Russian).