

CITATION FOR AN ARTICLE

Korneev K.B., Mankov M.B. Increase in the life characteristics of batteries by using the controlled desulphation method // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 44–53.

УДК 621.317

**ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

С.В. Маринова

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Маринова С.В., 2025

Аннотация. В статье рассмотрены аспекты определения межповерочного интервала микропроцессорных счетчиков электроэнергии. Приведено описание существующих методик с использованием показателей надежности. Показана необходимость корректировки межповерочных интервалов ряда микропроцессорных счетчиков.

Ключевые слова: метрологическая надежность, межповерочный интервал, микропроцессорный счетчик электроэнергии.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-53-60

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время микропроцессорный счетчик электроэнергии – это не только основа традиционных информационно-измерительных систем, но и неотъемлемая часть интеллектуальных систем учета (ИСУ) электроэнергии. Стабильность и метрологическая надежность микропроцессорного счетчика, как и любого средства измерений (СИ), являются необходимыми условиями достижения высокой точности измерений и обеспечения их единства.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕЖПОВЕРОЧНОГО ИНТЕРВАЛА

Документ РМГ 74-2004 [1] содержит рекомендации по методам расчета первоначального значения межповерочного интервала (МПИ) на этапе утверждения типа СИ. Существующие методы основаны на использовании формализованного описания зависимостей показателей точности метрологической надежности СИ от среднего времени их наработки с момента последней поверки. Метрологическая надежность в РМГ 74 основана на вероятности того, что в течение заданной наработки метрологический отказ не возникнет или средняя наработка на метрологический отказ будет равна математическому ожиданию наработки до первого метрологического отказа.

Среди перечисленных в РМГ 74-2004 методик определения первичного МПИ наиболее распространенной является методика ориентировочной оценки МПИ по нормируемым показателям надежности [2].

Определение МПИ осуществляют на основании моделирования зависимости показателей точности или метрологической надежности СИ от времени (наработки), прошедшего с момента последней поверки (калибровки) [1]. Кроме этого, модель процесса основана на предположении, что дрейф метрологических характеристик СИ обобщен и имеет нормальное распределение.

В РМГ 74-2004 предусмотрено применение двух критериев назначения МПИ:

- 1) нормируемых показателей метрологической надежности (нестабильности) СИ;
- 2) экономического критерия оптимальности МПИ, обеспечивающего максимальный экономический эффект эксплуатации СИ [1].

Первичное значение МПИ устанавливается при проведении испытаний СИ в целях утверждения типа. При этом погрешность определения оптимального значения МПИ может достигать десятков процентов [3]. Для более точного назначения первичного МПИ длительность испытаний должна составлять более 10 лет, что нецелесообразно, поэтому основное внимание следует уделять не назначению первичного значения МПИ, а его корректировке в процессе эксплуатации СИ.

На практике приведенные критерии назначения первичного МПИ могут противоречить друг другу, поскольку стоимость и частота поверки СИ сравнимы с полной стоимостью самого СИ.

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Со временем системы учета переводят в цифровой вид, а приборы, входящие в их состав, становятся более сложными и дорогостоящими. Основным элементом в измерительной системе для определения количества израсходованной (выданной) электроэнергии и мощности стал счетчик. Это не только прибор для интеграции значений тока и напряжения, но и микропроцессорное вычислительное устройство, имеющее интегральную микросхему для вычисления, запоминающее устройство для хранения измеренной информации и журнала событий, периферийное оборудование для выдачи сигнала стандартного уровня интерфейса. Таким образом, счетчик – это не только СИ, но и сложное электронное устройство (другими словами, промышленный компьютер).

Для микропроцессорных счетчиков, которые содержат большое число электронных модулей [4], на ранних этапах проектирования СИ применяются расчетные методы, основанные на стандартизованных методиках [5] и данных о характеристиках надежности электронной компонентной базы [6].

Для микропроцессорных измерительных приборов (каковыми являются микропроцессорные счетчики), которые содержат большое число электронных модулей, предназначенных для генерирования, вычисления, усиления аналого-цифрового преобразования и прочего, методики расчета приведены в источнике [7].

Средняя наработка на отказ и вероятность безотказной работы в документе [7] рассчитываются методом «λ-характеристик»:

$$T_0 = 1 / \lambda, \quad (1)$$

где T_0 – средняя наработка на отказ электронного средства измерений (ЭСИ);
 λ – интенсивность отказов ЭСИ.

Наиболее распространенной моделью надежности принимают экспоненциальную зависимость распределения времени до отказа, по которой вероятность безотказной работы может быть выражена уравнением

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \text{ или } P(t) = e^{(-\frac{t}{T})}, \quad (2)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы ЭСИ; t – наработка (время наработки) ЭСИ.

Интенсивность отказов ЭСИ определяется как сумма соответствующих интенсивностей отказов всех входящих в него i -х электронных компонентов:

$$\lambda = \sum_{i=1}^I \lambda_{\text{э}i},$$

где $\lambda_{\text{э}i}$ – интенсивность отказов i -го электронного компонента (ЭК) в режиме работы; i – общее число ЭК в ЭСИ.

Условия работы всех ЭК в модели, т.е. в ЭСИ, отличаются от нормальных, поэтому необходимо учесть интенсивность отказов в соответствующих эксплуатационных условиях $\lambda_{\text{э}}$ (например, с учетом электрического режима, внешних факторов, конструкторско-технологических особенностей):

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} \prod_{j=1}^J K_j,$$

где $\lambda_{\text{б}}$ – базовая интенсивность отказов ЭК в режиме работы; K_j – j -й коэффициент математической модели интенсивностей отказов ЭК, учитывающий влияние j -го фактора; J – общее число коэффициентов в математической модели (факторов).

Математические модели интенсивности отказов ЭК (формулы) и численные значения их коэффициентов приведены в справочнике [6].

Для расчета первоначального значения МПИ используются справочные данные по методике, указанной в п. А.5 РМГ 74-2004 «Методика ориентировочной оценки первичного МПИ или межкалибровочного интервала по нормируемым показателям надежности средств измерений» [1]:

$$\Delta T_{\text{МПИ}} = \min(T_1, T_2),$$

где $\Delta T_{\text{МПИ}}$ – первоначальное значение МПИ; T_1, T_2 – значения времени.

Если рассчитана вероятность безотказной работы $P(t)$, то с допущением о линейном изменении среднего значения погрешности (по совокупности СИ данного типа) при неизменном среднеквадратическом отклонении распределения погрешности σ_0 (линейный случайный процесс дрейфа по РМГ 74-2004) значения T_1, T_2 определяются по формулам:

$$T_1 = t \cdot \frac{\ln\left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{\chi_{P^*_{\text{МИ}}} \cdot \sigma_0}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta_{\text{э}}}{\chi_P \cdot \sigma_0}\right)}; \quad T_2 = t \cdot \frac{\Delta_{\text{э}} - \chi_{P^*_{\text{МИ}}} \cdot \sigma_0}{\Delta_{\text{э}} - \chi_P \cdot \sigma_0}, \quad (3)$$

где σ_0 – среднеквадратическое отклонение распределения погрешности градуировки при выпуске из производства; Δ – предел допускаемой погрешности, нормируемый в технических условиях (ТУ); $\Delta_{\text{э}}$ – предел допускаемой погрешности в фактических реальных условиях эксплуатации; $P^*_{\text{МИ}}$ – вероятность метрологической исправности в момент времени $T_{\text{МПИ}}$ (за время $\Delta T_{\text{МПИ}}$); $\chi_P, \chi_{P^*_{\text{МИ}}}$ – квантили нормированной функции Лапласа $F(\chi)$, соответствующие вероятностям $P(t)$ и $P^*_{\text{МИ}}$.

$$F(\chi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\chi}^{+\chi} e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

Если рассчитано T_0 , то значения T_1 и T_2 определяются по формулам:

$$T_1 = T_0 \cdot \frac{\ln\left(\frac{\Delta_3}{\chi_{P^*_{МИ}} \cdot \sigma_0}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta_3}{\sigma_0} + 0,635\right)}; \quad T_2 = T_0 \cdot \frac{\Delta_3 - \chi_{P^*_{МИ}} \cdot \sigma_0}{\Delta}. \quad (4)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что период $\Delta T_{МПИ}$, рассчитанный по формулам (4), будет больше, чем период, рассчитанный по формулам (3) [4].

Численные расчеты по формулам (3) и (4) могут существенно различаться (в несколько раз и даже на порядок). В том же РМГ 74-2004 приведены примеры расчетов, которые это подтверждают.

При расчетах двумя способами (по формулам (3) с определенной вероятностью безотказной работы $P(t)$ и по формулам (4) со средней наработкой на отказ ЭСИ) получим «нижнюю оценку» в виде значения $\Delta T_{МПИ}$. В то же время в ТУ обычно нормируют T_0 [2], что в дальнейшем при использовании соотношений (4) приводит к завышению оценки первоначального МПИ ЭСИ.

Имеющиеся методы определения МПИ имеют грубые допущения. Выше было указано, что при моделировании процессов изменения метрологических характеристик используется нормальное распределение, но это далеко не всегда подтверждается на практике. Процесс деградации каждой метрологической характеристики в течение времени является случайным процессом, который имеет свои числовые характеристики, а в методах, указанных в РМГ 74-2004, либо выделяют одну метрологическую характеристику, либо полагают, что все метрологические характеристики подчиняются одинаковому закону распределения с одними и теми же числовыми характеристиками. Кроме этого, расчет по безотказности не отражает действительные изменения метрологических характеристик, так как очевидно, что не каждый отказ ЭСИ является метрологическим в общем потоке отказов. Использование усредненных показателей метрологической надежности СИ приводит к достаточно грубым результатам вычислений МПИ электронных устройств [8].

Одним из способов выхода из ситуации с расчетами первоначального МПИ микропроцессорных счетчиков по вариантам РМГ 74-2004, которые дают неудовлетворительный разброс нижнего и верхнего предела МПИ, может быть использование показателей долговечности вместо показателей надежности.

Долговечность – это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта [9].

К показателям долговечности, которые можно использовать для ЭК, относятся:
средний ресурс до ремонта/списания;
средний срок службы до ремонта/списания.

Согласно классификации изделий, при задании требований по надежности [10] режим применения электронных счетчиков можно рассматривать как режим непрерывного длительного применения, при этом сам счетчик относится к изделиям конкретного

назначения. Для таких восстанавливаемых устройств в соответствии с документом [11] в качестве показателей безотказности и ремонтпригодности лучше выбирать среднюю наработку на отказ T_0 и среднее время восстановления $T_в$.

Электронный счетчик рассматривается как модель циклического применения, а поверка принимается за первую фазу ремонта ЭСИ (обычно в процессе поверки еще меняется питающий элемент – батарея счетчика). Следовательно, МПИ в терминах, указанных ГОСТ 27.003, будет представлять собой назначенный срок службы до ремонта ($T_{сл. н. р}$), его расчетное значение будет численно равно $\Delta T_{МПИ}$, которое в соответствии с ГОСТ 27.003 определяется как

$$T_{сл. н. р} = n \cdot T_{сл. \gamma \rho}, \quad (5)$$

где n – часть, которую должен составлять $T_{сл. н. р}$ от $T_{сл. \gamma \rho}$; $T_{сл. \gamma \rho}$ – гамма-процентный срок службы ЭСИ до ремонта; γ – доверительная вероятность.

При циклическом режиме функционирования ЭСИ значение $T_{сл. \gamma \rho}$ определяется как

$$T_{сл. \gamma \rho} = T_{р. \gamma \rho} / K_{и. э},$$

где $T_{р. \gamma \rho}$ – гамма-процентный ресурс ЭСИ до ремонта; $K_{и. э}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации ЭСИ.

В соответствии с источником [7] предельное состояние ЭСИ характеризуется снижением эффективности использования ЭСИ за счет снижения надежности, определяется по выработке ресурса у определенного процента ЭК от общего числа компонентов, входящих в состав ЭСИ. При расчетах отслеживаемых показателей долговечности ЭСИ этот процент равен 0. Поэтому

$$T_{р. \gamma \rho} = \min (T_{р. \gamma 1}, T_{р. \gamma 2}, \dots, T_{р. \gamma i}),$$

где $T_{р. \gamma i}$ – гамма-процентный ресурс i -го ЭК в режиме применения ЭСИ.

При циклическом и облегченном режиме применения ЭК значение $T_{р. \gamma i}$ определяют по формуле

$$T_{р. \gamma i} = \frac{T_{р. \gamma i}(TУ)}{K_{и. э i} \cdot K_{н i}},$$

где $T_{р. \gamma i}(TУ)$ – гамма-процентный ресурс i -го ЭК во всех режимах и условиях применения, заданных ТУ; $K_{и. э i}$ – коэффициент интенсивности применения i -го ЭК в режиме эксплуатации ЭСИ; $K_{н i}$ – коэффициент нагрузки i -го ЭК по отслеживаемому параметру.

В состав микропроцессорных счетчиков электроэнергии входят ЭК: электронный модуль, который состоит из основной электронной платы (осуществляющей функции измерения и регистрации ряда параметров), жидкокристаллического индикатора, элементов оптического порта; литиевая батарея. На основной электронной плате установлены следующие элементы: источник питания, резистивные делители напряжения для всех трех фаз и шунтирующие резисторы для трех трансформаторов тока, кварцевый генератор на 12,2 МГц для задания тактовой частоты и на 32 768 Гц для задания хода часов, специализированная сверхбольшая интегральная схема, микроконтроллер для обработки и регистрации данных на жидкокристаллическом индикаторе, схема сброса электрически перепрограммируемого EEPROM для хранения данных конфигурации и вспомогательных констант [12].

Для определения первичного МПИ микропроцессорного счетчика с использованием показателей долговечности применяются данные вероятности метрологической исправности $P_{МИ}^* = 0,9$, пределы допускаемой погрешности СИ, нормируемые ТУ в размере $\Delta = 0,5 \%$ и в условиях эксплуатации $\Delta_э = 0,5 \%$, среднеквадратическое отклонение распределения

погрешности градуировки (σ_0) при выпуске из производства принимают 0,05 %, средняя наработка до отказа, ч, принимается по данным производителей соответствующих комплектующих счетчика, перечисленных выше.

Оценивая важность назначенного срока службы до ремонта для имеющихся данных в виде средней наработки до отказа, примем коэффициент интенсивности эксплуатации для каждого ЭК равным 1.

В практических расчетах с использованием показателей безотказности для оценки периода до ремонта ЭСИ [4] получаются значения МПИ от единиц месяцев до полутора сотен лет, что вызывает сомнения в применимости такого подхода, рекомендуемого источниками [1] и [7], для счетчика как ЭСИ.

Методика расчета на базе показателей долговечности ЭК, входящих в состав ЭСИ, позволяет получить более адекватные значения МПИ. Пересчитав первичный МПИ счетчика по формулам (3), получим период чуть более 11 лет. Точность полученных значений первичных МПИ для любого СИ, в том числе и для ЭСИ, трудно оценить на адекватность, поскольку их нашли расчетными способами и они должны быть подтверждены экспериментальными данными, что требует времени и статистических результатов. Экспериментальные данные должны быть использованы для повышения точности прогнозирования МПИ ЭСИ и ее дальнейшей корректировки.

С течением времени в отдельных элементах и механизмах СИ происходят процессы «старения», которые приводят к отказам СИ, в том числе метрологических. Определяющими факторами являются эксплуатационные условия, влияющие на метрологическое состояние ЭСИ.

Для определения МПИ в РМГ 74-2004 рекомендованы методики, в которых могут учитываться данные по испытаниям или результаты эксплуатации, но уже с использованием показателей безотказности. Такие же испытательные данные можно использовать для расчета МПИ по показателям долговечности. Если есть данные по расчетным и экспериментальным значениям, то вводят поправочный коэффициент [4], определяемый как

$$K = \frac{\Delta T_{МПИэксп}}{\Delta T_{МПИрасч}}, \quad (6)$$

где $\Delta T_{МПИэксп}$ – экспериментальное значение МПИ ЭСИ; $\Delta T_{МПИрасч}$ – расчетное значение МПИ ЭСИ.

Данное значение поправочного коэффициента K (см. формулу 6), которое зависит как от экспериментальных, так и от расчетных значений МПИ, вводят в формулу (5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методики расчета первоначальных значений МПИ на базе показателей безотказности СИ малопригодны для микропроцессорных счетчиков электроэнергии. Для электронных счетчиков при оценке первичных МПИ можно использовать методику на базе показателей долговечности, срока службы до ремонта. Такие показатели можно применять не только для расчета МПИ электронных счетчиков, работающих автономно, но и для определения МПИ счетчиков в составе автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии.

Кроме этого, в РМГ 74-2004 предусмотрен единый МПИ для всех СИ вне зависимости от их возраста и порядкового номера поверки. Для оценки методов определения МПИ сравним расчетные данные, приведенные в описании типа

электронного счетчика [12], с опытными данными, полученными в ходе поверки. В описании типа электронного счетчика [12] указана средняя наработка на отказ 120 000 ч, МПИ рассчитан и составляет 12 лет. Когда счетчик эксплуатируется по назначению в условиях, отличных от нормальных, электронные элементы подвергаются физическому изменению, происходит скрытое снижение метрологической надежности. Согласно данным Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии за 2020–2024 гг., в результате очередной поверки некоторые счетчики [12] показали выход фактических погрешностей за нормируемые пределы. Доля забракованных счетчиков превысила допустимую норму. Следовательно, у микропроцессорных счетчиков такого типа должен быть скорректирован МПИ.

Ведение научно-исследовательских работ в области создания методов корректировки МПИ микропроцессорных счетчиков является одной из приоритетных задач при достижении необходимой точности измерений автоматизированных цифровых систем, в том числе ИСУ [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РМГ 74-2004. ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. М.: Стандартинформ, 2006. 24 с.
2. Ченцова С.В. Расчет первичного межповерочного интервала по нормируемым показателям надежности средств измерений. *Современные техника и технологии: Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. С. 141–142.
3. Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С. Динамика погрешностей средств измерений. Л.: Энергоатомиздат, ленингр. отд-ние. 1990. 192 с.
4. Жаднов В.В. Методы повышения достоверности и оценки межповерочных интервалов электронных измерительных приборов // *Приборы, методы, технологии*. 2015. № 11. С. 20–27.
5. ОСТ 4.012.013-84. Отраслевой стандарт. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/ost_otraslevoj-standart/0/ost_4_012_013-84_otraslevoj_standart_apparatura.html (дата обращения: 23.01.2025).
6. Надежность ЭРИ: справочник. М.: МО РФ, 2006. 641 с.
7. ОСТ 4Г 0.012.242-84. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчета показателей надежности. URL: <https://m.eruditor.one/file/965558/> (дата обращения: 23.01.2025).
8. Гусеница Я.Н., Шерстобитов С.А., Малахов А.В. Научно-методический аппарат обоснования межповерочных интервалов средств измерений // *Вестник СибГУТИ*. 2017. № 1. С. 40–46.
9. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181141> (дата обращения: 23.01.2025).
10. Боровиков С.М., Цырельчук Н.Н., Троян Ф.Д. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учебно-методическое пособие / под ред. С.М. Боровикова. Минск: БГУИР, 2010. 68 с.
11. ГОСТ 27003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200144951> (дата обращения: 23.01.2025).

12. Счетчик электрической энергии трехфазный многофункциональный Альфа А2. Руководство по эксплуатации. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://simenergo.com/1docs/elster/a2_rykovodstvo_iksplyatazii.pdf?ysclid=mamk370unr158166483 (дата обращения: 23.01.2025).

13. Новиков А.Н. Определение параметров метрологического обслуживания средств измерений по технико-экономическому критерию // *Вестник метролога*. 2022. № 4. С. 12–18.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАРИНОВА Светлана Васильевна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Маринова С.В. Особенности метрологической надежности микропроцессорных счетчиков электроэнергии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2025. № 1 (25). С. 53–60.

PECULIARITIES OF METROLOGICAL RELIABILITY OF MICROPROCESSOR-BASED ELECTRICITY METERS

S.V. Marinova

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article deals with the aspects of determination of the microprocessor electricity meters verification interval. Detailed description of the method which use of existing techniques with reliability indicators. The need for adjustment is shown microprocessor electricity meters verification interval correct.

Keywords: metrological reliability, verification interval, microprocessor electricity meters.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MARINOVA Svetlana Vasilevna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra-ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Marinova S.V. Peculiarities of metrological reliability of microprocessor-based electricity meters // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2025. No. 1 (25), pp. 53–60.