



Метрология цифровых измерений

Аркадий Гуртовцев

Проведён анализ основных понятий метрологии измерительных систем (ИС) и их разновидности — АСКУЭ. Показаны недостатки исторически сложившихся методов метрологической аттестации цифровых ИС и АСКУЭ. Предложено выделять и метрологически аттестовывать в качестве средств измерений в современных ИС и АСКУЭ только их входную часть — первичные цифровые средства измерений или измерительные каналы с цифровым выходом; при этом остальные системные средства рассматривать как вторичные средства неизмерительного назначения, требующие не метрологической, а цифровой аттестации. Такой подход позволяет существенно сократить затраты на метрологическое обеспечение ИС и АСКУЭ.

Часть 2

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цифровые ИС и их компоненты

В первой части статьи было показано, что основные ныне действующие понятия метрологии ИС сформированы в прошлом применительно к технологиям, основанным на аналоговых и дискретных измерениях с представлением их промежуточных и конечных результатов в форме аналогового сигнала, кода, стрелочного отсчёта и, в последнюю очередь, числа. При этом любая ИС, содержащая различные компоненты как измерительного, так и неизмерительного назначения, автоматически рассматривается российской метрологией как СИ, подлежащее метрологической аттестации и поверке. Кроме того, каждая такая система должна утверждаться как тип (единичный или серийный) СИ с обязательным внесением её в Государственный реестр СИ. Данный подход оправдан для аналоговых и дискретных ИС, но становится тормозом для развития цифровых ИС.

Исходным моментом в развитии цифровых технологий измерений следует признать 1971 год, когда был создан первый микропроцессор. Но прошло более двадцати лет, прежде чем микропроцессоры в ходе своей эволюции получили массовое внедрение в

различных СИ. Так, например, в области измерения и учёта электроэнергии электронные микропроцессорные электросчётчики стали широко распространяться в мире только в начале 90-х годов XX века. В микропроцессорных ИС прямые измерения составляют лишь незначительную часть всего процесса нахождения значения измеряемой физической величины, второй и главной частью которого являются операции хранения, передачи и обработки результатов прямых измерений, представленных в цифровом виде. Такие операции до сих пор рассматриваются традиционной метрологией как косвенные измерения, хотя по существу к процессу измерения уже никакого отношения не имеют.

В том случае когда измерительные, вычислительные и иные операции реализуются в рамках конструктивно и функционально законченного изделия (датчика, измерительного преобразователя, измерительного прибора), отделить в нём измерительные операции от вычислительных не представляется возможным: на выходе СИ имеется цифровой результат, и внутренние операции его получения метролога не интересуют. Важна лишь точность (достоверность) этого цифрового результата, которая гарантируется соответствующим метрологическим надзором и контролем. Такой подход сегодняшняя российская метрология распространяет на любые ИС, независимо от их слож-

ности, масштабности и используемых технологий. Для неё каждая ИС, даже если её компоненты распределены на территории в сотни квадратных километров, остаётся большим «чёрным ящиком», на входе которого находится измеряемый процесс, а на выходе формируется результат измерения.

Но в сложных и масштабных цифровых ИС используются конструктивно и функционально (а часто и территориально) обособленные компоненты, часть из которых реализует прямые измерения с представлением их результатов на выходе компонентов в цифровом виде, а другая часть — цифровую обработку этих результатов. Эти ИС представляют собой композицию измерительных и неизмерительных компонентов, и рассматривать их в виде «чёрных ящиков» нецелесообразно, ведь основной путь изучения и понимания сложных процессов заключается как раз в их декомпозиции на более простые составляющие. Относить в таких цифровых системах все компоненты, в том числе неизмерительные (цифровой вычислитель, цифровую память, компьютерное программное обеспечение, цифровой канал связи, модем, монитор, принтер и т.п.), к СИ нет разумных оснований.

В цифровых ИС следует с позиций метрологии цифровых измерений, предлагаемых в настоящей работе, отделить измерительные компоненты от иных компонентов и объединить в циф-

ровые измерительные каналы (ЦИК), а все остальные технические средства за пределами ЦИК рассматривать как специализированные (например, контроллеры) или универсальные (например, компьютеры) неизмерительные компоненты. Соответственно нельзя, если строго следовать понятию измерения, рассматривать как СИ и ИС в целом: средствами измерений в ИС являются только ЦИК и измерительные компоненты, входящие в их состав. Необходимо, наконец, преодолеть давно существующую подмену метрологических понятий и назвать вещи своими именами: измерение – измерением, а вычисление – вычислением.

Возникает вопрос: так как конечный результат на выходе цифровой ИС формируется в двух различных, но взаимосвязанных процессах (процесс измерений в ЦИК, который имеет нормируемые метрологические характеристики, и процесс вычислений в неизмерительных компонентах, который, по всей видимости, не должен иметь таких характеристик), то каким же образом будет обеспечена точность (достоверность) конечного результата? Ведь неизмерительные компоненты могут, вообще говоря, ухудшить в процессе своих цифровых преобразований (цифровой обработки) точность конечных результатов измерений. Очевидно, что для устранения этой опасности необходимо к неизмерительным компонентам ИС предъявить определённые требования по точности выполнения ими операций – точностные требования (не метрологические!), связанные с преобразованием результатов измерений как чисел известной значности в процессах их хранения, передачи, обработки, отображения и документирования. Точность этих операций должна быть такой, чтобы вклад погрешностей дополнительных цифровых преобразований в понижение точности результатов измерений, полученных в цифровом виде на выходе ЦИК (вклад в суммарную погрешность от ЦИК и неизмерительных компонентов), не выходил за установленные пределы. В частности, если точность этих преобразований в 3-5 раз выше точности измерений, то дополнительными погрешностями цифровых преобразований можно пренебречь (при условии отсутствия накоплений погрешностей в длинных последовательных цепочках таких преобразований). Заметим, что в отдельных случаях неизмерительные компоненты могут не

только не ухудшить, но даже улучшить точность результатов измерений (например, при статистической цифровой обработке случайных результатов многократных измерений).

Казалось бы, заменяя метрологические требования к неизмерительным компонентам точностными требованиями, мы ничего нового не получаем. Однако различия вытекают из особенностей процессов измерений и вычислений: первые представляют собой сложные процессы аналогового сравнения измеряемой величины с единицей измерения, а вторые – элементарные арифметические действия над рациональными числами. Например, в цифровых АСКУЭ электронные электросчётчики выполняют с заданной точностью пофазные измерения мгновенных значений переменного тока и напряжения, формируя из них усреднённые значения электроэнергии и мощности, которые накапливаются в цифровых базах данных счётчиков и через их цифровые интерфейсы выдаются для последующих цифровых преобразований на верхние уровни АСКУЭ в устройства сбора и обработки данных (УСПД) или компьютеры (эти устройства осуществляют только преобразования над цифровыми результатами измерений счётчиков). Для повышения точности аналоговых операций необходимы серьёзные технологические достижения (не просто сделать электронный счётчик высокого класса точности!), а для повышения точности

цифровых операций достаточно всего лишь увеличить разрядность чисел (это элементарно делается в УСПД и компьютере!). Поэтому требования к точности измерений и вычислений и способы их обеспечения принципиально различны. Если имеется возможность разделить эти требования (а такая возможность появляется вследствие разделения измерительных и неизмерительных компонентов), то это надо сделать в целях упорядочения и упрощения процесса аттестации ИС.

Проиллюстрируем сказанное примером. Для двоичных чисел, в случае представления их в формате с плавающей запятой, дополнительный байт мантиссы даёт возможность увеличить точность представления числа в $256 (2^8)$ раз. Такое существенное и при этом легко реализуемое повышение точности невозможно при аналоговых измерениях. Если относительная погрешность аналоговых измерений составляет 0,1% (очень высокая точность, например при измерении количества электроэнергии в АСКУЭ или АИИС КУЭ), то для вычислителя, на вход которого поступают числа такой точности, без особых проблем можно обеспечить точность их промежуточного представления и обработки в 100 раз больше (для этого потребуются всего лишь двухбайтовая мантисса). На выходе вычислителя, округлив результат до точности исходных чисел как результатов измерений, мы можем быть уверены, что «подпортили» их точ-

ность не более чем на один процент от исходного значения точности.

Прежде чем сформулировать основные понятия метрологии цифровых измерений, рассмотрим кратко особенности машинного представления результатов измерений в цифровом виде, их обработки, передачи и хранения.

Машинное представление цифровых результатов измерений

Представление цифрового результата измерений в дискретной машинной сетке любого цифрового элемента (электронного электросчётчика, контроллера, компьютера) цифровой ИС возможно в одном из двух форматов:

- в формате числа с фиксированной запятой $A = \pm a_p \dots a_2 a_1, a_{-1} a_{-2} \dots a_{-q}$ с $s = (p + q)$ R -ичными цифрами $a_i \leq (R - 1)$, где p и q – количество цифр, используемых для представления соответ-

венно целой и дробной частей числа, а R – основание системы счисления (для десятичной системы $R = 10$, а для двоичной $R = 2$);

- в формате числа с плавающей запятой $A = \pm M \cdot R^B$, где $M = (0, a_{-1} \dots a_{-m})$ – нормализованная мантисса ($a_{-1} \neq 0$) в R -ичной системе счисления с m значащими цифрами, а $B = \pm b_r \dots b_2 b_1$ – целочисленный порядок числа ($b_i \leq R - 1$).

В формате с фиксированной запятой точность представления числа и его количественное значение (масштаб) неразделимы и взаимозависимы: относительная погрешность представления числа уменьшается с увеличением его масштаба. Например, десятичное число 12345,67 формально по своей записи имеет $s = 7$ значащих цифр и относительную погрешность $\delta \leq 0,01/12345,67 = 0,000008$. При рассмотрении этого же числа как результата измерения электроэнергии электронным электросчётчиком класса 0,2S значащими становятся только первые четыре старшие цифры, показывающие, что истинный результат измерения находится в диапазоне [12340,(0)...12349,(9)]. При этом младшие три цифры числа превращаются в незначащие, но они важны для указания его разрядности и масштаба.

В формате с плавающей запятой точность числа и его количественное значение отделены друг от друга: первая задаётся разрядностью m нормализованной мантиссы, а второе – величиной порядка B (например, число $0,1234 \cdot 10^5$ является эквивалентным выражением результата измерения 12345,67 с точностью в четыре значащих цифры). В этом формате точность измерения величины может быть однозначно отражена соответствующей точностью представления нормализованной мантиссы числа (её разрядностью), причём для чисел любого масштаба.

Количество десятичных значащих цифр m (значасть) цифрового результата измерений на выходе цифрового измерительного компонента ИС должно соответствовать пределу относительной погрешности $\delta \leq 10^{-m+1}$ его представления, то есть при несимметричном округлении с отбрасыванием незначащих цифр числа предел погрешности результата измерений не должен превышать единицы его младшего разряда. При этом количество значащих цифр m в результате измерения определяется формулой $m \geq [1 - \lg(\delta)]$. Например, если $\delta = 0,01$, то количество десятичных

значащих цифр должно быть $m \geq 3$ (минимальное целое трёхразрядное десятичное число со значащими цифрами имеет значение 100, и относительная погрешность его представления составляет не более $1/100 = 0,01 = 1\%$). Для таких СИ, как электронные электросчётчики класса 0,2S, десятичный результат измерения электроэнергии должен иметь m в общем случае не менее 3,7, то есть не менее четырёх десятичных значащих цифр ($m \geq 4$).

В дискретной машинной сетке количество R -ичных разрядов, отводимых для чисел, ограничено как техническими, так и программными средствами, что порождает особенности машинного представления чисел и выполнения арифметических операций над ними: они являются числами и операциями ограниченной точности. Точность и диапазон ($A_{\text{мин}} \dots A_{\text{макс}}$) представления чисел ограничены длиной сетки; если ненулевые цифры числа A в процессе выполнения операций выходят за её пределы, то они теряются, что может привести к искажению результатов. Так, если в процессе выполнения операции появляется число $A > A_{\text{макс}}$, то происходит переполнение формата сетки (ошибка переполнения), а в том случае, когда появляется число $A < A_{\text{мин}}$ – антипереполнение (ошибка потери значности, при которой, в частности, ненулевое число может превратиться в машинный ноль).

Погрешности представления и погрешности операций над числами ограниченной точности определяются не только переполнением и антипереполнением машинной разрядной сетки, но и методами округления чисел, реализуемыми в процессе операций и представления их результатов (симметричным и несимметричным округлением). Правильный выбор разрядности машинной сетки для представления цифровых результатов измерений, выполнения операций над ними и округления промежуточных и конечных результатов вычислений важен для сохранения точности результатов измерения на всех уровнях цифровых ИС.

Известные методы вычислительной техники позволяют достаточно просто обеспечить, в отличие от аналоговых технологий, любую требуемую точность представления и обработки цифровых результатов измерений определённой значности. Тем самым в цифровых ИС гарантируется сохранение точности результатов измерений не

только на выходе ЦИК, но и после различных промежуточных цифровых преобразований на выходе ИС.

Хранение и передача результатов измерений в цифровых ИС

В цифровых ИС результаты измерений не только подвергаются той или иной арифметической обработке, но хранятся в цифровой памяти и передаются по линиям или каналам связи между разными компонентами системы для выполнения в них различных операций. Рассмотрим вопросы обеспечения требуемой точности при операциях машинного хранения и передачи чисел.

Пусть некоторое точное исходное число, поступающее в цифровую систему, помещается в машинную сетку разрядностью n , которая ограничивает точность его машинного представления. Для определённости пусть это будет двоичное число в формате с плавающей запятой, содержащее нормализованную n -разрядную мантиссу (относительная погрешность его представления не превышает 2^{-n}). При размещении в машинной n -разрядной сетке результата измерения как приближённого числа, точность которого

не превышает 2^{-k} ($k < n$), «лишние» $(n - k)$ разрядов обеспечивают хранение приближённого числа с точностью «с запасом». Это делается в целях исключения потери значности приближённого числа в процессе арифметической обработки, если она имеет место в системе. Для конечного же результата арифметической обработки точность его представления в общем случае не может быть выше точности исходного числа, то есть должна иметь не более k разрядов (это требование называют «золотым правилом приближённых вычислений»).

Таким образом, в цифровых системах, обрабатывающих цифровые результаты измерений, точность машинного представления (хранения) этих данных на входе и выходе системы должна соответствовать точности этих данных, то есть быть не ниже её. Точность представления промежуточных данных зависит от вида и количества выполняемых арифметических операций и может быть определена стандартными методами вычислительной техники.

При хранении чисел в цифровой твердотельной памяти современных цифровых систем следует учитывать высокую стабильность во времени та-

кого хранения, обеспечивающего сохранение данных без ошибок практически на протяжении всего срока службы этой памяти. Вместе с тем для повышения достоверности хранения цифровых данных (особенно при возникновении опасности технического отказа памяти) целесообразно периодически производить репликацию хранимых данных в резервные хранилища как внутри цифровой системы, так и вне её.

Передача данных в цифровых системах производится по цифровым интерфейсам (например, по интерфейсам физического уровня RS-232, RS-485 и т.п.) с протоколами, имеющими, как правило, многоуровневую архитектуру (в простейшем случае используются два-три уровня: физический, канальный и прикладной). На каждом уровне обеспечивается защита данных от искажений за счёт применения дополнительных контрольных разрядов и защитных кодов. В процессе приёма данных выполняется их контроль на наличие ошибок, а также используются другие методы обеспечения целостности и достоверности данных. В том случае когда измерительные данные накапливаются и хранятся длительное время в точке измерения (в цифровой

памяти СИ), одним из наиболее эффективных методов обеспечения их достоверности при передаче в другие цифровые компоненты системы является метод повторных запросов и сравнения их результатов.

Отметим, что операции арифметической обработки, хранения и передачи данных в цифровых ИС, в отличие от аналогичных операций в аналоговых и дискретных системах, обладают высокой стабильностью во времени и высокой достоверностью, которую, как и точность вычислений, можно повысить за счёт дополнительной обработки. Если для СИ метрология использует понятие межповерочного интервала (МПИ), что связано с меняющейся во времени метрологической стабильностью этих средств, то для цифровых неизмерительных компонентов их метрологическая стабильность постоянна во времени в течение всего срока службы и поэтому не требует периодических проверок (МПИ равен сроку службы компонента). Для цифровых компонентов возможен технический, но не метрологический отказ, который характерен для аналоговых и дискретных ИС в связи с постепенной деградацией их аналоговых элементов и параметров.

В современных цифровых ИС почти все виды преобразований данных за пределами ЦИК выполняются в микропроцессорных неизмерительных компонентах программным путём. Для цифровых систем, если отлаженная программа обработки или передачи данных работает, то она работает всегда и одинаковым образом, пока работает соответствующее техническое средство. Программы «не ломаются» (хотя недоотлаженные программы и могут работать с ошибками, но это не является проблемой метрологии). Таким образом, долговременная стабильность цифровых компонентов достигается, в том числе, и за счёт их программного обеспечения.

Основные понятия метрологии цифровых измерений

Введём систему понятий метрологии цифровых измерений, используя в качестве аналогов и прототипов устоявшиеся понятия традиционной метрологии (согласно РМГ 29-99).

Цифровой результат измерения физической величины — значение величины, полученное путём её измерения, представленное в позиционной системе счисления в виде рационального числа опре-

делённого формата с известной точностью и доверительной вероятностью.

Примечания:

1. В современных технических системах используются преимущественно двоичная, восьмеричная, шестнадцатеричная и десятичная (или двоично-десятичная) системы счисления и два формата представления рациональных чисел: с фиксированной и с плавающей запятой (точкой).

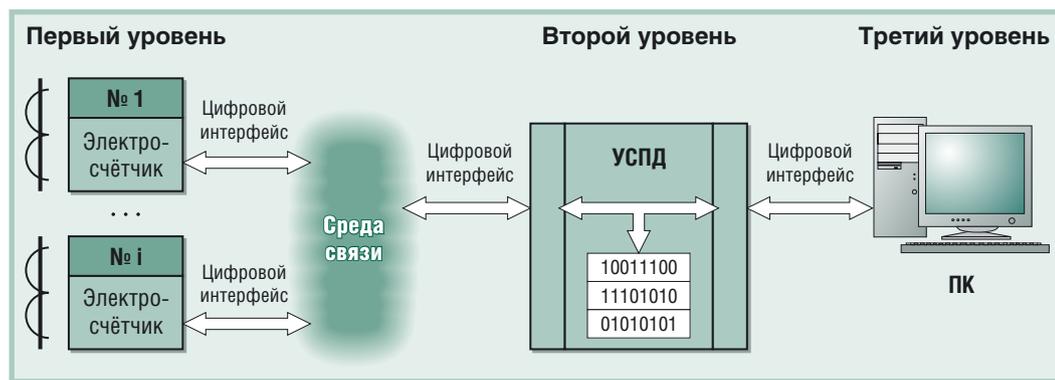
2. Цифровой результат измерения может храниться в регистре, в памяти (базе данных), передаваться по интерфейсу, отображаться на табло, выдаваться на печать, на другие аудио- и видеосредства отображения и документирования данных.

Цифровое измерение физической величины — измерение, результат которого является цифровым результатом.

Примечания:

1. Цифровому измерению физической величины противопоставляется нецифровое измерение; к нецифровым измерениям относятся такие измерения, результаты которых представляются в виде аналоговых сигналов, кодов, отсчётов соответствующей шкалы.

2. Любое измерение оканчивается там и тогда, где и когда появляется



Условные обозначения:
УСПД — устройство сбора и передачи данных; ПК — персональный компьютер.

Рис. 2. Типовая структурная схема цифровой АСКУЭ

цифровой результат измерения, независимо от его дальнейшего использования. Операции последующих преобразований цифровых результатов измерений не являются измерением, а относятся к операциям неизмерительного назначения (хранения, передачи, вычисления и т.п.).

Цифровое средство измерений (ЦИСИ) — СИ, выполняющее цифровое измерение.

Примечание. Цифровому СИ противопоставляется нецифровое СИ, которое выполняет нецифровые измерения.

Цифровой измерительный канал (ЦИК) — цепь последовательно соединённых СИ, образующих путь прохождения измерительной информации от входа цепи к выходу и предназначенных для измерения одной физической величины с представлением результатов её измерений на выходе ИК в цифровом виде.

Примечания:

1. Цифровому ИК противопоставляется нецифровой ИК, содержащий только нецифровые СИ.
2. В состав ЦИК входит в качестве выходного устройства цифровое СИ, а в качестве входных и промежуточных — нецифровые СИ. В простейшем случае ЦИК содержит одно цифровое СИ (например, электронный электросчётчик с цифровым интерфейсом).

Цифровая измерительная система (ЦИС) — совокупность цифровых ИК и иных технических средств неизмерительного назначения, объединённых единым алгоритмом функционирования, предназначенная для измерений, а также выполнения иных операций неизмерительного назначения с целью определения значений одной или нескольких физических величин или их функций.

Примечания:

1. Цифровой ИС противопоставляется нецифровой ИС, в которой хотя бы

один ИК является нецифровым. В цифровой ИС все ИК являются цифровыми.

2. Цифровая ИС в простейшем случае содержит один ЦИК.

3. К техническим средствам неизмерительного назначения относятся средства, не выполняющие измерений. Такими средствами, в частности, являются компьютер (в том случае, если он не реализует с помощью встроенных в него технических средств аналого-цифровых и дискретно-цифровых измерительных преобразований входных сигналов), цифровой накопитель (цифровая память), монитор, принтер, модем, каналы и линии связи и другие устройства.

4. Разновидностью цифровой ИС является цифровая АСКУЭ.

Метрология цифровых измерений (цифровая метрология) — наука о цифровых измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Примечания:

1. Цифровая метрология отличается от традиционной метрологии тем, что имеет дело только с цифровыми измерениями. Она может рассматриваться как новое направление традиционной метрологии, имеющее как сходства с ней, так и отличия. Появление этого направления метрологии связано с массовым распространением современной цифровой технологии во всех областях практики, включая измерения.

2. Традиционная метрология, частично входящая в цифровую метрологию, распространяет свою сферу влияния только до уровня получения цифрового результата измерения, то есть в рамках СИ или ЦИК. В этом отношении сохраняют применимость все традиционные метрологические понятия и положения, включая понятие метрологического контроля.

3. За пределами цифрового результата измерения кончается действие традиционной метрологии, так как с появлением этого результата заканчивается сам процесс измерения. Дальнейшие преобразования этого результата относятся не к области измерений, а к области цифровых информационных технологий (вычислительной техники, программирования, техники связи и т.п.).

4. Цифровая метрология, в отличие от традиционной метрологии, рассматривает все дальнейшие технологические процессы преобразования цифрового результата измерений как операции неизмерительного характера. Поэтому технические средства, выполняющие эти операции, не рассматриваются как СИ, хотя к ним и предъявляются определённые требования по точности и достоверности выполнения соответствующих неизмерительных операций.

Цифровой контроль технических средств — совокупность работ, в ходе выполнения которых устанавливаются или подтверждаются точностные характеристики технических средств неизмерительного назначения, используемых в составе цифровых измерительных систем.

Примечание. К цифровому контролю относятся цифровая экспертиза, цифровая проверка и цифровая аттестация технических средств неизмерительного назначения.

Точностная характеристика технического средства — характеристика технического средства неизмерительного назначения, определяющая точность и достоверность цифровых преобразований (цифровой обработки), выполняемых этим средством.

Примечания:

1. Точностные характеристики зависят от назначения и состава цифровых преобразований (цифровой обработки), производимых соответствующим техническим средством. Технические средства неизмерительного назначения могут подразделяться на вычислительные (компьютер, контроллер), хранения (память), отображения (табло, дисплей, монитор), документирования (принтер), передачи (линии и каналы связи) и т.п. и (или) их комбинации.
2. Точностная характеристика вычислителя определяет точность и достоверность вычислительных операций, включая форматы представления

чисел, методы их округления и контроля правильности операций.

3. Точностная характеристика средства хранения определяет его разрядность, методы контроля записи, чтения и хранения чисел и их временную стабильность.

4. Точностная характеристика средства отображения или документирования определяет форматы представления чисел и методы их округления при выводе чисел из памяти для отображения или документирования.

5. Точностная характеристика средства передачи определяет скорость, задержку и надёжность приёма/передачи чисел, включая методы обнаружения, контроля и исправления ошибок.

Цифровая экспертиза технических средств — анализ и оценивание экспертами-метрологами на основании соответствующей документации достаточности точностных характеристик технических средств неизмерительного назначения, используемых в составе цифровых измерительных систем.

Примечание. Результатом цифровой экспертизы технических средств является экспертное заключение соответствующей метрологической службы.

Цифровая проверка технических средств — испытание технических средств неизмерительного назначения на соответствие их реальных точностных характеристик характеристикам, заявленным в соответствующей технической документации.

Примечания:

1. Для технических средств неизмерительного назначения достаточна первичная однократная проверка, связанная с их цифровой аттестацией. Необходимость в периодических проверках (как для средств измерений) отсутствует в силу их неизменной (стабильной) цифровой структуры.

2. Цифровая проверка должна проводиться согласно соответствующей методике цифровой проверки, которая должна входить в комплект технической документации технического средства неизмерительного назначения, предназначенного, в частности, для использования в составе цифровой измерительной системы.

3. При цифровой проверке могут использоваться как автоматические способы генерации чисел заданной точности (применение генераторов чисел, подключаемых к техническому средству по цифровому интерфейсу), так и ручные способы (запись чисел в па-

мять технического средства через клавиатуру).

Цифровая аттестация технических средств — признание метрологической службой узаконенным применением технических средств неизмерительного назначения в составе конкретных цифровых измерительных систем.

Примечания:

1. Цифровая аттестация включает в себя цифровую экспертизу и первичную цифровую проверку соответствующих технических средств (неизмерительных компонентов системы).

2. Результатом цифровой аттестации технических средств является соответствующее свидетельство, выдаваемое метрологической службой.

Введённая система понятий цифровой метрологии позволяет с единых методологических позиций подойти к анализу и аттестации любой сложной и масштабной цифровой ИС. В частности, она даёт возможность разработать эффективные предложения по аттестации цифровых АСКУЭ.

Об аттестации цифровых АСКУЭ

Типовая структурная схема цифровой АСКУЭ приведена на рис. 2.

Эта схема содержит три уровня: а) первый, или нижний уровень, на котором устанавливаются масштабные преобразователи — измерительные трансформаторы тока и напряжения и электронные электросчётчики; б) второй, или промежуточный уровень, на котором устанавливается устройство сбора и передачи данных —

УСПД; в) третий, или верхний уровень, на котором устанавливается компьютер с программным обеспечением АСКУЭ. Такая модель цифровой АСКУЭ в наибольшей мере соответствует современным структурам реальных цифровых АСКУЭ.

Вместе с тем возможны варианты этой схемы. В одном случае, например, на первом уровне используются электронные электросчётчики непосредственного включения по току и напряжению (при напряжении не выше 0,4 кВ и токе не выше 100 А), не требующие применения измерительных трансформаторов тока и напряжения. Во втором случае на втором уровне может отсутствовать УСПД (или наоборот — применяться два последовательно соединённых УСПД: ведущее и ведомое), а счётчики подключаются по цифровым интерфейсам к компьютеру верхнего уровня и т.п. Можно представить и схему будущей цифровой АСКУЭ, в которой функции счётчиков перенесены на уровень цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения; в этом случае отпадает необходимость в счётчиках, а цифровые выходы измерительных трансформаторов подключаются непосредственно к УСПД или к компьютеру.

В любом варианте в цифровой АСКУЭ присутствуют две группы технических средств: СИ в составе ЦИК и средства неизмерительного назначения за пределами ЦИК. К первым относятся такие средства измерений и учёта, как измерительные трансформа-

торы и электронные электросчётчики, а ко вторым – УСПД, компьютеры с программным обеспечением АСКУЭ, линии и каналы связи. Первые выполняют аналого-цифровые измерения, а вторые – только цифровые операции неизмерительного характера (хранение, передача, обработка, отображение и документирование данных учёта).

Особенностью АСКУЭ любого вида является выполнение операций синхронного измерения количества электроэнергии в территориально-распределённых точках учёта, в которых устанавливаются электронные электросчётчики, имеющие встроенные часы и календарь. Эти часы должны синхронизироваться от единого источника точного времени. Такая синхронизация может выполняться как параллельно и независимо для каждого электросчётчика, например путём приёма счётчиком радиосигнала точного времени, так и посредством передачи команд синхронизации на счётчики и установки времени по каналам связи через компьютер и/или УСПД. Возникает вопрос: не становятся ли средства неизмерительного назначения, такие, например, как УСПД, компьютер или канал связи, средствами измерения времени из-за необходимости передачи сигналов точного времени и синхронизации измерений электроэнергии? Ведь УСПД и компьютер также имеют встроенные часы и календарь, которые используются для инициирования выполнения различных операций с привязкой их к меткам времени.

Отметим, что все процессы измерения электроэнергии, в том числе с привязкой к сигналам точного времени, производятся исключительно в электронных электросчётчиках, которые относятся к СИ со всеми вытекающими отсюда последствиями. УСПД и компьютеры обрабатывают далее только цифровые результаты измерений счётчиков, в том числе с привязкой их ко времени счётчиков (а не ко времени УСПД или компьютера), то есть УСПД и компьютер, несмотря на наличие своих встроенных часов, не выполняют операций измерений ни электроэнергии во времени, ни самого времени. Их встроенные часы носят не измерительный, а вспомогательный, справочный характер. Они могут, вообще говоря, существенно отличаться по своим показаниям от часов счётчиков, и это не вызовет ошибок в вычислениях электроэнергии, а только создаст неудобства. По-

этому требования к точности хода часов УСПД и компьютеров в АСКУЭ носят не метрологический, а общий характер.

В случае передачи команд точного времени для синхронизации часов счётчиков через канал связи, УСПД и компьютер эти средства неизмерительного назначения вносят в процесс передачи определённую задержку, которая может повлиять на точность хода часов счётчиков. Эта задержка может быть малой или большой, но известен рутинный алгоритм её компенсации (поправки), который сводит задержку на нет. Поэтому и в отношении передачи сигналов точного времени указанные средства не удаётся представить как СИ. Таким образом, с учётом выполнения в цифровых АСКУЭ операций синхронного измерения электроэнергии сохраняется ранее введённое разделение всех технических средств в АСКУЭ на СИ и средства неизмерительного назначения.

В соответствии с указанной структурой цифровой АСКУЭ методика её аттестации должна состоять из двух частей: метрологической аттестации ЦИК и цифровой аттестации технических средств неизмерительного назначения. Первая часть методики должна базироваться на типовых методиках аттестации ИК, а вторая – на положениях цифровой метрологии, приведённых ранее, и методах современных цифровых информационных технологий.

Электронные электросчётчики, измерительные трансформаторы тока и напряжения относятся к СИ, обладают нормированными метрологическими характеристиками, утверждаются как типы СИ, включаются в Государственный реестр средств измерений, имеют фиксированный МПИ и подлежат в течение срока своей службы периодическим проверкам. ЦИК содержат помимо измерительных компонентов и линии связи, соединяющие выводные клеммы вторичных обмоток трансформаторов с вводными клеммами измерительных элементов (цепей тока и напряжения) электронных счётчиков. Эти компоненты влияют на метрологические характеристики цифровых измерительных каналов и поэтому подлежат нормированию по верхнему значению своего сопротивления или потере в них мощности (напряжения).

Точностные требования к неизмерительным компонентам цифровых АСКУЭ имеют специфику в зависимости от вида этих компонентов и должны

выполняться: а) для каналов связи – по обеспечению минимального предела частоты ошибок в каналах и по минимальной длине безошибочно передаваемых сообщений; б) для цифровой памяти в УСПД и ПК – по обеспечению возможности хранения цифровых результатов измерений с учётом их значности и диапазона изменений; в) для обработки данных в УСПД и ПК – по устранению дополнительных погрешностей, связанных с используемыми операциями и методами округления; г) для средств отображения и документирования – по обеспечению выдачи результатов измерений и вычислений с учётом их значности и масштабности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлен новый подход к метрологии цифровых ИС и цифровых АСКУЭ. Предложено и обосновано новое направление в метрологии ИС, которое отделяет процессы измерения от всех иных дополнительных процессов неизмерительного характера (передачи, хранения, обработки, отображения и документирования цифровых данных) и формирует для процессов неизмерительного характера определённые требования по точности выполнения ими цифровых преобразований.

На пути становления цифровой метрологии предстоит ещё преодолеть психологическую инерцию многих метрологов, привыкших относить к измерениям и СИ, образно говоря, «всё, что только можно и нельзя». Этот консервативный подход создаёт путаницу в области метрологии сложных и масштабных цифровых ИС, порождает иллюзии обеспечения единства измерений и ведёт к необоснованным материальным, финансовым и временным затратам общества на метрологическое обеспечение таких систем.

В связи с появлением метрологии цифровых измерений необходимо будет в дальнейшем пересмотреть и уточнить ряд базовых понятий метрологии, в частности, таких как измерение и результат измерения, косвенные, совокупные и совместные измерения, средство измерения и т.д.

Использование метрологии цифровых измерений для создания методик аттестации цифровых ИС и АСКУЭ позволит упростить и упорядочить процессы их проектирования, внедрения и эксплуатации и обеспечить реальное единство измерений эффективным путём. ●