

Опыт разработки устройств учета и контроля качества электроэнергии на базе стандарта IEC 61850-9-2LE

Е.А. НЕГОДИНА
Россия, Екатеринбург
ООО «Прософт-Системы»
negodina@prosoftsystems.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Цифровая подстанция, 61850-9-2, счетчик электрической энергии, методика оценки погрешностей.

1 ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько лет стандарт IEC 61850 получил широкое распространение на объектах электроэнергетики по всему миру. Ведущие мировые и российские производители разрабатывают и выпускают новые устройства, работающие в соответствии с этим стандартом. Особый интерес представляет передача и прием мгновенных аналоговых значений в формате IEC 61850-9-2LE.

Счетчики электрической энергии, принимающие данные в формате IEC 61850-9-2LE, являются сравнительно новым классом устройств. Сегодня на рынке представлено только 2-3 типа подобных устройств.

В ООО «Прософт-Системы» был разработан прибор, являющийся цифровым счетчиком электрической энергии с функциями контроля качества и приемом данных в формате стандарта IEC 61850-9-2LE. Также сделана попытка предложить методику оценки погрешностей, вносимых приборами данного типа.

2 МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ С ВВОДОМ ДАННЫХ В СТАНДАРТЕ IEC 61850-9-2LE

2.1 Требования к счетчику электроэнергии с приемом данных в формате стандарта IEC 61850-9-2LE

В ходе разработки к многофункциональному цифровому счетчику электрической энергии с приемом данных в формате стандарта IEC 61850-9-2LE были выдвинуты следующие требования:

- Технические;
- Функциональные;
- Требования к производительности;
- Экономические.

Технические требования включают в себя:

- Компактный размер;
- Отсутствие активных элементов охлаждения;
- Модульное исполнение;
- Возможность монтажа в стойку 19”.

Минимальный функционал, который должен обеспечивать счетчик:

- Прием потоков SV с частотой 80 или 256 точек на период;
- Расчет вторичных электрических параметров;
- Расчет показателей качества электрической энергии по ГОСТ Р 54149-2010 (EN 50160:2010);

- Многотарифный и безтарифный учет электрической энергии;
- Ведение до трех массивов профилей мощности заданной глубины;
- Аварийная сигнализация и самодиагностика;
- Поддержка протоколов синхронизации времени;
- Поддержка протоколов связи с верхним уровнем: IEC 61850-8-1, IEC 60870-5-104, CRQ.

Счетчик должен соответствовать классу точности 0,2S (CI.0.2S) по активной и 0,5 (CI.0.5) по реактивной энергии.

Счетчик должен обладать производительностью, достаточной для одновременного приема до двух потоков SV с частотой до 256 точек на период, накопления собственной базы учетных данных и отдачи их на верхний уровень.

Кроме того, цена прибора должна быть минимальной при соблюдении вышеперечисленного функционала.

2.2 Оценка погрешностей при вычислении электрических параметров

Одной из важнейших задач, возникающих при разработке измерительных приборов и систем, является вопрос оценки погрешности измерения. В отношении систем, использующих шину процесса в соответствии со стандартом IEC 61850-9-2, возможны два подхода к этому вопросу. В первом случае оценивается погрешность измерительного тракта в целом – от измерительного модуля (AMU), выдающего SV поток до IED, принимающего поток и рассчитывающего значения измеренных параметров в именованных единицах. Во втором случае погрешности, вносимые AMU и IED, оцениваются отдельно.

С точки зрения действующей нормативной базы, первый способ является наиболее простым, так как оценка погрешности тракта в целом может быть проведена традиционными методами – подачей аналогового сигнала на вход комплекса и контролем измеренных значений на IED. Тем не менее, данный подход не всегда удобен. На объекте могут быть применены комбинации различных AMU и IED, и для каждой такой комбинации потребуется отдельная метрологическая экспертиза.

Более перспективным представляется второй подход – оценка погрешности каждого элемента измерительного тракта отдельно. В данном докладе мы рассмотрим наши соображения об оценке погрешности IED, в частности, счетчика электрической энергии. Погрешность, вносимая в тракт AMU рассматриваться не будет.

Погрешность, вносимая IED, может быть обусловлена следующими факторами:

1. Способом представления данных в протоколе IEC 61850-9-2LE;
2. Способом представления чисел – целочисленные значения либо формат чисел с плавающей точкой;
3. Количеством пропущенных точек при приеме SV;
4. Методом численного интегрирования.

Способ представления данных в протоколе IEC 61850-9-2LE является источником абсолютной погрешности. В соответствии со спецификацией протокола, токи и напряжения передаются в целых числах, причем масштабный коэффициент по току равен 1000, по напряжению – 100. Таким образом абсолютная погрешность составляет 0,001A по току и 0,01В по напряжению.

Из сказанного ранее следует, что в расчетах, производимых в IED целесообразно использование целочисленного представления данных. В случае расчетов в числах с плавающей точкой происходит потеря точности при суммировании квадратов за счет погрешности преобразования и особенностей машинного представления таких чисел. В случае использования целочисленной арифметики погрешность возникает только в операции SQRT при расчете действующих значений I и U, и ее предел можно приблизительно оценить как $\Delta I = 0,03A$, $\Delta U = 0,1В$.

Еще один источник погрешностей в IED – пропуски точек в потоке SV. Погрешность, возникающая при пропусках точек, зависит от их распределения во времени. Математическая оценка ее величины представляется сложной и нецелесообразной.

Особенно критичен к пропуску пакетов расчет частоты тока, поскольку в расчете могут быть пропущены моменты перехода синусоиды через 0 (ноль). Опытным путем было установлено, что независимо от распределения пропусков, погрешность частоты не превышает 0,01Гц при количестве пропусков в среднем не более 10 пакетов в минуту. Таблица зависимости приведена ниже.

Пропуски, пакетов/мин.	Δf , Гц	$\max \delta I_1$, %	$\max \delta U_1$, %
< 10	0,01	0,007	0,008
< 100	0,02	0,021	0,030
< 200	0,05	0,060	0,060
< 500	0,20	0,150	0,130

Табл. 1: Зависимость погрешностей от средней частоты пропуска пакетов

Дополнительно отметим целесообразность использования процессоров с разрядностью не ниже 32, поскольку это позволяет оперировать 32-разрядными значениями SV без дополнительных обращений к памяти, что ускоряет вычисления и уменьшает вероятность пропуска точек.

При расчете мгновенных значений важен метод численного интегрирования: он должен быть максимально быстрым и, при этом, иметь минимальную погрешность. Нами было рассмотрено два метода – метод прямоугольников и метод Симпсона.

Формулы расчета относительной погрешности для различных методов численного интегрирования известны и приведены в соответствующих справочниках [1]. Так, при использовании метода прямоугольников (1), погрешность метода вычисляется по формуле (2). Соответственно, при частоте SV 4000Гц и использовании метода прямоугольников, максимальная относительная погрешность, вносимая самим методом, составляет порядка $1,3 \cdot 10^{-3}$ %.

$$\int_a^b f(x)dx \approx h \sum_{k=1}^N f(x_k - \frac{h}{2}), h = \frac{b-a}{N}. \quad (1)$$

$$E(f) = \frac{h^3}{12} f^{(4)}(\xi). \quad (2)$$

Для метода Симпсона (3) погрешность вычисляется по формуле (4). При частоте SV 4000Гц и использовании метода Симпсона, максимальная относительная погрешность, вносимая самим методом, составляет порядка $1,0 \cdot 10^{-6}$ %.

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{3} (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \dots + 2y_{2N-2} + 4y_{2N-1} + y_{2N}), h = \frac{b-a}{2N} \quad (3)$$

$$E(f) = \frac{h^4}{2880} f^{(4)}(\xi). \quad (4)$$

Таким образом, мы рассмотрели четыре фактора, способных внести погрешность в расчет значений электрических параметров. Нетрудно заметить, что погрешности, вносимые первыми двумя факторами – представлением данных в протоколе IEC 61850-9-2LE и способом представления чисел – являются фактически константами, не зависят от реализации конкретного IED и в пределе составляют порядка $\Delta I = 0,03A$, $\Delta U = 0,1B$ в абсолютных величинах и порядка $\delta I_1 = 0,007\%$, $\delta U_1 = 0,008\%$ в относительных. Это означает, что при оценке конкретного IED метрологу достаточно:

1. Убедиться в использовании целочисленной арифметики;
2. Замерить количество пропусков пакетов при приеме потока SV;
3. По известным формулам рассчитать погрешность метода интегрирования.

2.3 Реализация счетчика, испытания, фактические погрешности

В 2012 году в компании ООО «Прософт-Системы» был разработан многофункциональный цифровой счетчик электрической энергии ARIS EM, с функциями контроля качества электроэнергии. В качестве аппаратной базы были выбраны два варианта процессоров:

- ARM v7, 600 MHz – для приема одного потока с частотой 80 точек на период. Такой вариант применим для расчета всех характеристик тока и напряжения, а также для расчета большинства показателей качества электроэнергии;
- Intel Atom, 1GHz – для одновременного приема до двух потоков с частотой до 256 точек на период. Такой вариант применим для расчета всех характеристик тока, напряжения и показателей качества электроэнергии.

Была произведена теоретическая оценка погрешности вычисления:

1. Счетчик реализован на базе 32-разрядного процессора, использует целочисленное представление данных, соответственно предельные абсолютные погрешности будут следующими: $\Delta I = 0,03A$, $\Delta U = 0,1B$.
2. Пропуски пакетов отсутствуют, следовательно, $\Delta f \leq 0,01Гц$, предельные относительные погрешности по току и напряжению – $\delta I_1 = 0,007\%$, $\delta U_1 = 0,008\%$.
3. Для интегрирования использован метод прямоугольников, значит, $\delta I_2 = 1,3 \cdot 10^{-3} \%$, $\delta U_2 = 1,3 \cdot 10^{-3} \%$.

С целью подтверждения заявленных характеристик были проведены испытания прибора. В качестве эталонного источника потока SV был использован OMICRON CMC 256plus, относительная погрешность которого составляет $\delta CMC = 0,5 \cdot 10^{-3} \%$.

Таким образом, предельные относительные погрешности вычисления не должны превышать по току и напряжению:

$$\delta I = \delta I_1 + \delta I_2 + \delta CMC = 8,8 \cdot 10^{-3} \%,$$

$$\delta U = \delta U_1 + \delta U_2 + \delta CMC = 9,8 \cdot 10^{-3} \%,$$

по мощности и энергии:

$$\delta P = \delta E \approx \delta I + \delta U = 1,86 \cdot 10^{-2} \%.$$

По результатам испытаний были получены характеристики, представленные в таблице 2.

	$\Delta I, A$	$\Delta U, B$	$\delta I, \%$	$\delta U, \%$	$\Delta f, Гц$	$\delta P, \%$	$\delta E, \%$
Теоретическая оценка	0,030	0,10	0,0088	0,0098	0,01	0,0186	0,0186
Результат испытаний	0,001	0,01	0,0001	0,0001	0,01	0,0025	0,0025
Примечание*	$I < 15A$	$U < 50B$	$I > 15A$	$U > 50B$	$45 < f < 65$	$P > 750Вт$	$E > 2700кВтч$

Табл. 2: Результаты испытаний счетчика ARIS EM. (*)Все данные приведены в первичных величинах

Очевидно, что метрологические характеристики счетчика полностью соответствуют заявленному классу точности. Погрешности, полученные по результатам испытаний меньше теоретической оценки по двум причинам:

1. Для теоретических погрешностей приведены предельные значения;
2. Исходные сигналы тока и напряжения имеют синусоидальную форму. На практике для периодических функций типа синусоиды погрешность интегрирования всегда будет серьезно меньше предельных оценочных значений.

В августе 2012 года были проведены испытания измерительного тракта с волоконно-оптическими измерительными преобразователями тока и напряжения (ВОПТ/ВОПН) производства ЗАО «Профотек» и ARIS EM. На испытаниях была подтверждена совместимость указанного оборудования. Суммарная погрешность тракта не превысила максимальную теоретическую суммарную погрешность, которая определяется классами точности оборудования. Класс точности ВОПТ/ВОПН и ARIS EM – 0,2S.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для полноценного и успешного внедрения концепции цифровой подстанции на объекты электроэнергетики необходима совместная работа производителей оборудования, а также эксплуатирующих и надзорных организаций. Вопросы, рассмотренные выше, могут служить основой для следующего этапа развития систем цифрового учета – разработки нормативной базы, соответствующей общемировым тенденциям развития отрасли. Она будет основываться на собственном опыте производителей, метрологов и эксплуатирующих организаций.

Таким образом, с применением описанного комплексного подхода к решению проблемы, будут устранены серьезные препятствия для дальнейшего совершенствования цифровых приборов учета и архитектур их применения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов., М., Наука, 1981.