

## РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНОВ ИЗМЕРЕНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОСЕТИ

*О.М.Доронина, А.Г.Оганесян, С.В.Хомич*

Национальный университет "Львівська  
политехніка"

г. Львов, ул. Ст. Бандеры, 12

E-mail: serge@polynet.lviv.ua

*Рассматривается проблема расширения диапазонов измерения параметров электроэнергетики системы с прямым аналого-цифровым преобразованием контролируемых сигналов. Анализируются способы ограничения погрешностей в расширенных диапазонах измерения за счёт увеличения разрядности АЦП, введения дополнительных поддиапазонов измерения и снижения влияния неустойчивости характеристик входных трансформаторов.*

**Вступление.** Необходимость контроля наряду с установившимися переходными режимов работы электросети, когда значения токов могут превышать в 20-30 раз свои номинальные значения, приводит к необходимости расширения диапазонов измерения токов, а следовательно мощностей и энергий, в сторону их увеличения. Что же касается установившихся режимов работы, то в реальных условиях эксплуатации при уменьшении нагрузки на энергосеть возможно значительное уменьшение токов (до 0,1% от номинального значения), что приводит к необходимости расширения диапазонов измерения соответствующих энергетических параметров в сторону их уменьшения. Расширение диапазонов измерения параметров электроэнергии в системе контроля выдвигает на первый план две проблемы: ограничение погрешности квантования и снижение влияния на точность измерения неустойчивости метрологических характеристик входных измерительных трансформаторов.

**Снижение погрешности квантования.** Основными источниками погрешности квантования в системе контроля параметров электроэнергии с прямым аналого-цифровым преобразованием входных сигналов является ограниченность разрядных сеток АЦП и вычислительного

устройства. При этом, как видно из [1], вопрос рационального выбора разрядности процессора всегда может быть сведен к определению необходимого резерва его разрядности сверх разрядности АЦП. Обычно этот резерв составляет один – два двоичных разряда.

Зависимости относительных погрешностей квантования параметров электроэнергии промышленной сети: действующих значений тока и напряжения, активной и реактивной мощности от погрешностей квантования входных сигналов  $u(t)$  и  $i(t)$  определяются соответственно как:

$$\delta_U = 1 - \sqrt{1 + \frac{\sum_{j=0}^{n-1} \Delta_{uj}^2}{nU_m^2}}, \quad (1)$$

$$\delta_I = 1 - \sqrt{1 + \frac{\sum_{j=0}^{n-1} \Delta_{ij}^2}{nI_m^2}}, \quad (2)$$

$$\delta_P = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} (\Delta_{uj} \Delta_{ij})}{nU_m I_m \cos \varphi}, \quad (3)$$

$$\delta_Q = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} (\Delta_{uj} \Delta_{ij})}{nU_m I_m \sin \varphi}, \quad (4)$$

где  $\Delta_{uj}$  и  $\Delta_{ij}$  – абсолютные погрешности квантования соответственно  $u(t)$  и  $i(t)$ ;  $U_m$  и  $I_m$  – амплитудные значения соответственно  $u(t)$  и  $i(t)$ ;  $\varphi$  – угловой сдвиг между  $u(t)$  и  $i(t)$ .

При случайном установлении начала шкалы отсчёта погрешности  $\Delta_{uj}$  и  $\Delta_{ij} \rightarrow \Delta_j$  распределяются по закону Симпсона в интервале  $[-h, h]$ , где  $h$  – шаг квантования АЦП:

$$\varpi(\Delta_j) = h^{-1} \cdot \left( 1 - \frac{|\Delta_j|}{h} \right). \quad (5)$$

Практика показывает, что при расширенном диапазоне измерения энергетических параметров промышленной электросети снижение погрешности квантования целесообразно выполнять за счёт увеличения разрядности АЦП и введения дополнительных поддиапазонов измерения. При этом наиболее оптимальным с точки зрения стоимости, быстродействия и простоты обслуживания является использование микросхем 16-разрядных АЦП поразрядного уравнивания.

Дополнительные поддиапазоны измерения предполагают введение ступенчато-равномерного квантования, характеризующегося дискретным изменением шага квантования при переходе контролируемого параметра  $y$  из одного поддиапазона измерения в другой. В этом случае критерий точности может быть выражен как средний квадрат относительной погрешности:

$$\delta_H^2 = \sum_{i=0}^{p-1} \int_{Y_i}^{Y_{i+1}} \frac{H_{i+1}^2}{6y^2} \omega(y) dy, \quad (6)$$

где  $H$  – шаг квантования измеряемого параметра  $y$  как функция от  $h$ ;  $\omega(y)$  – глобальное распределение  $y$  для системы с  $p$  поддиапазонами:

$$\omega(y) = \frac{1}{y \ln \frac{Y_{\max}}{Y_{\min}}}. \quad (7)$$

Определение оптимальных значений координат  $Y_i$  границ  $p$  поддиапазонов измерения по критерию (6) сводится после приравнивания нулю частных производных к решению системы уравнений:

$$2Y_i \int_{Y_{i-1}}^{Y_i} \frac{\omega(y)}{y^2} dy + \omega(Y_i) - \omega(Y_i) Y_{i+1}^2 Y_i^{-2} = 0, i = \overline{1, p}. \quad (8)$$

С учётом (7) система уравнений (8) преобразуется к виду:

$$2Y_i \int_{Y_{i-1}}^{Y_i} y^{-3} dy + Y_i^{-1} - Y_{i+1}^2 Y_i^{-3} - Y_{i+1}^2 Y_i^{-3} = 0, i = \overline{1, p} \quad (9)$$

И её решение согласно [2] имеет вид:

$$Y_i = Y_{\min} \left( \frac{Y_{\max}}{Y_{\min}} \right)^{\frac{i}{p}}, i = \overline{1, p-1}. \quad (10)$$

Анализ выражений (2)-(6) и (10) показывает, что при использовании 16-разрядного АЦП и граничном значении относительной погрешности квантования действующих значений токов и мощностей (энергий) промышленной электросети, равным 0,2%, оптимальным является 4 поддиапазона измерения этих параметров. Однако, так как в случае переходных процессов требование к погрешности измерения не является таким жестким, как для установившегося режима работы, количество поддиапазонов измерения может быть снижено до трёх при  $Y_1=0,04y_{\text{ном}}$ ,  $Y_2=1,2y_{\text{ном}}$ .

Снижение влияния нестабильности метрологических характеристик входных трансформаторов. Искажение оценок контролируемых параметров электроэнергии при расширенном диапазоне изменения входных токов (от  $0,001 I_{\text{ном}}$  до  $30 I_{\text{ном}}$ ) возможно из-за:

- зависимости угловой погрешности трансформаторов во входных измерительных цепях от амплитуды и частоты входных сигналов;

- насыщения промежуточных трансформаторов, рассчитанных на режимы работы, близкие к номинальному, при верхних значениях токов.

Идеальным в этом случае является включение в токовые измерительные цепи трех трансформаторов, рассчитанных на рассмотренные выше поддиапазоны измерения. Однако, с целью снижения стоимости системы контроля параметров электроэнергии, обслуживающей реально до 40 трёхфазных присоединений, возможно использование для двух нижних поддиапазонов измерения одного трансформатора с введением двух коэффициентов усиления сигнала со

вторичной обмотки трансформатора при соотношении коэффициентов 1:30.

При малом частотном диапазоне входных сигналов (для промышленной сети – от  $0,8 F_{\text{ном}}$  до  $1,2 F_{\text{ном}}$ ) и коррекции систематической составляющей погрешности вычисления мощностей (энергий) от углового сдвига между токами и напряжениями в фазах [1] на первый план выдвигается проблема снижения зависимости угловой погрешности от амплитуды входных сигналов в расширенном диапазоне их изменения. Решение этой проблемы возможно за счёт использования во входных измерительных цепях системы трансформаторов на тороидальных сердечниках из высококачественных материалов, гарантирующих малый угловой сдвиг между сигналами в первичной и вторичной обмотках. Недостатком такого пути решения проблемы является высокая стоимость таких трансформаторов из-за сложности намотки и относительно большой стоимости сердечников. Вторым возможным способом снижения угловой погрешности является программная коррекция результатов вычисления мощностей (энергий) по предварительно определённой зависимости изменения величины углового сдвига от амплитуд (действующих значений) контролируемых сигналов для каждой ступени их квантования.

Так, при результатах вычисления активной и реактивной мощностей соответственно:

$$P = UI \cos(\varphi + \Delta\varphi), \quad (11)$$

$$Q = UI \sin(\varphi + \Delta\varphi), \quad (12)$$

где:  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I$ ,  $\Delta\varphi_U$  и  $\Delta\varphi_I$  – дополнительные углы сдвига контролируемых напряжения и тока при их действующих значениях соответственно  $U$  и  $I$ .

коррекция этих результатов должна выполняться согласно выражениям:

$$P' = P \cos(\Delta\varphi') + Q \sin(\Delta\varphi'), \quad (13)$$

$$Q' = Q \cos(\Delta\varphi') - P \sin(\Delta\varphi'), \quad (14)$$

где:  $\Delta\varphi' = \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I$ ,  $\Delta\varphi_U$  и  $\Delta\varphi_I$  – дополнительные углы сдвига, определённые для соответствующих значениям  $U$  и  $I$  ступеней квантования входных сигналов.

После коррекции угловые погрешности вычисления активной и реактивной мощностей будут равны соответственно:

$$\delta_P = 1 - \cos\Delta + \text{Tg}\varphi \sin\Delta, \quad (15)$$

$$\delta_Q = 1 - \cos\Delta - \text{Ctg}\varphi \sin\Delta, \quad (16)$$

где значение  $\Delta = (\Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) - (\Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I)$  может быть уменьшено до необходимо малой величины за счёт уменьшения шага квантования.

**Выводы.** Расширение диапазонов измерения энергетических параметров промышленной электросети возможно как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения значений параметров, что приводит к возрастанию предельных значений относительной погрешности квантования и дополнительной угловой погрешности, зависимой от изменения амплитуды входных сигналов. Ограничение погрешности квантования в расширенном диапазоне измерения параметров электроэнергии возможно за счёт рационального выбора разрядности АЦП и перехода к ступенчато-равномерному квантованию. Дополнительная угловая погрешность может быть снижена за счёт повышения качества входных трансформаторов или введения программной коррекции результатов вычисления по предварительно определённым ожидаемым значениям угловой погрешности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дороніна О.М., Лавров Г.М., Хомич С.В. Підвищення точності системи контролю енергетичних параметрів електромережі. // Системи контролю оточуючої середовища. Сборник наукових трудов НАНУ. – Севастополь: МГІ, 2004. – С. 96-98.
2. Коломиец О.М., Прошин Е.М. Автоматический выбор диапазонов измерения в цифровых приборах. – М.: Энергия, 1980. – 289 С.