

УДК 621.317.73

Т.Г. Бойко, В.М. Ванько, П.Г. Столярчук
 Національний університет "Львівська політехніка",
 кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КРАЙОВОГО ЕФЕКТУ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

© Бойко Т.Г., Ванько В.М., Столярчук П.Г., 2001

Проаналізовано похибку вимірювання, зумовлену крайовим ефектом в методі цифрового оброблення миттєвих значень, при визначенні інтегральних характеристик сигналів електричної мережі. Запропоновано шляхи підвищення точності перетворення завдяки оптимізації параметрів дискретизації вхідних сигналів та вибору ефективної структури однокристальної мікро-ЕОМ.

The writers conduct the analysis of a measuring error conditioned by an edge effect in a method of digital processing of instantaneous values, at definition of the integral characteristics of signals of an electrical network. The path of increase of accuracy of transformation is offered by optimization of sampling parameters of input signals and selection of effective frame of a single-chip micro-computer.

Розвиток мікропроцесорної техніки сприяє щораз ширшому впровадженню процесорів обробки цифрових сигналів для реалізації засобів вимірювання енергетичних параметрів змінних сигналів низьких та інфранизьких частот. Основний принцип побудови таких вимірювальних засобів полягає в опрацюванні інформації про миттєві значення контрольованих сигналів за допомогою спеціалізованих процесорних структур, реалізованих, як правило, на однокристальних мікро-ЕОМ.

Згідно з [1] вимірювання з використанням методу цифрового оброблення миттєвих значень вхідних сигналів (МЦОМЗ) супроводжується виникненням таких похибок:

- похибки апроксимації, спричиненої вибірковою характером отримання інформації про неперервний сигнал у вигляді дискретизації останнього в часі з певним заданим кроком, котрий визначає відстань між сусідніми точками вибору миттєвих значень;
- похибки квантування, тобто відтворення даних про миттєві значення вхідних сигналів числовим кодовим еквівалентом у процесі аналого-цифрового перетворення;
- динамічних похибок, які виникають за рахунок часової невідповідності моменту отримання відліку миттєвого значення вхідного сигналу так званому "ідеальному моменту";
- похибки крайового ефекту, спричиненої тим, що інтервал вимірювання не ділиться кратно на тривалість кроку дискретизації вхідних неперервних сигналів, що веде до втрати чи надлишку перетвореної за певним алгоритмом інформації.

Методичні похибки, зумовлені операціями апроксимації та квантування, мінімізуються шляхом вибору необхідної кількості точок дискретизації залежно від спектрального складу вхідних сигналів та забезпечення відповідної розрядності АЦП. Для прикладу, у випадку вимірювання інтегральних характеристик сигналів промислової мережі для забезпечення похибок визначення середньоквадратичного значення (СКЗ) напруги чи

середнього значення (СЗ) активної потужності на рівні $\pm 0,1\%$ достатньо здійснювати аналого-цифрове перетворення 256 точок дискретизації на період повторення вхідних сигналів з використанням 12-14 двійкових розрядів на діапазон перетворення.

Динамічні похибки, що виникають при МЦОМЗ електричних сигналів мережі, в основному, визначаються швидкодією АЦП. Для більшості сучасних АЦП час перетворення становить 5...10 мкс, що визначає рівень динамічної похибки для СКЗ напруги і СЗ активної потужності не вище ніж $\pm 0,05\%$.

Виходячи з поданих міркувань, актуальним є аналіз впливу похибки крайового ефекту на точність вимірювання вищезгаданих величин в промисловій мережі.

В загальному випадку при МЦОМЗ вхідних сигналів СКЗ напруги та СЗ активної потужності визначаються виразами

$$U_{СК} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_2} u^2(t) dt}, \quad (1)$$

$$P_{СК} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_2} u(t) i(t) dt, \quad (2)$$

де T_1 і T_2 – часи усереднення та інтегрування.

Для трифазної системи синусоподібних сигналів $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_U)$ та $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_I)$ з амплітудними значеннями U_m та I_m , круговою частотою повторення ω і початковими фазами φ_U та φ_I похибка від крайового ефекту при визначенні $U_{СК}$ і P_C описується залежностями

$$\delta_U = \frac{\delta_{T_2} - \delta_{T_1}}{2n + 2\delta_{T_1}} + \frac{\sin 2\varphi_U - \sin(4\pi\delta_{T_2} + 2\varphi_U)}{8\pi(n + \delta_{T_1})}, \quad (3)$$

$$\delta_P = \frac{\delta_{T_2} - \delta_{T_1}}{n + \delta_{T_1}} + \frac{(1 - \cos 4\pi\delta_{T_2}) \sin(\varphi_U + \varphi_I) - \cos(\varphi_U + \varphi_I) \sin 4\pi\delta_{T_2}}{4\pi(n + \delta_{T_1}) \cos(\varphi_U - \varphi_I)}. \quad (4)$$

Причому $T_1 = T(n + \delta_{T_1})$ та $T_2 = T(n + \delta_{T_2})$ складаються з певної кількості цілих періодів повторення T та деяких часток $\delta_{T_1} = \Delta t_1 / T$ і $\delta_{T_2} = \Delta t_2 / T$, менших від одиниці.

Якщо забезпечити $n = 1$, кількість точок дискретизації на період повторення $T = 256$, а модулі максимальних значень $|\delta_{T_1}|_{max} = |\delta_{T_2}|_{max} = 1/256$, то згідно з (3) і (4) при перетворенні трифазних сигналів $u_A, u_B, u_C, i_A, i_B, i_C$ похибки крайового ефекту СКЗ цих напруг та СЗ фазових активних потужностей не перевищуватимуть відповідно: $\delta_U \leq \pm 0,5\%$ та $\delta_P \leq \pm 1,0\%$. Вважається, що між u_A та i_A, u_B та i_B, u_C та i_C відсутні зсуви фаз тобто $\varphi_U - \varphi_I = 0$, що відповідає активному характерові навантаження у всіх трьох фазах.

Аналіз виразів (3) і (4) показує, що похибки від крайового ефекту можна зобразити у вигляді двох незалежних складових $\delta_U = \delta'_U + \delta''_U$ і $\delta_I = \delta'_I + \delta''_I$, де

$$\delta'_U = \frac{\delta_{T_2} - \delta_{T_1}}{2n + 2\delta_{T_1}}; \quad \delta''_U = \frac{\sin 2\varphi_U - \sin(4\pi\delta_{T_2} + 2\varphi_U)}{8\pi(n + \delta_{T_1})}; \quad (5)$$

$$\delta'_P = \frac{\delta_{T_2} - \delta_{T_1}}{n + \delta_{T_1}}; \quad \delta''_P = \frac{(1 - \cos 4\pi\delta_{T_2}) \sin(\varphi_U + \varphi_I) - \cos(\varphi_U + \varphi_I) \sin 4\pi\delta_{T_2}}{4\pi(n + \delta_{T_1}) \cos(\varphi_U - \varphi_I)}. \quad (6)$$

Під час мікропроцесорної реалізації програми МЦОМЗ для обчислення вищевказаних інтегральних характеристик сигналів електромережі можна забезпечити примусове вирівнювання операцій інтегрування та усереднення. Враховуючи можливості сучасних однокристальних мікро-ЕОМ, можна з достатньо високою точністю забезпечити рівність $T_1 = T_2$, завдяки чому складовими δ'_U та δ'_P можна знехтувати.

У практиці вимірювань на енергооб'єктах переважно виникають дві необхідності:

- швидкого визначення СКЗ напруги і СЗ потужності за один-два періоди T для аналізу аварійних ситуацій;
- повільнішого отримання тих самих величин за час, більший, ніж $10 T$ у штатних ситуаціях, при продукуванні та розподілі електричної енергії споживачам.

У першому випадку, коли $n = 1$ та $\delta_{T_2} = \delta_{T_1} = \delta_T \ll 1$, отримуємо з (5) і (6)

$$\delta''_U = \frac{\sin 2\varphi_U - \sin(4\pi\delta_T + 2\varphi_U)}{8\pi}, \quad (7)$$

$$\delta''_P = \frac{2\pi\delta_T^2 \sin(\varphi_U + \varphi_I) - \delta_T \cos(\varphi_U + \varphi_I)}{\cos(\varphi_U - \varphi_I)}. \quad (8)$$

З урахуванням наведених даних, а саме $|\delta_T|_{max} = 1/256$ та $\cos(\varphi_U - \varphi_I) = 1$, при вимірюванні фазних напруг і активних потужностей похибки не перевищуватимуть: $\delta_U \leq \pm 0,25\%$ та $\delta_P \leq \pm 0,5\%$.

При більш повільних вимірюваннях, згідно з (5) і (6), збільшення кількості періодів n в циклі вимірювання викликає пропорційне зменшення похибок δ''_U і δ''_P від крайового ефекту, однак водночас стрімко зростає розрядність результату в мікроконтролері після інтегрування при обчисленні СКЗ чи СЗ сигналів. У такому разі необхідно використовувати однокристальні мікро-ЕОМ з розширеною шиною даних, наприклад 16-бітною, або зменшувати кількість точок дискретизації вхідних сигналів за цикл вимірювання. Прикладом такого мікроконтролера може бути один з різновидів базової архітектури MCS[®]96, котра вважається покращеною модифікацією відомої широкоживаної 8-бітної структури MCS[®]51. Згідно з [2] порівняння на основі результатів тестування з розв'язання ідентичних завдань мікроконтролерами 80C51 (представник MCS[®]51), 80C196KC і 80C196NU (належать до MCS[®]96) привело до такого висновку: якщо взяти за основу значення відносного індексу продуктивності, який вираховували за швидкістю виконання стандартної команди і максимальною тактовою частотою мікроконтролера, а саме для MCS[®]51 – одиницю, то для 80C196KC та 80C196NU отримано було, відповідно, значення 5,45 і 17.

Завдяки цьому з'являється можливість маніпулювати значеннями n та δ_T так, щоби одночасно забезпечити оптимальну розрядність результату обчислень після інтегрування та порівняно високу швидкість (на рівні 0,5 с для визначення інтегральних характеристик в трифазній мережі) і високу точність вимірювання. Наприклад, похибка крайового ефекту при визначенні СКЗ фазних напруг і фазних активних потужностей при вибраних

$|\delta_T|_{max} = 1/32$, $n = 16$ та 512 точках дискретизації за цикл вимірювання не перевищуватимуть таких значень: $\delta_U \leq \pm 0,1 \%$ та $\delta_P \leq \pm 0,2 \%$ для $\cos(\varphi_U - \varphi_I) = 1$. У поданому прикладі не встановлено меж у можливостях зменшення методичної похибки від крайового ефекту при вимірюванні інтегральних характеристик сигналів електромережі. Подальшим зменшенням δ_T та збільшенням n можна істотно мінімізувати значення δ_U та δ_P . Цьому сприятиме застосування АЦП з загальним часом перетворення, меншим від 5 мкс, та більш продуктивних мікроконтролерів.

1. Ванько В.М. *Повышение точности АЦП активной мощности энергетических цепей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львів. 1991.* 2. *Микроконтроллеры Intel MCS[®]96: делайте выбор // CHIP NEWS. - 1996. - № 3.*