

УДК 621.398

О.М. Дороніна*, Г.М. Лавров, С.В. Хомич
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра “Електронно-обчислювальні машини”,
 *НДКІ ЕЛВІТ

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ

© Дороніна О.М., Лавров Г.М., Хомич С.В., 2003

Розглянуто шляхи зменшення інструментальних похибок вимірювальних каналів комп'ютеризованої системи контролю та діагностики енергооб'єктів. Проаналізовано способи мінімізації впливу похибок блоків проміжних трансформаторів та аналого-цифрового перетворення на точність визначення енергетичних параметрів. Досліджено похибки обчислень через обмеженість розрядної сітки процесора.

This paper presents the instrumental errors decrease paths for the measuring channels of the power works control and diagnostics computerized system. There are analysed the methods of the minimization of the transformer blocks and AD converters errors effect on the power parameters determination accuracy. Also there are examined calculation errors through the processor digit capacity limit.

Вступ

В основі вимірювань енергетичних параметрів $\lambda(t)$ промислової електромережі лежить використання відомих функціональних зв'язків цих параметрів з величинами напруг $u(t)$ та струмів $i(t)$ в електромережі:

$$\lambda(t) = F(\gamma(t)), \quad (1)$$

де $\gamma(t) \equiv u(t)$, $\gamma(t) \equiv i(t)$ або $\gamma(t) \equiv u(t)$, $i(t)$, що дозволяє максимально уніфікувати та комп'ютеризувати ці вимірювання виконанням їх на основі аналого-цифрового перетворення контрольованих напруг та струмів і подальшою цифровою обробкою результатів перетворення. При цьому процедура вимірювання енергетичних параметрів в загальному вигляді може бути описана рівнянням:

$$\hat{\lambda}(t) = R_D R_{AD} R_A \gamma(t), \quad (2)$$

де: оператор R_A передбачає нормування вхідних сигналів $\gamma(t)$, яке зазвичай виконується паралельно з гальванічним розділенням електричної схеми системи від вихідних кіл контрольованого енергооб'єкта, оператор R_{AD} – аналогово-цифрове перетворення, оператор R_D – перетворення, що виконуються в цифровій формі.

Аналого-цифрове перетворення неперервних сигналів $R_A \gamma(t)$ передбачає їх дискретизацію у часі:

$$R_A \gamma(t) \rightarrow \{R_A \gamma(t_j)\} = \left\{ \int_T R_A \gamma(t) \cdot \delta(t - t_j) dt \right\}, t \in T, \quad (3)$$

де $\delta(t)$ – δ -функція, а отже, визначення енергетичних параметрів електромережі як сум функцій дискретних послідовностей:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} \phi(\gamma(t)) dt \rightarrow \frac{1}{n} \sum_0^{n-1} \phi(\gamma(t_j)), \quad (4)$$

де n – кількість вибірок миттєвих значень контрольованих сигналів за період їх коливання T_x ; $\phi(\gamma(t))$ дорівнює $u(t) \cdot i(t)$ та $u(t) \cdot i(t+T_x/4)$ – відповідно для активної та реактивної потужності; $u(t)^2$ та $i(t)^2$ – для середньоквадратичного значення відповідно напруги та струму.

Трансформація формули подання параметрів електроенергії згідно з виразом (4) приводить до похибок дискретизації. Для синусоїдальних вхідних сигналів $u(t)=U_m \sin \omega t$ та $i(t)=I_m \sin(\omega t + \varphi)$, за які з деяким наближенням можна прийняти напруги і струми промислової електромережі, похибки дискретизації визначаються з виразів:

для активної $[F(\varphi)=\cos \varphi]$ та реактивної $[F(\varphi)=\sin \varphi]$ потужностей:

$$\delta_{aw} = \frac{1}{nF(\varphi)} \sum_{j=0}^{n-1} F\left(\frac{4\pi j}{n} + \varphi\right) \quad (5)$$

для середньоквадратичних значень напруг та струмів:

$$\delta_{aw} = 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \cos\left(\frac{4\pi j}{n}\right)} \quad (6)$$

і не перевищують для $|\varphi| \leq \pi/3$ величини 0,01 % при $n \geq 200$.

На точність реалізації виразу (2) з урахуванням (4) у комп'ютеризованих системах контролю та діагностики енергооб'єктів при правильному виборі розрядної сітки процесорних пристроїв в основному впливають блоки проміжних трансформаторів і аналого-цифрові перетворювачі.

1. Зменшення кутової похибки блоків проміжних трансформаторів

Неідентичність фазочастотних характеристик струмового і напругового вимірювальних кіл блоків проміжних трансформаторів приводить до додаткового кутового зсуву $\Delta\varphi'$ (при використанні трансформаторів з феритовими осерддями – до 10^0) між напругою та струмом у фазі, наслідком чого є кутові похибки визначення активної та реактивної потужностей, відносні значення яких можуть бути визначені з виразу:

$$\delta_\varphi = 1 - \cos \Delta\varphi' + \alpha \sin \Delta\varphi' \cdot F(\varphi), \quad (7)$$

де $\alpha=1$ і $F(\varphi)=\tan(\varphi)$ – для активної потужності; $\alpha=-1$ і $F(\varphi)=\cot(\varphi)$ – для реактивної потужності, і сягати досить значних величин [1].

Одним з варіантів зменшення $\Delta\varphi'$, δ_φ є використання в трансформаторах осердь з матеріалу з великою початковою магнітною проникністю, наприклад пермалою, завдяки чому зменшується кут зсуву між сигналами у первинних та вторинних обмотках трансформаторів, а отже і $\Delta\varphi'$, і вирівнювання параметрів струмового та напругового вимірювальних кіл блоків трансформаторів через використання в них трансформаторів струму з короткозамкнутим режимом роботи вторинних обмоток, який забезпечується за рахунок, наприклад, навантаження цих обмоток низькоомними входами нормуючих операційних підсилювачів [2].

Іншим варіантом зменшення $\Delta\varphi'$ є використання як проміжних трансформаторів з осерддями з повітряним зазором, які практично не мають кутового зсуву між сигналами у

первинних та вторинних обмотках. Для трансформатора такого типу, з урахуванням того, що при навантаженні вторинної обмотки трансформатора на операційний підсилювач із нехтівно малим вхідним струмом магнітний потік $\Phi(t)$ в осерді утворюється практично вхідним струмом $i_1(t)$, залежність між напругою $u_2(t)$ на вторинній обмотці та $i_1(t)$ визначається з виразу:

$$u_2(t) = w_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{w_1 \cdot w_2}{Z_m + Z_p} \cdot \frac{di_1(t)}{dt}, \quad (8)$$

де Z_m та Z_p – магнітні опори відповідно феритової ділянки магнітопроводу та повітряного зазору.

Нелінійність коефіцієнта передачі $k=w_1 \cdot w_2 / (Z_m + Z_p)$ трансформатора визначається величиною Z_m . Тому при виконанні співвідношення $Z_p \gg Z_m$, завдяки відповідному вибору величини повітряного зазору, може бути досягнута висока лінійність k для широкого діапазону зміни вхідного струму, що важливо при необхідності контролю перехідних процесів. Однак, як видно з виразу (8), для трансформатора з осердям з повітряним зазором існує диференціальна залежність між $u_2(t)$ та $i_1(t)$, що потребує інтегрування отриманих значень $u_2(t)$, а отже, додаткових програмних витрат [3].

Можливі програмні варіанти компенсації $\Delta\phi'$ у результатах обчислення активної та реактивної потужностей, які полягають в попередньому визначенні величини $\Delta\phi'$ як $\text{Arcsin}(\hat{Q}/\hat{U}\hat{I})$ чи $\text{Cos}\Delta\phi'$ та $\text{Sin}\Delta\phi'$ відповідно як $\hat{P}/\hat{U}\hat{I}$ та $\hat{Q}/\hat{U}\hat{I}$ при подачі на входи відповідного блока трансформаторів зразкових синусоїдальних напруги та струму з нульовим кутовим зсувом між ними і перерахуванні значень активної та реактивної потужностей реального енергооб'єкта з урахуванням цих значень [1].

2. Мінімізація впливу похибок АЦП на точність визначення енергетичних параметрів

АЦП передбачає як обов'язкову операцію квантування за рівнем дискретизованого сигналу $\{R_A\gamma(t_j)\}$, що визначається за виразом (3):

$$\{R_A\gamma(t_j)\}_{\Delta_k} = \left\{ E \left[\frac{R_A\gamma(t_j) + \Delta_a}{\Delta_k(R_A\gamma)} \right] \cdot \Delta_k(R_A\gamma) \right\}, \quad (9)$$

де: $\Delta_k(R_A\gamma)$ – крок квантування, $\Delta_k(R_A\gamma) = \gamma_0 / 2^m$, причому γ_0 і m – відповідно опорний сигнал і число двійкових розрядів АЦП.

Наслідком трансформації $\{R_A\gamma(t_j)\}$ в $\{R_A\gamma(t_j)\}_{\Delta_k}$ є похибка квантування, яка має випадковий характер і, як показують дослідження [2], усереднюється в результатах обчислення енергетичних параметрів промислової електромережі за виразом (4). Що ж до систематичних складових похибок через зсув нуля і спотворення коефіцієнта передачі АЦП, то вони практично повністю переносяться на результати обчислень.

Мінімізація впливу зміщення нуля АЦП на точність визначення енергетичних параметрів промислової електромережі можлива за рахунок введення поправок у коди миттєвих значень контрольованих сигналів за результатами перетворення сигналу нульового рівня, який підключається аналоговим комутатором безпосередньо до входу АЦП. Однак з метою компенсації систематичної адитивної складової похибки вимірювальних каналів загалом (з урахуванням зсувів нуля нормуючих підсилювачів,

узгоджуючих каскадів), найбільш доцільним є введення поправок за результатами обчислення середніх значень N_{sr} контрольованих сигналів $\gamma(t)$ за період їх коливання [4].

При незначній нелінійності АЦП його систематична мультиплікативна складова похибки може компенсуватися введенням коефіцієнта корекції k_{cr} за результатом перетворення опорного сигналу γ_o , який при попередній компенсації адитивної складової похибки АЦП визначається так:

$$N_{\gamma_o} = \sum_{j=0}^{n-1} [(k_{AD} + \Delta k_{AD})(\gamma_o + \Delta\gamma) - k_{AD}\Delta\gamma]^2 \Big|_{\Delta k_{AD} \cdot \Delta\gamma \rightarrow 0} = (k_{AD} + \Delta k_{AD})^2 n\gamma_o^2, \quad (10)$$

де: k_{AD} і Δk_{AD} – відповідно розрахункове значення коефіцієнта передачі АЦП та відхилення реального коефіцієнта від цього значення.

Тоді:

$$k_{cr} = \frac{k_{AD}^2 \gamma_o^2}{N_{\gamma_o}} = \frac{k_{AD}^2}{n(k_{AD} + \Delta k_{AD})^2}, \quad (11)$$

$$k_{cr} \cdot \sum_0^{n-1} \phi([k_{AD} + \Delta k_{AD}]R_A \gamma(t_j)) = \frac{k_{AD}^2 R_A^2}{n} \sum_0^{n-1} \phi(\gamma(t_j)), \quad (12)$$

де $\sum_0^{n-1} \phi(\gamma(t_j))$ визначається з виразу (4).

При неможливості ігнорування нелінійності АЦП може бути запропонований алгоритм компенсації сумарної систематичної складової похибки АЦП Δ_{AD} , оснований на попередньому визначенні закону її зміни залежно від значення вихідного коду для кожного ступеня квантування ($i=1, 2, \dots, 2^m$) при певній температурі навколишнього середовища, і корекції результату перетворення контрольованого сигналу в кожній точці його дискретизації на значення $[\Delta_{AD}]_i^t$, очікуване для отриманого результату перетворення при певній температурі [5].

3. Дослідження похибки обчислень через обмеженість розрядної сітки процесора

Обмеженість розміру розрядної сітки процесора приводить до похибки утинання машинного слова як результату скорочення його довжини після виконання операцій множення, піднесення до квадрата, ділення, добування квадратного кореня, масштабування, алгебраїчного сумування операндів, а також при застосуванні до останніх правих зсувів.

Математичне сподівання і дисперсія похибки утинання машинного операнду $N_{(v+k)}=0, \varepsilon'_1 \dots \varepsilon'_v \varepsilon''_1 \dots \varepsilon''_k$ до значення $N_v=0, \varepsilon'_1 \dots \varepsilon'_v$ (з відкиданням молодших розрядів) та $N_{v,\varepsilon''}=0, \varepsilon'_1 \dots (\varepsilon'_v + \varepsilon''_1)$ (з округленням) при рівномірності значень $\varepsilon''_i=0$ та $\varepsilon''_i=1$ можуть бути визначені з виразів відповідно (13) і (14):

$$M[\Delta N_v] = -2^{-v} M \left[\sum_{i=1}^k M[\varepsilon''_i] \cdot 2^{-i} \right] = -2^{-v-1} (1 - 2^{-k}), \quad D[\Delta N_v] \leq \frac{1}{12} 2^{-2v} \quad (13)$$

$$M[\Delta N_{v,\varepsilon''}] = 2^{-v-1} M \left[\varepsilon''_1 - \sum_{i=1}^{k-1} M[\varepsilon''_{i+1}] \cdot 2^{-i} \right] = 2^{-v-k-1}, \quad D[\Delta N_{v,\varepsilon''}] \leq \frac{1}{12} 2^{-2v} \quad (14)$$

Як показує аналіз виразів (13) і (14), при $k \gg 1$ $M[\Delta N_v] \rightarrow -2^{-v-1}$; $M[\Delta N_{v,\varepsilon^*}] \rightarrow 0$.

Тобто округлення машинного слова на відміну від утинання з відкиданням молодших розрядів практично не супроводжується систематичною похибкою, що робить доцільним його використання в операціях типу перемноження і піднесення до квадрата миттєвих значень контрольованих напруг та струмів, подальше підсумовування результатів яких приводить до усереднення випадкової похибки. Що ж стосується таких процедур, як ділення сум добуток (квадратів) контрольованих сигналів на період коливання, множення на коефіцієнт корекції, добування квадратного кореня, то тут можливе використання операції утинання з відкиданням молодших розрядів через простіше програмне супроводження.

Питання раціонального вибору розрядності процесора може бути зведене до визначення необхідного резерву розрядності РС понад розрядність АЦП, який забезпечує необхідний рівень точності визначення енергетичних параметрів.

При допущенні збільшення середньої квадратичної похибки вимірювального каналу $\sigma[\Delta N]$ на деяку малу величину $\delta \ll 1$ відносно спадкової похибки РС $\sigma[\Delta N_{sp}]$ [6], тобто:

$$\sigma[\Delta N] \leq (1 + \delta)\sigma[\Delta N_{sp}], \quad (15)$$

статистичній незалежності машинної (ΔN_p) і спадкової похибок та $M[\Delta N_p] \rightarrow 0$ початкова умова для визначення резерву розрядності РС (v) понад розрядність АЦП (m) як функції $f(m, \delta)$ визначається виразом:

$$D[\Delta N_p] \leq 2\delta \cdot D[\Delta N_{sp}]. \quad (16)$$

Висновки

Оптимальним варіантом мінімізації інструментальних похибок вимірювальних каналів комп'ютеризованої системи контролю та діагностики енергооб'єктів є:

- об'єднання апаратних та алгоритмічно-програмних засобів зменшення кутової похибки блоків проміжних трансформаторів;
- застосування алгоритмічних програмно-керованих засобів корекції похибок аналого-цифрового перетворення;
- раціональний вибір розрядності процесора, що зводиться до визначення необхідної величини її резерву понад розрядність АЦП.

1. Дороніна О.М., Лавров Г.М., Хомич С.В. Алгоритми компенсації кутової похибки вимірювання потужності в силових колах синусоїдального струму. // Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка" – 2000. – № 385. – С. 34–36. 2. Лавров Г.Н., Дороніна О.М., Портнов М.Л., Портнов Е.М. Снижение погрешностей измерений телемеханических систем // Энергетик – 1997. – № 2. – С. 11–13. 3. Лавров Г.М., Хомич С.В., Дороніна О.М., Паньків Р.С. Використання лінійних трансформаторів у вхідних колах інформаційно-вимірювальних систем. // Вісник Держ ун-ту "Львівська політехніка". – 1998. – № 350. – С. 40–43. 4. Дороніна О.М., Лавров Г.М., Хомич С.В. Алгоритми визначення активної та реактивної потужностей. – Свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір № 2027. 5. Рылик М.Г., Дороніна О.М., Ванько В.М. О погрешностях перемножителей АЦП энергетических параметров промышленной сети с цифровой обработкой мгновенных значений входных сигналов. // Контрольно-измерительная техника. – 1988. – № 44. – С. 14–19. 6. Цветков Э.И. Методы электрических измерений. – Ленинград: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1990. – 288 с.