

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

O.M.Дороніна, Г.М.Лавров, С.В.Хомич

Національний університет
“Львівська політехніка”
м.Львів, ул. Ст.Бандери, 12
E-mail: oganes@polynet.lviv.ua

Розглянуто шляхи зниження інструментальних похібок комп’ютеризованої системи контролю енергетичних параметрів електромережі. Проаналізовано способи мінімізації впливу похібок блоків проміжних трансформаторів та аналогово-цифрового перетворення на точність визначення параметрів. Досліджено похибки обчислень через обмеженість розрядної сітки процесора..

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 $\gamma(t) = u(t)$, $\gamma(t) = i(t)$ або $\gamma(t) = u(t), i(t)$,

що дозволяє максимальну уніфікацію та комп’ютеризацію цих вимірювань через їх виконання на основі аналогово-цифрового перетворення контролюваних напруг та струмів і подальшої цифрової обробки 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 звичайно виконується паралельно з гальванічним розділенням електричної схеми системи від кіл контролюваної електромережі, оператор R_{AD} – аналогово-цифрове перетворення, оператор R_D – перетворення, що виконуються в цифровій формі.

Аналого-цифрове перетворення безперервних сигналів $R_A \gamma(t)$ передбачає їх дискретизацію у часі, а отже визначення енергетичних параметрів електромережі як сум функцій дискретних послідовностей:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} \phi(\gamma(t)) dt \rightarrow \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \phi(\gamma(t_j)), \quad (3)$$

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

Трансформація формули представлення параметрів електроенергії згідно з виразом (3) приводить до похибок дискретизації, які для промислової електромережі не перевищують 0,01% для $n \geq 200$ [1].

Основний вплив на точність реалізації виразу (2) з урахуванням (3) у комп’ютеризованій системі контролю електромережі при правильному виборі розрядної сітки процесорних пристрій чинять блоки проміжних трансформаторів і аналогово-цифрові перетворювачі.

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

$$\delta_\phi = 1 - \cos \Delta\phi' + \alpha \sin \Delta\phi' \cdot F(\phi), \quad (4)$$

де $\alpha = 1$ і $F(\phi) = \tan(\phi)$ – для активної потужності; $\alpha = -1$ і $F(\phi) = \cot(\phi)$ – для реактивної потужності,

і сягати досить значних величин [1].

Одним з варіантів зменшення $\Delta\phi'$, δ_ϕ є використання в трансформаторах осердь з матеріалу з великою початковою магнітною проникливістю, наприклад пермалою, завдяки чому зменшується кут зсуву між сигналами у первинних та вторинних обмотках трансформаторів, а отже і $\Delta\phi'$, і вирівнюванні параметрів струмового та напругового вимірювальних кіл блоків трансформаторів через використання в них трансформаторів струму з короткозамкненим режимом роботи вторинних обмоток, який забезпечується за

рахунок, наприклад, навантаження цих обмоток низькоомними входами нормуючих операційних підсилювачів [2].

Можливі програмні варіанти компенсації $\Delta\phi'$ у результататах обчислення активної та реактивної потужностей, які полягають в попередньому визначенні величини $\Delta\phi'$ як $\arcsin(\hat{Q}/\hat{U})$ або $\cos\Delta\phi'$ та $\sin\Delta\phi'$ відповідно як \hat{P}/\hat{U} та \hat{Q}/\hat{U} при подаванні на входи відповідного блока трансформаторів зразкових синусоїdalьних напруги та струму з нульовим кутовим зсувом між ними і перерахуванні значень активної та реактивної потужностей реального енергооб'єкту з урахуванням цих значень [3].

Мінімізація впливу похибок АЦП на точність визначення енергетичних параметрів. АЦП передбачає у якості обов'язкової операції квантування за рівнем дискретизованого сигналу $\{R_A\gamma(t_j)\}$:

$$\{R_A\gamma(t_j)\}_{\Delta_k} = \left\{ E \left[\frac{R_A\gamma(t_j) + \Delta_a}{\Delta_k(R_A\gamma)} \right] \cdot \Delta_k(R_A\gamma) \right\} \quad (5)$$

де $\Delta_k(R_A\gamma)$ – крок квантування, $\Delta_k(R_A\gamma) = \gamma_o/2^m$, причому γ_o 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 носить випадковий характер і, як показують дослідження [1], усереднюється в результатах обчислення енергетичних параметрів промислової електромережі за виразом (3). Що стосується систематичних складових похибок через зсув нуля і спотворення коефіцієнту 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 контролюваних сигналів по результататах перетворення сигналу нульового рівня, який підключається аналоговим комутатором безпосередньо до входу АЦП. Однак, з метою компенсації систематичної адитивної складової похибки вимірювальних каналів в цілому (з

урахуванням зсувів нуля нормуючих підсилювачів, узгоджуючих каскадів), найбільш доцільним є введення поправок по результатах обчислення середніх значень N_{γ_o} контролюваних сигналів $\gamma(t)$ за період їх коливання [3].

При незначній нелінійності АЦП компенсація його систематичної мультиплікативної складової похибки може бути виконана за рахунок введення коефіцієнту корекції k_{cr} по результату перетворення опорного сигналу γ_o , який при попередній компенсації адитивної складової похибки АЦП визначається наступним чином:

$$N_{\gamma_o} = \sum_{j=0}^{n-1} [(k_{AD} + \Delta k_{AD})(\gamma_o + \Delta\gamma) - k_{AD}\Delta\gamma]^2 \quad (6)$$

$$= \frac{(k_{AD} + \Delta k_{AD})^2 n \gamma_o^2}{\Delta k_{AD} \Delta\gamma \rightarrow 0}$$

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

При цьому:

$$k_{cr} = \frac{k_{AD}^2 \gamma_o^2}{N_{\gamma_o}} = \frac{k_{AD}^2}{n(k_{AD} + \Delta k_{AD})^2}, \quad (7)$$

$$k_{cr} \cdot \sum_0^{n-1} \phi([k_{AD} + \Delta k_{AD}] R_A \gamma(t_j)) = \\ = \frac{k_{AD}^2 R_A^2}{n} \sum_0^{n-1} \phi(\gamma(t_j)), \quad (8)$$

де $\sum_0^{n-1} \phi(\gamma(t_j))$ визначається з виразу (3).

При неможливості ігнорування нелінійності АЦП може бути запропонований алгоритм компенсації сумарної систематичної складової похибки АЦП Δ_{AD} , оснований на попередньому визначенні закону її зміни в залежності від значення вихідного коду для кожного ступеня квантування ($i=1,2,\dots,2^m$) при певній температурі навколошнього середовища, і корекції результату перетворення контролюваного сигналу в кожній точці його дискретизації на значення $[\Delta_{AD}]_i^0$, очікуване для отриманого результату перетворення при певній температурі.

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 квадрату, ділення, добування кореня квадратного, масштабування, алгебраїчного сумування операндів, а також при застосуванні до останніх правих зсувів.

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

$$M[\Delta N_v] = -2^{-v} M\left[\sum_{i=1}^k M[\epsilon''_i] \cdot 2^{-i} \right] = \\ -2^{-v-1} (1 - 2^{-k}), D[\Delta N_v] \leq \frac{1}{12} 2^{-2v}; \quad (9)$$

$$M[\Delta N_{v,\epsilon''}] = 2^{-v-1} M\left[\epsilon''_1 - \sum_{i=1}^{k-1} M[\epsilon''_{i+1}] \cdot 2^{-i} \right] \\ = 2^{-v-k-1}, D[\Delta N_{v,\epsilon''}] \leq \frac{1}{12} 2^{-2v} \quad (10)$$

Як показує аналіз виразів (9) і (10), при $k >> 1$ $M[\Delta N_v] \rightarrow -2^{-v-1}$, $M[\Delta N_{v,\epsilon''}] \rightarrow 0$. 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 квадрату миттєвих значень контролюваних напруг та струмів, подальше сумування результатів яких приводить до усереднення випадкової похибки. Що ж стосується таких процедур, як ділення сум добутків (квадратів) контролюваних сигналів на період коливання, помноження на коефіцієнт корекції, добування кореня квадратного, 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 $\delta << 1$ по відношенню до спадкової похибки РС $\sigma[\Delta N_{sp}]$ [6], тобто:

$$\sigma[\Delta N] \leq (1 + \delta)[\Delta N_{sp}], \quad (11)$$

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:

$$D[\Delta N_p] \leq 2\delta \cdot D[\Delta N_{sp}]. \quad (12)$$

Висновки. Оптимальним варіантом мінімізації інструментальних похибок вимірювальних каналів комп'ютеризованої системи контролю енергетичних параметрів промислової електромережі 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 методів утинання машинного слова при різних операціях.

1. Лавров Г.Н., Дороніна О.М., Портнов М.Л., Портнов Е.М. Снижение погрешностей измерений телемеханических систем – Энергетик – М.: НТА Энергопрогрес, 1997, № 2. – С. 11–13. 2. Лавров Г.М., Хомич С.В., Дороніна О.М., Паньків Р.С. Використання лінійних трансформаторів у вхідних колах інформаційно-вимірювальних систем. – Вісник ДУ “Львівська політехніка” № 350. Комп’ютерні системи та мережі. – Львів: НУ “ЛПТ”, 1998. – С. 40–43. 3. Дороніна О.М., Лавров Г.М., Хомич С.В. Алгоритми визначення активної та реактивної потужностей. – Свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір № 2027.