

ОСОБЛИВОСТІ ЦИФРОВИХ ВИМІРЮВАНЬ СТРУМІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Об'єктивна І.В., Танкевич С.Є., 2009

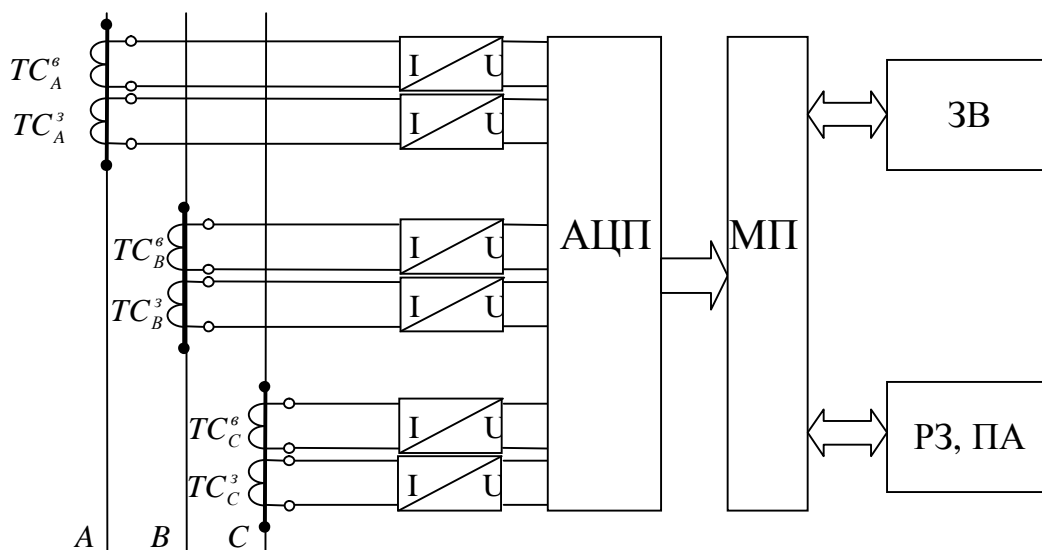
Розглянуто основні особливості і похибки цифрового вимірювального перетворення струму високої напруги.

The principal features and errors of digit measuring transformation of high-tension current are considered.

Постановка задачі. Широке використання в системах управління електроенергетичними об'єктами (ЕЕО) мікропроцесорної техніки потребує представлення вихідних сигналів високовольтних трансформаторів струму (ТС), що є найпоширенішими в електроенергетиці давачами вимірювальної інформації, в цифровому вигляді, придатному для безпосереднього використання обчислювальними засобами систем обліку електроенергії, релейного захисту тощо. Застосування методів вимірювання, що ґрунтуються на нових технічних можливостях цифрової обробки миттєвих значень вторинних струмів ТС є, на наш погляд, найпрогресивнішим напрямком підвищення метрологічного рівня високовольтних вимірювань струму.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Дослідженню операцій процедури вимірювання змінних у часі величин, а також і електричних, виконуваних у цифровій формі (цифрових фільтрів), присвячено багато робіт. Однак вітчизняні публікації, що стосуються досліджень цифрових вимірювань струму ЛЕП високої напруги в нормальному режимі, усталених і перехідних аварійних режимах, авторам невідомі, за винятком роботи [1], хоча вже існує міжнародний стандарт щодо електронних трансформаторів струму, включно і з цифровим виходом, призначених для виконання таких вимірювань [2]. Відомі публікації на цю тему китайських авторів [3,4] та інші, які, на жаль, не є для нас, поки що, доступними.

Задача досліджень. Зазначене пояснює інтерес до дослідження особливостей вимірювального перетворення і цифрового представлення інформації про струм ЕЕО на виході високовольтного ТС, яка найширше використовується в техніці управління (рисунок).



Узагальнена структурна схема вимірювання струмів високовольтної ЛЕП з цифровим представленням інформації

$TC_A^6, TC_A^3, TC_B^6, TC_B^3, TC_C^6, TC_C^3$ – трансформатори струму відповідно для вимірювання і захисту фаз A, B і C ; I/U – вимірювальний перетворювач струм/напруга; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; МП – мікропроцесор; ЗВ – засоби вимірювання; РЗ, ПА – релейний захист і протиаварійна автоматика.

Вимірювальний сигнал в загальному випадку можна зобразити математичною моделлю [5], що відображає адитивну взаємодію періодичної складової основної частоти і згасаючих з часом аперіодичної і гармонічних складових з відмінними від основної частотами:

$$i_1 = \sum_{k=1}^n I_k e^{-t/T_k} \cos(w_k t + a_k),$$

де I_k, T_k, w_k, a_k – відповідно амплітуда, постійна згасання, частота і початкова фаза k -ї складової сигналу.

Склад вимірюваного сигналу і параметри його окремих складових визначаються режимом контрольованого об'єкта і можуть змінюватися в доволі широких межах. Так, відношення величин струмів на границях діапазону вимірювання може досягати $5 \cdot 10^3$ і більше, або 70 дБ, а їх частот 66 дБ. Варто також зазначити, що в умовах ЕЕО практично завжди на вимірюваний сигнал накладаються завади у вигляді перенапруг імпульсного та високочастотного характеру, що виникають у вторинних вимірювальних колах в результаті певних дій, явищ і процесів, переважно, в основному електрообладнанні ЕЕО.

У давачах інформації, якими є фазні ТС, здійснюється перша і найважливіша з погляду забезпечення точності вимірювання операція вимірювального перетворення струму ЛЕП (масштабування), тобто його перетворення в однорідний вихідний сигнал, діюче значення якого в K раз відрізняється від діючого значення вхідного сигналу. Вторинний струм ТС після його вимірювального перетворення в напругу в перетворювачі I/U надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП). В АЦП по черзі здійснюється поділ в часі аналогового сигналу в послідовність квантованих за величиною дискретних значень (змінюваних лише стрибками скінченної величини) і їх кодування. Як очевидно з наведеної на рисунку схеми, головною особливістю розглядуваного вимірювання є додаткове включення у вимірювальне коло програмованої обчислювальної потужності (обчислювального компонента) у вигляді мікропроцесора (МП), а також деяких вимірювальних перетворювачів (ВП) (проміжних струм/напруга, АЦП), що здійснюють попередню обробку аналогового сигналу з неперервною множиною значень. Отже, у цьому разі вимірювання струму пов'язані з виконанням низки додаткових до здійснюваного давачем інформації масштабування вхідного сигналу операцій вимірювального перетворення, серед яких найважливішими є дискретизація за часом і квантування за рівнем аналогового сигналу давача.

Отже, враховуючи наведену схему вимірювань, параметрів і характеристик вимірюваного сигналу, розглядувані вимірювання можна класифікувати як високоточні динамічні, багатомірні як за входом (дві або три фази), так і за виходом (для вимірювальних приладів і для релейного захисту), що реалізуються в широкому амплітудному та частотному діапазонах вимірювальним каналом з високовольтною аналоговою частиною, включно і за умов несприятливого співвідношення величин інформативного і неінформативних параметрів вимірювального сигналу.

Під час дискретизації безперервний сигнал замінюється послідовністю відліків цього сигналу в дискретні моменти часу. Зазвичай, дискретизація здійснюється рівномірно і характеризується частотою f_δ .

Вибір частоти дискретизації повинен, насаперед, визначатися спектральним складом сигналу. За теоремою Котельникова частота дискретизації не менше ніж у два рази повинна перевищувати частоту вищої гармоніки. У разі невиконання цієї умови із-за процесу дискретизації синусоїда високої частоти “накладається” на синусоїду з частотою, що лежить в області від 0 до $f_\delta/2$. Зокрема, гармоніки з номерами $k = n \cdot k_\delta \pm 1$ ($k_\delta = f_\delta/f$ – кратність частоти дискретизації, $n = 1, 2, \dots$) “накладаються” на гармоніку основної частоти f . Це відбувається тому, що в точках відліків будь-яка синусоїда довільної частоти еквівалентна синусоїді з частотою, що входить до

області від 0 до $f_0/2$ і призводить до додаткових похибок вимірювання. Покажемо це на прикладі. Нехай вхідний сигнал представляє суму двох гармонік:

$$i(t) = I_{m1} \cdot \sin(2 \cdot p \cdot f \cdot t + j_1) + I_{mk} \cdot \sin(2 \cdot p \cdot (n \cdot f_0 \pm 1) \cdot f \cdot t + j_k),$$

де I_{m1} , I_{mk} , j_1 , j_k – амплітуди та початкові фази основної та k -ї гармонік сигналу.

Діюче значення сигналу дорівнює

$$I = ((I_{m1}^2 + I_{mk}^2)/2)^{1/2}. \quad (1)$$

Одержаний внаслідок дискретизації відлік сигналу в момент часу $t_m = m \cdot 1/f_0$, де m – ціле число, дорівнює

$$i(m) = I_{m1} \cdot \sin(2 \cdot p \cdot f \cdot t_m + j_1) + I_{mk} \cdot \sin(2 \cdot p \cdot (n \cdot f_0 \pm 1) \cdot f \cdot t_m + j_k) = \\ = I_{m1} \cdot \sin(2 \cdot p \cdot f \cdot t_m + j_1) + I_{mk} \cdot \sin(2 \cdot p \cdot n \cdot m \pm 2 \cdot p \cdot f \cdot t_m + j_k) = I_{m1} \cdot \sin(2 \cdot p \cdot f \cdot t_m + j_1) \pm I_{mk} \cdot \sin(2 \cdot p \cdot f \cdot t_m \pm j_k).$$

Таким чином в усіх точках дискретизації ми отримуємо суму миттєвих значень двох синусоїдальних коливань однакової частоти. Застосовуючи теорему косинусів, визначимо величину діючого значення цього сигналу, отриманого в результаті дискретизації:

$$I_0 = ((I_{m1}^2 + I_{mk}^2 \pm 2 \cdot I_{m1} \cdot I_{mk} \cdot \cos(j_1 - j_k))/2)^{1/2}, \quad (2)$$

що відрізняється від дійсного значення за виразом (1). Величина і знак похибки визначаються співвідношенням початкових фаз і номером гармоніки. Наприклад, якщо коефіцієнт k -ї гармоніки дорівнює 5 %, то величина діючого значення струму, визначеного за формулою (1), дорівнює $1,00125 \cdot I_1$, де I_1 – діюче значення основної гармоніки. За умови несприятливого співвідношення початкових фаз гармонік діюче значення дискретизованого сигналу, визначене за виразом (2), дорівнює $1,05 \cdot I_1$, тоді похибка визначення діючого значення струму становитиме $-4,87$ %.

Вміст вищих гармонік в струмі, як правило, більший, ніж в напрузі і може досягати десятків відсотків від основної гармоніки. Тому вибір частоти дискретизації повинен бути таким, щоб сучасні системи керування режимами, обліку електроенергії, пристрої захисту та протиаварійної автоматики мали змогу одержати всю необхідну для їх функціонування інформацію про гармонічний склад струму. До того ж, щоб уникнути негативних наслідків дискретизації за наявності в сигналі складових з частотою, вищою $f_0/2$, використовують низькочастотні фільтри, що гасять ці складові перед процесом аналого-цифрового перетворення сигналу.

Зазвичай частота дискретизації вибирається кратною частоті вхідного сигналу. Проте, якщо частота дискретизації залишається під час роботи незмінною, а частота сигналу змінюється, то під час визначення параметрів сигналу шляхом цифрової обробки миттєвих значень виникає додаткова похибка, викликана зсувом моментів дискретизації і невідповідністю періоду інтеграції періоду сигналу. Особливо чутливі до цього алгоритми, в яких застосовують перетворення Фур'є, зокрема, у разі виконання синхронізованих векторних вимірювань параметрів режиму. Уникнути цього можна шляхом постійної адаптації частоти дискретизації до частоти сигналу так, щоб на періоді основної гармоніки сигналу укладалося ціле число кроків дискретизації [6].

Для визначення похибки результату вимірювання, обумовленої квантуванням, необхідно спочатку оцінити похибку квантування, що виникає на кожному кроці дискретизації, а потім отримати оцінку результуючої похибки, враховуючи алгоритми обробки миттєвих значень. Похибка квантування має випадковий характер і її вважають дискретним білим шумом з рівномірним розподілом щільності. Її дисперсія дорівнює $Dx = q^2/12$, де q – крок квантування.

Оскільки миттєві значення сигналу ніяк не пов'язані з внутрішньою будовою АЦП, то їх похибки квантування некорельовані з вимірюваним сигналом. Діюче значення струму I визначається за алгоритмом автокореляційної обробки сигналу і в цьому випадку математичне очікування похибки результату вимірювання, спричиненої квантуванням, дорівнює 0, а дисперсія дорівнює

$$D = 4 \cdot (k^2/m) \cdot I^2 \cdot Dx,$$

де k – коефіцієнт передачі АЦП; m – число відліків на інтервалі вимірювання.

Тоді середньоквадратичне відхилення випадкової складової відносно похибки вимірювання діючого значення струму можна визначити за виразом

$$d_I \approx \frac{\sqrt{2}}{I_m \cdot \sqrt{m}} \cdot \sqrt{Dx}, \quad (3)$$

де I_m – амплітудне значення струму.

Відношення межі похибки квантування до її середньоквадратичного відхилення за прийнятої величини довірчої ймовірності визначається квантільним множником k_v . Найбільший вплив на точність вимірювання струму розглядувана похибка спричиняє за найменшого вхідного сигналу I_{min} , який в одиницях АЦП можна виразити так:

$$I_{min \text{ АЦП}} = (I_{min}/I_{max}) \cdot 2^{n-1} q,$$

де I_{max} – значення струму, що відповідає максимальному коду АЦП; n – розрядність АЦП (один розряд знаковий).

Тоді, враховуючи (3) і позначаючи $k_{duan} = I_{max}/I_{min}$, межу похибки вимірювання сигналу I_{min} , спричинену його квантуванням, запишемо так:

$$d_{кв} = k_v \cdot \frac{k_{duan}}{\sqrt{m} \cdot 2^{n-1} \cdot \sqrt{6}}.$$

Звідси можна визначити необхідну розрядність АЦП для забезпечення заданого діапазону вимірювання вхідного сигналу і значення похибки квантування

$$n = \log_2 \left(\frac{1,6 \cdot k_{duan}}{\sqrt{6} \cdot \sqrt{m} \cdot d_{кв}} \right) + 1.$$

Вузол АЦП, крім похибок, зумовлених цими процесами, як будь-який електронний пристрій, є джерелом додаткових похибок, які спричинені нелінійністю передавальної функції, шумами, помилками дискретизації із-за тремтіння тактового генератора тощо. Сумарний вплив цих факторів призводить до збільшення повної середньоквадратичної похибки, яку зазвичай виражають зменшеним ефективним числом біт n_e [7]: $n_e = n - (1/2) \cdot \log_2(e/e_{id})$, де e – результуюча похибка АЦП; e_{id} – похибка квантування n -розрядного ідеального пристрою.

Перехід від аналогових вимірювань до цифрових зумовлює особливу побудову засобу вимірювання – високовольтного ВП струму, як поєднання трьох складових частин – групи з двох чи трьох високовольтних аналогових давачів інформації, апаратної і програмної частин, що реалізують значну кількість операцій вимірювальної процедури в цифровій формі. Це призводить до появи у цифрового перетворювача специфічних властивостей, що зумовлюють істотні відмінності в методах вибору, аналізу, опису і нормування його метрологічних характеристик порівняно з аналоговим перетворювачем.

Висновки. Розглянуті основні операції процедури цифрових вимірювань, їхні особливості і спричинювані ними похибки вимірювань струму необхідно враховувати під час розроблення алгоритму цифрової обробки вихідних аналогових сигналів високовольтного ТС.

1. *Микропроцессорные системы в электроэнергетике / Б.С. Стогний, В.В. Рогоза, А.В. Кириленко и др. АН УССР. – К.: Наук. думка, 1988. – 232 с.* 2. *International Standard IEC 60044-8: Instrument transformers – Part 8: Electronic current transformers. – Geneva. – 2007. – 120 p.* 3. *Применение электронных измерительных трансформаторов на подстанциях с цифровой системой управления // High voltage engineering. – 2007. – 33. – № 1. – P. 78–82.* 4. *Исследование и проектирование системы дискретизации данных для электронного преобразователя // High voltage engineering. – 2007. – 33. – № 2. – P. 111–119.* 5. *Стогний Б.С. Теория высоковольтных преобразователей переменного тока и напряжения. – К.: Наук. думка, 1984. – 272 с.* 6. *Танкевич Е.Н., Яковлева И.В. Реализация цифрового способа измерения частоты сетевого напряжения в средствах измерения характеристик электропотребления // Технічна електродинаміка. – 1998. – № 3. – С. 65–69.* 7. *Джакуинто Н., Савино М., Тротта А. Влияние различных типов погрешностей на общую характеристику аналого-цифровых преобразователей // Приборы и системы управления. – 1996. – № 6. – С. 40–43.*