

ОСОБЛИВОСТІ ОБЧИСЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

© Паньків Р., 2001

Запропоновано алгоритм обчислення енергетичних параметрів промислової електромережі, в якому компенсуються неточності, зумовлені неодноразовістю виконання аналого–цифрових перетворень миттєвих значень контрольованих напруг та струмів. Проаналізовано вплив вищих гармонік на точність визначення активної потужності. Розглянуто особливості контролю енергетичних параметрів трифазної електромережі.

The algorithm of calculation of power parameters of the industrial electric system is offered, in which the discrepancies caused by non-simultaneity of performance an analog-digital transformations of instant values of controllable voltage and currents are compensated. The analysis of highly harmonics influence on accuracy of definition an active capacity is executed. The features of the control of power parameters of the three-phase electric system are considered.

Вступ

У сучасних спеціалізованих процесорних вимірювальних пристроях та системах програмовані обчислювальні засоби входять до складу вимірювальних кіл і безпосередньо беруть участь у формуванні результатів вимірювань. При цьому процесорні вузли використовуються не тільки для автоматизації керування функціонуванням і обробки результатів вимірювань, а також і для реалізації частини вимірювальних процедур в числовій формі на програмній основі [1]. Тобто розвиток матеріально-технічної основи сучасної інформаційно-вимірювальної техніки підвищив актуальність розробки відповідного прикладного програмно-алгоритмічного забезпечення.

Аналіз відомих алгоритмів обчислення енергетичних параметрів

Для спрощення внутрішньої структури та зменшення собівартості спеціалізованих процесорних вимірювальних пристроїв для виконання аналого–цифрових перетворень миттєвих значень контрольованих сигналів використовують тільки один АЦП. Очевидно, що при цьому обчислення діючих значень контрольованих напруг \dot{U} та струмів \dot{i} , повної потужності S не викликає особливих труднощів [2]:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j^2}, \\ \dot{i} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_j^2}, \\ S &= \dot{U} \cdot \dot{i},\end{aligned}\tag{1}$$

де u_j та i_j – миттєві значення напруги u_j та струму i_j ; T – період коливань промислової електромережі; N – кількість миттєвих значень напруги u_j (або струму i_j), що визначаються протягом періоду коливань T .

За визначенням, значення активної потужності P дорівнює:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \, dt \quad (2)$$

Неодночасність формування миттєвих значень напруги u_j і струму i_j рівнозначна введенню додаткового інструментального зсуву фази φ :

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j \cdot i_j = S \cdot \cos(f + \varphi) \approx P, \quad (3)$$

де f – зсув фази між відповідними напругою та струмом; φ – інструментальний фазовий зсув, який дорівнює $\varphi = \frac{t}{T} 2\pi$, при цьому t – час між аналого–цифровими перетвореннями суміжних миттєвих значень напруги u_j та струму i_j .

На практиці, як правило, при визначенні значення активної потужності P зменшують час t між відповідними миттєвими значеннями напруги u_j та струму i_j , а похибкою, що зумовлена додатковим фазовим зсувом φ , нехтують. У такому випадку значення реактивної потужності Q визначається на основі значення активної потужності P і діючих значень напруги \dot{U} та струму \dot{I} :

$$Q = \sqrt{\dot{U}^2 \cdot \dot{I}^2 - P^2} \quad (4)$$

У випадку проектування алгоритмічного забезпечення електронного лічильника потужності (активної, реактивної та повної), використання виразу (4) для формування значення реактивної потужності Q зумовлює значні обчислювальні витрати для визначення діючих значень напруги \dot{U} та струму \dot{I} , а також виконання операції добування квадратного кореня.

Відомий інший алгоритм визначення реактивної потужності, за яким один з вхідних сигналів, наприклад, струм повинен мати зсув відносно іншого вхідного сигналу (напруги) на 90° (одну четверту періоду T) [2]. Зсув відбувається за рахунок множення величини напруги в j -й точці відліку поточного періоду T на величину струму в $j - \frac{T}{4}$ точці відліку:

$$Q \approx S \cdot \cos\left(f - \frac{T}{4}\right) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j \cdot i_{j-\frac{T}{4}}. \quad (5)$$

При цьому, по-перше, виникає необхідність в додатковому об'ємі ОЗП для запам'ятовування миттєвих значень струму. По-друге, внаслідок того, що кількість точок дискретизації вхідних сигналів N часто може бути не кратна 4, виникає небезпека в появі додаткового кута зсуву між напругою та струмом, що приводить до додаткової похибки. По-третє, наявність у вхідних сигналах напруги та струму гармонік вищих порядків додатково вносить значну похибку.

Відомий алгоритм визначення активної потужності [3], згідно з яким аналого–цифрові перетворення миттєвих значень напруги u_j та струму i_j виконуються послідовно через однакові проміжки часу t . При цьому:

$$\varphi = \frac{t}{T} 2\pi = \frac{\pi}{N} . \quad (6)$$

У такому випадку значення активної потужності P дорівнює:

$$P = \frac{1}{2 \cos \varphi} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (u_j \cdot i_{j-1} + u_j \cdot i_j) . \quad (7)$$

Значення реактивної потужності Q визначається аналогічно:

$$Q = \frac{1}{2 \sin \varphi} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (u_j \cdot i_{j-1} - u_j \cdot i_j) \quad (8)$$

Потрібно зазначити, що інструментальний фазовий зсув φ може виникати не тільки внаслідок неодночасності аналого–цифрового перетворення миттєвих значень сигналів напруги та струму, а може бути зумовлений і іншими причинами, наприклад, різницею затримок проходження сигналів електричними трактами напруги та струму. Наприклад, навіть якщо аналого–цифрове перетворення напруги та струму одного приєднання апаратно ініціалізується через рівні проміжки часу, то для компенсації зсуву фаз, що виникає внаслідок неоднаковості режимів роботи вхідних трансформаторів напруги та струму, потрібні додаткові обчислення.

Отже, розробка ефективних алгоритмів для компенсації інструментального зсуву фази φ , що виникає при використанні однофазного АЦП для визначення миттєвих значень напруги u_j та струму i_j , є актуальною задачею і має практичне значення. При цьому під інструментальним фазовим зсувом розуміють сумарну неодночасність ініціалізації визначення миттєвих значень напруги u_j та струму i_j , яка може бути зумовлена різними причинами: викликана особливостями апаратної реалізації аналого–цифрового перетворення і/або вводиться програмним шляхом.

Узагальнений алгоритм визначення енергетичних параметрів

Надалі, якщо не вказано інше, вважається, що визначається однакова кількість точок дискретизації напруги $\{u_j\}=u_1, \dots, u_N$ та струму $\{i_j\}=i_1, \dots, i_N$. При цьому аналого–цифрове перетворення біжучого миттєвого значення струму i_j ініціалізується через інтервал час τ після початку аналого–цифрового перетворення відповідного миттєвого значення напруги u_j .

В такому випадку, якщо кожне аналого–цифрове перетворення миттєвого значення струму i_j виконується на час τ_1 після аналого–цифрового перетворення відповідного миттєвого значення напруги u_j , тобто між однофазними напругою та струмом вноситься додатковий додатний зсув фази φ_1 , то з виразу (3) отримаємо:

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j \cdot i_j = P \cdot \cos \varphi_1 - Q \cdot \sin \varphi_1 . \quad (9)$$

Аналогічно для миттєвого значення струму i_{j-1} , аналого–цифрове перетворення якого починається на час t_2 до аналого–цифрового перетворення миттєвого значення напруги u_j , тобто між однофазними напругою та струмом вноситься додатковий від’ємний зсув фази φ_2 , на основі співвідношення (3) можна записати:

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j \cdot i_{j-1} = P \cdot \cos \varphi_2 + Q \cdot \sin \varphi_2 . \quad (10)$$

На основі виразів (9) та (10) для значення активної потужності P можна отримати рівність:

$$P = \frac{\sin \varphi_1}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j \cdot i_{j-1} + \frac{\sin \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j \cdot i_j . \quad (11)$$

Аналогічний вираз для обчислення значення реактивної потужності Q має вигляд:

$$Q = \frac{\cos \varphi_1}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j \cdot i_{j-1} - \frac{\cos \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j \cdot i_j . \quad (12)$$

Очевидно, що з метою зменшення загальної кількості точок дискретизації струму доцільно, щоби кожне миттєве значення струму використовувалось двічі: як значення струму i_j , що прямує за відповідним миттєвим значенням напруги u_j в j -й момент дискретизації, як і миттєве значення струму i_j , що випереджає відповідне миттєве значення напруги u_{j+1} , в $(j+1)$ -й момент дискретизації.

Потрібно зазначити, що запропонований в [4] алгоритм обчислення активної та реактивної потужності згідно з виразами (11) та (12) можна вважати узагальненням відомого алгоритму (7) та (8) для довільних часових співвідношень між миттєвими значеннями контрольованих сигналів напруги u_j та струму i_j .

Аналіз впливу вищих гармонік на точність визначення енергетичних параметрів

Внаслідок того, що коефіцієнти корекції активної потужності P розраховуються для основної гармоніки, то необхідно виконати аналіз точності запропонованих алгоритмів для синусоподібних сигналів напруги та струму, які містять гармоніки вищих порядків. Далі будуть розглянуті особливості реалізації алгоритму визначення значення активної потужності P на основі виразу (11). Очевидно, що проведений аналіз можна розповсюдити на сигнали, що містять декілька гармонік вищих порядків.

Для сигналів напруги та струму, які містять гармонічну складову n -го порядку, значення активної потужності P дорівнює:

$$P = P_1 + P_n = (1 - \eta)P + \eta P , \quad (13)$$

де P_1 та P_n – значення активних потужностей, що переносяться, відповідно, за першою та n -ю гармонікою; η – відсотковий вміст активної потужності n -ї гармоніки.

Внаслідок впливу гармонічної складової вищого порядку при використанні запропонованого алгоритму (11) буде отримане приблизне значення активної потужності P' :

$$P' = (1 - \eta)P + \eta P \left(\cos n\varphi_1 \frac{\sin \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} + \cos n\varphi_2 \frac{\sin \varphi_1}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \right) . \quad (14)$$

Отже, відносна похибка визначення значення активної потужності P становить:

$$\delta = \eta \left(\cos n\varphi_1 \frac{\sin \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} + \cos n\varphi_2 \frac{\sin \varphi_1}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} - 1 \right) . \quad (15)$$

У таблиці наведено у відсотках значення відносної похибки δ визначення активної потужності P однофазної електромережі, частота якої 50 Гц, при використанні алгоритму (11), якщо сигнали напруги та струму містять 10 % гармонічної складової n -го порядку, а період їх дискретизації дорівнює 100 мкс.

Відносна похибка визначення активної потужності

t_1 , мкс	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	...	90	95
t_2 , мкс	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	...	10	5
n=2	0,07	0,13	0,19	0,24	0,28	0,31	0,34	0,36	0,37	0,37	0,37	...	0,13	0,07
n=3	0,19	0,36	0,5	0,63	0,74	0,83	0,9	0,95	0,98	0,99	0,98	...	0,36	0,19
n=4	0,35	0,67	0,94	1,18	1,39	1,55	1,68	1,78	1,83	1,85	1,83	...	0,67	0,35
n=5	0,56	1,06	1,51	1,89	2,22	2,49	2,69	2,84	2,93	2,96	2,93	...	1,06	0,56

Як видно з наведеної таблиці, точність обчислення значення активної потужності P зменшується, якщо збільшується часовий інтервал між суміжними точками дискретизації напруги та струму. А також із зростанням порядку вищої гармоніки n збільшується величина додаткових фазових зсувів φ_1 та φ_2 і, відповідно, похибка визначення активної потужності P .

Очевидно, що аналіз впливу гармонічних складових вищого порядку на точність обчислення значення реактивної потужності Q згідно із співвідношенням (12) виконується аналогічно. Основні результати проведених досліджень збігаються з висновками щодо точності обчислення значення активної потужності P при використанні запропонованого алгоритму (11). Потрібно зазначити, що в даній таблиці при однаковому (50 мкс) значенні інтервалів відставання t_1 і випередження t_2 точок дискретизації струму i_j (i_{j-1}) відносно відповідних точок дискретизації напруги u_j наведена відносна похибка δ визначення активної потужності P при використанні відомого алгоритму (7).

Особливості обчислення енергетичних параметрів трифазної електромережі

Найчастіше потужність трифазного приєднання промислової електромережі (активна, реактивна або повна) обчислюється як сума відповідних однофазних потужностей. При цьому для забезпечення достовірності результатів вимірювання однофазні потужності одного приєднання повинні визначатися протягом одного і того ж періоду коливань вхідних сигналів. У такому випадку при використанні запропонованих алгоритмів обчислення енергетичних параметрів (11) та (12) порядок дискретизації однофазних сигналів напруги та струму впливає на точність визначення відповідних потужностей.

Очевидно, що з метою збільшення точності обчислення енергетичних параметрів потрібно забезпечити мінімальне значення зміщення точок дискретизації струму i_j відносно точок дискретизації напруги u_j відповідної фази. Для цього в поточний j -й момент дискретизації вхідних сигналів фазні напруги та струми повинні комутуватися на вхід АЦП в такій послідовності:

$$\dots, u_{Aj}, i_{Aj}, u_{Bj}, i_{Bj}, u_{Cj}, i_{Cj}, \dots$$

при цьому u_{Aj}, u_{Bj}, u_{Cj} – миттєві значення фазних напруг, а $i_{Aj}^m, i_{Bj}^m, i_{Cj}^m$ – миттєві значення фазних струмів.

Завдяки сучасним технологічним досягненням стали доступними для масового використання швидкодіючі мікропроцесорні комплекти та аналого–цифрових перетворювачі в інтегральному виконанні. У результаті стала можливою розробка багатоканальних спеціалізованих процесорних вимірювальних пристроїв для контролю енергетичних параметрів декількох трифазних приєднань.

Під час контролю споживачів електроенергії, що під'єднані до однієї системи шин, у відповідних трифазних приєднаннях збігаються фазні напруги. Для зменшення загальної кількості аналого–цифрових перетворень визначені в j -й момент дискретизації миттєві значення поточної фазної напруги u_j можна використовувати при обчисленні потужностей всіх приєднань відповідної фази. Тобто, якщо контролюються M трифазних приєднань, в яких фазні напруги однакові, то поточний j -й цикл визначення миттєвих значень вхідних трифазних сигналів багатоканального спеціалізованого процесорного вимірювального пристрою доцільно виконувати так:

$$\dots, u_{Aj}, i_{Aj}^1, i_{Aj}^2, \dots, i_{Aj}^M, u_{Bj}, i_{Bj}^1, i_{Bj}^2, \dots, i_{Bj}^M, u_{Cj}, i_{Cj}^1, i_{Cj}^2, \dots, i_{Cj}^M, \dots$$

при цьому $i_{Aj}^m, i_{Bj}^m, i_{Cj}^m$ – миттєві значення фазних струмів, де $m = \{1, 2, \dots, M\}$ – порядковий номер трифазного приєднання.

Висновки

Запропонований узагальнений алгоритм обчислення енергетичних параметрів за рахунок корекції додаткових фазових зсувів між точками дискретизації напруги та струму дозволяє підвищити точність обчислення значення активної та реактивної потужностей [4]. А також можна зазначити, що структура та обчислювальна складність наведених алгоритмів обчислення значень активної та реактивної потужностей аналогічна, і при їх реалізації може бути використане спільне програмне забезпечення. При цьому значення енергетичних параметрів визначаються за єдиною методологічною основою з однаковою точністю.

Внаслідок усунення при виконанні аналого–цифрових перетворень миттєвих значень контрольованих сигналів спеціальних вимог до часових співвідношень між моментами їх дискретизації можна значно розширити функціональні можливості спеціалізованих процесорних вимірювальних пристроїв та сферу їх використання. Наведена методика дослідження впливу вищих гармонік на точність визначення енергетичних параметрів промислової електромережі має практичне значення і може бути корисна для вирішення широкого кола задач, що пов'язані з проектуванням багатоканальних аналого–цифрових перетворювачів.

1. Цветков Э.И. Процессорные измерительные средства. – Л., 1989. – 224 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М., 1964. – 750 с.
3. Дороніна О.М., Ванько В.М., Лавров Г.М. Пристрій для вимірювання активної та реактивної потужності / Патент України на винахід № 6354.
4. Паньків Р.С. Алгоритми обчислення значень активної та реактивної потужностей / Свідоцтво на державну реєстрацію прав автора на науковий твір ПА № 2290. – ДААСП України, 15.09.99.