MCIT
Modeling, control & information technologies

Метод оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії вузлом комерційного обліку

https://doi.org/10.31713/MCIT.2021.36

К.С. Василець
Кафедра комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій
Національний авіаційний університет
проспект Любомира Гузара, 1, Київ, 03058
9275195@stud.nau.edu.ua

***Анотація* — Запропоновано метод оцінювання невизначеності відхилення величини показів лічильника трансформаторного включення від лічильника прямого включення за умови незмінного рівня навантаження одного з трьох вимірювальних каналів, який відповідає одній з фаз трифазної системи, причому струм двох інших вимірювальних каналів дорівнює нулю. Невипадкова невизначеність оцінюється з використанням теорії нечітких множин.**

***Keywords* — комерційний облік електроенергії; невизначеність вимірювання; нечіткий інтервал; вимірювальний трансформатор струму.**

I. Актуальність питання

Для комерційного обліку електроенергії використовуються цифрові трифазні лічильники, струмові кола яких підключаються до електромережі за допомогою вимірювальних трансформаторів струму [1]. В реальних умовах експлуатації протягом тривалого часу вузол комерційного обліку функціонує при зниженому навантаженні, коли для заданого класу точності вимірювальних трансформаторів струму не унормована відносна похибка, а лічильник може знаходитися в режимі нечутливості. В такому режимі порушуються вимоги п. 1.5.17 Правил улаштування електроустановок щодо допустимих рівнів струму у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму. Як було встановлено в результаті експериментальних досліджень [2], в режимі зниженого навантаження невизначеність обліку електроенергії суттєво збільшується. Це спричиняє «недооблік» електричної енергії, що призводить до фінансових втрат енергопостачальної організації. Цим обумовлена актуальність досліджень.

Мета роботи – обґрунтувати метод оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії вузлом комерційного обліку в режимі зниженого навантаження.

II. Обґрунтування показника для оцінювання точності обліку електроенергії в режимі зниженого навантаження

Необхідною умовою для оцінювання точності обліку електроенергії в режимі зниженого навантаження є наявність дійсного значення спожитої протягом інтервалу Δt активної енергії, що є максимально точним, в умовах експерименту, наближенням до істинного значення спожитої активної енергії. Для вимірювання такого значення, одночасно з лічильником PI1 трансформаторного включення, що входить до складу вузла комерційного обліку, пропонується використовувати лічильник PI2 прямого підключення, струмові обмотки якого вмикаються послідовно до первинних обмоток вимірювальних трансформаторів струму вузла комерційного обліку, точність якого досліджується, рис. 1.

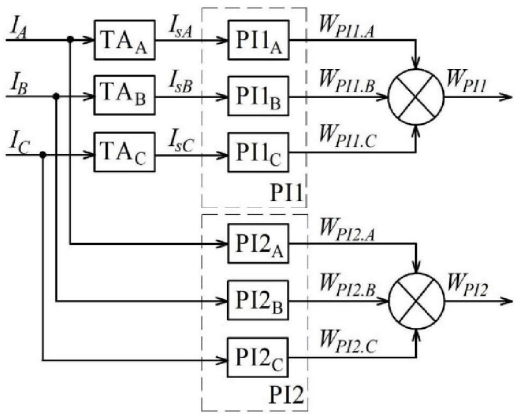

Рисунок. 1. Структурна схема вимірювання споживання енергії в режимі зниженого навантаження за допомогою лічильників PI1 трансформаторного включення та PI2 прямого включення

Точність вимірювання електроенергії за ζ-м вимірювальним каналом, причому $\zeta = \{A, B, C\}$, вузла комерційного обліку в режимі зниженого навантаження може бути оцінена за відносним відхиленням δW_ζ виміряної за часовий інтервал $\Delta t = t_2 - t_1$ активної енергії між показами лічильника трансформаторного та лічильника прямого включення, що визначається в припущенні про нульовий струм двох інших каналів наступним чином:

$$\delta W_\zeta[\Delta t, I_\zeta] = W_{PI1.\zeta}[\Delta t, I_\zeta] / W_{PI2.\zeta}[\Delta t, I_\zeta] - 1, \quad (1)$$

де $W_{PI2.\zeta}[\Delta t, I_\zeta]$ – активна енергія, що облікована за ζ-м вимірювальним каналом лічильника прямого включення.

Відносне відхилення δW_ζ, а також величини $W_{PI1.\zeta}$ та $W_{PI2.\zeta}$ можуть розглядатися як функції тільки струму I_ζ фази ζ навантаження. Тоді маємо:

$$\delta W_\zeta(I_\zeta) = \frac{I_\zeta}{I_{s\zeta}(I_\zeta)} \cdot \frac{W_{PI1.\zeta.mr}(t_2) - W_{PI1.\zeta.mr}(t_1)}{W_{PI2.\zeta.mr}(t_2) - W_{PI2.\zeta.mr}(t_1)} - 1. \quad (2)$$

де $W_{PI1.\zeta.mr}(t_{1(2)})$ – покази PI1 в моменти $t_{1(2)}$.

Функціонування вимірювальних каналів лічильників трансформаторного та прямого включення є взаємно незалежним. Похибки, що супроводжують вимірювання, можуть вважатися випадковими. Величини δW_ζ, що оцінюють точність вимірювання за ζ-м вимірювальним каналом вузла комерційного обліку, визначаються, відповідно до (2), як результат ділення виміряних величин. Це дає підстави визначати відносне відхилення показів лічильника трансформаторного включення від лічильника прямого включення за трьома фазами наступним чином:

$$\delta W(I_A, I_B, I_C) = \sqrt{\sum_{\zeta=\{A,B,C\}} \delta W_\zeta^2(I_\zeta)}. \quad (3)$$

Обраний параметр відповідає базовим вимогам до функції цілі [3], оскільки: параметр є кількісним з неперервною областю визначення; наявні прилади (лічильники електроенергії), за показами яких можна опосередковано встановити значення δW; параметр δW задовольняє вимогам однозначності в статистичному сенсі.

Оцінювання залежності δW від значень струмів фаз в режимі зниженого навантаження можливо здійснити відповідно до (3) за умови, що залежності $\delta W_\zeta(I_\zeta)$ для кожного з вимірювальних каналів вузла комерційного обліку є відомі. Остання умова може бути виконана, якщо, відповідно до (2), відомі характеристики вимірювальних трансформаторів струму $I_{s\zeta}(I_\zeta)$ в режимі зниженого навантаження, а також відомі оцінки залежностей активної енергії, що облікована за ζ-м вимірювальним каналом лічильниками трансформаторного та прямого включення, від струмів навантаження I_ζ.

III. Метод оцінювання невизначеності вимірювань

Для оцінювання невизначеності результатів вимірювання приймається припущення щодо нормального характеру нечіткої множини, яка відповідає цим результатам. Тоді вважатиметься, що для функції приналежності $\mu(x)$ множини **X** результатів вимірювання існує таке значення $x \in \mathbf{X}$, при якому $\mu(x)=1$.

Функція приналежності $\mu(x)$ розглядається як сукупність двох гілок $\mu_1(x)$ та $\mu_2(x)$, що розділені істинним значенням вимірюваної величини x_0. Припустимо, що в результаті експериментальних досліджень отримано вибіркові значення x_i, $i = \overline{1,n}$. Відповідно до [4], вибіркові значення x_i мають бути відсортовані за збільшенням, в результаті чого отримаємо вектор, для елементів якого виконується співвідношення $x_j^* < x_{j+1}^*$. В подальшому обчислюються довжини інтервалів $\Delta_j = x_{j+1}^* - x_j^*$, причому $j = \overline{1,(n-1)}$. Частоти попадання вимірюваних значень у кожний інтервал дорівнюють:

$$m_j = 1 - [\Delta_j - \max(\Delta_j)]/\min[\Delta_j]. \quad (4)$$

Значення x_υ^* вимірюваної величини, для якого $m_j = 1$, приймається як найближче до істинного значення. Таке значення поділяє вектор x^* на дві частини, які відповідають гілкам функції приналежності, рис. 2.

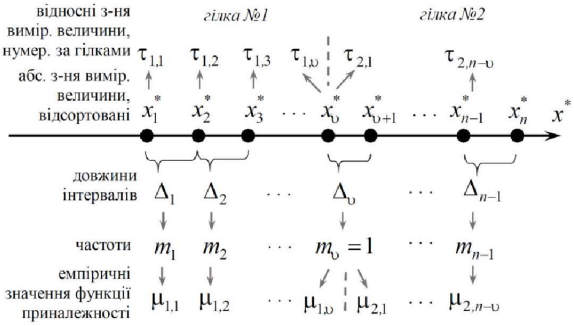

Рисунок. 2. Умовне зображення розподілу відсортованих за збільшенням вибіркових значень вимірюваної величини за двома гілками функції приналежності, а також позначення відповідних емпіричних значень функції приналежності

З використанням обчислених відповідно до (4) частот m_j для кожної з гілок обчислюються вибіркові значення функції приналежності [4]:

$$\mu_{1,j} = \frac{m_j - m_{min1}}{m_{max1} - m_{min1}}, \ \mu_{2,j} = \frac{m_{j+\upsilon-1} - m_{min2}}{m_{max2} - m_{min2}}. \quad (5)$$

Для кожної гілки функції приналежності необхідно перейти від абсолютних значень вимірюваної величини x_j^* до відносних значень τ_j, які обчислюються наступним чином:

$$\tau_{1,j} = | x_j^* - x_\upsilon^* | / (x_{max}^* - x_{min}^*), \ j = \overline{1,\upsilon}; \quad (6)$$

$$\tau_{2,j} = | x_{j+\upsilon-1}^* - x_\upsilon^* | / (x_{max}^* - x_{min}^*), \ j = \overline{1,(n-\upsilon)}. \quad (7)$$

Отримані експериментальні точки, що належать двом гілкам функції приналежності, необхідно апроксимувати, для чого можна використати метод максимальної норми [4]. Апроксимуючі поліноми степені L (зазвичай L<4) та нев'язки для гілок функції приналежності мають вигляд, рис. 3:

$$f_1(\tau_1) = 1 + \sum_{l=1}^{L} a_l \tau_1^l, \ r_{1,j} = f_1(\tau_{1,j}) - \mu_{1,j}(\tau_{1,j}); \quad (8)$$

$$f_2(\tau_2) = 1 + \sum_{l=1}^{L} b_l \tau_2^l, \ r_{2,j} = f_2(\tau_{2,j}) - \mu_{2,j}(\tau_{2,j}). \quad (9)$$

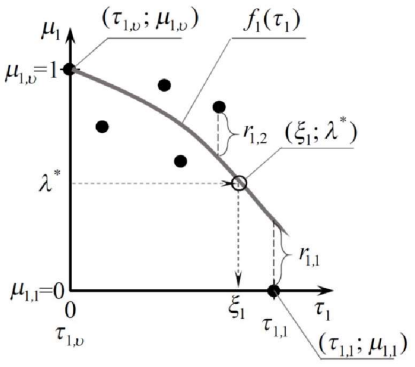

Рисунок. 3. Поліноміальна апроксимація гілки №1 функції приналежності

В якості критерія апроксимації для гілок функції приналежності розглядається мінімум чебишевської норми нев'язки. З використанням апроксимуючих поліномів f_1 (8) та f_2 (9) для гілок функції приналежності для заданого рівня довіри λ^* необхідно знайти відносне значення піддіапазонів ξ_1 та ξ_2, що в сумі становлять величину нечіткого інтервалу $U_{F_{\lambda^*}} = \xi_1 + \xi_2$, який характеризує невизначеність результатів вимірювання.

Значення ξ_1 може бути визначене як корінь функції $f_1(\xi_1) = \lambda^*$, рис. 3. Відповідно до (8) це відповідає знаходженню кореня виразу:

$$1 - \lambda^* + \sum_{l=1}^{L} a_l \xi_1^l = 0 . \qquad (10)$$

Значення ξ_2 обчислюється аналогічно. Ширина нечіткого інтервалу, що при рівні довіри λ^* включає істинне значення, в одиницях вимірюваної величини становить (рис. 4):

$$U_{F_\lambda} = (\xi_1 + \xi_2)(x_{\max} - x_{\min}) , \qquad (11)$$

а межі вказаного інтервалу становлять:

$$x_L = x_\upsilon - s_1 , \; x_R = x_\upsilon + s_2 , \qquad (12)$$

де $s_1 = \xi_1 (x_{\max} - x_{\min})$, $s_2 = \xi_2 (x_{\max} - x_{\min})$.

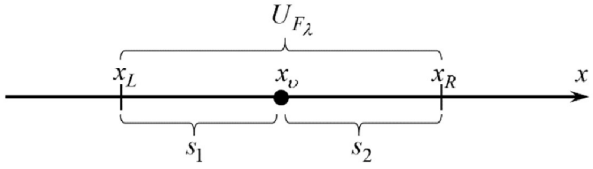

Рисунок. 4. Нечіткий інтервал, що при рівні довіри λ^* включає істинне значення вимірюваної величини, в одиницях цієї величини

IV. Результати експериментів

Експериментальне дослідження точності обліку електроенергії при зниженому нвантаженні здійснювалося з використанням лічильників трансформаторного підключення NIK2307 ART T.1600.M2.21 та прямого підключення NIK2307 ARP3 T.1600.M2.21. Використовувалися вимірювальні трансформатори струму 600/5. Клас точності перелічених приладів 0,5 S. За допомогою описаного методу оцінено невизначеність відхилення показів лічильника трансформаторного включення від лічильника прямого включення за вимірювальним каналом фази А. При цьому струм фази А I_A^* змінювався в діапазоні 0÷2%. Фази В та С не були навантажені. Межа чутливості за струмом встановлена на рівні 0,2%. Інтервал зміни струму навантаження I_A^* був розбитий на 6 проміжків шириною 0,3%, для кожного з яких обчислені межі нечітких інтервалів невизначеності δW_A, рис. 5.

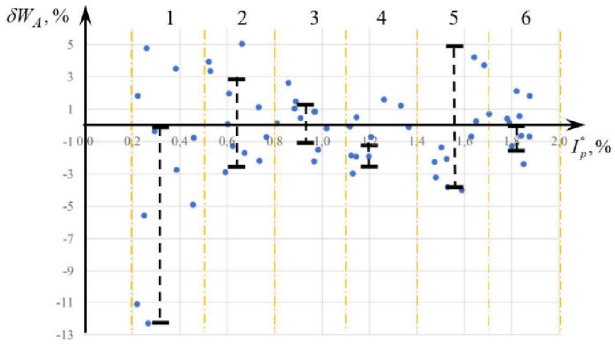

Рисунок. 5. Емпіричні значення та нечіткі інтервали невизначеності δW_A вимірювання електроенергії вузлом комерційного обліку в режимі зниженого навантаження

V. Висновки та напрямок подальших досліджень

Обґрунтований метод оцінювання невизначеності вимірювання електроенергії вузлом комерційного обліку за допомогою нечітких інтервалів може бути використаний під час оцінювання параметрів нечіткої функції, що описує залежність відносної похибки вимірювання від струмів фаз в режимі зниженого навантаження. Застосування методу дозволить підвищити точність розрахунків між постачальниками та споживачами електричної енергії.

Література

[1] Кодекс комерційного обліку електричної енергії, Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, постанова від 14.03.2018 № 311 (у редакції від 20.03.2020 № 716). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18#Text.

[2] В. В. Древецький, К. С. Василець, А. О. Ахромкін, С. В. Василець, та Р. С. Стасюк. Вимірювання та облік електричної енергії із застосуванням вимірювальних трансформаторів струму в умовах зниженого навантаження. Національний університет водного господарства та природокористування, ПрАТ «Рівнеобленерго», Рівне, 2020. № 4–778.

[3] C. F. Jeff Wu, and M. S. Hamada, “Experiments: Planning, Analysis, and Optimization,” 2nd ed., Wiley, 2009.

[4] X. Xia, Z. Wang, and Y. Gao, “Estimation of non-statistical uncertainty using fuzzy-set theory,” in Meas. Sci. Technol, 11 (2000), 2000. pp. 430–435. URL: http://www.people.vcu.edu/~lparker/DBGroup/References/Estimati.pdf