

## ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВУЗЛОМ КОМЕРЦІЙНОГО ОБЛІКУ

Національний авіаційний університет, Київ

Запропоновано метод оцінювання точності обліку електричної енергії трифазним вузлом комерційного обліку в режимі зниженого навантаження, що дає змогу встановити недооблік електроенергії за однією або декількома фазами в разі зниження рівня завантаження трансформаторів струму до значень, за яких для заданого класу точності не унормована допустима похибка, або у разі функціонування лічильника електричної енергії трансформаторного включення в режимі нечутливості, що є характерним для простоїв виробничого обладнання у нічний час, під час вихідних та святкових днів, коли функціонує лише освітлення території підприємства, відеонагляд, охоронна сигналізація тощо. Метод дозволяє оцінити за допомогою нечіткої функції залежність між вимірюваною величиною — відносним відхиленням показів лічильника трансформаторного включення від дійсних значень енергії, що оцінюються за показами лічильника прямого включення, — та струмами фаз. Для оцінювання параметрів апроксимуючих залежностей для граничних дійсних функцій, що визначають таку нечітку функцію, необхідно: 1) отримати вибірки значень вимірюваної величини по кожному з вимірюваних каналів при зміні струму відповідної фази в межах, що відповідають режиму зниженого навантаження; 2) для кожної з вибірок із застосуванням теорії нечітких множин оцінити межі фаззі-інтервалів, що характеризують результат вимірювання; 3) межі отриманих нечітких інтервалів для фіксованих значень струмів певної фази апроксимувати функціями, які є сумою двох експонент, в результаті чого отримують нечіткі функції, що характеризують невизначеність обліку по кожній фазі; 4) оцінити границі шуканої нечіткої функції, що визначає невизначеність вимірювання електроенергії за трьома фазами, як корінь із суми квадратів відповідних границь нечітких функцій невизначеностей обліку по кожній з фаз. Встановлено, що в режимі зниженого навантаження недооблік активної енергії за одним вимірювальним каналом лічильника трансформаторного включення класу точності 0,5 S може досягати 3 %. Застосування методу дасть можливість підвищити точність фінансових розрахунків між постачальниками та споживачами електроенергії.

**Ключові слова:** електроенергія, облік, невизначеність вимірювань, нечітка функція, вимірювальний трансформатор струму, межа чутливості.

### Вступ

Вузол комерційного обліку електроенергії для мереж напругою 0,38 кВ включає цифровий трифазний лічильник та вимірювальні трансформатори струму. Відповідно до Кодексу комерційного обліку електричної енергії, покази лічильників є основою для фінансових відносин між постачальниками та споживачами електроенергії. Як показує досвід експлуатації, промислові та побутові споживачі напругою 0,38 кВ протягом тривалого часу можуть функціонувати в режимі зниженого навантаження, що є характерним для простоїв виробничого обладнання у нічний час, під час вихідних та святкових днів. Також суттєве скорочення споживання електроенергії спостерігається на фоні пандемії COVID-19 [1]. Під час такого режиму для однієї або декількох фаз вузла комерційного обліку може мати місце: зниження рівня завантаження трансформаторів струму до значень, за яких для заданого класу точності не унормована допустима похибка; функціонування лічильника електричної енергії трансформаторного включення в режимі нечутливості (відповідно до паспортних даних лічильника); порушення вимог п. 1.5.17 Правил улаштування електроустановок щодо допустимих рівнів струму у вторинній обмотці вимірювального трансформатора струму. Результати натурних експериментальних досліджень в рамках науково-дослідної роботи [2] свідчать про суттєве збільшення невизначеності вимірювання в режимі зниженого навантаження. Це призводить до «недообліку» електричної енергії [3], наслідком якого є фінансові втрати енергопостачальної організації, чим і зумовлена актуальність досліджень.

На сьогоднішній день для вираження недосконалості результатів вимірювання все частіше використовується поняття невизначеності. Вперше такий термін замість поняття «похибка» був впроваджений 1993 р. у «Настанові з оцінювання невизначеності вимірювань» [4], положення якої та похідних стандартів впроваджені в Україні: ДСТУ ISO/IEC Guide 98-1:2018, ДСТУ ISO/TS 21749:2013 тощо. Для оцінювання невизначеності, спричиненої як випадковими, так і систематичними чинниками, на основі результатів повторних спостережень у метрологічній практиці широко користуються статистичними методами [5]. Однак, ефективність застосування таких методів знижується в разі переважання (або неможливості виключення) систематичної складової невизначеності [6]. Крім того, існують жорсткі вимоги до кількості вимірювань для гарантування надійної оцінки невизначеності. Подолати недоліки статистичного підходу під час оброблення даних вимірювань, особливо за обмеженого обсягу експериментального матеріалу, дають змогу методи, що не ґрунтуються на імовірнісних моделях для опису та оцінювання похибок. Зокрема, може бути застосований апарат теорії нечітких множин та нечіткої логіки як узагальнення інтервальної арифметики, що дає змогу коректно описувати систематичну складову невизначеності вимірювань.

*Мета роботи* — розроблення методу оцінювання точності обліку електроенергії трифазним вузлом комерційного обліку в режимі зниженого навантаження.

### Результати дослідження

Для досягнення мети пропонується розробити метод оцінювання залежності невизначеності вимірювання електроенергії лічильником трансформаторного включення від величини струму споживача зі зниженим навантаженням за кожним з вимірювальних каналів. Врахування характеристик кожного з каналів під час аналізу точності обліку дасть змогу коректно враховувати функціонування навантаження в несиметричних режимах.

Під режимом зниженого навантаження будемо розуміти активні навантаження кожної з фаз в діапазоні від 0 до  $2I_{P_{min}}^*$ , причому  $I_{P_{min}}^*$  — мінімальний відносний первинний струм трансформатора струму для якого, відповідно до ДСТУ EN 61869-2:2017, нормується відносна похибка.

Вузол комерційного обліку електроенергії у розподільних електромережах напругою 0,38 кВ включає трифазний лічильник електроенергії ПІ та вимірювальні трансформатори струму ТА<sub>ζ</sub> (ζ = {A; B; C} — позначення фази) електромагнітного типу (рис. 1). Для вузла комерційного обліку, як вимірювального перетворювача, вхідними величинами є діючі значення лінійних струмів

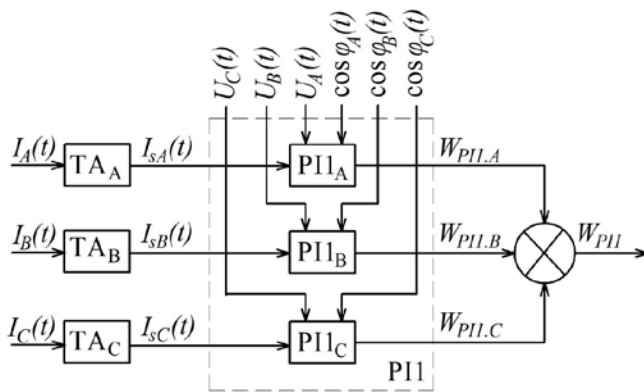


Рис. 1. Структурна схема трифазного вузла комерційного обліку електроенергії як вимірювального перетворювача

статична функція перетворення для вимірювального каналу

$$W_{PI,\zeta} = W_{PI,\zeta} [t, I_{s\zeta} [I_{\zeta}(t)], U_{\zeta}(t), \cos \varphi_{\zeta}(t)], \quad (1)$$

де  $I_{s\zeta}$  — вторинний струм вимірювального трансформатора струму ТА<sub>ζ</sub>;  $I_{s\zeta} [I_{\zeta}(t)]$  — статична характеристика ТА<sub>ζ</sub> в режимі зниженого навантаження.

Вводяться припущення: про активний характер навантаження; про знаходження діючого значення напруги в інтервалі (0,9...1,1) в.о., відповідно до ДСТУ EN 50160:2014, з імовірністю не нижче 0,95; про стаціонарний характер випадкових змін струмів  $I_{\zeta}(t)$  в режимі зниженого наванта-

$I_{\zeta}(t)$  навантаження, які є випадковими функціями часу  $t$ . В якості збурень розглядаються діючі значення фазних напруг електромережі  $U_{\zeta}(t)$  та коефіцієнти потужності навантажень фаз  $\cos \varphi_{\zeta}(t)$ . Вихідною величиною є накопичення активної енергії  $W_{PI}(t)$  з часом.

Трифазний лічильник електроенергії може розглядатися як сукупність трьох вимірювальних каналів ПІ<sub>ζ</sub> фаз. Кожен з таких каналів забезпечує вимірювання накопичення активної енергії з часом (інтегралу від потужності за часом), яка споживається відповідною фазою наванта-

ження. Якщо розглядати випадок, що протягом інтервалу  $\Delta t$  струм протікав тільки по  $\zeta$ -му вимірювальному каналу, а струми двох інших каналів нульові, і позначити покази лічильника P11 в моменти  $t_{1(2)}$  як  $W_{P11,\zeta,mr}(t_{1(2)})$ , тоді активна енергія, облікована за  $\zeta$ -м каналом, становить

$$W_{P11,\zeta}[\Delta t, I_\zeta] = I_\zeta \cdot I_{s\zeta}^{-1}(I_\zeta) \cdot [W_{P11,\zeta,mr}(t_2) - W_{P11,\zeta,mr}(t_1)]. \quad (2)$$

Необхідною умовою для оцінювання точності обліку електроенергії в режимі зниженого навантаження є наявність дійсного значення спожитої протягом інтервалу  $\Delta t$  активної енергії, що є максимально точним, в умовах експерименту, наближенням до істинного значення спожитої активної енергії. Для вимірювання такого значення використовується лічильник P12 прямого підключення.

Точність вимірювання електроенергії у  $\zeta$ -му вимірювальному каналі вузла комерційного обліку в режимі зниженого навантаження може бути оцінена за відносним відхиленням  $\delta W_\zeta$  виміряної за часовий інтервал  $\Delta t = t_2 - t_1$  активної енергії між показами лічильника трансформаторного та лічильника прямого включення

$$\delta W_\zeta(I_\zeta) = \frac{I_\zeta}{I_{s\zeta}(I_\zeta)} \cdot \frac{W_{P11,\zeta,mr}(t_2) - W_{P11,\zeta,mr}(t_1)}{W_{P12,\zeta,mr}(t_2) - W_{P12,\zeta,mr}(t_1)} - 1. \quad (3)$$

Функціонування вимірювальних каналів лічильників трансформаторного та прямого включення є взаємно незалежним. Похибки, що супроводжують вимірювання, можуть вважатися випадковими. Величини  $\delta W_\zeta$ , що оцінюють точність вимірювання у  $\zeta$ -му вимірювальному каналі вузла комерційного обліку, визначаються, відповідно до (3), як результат ділення виміряних величин. Це дає підстави визначати відносне відхилення показів лічильника трансформаторного включення від лічильника прямого включення за трьома фазами таким чином:

$$\delta W(I_A, I_B, I_C) = \sqrt{\sum_{\zeta=\{A,B,C\}} \delta W_\zeta^2(I_\zeta)}. \quad (4)$$

Для оцінювання невизначеності відхилення показів лічильника трансформаторного включення від лічильника прямого включення за умови незмінного рівня навантаження одного з трьох вимірювальних каналів, у разі нульового струму двох інших каналів, передбачається невідповідну невизначеність оцінювати з використанням теорії нечітких множин [7].

Досліджуваний в лабораторних умовах вузол обліку укомплектовано лічильником трансформаторного підключення NIK2307 ART T.1600.M2.21. Для оцінювання дійсних значень вимірювальної величини передбачається використовувати лічильник прямого підключення NIK2307 ARP3 T.1600.M2.21, рис. 2. Клас точності обох лічильників 0,5 S. Схема стенда дозволяє формувати на кожній фазі активне навантаження.

Для оцінювання невизначеності відхилення показів лічильника трансформаторного включення

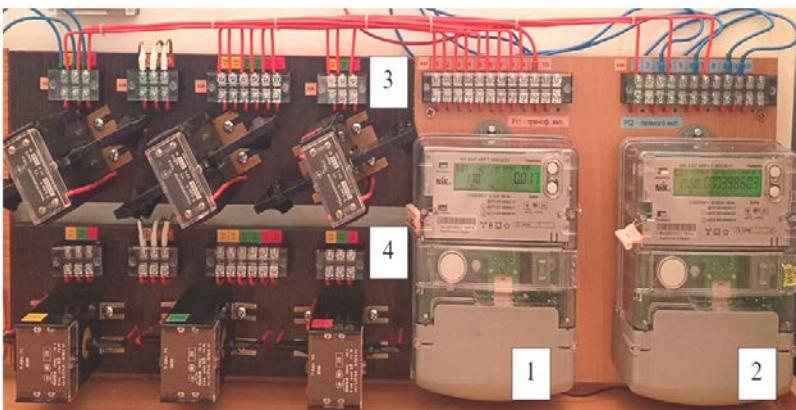


Рис. 2. Лабораторна установка для дослідження точності обліку електроенергії:

1 — лічильник електроенергії P11 трансформаторного підключення типу NIK2307 ART T.1600.M2.21; 2 — лічильник P12 прямого підключення типу NIK2307 ARP3 T.1600.M2.21; 3 — панель з трансформаторами струму 600/5 класу точності 0,5 S; 4 — панель з трансформаторами струму 100/5 класу точності 0,5

від лічильника прямого включення у вимірюваному каналі фази А проведено 70 дослідів тривалістю близько двох годин кожний, в яких струм фази А  $I_A^* = 0 \dots 2\%$ , фази В та С не навантажувалися. Інтервал зміни струму навантаження  $I_A^*$  розбито на 6 проміжків шириною 0,3 %, причому межа чутливості за струмом становила 0,2 %. Оцінювання невідповідної невизначеності вимірювання  $\delta W_A$ , що відповідають кожному з проміжків зміни струму, здійснювалося з використанням теорії нечітких множин. Сутність

метода полягає у знаходженні вибірових емпіричних значень функції належності на основі довжин інтервалів між сусідніми вибіровими значеннями вимірюваної величини, що шляхом лінійного перетворення, приведені до діапазону від 0 до 1 в.о. [7]. Визначається значення вимірюваної величини, що є найближчою оцінкою істинного значення. Для такого значення вважається, що функція належності дорівнює 1. Вказане значення поділяє весь діапазон вибірових значень вимірюваної величини на 2 піддіапазони, які в подальшому аналізуються окремо, але за однаковою процедурою. Для кожного з піддіапазонів значення вимірюваної величини нормуються. Це дає змогу апроксимувати експериментальні значення функції належності у відносних одиницях. Для кожної з гілок функції належності, що відповідає одному з виділених піддіапазонів, застосовується поліноміальна апроксимація за критерієм мінімуму чебишевської норми нев'язки похибки. Для чисельної мінімізації норми нев'язки застосовується метод Нелдера–Міда. З використанням коефіцієнтів апроксимуючих поліномів для заданого рівня довіри обчислюються межі фаззи-інтервалу, який характеризує результати вимірювання.

В результаті отримано межі фаззи-інтервалів  $\{\delta W_{Lk}; \delta W_{Rk}\}$  за рівня довіри 0,4 для проміжків зміни струму фази А, рис. 3. Межі оцінених нечітких інтервалів апроксимовані залежністю

$$\delta W_A(I_A^*) = A_1 \cdot e^{-I_A^*/B_1} + A_2 \cdot e^{-I_A^*/B_2} + C. \quad (5)$$

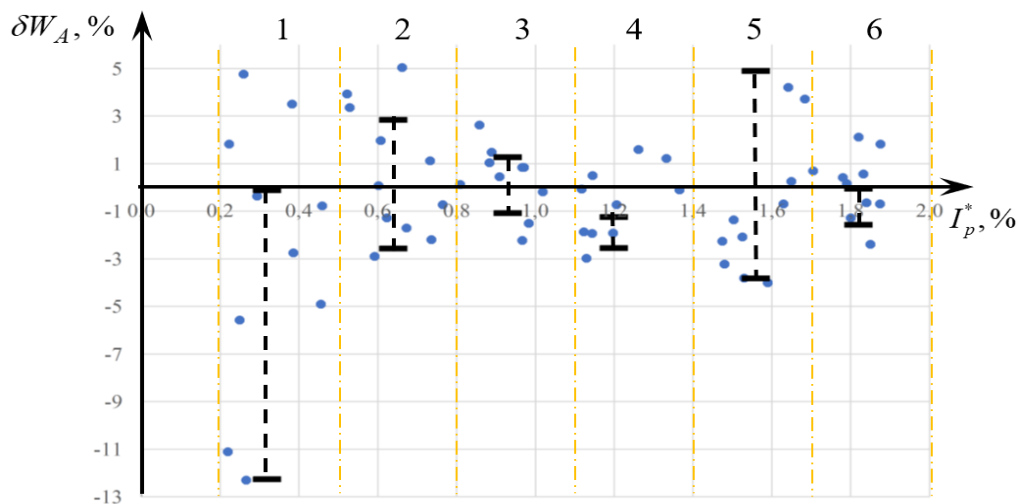


Рис. 3. Результати експерименту та фаззи-інтервали невизначеності  $\delta W_A$  вимірювання електроенергії вузлом комерційного обліку в режимі зниженого навантаження

Завдяки цьому отримана нечітка функція, яка характеризує невизначеність обліку по вимірювальному каналу фази А:

$$\widetilde{\delta W}_A(I_A^*) = [A_{1L}; A_{1R}] \cdot \exp(-I_A^*/[B_{1L}; B_{1R}]) + [A_{2L}; A_{2R}] \cdot \exp(-I_A^*/[B_{2L}; B_{2R}]) + [C_L; C_R], \quad (6)$$

де  $A_{1L} = -2,72 \cdot 10^2$ ;  $A_{1R} = -6,01 \cdot 10^2$ ;  $A_{2L} = 2,03$ ;  $A_{2R} = 9,35$ ;  $B_{1L} = 9,84 \cdot 10^{-2}$ ;  $B_{1R} = 5,64 \cdot 10^{-2}$ ;  $B_{2L} = 2,15$ ;  $B_{2R} = 1,93 \cdot 10^{-1}$ ;  $C_L = -3,42$ ;  $C_R = -7,25$  — оцінки коефіцієнтів регресії для лівої та правої граничних функцій (5), отримані за допомогою метода найменших квадратів.

Оцінювання параметрів нечіткої функції (6) для кожного з вимірювальних каналів дає підстави оцінити границі, відповідно до (4), нечіткої функції, що визначає невизначеність вимірювання електроенергії по трьох фазах.

### Висновки

Запропоновано метод оцінювання точності обліку електроенергії трифазним вузлом комерційного обліку в режимі зниженого навантаження, згідно з яким залежність між вимірюваною величиною (відносним відхиленням показів лічильника трансформаторного включення від дійсних значень енергії, що оцінюються за показами лічильника прямого включення) та струмами фаз оцінюється за допомогою нечіткої функції. Встановлено, що в режимі зниженого навантаження недооблік активної енергії по одному вимірюваному каналу лічильника трансформаторного включення може досягати 3 %. В ході подальших досліджень доцільно сформулювати інтегральний показник

для оцінювання недообліку електроенергії вузлом комерційного обліку в режимі зниженого навантаження залежно від рівня струму та несиметрії навантаження.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] P. Jiang et al, "Impacts of COVID-19 on energy demand and consumption: Challenges, lessons and emerging opportunities," *Appl Energy*, vol. 285: 116441, Mar. 1. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116441> .
- [2] В. В. Древецький, К. С. Василець, А. О. Ахромкін, С. В. Василець, і Р. С. Стасюк, «Вимірювання та облік електричної енергії із застосуванням вимірювальних трансформаторів струму в умовах зниженого навантаження,» на *V Міжнародна науково-практична конференція «Моделювання, керування та інформаційні технології»*, Національний університет водного господарства та природокористування, ПрАТ «Рівнеобленерго». Рівне, 4-778, 2020.
- [3] С. А. Приведенний, і В. Ф. Рой, «Вплив похибок вимірювальних трансформаторів на точність обліку електроенергії,» *Світлотехніка та електроенергетика*, № 1'2009, с. 73-76, 2009. Режим доступу: <http://eprints.kname.edu.ua/11667/1/73-76.pdf> .
- [4] International Organization for Standardization, "Guide to the expression of uncertainty in measurement," *ISO/IEC Guide 98:1993*, 1993.
- [5] M. Drosig, *Dealing with Uncertainties. A Guide to Error Analysis*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 193 p.
- [6] A. Ferrero, and S. Salicone, "The random-fuzzy variables: A new approach to the Expression of Uncertainty in Measurement," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 5, pp. 1370-1377, 2004. <https://doi.org/10.1109/TIM.2004.831506> .
- [7] X. Xia, Z. Wang, and Y. Gao, "Estimation of non-statistical uncertainty using fuzzy-set theory," in *Meas. Sci. Technol*, 11 (2000), pp. 430-435, 2000. [Electronic resource]. Available: <http://www.people.vcu.edu/~lparker/DBGroup/References/Estimati.pdf>.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.10.2021

**Василець Катерина Сергіївна** — аспірантка кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, e-mail: 9275195@stud.nau.edu.ua .

Національний авіаційний університет, Київ

**K. S. Vasylets<sup>1</sup>**

## Evaluation of the Electricity Metering Accuracy by Commercial Accounting Unit

<sup>1</sup>National Aviation University, Kyiv

*The method for evaluation of the electricity metering accuracy by a three-phase commercial accounting unit in a reduced load mode is proposed. The method enables to determine the incomplete calculating of electricity by one or several phases in the case of a decrease in the load level of current transformers to values at which the permissible error is not standardized for a given accuracy class, or the operation of the electric energy meter of a transformer connection is in the dead mode. This is typical during downtime of production equipment at night, on weekends and holidays, when only the territory lighting of the enterprise, video surveillance, burglar alarms etc. are functioning. The method makes it possible to evaluate the relationship between the measured value and the phase currents using a fuzzy function. The measured value is the relative deviation of the readings of the transformer connection meter from the actual energy values, which are estimated from the readings of the direct connection meter. To estimate the parameters of the approximating dependences for the boundary real functions, which determine such a fuzzy function, it is necessary: to obtain samples of the measured value for each measuring channel when the current of the corresponding phase changes within the limits that correspond to the reduced load mode; for each of the samples, using the theory of fuzzy sets, estimate the boundaries of fuzzy intervals characterizing the measurement result; the boundaries of the obtained fuzzy intervals for fixed values of currents of a certain phase are approximated by functions representing the sum of two exponentials, as a result of which fuzzy functions are obtained that characterize the accounting uncertainty for each phase; estimate the boundaries of the desired fuzzy function, which determines the uncertainty in the measurement of electricity in three phases, as the root of the sum of the corresponding boundaries squares of the fuzzy functions, which show the accounting uncertainties for each phase. It was found that in the reduced load mode the incomplete counting of active energy over one measuring channel of the transformer connection meter of accuracy class 0.5 S can reach 3 %. The use of the method will make it possible to improve the accuracy of financial calculations between suppliers and consumers of electricity.*

**Keywords:** electricity, metering, measurement uncertainty, fuzzy function, measuring current transformer, sensitivity limit.

**Vasylets Kateryna S.** — Post-Graduate Student of the Chair of Computerized Electrotechnical Systems and Technologies, e-mail: 9275195@stud.nau.edu.ua



## Оценка точности измерения электрической энергии узлом коммерческого учета

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет, Киев

*Предложен метод оценки точности учета электрической энергии трехфазным узлом коммерческого учета в режиме сниженной нагрузки, который позволяет определить недоучет электроэнергии по одной или нескольким фазам в случае снижения уровня загрузки трансформаторов тока до значений, при которых для заданного класса точности не нормирована допустимая погрешность, либо при функционировании счетчика электрической энергии трансформаторного включения в режиме нечувствительности, что характерно во время простоев производственного оборудования в ночное время, в выходные и праздничные дни, когда функционирует только освещение территории предприятия, видеонаблюдение, охранная сигнализация и т.п. Метод дает возможность оценить с помощью нечеткой функции зависимость между измеряемой величиной (относительным отклонением показаний счетчика трансформаторного включения от действительных значений энергии, которые оцениваются по показаниям счетчика прямого включения) и токами фаз. Для оценки параметров аппроксимирующих зависимостей для граничных действительных функций, которые определяют такую нечеткую функцию, необходимо: 1) получить выборки значений измеряемой величины по каждому измерительному каналу при изменении тока соответствующей фазы в границах, которые отвечают режиму сниженной нагрузки; 2) для каждой из выборок с использованием теории нечетких множеств оценить границы фазы-интервалов, характеризующих результат измерения; 3) границы полученных нечетких интервалов для фиксированных значений токов определенной фазы аппроксимировать функциями, представляющими собой сумму двух экспонент, в результате чего получают нечеткие функции, которые характеризуют неопределенность учета по каждой фазе; 4) оценить границы искомой нечеткой функции, определяющей неопределенность измерения электроэнергии по трем фазам, как корень из суммы квадратов соответствующих границ нечетких функций неопределенностей учета по каждой фазе. Установлено, что в режиме сниженной нагрузки недоучет активной энергии по одному измерительному каналу счетчика трансформаторного включения класса точности 0,5 S может достигать 3%. Использование метода даст возможность повысить точность финансовых расчетов между поставщиками и потребителями электроэнергии.*

**Ключевые слова:** электроэнергия, учет, неопределенность измерений, нечеткая функция, измерительный трансформатор тока, граница чувствительности.

*Василец Екатерина Сергеевна* — аспирант кафедры компьютеризированных электротехнических систем и технологий, e-mail: 9275195@stud.nau.edu.ua