

**С. Ю. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ»;  
**В. В. ВОЛОХІН**, канд. техн. наук, доцент, СумДУ, Суми;  
**І. М. ДЯГОВЧЕНКО**, аспірант, СумДУ, Суми;  
**Д. М. МАКУХА**, асистент, СумДУ, Суми;

## АКТУАЛЬНІСТЬ УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НАПРУГИ ПРИ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Розглянуто і проаналізовано вплив на роботу приладів обліку електричної енергії показників якості напруги, зокрема відхилення напруги від нормованих значень, коливання напруги, несинусоїдальність напруги, несиметрія напруги, провали напруги, імпульси напруги та тимчасові перепади напруги. Визначено основні причини виникнення таких відхилень якості електроенергії, зроблено висновки щодо їх впливу на прилади обліку електричної енергії, розглянуто основні методи їх врахування.

**Ключові слова:** прилад обліку, лічильник електроенергії, електрична енергія, напруга, несиметрія, відхилення, вплив, похибка.

**Вступ.** Електрична енергія як товар використовується у всіх сферах життєдіяльності людини, володіє сукупністю специфічних властивостей і бере безпосередню участь при створенні інших видів продукції, впливаючи на їх якість. У зв'язку з цим питання точності вимірювання електричної енергії в електричних розподільних мережах є актуальним.

Для вимірювання електричної енергії в системах електропостачання в даний час застосовуються як індукційні, так і електронні лічильники електроенергії. Причому останні найчастіше будуються на основі аналогово-цифрових перетворювачів з використанням мікропроцесорних обчислювачів, тобто в процесі обчислення електроенергії застосовується дискретизація вимірювань за часом і квантування вхідних сигналів, пропорційних поточних значень струму і напруги на навантаженні, що неминує породжує похибка обчислення енергії.

В якості електронних приладів обліку сьогодні використовуються спеціально розроблені лічильники, що забезпечують з досить високою точністю визначення поточного значення електроенергії  $W(t)$  у порівнянні з індукційними лічильниками, у відповідності з виразом:

$$W(t) = \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt, \quad (1)$$

де  $u(t)$  – миттєве значення напруги навантаження;  $i(t)$  – миттєве значення струму навантаження;  $t$  – поточний час вимірювання.

У структурній схемі такого лічильника як перемножувача миттєвих зна-

чень  $u(t)$  і  $i(t)$  використовується імпульсний інтегратор, імпульсний перемножуючий пристрій, цифровий лічильник імпульсів, що дає можливість забезпечити дуже низьку сумарну похибку вимірювання поточного значення електроенергії (порядку декількох десятих часток відсотка) в умовах високого рівня вищих гармонік на кратних частотах 50 Гц, аж до частот у кілька десятків кілогерц, і використовувати його для зразкового вимірювання електричної енергії.

Точність обліку електричної енергії, яка проходить через контрольно-вимірювальний пристрій (лічильник), багато в чому залежить від параметрів якості електричної енергії (ЯЕ). Кожен електроприймач призначений для роботи при певних параметрах електричної енергії: номінальній напрузі, частоті, струмі і т. п., тому для його нормального функціонування повинна бути забезпечена необхідна ЯЕ. Таким чином, якість електричної енергії визначається сукупністю її характеристик, при яких електроприймачі (ЕП) і контрольно-вимірювальні прилади можуть нормально працювати і виконувати закладені в них функції.

На сьогодні в Україні діє стандарт ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», який встановлює норми і показники ЯЕ в електромережах загального призначення однофазного та трифазного змінного струму промислової частоти у мережах, до яких приєднуються електричні мережі, що перебувають у власності різних споживачів електричної енергії, або приймачі електричної енергії (точки загального приєднання). Норми ЯЕ, що встановлюються стандартом, є обов'язковими і служать для забезпечення електромагнітної сумісності електричних мереж систем електропостачання загального призначення і електричних мереж приймачів електричної енергії (споживачів).

Одним з найважливіших показників якості є напруга. Згідно з ГОСТ 13109-97, встановлюються наступні показники ЯЕ по напрузі:

- усталене відхилення напруги  $\delta U_y$ ;
- розмах зміни напруги  $\delta U_i$ ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ ;
- коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги  $K_{U(n)}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруги при зворотній послідовності  $K_{2U}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг при нульовій послідовності  $K_{0U}$ ;
- тривалість провалу напруги  $\Delta t_n$ ;
- імпульсна напруга  $U_{\text{имп}}$ ;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги  $K_{\text{пер}U}$ .

При визначенні значень деяких показників якості стандартом вводяться допоміжні параметри електроенергії:

- інтервал між змінами напруги  $\Delta t_{i,i+1}$ ;
- глибина провалу напруги  $\delta U_n$ ;
- частота появи провалів напруги  $F_n$ ;

- тривалість імпульсу за рівнем 0,5 його амплітуди  $\Delta t_{\text{имп}0,5}$ ;
- тривалість тимчасової перенапруги  $\Delta t_{\text{пер}U}$ .

**Відхилення напруги.** Відхилення напруги визначається різницею між дійсним  $U$  і номінальним значеннями напруги  $U_{\text{ном}}$ , В:

$$\delta U = U - U_{\text{ном}}. \quad (2)$$

Усталене відхилення напруги:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 \%, \quad (3)$$

де  $U_y$  – стале (діюче) значення напруги за інтервал усереднення.

В електричних мережах однофазного змінного струму діюче значення напруги визначається як значення напруги основної частоти  $U_{(1)}$  без урахування вищих гармонійних складових напруги, а в електричних мережах трифазного струму – як діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти  $U_{1(1)}$ . Стандартом нормуються відхилення напруги на виводах приймачів електричної енергії. Нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги дорівнюють відповідно  $\pm 5$  та  $\pm 10$  % від номінального значення.

Відхилення напруги від номінальних значень відбуваються через добові, сезонні і технологічні зміни електричного навантаження споживачів; зміни потужності компенсуючих установок; зміни схем та параметрів електричних мереж; регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистем.

При відхиленні напруги від номінального більш ніж на 10 % виникає суттєва зміна похибки лічильника. Зазвичай доводиться рахуватися з впливом зниженої напруги. При коефіцієнті завантаження індукційного лічильника менше 0,3 зниження напруги призводить до зміни похибки в негативну сторону через послаблення дії компенсатора тертя. При коефіцієнтах завантаження вище 0,3 зниження напруги призводить до зміни похибки вже в позитивний бік. Це відбувається через зменшення гальмівної дії робочого потоку в колах напруги.

**Коливання напруги.** Коливання напруги викликаються різкою зміною навантаження на аналізованій ділянці електричної мережі, наприклад, після включенням асинхронного двигуна з великою кратністю пускового струму (7-8 разів), технологічними установками зі швидкозмінним режимом роботи, що супроводжуються поштовхами активної та реактивної потужності - такими як, привод реверсивних прокатних конвеєрів, зварювальні установки, дугові сталеплавильні печі і т. п. Коливання напруги характеризуються двома показниками:

- розмахом зміни напруги  $\delta U_t$ ;
- дозою флікера  $P_t$ .

Розмах зміни напруги  $\delta U_i$  обчислюють за формулою:

$$\delta U_i = \frac{(U_i - U_{i+1})}{U_{ном}} 100\%,$$

де  $U_i, U_{i+1}$  – значення наступних один за іншим екстремумів (або екстремуму і горизонтальної ділянки) обвідної середньоквадратичних значень напруги, відповідно до рис. 1.

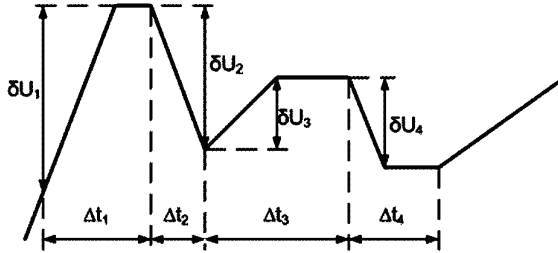


Рисунок 1 – Коливання напруги

Частота повторення змін напруги  $F_{\delta U_i}$  (1/с, 1/хв) визначається за виразом:

$$F_{\delta U_i} = \frac{m}{T}, \quad (4)$$

де  $m$  – число змін напруги за час  $T$ ;  $T$  – інтервал часу виміру, приймається рівним 10 хв.

Якщо дві зміни напруги відбуваються з інтервалом менше 30 мс, то їх розглядають як одне. Інтервал часу між змінами напруги дорівнює

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i,i+1} - \Delta t_i.$$

**Несинусоїдальність напруги.** В процесі вироблення, перетворення, розподілу і споживання електроенергії мають місце спотворення форми синусоїдальних струмів і напруг. Несинусоїдальність форми струму в основному визначається електроприймачами з нелінійною характеристикою. До них, зокрема, відносяться вентиляльні перетворювачі, електродугові сталеплавильні печі, випрямні установки, газорозрядні лампи, зварювальне обладнання та ін. Вимірювання електроенергії при наявності вищих гармонік проводиться з похибкою, знак якої може бути як позитивним, так і негативним. При відхиленні частоти на 1 Гц похибка лічильника може досягати 0,5 %.

Відомо, що будь-яку несинусоїдальну функцію  $f(\omega t)$  (наприклад, див. рис. 2), що задовольняє умови Діріхле, можна представити у вигляді суми постійної величини і нескінченного ряду синусоїдальних величин з кратними частотами (гармонійні складові). Синусоїдальна складова, період якої дорівнює періоду несинусоїдальної періодичної величини, називається основною (першою) гармонікою. Інші складові синусоїди з частотами з другої по  $n$ -у

називають вищими гармоніками.

Несинусоїдальність напруги характеризується наступними показниками:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги.
- коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги.

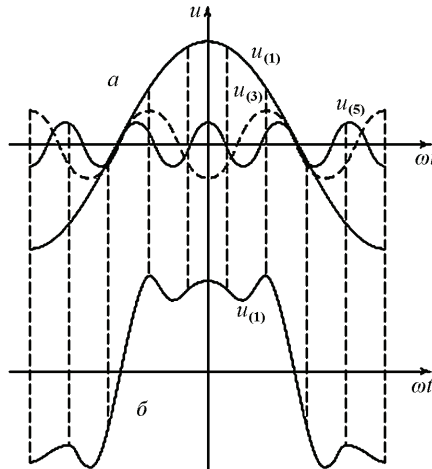


Рисунок 2 – Несинусоїдальність напруги:  $a$  – гармонічного складу напруги (1, 3, 5-а гармоніки),  $b$  – результуюча (спотворена форма кривої)

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$  визначається за виразом:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} 100\%, \quad (5)$$

де  $U_{(n)}$  – діюче значення  $n$ -ої гармонійної складової напруги; В,  $n$  – порядок гармонійної складової напруги;  $N$  – порядок останньої з обліковуються гармонійних складових напруги, стандартом встановлюється  $N = 40$ ;  $U_{(1)}$  – діюче значення напруги основної частоти, В.

Коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги дорівнює:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} 100\%, \quad (6)$$

Для обчислення необхідно визначити значення напруги окремих гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням. Нормально допустимі та гранично допустимі значення  $K_U$  є нормованими величинами.

**Несиметрія напруги.** Найбільш поширеними джерелами несиметрії напруг у трифазних системах електропостачання є такі споживачі електроенер-

гії, симетричне трифазне навантаження яких або неможливе, або недоцільне з техніко-економічних міркувань. До таких установок відносяться індукційні та дугові електричні печі, тягові навантаження залізничних составів, спеціальні однофазні навантаження, освітлювальні установки. Несиметричні режими напруги в електричних мережах мають місце також в аварійних ситуаціях – при обриві фази або несиметричних коротких замиканнях. Несиметрія напруг характеризується наявністю в трифазній електричній мережі напруг зворотної або нульової послідовностей, що є значно меншими за величиною, ніж відповідні складові напруги прямої (основної) послідовності.

Несиметрія трифазної системи напруг виникає внаслідок накладення на систему прямої послідовності системи напруг зворотної послідовності, що призводить до змін абсолютних значень фазних і міжфазних напруг (рис. 3).

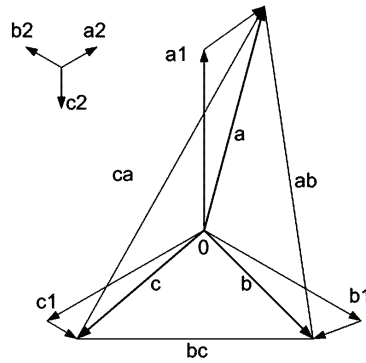


Рисунок 3 – Векторна діаграма напруг прямої та зворотної послідовності

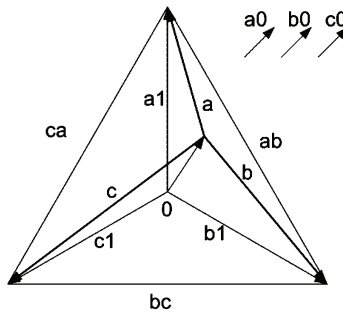


Рисунок 4 – Векторна діаграма напруг прямої і нульової послідовності

Крім несиметрії, що викликається напругами системи зворотної послідовності, може виникати несиметрія від накладення на систему прямої послідовності системи напруг нульової послідовності. В результаті зсуву нейтралі трифазної системи виникає несиметрія фазних напруг при збереженні симет-

ричної системи міжфазних напруг (рис. 4).

Несиметрія напруг характеризується наступними показниками:

- коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності;
- коефіцієнтом несиметрії напруг за нульовою послідовністю.

Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності дорівнює:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(n)}}{U_{1(1)}} 100 \%, \quad (6)$$

де  $U_{2(1)}$  – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В;  $U_{1(1)}$  – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти, В.

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю дорівнює:

$$K_{2U} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{1(1)}} 100 \%, \quad (7)$$

де  $U_{0(1)}$  – діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В.

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю проводять у чотирихпроводниковій мережі. Нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в точці загального приєднання до електричних мереж складають 2,0 і 4,0 %.

Нормовані значення коефіцієнта несиметрії напруги за нульовою послідовністю в точці загального приєднання до чотирихпроводникової електричної мережі 0,38 кВ також дорівнюють 2,0 і 4,0 %.

Варто відзначити, що несиметрія навантажень незначною мірою впливає на похибку лічильника. Деяке збільшення похибки може мати місце при відсутності навантаження в одній фазі, що практично виключено. Вирівнювання навантажень по фазах має за мету не тільки зменшення втрат, але і підвищення точності обліку. На трьохелементний лічильник несиметрія навантажень не впливає. В сучасних електронних приладах обліку дана проблема вирішена практично повністю.

**Провали напруги.** До провалів напруги належить раптова значна зміна напруги в точці електричної мережі нижче рівня 0,9, за якою слідує відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня через проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд (рис. 5).

Характеристикою провалу напруги є його тривалість –  $\Delta t_n$ , яка дорівнює

$$\Delta t_n = t_k - t_n, \quad (8)$$

де  $t_n$  і  $t_k$  – початковий і кінцевий моменти часу провалу напруги.

Провал напруги характеризується також глибиною провалу напруги – різницею між номінальним значенням напруги і мінімальним діючим значенням напруги, вираженої в одиницях напруги або у відсотках від номінального

значення. Провал напруги обчислюється за виразами

$$\delta U_n = U_{ном} - U_{мин} \quad (9)$$

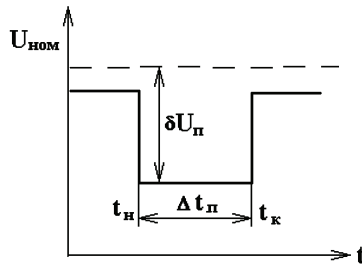


Рисунок 5 – Провал напруги

**Імпульс напруги і тимчасова перенапруга.** Спотворення форми кривої напруги може відбуватися за рахунок появи височастотних імпульсів при комутаціях в мережі, роботі розрядників і т. д. Імпульс напруги - різка зміна напруги в точці електричної мережі, за якою слідує відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня. Величина спотворення напруги при цьому характеризується показником імпульсної напруги (рис. 6).

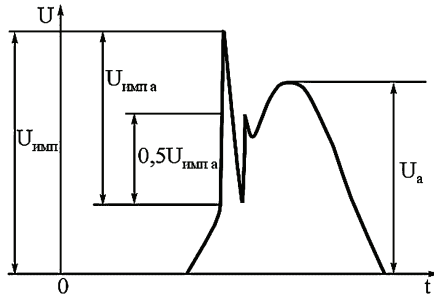


Рисунок 6 – Параметри імпульсної напруги

Імпульсна напруга у відносних одиницях дорівнює:

$$\delta U_{имп} = \frac{U_{имп}}{\sqrt{2}U_{ном}}, \quad (10)$$

де  $U_{имп}$  – значення імпульсної напруги, В.

Амплітудою імпульсу називається максимальне миттєве значення імпульсу напруги. Тривалість імпульсу – це інтервал часу між початковим моментом імпульсу напруги і моментом відновлення миттєвого значення напруги до початкового або близького до нього рівня. Показник імпульсна напруга стандартом не нормується.

Значні стрибки напруги можуть призводити до пошкодження складових



елементів лічильників електроенергії та виникнення порушень в їх роботі.

Тимчасова перенапруга – це підвищення напруги в точці електричної мережі вище  $1,1 \cdot U_{ном}$  тривалістю більше 10 мс, яке виникає у системах електропостачання при комутаціях або коротких замиканнях (рис. 7).

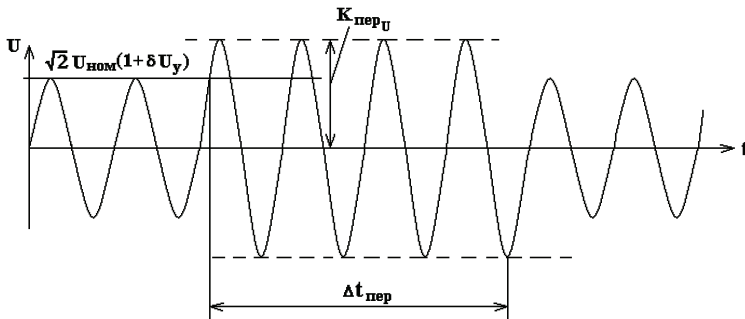


Рисунок 7 – Тимчасова перенапруга

Тимчасова перенапруга характеризується коефіцієнтом тимчасової перенапруги ( $K_{перU}$ ): це величина, що дорівнює відношенню максимального значення огинаючої амплітудних значень напруги за час існування тимчасової перенапруги до амплітуді номінального напруги мережі.

$$K_{перU} = \frac{U_{aMax}}{\sqrt{2} U_{ном}} \quad (11)$$

Тривалістю тимчасової перенапруги називається інтервал часу між початковим моментом виникнення тимчасової перенапруги і моментом її зникнення.

$$\Delta t_{перU} = t_{кпер} - t_{нпер} \quad (12)$$

Коефіцієнт тимчасової перенапруги стандартом також не нормується. В середньому за рік в точці приєднання можливі близько 30 часових перенапруг. При обриві нульового провідника в трифазних електричних мережах напругою до 1 кВ, що працюють з глухозаземленою нейтраллю, виникають тимчасові перенапруги між фазою і землею. Рівень таких перенапруг при значній несиметрії фазних навантажень може досягати значень міжфазової напруги, а тривалість кількох годин.

**Висновки.** Встановлений і розширений робочі діапазони лічильника повинні мати відповідно значення  $0,90 \div 1,10 U_{ном}$  і  $0,8 \div 1,15 U_{ном}$ . У відповідності до результатів досліджень, граничні похибки для установленого діапазону з його допустимим 10 % відхиленням від номінальної напруги в найгіршому випадку для класів точності 0,2S; 0,5S; 1,0 і 2,0 складають відповідно 0,2; 0,4; 1,0; 1,5. Однак більшість лічильників розраховані на роботу в розширеному діапазоні напруги, а це означає, що їх граничні похибки при відхиленнях на-

пруги понад  $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$  (до  $1,15 \cdot U_{\text{ном}}$ ) і нижче  $0,9 \cdot U_{\text{ном}}$  (до  $0,8 \cdot U_{\text{ном}}$ ) можуть мати межі в 3 рази більші: 0,6; 1,2; 3,0 і 4,5. Таким чином якість електричної енергії, зокрема якість напруги є дуже важливим параметром, від контролю якого на пряму залежить точність вимірювання і обліку електричної енергії контрольно-вимірювальними приладами.

**Список літератури:** 1. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с. 2. Pietro Vincenzo Barbaro. Behaviour of reactive energy meters in polluted power systems / Pietro Vincenzo Barbaro, Antonio Cialiotti, Valentina Cosentino at all. – XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development, September, 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil. – 6 с. 3. Причины нарушения учета электроэнергии и неисправности индукционных счетчиков. – Режим доступа : <http://electricalschool.info/main/286-prichiny-naruseniija-ucheta.html>. – Дата звертання : 20 березня 2015. 4. Влияние колебаний напряжения на работу электрооборудования. – Режим доступа: [http://studopedia.ru/5\\_76337\\_vliyanie-kolebaniy-napryazheniya-na-rabotu-elektrooborudovaniya.html](http://studopedia.ru/5_76337_vliyanie-kolebaniy-napryazheniya-na-rabotu-elektrooborudovaniya.html). – Дата звертання : 21 березня 2015. 5. Попов А.П. Влияние широтно-импульсной модуляции на погрешность индукционных счетчиков электроэнергии и на потери в асинхронном двигателе / А. П. Попов, А. О. Чузулев, А. А. Горшенков та ін. – Режим доступа: <http://habarok.info/vlianie.shtm>. – Дата звертання : 21 березня 2015. 6. Петров В. М. О влиянии бытовых электроприемников на работу смежных электротехнических устройств. / В. М. Петров, Е. Ф. Щербаков, М. В. Петрова. // Промышленная энергетика. – 1998. – № 4. 7. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с. 8. ГОСТ13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». 9. ГОСТ Р 52322–2005. Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Ч. 21: Статические счетчики активной энергии классов точности 1 и 2. – М.: Стандартинформ, 2005. 10. Гуртовцев А. Погрешности электронных счетчиков. Исследование и оценка / А. Гуртовцев // Новости электротехники. Информационно-справочное издание. – 2007. – № 43. – С. 26-27.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zhelezko Ju. S. Poteri elektrojenergii. Reaktivnaja moshhnost. Kachestvo jelektrojenergii: Rukovodstvo dlja prakticheskikh raschetov. Moscow: JeNAS, 2009. Print. 2. Pietro Vincenzo Barbaro. Behaviour of reactive energy meters in polluted power systems. Pietro Vincenzo Barbaro, Antonio Cialiotti, Valentina Cosentino at all. XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development, September, 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil. Print. 3. Prichiny narusheniija ucheta jelektrojenergii i neispravnosti indukcionnyh schetchikov. Web. <http://electricalschool.info/main/286-prichiny-naruseniija-ucheta.html>. 20 March 2015. 4. Vliyanie kolebaniy naprjazheniya na rabotu elektrooborudovaniija Web. [http://studopedia.ru/5\\_76337\\_vliyanie-kolebaniy-napryazheniya-na-rabotu-elektrooborudovaniya.html](http://studopedia.ru/5_76337_vliyanie-kolebaniy-napryazheniya-na-rabotu-elektrooborudovaniya.html). 21 March 2015. 5. Popov A.P. Vliyanie shirotno-impul'snoj moduljacji na pogreshnost' indukcionnyh schetchikov jelektrojenergii i na poteri v asinhronnom dvigatele. Web. <http://habarok.info/vlianie.shtm>. 21 March 2015. 6. Petrov V. M. O vlijanii bytovykh jelektropriemnikov na rabotu smezhnykh jelektrotehnicheskikh ustrojstv. Promyshlennaja jenergetika. 1998. No 4 Print. 7. Zhezhenko I.V. Pokazateli kachestva jelektrojenergii i ih kontrol na promyshlennyh predpriatijah. Moscow: Jenergoatomizdat, 1986. Print. 8. GOST13109-97 «Normy kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija». 9. GOST R 52322–2005. Apparatura dlja izmereniija jelektricheskoi jenergii peremennogo toka. Chastnye trebovanija. Ch. 21: Statische schetchiki aktivnoj jenergii klassov tochnosti 1 i 2. – Moscow.: Standartinform, 2005. 10. Gurtovcev A. Pogreshnosti jelektronnyh schetchikov. Issledovanie i ocenka Novosti jelektrotehniki. Informacionno-spravocnoe izdanie. 2007. No 43. 26-27 Print.

*Поступила (received) 19.03.2015*