

УДК 621.3.016.4

П. Євтух, докт. техн. наук; С. Бабюк, канд. техн. наук; Т. Кислиця

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОБЛІК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИХ І НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМАХ У МЕРЕЖАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МІСТ

Резюме. Розглянуто проблему порушення симетрії навантаження та виникнення несинусоїдальних режимів у трифазних системах електропостачання мереж міст з нелінійними параметрами встановлених освітлювальних установок та, як наслідок, завищення при наявності несиметрії та нелінійності навантажень оплати за спожиту електроенергію. Доведено, що облік електроенергії у колах з несинусоїдальними режимами залежить від результативності похибки обліку електроенергії індуктивними лічильниками. Встановлено, що найбільшою мірою вплив несинусоїдальності на сумарну похибку таких лічильників проявляється на частотах 11-ї і 13-ї гармонік. Запропоновано для покращення обліку електроенергії та економії коштів бюджету міста встановлення у системах вуличного освітлення сучасних електронних коректорів потужності, які суттєво зменшують похибку обліку.

Ключові слова: облік електроенергії, лічильник, несинусоїдальний режим, гармоніки струму, похибка, електронний коректор потужності.

P. Yevtukh, S. Babyuk, T. Kyslytsia

CALCULATION OF ELECTRIC ENERGY UNDER NON-SINUSOIDAL AND ASYMMETRIC REGIMES OF THE MUNICIPAL POWER SUPPLY LINES NETWORKS

Summary. The problem of load symmetry disturbance and appearance of non-sinusoidal regimes in the three-phase mains power-supply systems of the municipal lighting networks with non-linear parameters of the installed lighting devices, which result in the increase of the meters data and raise of bills payment, has been analyzed.

It has been found, that voltage asymmetry in the municipal lighting networks results in the appearance of the inadmissible regimes, caused by the fact, that the gas-discharged lamp lighting devices, which are used in the municipal lighting, in the main non-linear loads, consist of out-of-date electromagnetic circuitry and create noises in the networks: they introduce reactive component, which can hardly be balanced and cause the appearance of higher harmonics. Higher harmonic currents, which are the result of this non-linearity, affecting the total network resistance, cause the network voltage disturbance and appearance of the non-sinusoidal regimes.

Current harmonics, penetrating into the power system network, cause the deterioration of the high-frequency communication and automatic systems operation, initiate unpredictable response of some relay protections as well as make worse the electric power calculation.

Nowadays for calculation of the electric power inductor counters, which have negative frequency error in the higher harmonic frequencies, are more widely used. It was stressed, that the electric energy calculation in the non-sinusoidal regime circuits depends on the electric power calculation error result, carried out by these counters. The limits of the maximal error of the non-sinusoidal voltage amplitude measurement, depending on the level of the higher harmonics, were found. It was determined that the greatest non-sinusoid effect on the induction counters error is that of the 11th and 13th harmonic frequencies, and depending on the fact, if the load is linear or non-linear, inaccurate calculation of the consumed electric power is possible. These characteristics of the induction counters operation, while being used in the lighting networks, result in the appearance of unexpected results, that is: excessive calculation and calculation defect of the electric energy as to the total consuming power of the lighting devices, which is treated as the power losses, but is fixed by the electric energy meters together with the useful power and is paid for the electric supply institution from the municipal budget funds according to the meters data.

One of the possible ways of solving this problem is the installation of modern electronic electronic corrector power., in which the circuitry solutions in the linearity of the input volt-ampere characteristic are applied, which will make possible the efficiency of the electric energy calculation and to save funds.

Key words: *electric energy, calculation, non-sinusoidal regime, current harmonic, error, electronic corrector power.*

Постановка проблеми. Внаслідок порушення симетрії навантаження у трифазних електроенергетичних системах спостерігається підвищення споживання електроенергії [1], яке проявляється у завищених показниках лічильників електроенергії у порівнянні з показниками, яких можна було б сподіватися, виходячи із паспортних режимів електроспоживання встановлених споживачів.

Ідеальний синусоїдний струм можна спостерігати тільки у мережах з лінійним навантаженням. Міська мережа є одним з найбільших споживачів електроенергії в комунальному господарстві міста. Пристрої на основі газорозрядних ламп, що застосовуються у вуличному освітленні, є принципово нелінійним навантаженням, мають застарілу електромагнітну схемотехніку (без електронної корекції вольт-амперної характеристики) і створюють завади в мережі: вносять реактивну складову, яку важко компенсувати; спричиняють виникнення вищих гармонік. Струми вищих гармонік, впливаючи на повний опір мережі, призводять до спотворення напруги мережі й виникнення несинусоїдальних режимів [2]. «Паразитна» енергія від несиметричних та несинусоїдальних режимів – це втрачена енергія, яка, однак, фіксується лічильниками електроенергії разом із корисною електроенергією, і яка оплачується за рахунок коштів бюджету міста електропостачальній організації згідно з показами лічильників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [3] запропоновано методику визначення споживаної чи генерованої на кожній частоті електроенергії, що дає можливість знайти винуватця погіршення якості електроенергії. Однак дана методика не вирішує проблеми усунення причин погіршення якості енергії підприємством, що здійснює оплату згідно з показами лічильника, які, у свою чергу, є завищеними.

Найбільший об'єм генерації світлової енергії у системах освітлення міст на сьогодні доводиться на газорозрядні лампи. Зниження якості електроенергії призводить до додаткових втрат і погіршення технічних показників роботи освітлювальних установок, а термін служби лампи суттєво залежить від форми струму. Якщо термін служби лампи при синусоїдальному струмі (коефіцієнт амплітуди дорівнює 1,41) прийняти за 100%, то при коефіцієнті амплітуди 2 термін горіння знижується на 30 – 40% [4].

У роботі [5] проаналізовано вплив несиметрії напруги на роботу освітлювальних установок та визначено фактори, які впливають на величину несиметрії в мережі зовнішнього освітлення: освітлювальні установки однофазного виконання живляться від трифазної, чотирипровідної електричної мережі зовнішнього освітлення, причому нейтральний провідник є спільним як для мережі зовнішнього освітлення, так і для мережі загального призначення. Тому навіть повністю симетрична система однофазних електроприймачів, які мають однакову потужність за модулем та характером навантаження, має значну несиметрію, викликану несиметрією від мережі загального призначення через спільний нульовий провідник. У результаті різкого перекосу фаз відбувається явище повторного запалювання ламп унаслідок коливання рівня напруги, що в кілька разів зменшує термін експлуатації освітлювальних установок зовнішнього освітлення.

Таким чином, несинусоїдальні та несиметричні режими не тільки призводять до неточного обліку спожитої енергії, а й є причиною додаткових витрат на заміну неробочих світильників, що, у свою чергу, підтверджує актуальність дослідження.

Мета роботи. Визначити міру впливу несинусоїдальних режимів, які виникають у трифазних системах електропостачання вуличного освітлення, на показники

лічильників обліку електроенергії. Знайти межі максимальної сумарної похибки вимірювання амплітуди несинусоїдної напруги залежно від рівня вищих гармонік. Запропонувати методи чи засоби покращення обліку електроенергії та економії коштів бюджету міста.

Постановка завдання. Асиметрія напруг у трифазній мережі електропостачання призводить до появи напруг зворотної та нульової послідовностей, із яких лише пряма послідовність виконує корисну роботу, а струми зворотних і нульових послідовностей призводять до втрат електроенергії та знижують параметри її якості [1].

При несинусоїдальних режимах гармоніки струму, проникаючи в мережу енергосистеми, призводять до погіршення роботи високочастотного зв'язку і систем автоматики, викликають неочікуване спрацювання деяких релейних захистів, а також негативно впливають на облік електроенергії. Вищі гармоніки струму і напруги в мережі порушують роботу телемеханічного устаткування і навіть викликають збій, якщо силові мережі використовуються в якості каналів зв'язку між півкомплектами диспетчерського і контрольного пункту, що має місце в автоматизованих системах керування вуличним освітленням міст.

Часто вплив несинусоїдальних режимів накладається на вплив від порушень симетрії. Однак механізм дії несинусоїдальних режимів відрізняється тим, що потоки «паразитної» енергії створюються вищими гармонічними складовими напруги та струмів. Кожна гармонічна складова, в свою чергу, розкладається на симетричні складові, а дія зворотної та нульової складових аналогічна параметрам впливу таких же складових, зумовлених впливом асиметрії навантажень. «Паразитний» вплив несинусоїдальних режимів на втрати електроенергії – це ще один фактор, який призводить до негативних явищ у мережі у вигляді підвищеного електроспоживання, що також оплачується споживачем електропостачальної організації. Тобто й у випадку, коли несинусоїдальність напруги зумовлена нелінійністю електроприймача, і у випадку, коли несинусоїдальність присутня з вини енергосистеми, за додаткові складові потужності, поява яких викликана несинусоїдальністю напруги, платитимуть усі споживачі, а не лише винуватець [3].

Для обліку електроенергії, поки що, поширене застосування мають лічильники, які мають від'ємну частотну похибку на частотах вищих гармонік [6]. Залежно від того, лінійне чи нелінійне навантаження, можливий «переоблік» або «недооблік» спожитої ними електроенергії. Нелінійні навантаження є генераторами вищих гармонік. Потужність $P_{н.л.}$, спожита ними,

$$P_{н.л.} = P_1 - \sum_{v=2}^n \Delta P_v (1 + \gamma_v), \quad (1)$$

де P_1 і $\sum_{v=2}^n \Delta P_v$ – потужність на частотах першої і вищих гармонік;

γ_v – частотна похибка лічильника на частоті v -ї гармоніки.

Для лінійних навантажень

$$P_n = P_1 + \sum_{v=2}^n \Delta P_v (1 + \gamma_v). \quad (2)$$

Результативність похибки обліку електроенергії обумовлена несинусоїдальністю

$$\gamma_{\Sigma} \approx \sum_{v=2}^n \Delta P_{v*} \gamma_v, \quad (3)$$

де

$$\Delta P_{v*} = \frac{\Delta P_v}{P_1}. \quad (4)$$

З останнього виразу випливає, що у випадку лінійних навантажень, оскільки всі $\gamma_v < 0$, виходить, що $\gamma_\Sigma < 0$, і має місце «недооблік» енергії. При нелінійних навантаженнях $\gamma_\Sigma > 0$, тобто здійснюється «переоблік» електроенергії, оскільки лічильники встановлені з боку вищої або нижчої напруг трансформатора підстанції, працюють з незначною частотною похибкою, завдячуючи меншим спотворенням напруги і струму; витрати активної енергії зафіксовані ними будуть меншими сумарних втрат, визначених за показниками лічильника.

Таким чином, облік електроенергії при таких особливостях роботи індуктивних лічильників (які ще в переважній більшості обслуговують освітлювальні мережі) є неточним: споживачів, які погіршують якість електроенергії, немов «наказують» за це; споживачі які не є джерелом гармонік, однак споживають їх, з точки зору обліку електроенергії знаходяться у зручнішому становищі.

Частотна похибка індуктивного лічильника на частоті ν -ї гармоніки визначається відомим співвідношенням

$$\gamma_\nu = \alpha [\exp(-\beta\nu) - 1], \quad (5)$$

де $\alpha = 1,28$; $\beta = 0,19$.

На частотах 5, 7, 11, 13-й гармонік частотні похибки $\gamma_5 = 3,32$; $\gamma_7 = 0,54$; $\gamma_{11} = 0,71$; $\gamma_{13} = 0,84$.

При дії на вимірювальну систему лічильника кількох гармонік напруги і струму математичне сподівання результативної частотної похибки

$$M_{\gamma_\Sigma} = \frac{\sum_{\nu=1}^n (1 + \gamma_\nu) MU_\nu MI_\nu M[\cos\phi_\nu]}{\sum_{\nu=1}^n MU_\nu MI_\nu M[\cos\phi_\nu]} - 1, \quad (6)$$

де MU_ν , MI_ν , $M[\cos\phi_\nu]$ – математичне сподівання напруги і струму ν -ї гармоніки і кута зсуву між ними.

Середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_{\gamma_\Sigma} = \sqrt{\sum_{\nu=1}^n MU_\nu MI_\nu M^2[\cos\phi_\nu] (1 + \gamma_\nu)}. \quad (7)$$

Якщо нелінійні навантаження працюють у стабільному режимі, в останніх двох виразах замість математичних сподівань MU_ν , MI_ν , $M[\cos\phi_\nu]$ потрібно підставити відповідні значення напруги і струму гармонік і кута зсуву між ними. Для цього випадку вираз для $M\gamma_\Sigma$ можна представити в компактнішому вигляді

$$M\gamma_\Sigma = \frac{1}{\cos\phi_1} \sum_{\nu=2}^n \gamma_\nu U_{\nu*} I_{\nu*} \cos\phi_\nu, \quad (8)$$

де $U_{\nu*}$, $I_{\nu*}$ – відносно (в долях напруги і струму промислової частоти) значення напруги і струму ν -ї гармоніки.

Результати дослідження. При великих спотвореннях напруги (коефіцієнт несинусоїдальності $k_{HC} \approx 7 \div 10\%$) і домінуванні 5-13-ї гармонік струму додаткові похибки вимірювання енергії, спожитої навантаженням, можуть досягати 3 – 4%. Найбільшою мірою вплив несинусоїдальності на похибки індуктивних лічильників проявляється на частотах 11-ї і 13-ї гармонік.

Максимальна похибка вимірювання амплітуди несинусоїдальної напруги Δa залежно від рівня вищих гармонік знаходиться в межах

$$\sum_{v=2}^n U_v^* \geq \Delta a \geq -\sum_{v=2}^n U_v^* \quad \text{при} \quad \sum_{v=2}^n U_v^* v^2 < 1, \quad (10)$$

де U_v^* – відносний (у долях номінального) рівень вищих гармонік напруги;
 n – номер останньої з врахованих гармонік.

Якщо $\sum_{v=2}^n U_v^* v^2 > 1$, то максимальна похибка

$$\Delta_a \leq \sum_{v=2}^n U_v^* v^2. \quad (11)$$

При цьому похибка оцінюється так:

$$\Delta_a = \frac{U_m - U_{m1}}{U_{m1}},$$

де U_m – максимальне значення амплітуди несинусоїдної напруги;

U_{m1} – амплітуда 1-ї гармоніки напруги.

При вимірюванні середнього за півперіод значення напруги максимальна похибка знаходиться в межах

$$-\sum_{v=3}^{2R+1} \frac{U_v^*}{v} \leq \Delta a_{cp} \leq \sum_{v=3}^{2R+1} \frac{U_v^*}{v}, \quad (12)$$

де $\Delta a_{cp} = \frac{U_{cp} - U_{cp1}}{U_{cp1}}$ – похибка вимірювання;

U_{cp} і U_{cp1} – відповідно середнє за півперіод значення несинусоїдальної напруги і напруги 1-ї гармоніки.

Одним із варіантів вирішення проблеми неточного обліку електроенергії при несинусоїдальних режимах ліній електропостачання освітлювальних мереж міст пропонується встановлення електронних коректорів потужності [7]. Це, зокрема, дозволить зменшити сумарну похибку вимірювання та покращити точність обліку електроенергії лічильниками за рахунок прийнятих у цих апаратах схемотехнічних заходах.

На даний час більшість установок освітлювальної мережі міст укомплектовані пристроями без електронної корекції вольт-амперної характеристики (коректора потужності), тобто є комплексним навантаженням з індуктивним характером і мають спеціальний компенсуючий конденсатор реактивної потужності. Проте компенсуючий конденсатор в будь-який момент може створити резонансний контур з індуктивністю мережі при підвищеному рівні гармонік з боку інших споживачів, а це, в свою чергу, призводить до зниження ресурсу роботи освітлювальної установки. Типове значення коефіцієнта потужності $\cos \varphi = 0,85$.

У сучасних електронних пристроях для освітлювальних установок застосовується активний коректор коефіцієнта потужності. За рахунок високого коефіцієнта потужності (не менше 0,99) такі пристрої знижують споживання реактивної потужності майже в 10 разів, рівень третьої гармоніки не менше, ніж у 5 разів, пусковий струм повністю відсутній.

Використання електронних коректорів потужності позитивно впливає і на термін служби ламп. Це зумовлено відсутністю імпульсів перезапалювання, неможливістю виникнення випрямного, неможливістю перевантаження лампи при підвищеній напрузі мережі живлення. Електронних коректорів стабілізує потужність лампи, навантажуючи лампу до її номінальної потужності. Тобто незалежно від стану лампи (старіння, знос,

дефекти), природно в межах регульовальної характеристики, потужність у лампі завжди буде підтримуватися на номінальному рівні.

Приклад порівняння споживання електроенергії установкою при роботі без електронної корекції вольт-амперної характеристики (коректора потужності) і з електронним коректором потужності наведений векторною діаграмою на рисунку 1.

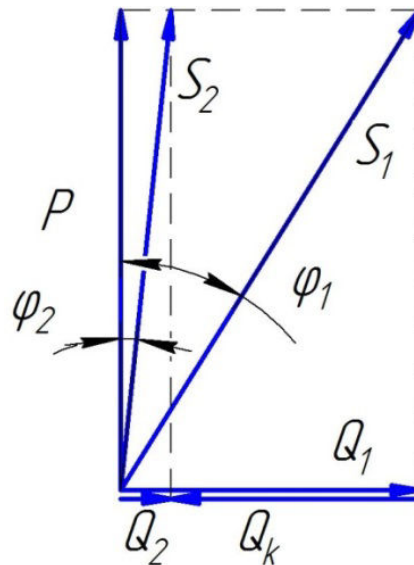


Рисунок 1. Споживання енергії установкою, яка отримує однакову активну потужність при різних коефіцієнтах потужності $\cos \phi_1$ і $\cos \phi_2$: S_1 – споживання енергії установкою при роботі без електронної корекції вольт-амперної характеристики (коректора потужності), $\cos \phi_1 = 0,85$; S_2 – споживання енергії установкою з електронним коректором потужності, $\cos \phi_2 = 0,99$

Figure 1. Energy consumption by the installation receiving similar active power under different power factor $\cos \phi_1$ and $\cos \phi_2$: S_1 – consumption of energy by the installation operating without electronic correction of current-voltage characteristics (power corrector), $\cos \phi_1 = 0,85$; S_2 – consumption of energy by the installation with an electronic corrector power ($\cos \phi_2 = 0,99$)

Бачимо, що споживач S_1 навантажує мережу більшою реактивною потужністю Q , ніж споживач S_2 , який працює з кращим коефіцієнтом потужності. Відповідно, перший споживач витрачає від 5 до 15% грошових коштів більше при оплаті за фактично спожиту електроенергію.

Висновки. Визначено межі максимальної сумарної похибки вимірювання амплітуди несинусоїдної напруги залежно від рівня вищих гармонік. Встановлено, що найбільшою мірою вплив несинусоїдальності на похибки індукційних лічильників проявляється на частотах 11-ї і 13-ї гармонік, які часто виникають у системі електропостачання міста, внаслідок нелінійних характеристик освітлювальних пристроїв. Встановлення сучасних електронних апаратів, в яких прийняті схемотехнічні рішення по лінеаризації вхідної вольт-амперної характеристики, суттєво зменшує сумарну похибку обліку та дозволяє зекономити кошти бюджету міста.

Conclusions. The limits of the maximum error of the non-sinusoidal voltage amplitude measurement depending on the level of higher harmonics have been found. It was determined that the greatest non-sinusoid effect on the induction counters error is that of the 11th and 13th harmonic frequencies, which often occur in the municipal power supply lines networks as the result of non-linear characteristics of the lighting devices. It is proposed to install in the municipal lighting systems modern electronic corrector power, in which the scheme-engineering solution in the linearity of the input volt-ampere characteristic are

applied, and which decrease greatly the total calculation error and make possible to save funds.

Список використаної літератури

1. Шидловський, А.К. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения [Текст] / А.К. Шидловський, В.Г. Кузнецов, В.Г. Николаенко. – Киев: Наукова думка, 1987. – 176 с.
2. Аррилага, Д. Гармоники в электрических сетях [Текст] / Д. Аррилага, Д. Бредли, П. Боутер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
3. Облік енергії з урахуванням вищих гармонік / В.М. Ковальов, Д.О. Білоха // ААЭКС. – 2006. – №1. – С. 17. – Режим доступу: <http://aaecs.org/kovalov-vm-bloha-do-oblk-energ-z-urahuvannyam-vishih-garmonk.html>.
4. Анализ влияния низкого качества электрической энергии на технические показатели осветительных систем / А.В. Сапрыка // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2008. – №18. – Режим доступу: http://archive.nbu.gov.ua/portal/Natural/VPDTU/2008_18_2/C2/24.pdf.
5. Вплив несиметрії режиму на роботу освітлювальних установок зовнішнього освітлення та шляхи зменшення втрат активної потужності від протікання струмів несиметрії / Б.І. Мокін, В.А. Барчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №2. – Режим доступу: [http://dev.visnyk.vntu.edu.ua/2012/2/pdf/12mbioac.pdf_\(26.04.2012\)](http://dev.visnyk.vntu.edu.ua/2012/2/pdf/12mbioac.pdf_(26.04.2012)).
6. Киселев, В.В. Влияние несинусоидальности напряжения и тока на показания электронных счетчиков электроэнергии [Текст] / В.В. Киселев, И.С. Пономаренко // Промышленная энергетика. – 2004. – №2.
7. Еськин, Д. Контроллеры корректоров коэффициента мощности L656X / Д. Еськин // Новости электроники. – 2009. – №3. – Режим доступу: http://www.compeljournal.ru/images/articles/2009_3_6.pdf

Отримано 25.04.2013