

УДК 621.331

Д. О. БОСИЙ, канд. техн. наук

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка

В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ У НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМАХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

В статті розглядається питання виникнення похибок електронних лічильників унаслідок спотворення синусоїдності напруги і струму на тягових підстанціях електричного транспорту. Приведено результати досліджень одного типу лічильника в лабораторних умовах для широкого діапазону зміни коефіцієнта спотворення синусоїдності струму. Отримано критичне значення коефіцієнта спотворення, при якому лічильник виходить за межі, які регламентовані класом точності.

Ключевые слова: тяговая подстанция, искажения гармонические, счетчик электронный, погрешность, класс точности.

В статті розглядається питання виникнення похибок електронних лічильників унаслідок спотворення синусоїдності напруги і струму на тягових підстанціях електричного транспорту. Приведено результати досліджень одного типу лічильника в лабораторних умовах для широкого діапазону зміни коефіцієнта спотворення синусоїдності струму. Отримано критичне значення коефіцієнта спотворення, при якому лічильник виходить за межі, які регламентовані класом точності.

Ключові слова: тягова підстанція, спотворення гармонійні, лічильник електронний, похибка, клас точності.

Вступ

Тягові підстанції електрифікованих залізниць є досить специфічними навантаженнями у загальній енергетиці країни. Знаходячись на 4-му місці загального електроенергетичного балансу України після промисловості, населення, та комунально-побутових споживачів, тягові підстанції електрифікованого транспорту виконують переробку майже 6 % електричної енергії. Автоматизована система комерційного обліку електроенергії практично повністю впроваджена на тягових підстанціях залізничного транспорту. Як невід'ємна складова роботи залізниць в оптовому ринку електроенергії, система передбачає роботу електронних лічильників та обмін даними зі встановленими інтервалами між ними та пристроями збору даних. Вимірювальні трансформатори струму, напруги та безпосередньо прилади обліку мають відповідні похибки, за максимальними значеннями яких, встановлюються класи точності. Зазвичай, класи точності вказаних засобів вимірювальної техніки визначені для симетричних та синусоїдних режимів напруги і струму. Попри це, виробники передбачають роботи вимірювальних приладів у несинусоїдних та несиметричних режимах.

В реальних умовах на тягових підстанціях залізничного транспорту вимірювальні прилади працюють у несиметричних та несинусоїдних режимах, що в свою чергу викликає нерівномірність завантаження фаз та наявність гармонійних спотворень від потужних напівпровідникових перетворювачів.

Несиметрія напруги значного впливу на похибки електронних лічильників, як правило, не впливає, оскільки застосовується двох елементна схема включення Арона. Ця схема базується на методі двох ватметрів, сума значень яких визначає повну потужність трифазної системи, вимірюючи дві лінійні напруги та два струми. Істотно на похибку електронних лічильників впливають гармонійні спотворення форми напруги, а значною мірою – спотворення струму, оскільки значення останнього на порядок вищі спотворення напруги.

Досвід експлуатації тягових підстанцій показує, що покази основних комерційних приладів обліку та додаткових, які враховують потужність спотворення не співпадають. Добовий небаланс може сягати величин 30 % за перетіканням реактивної потужності.

Опубліковані результати досліджень різних авторів показують, що при виборі типу комерційних приладів обліку для нелінійних навантажень, зокрема для тягових підстанцій постійного та змінного струму, необхідно звертати увагу на результати випробувань при заниженій якості електричної енергії. При цьому не тільки похибки приладів можуть досягати 10-20 %, а прилади можуть виходити з ладу.

Метою даної роботи є визначення похибки електронного лічильника розповсюдженого типу для несинусоїдного струму в лабораторних умовах, перевірка відповідності класу точності та розробка рекомендацій щодо застосування лічильників в несинусоїдних режимах роботи. Тип обраного лічильника свідомо не вказується для попередження можливих претензій з боку виробників.

Постановка проблеми в загальному виді

Відомі дослідження електронних приладів обліку [1–3], які проведені фахівцями, показують цікаві тенденції в поведінці однотипних приладів та різноманітні реакції в одних і тих же режимах роботи. Так, похибка приладів обліку з класом точності 0,5 в залежності від коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої струму при наявності непарних гармонійних складових кратних трьом, може перевищувати 8 %. Досить цікавим виявляється факт, що при несиметричній нарузі та при наявності парних гармонійних складових в залежності від коефіцієнта потужності, похибка приймає як від'ємні так і додатні значення від -10 % до + 5 %.

На приєднаннях фідерів та вводах трансформаторів тягових підстанцій змінного струму зі сторони контактної мережі 27,5 кВ форма напруги і струму спотворюється первинними струмами електровозів випрямного типу. Тягова підстанція постійного струму містить в собі джерело спотворень у вигляді випрямного чи випрямно-інверторного трифазного перетворювача. Характерні осцилограми струму тягових підстанцій постійного і змінного приведені на рис. 1.

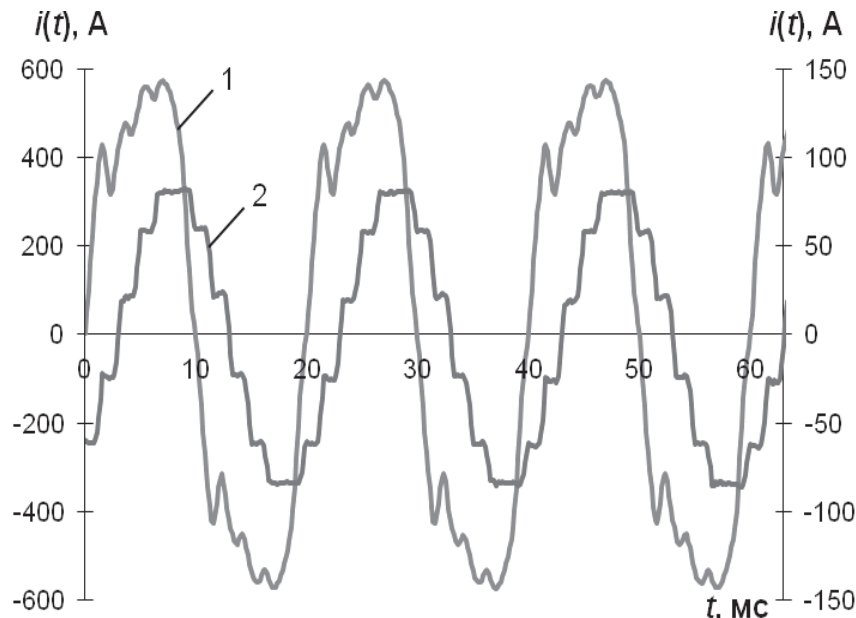


Рис. 1. Характерні осцилограми струмів тягових підстанцій:
1 – змінний струм; 2 – постійний струм

Гармонійні спотворення напруги та струму прийнято характеризувати коефіцієнтом сумарних гармонійних спотворень, який у відсотках визначає співвідношення діючого значення вищих гармонік до діючого значення на основній частоті

$$K_U = U_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N U_{(i)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100; \quad K_I = I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N I_{(i)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100.$$

На інтервалі спостереження значення коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги для приєднань тягових мереж зазвичай становить близько 5-8 %. На відміну від K_U коефіцієнт спотворення струму K_I змінюється в більш широких межах, при чому може приймати значень більше 100 %, які свідчать, що діюче значення вищих гармонік перевищує діюче значення струму основної частоти (рис. 2).

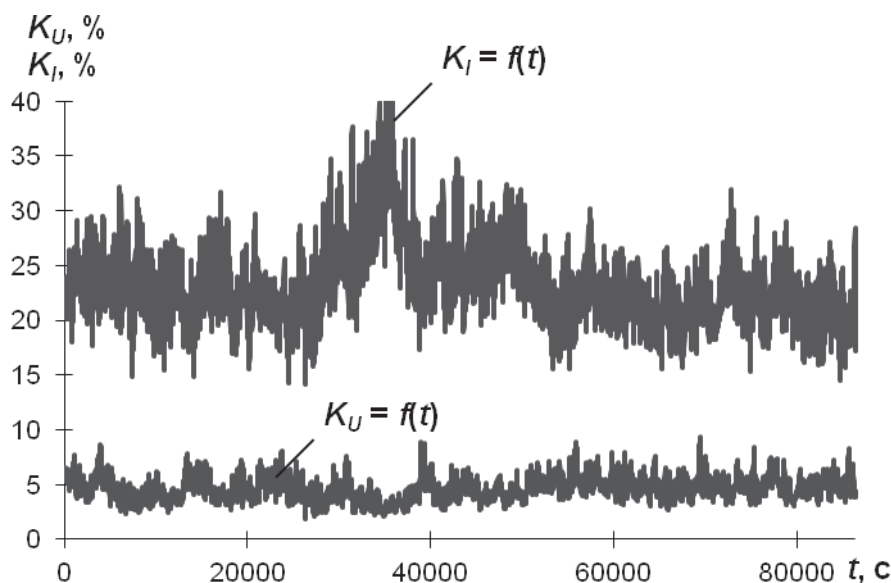


Рис. 2. Коефіцієнт спотворення синусоїдності струму

Принцип роботи електронних лічильників

Донедавна питання виміру електроенергії зводилося до застосування електромеханічних лічильників принцип роботи яких заснований на підрахунку оборотів металевого диска, що обертається в змінному магнітному полі яке створюється двома електромагнітами. Розвиток мікроелектроніки розпочав переворот в області створення промислових і побутових систем обліку, який, у першу чергу, пов'язаний з використанням систем керування на базі мікроконтролерів.

У цифрових системах обліку досяжний практично будь-який клас точності, при виборі відповідної елементної бази й алгоритмів обробки інформації. Відсутність механічних частин значно підвищує надійність. Обробка інформації в цифровому вигляді дозволяє одночасно підраховувати як активну, так і реактивну складові потужності з урахуванням їх напрямку, це є важливим, наприклад, при обліку енергії в трифазних мережах.

Сигнали надходять через відповідні трансформаторні датчики на входи мікросхеми-перетворювача. З її виходу знімається частотний сигнал, що надходить на вхід мікроконтролера. Мікроконтролер складає кількість імпульсів, перетворюючи сигнал для одержання кількості енергії у Вт-год. По мірі накопичення кожної одиниці, значення накопиченої енергії виводиться на монітор і записується до flash-пам'яті. Якщо виникає збій, зникнення напруги мережі, інформація про накопичену енергію зберігається в пам'яті. Після відновлення напруги ця інформація зчитується мікроконтролером та виводиться на індикатор, розрахунок продовжується з цієї величини.

Розрахунки енергії, споживаної за певний проміжок часу будь-яким навантаженням, вимагає інтегрування поточних значень потужностей протягом усього часу виміру. В електромеханічних лічильниках електроенергії це здійснювалось механічним лічильником. У

цифрових – необхідно реалізувати постійне підсумовування обчисленої величини потужності за певні проміжки часу.

Експериментальні вимірювання

Для оцінки похибок електронних лічильників в умовах лабораторії використано наступну схему підключення.

Схема для вимірювання лічильниками спожитої електроенергії в лабораторних умовах приведена на рис. 3, яка складається з 2 частин:

1) перша частина призначена для живлення обмоток напруги лічильників з використанням ЛАТРа, до вторинної обмотки якого підключаються відповідні обмотки кожного лічильника;

2) друга частина являє собою фізичний макет плавного регулювання компенсації реактивної потужності і складається з:

– батареї конденсаторів увімкнених послідовно з реактором, утворюючи *LC*-фільтр налаштований на 3 гармоніку (компенсуючий контур);

– послідовно з'єднаних реактора та зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів (декомпенсуючий контур);

– підключеного індуктивного навантаження, у якості якого використовується малопотужний двигун увімкнений через підвищуючий трансформатор.

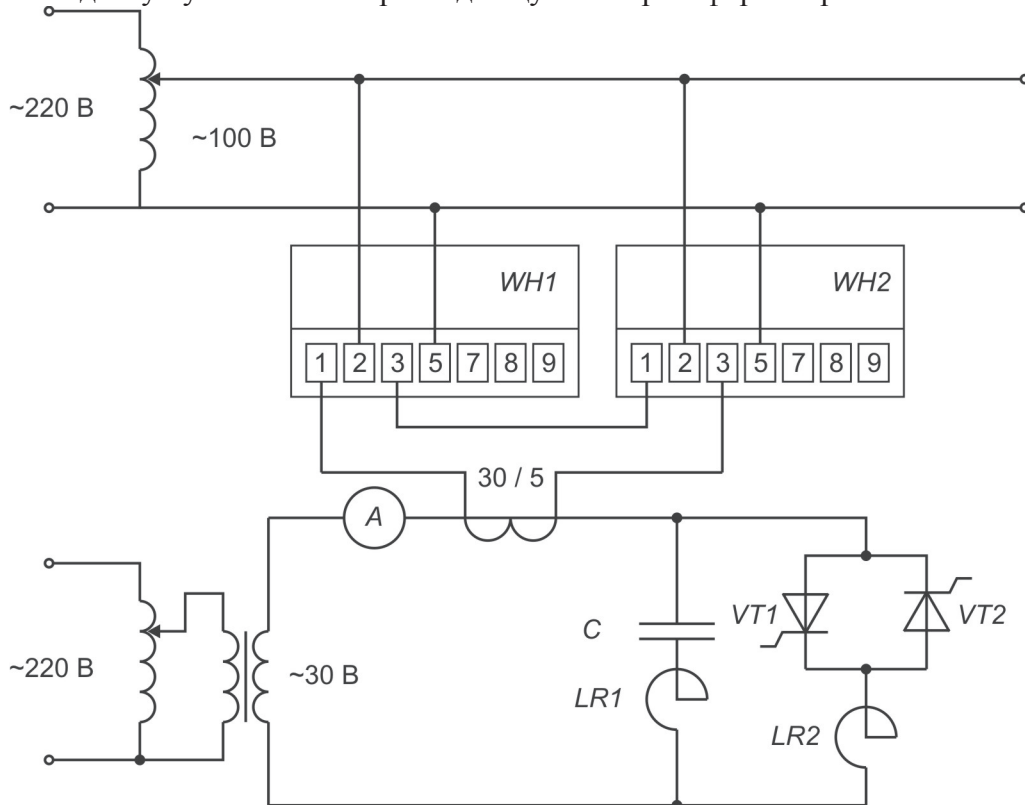


Рис. 3 Схема підключення приладів обліку та навантаження

Лічильник у першій частині схеми було обрано у відповідності з класом точності 1,0. Прилад обліку підключений на номінальну напругу 100 В. Для досягнення поставленої задачі у якості еталонного приладу застосований аналізатор якості електричної енергії EDL-175 виробництва Satcs з класом точності 0,2.

Еталонний прилад має 2 режими вимірювання реактивної потужності:

1) за миттєвими значеннями струму та напруги розраховується активна та повна потужності, а реактивна потужність є їх функцією, $Q = f(S, P)$;

2) за діючими значеннями струму та напруги, а також за кутом між ними розраховуються активна та реактивна потужності, а повна потужність є їх функцією $S = f(P, Q)$.

Результати вимірювань

Вимірювання проводились одночасно і лічильником, і еталонним приладом, налаштовуючи спочатку на один, а потім на другий режим вимірювання потужності. Знімання показів приладів відбувалось з кожною зміною характеру навантаження. Реєструвались такі показники: активна та реактивна потужності, струм навантаження, коефіцієнт спотворення форми струму, осцилограми струму і напруги.

За характером електричне навантаження може бути:

- активне – активний електричний опір (напр., лампи, нагрівальні прилади);
- ємнісне – навантаження кола змінного струму, при якому вплив ємності переважає вплив індуктивності, а струм при цьому за фазою випереджає напругу;
- індуктивне – навантаження кола змінного струму, при якому вплив індуктивності переважає вплив ємності, а струм при цьому за фазою відстає від напруги.

У даному експерименті використано такі режими навантажень:

- 1) режим, при якому відсутня реактивна потужність 1-ї гармоніки, $\varphi_1=0$.
- 2) застосування плавного регулювання компенсації реактивної потужності за допомогою тиристорного регулятора;
- 3) режим надлишкової компенсації, за якого $Q_E > Q_i$,
де Q_E – потужність компенсації;
 Q_i – реактивна потужність навантаження.

Результати експериментальних вимірювань похибок лічильника зведені до табл. 1.

Таблиця 1

Дослідний лічильник		Еталонний прилад				
P, Вт	Q, вар	I _{THD} , %	I, А	P, Вт	Q, вар	
					1	2
184	-382	2,2	4,35	181	-393	-390
178	-351	5,2	4,06	179	-361	-371
172	-316	10,6	3,7	174	-320	-336
170	-283	14,8	3,47	168	-290	-288
170	-236	20,6	3,09	169	-243	-251
174	-171	31,1	2,68	172	-176	-185
180	-123	37,5	2,47	178	-126	-160
225	-10	53,1	2,63	224	-13	-113
233	9	52,3	2,7	230	8	-106
305	148	40,5	3,72	304	146	216
395	262	30,2	5,07	393	268	297

Примітка: 1 – $Q = f(S, P)$; 2 – $S = f(P, Q)$.

На рис. 4–6 представлені осцилограми струмів і напруги в окремих режимах навантаження.

Залежність похибки електронного лічильника від коефіцієнта спотворення струму, яка приведена на рис. 7, відображає, що при значеннях I_{THD} більше 25 %, дослідний лічильник виходить за клас точності.

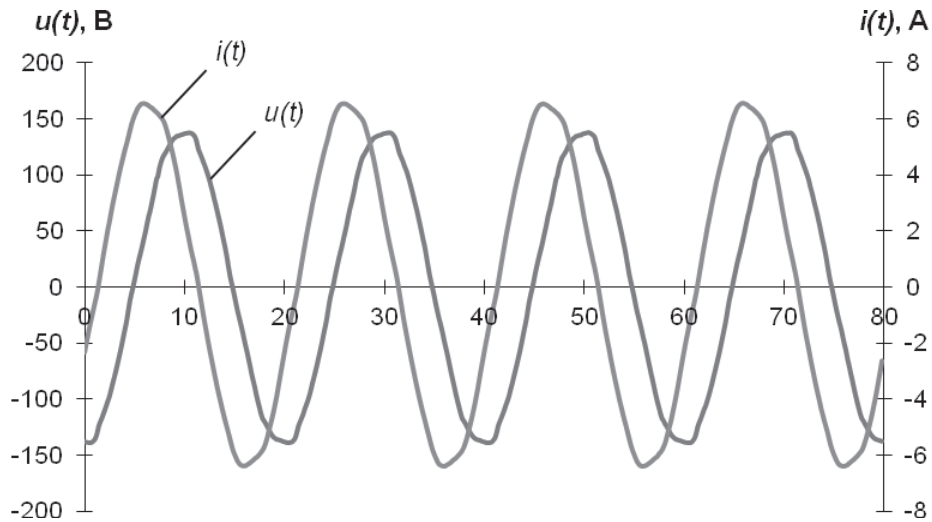


Рис. 4. Осцилограми напруги і струму в режимі перекомпенсації реактивної потужності при відсутності регулювання ($I = 4,35$ А, $\varphi_1 = -64,2^\circ$, $I_{\text{THD}} = 2,2$ %)

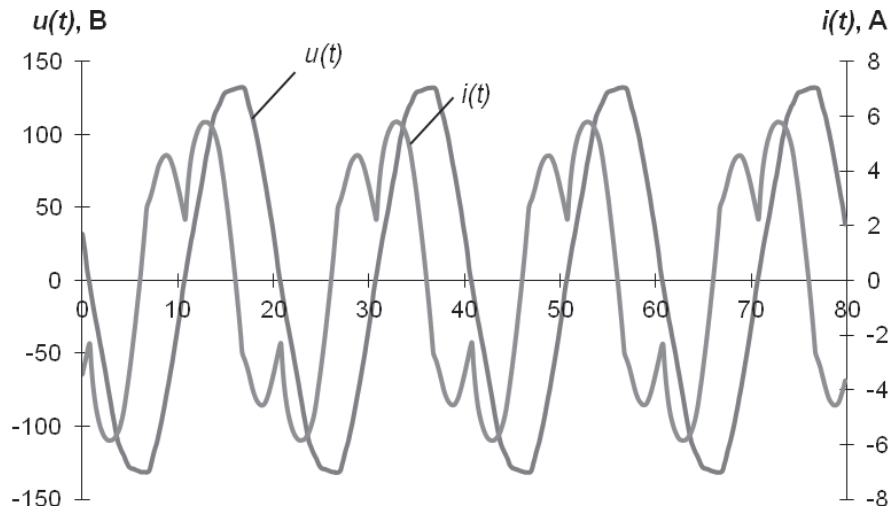


Рис. 5. Осцилограма напруги і струму при початку регулювання струму декомпенсації ($I = 5,07$ А, $\varphi \square \square = -34,3^\circ$, $I_{\text{THD}} = 30,2$ %)

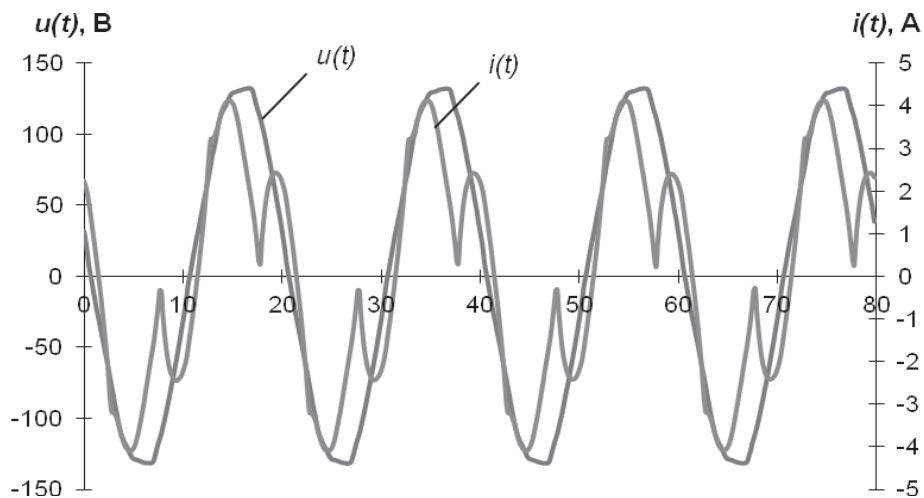


Рис. 6. Осцилограма напруги та струму у режимі, при якому відсутня реактивна потужність 1-ї гармоніки ($I = 4,35$ А, $\varphi \square \square = 0^\circ$, $I_{\text{THD}} = 52,3$ %)

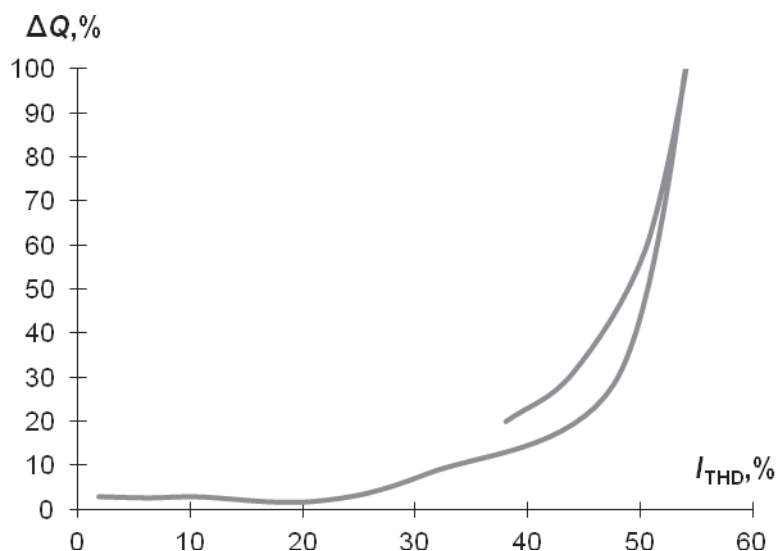


Рис. 7. Похибка електронного лічильника в залежності від коефіцієнта спотворення струму

Зіставляючи результати вимірювань реактивної потужності для двох приладів та двох режимів роботи еталонного приладу, отримана залежність, яка приведена на рис. 8.

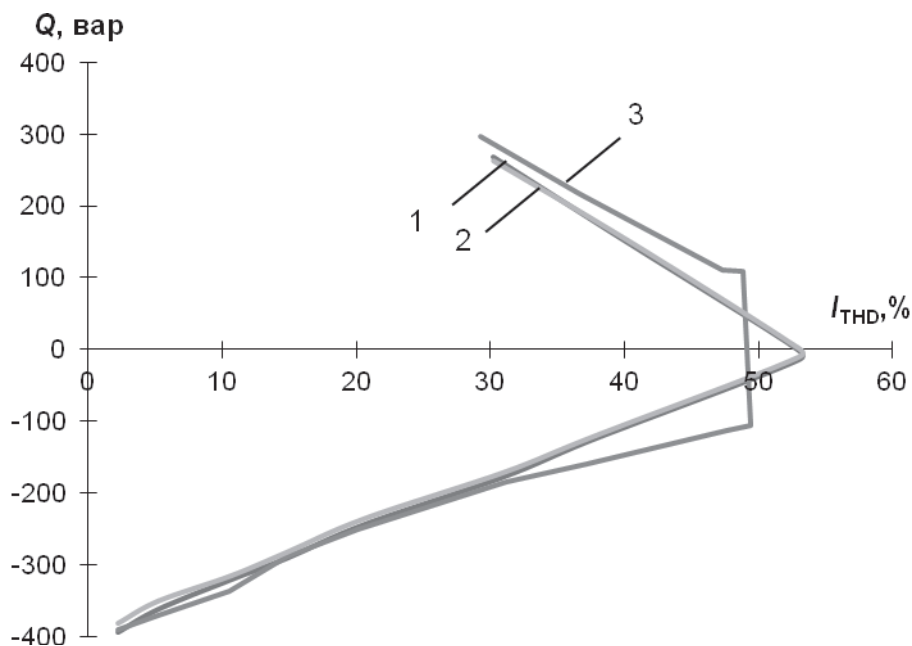


Рис. 8. Реактивні потужності в залежності від коефіцієнта спотворення струму:

- 1 – реактивна потужність 1-ї гармоніки за лічильником;
- 2 – реактивна потужність 1-ї гармоніки за еталонним приладом;
- 3 – реактивна потужність Фрізе за еталонним приладом

Приведена залежність показує, що для малих значень коефіцієнта спотворення струму реактивні потужності для двох методів розрахунку практично не відрізняються. При збільшенні спотворень струму збільшується різниця між цими величинами. Особливим є те, що за наявності спотворень реактивна потужність за концепцією Фрізе змінює знак при зміні характеру навантаження, при цьому не дорівнює нулю.

Отримані результати свідчать про те, що при вимірюванні активної потужності (за умов, що не відповідають повірочним аспектам: нелінійне навантаження, підвищений рівень

несинусоїдності напруги) основна відносна похибка відповідає допустимим класу точності значенням, а при вимірюванні реактивної потужності (за тих самих умов) основна відносна похибка відповідає допустимим класу точності значенням лише для реактивної потужності першої гармоніки та при коефіцієнті спотворення форми струму не більше за 25 %, а для інших значень – не відповідає.

Таким чином, аналізуючи отримані результати, можна рекомендувати застосування даного типу лічильника в межах класу точності при спотворенні струму непарними гармоніками з сумарним коефіцієнтом спотворення до 25 %. При збільшенні коефіцієнту спотворення до 50 % похибка сягає майже 100 % і застосування такого типу лічильника в даних умовах не рекомендується.

Висновки

Приведені результати досліджень показують, що при виборі типу комерційних приладів обліку для нелінійних навантажень, зокрема для тягових підстанцій постійного та змінного струму, необхідно звертати увагу на результати випробувань при заниженій якості електричної енергії.

Цифрові системи обліку можна побудувати для будь-якого класу точності при відповідному виборі елементної бази та алгоритмів обробки інформації.

В електричних колах з синусоїдними електричними величинами існують чітке поняття і єдина формула знаходження реактивної потужності. У колах з несинусоїдними величинами, до яких відносяться тягові електричні кола, питання реактивної потужності є дискусійним і неоднозначним.

Електронні прилади обліку електричної енергії можуть мати декілька алгоритмів визначення реактивної потужності, які базуються на відомих теоретичних підходах до визначення неактивних складових повної потужності.

За результатами вимірювань встановлено, що при вимірюванні активної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням, а при вимірюванні реактивної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням лише для реактивної потужності першої гармоніки та при коефіцієнті спотворення форми струму не більше за 25 %.

Перелік літератури

1. Siczenko W. G. Badanie liczników różnych typów pod niezerównoważonym obciążeniu / W. G. Siczenko, O. P. Koszmac // Infrastruktura transportu. – 2013. – № 1. – P. 46–48.
2. Тубинис В. В. Европа принимает общие технические требования к приборам учета топливных энергетических ресурсов / В. В. Тубинис, О. В. Балашов // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2005. – № 1. – С. 47–51.
3. Гуртовцев А. Электронные счетчики. Доверяют или проверяют? / А. Гуртовцев, В. Бордаев, В. Чижонков // Электронный журнал «Новости Электротехники». – 2005. – № 1(31), 2(32).
4. Соколов В. С. Работа электросчетчиков в условиях пониженного качества электроэнергии / В. С. Соколов, А. А. Созыкин, Р. В. Коровкин // Электронный журнал «Новое в Российской электроэнергетике». – 2005. – № 5 (35).
5. Арриллага Дж. Гармоники в электрических схемах: Пер. с англ./Дж. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
6. Тонкаль В. Е. Баланс энергий в электрических цепях / В. Е. Тонкаль, В. А. Новосельцев, С. П. Денисюк. – К.: Наук. Думка, 1992. – 312 с.
7. ДСТУ 2708:2006 «Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення».
8. ГОСТ 8.584-2004 «Счетчики статистические активной электрической энергии переменного тока. Методика поверки».
9. ГОСТ 30207-94 «Статистические счетчики Ватт-часов активной энергии переменного тока (классы точности 1 и 2)».

10. ГОСТ 26104-89 «Средства измерений электронные. Технические требования в части безопасности. Методы испытаний».

OPERATIONAL FEATURES OF ELECTRONIC METERS UNDER NON-SINUSOIDAL MODES OF TRACTION SUBSTATIONS OF ELECTRIC TRANSPORT

D. O. BOSIY, Candidate of Engineering

The paper deals with the issues of occurrence of errors of electronic meters as a result of distortion in traction substations of electric transport. It presents results of studies of one type of meter in laboratory conditions for a wide range of distortion factor variation. It determines the critical value of the distortion factor under which the meter goes beyond the limits prescribed by its accuracy class.

Key words: *traction substation, harmonic distortions, electronic meter, error, accuracy class.*

Поступила в редакцию 27.06 2013 г.
