

## ПРОБЛЕМИ РОЗРАХУНКУ ТА КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖАХ З НЕСИНУСОЇДНИМ (НЕЛІНІЙНИМ) НАВАНТАЖЕННЯМ

**О.В.Соломчак**, канд.техн.наук, **І.В.Гладь** канд.техн.наук,  
Івано–Франківський Національний технічний університет нафти і газу

Напівпровідникові пристрої і перетворювачі, випрямлячі, тиристорні регулятори частоти, динамічне навантаження, вентильні електротехнологічні установки спричиняють спотворення кривих струмів і напруг у системах електропостачання.

Значне зростання електроприймачів з нелінійним навантаженням, які генерують вищі гармоніки, ускладнює процес розрахунку реактивної потужності та вибору компенсуючих пристроїв.

Питанню систематизації підходів до ідентифікації та розрахунку реактивної потужності при несинусоїдності струмів присвячено ряд досліджень [1-3]. Проте так і не вироблено єдиної методології, особливо з точки зору практичної реалізації.

**Метою роботи є** експериментальні дослідження кривих струму і напруги нелінійних електроприймачів та комплексного вузла з часткою нелінійного навантаження, аналіз та вироблення практичних підходів до розрахунку реактивної потужності та визначення компенсуючих пристроїв з точки зору особливостей обліку реактивної електроенергії та практичного застосування.

**Об'єктом дослідження** визначено електричні мережі підприємств та організацій з нелінійним навантаженням.

### **Засоби та методи досліджень**

З метою отримання достовірної інформації та аналізу природи реактивної потужності використовувався комп'ютерний інформаційно-вимірювальний комплекс, який дозволив зняти графіки миттєвих струмів та напруг у трифазній мережі 0,38 кВ.

### **Основні теоретичні положення**

У колах змінного синусоїдного струму повну потужність прийнято записувати як:

$$S = P + jQ \quad , \text{ВА}, \quad (1)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad , \text{ВА}, \quad (2)$$

де  $P = UI \cos \varphi$  - активна потужність, Вт;  $Q = UI \sin \varphi$  - реактивна потужність, Вар.

Фактично потужність в колі періодичного струму характеризують середнім значенням потужності за період, яке називають активною потужністю:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \quad ; \quad (3)$$

Проте в колах несинусоїдного струму навіть при чисто активному навантаженні співвідношення (1) та (2) не виконуються. У таких колах  $S \neq P$  навіть при  $\cos \varphi = 1$ .

Виникає певна потужність  $T$ , яка поєднана співвідношенням

$$S^2 = P^2 + T^2 \quad . \quad (4)$$

Враховуючи, що  $S = UI$  можна визначити  $T$ :

$$T = \sqrt{(UI)^2 - P^2} \quad . \quad (5)$$

Останніми роками у наукових виданнях ведеться дискусія, щодо ідентифікації цієї потужності та її відмінності від загальноприйнятого поняття реактивної потужності. У [3], на думку автора, подано найбільш зрозуміле і прийнятне для практичних розрахунків визначення реактивної потужності та математичні співвідношення. У колах з активними, індуктивними та нелінійними електроприймачами запропоновано наступні визначення та співвідношення:

$$S^2 = P^2 + D^2 = P^2 + Q^2 + T^2 \quad , \quad (6)$$

де  $P = UI_1 \cos \varphi_1$  - активна потужність; (7)

$Q = UI_1 \sin \varphi_1$  - реактивна потужність **зсуву**; (8)

$T = U \sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}$  - реактивна потужність **спотворення**; (9)

$D = \sqrt{Q^2 + T^2}$  - реактивна потужність; (10)

$I_i$  - струм  $i$ -ї гармоніки.

При цьому припускається, що напруга живлення є синусоїдною.

Величину реактивної потужності  $D$  можна визначити з (6) :

$$D = \sqrt{(UI)^2 + P^2} \quad . \quad (11)$$

Але саме це співвідношення (11) покладено в основу алгоритму обчислення реактивної потужності електронними лічильниками. Отже при чисто активному навантаженні, але несинусоїдному струмі, який спричиняють нелінійні навантаження, електронні лічильники електроенергії фіксуватимуть споживання реактивної електроенергії. Враховуючи нарахування плати енергопостачальною організацією за споживання реактивної електроенергії, у працівників енергослужб підприємств виникає логічне рішення скомпенсувати дану реактивну потужність конденсаторними установками чи іншими компенсуючими пристроями. Проте поява реактивної потужності зсуву конденсаторних батарей, згідно з (6), призведе до ще більшого споживання реактивної електроенергії.

Наявність несинусоїдних електроприймачів може привести також до хибної роботи автоматичних конденсаторних установок з регуляторами коефіцієнта потужності, в алгоритм роботи яких закладено вираз (11).

Очевидно, що неправильним буде розрахунок коефіцієнта потужності за виразом

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad . \quad (12)$$

З урахуванням (7-11) правильним є вираз

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI_1} \quad . \quad (13)$$

Для характеристики частки *реактивної потужності зсуву* більш коректним є використання коефіцієнта реактивної потужності

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} \quad . \quad (14)$$

### Експериментальні дослідження

З метою визначення фактичного характеру навантаження та наочного підтвердження вищезазначених теоретичних виразів було проведено експериментальні дослідження для ряду нелінійних електроприймачів і комплексного вузла навантаження з індуктивними та несинусоїдними електроприймачами.

Миттєві значення напруги вимірювались за допомогою перетворювача напруги компенсаційного типу, марки CV3-1000 виробництва LEM класу точності 0,2 , а миттєві значення струму – за допомогою струмовимірювальних кліщів-адаптера марки АТА-2502 виробництва АКТАКОМ класу точності 2. Введення вторинних сигналів в ЕОМ здійснювалось 14-розрядним АЦП марки NI USB-6009 виробництва National Instruments класу точності 0,5. Дискретність зняття показів становила 100 значень за 1 період (5кГц).

## Аналіз форми напруги

На рис.1 подано осцилограму напруги та першої гармоніки, отриманої при розкладанні в ряд Фур'є.

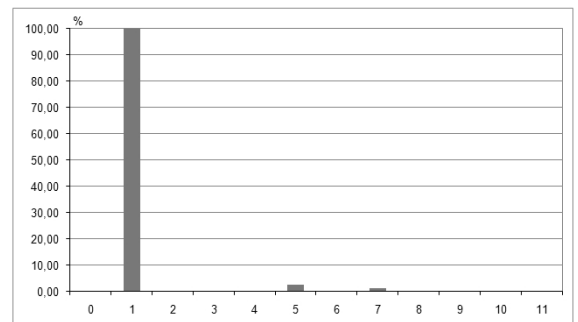
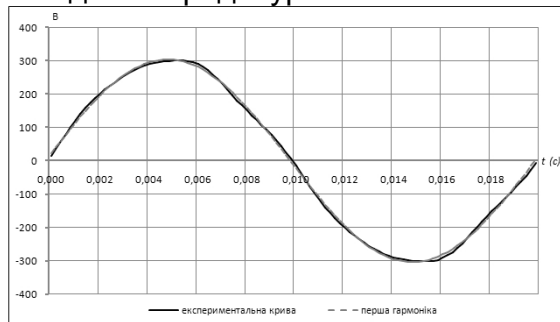


Рис. 1. Осцилограма напруги та перша гармоніка Рис. 2. Спектральний склад (%) напруги мережі

Як видно із рисунка, реальна крива напруги є дещо спотвореною і відрізняється від ідеальної. На рис. 2 показано спектральний склад кривої напруги після розкладання в ряд Фур'є.

Діюче значення напруги, розраховане з експериментальної кривої становить 215,01 В, а першої гармоніки синусоїдної напруги - 214,93 В. Різниця не перевищує 0,041%, що значно менше похибки вимірювальних трансформаторів і приладів. Із спектрального складу видно, що вищі гармоніки є незначними. Отже відхиленням напруги від синусоїдної форми можна знехтувати при розрахунках потужностей.

## Аналіз струмів та потужностей

Для аналізу впливу форми кривої струму на розрахунок потужностей було вибрано ряд характерних електроприймачів.

### Реостат, ввімкнений послідовно з діодом

З погляду електротехніки це чисто активний елемент. Осцилограми струму і напруги у відносних одиницях (відносно діючих значень) при ввімкненні через діод показані на рис. 3. На рису. 4 показано експериментальну і першу гармоніку струму, а на рис. 5 – спектральний склад струму.

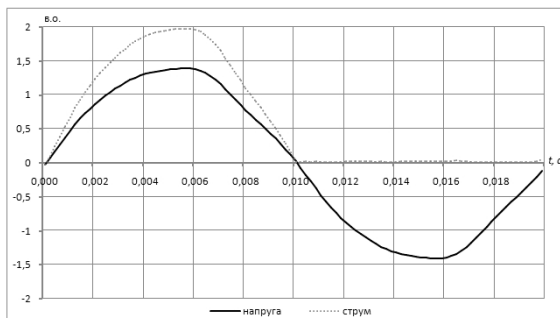


Рис. 3. Осцилограми експериментальних струму і напруги реостата з діодом

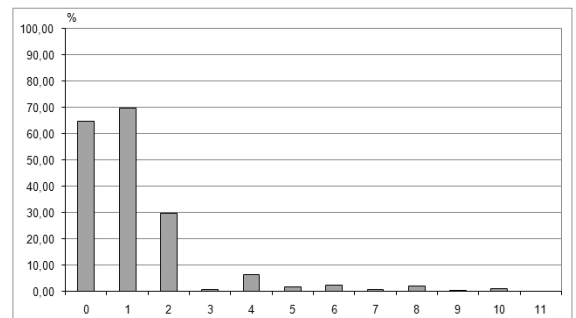


Рис. 5. Спектральний склад (%) струму реостата при ввімкненні через діод

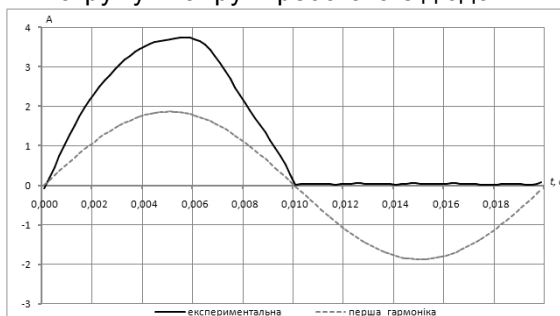


Рис. 4. Експериментальна крива і перша гармоніка струму

Таблиця 1. Діючі значення гармонік струму реостата з діодом

Гармоніка	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Струм, А	1,215	1,307	0,558	0,016	0,107	0,035	0,030	0,009	0,023	0,005	0,007	0,002
%	64,85	69,77	29,76	0,82	5,74	1,87	1,57	0,51	1,22	0,27	0,38	0,12

Діючі (середньоквадратичні) значення напруги - 215.9 В, струму - 1.874 А. При розрахунку повної потужності за виразом  $S = UI$  отримуємо 404.6 ВА, а активна потужність, обчислена за виразом (3) 280.6 Вт. Як бачимо в даному колі  $S \neq P$ , хоча, як видно з осцилограм, зсув фаз між струмом і напругою відсутній і  $\sin \varphi = 0$ . При класичному записі (1),(2)  $Q = UI \sin \varphi = 0$ . Даний приклад підтверджує, що для несинусоїдних кіл вирази (1),(2),(12) є некоректними.

За виразом (7)  $Q = UI_1 \sin \varphi_1 = 0$ .

Якщо скористатись виразом (9) то  $T = U \sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2} = 123.19$  ВАр. За виразом (6)

$S = 306.48$  ВА. Але це не відповідає величині, розрахованій вище, за виразом  $S = UI = 404.6$  ВА.

Як видно із рис. 4 дана схема має значну постійну складову струму. Якщо її врахувати при розрахунку

$$T = U \sqrt{I_0^2 + \sum_{i=2}^n I_i^2}, \quad (15)$$

то отримаємо  $T = 289.82$  ВАр, а згідно (6)  $S = 403.43$  ВА, що практично повністю співпадає з величиною 404.6 ВА.

Отже при розрахунку *реактивної потужності спотворення* необхідно враховувати вищі гармоніки струму і постійну складову.

### Комп'ютер

Даний прилад обладнано імпульсним блоком живлення з характерною кривою струму. Більшість блоків живлення не обладнано фільтрами імпульсних завад.

Осцилограми струму і напруги у відносних одиницях (відносно діючих значень) показані на рис. 6. На рис. 7 показано експериментальну криву і першу гармоніку струму, а на рис. 8 – спектральний склад струму.

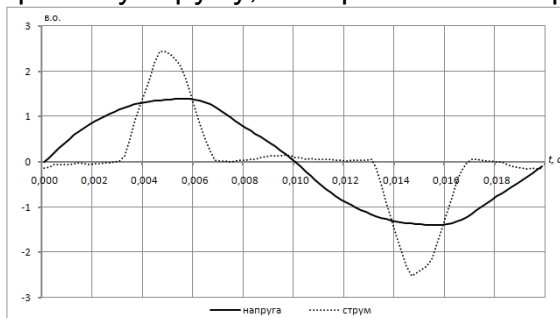


Рис. 6. Осцилограми експериментальних струму і напруги комп'ютера

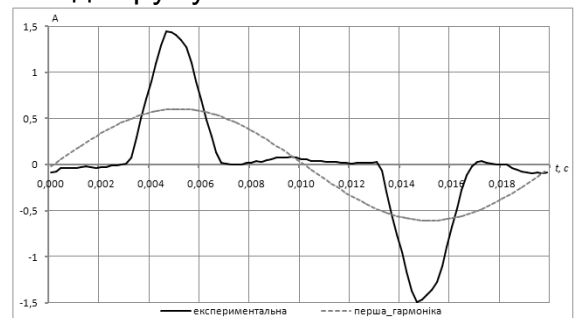


Рис. 7. Осцилограми струму комп'ютера

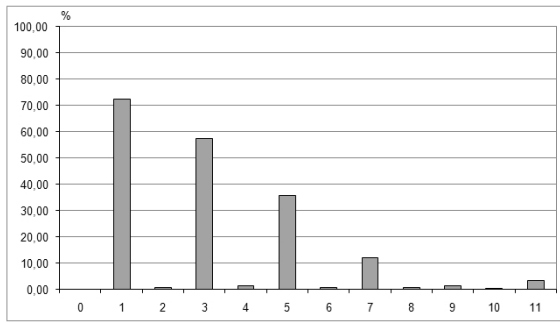


Рис. 8. Спектральний склад (%) струму комп'ютера

Таблиця 2. Діючі значення гармонік струму комп'ютера

Гармоніка	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Струм, А	0,000	0,429	0,005	0,339	0,008	0,211	0,004	0,071	0,004	0,008	0,003	0,019
%	0,00	72,51	0,87	57,34	1,45	35,80	0,56	12,11	0,75	1,36	0,53	3,26

Діючі (середньоквадратичні) значення напруги - 217,8 В, струму - 0,591 А. При розрахунку повної потужності за виразом  $S = UI$  отримуємо 128,7 ВА, а активна потужність, обчислена за виразом (3) 92,1 Вт. Як бачимо в даному колі також  $S \neq P$ , хоча, як видно з осцилограм, зсув фаз між першою гармонікою струму і напругою відсутній, а отже і реактивна потужність зсуву практично рівна нулю.

За виразом (7)  $Q = 0$ . За виразом (15)  $T = 88.42$  ВАр.

Якщо помилково *реактивну потужність спотворення* прийняти за реактивну потужність зсуву і для її компенсації використати конденсатор потужністю 88,42 ВАр, то за виразом (6) отримаємо:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2} = \sqrt{92.1^2 + (-88.42)^2 + 88.42^2} = 155.3 \quad \text{ВА.}$$

Як бачимо це призведе до ще більшого зростання повної потужності і струму.

### Активний опір з тиристорним регулятором напруги

Даний прилад обладнано тиристорним (симісторним) регулятором, який відкриває тиристири при певному куті.

Осцилограми струму і напруги у відносних одиницях показані на рис. 9. На рис. 10 показано експериментальну криву і першу гармоніку струму, а на рис. 11 – спектральний склад струму.

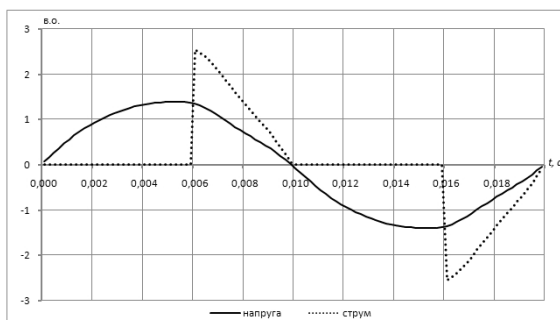


Рис. 9. Осцилограми експериментальних струму і напруги тиристорного регулятора

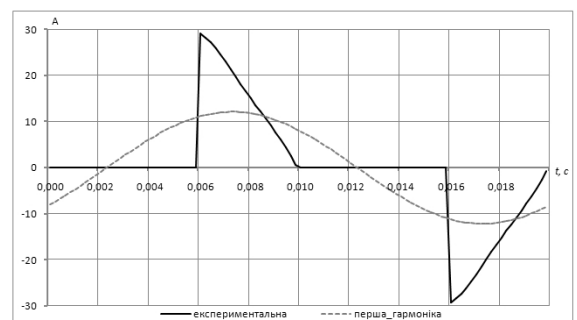


Рис. 10. Осцилограми струму тиристорного регулятора

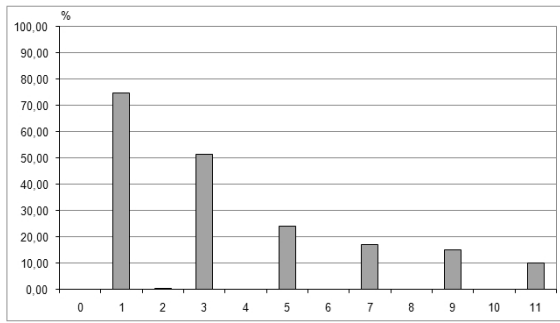


Рис. 11. Спектральний склад (%) струму тиристорного регулятора

Таблиця 3. Діючі значення гармонік струму тиристорного регулятора напруги

Гармоніка	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Струм, А	-0,029	8,579	0,029	5,905	0,006	2,758	0,013	1,947	0,014	1,733	0,006	1,143
%	-0,25	74,87	0,25	51,53	0,05	24,07	0,12	16,99	0,12	15,12	0,06	9,98

Діючі (середньоквадратичні) значення напруги - 215,0 В, струму - 11,46 А. При розрахунку повної потужності за виразом  $S=UI$  отримуємо 2463,62 ВА, а активна потужність, обрахована за виразом (3) 1312,86 Вт. Як бачимо в даному колі також  $S \neq P$ , хоча, на активному опорі реактивна потужність зсуву повинна бути рівною нулю.

Проте апроксимація рядом Фур'є кривої струму показує, що перша гармоніка зміщена відносно напруги на кут 44,8 град, що спричиняє появу реактивної потужності зсуву  $Q=1300$  ВАр. За виразом (15)  $T=1510$  ВАр.

Отже обрізання синусоїди струму тиристорами (симісторами) призводить до появи *реактивної потужності зсуву* навіть при чисто активному навантаженні.

### Адміністративно-навчальний корпус вищого навчального закладу

Даний споживач характеризується комплексним навантаженням, яке містить освітлювальні установки, комп'ютери, офісну техніку, нагрівальні прилади.

Осцилограми струму і напруги у відносних одиницях показані на рис. 12. На рис.13 показано експериментальну криву і першу гармоніку струму, а на рис.14 – спектральний склад струму.

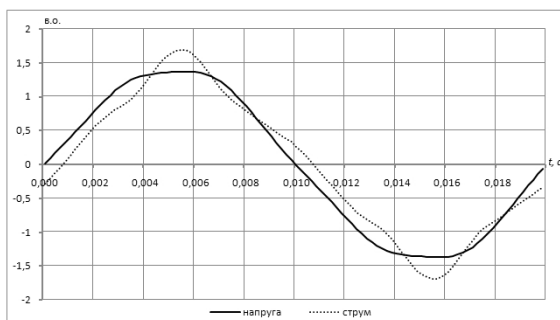


Рис. 12. Осцилограми експериментальних струму і напруги адміністративно-навчального корпусу

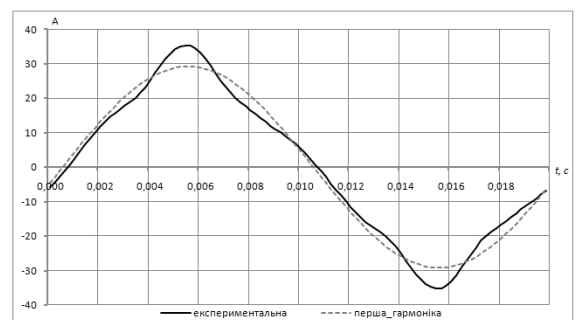


Рис. 13. Осцилограми струму

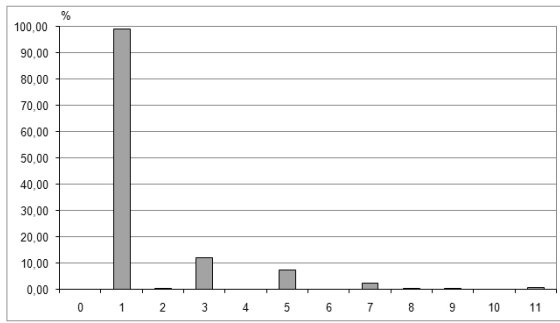


Рис. 14. Спектральний склад (%) струму

Таблиця 4. Діючі значення гармонік струму адміністративно-навчального корпусу

Гармоніка	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Струм, А	-0,033	20,635	0,066	2,511	0,002	1,570	0,025	0,519	0,054	0,048	0,035	0,115
%	-0,16	98,95	0,32	12,04	0,01	7,53	0,12	2,49	0,26	0,23	0,17	0,55

Діючі (середньоквадратичні) значення напруги - 209,8 В, струму - 20,85 А. При розрахунку повної потужності за виразом  $S=UI$  отримуємо 4374,75 ВА, а активна потужність, обчислена за виразом (3) 4273,08 Вт. Як бачимо в даному колі також  $S \neq P$ . Реактивна потужність зсуву  $Q=624$  ВАр. За виразом (15)  $T=631.22$  ВАр.  $D=937.67$  ВАр.

Як бачимо, реактивні потужності зсуву і спотворення практично співрозмірні.

Осцилограми і спектральний склад струму у нульовому проводі показано на рис.15 і 16.

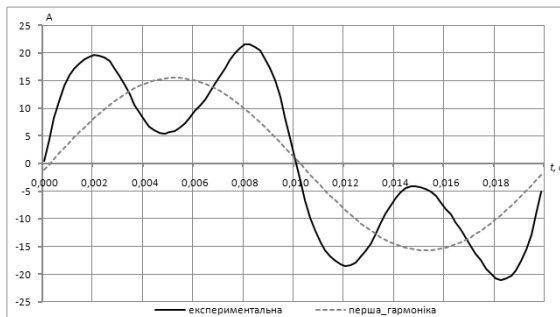


Рис. 15. Осцилограми струму в нульовому проводнику

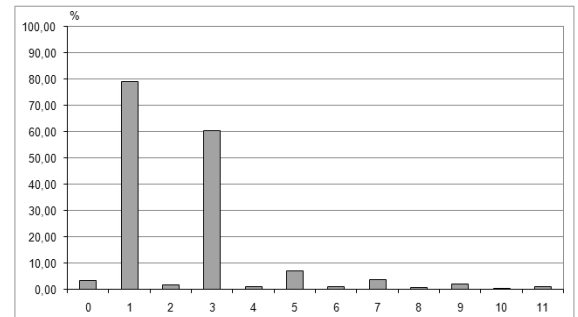


Рис. 16. Спектральний склад (%) струму нейтралі

Не дивлячись на те, що діючі значення струмів у фазах були практично рівними, струм у нульовому проводі становить 14.03 А (67.3 % фазного). Це спричинено накладанням третьої гармоніки фазних струмів, період якої рівний зсуву фаз.

### Висновки:

1. Системи електропостачання підприємств, організацій, комунально-побутових електроприймачів містять нелінійні (несинусоїдні) елементи, частка яких постійно зростає. Це потребує затвердження на офіційному рівні понять реактивної потужності зсуву та спотворення (6),(8),(15).

2. Електронні лічильники реактивної електроенергії обліковують сумарну реактивну потужність D: зсуву і спотворення, що є правильним, оскільки їх перетоки спричиняють додаткові втрати активної потужності в електричних мережах. Індукційні лічильники обліковують тільки реактивну потужність зсуву.

3. Розрахунок величини реактивної потужності зсуву за показами електронних лічильників є некоректним.
4. Відхилення форми кривої напруги від синусоїдальної незначно впливає на розрахунки діючого значення і потужностей.
5. Коефіцієнт потужності необхідно визначати за виразом (13) для основних гармонік напруги і струму, в тому числі і в алгоритмі роботи автоматичних регуляторів коефіцієнта потужності. Нагляднішим і коректнішим для характеризування *реактивної потужності зсуву* є використання коефіцієнта реактивної потужності  $tg\varphi$ .
6. При розрахунку *реактивної потужності спотворення* необхідно враховувати вищі гармоніки струму і постійну складову (15).
7. Компенсація *реактивної потужності спотворення* конденсаторами призводить до зростання повної потужності та струму.
8. Для компенсації *реактивної потужності спотворення* необхідно використовувати фільтри вищих гармонік та коректори коефіцієнта потужності.
9. Обрізання синусоїди струму тиристорами (сімісторами) призводить до появи *реактивної потужності зсуву* навіть при чисто активному навантаженні, яку можна скомпенсувати конденсаторами.
10. Необхідно впровадити стандарти [4,5] щодо обмеження рівня вищих гармонік струму електрообладнання та забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) нелінійних споживачів.

### **Список літератури**

1. Саєнко Ю.Л. Реактивна потужність в системах електропостачання з нелінійними навантаженнями: Автореф. дис. ... докт.техн.наук / Приазовський державний технічний університет.- Маріуполь,2003.- 42 с.
2. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. Об определении реактивной мощности при несинусоидальных режимах // Проблемы энергетики.-2005.- №1.
3. Сегеда М.С. Электричні мережі та системи: Підручник.-Львів:Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2007.- 488 с.
4. ДСТУ ІЕС 61000-3-2: 2004 Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми на емісію гармонік струму(для сили вхідного струму обладнання не більше 16 А на фазу).
5. ДСТУ ІЕС 61000-6-2:2004 Електромагнітна сумісність. Частина 6-2. Несприйнятливість промислового обладнання до завад. Загальні технічні вимоги.