

УДК 621.311.1:658.562

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У МЕРЕЖАХ З РІЗКОЗМІННИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ СПЕКТРАЛЬНИМ МЕТОДОМ

© Буняк О.А., Микулик П.Н., Тиш А., 2004

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

**Обґрунтовано вибір показників якості електроенергії у мережах з різкозмінними навантаженнями. Вказано на труднощі з контролем та оцінкою якості із спотвореними формами струмів та напруг, тобто з різкозмінними навантаженнями електричної мережі**

Найбільші ускладнення виникають при обґрунтуванні та кількісному нормуванні показників якості електроенергії (ПЯЕ) з контролем та оцінкою якості із спотвореними формами струмів та напруг в електричних мережах, тобто при появі вищих гармонік та несиметрії струмів та напруг [1]. Такі спотворення, в першу чергу, відбуваються при різкозмінних навантаженнях. Змінно-періодичні навантаження в системах електропостачання викликають модуляцію живильної напруги [2, 3].

Стандартами визначені три основних показники електроенергії: повільні відхилення і коливання середньоквадратичного значення напруги та частоти повторення, несиметрія трифазної системи напруг та несинусоїдність змінної напруги [4, 5]. Аналіз останніх досліджень засвідчив, що для розв'язання даних задач використовуються методи, на основі яких проводяться періодичні виміри напруги мережі з нас-тупною статистичною обробкою результатів [1, 2].

Алгоритм, запропонований авторами який базується на використанні дискретної трансформації Фур'є і конкретно на визначенні енергетичної спектральної щільності, яка, на переконання авторів, є інваріантним ядром для визначення ПЯЕ [6, 7].

Мета статті полягає у визначенні ПЯЕ у мережах з різкозмінними навантаженнями з використанням спектральних методів дослідження.

Математична форма представлення алгоритму зручна для обробки на комп'ютері, наприклад, з використанням математичного пакету *MathCad*. Використання різних методів розрахунків ПЯЕ дає різні результати з одним і тим же характером процесу його зміни і не дозволяє достатньо коректно оцінити збитки або наслідки від впливу неякісної електроенергії на різні види електрообладнання та технологічні процеси.

Одним із перших ПЯЕ, що викликає практич-

ний інтерес, є відхилення напруги (повільна її зміна). Графіки відхилення напруги на практиці будуються з інтервалом в 0,5-2 год. За цей час в ряді випадків відхилення напруги встигає вплинути на: пониження частоти обертання двигунів, збільшення нагріву деяких видів обладнання, порушення нормального ходу окремих типів технологічних процесів. Тому, визначаючи найбільшу величину відхилення напруги із врахуванням 95%-ої ймовірності як:

$$\Delta U = U_m - u(t), \quad (1)$$

де  $U_m$  – амплітудне значення напруги без впливу різкозмінного навантаження,  $u(t)$  – значення живильної напруги в часі спостереження із врахуванням різкозмінного навантаження, одержимо реальне значення ПЯЕ.

На рис.1 наведений фрагмент осцилограми напруги, що живить зварювальний автомат типу АДС-1000-4. З осцилограми видно, що величина живильної напруги  $u(t)$  в значній мірі залежить від параметрів огинаючої: амплітуди, частоти та кута початкової фази.

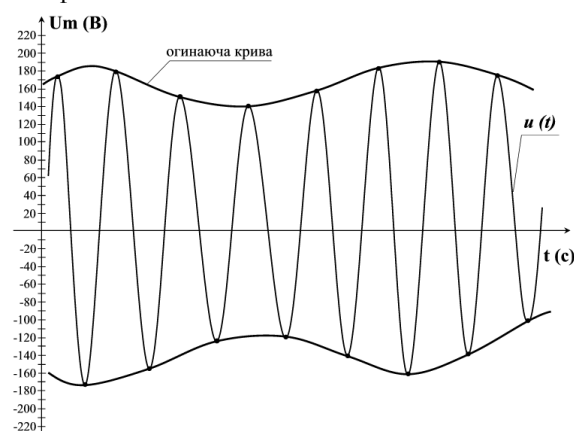


Рис.1. Фрагмент осцилограми напруги, що живить зварювальний автомат АДС-1000-4

Значення  $u(t)$  можна визначити, використовуючи спектральні методи і конкретно спектральну щільність сигналу, що обробляється. Значення живильної напруги  $u(t)$  для несинусоїдних режимів та різкозмінних навантажень за допомогою аналого-цифрового перетворювача подається наступним дискретним кодом:

$$U_i(n) = \sum_{m=1}^M U_m \sin\left(\frac{2\pi \cdot f_m \cdot n}{N} + \psi_m\right), \quad (2)$$

де  $U_m$ ,  $f_m$ ,  $\psi_m$  – відповідно амплітуда, частота та фазовий кут живильної напруги  $u(t)$ ;  $n$  – інтервал квантування за часом миттєвого значення  $u(t)$  несинусоїдної напруги;  $N$  – число вибірок за період  $T$  дії дискретної напруги  $U_i(n)$ .

З врахуванням останнього для сигналу  $U_i(n)$ , що представлений дискретними вибірками, пряме перетворення Фур'є має вигляд [6]:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} U_i(n) \exp^{-j\frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N}}, \quad (3)$$

або в матричній формі

$$\bar{S}(k) = (\bar{A} - j\bar{B})^T \bar{U}_i^T(n), \quad (4)$$

де матриця дійсних та уявних значень спектральних щільностей має розмір  $(N-1) \cdot k$ ;

$$a_{ij} = \cos\left(\frac{2\pi \cdot n_i \cdot k_j}{N}\right); \quad b_{ij} = -\sin\left(\frac{2\pi \cdot n_i \cdot k_j}{N}\right) -$$

елементи матриці  $i = (0, 1, \dots, (N-1)); j = (1, 2, \dots, k)$ .

Значення живильної напруги  $u(t)$  залежить від параметрів огинаючої, тобто

$$U_i(n) = f(\Pi_i), \quad (5)$$

де  $\Pi_i$  – параметри огинаючої.

Експериментально автором встановлено, що зміни амплітуди, частоти та кута початкової фази огинаючої майже однаково впливають на значення живильної напруги  $u(t)$ .

Дослідимо, як змінюється значення живильної

напруги  $u(t)$ , а, як наслідок, і значення спектральної щільності від впливу амплітуди огинаючої  $U_\Omega$ . Для цього складемо матрицю вигляду:

$$\begin{bmatrix} u(t)_1 & U_{\Omega 1} \\ u(t)_2 & U_{\Omega 2} \\ \dots & \dots \\ u(t)_i & U_{\Omega j} \\ \dots & \dots \\ u(t)_m & U_{\Omega p} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де  $i = 1, 2, \dots, m$  – кількість вибірок з фрагменту осцилограми (рис.1);  $j = 1, 2, \dots, p$  – значення амплітуди огинаючої від  $U_\Omega \min$  до  $U_\Omega \max$ .

З врахуванням (6) формула (4) прийме вигляд:

$$\bar{S}(k)_i = (\bar{A}(k)_i - j\bar{B}(k)_i)^T \bar{U}_i^T(n). \quad (7)$$

За допомогою формули (7) визначались модулі спектральних щільностей [8]:

$$|S(k)_i| = \sqrt{A(k)_i^2 - B(k)_i^2}. \quad (8)$$

Амплітудне значення  $k$ -ої гармоніки визначалось наступним чином:

$$U(k)_i = \frac{2 \cdot |S(k)_i|}{N}. \quad (9)$$

Вихідні дані для визначення впливу амплітуди огинаючої на значення живильної напруги  $u(t)$  наступні:  $U_m = 220$  В,  $f_m = 50$  Гц,  $\psi_m = 0$ , межа зміни амплітуди огинаючої  $U_\Omega = (15-28,5)$  В. Всі обчислення проводились для першої гармоніки живильної напруги  $u(t)$ .

У табл. 1 наведені обчислені експериментальні дані значень живильної напруги  $u(t)$  та її відхилення від амплітудного значення при зміні амплітуди огинаючої  $U_\Omega$ .

Таблиця 1 – Значення спектральної щільності  $|S(k)|$  та живильної напруги  $u(t)$  при зміні амплітуди згинаючої  $U_\Omega$

№ п/п	$k$	$ S(k) $	$U_\Omega$ , В	$u(t)$ , В	$\Delta U$ , В
1	1	$1,255 \cdot 10^4$	15	196,031	23,969
2	1	$1,034 \cdot 10^4$	16.5	161,554	58,446
3	1	$6,993 \cdot 10^3$	18	109,269	110,731
4	1	$1,012 \cdot 10^4$	19.5	158,065	61,935
5	1	$9,541 \cdot 10^3$	21	149,073	70,927
6	1	$9,035 \cdot 10^3$	22.5	141,179	78,821
7	1	$7,203 \cdot 10^3$	24	112,542	107,458
8	1	$8,238 \cdot 10^3$	25.5	128,715	91,285
9	1	$7,873 \cdot 10^3$	27	123,02	96,98

10	1	$7,581 \cdot 10^3$	28.5	118,448	101,552
----	---	--------------------	------	---------	---------

Аналізуючи дані табл. 1 видно, що зміни живильної напруги  $u(t)$  та спектральної щільності  $S(k)$  за формою аналогічні. Значення  $\Delta U$  (табл. 1), обчислене за формулою (1), характеризує також і відповідну потужність спотворень. Аналогічний висновок справедливий для оцінки повільних змін (відхилень) несинусоїдності та несиметрії напруг.

Слід відзначити, що втрати від впливу неякісної електроенергії на електрообладнання залежать від інерційних властивостей цього обладнання. Однак, як показали розрахунки, при повільних змінах ПЯЕ похибка в оцінці результатів впливу неякісної електроенергії обумовлена неврахуванням інерційних властивостей електрообладнання, як правило, невелика. Це пояснюється тим, що постійна часу нагрівання, електромеханічна постійна часу і ряд інших інерційних постійних „силового” електрообладнання є менш вагомими протягом інтервалу часу між поступаючими один за одним повільними змінами ПЯЕ. Виняток складають лише коливання напруги, оскільки вони нормуються за результатами впливу на органи зору.

Несинусоїдність змінної напруги з різкозмінними навантаженнями регламентується коефіцієнтом спотворення синусоїдності кривої напруги  $u(t)$  та  $k$ -ї гармонічної складової напруги.

Оскільки при відхиленнях ПЯЕ не є можливим врахувати передавальні функції всіх видів електрообладнання, доцільно для деякої степені обліку особливостей результатів впливу швидкозмінних ПЯЕ на електрообладнання в мережах з різкозмінними навантаженнями розраховувати такий ПЯЕ, як коефіцієнт несинусоїдності  $k_{нс}$ .

Такий показник визначається на основі результатів виконання не менше, ніж 9 спостережень та вимірювань середньоквадратичних значень  $k$ -гармонік напруги мережі протягом 3 с. Максимальна кількість  $k_{\max}=40$  [5], хоча в практичній роботі з потужним електрообладнанням на промисловому

виробництві кількість гармонік може сягати і більше [9].

Як видно з формул (8), (9) та табличних даних, інваріантним ядром при визначенні спектральних характеристик складного сигналу є спектральна щільність. Здійснимо оцінку впливу несинусоїдності електричного сигналу на значення спектральної щільності, для чого введемо коефіцієнт впливу  $\delta$ :

$$\delta = \frac{S(k) - S(\varepsilon k)}{S(k)} \cdot 100\%, \quad (10)$$

де  $S(k)$  – спектральна щільність електричного сигналу, осцилограма якого наведена на рис.1;  $S(\varepsilon k)$  – спектральна щільність електричного сигналу неспотвореної синусоїди (форма такого сигналу нами названа гладкою).

Для визначення  $S(\varepsilon k)$  використовуються ті ж формули, що і для визначення  $S(k)$ .

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги, значення якого регламентується стандартом, визначається за формулою [9]:

$$k_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n U_k}}{U_n} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де  $U_k$  – номінальне значення  $k$ -ої гармоніки, обчислене за формулою (9);  $U_n$  – номінальна напруга мережі.

У подальшому згідно (10) та (11) визначались значення коефіцієнта впливу  $\delta$  (%) та коефіцієнта спотворення синусоїдності  $k_{нс}$  для  $k_{\max}=19$  для фрагмента осцилограми, наведеної на рис.1.

За даними, що наведені в табл. 2, для  $k=(1 \div 19)$  з кроком 2 побудований графік (рис.2) залежності  $k_{нс}$  від  $\delta$  (%), який дає змогу без знаходження амплітуд гармонійного складу досліджуваних напруг опосередковано визначити коефіцієнт несинусоїдності, що значно зменшує обсяг обчислень.

Таблиця 2 – Значення спектральних щільностей  $S(k)$ ,  $S(\varepsilon k)$ , коефіцієнта несинусоїдності  $k_{нс}$  для та коефіцієнта впливу  $\delta$ (%)  $k=(1 \div 19)$

№п/п	$k$	$S(k)$	$S(\varepsilon k)$	$k_{нс}, \%$	$\delta, \%$
1	1	$1,255 \cdot 10^4$	$1,2513 \cdot 10^4$	18,99	37,0
2	3	160,37	71,76	21,06	88,61
3	5	196,21	31,48	23,83	164,73
4	7	194,55	22,54	26,27	172,01
5	9	194,55	15,52	28,50	179,03
6	11	196,21	15,17	30,6	181,04
7	13	206,37	20,03	31,93	186,34
8	15	247,17	51,08	37,15	195,19

9	17	233,05	36,02	39,16	197,03
10	19	240,79	40,2	41,54	200,17

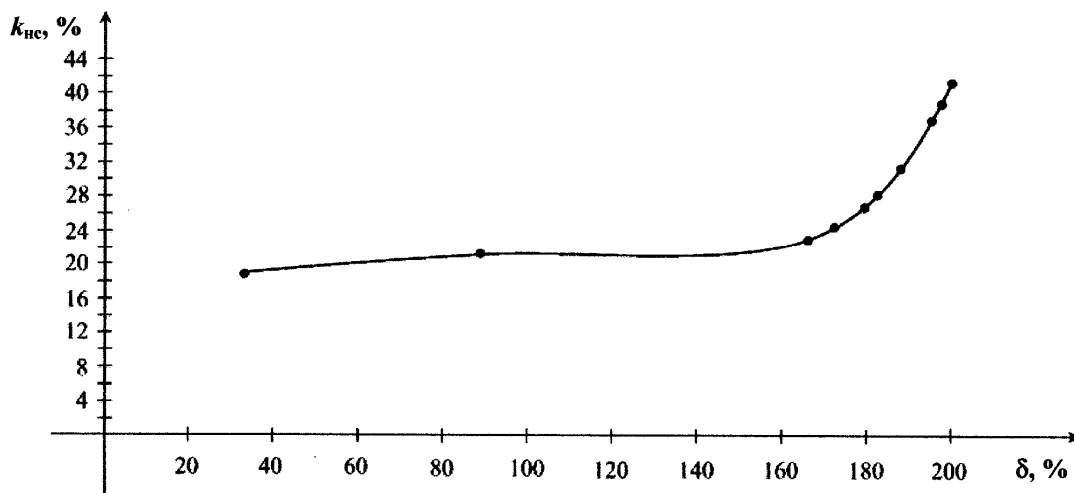


Рис.2. Графік залежності коефіцієнта несинусоїдності від коефіцієнта впливу

Методика визначення ПЯЕ на основі виразів (10) та (11) в мережах з різкозмінними навантаженнями може бути взяте за основу при виборі потужностей компенсуючих пристроїв виходячи з економічної і технічної доцільностей.

Наприклад, визначення  $k_{нс}$  з виразів (10) та (11) дає можливим знизити потужність фільтрів вищих гармонік за нашими розрахунками майже в 1,5 рази. Крім того, негативний вплив вищих гармонік на синхронні двигуни, трансформатори, батареї конденсаторів та засоби лінійного захисту, що мають фільтри симетричних складових, практично не збільшується порівняно з випадком, коли фільтри вищих гармонік вибираються із умови зниження  $k_{нс}$ , що визначається за методикою, яка наведена в літературі [9].

Використання спектральних методів для визначення ПЯЕ підтверджує раніше наведені висновки про те, що спектральна щільність є інваріантним ядром при визначенні ПЯЕ, в тому числі таких параметрів, як відхилення живильної напруги та коефіцієнта її несинусоїдності.

Таким чином, показники при повільних змінах (відхиленнях живильної напруги) слід обчислювати як найбільші значення відповідних ПЯЕ, які визначені за нормовані проміжки часу з урахуванням 95%-ої ймовірності їх виникнення. У мережах з різкозмінними навантаженнями коефіцієнт несинусоїдності доцільно розраховувати як середньоквадратичну величину з похибкою не більше 5%.

//Міжвідомчий науково-технічний збірник „Вимірювальна техніка та метрологія”. – Львів: НУ „Львівська політехніка”. 2001. – №58. – С. 47 – 56.  
 2. Жежеленко І.В., Липський А.М., Коляда Л.І. Оценки отклонений напряжения при наличии колебаний его амплитуды. – Минск: – Энергетика, 1981. – №1. – С. 30-34. 3. Зыкин Ф.А., Карпов И.О. Измерение мощности в системе электроснабжения переменного-периодических нагрузок. //Изв. Вузов СССР. – Энергетика, 1982. – № 3. – С. 26-30. 4. ГОСТ 23875-88. Качество электрической энергии. Термины и определения. 5. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. 6. Буняк А.М. Использование дискретного преобразования Фурье для определения параметров качества электроэнергии вычислительными устройствами. – Минск: Энергетика, 1982. – №6. – С. 7-12. 7. Буняк О.А., Микулик П.М. Дослідження інтегральних показників електроенергії за спектральними параметрами напруги електропостачання. – Харків: “Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства”, 2003. – Випуск 19: Том 1. – С. 70-75. 8. Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е. Обработка сигналов. – К: Либідь, 1996. – 392 с. 9. Жежеленко І.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. – М.: Техника, 1974. – 175 с.