

## ПОБУДОВА АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ВІДХИЛЕННЯ ЖИВИЛЬНОЇ НАПРУГИ ВІД НОМІНАЛЬНОЇ ПРИ ЗМІНІ ПАРАМЕТРІВ НЕСИНУСОЇДНОЇ ОБВІДНОЇ З РІЗКОЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

*Запропоновано алгоритм контролю показників якості електроенергії та проаналізовано їх залежність від параметрів несинусоїдної обвідної. Алгоритм базується на використанні дискретної трансформації Фур'є, а саме на визначенні енергетичної спектральної щільності сигналу. Відхилення та коливання напруги мережі наявні при різкозмінних навантаженнях, що породжує несинусоїдність обвідної.*

Проблеми контролю та забезпечення якості електроенергії за останні роки набувають великого значення. Невиконання нормованих показників якості призводить до матеріальних витрат на виробництвах, що оснащені все більш тонкою та удосконаленою технологією з високим рівнем автоматизації виробничих процесів. З другої сторони погіршення якості електроенергії, як правило, супроводжується і погіршенням економічних режимів – збільшення втрат потужності, енергії в електричній мережі та пониженням її пропускної здатності [3].

Якість електроенергії в мережах та промислових підприємствах характеризується рядом показників, в тому числі і таким, як відхилення напруги. Спотворення напруги, що відноситься до відхилення та коливання напруги, у більшості випадків наявні одночасно. У ряді практичних випадків, що пов'язані, наприклад, з визначенням умов роботи розподільних підстанцій напруг трансформаторів або оцінкою допустимості коливання напруги, необхідно виділити в обвідній напруги живильної мережі її зміни, що відносяться до відхилення та коливання напруги.

Розв'язок подібної задачі дозволяє також оцінити названі вище показники якості електроенергії (ПЯЕ) без спеціальних приладів їх контролю [4].

У силу того, що основна гармоніка 50 Гц напруги в мережах з різкозмінними навантаженнями і модулюючі її гармоніки (1-10 Гц) практично частотно незалежні, при аналізі характеру зміни напруги (коливання напруги) в мережі допустимо і доцільно розглядати ймовірні характеристики лише обвідної, а не повного сигналу напруги [6].

У більшості випадків, що стосуються впливу параметрів обвідної на відхилення живильної напруги від номінальної форму обвідної представляють гладкою, здебільшого синусоїдною [1, 2].

Однак, як засвідчили дослідження, що стосуються впливу параметрів обвідної на відхилення живильної напруги від номінальної, вона є несинусоїдна, наприклад, на затискачах з тиристорними перетворювачами зварювальних автоматів [3].

У даному випадку виникає потреба вивчення впливу гармонічного складу обвідної на відхилення живильної напруги від номінальної та її коливання в часі спостереження.

Аналіз останніх досліджень засвідчив, що для розв'язання даної задачі в основному використовують три підходи. Перший з них проводиться на основі періодичних вимірювань напруги мережі з наступною статистичною обробкою отриманих даних [3, 4].

Другий метод ґрунтується на роздільному формуванні стабільної системи, наприклад трифазної, номінальних напруг і системи із заданими значеннями ПЯЕ з подальшим їхнім підсумуванням [7].

Алгоритм, запропонований авторами, базується на використанні дискретної трансформації Фур'є і конкретно на визначенні енергетичної спектральної щільності, яка є, на переконання авторів, інваріантним ядром для визначення якісних показників електроенергії [1], [2].

Мета статті (постановка задачі) полягає в дослідженні впливу параметрів несинусоїдної обвідної на відхилення та коливання живильної напруги.

Досліджувальний алгоритм побудований в матричній формі зручний для обробки на комп'ютері, наприклад, з використанням математичного пакета MathCad.

Тут слід звернути увагу на випадковий характер процесів, що відбуваються в електричних мережах. Останнє при застосуванні дискретної трансформації Фур'є вимагає аналізу цих характеристик сигналів. Зазначимо, що перетворення Фур'є – лінійне [6]. З цього безпосередньо виходить, що до нього застосовується принцип накладання. Згідно з основними визначеннями спектральна щільність описується формулою (2). Спектр функції  $u(t)$  можна обчислити при дотриманні звичайних обмежень, що накладаються на функцію. Основне з них полягає в тому, що  $u(t)$  повинна бути абсолютно інтегрованою у нескінчених границях.

У запропонованому алгоритмі пари величин, через які проводять криву (див. рис. 2), періодичні. При цьому період  $T_0$  основної гармоніки з круговою частотою  $\omega_0$  відомий. Незалежною змінною тепер є час  $t$ . За основу взята згасаюча функція  $u(t)$ . Вона була виміряна в точках часу, при чому індекс  $n$  пробігає від 0 до  $N-1$ . Знайдені вибіркові значення функції  $u(t)$  відомі тільки для дискретних точок часу, тобто з неперервної змінної виникла дискретна. Для визначення спектральної функції в повному об'ємі підходить

алгоритм, названий дискретною трансформацією Фур'є.

Для побудови алгоритму оцінки відхилення живильної напруги від номінальної при зміні параметрів несинусоїдної обвідної використана дослідна установка, наведена на рис. 1. Для забезпечення різкозмінного навантаження живильної напруги використаний зварювальний автомат 1 типу АДС-1000-4, який призначений для автоматичного дугового зварювання під флюсом змінним струмом сталієм дротом 3 стикових, кутових та напусткових швів 2, розміщених на поверхнях, нахилених до горизонту під кутом  $0-15^{\circ}$ .

Напруга живлення автомата мережею трифазного змінного струму при частоті 50 Гц становить 380/220 В. Границі регулювання зварювального струму 400-1200 А. Система керування 4 зварювального автомата призначена для забезпечення руху заданої швидкості зварювальної каретці та швидкості поступлення зварювального дроту.

Для узгодження параметрів первинної обвитки трансформатора з персональним комп'ютером 9 використана інтерфейсна плата типу ЕТ1270. На платі розміщені наступні схемні блоки: резистивний масштабний перетворювач МПер 5, аналоговий мультиплексор типу 590КН АМХ 6, призначений для програмної комутації восьми каналів режимів роботи. Режими роботи вибрані залежно від зварювального значення струму: 1 режим – межі зміни струму від 400 до 500 А; 2 режим – від 500 до 600 А; 3 режим – від 600 до 700 А; 4 режим – від 700 до 800 А; 5 режим – від 800 до 900 А; 6 режим – від 900 до 1000 А; 7 режим – від 1000 до 1100 А; 8 режим – від 1100 до 1200 А.

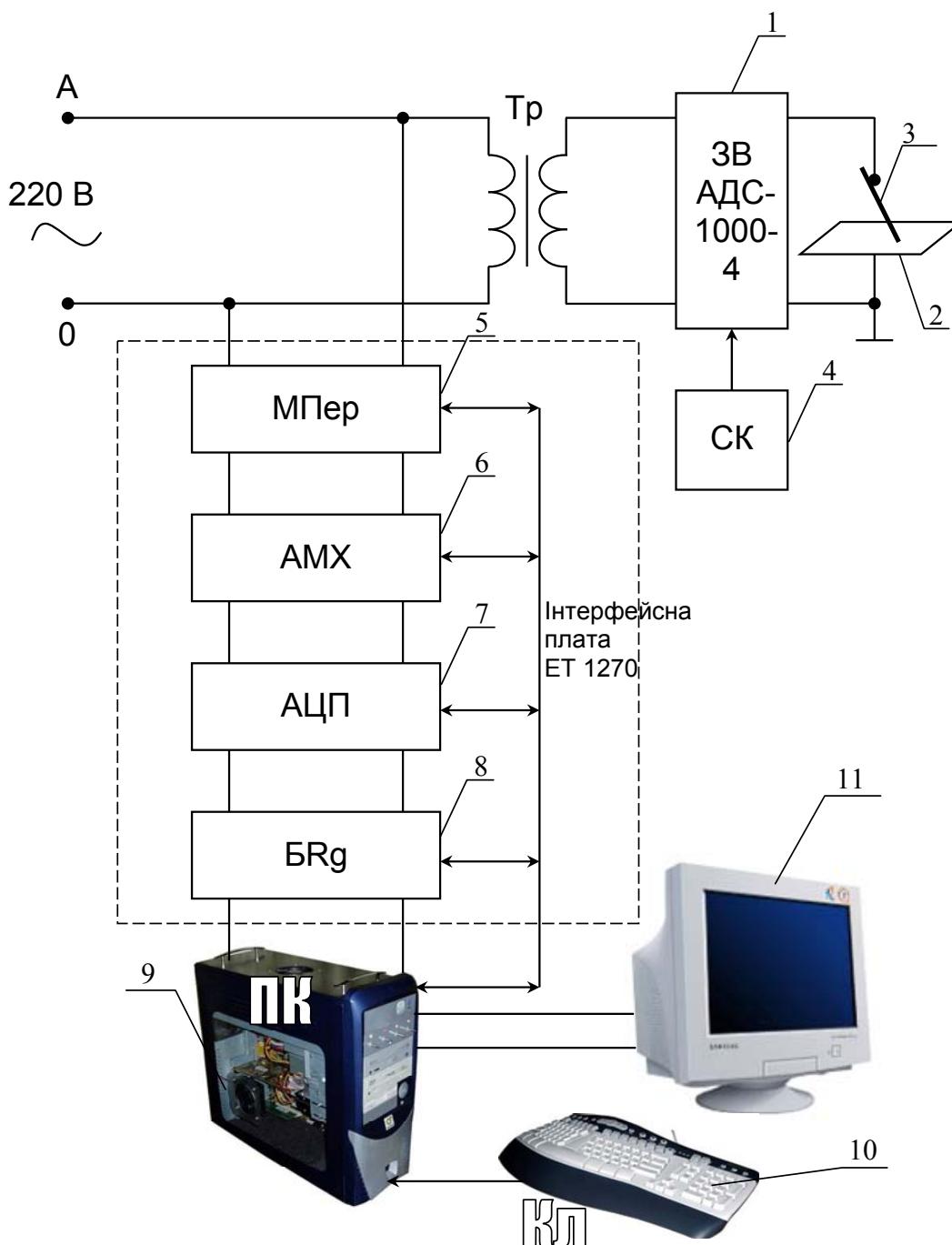


Рис. 1. Дослідна установка для оцінки відхилення живильної напруги від номінальної її амплітуди

Програмна комутація відповідного каналу здійснюється від персонального комп'ютера 9, на вхід дванадцятирозрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 7 паралельно-последовного типу, що працює в кодї Грея, реалізований на мікросхемах типу К140. Буферний регістр (БРг) 8 призначений для формування стробуючих імпульсів готовності даних.

У комплект дослідної установки входять також персональний комп'ютер (ПК) 9 типу Pentium з клавіатурою (Кл) 10 та монітор 11 типу Samsung 795DF 17".

На рис. 2 наведений фрагмент осцилограми живильної напруги зварювального автомата, який працює в другому режимі. Форма напруги характерна для різкозмінних навантажень з несинусоїдною обвідною описується наступним рівнянням [5]:

$$u(t) = [U_m \sin(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t + \psi_m)] + [\sum_{p=1}^M U_{\Omega_p} \sin(2 \cdot \pi \cdot p \cdot \Omega_p \cdot t + \xi_p)], \quad (1)$$

де  $U_m, f_m, \psi_m$  – відповідно амплітуда, частота та початкова фаза живильної напруги  $u(t)$ ;  
 $U_{\Omega_p}, \Omega_p, \xi_p$  – амплітуда, частота та початкова фаза несинусоїдної обвідної напруги  $u(t)$ , причому ( $f_m \neq \Omega_p$ ).

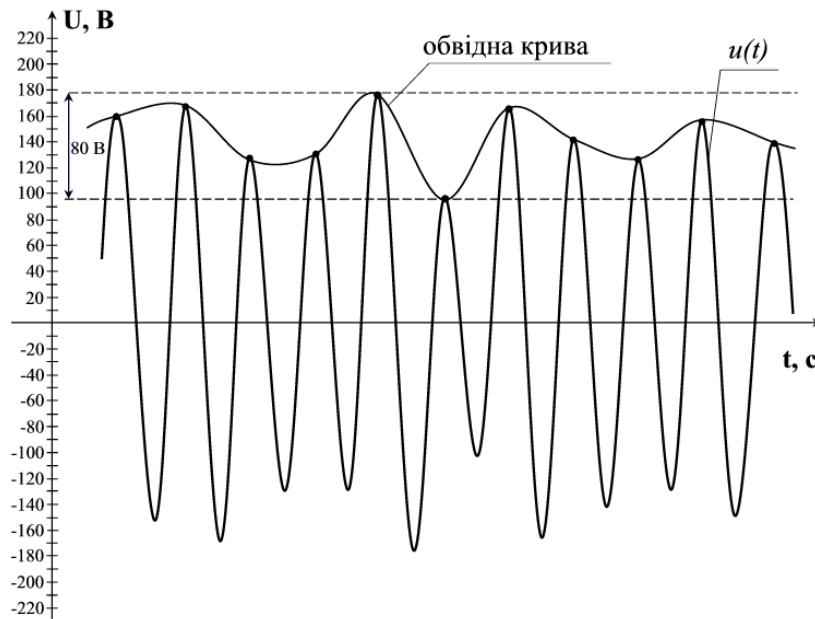


Рис. 2. Фрагмент осцилограми напруги, що живить зварювальний автомат

З врахуванням останнього для сигналу  $u(t)$ , що представлений дискретними вибірками  $U(n)$ , пряме перетворення Фур'є має вигляд [2]:

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

або в тригонометричній формі:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \left( U(n) \cos \frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N} - j U(n) \sin \frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N} \right) = A_k + j B_k, \quad (3)$$

де  $S(k)$  – спектральна щільність живильної напруги  $k$ -ї гармоніки;

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} \left( U(n) \cdot \cos \left( \frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N} \right) \right), \quad B_k = - \sum_{n=0}^{N-1} \left( U(n) \cdot \sin \left( \frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N} \right) \right), \quad k=0, 1, 2 \dots N-1,$$

$N$  – число вибірок за період  $T$  дії дискретизованої напруги  $u(t)$ ;

$U(n) = [U_0, U_1, \dots, U_{N-1}]^T$  – матриця стовпчик, складена із значень напруг  $u(n)$  при кожній вибірці;

$n$  – інтервал квантування за часом миттєвого значення  $u(t)$  несинусоїдної напруги.

Використаємо тригонометричну інтерпретацію для апроксимації виразу (2). Розділення на уявну та дійсну частини апроксимованого перетворення Фур'є приводить до виразу, який для різних значень  $k$  можна записати у вигляді матриці:

$$\overline{S}_k = (\overline{A}_k + j \overline{B}_k)^T \cdot \overline{U}^T(n), \quad (4)$$

де матриця дійсних та уявних значень спектральних щільностей розміром:

$$(N-1) \cdot k; a_{ij} = \cos\left(\frac{2\pi \cdot n_i \cdot k_j}{N}\right); b_{ij} = -\sin\left(\frac{2\pi \cdot n_i \cdot k_j}{N}\right) -$$

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

З обчислення матриці (4) визначаються модулі спектральних щільностей [1]:

$$|S_k| = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}, \quad (5)$$

де  $A_k, B_k$  – дійсні та уявні частини обчислених спектральних щільностей матриці (4).

Амплітудне значення  $k$ -ї гармоніки обчислюється з виразу [2]:

$$U_k = \frac{2 \cdot |S_k|}{N}. \quad (6)$$

Для визначення впливу гармонічного складу обвідної на відхилення живильної напруги зварювального автомата, тобто непарних ( $p=1,3,5,7,9,11$ ) та парних ( $p=2,4,6,8,10,12$ ) гармонік приймаємо наступні вихідні дані:  $U_m=220$  В,  $N=30$ ,  $\psi_m=\xi_p=0$ , межі зміни амплітуди обвідної  $U_{\Omega} = (0-80)$  В,  $f_m=50$  Гц,  $\Omega_p=210$  Гц,  $t=100$  с.

Враховуючи вищеповисані дані та формули (1), (3), (5) та (6), обчислюємо амплітуди основної (першої) гармоніки живильної напруги, значення якої дорівнює:

$$U_1 = \frac{2 \cdot |S(1)|}{N},$$

$$\text{де } S(1) = \sqrt{A^2(1) + B^2(1)} = \sum_{n=0}^{N-1} \left( U(n) \cos \frac{2\pi \cdot n \cdot 1}{N} - jU(n) \sin \frac{2\pi \cdot n \cdot 1}{N} \right).$$

Значення відхилення живильної напруги визначалось за формулою:

$$\delta U_e = \frac{U_m - U_1}{U_m} \cdot 100\%.$$

Обчислені при  $k=1$  значення  $U_1, S(k), \delta U_e$  зведено в таблицю 1.

Таблиця 1

Обчислені значення  $U_1, S(k), \delta U_e$  при  $k=1$ 

№ п/п	$p$	$U_k=U_1$	$S(k)$	$\delta U_e, \%$
1	1	102,1	1531,73	53,58
2	2	124	1860,76	43,6
3	3	48,58	728,75	77,9
4	4	65	975,47	70,44
5	5	127,58	1913,8	42
6	6	89,96	1349,4	59,1
7	7	18,3	274,5	91,68
8	8	112,19	1682,9	49
9	9	117,99	1769,86	46,36
10	10	31,14	467,18	85,84
11	11	80,15	1202,3	63,56
12	12	128,5	1927,8	41,58

За даними таблиці 1 побудуємо наступні графіки:

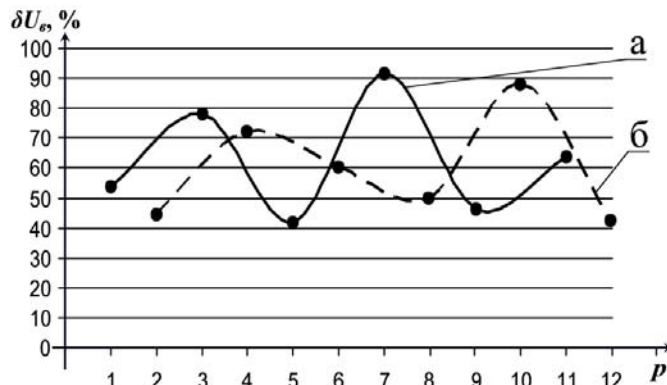


Рис. 3. Графік залежності значень відхилення амплітуди основної (першої) гармоніки від гармонічного складу обвідної (а – для непарних; б – для парних гармонік)

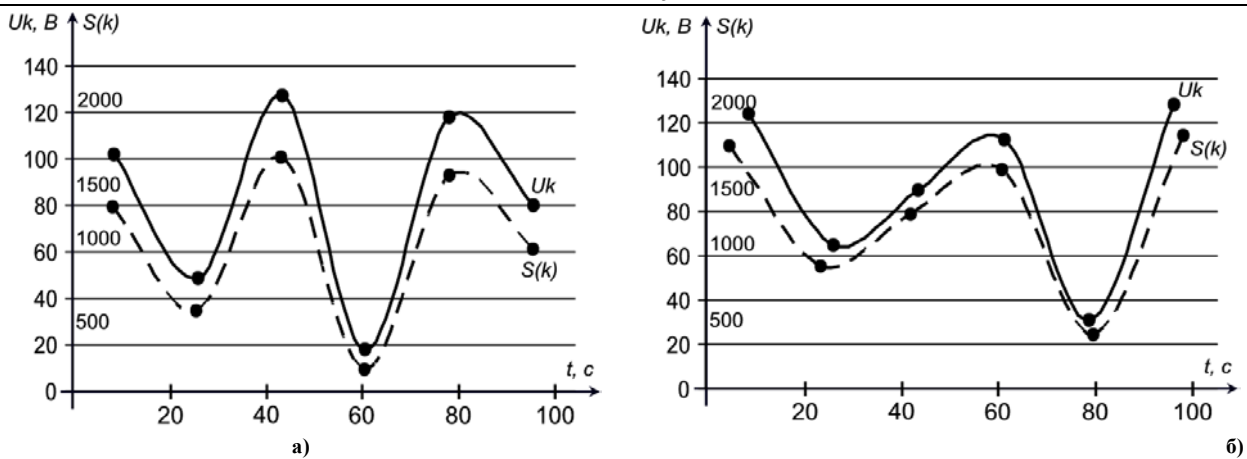


Рис. 4. Графік зміни живильної напруги першої гармоніки  $U_k$  та її спектральної щільності  $S(k)$  в часі спостереження ( $t=100$  с) (а – для непарних; б – для парних гармонік)

Вищенаведені графіки на рис. 3 дають змогу оцінити, як впливає гармонічний склад несинусоїдної обвідної на відхилення амплітуди основної (першої) гармоніки від номінального значення. Проведені дослідження засвідчили характер впливу гармонічного складу обвідної на такі відхилення.

З рис. 4 видно, як змінюється в часі спостереження ( $t=100$  с) амплітуда основної (першої) гармоніки живильної напруги та її спектральної щільності при дії несинусоїдної обвідної. Як видно з графіків, зміна напруги  $U_k$  та спектральної щільності  $S(k)$  за формою аналогічні, тому спектральна щільність може бути базовою основою для визначення ПЯЕ.

Отже, проведені дослідження засвідчують, що спектральна щільність є інваріантним ядром для визначення ПЯЕ, в тому числі таких параметрів як відхилення живильної напруги в мережах з різкозмінними навантаженнями при її коливанні.

Аналіз раніше проведених досліджень [1, 2] та описаних, дають змогу зробити висновок, що параметри періодичних синусоїдних і несинусоїдних обвідних однаково впливають на відхилення основної (першої) гармоніки живильної напруги в мережі з різкозмінними навантаженнями. При подальших дослідженнях енергетичних спектрів електричних неперіодичних сигналів струмів та напруг, слід встановити як вони впливають на споживану потужність різкозмінними навантаженнями.

### Література

1. 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.
2. Буняк О.А., Микулик П.М. Дослідження імітаційної моделі оцінки відхилення та коливання напруги мережі за параметрами її спектру. – Тернопіль: “Вісник Тернопільського державного технічного університету”, 2004. – Випуск 1: Том 9. – С.90-98.
3. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – К.: Техника, 1981. – 160 с.
4. Жежеленко И.В., Липский А.М., Коляда Л.И. Оценка отклонений напряжения при наличии колебаний его амплитуды // Энергетика. – 1981. – № 1. – С. 30-34.
5. Основы анализа и синтеза электронных цепей /Под ред. Ионина П.А. – М.: Высшая школа. 1982. – С. 347-358.
6. Салтыков В.М., Салтыкова О.А. Прохождение случайных колебаний напряжения по системе электроснабжения // Энергетика. – 1981. – № 4. – С. 32-37.
7. Таранов С.Г., Брайко В.В., Тесик Ю.Ф., Мирфайзиев О.М. Принципы построения прецизионных источников статических показателей качества электроэнергии // Технічна електродинаміка. – 2003. – № 4. – С. 38-41.

Надійшла 15.3.2009 р.