

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.12

УДК 658.26:621.316.1

Хмельницький Є.Д., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8605-4960,
e-mail: khmell2020@gmail.com

Клюєв О.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-4542-3317, e-mail: kluev2006@ukr.net

Сокурєнко Є.О., здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти,
e-mail: zhekan2505@gmail.com

Новоселець В.М., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Khmelnitskyi Evgen, Ph.D., Associate Professor, ORCID: 0000-0002-8605-4960,
e-mail: khmell2020@gmail.com

Kliuiev Oleh, Ph.D., Associate Professor, ORCID: 0000-0003-4542-3317,
e-mail: kluev2006@ukr.net

Sokurenko Evgen, undergraduate student, e-mail: zhekan2505@gmail.com

Novoselets Vitalii, master's degree student
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІРОГІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

Дослідження присвячено аналізу роботи системи електроживлення підприємства із значною кількістю тиристорних перетворювачів. Результати експериментальних вимірів показали наявність вищих гармонік струму і напруги дуже високого порядку (до 40-ї включно) у межах 2—4 % від номінальної напруги. За результатами дослідження розраховані і побудовані кореляційні функції та спектральні щільності випадкових процесів зміни струму і напруги. Також запропоновані необхідні рекомендації щодо методики вимірювання вищих гармонік.

Ключові слова: вищі гармоніки; експериментальні виміри; кореляційна функція; спектральна щільність.

The study is devoted to the analysis of the operation of the power supply system of an enterprise with a significant number of thyristor converters. The results of experimental measurements showed the presence of higher harmonics of current and voltage of a very high order (up to the 40th inclusive). within 2—4 % of the nominal voltage. Based on the results of the study, correlation functions and spectral densities of random processes of current and voltage changes were calculated and constructed. The necessary recommendations on the methodology for measuring higher harmonics are also proposed.

Keywords: higher harmonics; experimental measurements; correlation function; spectral density.

Постановка проблеми

У якості об'єкта дослідження прийнята підстанція глибокого вводу підприємства із потужними перетворювачами. Як наслідок, передбачається споживання з мережі несинусоїдального струму, що потребує застосування силових фільтрів. Тому дослідження повинно дати відповідь на такі питання: який рівень вищих гармонік при різному навантаженні та чи є потреба у силових фільтрах, а особливо номерах гармонік, які необхідно враховувати при визначенні коефіцієнтів несинусоїдальності струмів і напруг.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження у цьому напрямку виконані фахівцями [1, 2], а також проведені у роботі [3]. Основний напрямок проведених досліджень — це склад і рівень вищих гармонік у мережах промислових підприємств, обґрунтування засобів з обмеження негативного впливу на електричне обладнання, а також імовірнісне моделювання при розрахунках електричних навантажень споживачів. Значну увагу також приділено дослідженню електромагнітних процесів у мережах з вентильними комутаторами.

Формування мети дослідження

Основна частина публікацій (монографій) з аналізу процесів у електричних мережах торкається загальних, суцільно теоретичних аспектів проблеми вищих гармонік. У той же час, деякі підприємства — в силу специфіки електроживлення або електроспоживання — мають проблеми з роботою електричного обладнання у разі відсутності варіантів з вирішення своїх конкретних проблем. Так, Криворізький металургійний комбінат мав декілька проблем з кабелями у разі пошкодження ізоляції вищими гармоніками. Тому дане дослідження має на меті вирішити це питання.

Виклад основного матеріалу

1. Характеристика об'єкта та результати експериментальних досліджень.

У якості об'єкта дослідження обрано підстанцію глибокого вводу з трансформаторами 150/10 кВ. На кожну секцію шин (дві секції) увімкнені силові резонансні фільтри, налаштовані на 3—5—7—11 гармоніки.

У процесі дослідження зареєстровані рівні канонічних гармонік: друга та третя гармоніки 0,3—0,7 %; канонічні гармоніки 5—7 на рівні 1,8—2,2 %; гармоніки 11—13 на рівні 1,7—0,9 % відповідно; при цьому коефіцієнт синусоїдальності напруги ($K_{НС}$) знаходився у межах 4,5—8,7 % [3], що не відповідає невеликим значенням канонічних гармонік.

Таким чином, основну вагу у формуванні $K_{НС}$ визначають гармоніки високого порядку — від $\nu = 20$ до $\nu = 39$. Так були зафіксовані значення: $\nu = 22$ —0,9 %; $\nu = 25$ —1,3 %; $\nu = 29$ —4,6 %; $\nu = 36$ —1,8 %; $\nu = 39$ —1,8 %. Появу у спектрі парних і непарних гармонік високого порядку можна пояснити в основному несиметрією імпульсів вмикання тиристорів.

2. Аналіз причин появи неканонічних гармонік.

Симетрування системи імпульсно-фазового керування (ІФК) перетворювачів за мостовою схемою або з порівнювальним реактором є ефективним засобом зниження коефіцієнта несинусоїдальності. Незважаючи на те, що перетворювачі працюють у режимі, близькому до еквівалентного 12-ти фазного, зменшення пульсацій струму і напруги переважає нормативні значення на виході перетворювача.

Під структурою коефіцієнта несинусоїдальності ми розуміємо склад і рівень вищих гармонік [3]. Стохастичний характер коефіцієнтів несинусоїдальності визначається в основному режимом навантаження перетворювачів.

3. Обґрунтування методу дослідження.

Математичне очікування $X(t)$ і дисперсія $D_X(t)$ це основні характеристики випадкової функції. Розглянемо два випадкових процеси (рис. 1), що мають приблизно однакові математичні

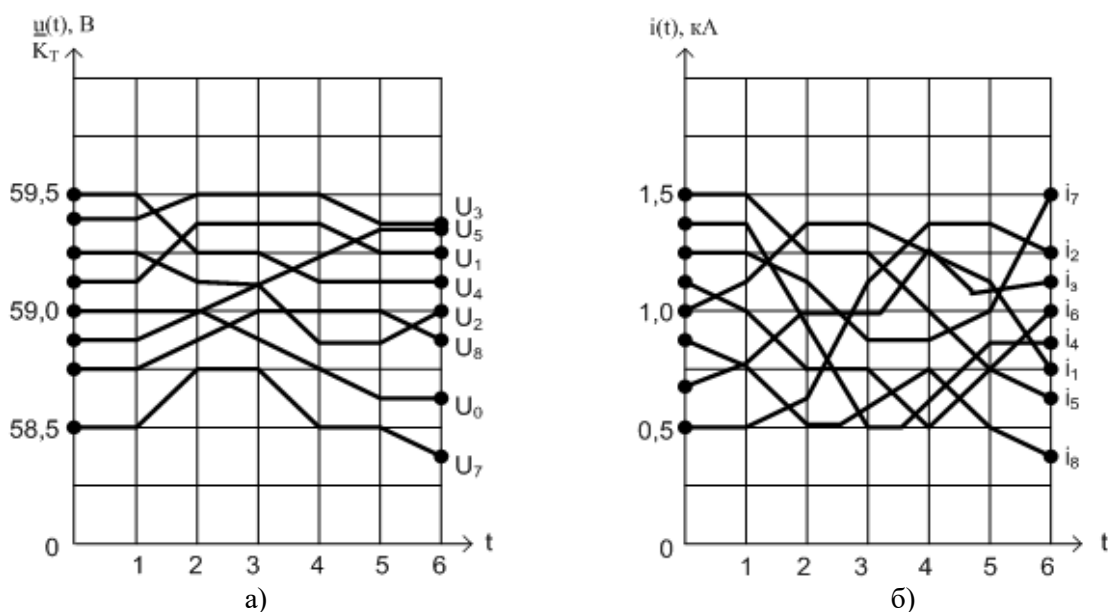


Рис. 1. Фрагменти реалізації зміни напруги (а) і струму (б) трансформатора

очікування і дисперсії. Так, для випадкової функції зміни напруги трансформатора (рис. 1, а) характерне плавне, поступове зниження; випадкова функція зміни струму трансформатора (рис. 1, б) має різко коливальний характер і спрогнозувати значення функції у разі збільшення параметра від t до t' набагато складніше. Таким чином, внутрішня структура обох випадкових процесів цілком різна, однак ця відмінність не помічається ні математичним очікуванням, ні дисперсією. Цю відмінність може визначити тільки спеціальна характеристика — кореляційна функція (КФ).

Аналітичний вираз КФ запишемо у вигляді:

$$K_x(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) \cdot dt. \quad (1)$$

Таким чином, КФ випадкової функції $X(t)$ — це не випадкова функція двох аргументів $K_X(t, t')$, тобто

$$K_X(t, t') = M \left[\overset{\circ}{X}(t) \overset{\circ}{X}(t') \right], \quad (2)$$

де

$$\overset{\circ}{X}(t) = X(t) - m_X(t); \quad \overset{\circ}{X}(t') = X(t') - m_X(t'). \quad (3)$$

Важлива особливість КФ полягає у тому, що у разі $t = t'$ маємо:

$$K_X(t, t') = M \left[\left(\overset{\circ}{X}(t) \right)^2 \right] = D_X(t), \quad (4)$$

тобто при $t = t'$ КФ перетворюється у дисперсію випадкової функції. Звідки випливає, що у якості основних характеристик достатньо розглядати математичне очікування і КФ.

Визначення коефіцієнтів кореляції наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Коефіцієнти кореляції струмів фаз трансформатора

Параметри реалізацій		Коефіцієнти несинусоїдальності струмів	
$I_{mA} = 1,975$	$I_{mc} = 1,989$	$\alpha_{IA}^{\%} = 3,269$	$\alpha_{Ic}^{\%} = 2,774$
$D_I = 0,268$	$D_I = 0,290$	$D_I = 0,564$	$D_{\alpha} = 0,361$
$\sigma_I = 0,519$	$\sigma_I = 0,543$	$\sigma_I = 0,710$	$\sigma_{\alpha} = 0,601$
Коефіцієнти кореляції між струмами фаз (A – C)		Коефіцієнти кореляції коефіцієнтів несинусоїдальності струмів	
$R_0 = 0,866$		$R_{0\alpha} = 0,774$	

Як видно, коефіцієнти кореляції струмів фаз трансформатора та коефіцієнтів несинусоїдальності струмів доволі значні, що свідчить про однорідність споживачів та відсутність потужних однофазних навантажень.

Визначення кореляції між коефіцієнтами несинусоїдальності напруги і струмів наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Коефіцієнти несинусоїдальності напруги і струмів

Параметри реалізацій		Коефіцієнти несинусоїдальності струмів	
$\alpha_U^{\%} = 5,100$	$\alpha_{IA}^{\%} = 4,184$	$\alpha_{IAB}^{\%} = 6,425$	$\alpha_{Ic}^{\%} = 4,104$
$D_{\alpha} = 0,187$	$D_{\alpha} = 0,178$	$D_{\alpha} = 1,467$	$D_{\alpha} = 0,123$
$\sigma_{\alpha} = 0,439$	$\sigma_{\alpha} = 0,422$	$\sigma_{\alpha} = 1,211$	$\sigma_{\alpha} = 0,351$
Коефіцієнти кореляції між коефіцієнтами несинусоїдальності напруги і струмів фаз			
$R_{0U-IA} = 0,250$		$R_{0U-IB} = -0,227$	
		$R_{0U-Ic} = 0,137$	

Як бачимо, кореляція між коефіцієнтами несинусоїдальності напруги і струмів значно менша, що можна пояснити різною внутрішньою структурою цих випадкових процесів: зміна струмів визначається гармоніками низького порядку (3-я, 5-а, 7-а), а зміна напруги гармоніками >15 , як парними так і непарними [4].

4. Аналіз частотної структури випадкового процесу.

Кореляційна функція (рис. 2) змінює свій вигляд у залежності від складу вищих гармонік даного випадкового процесу та характеризує розподіл дисперсій за різними частотами.

Кореляційна функція є парна функція, тому може бути розкладена у ряд Фур'є за парними (косінусними) гармоніками

$$K_X(\tau) = \sum_{K=0}^{\infty} D_K \cdot \cos \omega_K \cdot \tau, \quad (5)$$

$$\text{де } \omega_K = K \cdot \omega_1; \quad \omega_1 = \frac{2\pi}{2T} = \frac{\pi}{T}.$$

Коефіцієнти D_K визначаються за формулами

$$D_0 = \frac{1}{T} \int_0^T K_X(\tau) \cdot d\tau, \quad (6)$$

$$D_K = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} K(\tau) \cdot \cos \omega_K \cdot \tau \cdot d\tau, \quad K \neq 0. \quad (7)$$

Дисперсія функції розподілена за різними частотами, яким відповідають різні величини дисперсії, тобто такий графік можна назвати спектром дисперсій. Якщо $T \rightarrow \infty$, то частота $\omega_1 = \frac{2\pi}{2T} \rightarrow 0$, а відстань між частотами ω_K буде необмежено зменшуватись, тоді дискретний спектр буде наближатись до безперервного. У такому спектрі маленькому інтервалу частоти $\Delta\omega$ відповідає елементарна дисперсія $\Delta D(\omega)$. Тоді на кожному відрізку $\Delta\omega$ можна побудувати прямокутник площиною D_K і ми отримаємо ступінчасту діаграму, де функцією $S_K(\omega_K)$ є середня щільність дисперсії на ділянці $\Delta\omega_K$. При $T \rightarrow \infty$, $\Delta\omega \rightarrow 0$ ступінчаста крива буде необмежено наближатись (рис. 3) до повільної кривої $S_X(\omega)$.

$$S_K(\omega) = \frac{D_K}{\Delta\omega}, \quad \Delta\omega \rightarrow 0 \quad \text{тоді} \quad D_X = \int_0^{\infty} S_K(\omega) \cdot d\omega. \quad (8)$$

Функція $S_X(\omega)$ має назву спектральна щільність дисперсії. Зв'язок спектральної щільності з кореляційною функцією можна визначити за косинус-перетворенням Фур'є,

$$S_X = \frac{2}{T} \int_0^{\infty} K_X(\tau) \cdot \cos \omega \cdot \tau \cdot d\tau. \quad (9)$$

Для згладжування статистичної залежності $K(t)$, використовуємо функцію виду:

$$\rho(\tau) = e^{-a|\tau|}. \quad (10)$$

Для визначення параметра a складаємо наступне нелінійне рівняння

$$\sum_{i=1}^1 \tau_i \rho^*(\tau_i) e^{-a\tau_i} - \sum_{i=1}^1 \tau_i e^{-2a\tau_i} = 0, \quad (11)$$

де $\rho^*(\tau_i)$ — значення емпіричної нормованої КФ в моменти часу τ_i .

Вирішуючи рівняння (11), знаходимо $a = 0.318$. Тоді аналітичний вираз нормованої КФ має вигляд:

$$\rho(\tau) = e^{-0.318|\tau|}. \quad (12)$$

Кореляційна функція однозначно зв'язана з функцією розподілу енергії процесу за частотами, тобто спектральною щільністю.

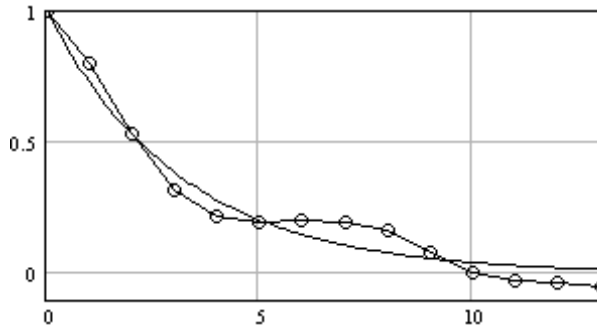


Рис. 2. Кореляційна функція

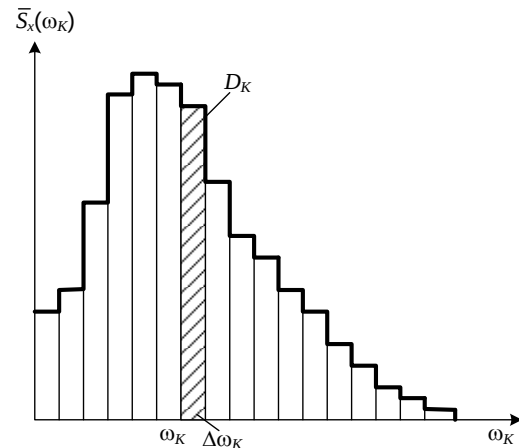
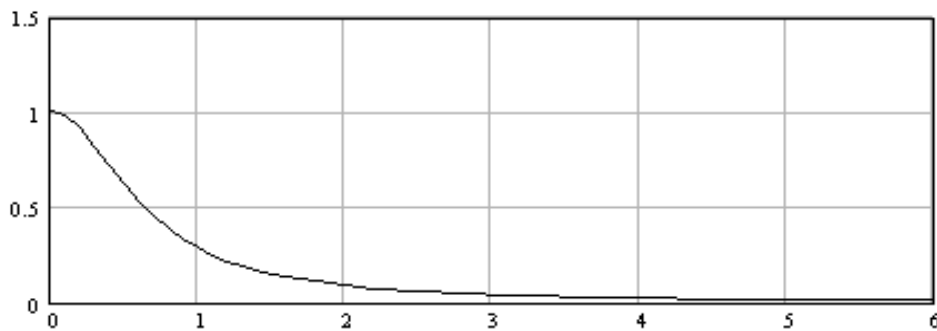


Рис. 3. Спектральна щільність

Скориставшись виразом (12) і формулою (8), знаходимо однобічну нормовану спектральну щільність (рис. 4)

Рис. 4. Графік однобічної нормованої спектральної щільності випадкового процесу $x(t)$

$$s(f) = 4 \int_0^{\infty} e^{-a\tau} \cos 2\pi f \tau d\tau = \frac{4a}{a^2 + 4\pi^2 f^2} = \frac{15.88}{15.76 + 4\pi^2 f^2}. \quad (13)$$

Спектральна щільність дає можливість для дослідження частотної структури процесу, яка, у свою чергу, відкриває важливу інформацію про характеристики досліджуваної електричної системи.

У роботі апроксимація АКФ зроблена експоненціальною функцією, яка відноситься до класу не диференційованих. Основна причина у тому, що на даному етапі дослідження аналізуємо електропостачання при нормальній схемі живлення підстанції, коли склад споживачів стабільний. У разі ремонтної (аварійної) схеми, коли усі цехові підстанції живляться від одного понижуючого трансформатора та у складі споживачів присутній прокатний стан (блюмінг), необхідно застосовувати іншу АКФ, щоб не втрачати початковий процес кореляційної функції.

Висновки

У роботі досліджені статистичні характеристики випадкового процесу зміни струму і напруги електроспоживання підприємства. Експериментально виміряні вищі гармоніки струму і напруги (до 40-ї гармоніки включно). Розраховані автокореляційні функції та спектральна щільність випадкового процесу струму навантаження. Рекомендовано, у разі наявності у мережі вентиляльних перетворювачів, при розрахунках коефіцієнта несинусоїдальності напруги вимірювати вищі гармоніки до 40-ї включно.

Список використаної літератури

1. Терешкевич Л.Б. Оптимізація режимів електроспоживання : навчальний посібник Вінниця : ВНТУ, 2020. 112 с.
2. Півняк Г.Г., Жежеленко І.В., Папаїка Ю.А. Енергетична ефективність систем електропостачання : монографія. Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». 2-ге вид., переробл. і допов. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 148 с.
3. Визначення ефективності фільтрів вищих гармонік у мережах 10 кВ металургійного комбінату : Хмельницький Є.Д., Ключев О.В. Збірник наукових праць ДДТУ. Кам'янське. 2017. Вип. 1 (30). С. 104–111.
4. Карюк А.О., Ієрусалімова Т.С., Сєдова О.О. Вищі гармоніки в промислових та побутових системах електропостачання // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. Харків : ХНТУСГ, 2017. Вип. 186 : "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". С. 59–61.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEGENERATIVE CHARACTERISTICS OF THE ENTERPRISE'S ELECTRICITY CONSUMPTION PROCESS

Abstract

The study is devoted to the analysis of the operation of the power supply system of an enterprise with a significant number of valve converters. The object is a deep-induction substation with thyristor converters and power resonant filters tuned to 3—5—7—11 harmonics.

The measurement showed the presence of higher harmonics in the network, even and odd, of very high order and significant intensity (for example: $\nu = 29$ —4,2 %; $\nu = 36$ —1,8 %;), which can only be explained by the violation of the thyristor turn-on angles. It was determined that the composition and level of harmonics are influenced by the connection schemes of the converters and the load intensity, as well as a number of technological factors of the rolling process (temperature, speed, etc.).

The main attention in the work was paid to the analysis of the structure of the non-sinusoidality coefficients of voltage and currents. The experiments conducted confirm the stochastic nature of the dependences between the magnitude of the non-sinusoidality coefficients and technological factors. As a research method, a statistical correlation method was adopted, which determines the degree of influence of various factors and non-sinusoidality coefficients. The statistical correlation function between the transformer phase currents is approximated by an exponential function, which is explained by the fact that the research was conducted in the case of a normal power supply scheme and a stable group of consumers. The research showed a high level of correlation of the transformer phase currents with the non-sinusoidality coefficient of currents ($R_0 = 0,866$ та $R_{0\alpha} = 0,774$). At the same time, the degree of correlation of the transformer phase currents with the non-sinusoidality coefficients of voltage is much lower, which can be explained by the different internal structure of these random processes. The frequency structure of the process is determined by the spectral density, which is illustrated by the graph of the normalized spectral density.

The paper gives some proposals for conducting experimental research, the main of which is to measure higher harmonics up to and including the 40th for electrical networks with powerful valve converters.

References

- [1] Tereshkevych L.B. (2020) *Optymizatsiia rezhymiv elektrospozhyvannia [Optimization of power consumption modes]* : navchalnyi posibnyk : L.B. Tereshkevych. Vinnytsia : VNTU, 2020. 112 p. [in Ukrainian].
- [2] Pivniak H.H. (2018) *Enerhetychna efektyvnist system elektropostachannia [Energy efficiency of power supply systems]* : monohrafiia. Nats. tekhn. un-t «Dniprovska politekhnika». 2-he vyd., pererobl. i dopov. Dnipro: NTU «DP». 2018. 148 p. [in Ukrainian].

- [3] *Vyznachennia efektyvnosti filtriv vyshchych harmonik u merezhakh 10 kV metalurhiinoho kombinatu [Determination of the efficiency of higher harmonic filters in 10 kV networks of a metallurgical plant]*. Khmelnytskyi Ye.D., Kliuiev O.V. Zbirnyk naukovykh prats DDTU. Kam'yanske. 2017. Vyp. 1 (30). P. 104–111. [in Ukrainian].
- [4] Kariuk A.O., Iierusalimova T.S., & Siedova O.O. (2017) *Vyshchi harmoniky v promyslovykh ta pobutovykh systemakh elektropostachannia [Higher harmonics in industrial and domestic power supply systems]*. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. Kharkiv : KhNTUSH, 2017. Vyp. 186 : "Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy". P. 59–61. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 28.03.2025