

УДК 621.311.1.018.3

О. М. ДМИТРИЄВА (канд.техн.наук, доц.), І. Б. ПОНОМАРЬОВ

Державний вищий навчальний заклад

«Донецький національний технічний університет»

n8400@matrixhome.net

ОСОБЛИВОСТІ АНАЛІЗУ ІНТЕРГАРМОНІК

Розглядається задача оцінювання несинусоїдальності напруги при наявності неканонічного та безперервного спектрів. Вказується область коректності використання інтергармонік. Аналізуються похибки використання стандартної процедури обробки осцилограм напруги.

Електромагнітна сумісність (ЕМС), несинусоїдальність, гармоніки, спектральна щільність, похибки оцінювання ЕМС.

Постановка задачі. Інтергармоніки являють собою синусоїдальні процеси зміни за часом миттєвих значень u напруги, частота яких відрізняється від частоти 50 Гц у меншу або більшу сторони [1]. У проектуванні використовуються періодичні графіки $u(t)$, по яких розрахунок будь-яких гармонік виконується шляхом розкладання в ряд Фур'є за час тривалості циклів. У діючих електричних мережах такої ясності немає, оскільки стандарт [2] передбачає визначення тільки вищих гармонік різними вимірюваними вікнами у широкому діапазоні їх ширини: від 0,08 до 0,5 с. В [3] показано, що такий підхід не забезпечує достовірності оцінок електромагнітної сумісності (ЕМС) за вищими гармоніками.

Метою статті є узагальнення результатів [3] на інтергармоніки. Для визначеності розглядається стандартна процедура цифрової обробки осцилограм з використанням прямокутного вікна шириною $\kappa = 0,32$ с без пробілів між вікнами (табл. Е.1 з [2]).

Прийняті наступні терміни і позначення. Для канонічних f -гармонік: n – порядок гармоніки, f_n – ω_n – частота в Гц і кутова частота в рад/с, c_n – амплітуда n -ої гармоніки. Для інтергармонік (ν -гармонік): m – номер (не порядок) гармоніки, ν_m і $\Omega_m = 2\pi\nu_m$ – частоти і кутові частоти, c_m – амплітуди. Окрім того, для періодичного процесу з тривалістю циклу T_μ використовуються μ -гармоніки з основною частотою $\mu_1 = 1/T_\mu$, порядком r , частотами μ_r і $\omega_{\mu r} = 2\pi\mu_r$, амплітудами $c_{\mu r}$. При обробці за стандартною процедурою і $\kappa \neq T_\mu$ гармонічні складові формально розрахувати можна, але вони не мають смислу. Тому будемо називати їх квазігармоніками [3] або κ -гармоніками, які мають основну частоту $\beta_1 = 1/\kappa = 3,125$ Гц, порядком q , частоти β_q і $\omega_{\beta q} = 2\pi\beta_q$, амплітуди $c_{\beta q}$.

Періодичні процеси. Для наочності розглянемо суму

$$u(t) = u_f(t) + u_\nu(t) = \sin \omega_1 t + \alpha \sin \omega_\nu t, \quad (1)$$

перша (корисна) складова якої має частоту $f_1 = 50$ Гц і одиночну амплітуду, а друга є завадою – інтергармонікою з частотою ν і амплітудою $\alpha < 1$. Якщо частота завади є раціональним числом, то процес (1) буде періодичним, тривалість циклу T_μ якого залежить від співвідношення частот f_1 і ν . При ірраціональній частоті процес буде неперіодичним.

Слід відзначити, що мале змінення частоти інтергармоніки може приводити до значного змінення тривалості циклу. Наприклад, при $\nu = 4$ Гц цикл $T_\mu = 0,5$ с, а при близькій частоті $\sqrt{16,1} \approx 4,012$ Гц він є нескінченним.

Нехай перетворення Фур'є процесу (1) здійснюється на відрізку часу від t_1 до t_2 тривалістю $\tau = t_2 - t_1$. Позначивши через p порядок відповідних гармонік, $\gamma_1 = 1/\tau$ – основну частоту, $\omega_{\gamma_1} = 2\pi\lambda_1$ – основну кутову частоту, $t_{12} = t_1 + t_2$, $\nu_{1,2} = \omega_1 \mp p\omega_{\gamma_1}$, $\nu_{3,4} = \Omega \mp p\omega_{\gamma_1}$, отримаємо коефіцієнти ряду Фур'є при $p \geq 1$ і будь-якому $\nu \neq 0$:

$$a_p = \frac{2}{\tau} \left(\frac{1}{\nu_1} \sin \frac{\nu_1 t_{12}}{2} \sin \frac{\nu_1 \tau}{2} + \frac{1}{\nu_2} \sin \frac{\nu_2 t_{12}}{2} \sin \frac{\nu_2 \tau}{2} + \frac{1}{\nu_3} \sin \frac{\nu_3 t_{12}}{2} \sin \frac{\nu_3 \tau}{2} + \frac{1}{\nu_4} \sin \frac{\nu_4 t_{12}}{2} \sin \frac{\nu_4 \tau}{2} \right), \quad (2)$$

$$b_p = \frac{2}{\tau} \left(\frac{1}{\nu_1} \cos \frac{\nu_1 t_{12}}{2} \sin \frac{\nu_1 \tau}{2} - \frac{1}{\nu_2} \cos \frac{\nu_2 t_{12}}{2} \sin \frac{\nu_2 \tau}{2} + \frac{1}{\nu_3} \cos \frac{\nu_3 t_{12}}{2} \sin \frac{\nu_3 \tau}{2} - \frac{1}{\nu_4} \cos \frac{\nu_4 t_{12}}{2} \sin \frac{\nu_4 \tau}{2} \right), \quad (3)$$

$$c_p = \sqrt{a_p^2 + b_p^2}. \quad (4)$$

Якщо $\nu = 0$, то враховуючи, що границя $\sin x/x$ при $x \rightarrow 0$ дорівнює одиниці, відповідні члени в (2)-(4) становлять:

$$\frac{1}{\nu} \sin \frac{\nu t_{12}}{2} \sin \frac{\nu \tau}{2} \Big|_{\nu=0} = 0, \quad \frac{1}{\nu} \cos \frac{\nu t_{12}}{2} \sin \frac{\nu \tau}{2} \Big|_{\nu=0} = \frac{\tau}{2}.$$

Постійний член ряду при $p = 0$ становить $c_0 = a_0/2$.

Формули (2)-(4) є загальними для гармонік будь-якого виду: при $\tau = 0,02$ с і $p = n$ вини дають вищі гармоніки, при $\tau = T_\mu$ і $p = r - \mu$ – гармоніки, при $\tau = \kappa$ і $p = q$ – квазігармоніки.

Якщо $\tau = T_\mu$ і $T_\mu < \infty$, формули (2)-(4) дають дві гармоніки з амплітудами 1 і α , порядками $r = fT_\mu$ і νT_μ , частотами $\mu_r = fT_\mu \mu_1 = f$ і $\nu T_\mu \mu_1 = \nu$. Це означає, що розв'язок є точним. Але для цього потрібно знати, що процес є періодичним з циклом T_μ . При використанні ж аналізаторів якості напруги графік $u(t)$ не записується, тому інформація про T_μ відсутня – приводяться лише результати обробки по вікнах. Очевидно, що лише для окремих випадків, коли цикл $T_\mu \leq 0,32$ с і ціле число разів розміщується в інтервалі $0,32$ с, результат буде вірним. Проте такі випадки зустрічаються зовсім не часто.

Проілюструємо механізм виникнення помилок на прикладі інтергармоніки частотою 4 Гц з періодом $t_\nu = 1/\nu = 0,25$ с і амплітудою $\alpha = 0,5$. Сумарний процес (1) має цикл $T_\mu = 0,5$ с, у якому розміщується 25 циклів $t_f = 0,02$ с і два цикли інтергармоніки (рис. 1). Тривалість $0,32$ с не співпадає з T_μ , тому графіки у вікнах будуть різними. На рис. 2 потовщеними лініями показано фактичний спектр, а світлими кружками для першого вікна частково представлені спектри «гармонік», які розраховані за формулами (2)-(4) при $\tau = \kappa$. Згідно з [2] враховувалися гармоніки з амплітудами, більшими ніж $0,001$: для трьох послідовних вікон включно до $q = 156$; 216 ; 76 з частотами до $487,5$; 675 ; $237,5$ Гц. Оскільки на інтервалі $0,32$ с цикл $0,02$ с розміщується ціле число разів, амплітуда гармоніки 50 Гц ($q = 16$) визначається точно. Інтергармоніка частотою 4 Гц відсутня – її потужність розподілилася по частотах $3,125$ і $6,25$ Гц ($q = 1$ і 2). З'явилися постійні складові ($q = 0$), вищі гармоніки ($q = 32$; 48 ; ...) і квазігармоніки¹. Спектр гармонік змінюється від вікна до вікна, хоча фактично він є постійним.

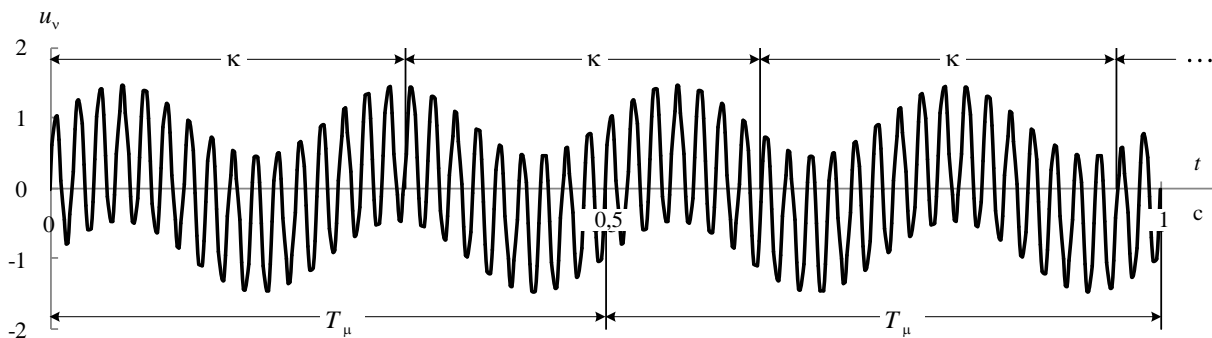


Рисунок 1 – Сума гармонічних сигналів з частотами 50 і 8 Гц

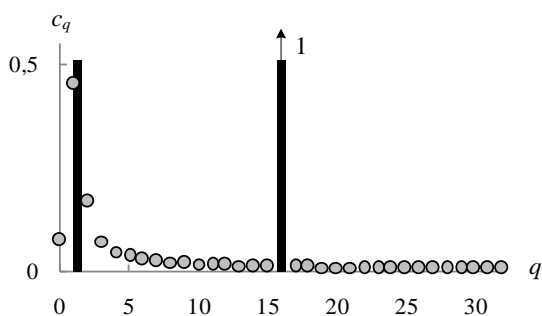


Рисунок 2 – Спектри гармонік: точний і визначений на інтервалі $0 \leq t \leq 0,32$ с

Аналогічно стоїть справа і з періодичними коливаннями напруги. Наприклад, ідеалізоване гармонічне коливання з частотою $\lambda \ll 50$ Гц приблизно описується виразом, до якого входить не тільки несуча частота 50 Гц, але і дві інтергармоніки з частотами $50 \pm \lambda$. Тривалість циклу T_μ залежить від співвідношення частот 50 Гц і λ : наприклад, при $\lambda = 25$ Гц маємо $T_\mu = 0,04$ с, а при 27 Гц – 1 с. При великих частотах (практично $\lambda > 6$ Гц) у циклі 20 мс з'являються інші гармоніки, які модулюються частотою λ , тому фактичний спектр гармонік значно збільшується.

Неперіодичні процеси. У діючих електричних мережах процес $u(t)$ є випадковим, для якого поняття «гармоніка» не має сенсу. Він описується спектральною щільністю, яка має великий максимум на частоті 50

¹ Обробка по циклах тривалістю $0,02$ с дає ще більшу похибку – спектр зовсім не має інтергармонік.

Гц і може мати максимуми на інших частотах. Оскільки в [2] показники несинусоїдальності нормуються окремо від складової 50 Гц, з процесу $u(t)$ доводиться виділяти несинусоїдальну складову $u_v(t)$ шляхом пропускання $u(t)$ через вузькосмуговий фільтр з частотою настройки 50 Гц, або поциклічним виділенням синусоїди 50 Гц на інтервалах 0,02 с.

Проаналізуємо похибки, які виникають при обробці осцилограм за стандартною процедурою на прикладі несинусоїдальної складової напруги на шинах 6 кВ електросталеплавильного цеху. Спектральна щільність $S_v(\omega)$ цієї складової представлена на рис. 3. Для можливості зіставлення з обробкою по вікнах щільність розраховувалася за час 0,32 с. У діапазоні частот від $\omega_m = 60$ до $\omega_M = 3500$ рад/с вона добре апроксимується виразом

$$S_v(\omega) = \frac{k\alpha}{2\pi} \left\{ \sigma_{v1}^2 \left[\frac{1}{\alpha_1^2 + (\omega_{01} + \omega)^2} + \frac{1}{\alpha_1^2 + (\omega_{01} - \omega)^2} + \frac{1}{\alpha_1^2 + (\omega_{02} + \omega)^2} + \frac{1}{\alpha_1^2 + (\omega_{02} - \omega)^2} \right] + \sigma_{v2}^2 \left[\frac{1}{\alpha_2^2 + (\omega_{03} + \omega)^2} + \frac{1}{\alpha_2^2 + (\omega_{03} - \omega)^2} \right] \right\}, \quad (5)$$

де величини $\sigma_{v1} = 0,03483$, $\sigma_{v2} = 0,02142$ вимірюється у відносних одиницях (в.о.), а параметри становлять: $k = 1,382$, $\alpha_1 = 50$, $\alpha_2 = 14$ с⁻¹, $\omega_{01} = 2330$, $\omega_{02} = 1420$, $\omega_{03} = 258$ рад/с. За цими межами щільність дорівнює нулю.

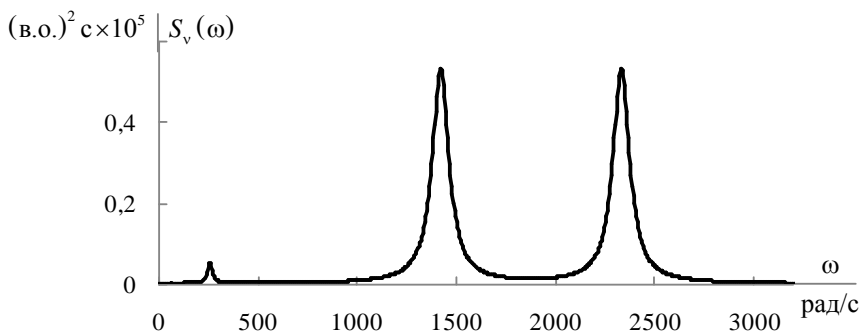


Рисунок 3 – Спектральна щільність несинусоїдальної складової напруги на шинах підстанції 6 кВ

У межах (ω_m, ω_M) щільність є безперервною функцією і при $\omega = 0$ дорівнює нулю. Однак розкладання на квазігармоніки дає дискретний спектр з постійною складовою, що не відповідає дійсності.

Якщо тривалість часу, за який розраховувалася спектральна щільність, не співпадає з 0,32 с, то спектр квазігармонік буде змінюватися від відрізка до відрізка по 0,32 с.

Вплив на електроприймачі. Похибки у визначенні спектрів приводять до похибок у оцінюванні

впливу несинусоїдальності напруги на електроприймачі. Для короткості розглянемо три ідеальні електроприймачі з активною, індуктивною і ємнісною провідностями (індекси R , L і C), показниками ЕМС яких є ефективні значення I_{Re} , I_{Le} і I_{Ce} несинусоїдальних складових відповідних струмів.

При активній провідності у в.о. струм і напруга співпадають. При індуктивній провідності для отримання в.о. струму напругу потрібно розділити на відносну величину частоти $v_* = v/50$ або $\omega_* = \omega/100\pi$, а при ємнісній – помножити на ту ж саму величину. З урахуванням цього для процесу (1) маємо

$$I_{Re} = \alpha/\sqrt{2}, \quad I_{Le} = \alpha/(\sqrt{2}v_*), \quad I_{Ce} = \alpha v_*/\sqrt{2}. \quad (6)$$

Якщо ж використовувати квазігармоніки з відносними частотами $\beta_{q*} = \beta_q/50$, то виключаючи складові з частотою 50 Гц (при $q = 16$), на кожному інтервалі по 0,32 с отримаємо

$$I_{Re} = \sqrt{\sum_{q=0, q \neq 16}^{\infty} c_q^2/2}, \quad I_{Le} = \sqrt{\sum_{q=0, q \neq 16}^{\infty} c_q^2/(2\beta_{q*}^2)}, \quad I_{Ce} = \sqrt{\sum_{q=0, q \neq 16}^{\infty} \beta_{q*}^2 c_q^2/2}, \quad (7)$$

де враховано, що при постійній напрузі, коли $q = 0$, ємнісний струм дорівнює нулю.

При $v = 4$ Гц і $\alpha = 0,5$ згідно з (6) точні значення дорівнюють: $I_{Re} = 0,3536$; $I_{Le} = 4,4194$ і $I_{Ce} = 0,0283$, у той час як на перших трьох інтервалах $I_{Re} = 0,353$; $0,340$; $0,365$; $I_{Le} = \infty$; $I_{Ce} = 28,17$; $44,42$; $12,32$. Різницю у результатах оцінювання ЕМС найбільш наочно видно на струмі через індуктивність, який при появі постійної складової, що не існує, стає нескінченним. Для випадкових завод струми визначаються за спектральною щільністю:

$$I_{Re} = \frac{1}{100\pi} \sqrt{\int_0^{\infty} S_v(\omega) d\omega} = \frac{\sigma_v}{100\pi}, \quad I_{Le} = \frac{1}{100\pi} \sqrt{\sum_{q=0, q \neq 16}^{\infty} \frac{S_v(\omega)}{\omega^2} d\omega}, \quad I_{Ce} = \frac{1}{100\pi} \sqrt{\int_0^{\infty} \omega^2 S_v(\omega) d\omega}. \quad (8)$$

Інтегрування щільності виду (5) здійснюється у межах від ω_M до ω_M . Усі інтеграли є табличними, але кінцеві вирази є громіздкими. Наприклад, квадрат ефективного значення струму крізь індуктивність становить

$$I_{Le}^2 = \frac{k\alpha \cdot 10^{-4}}{\pi^3} \left[\sigma_{v1}^2 \frac{\omega_{01}^2}{(\alpha^2 + \omega_{01}^2)} \left(\ln \frac{a_1 a_4}{a_2 a_3} - \frac{\omega_{01}^2 - \alpha^2}{\alpha} \operatorname{arctg} \frac{2\alpha \omega_{01} b_7}{b_1 b_4} \right) + \right. \\ \left. + \sigma_{v1}^2 \frac{\omega_{02}^2}{(\alpha^2 + \omega_{02}^2)} \left(\ln \frac{a_5 a_8}{a_6 a_7} - \frac{\omega_{02}^2 - \alpha^2}{\alpha} \operatorname{arctg} \frac{2\alpha \omega_{02} b_7}{b_2 b_5} \right) + \right. \\ \left. + \sigma_{v2}^2 \frac{\omega_{03}^2}{(\alpha^2 + \omega_{03}^2)} \left(\ln \frac{a_9 a_{12}}{a_{10} a_{11}} - \frac{\omega_{03}^2 - \alpha^2}{\alpha} \operatorname{arctg} \frac{2\alpha \omega_{03} b_7}{b_3 b_6} \right) \right], \quad (9)$$

де позначено:

$$a_{1,2} = \alpha^2 + (\omega_M \pm \omega_{01})^2, \quad a_{3,4} = \alpha^2 + (\omega_M \pm \omega_{01})^2, \quad a_{5,6} = \alpha^2 + (\omega_M \pm \omega_{02})^2, \quad a_{7,8} = \alpha^2 + (\omega_M \pm \omega_{02})^2, \quad a_{9,10} = \\ = \alpha^2 + (\omega_M \pm \omega_{03})^2, \quad a_{11,12} = \alpha^2 + (\omega_M \pm \omega_{03})^2, \quad b_{1-3} = \alpha^2 + \omega_M^2 - \omega_{0,1-3}^2, \quad b_{4-6} = \alpha^2 + \omega_M^2 - \omega_{0,1-3}^2, \quad b_7 = \omega_M^2 - \omega_M^2.$$

Вираз (9) дає кінцеву величину ефективного струму, тоді як розрахунки по квазігармоніках на інтервалах по 0,32 с, як і для періодичних процесів, дають постійні складові, а отже нескінчений струм.

Розглянуті приклади показують, що квазігармоніки не можна використовувати для оцінювання впливу на електроприймачі, а також для нормування завод на їх затискачах. Останнє доцільно виконувати шляхом встановлення норм на підвищення температури, як у [4], або з використанням стандартних електроприймачів: за дозами несинусоїдальності [3].

Висновки.

1. Використання інтергармонік є коректним лише для періодичної завади з тривалістю циклу, що не співпадає з 0,02 с.
2. Показники ЕМС за «гармоніками», які нормуються у ГОСТ 13109-97 у точках загального приєднання, є умовними і не можуть використовуватися для оцінювання впливу несинусоїдальності напруги на електричні мережі та електроприймачі.
3. У якості показників ЕМС для електрообладнання доцільно прийняти низько- і височастотну дози несинусоїдальності без нормування «гармонік».

ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000.
2. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине с 01.01.2000.
3. Куренный Э.Г. Оценка несинусоидальности напряжения при анализе качества электроэнергии / Э.Г. Куренный, А.П. Лютый // Электричество. – 2005. – № 8.
4. ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования. – Введ. 01.01.76.

Надійшла до редколегії 16.13.2011

Рецензент: І.П. Заболотний

Е. Н. ДМИТРИЕВА, И.Б. ПОНОМАРЕВ
Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»
Особенности анализа интергармоник.
Рассматривается задача оценивания несинусоидальности напряжения при наличии неканонического и непрерывного спектров. Указывается область корректности использования интергармоник. Анализируются ошибки использования стандартной процедуры обработки осциллограмм напряжения.
Електромагнітна сумісність (ЕМС), несинусоїдальність, гармоніки, спектральна щільність, помилки оцінювання ЕМС.

Е. DMITRIEVA, I. PONOMARJOV
State Institution of Higher Education
«Donetsk National Technical University»

Features of Interharmonics Analysis. The estimation task of voltage nonsinusoidality in the presence of not canonical and continuous spectrum is considered. The area of a correctness of interharmonics usage is indicates. Errors of usage of standard processing procedure of voltage oscillograms are analyzed.
Electromagnetic compatibility (EMC), nonsinusoidality, harmonics, spectral density, errors of EMC estimation.