

енергетична установка, відпрацьовані гази, комбінований газо-вітроелектроагрегат.

In this paper the principle and design solution and vortex gas-wind turbine to generate electricity through the use of the effluent gas the gas compressor units and the kinetic energy of the wind.

Gas compressor unit, loss of electricity, gas-turbine power units, wind energy, whirling wind power plant, exhaust, combined gas-electric generation wind.

УДК 621.311.001.57

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ СПОТВОРЕНЬ КРИВОЇ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ НАПРУГИ ВИЩИМИ ГАРМОНІКАМИ

А.М.ГЛАДКИЙ, кандидат фізико-математичних наук

Розроблено автоматизовану систему моделювання багаточастотних детермінованих і випадкових коливань із кратними частотами. Система дозволяє визначати форму, огинаючу і фазу детермінованих коливань, їх залежності від спектрального складу і початкових фаз гармонік, статистичні характеристики випадкових сумішей з кратними середніми частотами.

Електроенергія, якість, гармоніки, спотворення напруги, модель.

Питання якості електричної енергії набуває все більш важливого значення у зв'язку з її дефіцитом та підвищенням вартості [8]. У той же час, при розподілі, перетворенні і споживанні електроенергії мають місце погіршення показників якості, у т.ч. спотворення форми синусоїдальних струмів і напруг.

Основними джерелами спотворень є випрямлячі, зварювальні апарати, індукційні печі, двигуни постійного струму, перетворювачі постійного струму у змінний, сучасні електроспоживачі з нелінійною вольт-амперною характеристикою (офісна техніка, енергозберігаючі джерела світла, регулюючі тиристорні пристрої і перетворювачі частоти) та ін. [1, 7, 9, 10]. Оцінки спотворень проводять відповідно до вимог діючого в Україні ГОСТ 13109-97 шляхом вимірювань і відповідних обчислень коефіцієнтів n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ та спотворення синусоїдальності кривої міжфазної (фазної) напруги K_U [6]. Ці коефіцієнти характеризують відносний та відносний сумарний рівні вищих гармонік відповідно і не дають уявлення про реальні спотворення синусоїдальності напруги. Дослідження спотворень аналітичними методами є досить громіздкими і не завжди можливими [2, 3].

© А.М.ГЛАДКИЙ, 2015

Мета досліджень – розробка програмної системи дослідження характеристик детермінованих і випадкових коливань з кратними частотами.

Матеріали та методика досліджень. Розроблена система призначена для автоматизації досліджень функціональних залежностей (заданих аналітично або таблично) шляхом побудови і виведення на екран і (або) принтер графіків і (або) таблиць. Спілкування з користувачем здійснюється за допомогою меню-орієнтованого інтерфейсу, який має ієрархічну структуру. Система реалізована за допомогою інструментального комплексу BC 2.0 фірми BORLAND.

Результати досліджень. Формування детермінованих коливань із кратними частотами здійснюється ідеалізованим генератором гармонік шляхом подання в чисельному вигляді функцій:

$$\begin{aligned} & \sin(\omega t + \varphi_1); \\ & K_2 \sin[2(\omega t + \varphi_1) + \varphi_2]; \\ & K_n \sin[n(\omega t + \varphi_1) + \varphi_n]; \\ & K_N \sin[N(\omega t + \varphi_1) + \varphi_N], \end{aligned} \tag{1}$$

де t – час; ω – частота; $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \dots, \varphi_N$ – початкова фаза гармоніки; $n = 2, 3, \dots$ – номер гармоніки; N – кількість гармонік; $K_n = U_n/U_1$ – коефіцієнт гармоніки; U_1, U_n – амплітуда першої та n -ї гармоніки відповідно.

У часі t коливання подається 181 рівновіддаленим відліком за формулами (1) в інтервалі, рівному періоду коливань першої гармоніки. Кути $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \dots, \varphi_N$ задаються з кроком 10° від 0° до 360° . Кількість гармонік N і значення коефіцієнтів $K_2, K_3, \dots, K_n, \dots, K_N$ визначаються умовами експерименту.

Моделювання складного багаточастотного коливання, що містить кілька гармонік, здійснюється шляхом додавання значень цих гармонік у кожній відліковій точці періоду відповідно до одного з виразів:

$$u(t) = \sin(\omega t + \varphi_1) + K_n \sin[n(\omega t + \varphi_1) + \varphi_n]; \tag{2}$$

$$u(t) = \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^N K_n \sin[n(\omega t + \varphi_1) + \varphi_n]. \tag{3}$$

Форма коливання визначається шляхом розрахунку залежності $u(t)$ для заданих кількості N , розподілів коефіцієнтів K_n і початкових фаз φ_n гармонік (рис. 1).

Система забезпечує обчислення огибаючої U коливань (2), (3). Обчислення «класичної» огибаючої проводиться лише для вузькосмугових коливань, коли осциляції амплітуди і фази коливання відбуваються набагато повільніше, ніж коливання основної частоти [4].

Надширокосмугове коливання (2) відрізняється тим, що осциляції $u(t)$ можуть відбуватися протягом періоду основного коливання, а їх характер визначається складом і значеннями K_n і φ_n гармонік. Більше того, за певних значень K_n і φ_n , на кривій $u(t)$ виникають додаткові максимуми і залежність між амплітудою і фазою коливання стає неоднозначною (див. рис. 1, г). Тому розглядаються коливання $u(t)$ із одним максимумом. Умова існування лише одного максимуму на кривій $u(t)$ полягає в обмеженні коефіцієнта K_n значеннями $0 \leq K_n \leq n^{-2}$ [2, 3].

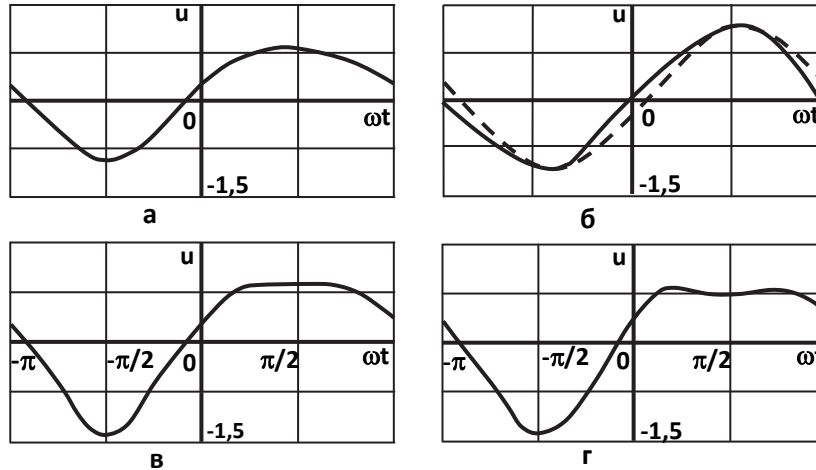


Рис. 1. Форма коливань (2) – неперервна лінія, і (7) – пунктирна лінія за різних рівнів другої гармоніки та її початкової фази:

а – $K_2=0,2$, $\varphi_2=\pi/2$; б – $K_2=0,2$, $\varphi_2 = 120^\circ$, $\varphi = 105^\circ$;
в – $K_2=0,25$, $\varphi_2=\pi/2$; г – $K_2=0,35$, $\varphi_2=\pi/2$

Із необхідної і достатньої умов існування максимуму диференційованої функції

$$\frac{du(t)}{dt} = 0; \quad \frac{d^2u(t)}{dt^2} > 0 \quad (4)$$

знайдемо:

$$\begin{cases} U = u(t_m), & \text{для } t = t_m, 0 \leq t_m \leq 2\pi / \omega; \\ U \geq u(t), & \text{для } t \neq t_m, 0 \leq t \leq 2\pi / \omega. \end{cases} \quad (5)$$

Підставляючи $\varphi = \omega t_m + \varphi_1$ у (2), із (4) отримаємо:

$$\begin{cases} \cos \varphi + nK_n \cos(n\varphi + \varphi_n) = 0; \\ \sin \varphi + n^2K_n \sin(n\varphi + \varphi_n) > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Огинаюча багаточастотного коливання U , визначена умовами (4), (5) задовольняє всім вимогам до огинаючої [4]. За фізичним змістом вона є істинним амплітудним значенням коливання, рівним вимірюваному ідеалізованим надширокосмуговим вимірювачем. Фаза φ , визначена умовами (6), за якої (2) досягає максимального значення $u(\varphi) = U$, приймається за фазу багаточастотного коливання. Фаза огинаючої, виміряна ідеалізованим вимірювачем без похибок, буде рівна φ .

Використовуючи U і φ , негармонічну надширокосмугову суміш (2) можна подати у вигляді "огинаючої" її гармонійного коливання:

$$u_0(t) = U \cos(\omega t - \varphi) \approx u(t). \quad (7)$$

Коливання (2) і (7) в одній і тій же точці періоду $t = t_m$ досягають амплітудного значення і мають у цій точці спільні дотичні і рівні значення. В інших точках періоду їх значення можуть відрізнятись (див. рис. 1, б). Тобто, огинаюча і фаза суміші (2) і коливання (7) збігаються.

Враховуючи викладене, в моделі значення огинаючої визначається шляхом знаходження максимального значення U коливання $u(t)$ за період, яке задовольняє умови (5) і фази φ цього максимального значення, яке задовольняє умови (6).

Результати моделювання подаються у вигляді таблиць значень огинаючої $U(K_n, \varphi_n)$ і фази $\Phi(K_n, \varphi_n)$ або графіків цих функцій залежно від заданого режиму роботи системи (рис. 2). Таблиці значень функцій огинаючої $U(K_n, \varphi_n)$ і фази $\Phi(K_n, \varphi_n)$ складаються з масивів значень для кожного значення φ_n , яке задається в діапазоні від 0 до 360° з кроком 5°, і всіх заданих значень K_n .

Випадкові процеси моделюються функціями від випадкових величин:

$$\begin{aligned} &K_1(t)\sin[\omega t + \varphi_1(t)]; \\ &K_2(t)\sin[2(\omega t + \varphi_1) + \varphi_2(t)]; \\ &K_n(t)\sin[n(\omega t + \varphi_1) + \varphi_n(t)]; \\ &K_N(t)\sin[N(\omega t + \varphi_1) + \varphi_N(t)], \end{aligned} \tag{8}$$

де випадкові величини $K_1(t), K_2(t), \dots, K_n(t), \dots, K_N(t)$ – розподілені за нормальним (гаусовським законом); $\varphi_1(t), \varphi_2(t), \dots, \varphi_n(t), \dots, \varphi_N(t)$ – за рівноймовірним законом.

Випадкові величини з рівноймовірною густиною розподілу формуються генератором випадкових чисел – функцією Random, яка генерує випадкове число в інтервалі $[0, 1]$ (1 – задана межа інтервалу). N рівномірно розподілених випадкових величин генеруються при N -кратному зверненні до цієї функції.

Випадкові величини, розподілені за нормальним законом, формуються процедурою Gauss. Процедура Gauss відповідно до центральної граничної теореми використовує суму 12 рівномірно розподілених випадкових чисел, сформованих генератором Random в інтервалі $[0, 1]$. Результат процедури визначається заданими стандартним відхиленням σ і математичним очікуванням m нормального розподілу. Випадкова величина v при виконанні процедури обчислюється за формулою:

$$v = (a - 6.0)\sigma + m,$$

де a – сума 12 рівномірно розподілених чисел в інтервалі $[0, 1]$; σ – задане стандартне відхилення; m – задане математичне очікування. Реалізація N випадкових величин отримується шляхом N -кратного звернення до процедури Gauss.

Якщо амплітуди і фази гармонік залишаються стаціонарними стосовно своїх законів розподілу, їх зміни в часі відбуваються зі швидкістю, яка не перевищує швидкість зміни $\cos \omega t$, а реалізації амплітуд гармонік обмежені значеннями $\sum_{n=2}^N K_n < \frac{1}{N^2}$, то можна ввести визначення огинаючої і фази

реалізації процесу $u(t) = \sum_{n=1}^N u_n(t)$ у вигляді максимального значення суміші за період основної гармоніки і фази максимального значення суміші згідно з умовою (4) та умовою (6), записаною у вигляді:

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N nK_n \cos(n\varphi + \varphi_n) = 0; \\ \sum_{n=1}^N n^2 K_n \cos(n\varphi + \varphi_n) > 0. \end{cases} \quad (9)$$

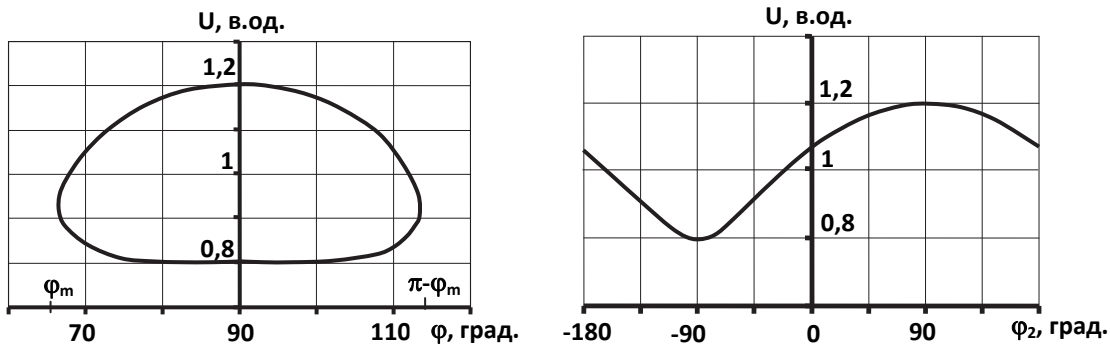


Рис. 2. Залежність огинаючої U від фази φ і початкової фази φ_2 . $K_2 = 0,2$

Дослідження статистичних властивостей процесу, а також його огинаючої і фази (функції розподілу, математичного очікування, стандартного відхилення та ін.) проводиться за допомогою процедури Tab1, реалізованої аналогічно [5]. Процедура Tab1 обробляє масив з певної кількості елементів, що визначається кількістю реалізацій випадкового процесу, яка вибирається в межах $10^3 - 10^4$.

Отримані при моделюванні залежності форми коливання і огинаючої U від рівня другої гармоніки та її початкової фази, форма коливання (7) та залежності огинаючої U від фази φ та початкової фази φ_2 наведено на рис.1 і 2.

Висновки. Розроблена система дозволяє досліджувати форму, огинаючу і фазу багаточастотних детермінованих коливань із кратними частотами, їх залежності від спектрального складу і початкових фаз гармонік, складати таблиці значень функцій огинаючої $U(K_n, \varphi_n)$ і фази $\Phi(K_n, \varphi_n)$, визначати статистичні характеристики випадкових сумішей з кратними середніми частотами. Система може використовуватися для оцінки спотворень синусоїдальної напруги вищими гармоніками, зокрема їх максимальних і допустимих значень, розробки методів мінімізації цих спотворень, визначення електромагнітної сумісності, обчислення похибок вимірювань амплітуди, частоти і різниці фаз від вищих гармонік та ін.

Список літератури

1. Влияние компьютерных нагрузок на работу электрических сетей зданий / [О. Григорьев, В. Петухов, В. Соколов, И. Красилов] // Мир связи. – 2002. – №12. – С. 24 – 36.
2. Гладкий А.М. Распределение вероятностей смеси случайных сигналов с кратными частотами / А. М. Гладкий // Радиоэлектроника. – 2000. – Т. 43, № 7 – 8. – С. 75 – 78.

3.Гладкий А.М. Статистические характеристики искажений детерминированного сигнала высшими гармониками / А.М. Гладкий, А.В. Желизко // Радиоэлектроника. – 1995. – Т. 38, № 3 – 4. – С.58 – 62.

4.Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Дрофа, 2006. – 720 с.

5.Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Т.2: Получисленные алгоритмы / Д. Кнут. – М.: Мир, 1977. – 724 с.

6.Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Правила устройства электроустановок: ГОСТ 13109-97. – [Чинний від 1999 – 01 – 01]. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 57с.

7.Ружовіч А. Вміст гармонік і коефіцієнт потужності – параметри якості енергії в уставах живлення люмінесцентних ламп з електромагнітними та електронними стабілізаторами / А. Ружовіч // Електроінформ. – 2003. – №2. – С. 10 – 11.

8.Савин К.Н. Управление качеством электроэнергии через стандарт ISO 50001 / К.Н. Савин, Г.Л. Попова, В.А. Сыщиков // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9–2. – С. 410 – 413.

9.Цадлер Е. Вплив сучасних освітлювальних устав на електроенергетичну мережу / Е. Цадлер, Е. Качмарек // Електроінформ. – 2003. – №1. – С. 28 – 29.

10.Evaluating Harmonic Concerns With Distributed Loads, Mark McGranaghan, Electrotek Concepts, Knoxville, Tenn., Nov. 2001.

Разработана автоматизированная система моделирования многочастотных детерминированных и случайных колебаний с кратными частотами. Система позволяет определять форму, огибающую и фазу детерминированных колебаний, их зависимости от спектрального состава и начальных фаз гармоник, статистические характеристики случайных смесей с кратными средними частотами.

Электроэнергия, качество, гармоники, искажения напряжения, модель.

Developed automated system for simulation of multi-frequency deterministic and random oscillations with multiple frequencies. The system allows to determine the form, envelope and phase of the deterministic oscillations, their dependence on the spectral composition and the initial phases of the harmonics, the statistical characteristics of random mixtures with multiples of the average frequency.

Electric power, quality, harmonics, voltage distortion, model.