

АНАЛІЗ ЯКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ НЕСТАЦІОНАРНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Розглянуто основні риси аналізу якості енергетичних процесів у системах електроживлення з нелінійними нестационарними елементами. Наведено особливості формування та використання енергетичних характеристик на основі операцій диференціювання та інтегрування. Представлено графічні інтерпретації візуалізації енергетичних процесів у просторових образах.

Співставний аналіз протікання енергетичних процесів у системах електроживлення з нелінійними нестационарними елементами (зокрема, автономних, децентралізованих та розподілених систем) при зміні їх параметрів та режимів роботи потребує у багатьох випадках введення поняття «якість енергетичних процесів» [4, 5]. Під цим поняттям надалі будемо розуміти відповідність енергетичних процесів сформульованому переліку вимог.

При аналізі якості енергетичних процесів у таких системах полігармонійність функцій $p(t)$, $u(t)$, $i(t)$ обумовлює необхідність застосування нових енергетичних характеристик, які мають свої особливості та можливі сфери застосування, а також відповідні форми їх графічного (просторового) відображення та співставлення [2, 3, 5–7].

Задачі аналізу та оптимізації енергетичних процесів потребують розробки адекватних моделей і, як наслідок, формування системи енергетичних характеристик, які б найбільш повно давали можливість оцінити всі виділені аспекти (сторони) протікання енергетичних процесів [2]. Оцінка енергетичних процесів у виділених системах, на відміну від аналізу електромагнітних процесів, який базується на аналізі форми кривих $u(t)$ та $i(t)$, передбачає аналіз енергетичних властивостей функції миттєвої потужності $p(t)$ та її складових (надалі для узагальнення позначимо ці функції $x(t)$). Для визначення елементів множини енергетичних характеристик $G_e = \{g_1, g_2, \dots, g_{g,j}, \dots, g_{ng}\}$ введемо множини функціональних перетворень $F_G = \{F_{g,1}, \dots, F_{g,j}, \dots, F_{g,ng}\}$ до функції $x(t)$. Тоді має місце співвідношення

$$F_G(x(t)) = G_e. \quad (1)$$

Кожне перетворення $F_{g,j}$, $j = 1, \dots, n_g$, в (1) виділяє на множині $\{x(t)\}$ відповідний клас еквівалентності [2].

У загальному випадку метою введення перетворення $F_{g,j}$, $j = 1, \dots, n_g$, є не відновлення функції $x(t)$ в іншому просторі, а побудова відношення еквівалентності згідно з визначеними критеріями. Вибір функціоналів $F_{g,j}$, $j = 1, \dots, n_g$, обумовлюється вибором необхідної форми математичної чи фізичної інтерпретації енергетичних процесів. Зауважимо, що множина G_e може включати різноманітні елементи, що визначаються за різних вихідних передумов, функціональні перетворення $F_{g,j}$, $j = 1, \dots, n_g$, не є однотипними. Можливе існування зв'язків між окремими елементами, один елемент цієї множини для конкретного типу енергетичних процесів може бути більш інформаційним, ніж інший.

При розробці додаткових характеристик найпростішим шляхом є перенесення гармонічного підходу, ефективного при аналізі функцій $u(t)$, $i(t)$, на розгляд енергетичних процесів. Одним із шляхів побудови співвідношень для характеристики енергетичних процесів у виділених системах є використання спектрів сигналів. Якщо $\{\varphi_i, i = 1, \dots, n_\varphi\}$ – повна ортонормована система функцій в $L^2(T)$, то сигнал $x(t)$ можемо єдиним способом представити у вигляді

$$x(t) \approx x^*(t) = \sum_{i=1}^{n_\varphi} \alpha_i \varphi_i(t), \quad n_\varphi \in N, \quad t \in T, \quad (2)$$

де $\|\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n_\Phi}\|$ – вектор-рядок дійсних чисел.

Відображення сигналів узагальненим рядом Фур'є (2) дає змогу отримати мінімум похибки апроксимації сигналів, характеризувати сигнал зліченою системою коефіцієнтів узагальненого ряду. При цьому енергія сигналів визначається лише через суму енергій усіх складових розкладу (рівняння Парсеваля). Похибку представлення (2) $\xi = \|x(t) - x^*(t)\|$ згідно з теоремою Рісса-Фішера можна звести до довільно малої величини при відповідному зростанні n_Φ . Важливою задачею тут є вибір базису $\{\varphi_i, i = 1, \dots, n_\Phi\}$, для якого величина n_Φ мінімальна при заданих вихідних даних.

На основі елементів $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n_\Phi}$ при умові $x(t) \equiv p(t)$ та виборі базовими синусоїдальних функцій формується низка відомих співвідношень, які дозволяють проаналізувати характер протікання енергетичних процесів у окремих випадках [2, 3]. Але вони не дають змоги зробити загальні висновки про форму сигналу на періоді T роботи системи при необхідності врахувати несинусоїдальність сигналів $u(t)$ та $i(t)$. При спотвореннях форм сигналів для оцінки енергетичних процесів за кривою миттєвої потужності $p(t)$ необхідно визначити скла-

дові потоки, їх співвідношення, інтенсивність зміни енергетичних характеристик тощо при довільній формі кривих напруги та струму.

Інший підхід до побудови елементів множини G_e може ґрунтуватись на операціях інтегрування $I\{\dots\}$ та диференціювання $D\{\dots\}$ від 1-го до n_g -го порядку включно. Необхідно враховувати, що для досягнення найбільшої інформаційності енергетичні характеристики не мають бути лінійно залежними, що й забезпечується використанням операцій інтегрування $I\{\dots\}$ та диференціювання $D\{\dots\}$ в області L^2 .

На наш погляд, перспективним може бути суміщення двох наведених підходів. Наприклад, при побудові множини G_e потужністю n_g , перші n_{g1} характеристики формуються згідно з (1), а $n_{g2} = n_g - n_{g1}$ характеристик – з використанням операцій диференціювання $D\{\dots\}$ та/чи інтегрування $I\{\dots\}$.

Викладене вище покажемо на прикладі регулятора струму з R -навантаженням. Для цієї схеми при $U = 100$ В; $R = 1$ Ом та зміні кута регулювання вентиля α в межах від 0 до $\pi/2$. Розрахуємо активну P та реактивну потужність Фризе Q_Φ , як функції від кута регулювання вентиля α (відповідно криві 1 та 2 на рис. 1 а). Додаткові характеристики можна ввести, побудувавши залежності $dP/d\alpha$, $dQ_\Phi/d\alpha$ (відповідно криві 1 та 2 на рис. 1 б) чи $dP/dQ_\Phi(\alpha)$ (див. рис. 1 в).

Важливою складовою аналізу якості енергетичних процесів також є розробка процедур візуалізації енергетичних процесів у просторових образах [1–3, 5–8].

Аналіз якості вимагає здійснювати оцінку складних процесів, вироблення і прийняття рішень при одночасному розгляді декількох

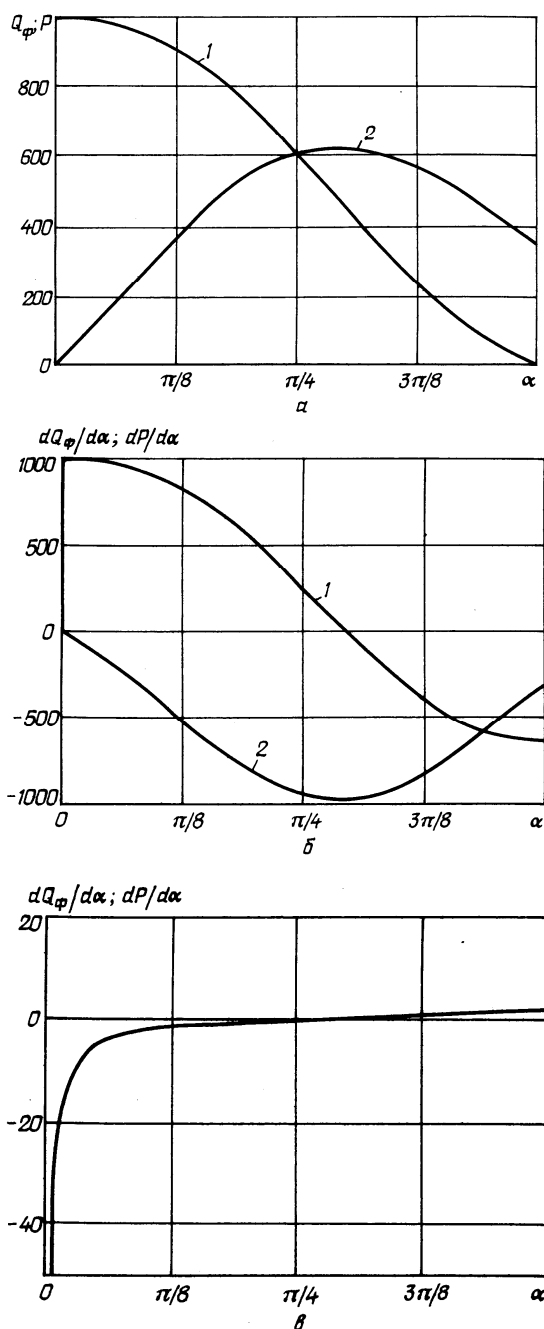


Рис. 1

параметрів різних за своєю суттю, розмірністю, шкалою виміру властивостей, іноді в умовах суперечливості та невизначеності відносин між параметрами, у випадку не співмірності кількісних та якісних показників.

Для вирішення задач візуалізації інформації доцільно використовувати графічні моделі, які інтерпретують складні об'єкти, процеси та явища за допомогою абстрактних образів [1, 7]. Можна виділити три аспекти застосування таких графічних моделей:

- образ-розв'язок – графічний образ призводить до вирішення задачі або розуміння ситуації;
- розв'язок-образ – рішення, отримане за допомогою комп'ютера, відображається у вигляді деякого образу;
- образ-задача – графічне відображення образу, з якого користувач може сформулювати задачу.

Вихідні дані для побудови графічних образів можуть вводиться в обчислювальне середовище за допомогою спеціальних датчиків, користувачем або генеруватися ЕОМ, а синтез графічного образу та його аналіз можуть здійснюватися (в інтерактивному режимі) за участі користувача. При поданні інформації щодо перебігу енергетичних процесів важливо враховувати принципи: лаконічність, узагальнення й уніфікацію, акцент на основних елементах, автономність, структурність, використання звичних асоціацій і стереотипів, строге співвіднесення композиційного рішення його функціональному призначенню, зміст відображуваної інформації.

Можуть бути запропоновані різні евристичні та алгоритмічні процедури згортки нескінченного ряду значень у просторовий графічний образ. Виділяють п'ять типів таких когнітивних образів: спіральну, лінійну динамічну, матричну, гармонічну та віялову динамічну ритмограми. Відоме одночасне відображення показників якості електроенергії (ПЯЕ) на одній круговій діаграмі, що дає змогу провести значення ПЯЕ згідно з ГОСТ 13109-97 за критеріями «Задовільно» чи «Незадовільно» [1–3, 5, 8].

Можна запропонувати спосіб відображення інформації з метою якісної оцінки значень ПЯЕ, яка є більш широкою, ніж «Задовільно» чи «Незадовільно» (див. рис. 2 а). На наведеній діаграмі Шумана встановлено, що:

- область (1) (на діаграмі - 0,3 відносних одиниць (в.о.)) – відповідає оцінці «Дуже добре»;
- область (2) (0,3 - 0,6 в.о.) – відповідає оцінці «Добре»;
- область (3) (0,6 – 1,0 в.о.) – відповідає оцінці «Нормально»;
- область (4) (1,0 – 1,2 в.о.) – відповідає оцінці «Погано».

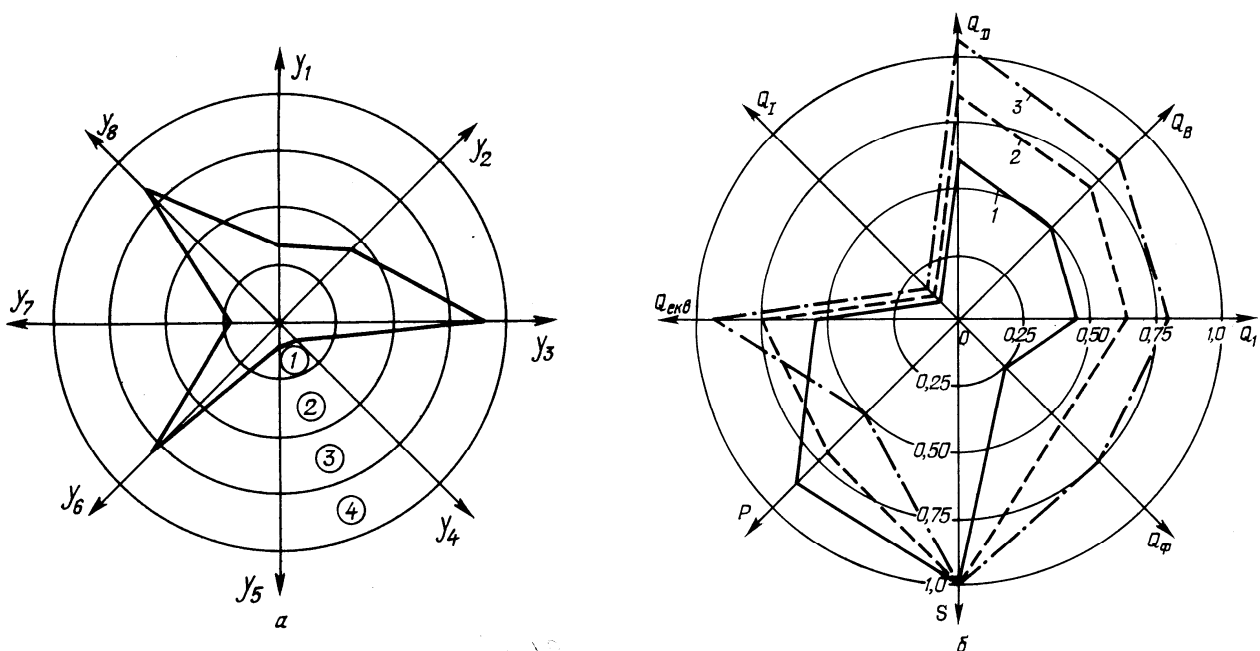


Рис. 2

За допомогою графічних моделей на одній діаграмі можна представити не тільки значення показників ПЯЕ, а й енергетичні характеристики або їхню комбінацію з ПЯЕ. Такі діаграми назвемо «енергетичним профілем» сигналу.

Для ілюстрації особливостей застосування енергетичних профілів сигналів розглянемо енергетичні процеси в системі «генератор – навантаження» при дії першої та третьої гармонік напруги та струму. Проаналізуємо відображення восьми енергетичних характеристик, які описують різні сторони процесів: реактивну потужність за першою гармонікою Q_1 , реактивну потужність Фризе Q_F , реактивну потужність Будеана Q_B , диференціальну реактивну потужність Q_D , інтегральну реактивну потужність Q_I , еквівалентну реактивну потужність Q_{EKB} , активну потужність P , повну потужність S [4]. Покладемо, що $u(t) = u_1(t) + u_3(t) = U_1 \sin \omega t + U_3 \sin(3\omega t + \varphi_{u,3})$; $i(t) = i_1(t) + i_3(t) = I_1 \sin \omega t + I_3 \sin(3\omega t + \varphi_{i,3})$; $U_1 = 100$ В; $U_3 = 30$ В; $I_1 = 100$ А; $I_3 = 40$ А.

На рис. 2 б наведено енергетичний профіль енергетичних процесів у перетині виділеної системи для восьми зазначених енергетичних характеристик, а також характеристику процесу при трьох значеннях кута φ : $\pi/6$ (фігура 1); $\pi/4$ (фігура 2); $\pi/3$ (фігура 3).

Розвитком запропонованої моделі візуалізації енергетичних характеристик, з одного боку, може бути відображення приростів функцій енергетичних процесів у рамках однієї діаграми, а також більш поглиблений просторовий аналіз характеристик енергетичних процесів у часі та при зміні окремих режимних параметрів системи.

Рассмотрены основные черты анализа качества энергетических процессов в системах электропитания с нелинейными нестационарными элементами. Приведены особенности формирования и использования энергетических характеристик на основе операций дифференцирования и интегрирования. Представлены графические интерпретации визуализации энергетических процессов в пространственных образах.

The main features of the analysis of energy processes in power systems with nonlinear nonstationary elements are considered. An especially formation and use of energy performance based on the operations of differentiation and integration is mentioned. And the interpretations of visual energy processes in spatial imagery are presented.

1. Боумен У. Графическое представление информации. – М.: Мир, 1971. – 228 с.
2. Бутырин П.А., Мареева О.А. Геометрическая визуализация оценки качества электроэнергии // Электро. – 2006. – № 5. – С. 45.
3. Бутырин П.А., Шатунова О.А. Об одной оценке качества режимов электрических цепей постоянного и синусоидального токов // Изв. РАН. Энергетика. – 2003. – № 2. – С. 171–172.
4. Денисюк С. П. Загальні властивості енергетичних характеристик систем з перетворювачами електромагнітної енергії // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електроенергетика: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 1999. – С. 46–59.
5. Денисюк С.П., Сафроненко Є.В. Просторовий аналіз характеристик для систем адаптивного керування оптимізацією електропостачання // Мат. конф. «Енергетика. Екологія. Людина», 2009. – С. 141–144.
6. Мороз А.В., Терещенко Т.А. Вейвлет-преобразования дискретных функций в полярной системе координат // Електроніка і зв'язок. – 2007. – № 2. – С. 39–47.
7. Ракчеева Т.А. Анализ ритмической структуры данных методами когнитивной графики // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1992. – № 5. – С. 35–49.
8. Цицилиано О. СУЯ органів з оцінки відповідності. Моніторинг з використання методу Харінгтона // Стандартизація. Сертифікація. Якість. – 2008. – № 2. – С. 46–49.

Надійшла 7.10.2009