

УДК 621.317.73

М. Й. Бурбело, д. т. н., проф.; О. М. Кравець; К. С. Фомін**ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕЛІНІЙНИХ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Введено провідності нелінійного спотворення, які інтегрально характеризують нелінійність елементів, та розглянуто фізичні основи їх вимірювань.

Ключові слова: нелінійні об'єкти, гармонічні спектри, вимірювання параметрів.

Постановка завдання

У нелінійних електротехнічних об'єктах процеси споживання електричної енергії характеризують за допомогою повної S , активної P , реактивної Q потужностей та потужності спотворення D , причому

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}. \quad (1)$$

Потужність спотворення можна записати у вигляді суми ортогональних складових

$$D = \sqrt{D_P^2 + D_Q^2}, \quad (2)$$

які можна виразити через статичні параметри елементів.

Розглянемо нелінійний RL -двополюсник із послідовним з'єднанням резистивного й індуктивного елементів, нелінійні характеристики елементів якого апроксимовані парними степеневими поліномами струму

$$R(i) = a_0 + a_2 i^2 + \dots; \quad L(i) = b_0 + b_2 i^2 + \dots,$$

де $R(i)$, $L(i)$ – статичні опір та індуктивність нелінійних відповідно резистивного й індуктивного елементів; $a_0, a_2, \dots, b_0, b_2, \dots$ – статичні параметри відповідно резистивного й індуктивного елементів (коефіцієнти степеневих поліномів).

Наявність нелінійного резистивного елемента призводить до появи складової потужності спотворення D_P , а наявність нелінійного індуктивного елемента – до появи складової потужності спотворення D_Q , які можуть бути визначені за формулами:

$$D_P = I_1^2 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (R_{1k}(I_1))^2}; \quad D_Q = I_1^2 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (X_{1k}(I_1))^2}, \quad (3)$$

де $R_{1k}(I_1)$, $X_{1k}(I_1)$ – опори, які зв'язують k -ту гармоніку напруги на відповідно резистивному й індуктивному елементах з першою гармонікою струму I_1 . Останні виражаються через статичні параметри елементів [1]:

$$R_{11}(I_1) = a_0 + \frac{3}{4} a_2 I_1^2 + \frac{10}{16} a_4 I_1^4 + \dots;$$

$$R_{13}(I_1) = \frac{1}{4} a_2 I_1^2 + \frac{5}{16} a_4 I_1^4 + \dots; \quad R_{15}(I_1) = \frac{1}{16} a_4 I_1^4 + \dots; \quad \dots;$$

$$X_{11}(I_1) = \omega \left(b_0 + \frac{3}{4} b_2 I_1^2 + \frac{10}{16} b_4 I_1^4 + \dots \right);$$

$$X_{13}(I_1) = 3\omega \left(\frac{1}{4} b_2 I_1^2 + \frac{5}{16} b_4 I_1^4 + \dots \right); \quad X_{15}(I_1) = 5\omega \left(\frac{1}{16} b_4 I_1^4 + \dots \right); \dots$$

У разі паралельного з'єднання нелінійних елементів складові потужності нелінійного спотворення за синусоїдної напруги живлення

$$D_P = U_1^2 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (g_{1k}(U_1))^2}; \quad D_Q = U_1^2 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (b_{1k}(U_1))^2}, \quad (4)$$

де $g_{1k}(U_1)$, $b_{1k}(U_1)$ – провідності, які зв'язують k -ту гармоніку струму на відповідно резистивному й індуктивному елементах з першою гармонікою напруги U_1 .

Однак експериментальне визначення складових потужності спотворення D_P , D_Q можливе лише із застосуванням спектроаналізаторів і не знаходить практичного застосування в системах автоматичного керування нелінійними електротехнічними об'єктами через низьку швидкість.

Мета роботи

Метою роботи є розробка методу визначення потужності спотворення нелінійних електротехнічних об'єктів, що забезпечує високу швидкість.

Обґрунтування результатів

Значно більш простою порівняно з D_P , D_Q є оцінка потужностей спотворення відповідно для послідовного та паралельного з'єднання нелінійних елементів за формулами

$$\hat{D}_P = I_1^2 \sum_{k=2}^{\infty} R_{1k}; \quad \hat{D}_Q = I_1^2 \sum_{k=2}^{\infty} X_{1k}; \quad (5)$$

$$\hat{D}_P = U_1^2 \sum_{k=2}^{\infty} g_{1k}; \quad \hat{D}_Q = U_1^2 \sum_{k=2}^{\infty} b_{1k}. \quad (6)$$

У цьому випадку дійсні значення потужностей спотворення можна визначити через їх оцінки з урахуванням ефективного числа гармонічних складових з виразів

$$D_P^2 = \hat{D}_P^2 / n_P; \quad D_Q^2 = \hat{D}_Q^2 / n_Q, \quad (7)$$

де n_P , n_Q – ефективні числа гармонічних складових, що генеруються відповідно резистивним та індуктивним нелінійними елементами, які визначають за формулами

$$n_P = \frac{\left(\sum_{k=2}^{\infty} R_{1k} \right)^2}{\sum_{k=2}^{\infty} R_{1k}^2}; \quad n_Q = \frac{\left(\sum_{k=2}^{\infty} X_{1k} \right)^2}{\sum_{k=2}^{\infty} X_{1k}^2}; \quad n_P = \frac{\left(\sum_{k=2}^{\infty} g_{1k} \right)^2}{\sum_{k=2}^{\infty} g_{1k}^2}; \quad n_Q = \frac{\left(\sum_{k=2}^{\infty} b_{1k} \right)^2}{\sum_{k=2}^{\infty} b_{1k}^2}. \quad (8)$$

Оцінки потужностей нелінійного спотворення зручно представити чотирма складовими D_{nP} , D_{nQ} , які характеризують дію непарних гармонік, та D_{pP} , D_{pQ} , які характеризують дію парних гармонік, з відповідними ефективними числами гармонічних складових.

Звідси випливає можливість введення складових спектрального опору та спектральної провідності, що характеризують нелінійність об'єкта, у вигляді

$$X_{nP} = \frac{D_{nP}}{I_1^2}; \quad X_{nQ} = \frac{D_{nQ}}{I_1^2}; \quad X_{pP} = \frac{D_{pP}}{I_1^2}; \quad X_{pQ} = \frac{D_{pQ}}{I_1^2}; \quad (9)$$

$$b_{nP} = \frac{D_{nP}}{U_1^2}; \quad b_{nQ} = \frac{D_{nQ}}{U_1^2}; \quad b_{pP} = \frac{D_{pP}}{U_1^2}; \quad b_{pQ} = \frac{D_{pQ}}{U_1^2}. \quad (10)$$

Розглянемо можливість роздільного визначення складових спектральних опору та провідності нелінійних об'єктів з використанням залежностей струму $i(t)$ та його складової, зумовленої нелінійністю $i_H(t) = i(t) - i_1(t)$, де $i_1(t)$ – струм першої гармоніки. На рис. 1 зображено непарні, а на рис. 2 – парні косинусні гармонічні складові струму $i_H(t)$. В точці $t=10$ мс ординати непарних і парних косинусних гармонічних складових додаються, в точці $t=20$ мс – віднімаються. Отже, можна забезпечити визначення та розділення цих складових у разі, якщо знаки усіх складових однакові (додатні або від'ємні). Віднявши миттєві значення струму в цих точках і розділивши на два $[i_H(t=10\text{мс}) - i_H(t=20\text{мс})]/2$, можна забезпечити визначення непарних косинусних гармонічних складових. Навпаки, додавши миттєві значення струму в цих точках і розділивши на два $[i_H(t=10\text{мс}) + i_H(t=20\text{мс})]/2$, можна забезпечити визначення парних косинусних гармонічних складових.

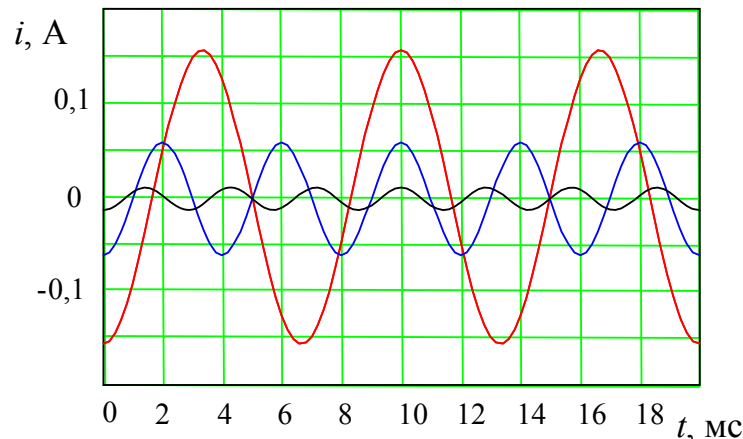


Рис. 1. Непарні косинусні складові струму

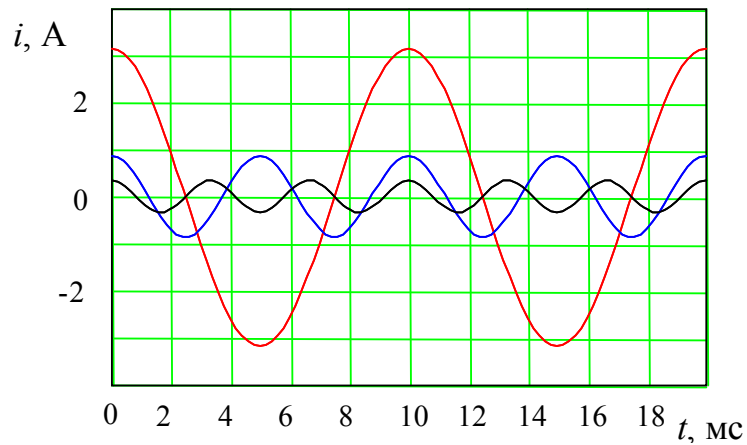


Рис. 2. Парні косинусні складові струму

Слід звернути увагу на те, що парні косинусні гармоніки не дорівнюють нулю в точках $t=5$ мс та $t=15$ мс. У разі знакозмінних парних косинусних складових, наприклад, якщо четверта гармоніка має від'ємний знак, то миттєве значення струму в цих точках дорівнює від'ємному значенню суми їх амплітудних значень.

На рис. 3 зображено залежності знакозмінних непарних, а на рис. 4 – парних синусних гармонічних складових струму $i_H(t)$. В точці $t=5$ мс і в точці $t=15$ мс ординати знакозмінних непарних синусних гармонічних складових додаються. В цих точках ординати парних синусних гармонічних складових дорівнюють нулю. Однак, як було відмічено раніше, в цих точках впливають парні косинусні гармонічні складові, причому в обох точках цей вплив однаковий. Віднявши миттєві значення струму в цих точках і розділивши на два $[i_H(t=5\text{мс}) - i_H(t=15\text{мс})]/2$, можна забезпечити визначення знакозмінних непарних синусних гармонічних складових. І, навпаки, додавши миттєві значення струму в цих точках і розділивши на два $[i_H(t=5\text{мс}) + i_H(t=15\text{мс})]/2$, можна забезпечити визначення знакозмінних парних косинусних гармонічних складових.

Не визначеними залишаються знакозмінні непарні косинусні складові та знакопостійні непарні синусні складові, а також парні синусні складові. Для визначення інтегрального вмісту цих складових необхідно використати спектральний фазовертач, який забезпечує фазовий зсув кожної гармоніки на кут $\pi/2$ [2].

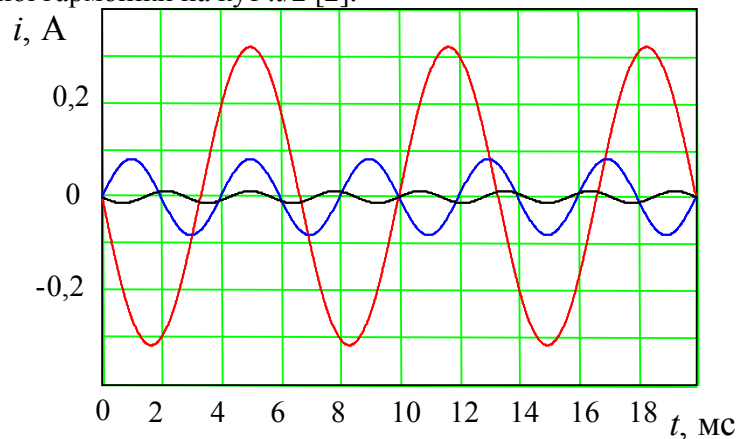


Рис. 3. Непарні знакозмінні синусні складові струму

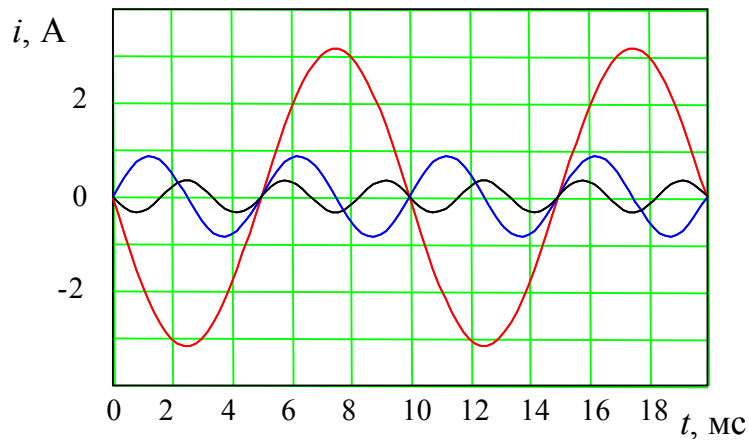


Рис. 4. Парні синусні складові струму

На рис. 5 зображено залежність струму $i(t)$ та його складової, зумовленої нелінійністю $i_H(t)=i(t)-i_1(t)$, об'єкта, представленого паралельною RL -схемою заміщення з нелінійним індуктивним елементом, нелінійна характеристика якого зображена на рис. 6. У даному випадку використано косинусне представлення гармонічного спектра $u(t)=311\cos\omega t$. Гармонічний спектр струму подано в табл. 1.

Зафіксувавши значення складової струму, зумовленого нелінійністю $i_H(t)$, в точці $t=5$ мс або $t=15$ мс можна визначити інтегральний вміст вищих непарних гармонік $i_H(t=5\text{мс})=-i_H(t=15\text{мс})=0,414$ А. Сума амплітудних значень третьої, п'ятої та сьомої гармонік струму дорівнює 0,412 А (табл. 1).

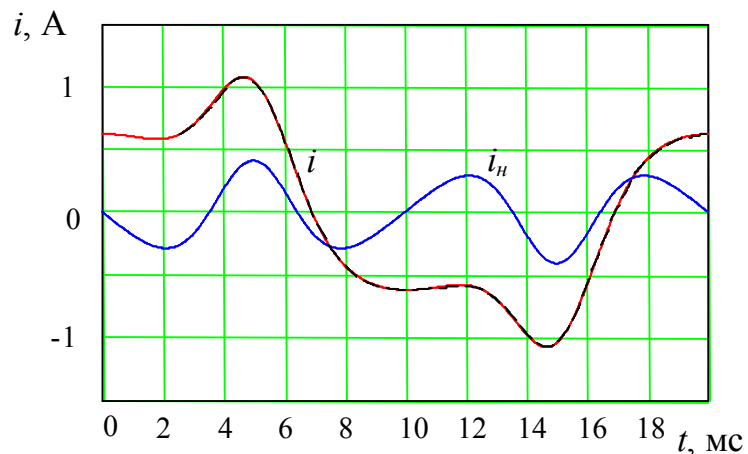


Рис. 5. Залежність струму через об'єкт з нелінійним індуктивним елементом

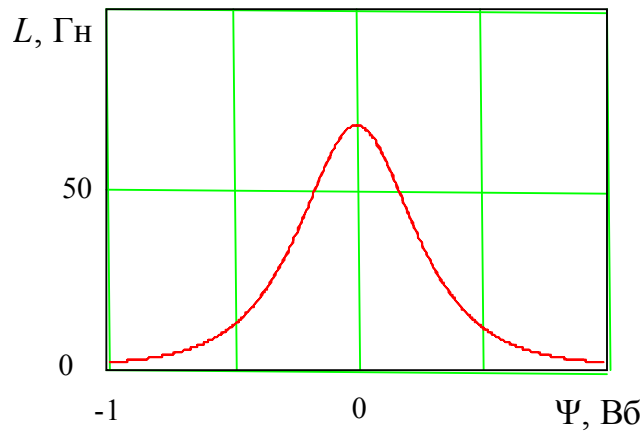


Рис. 6. Нелінійна характеристика індуктивного елемента

Таблиця 1

Гармонічний спектр струму через об'єкт з нелінійним індуктивним елементом

ν	1	2	3	4	5	6	7
a_ν	0,620	0	0	0	0	0	0
b_ν	0,634	0	-0,318	0	0,082	0	-0,012

Таким чином, у даному випадку нелінійний об'єкт характеризується трьома провідностями: активною, реактивною та реактивною провідністю спотворення. Провідність спотворення $b_{nQ} = \frac{0,414}{220} = 1,88 \cdot 10^{-3}$ См. Ефективне число гармонічних складових, що генеруються індуктивним нелінійним елементом, становить $n_{nQ} = 1,59$.

На рис. 7 зображено залежність струму $i(t)$ та його складової, зумовленої нелінійністю $i_n(t)$, об'єкта, представленого паралельною RL-схемою заміщення. Нелінійні характеристики резистивного та індуктивного елементів подані на рис. 8. Гармонічний спектр струму наведений в табл. 2.

Зафіксувавши значення складової струму, зумовленої нелінійністю $i_n(t)$, в точці $t=5$ мс або $t=15$ мс ($i_n(t=5\text{мс}) = -i_n(t=15\text{мс}) = 0,422$ А), можна визначити інтегральний вміст вищих непарних синусних гармонік, що характеризують нелінійність індуктивного елемента. Сума амплітудних значень третьої, п'ятої, сьомої та дев'ятої гармонік струму дорівнює 0,421 А (табл. 2).

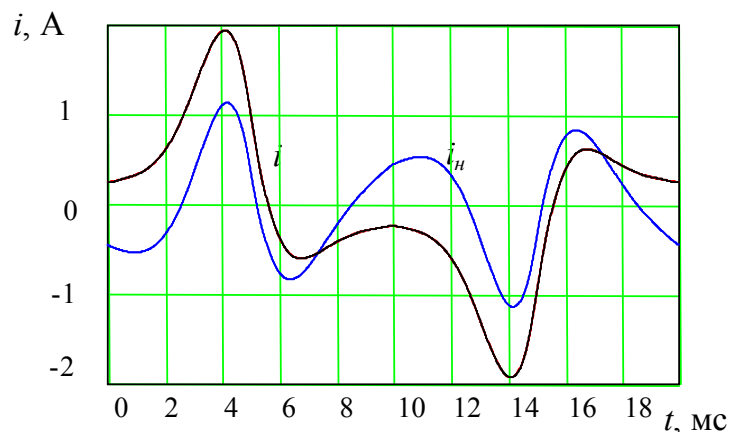


Рис. 7. Залежність струму через об'єкт з нелінійними індуктивним та резистивним елементами

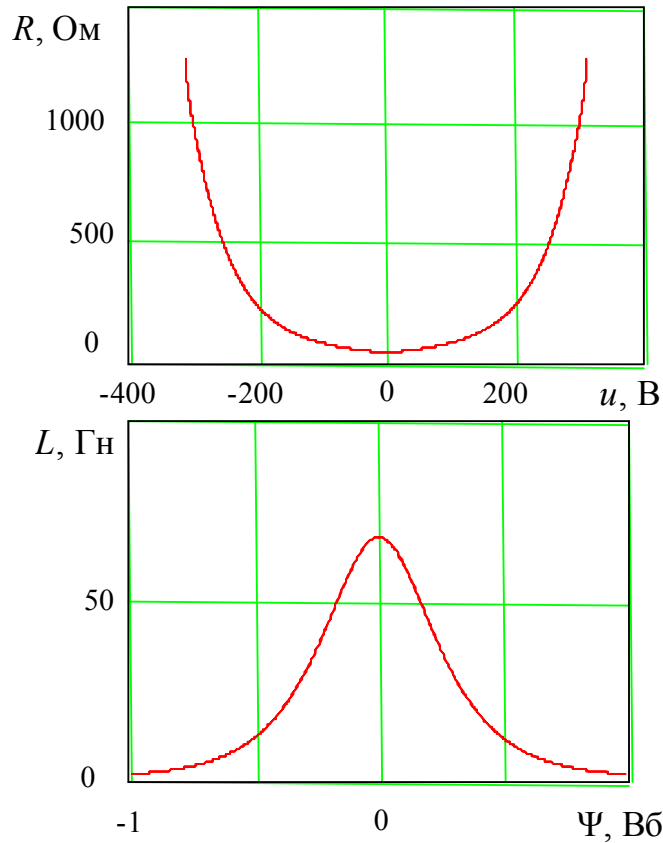


Рис. 8. Нелінійні характеристики резистивного та індуктивного елементів

Таблиця 2

Гармонічний спектр струму через об'єкт з нелінійними резистивним та індуктивним елементами

ν	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a_{ν}	0,694	0	-0,665	0	0,309	0	-0,115	0	-0,041
b_{ν}	0,634	0	-0,321	0	0,085	0	-0,013	0	0,002

Для визначення інтегрального вмісту вищих знакозмінних непарних косинусних гармонік, що характеризують нелінійність резистивного елемента, необхідно використати спектральний фазоповертач.

Отже, у даному випадку нелінійний об'єкт характеризується чотирма провідностями: активною та реактивною провідностями, а також двома реактивними провідностями спотворення $b_{nR} = \frac{1,184}{220} = 5,38 \cdot 10^{-3} \text{ СМ}$, $b_{nQ} = \frac{0,422}{220} = 1,92 \cdot 10^{-3} \text{ СМ}$. Ефективні числа гармонічних складових, що генеруються нелінійними елементами, будуть $n_{nR} = 2,56$, $n_{nQ} = 1,62$.

Висновки

Нелінійні об'єкти, окрім активної та реактивної провідності, можна характеризувати ще й чотирма провідностями нелінійного спотворення, які інтегрально характеризують нелінійність резистивного та індуктивного елементів і характер цієї нелінійності. Розглянуто фізичні основи їх вимірювань. Показано, що використання миттєвих значень струмів

дозволяє здійснювати вимірювання параметрів нелінійних об'єктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сверкунов Ю. Д. Идентификация и контроль качества нелинейных элементов радиоэлектронных схем (спектральный метод). Ю. Д. Сверкунов – М.: Энергия, 1975. – 75 с.
2. Штамбергер Г. А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания) / Г. А. Штамбергер; Под ред. К. Б. Карандеева. – Новосибирск: Наука, 1972. – 164 с.

Бурбело Михайло Йосипович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Кравець Олександр Миколайович – асистент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.
Вінницький національний технічний університет.

Фомін Кирило Сергійович – студент Сумського державного університету.