

УДК 621.311.1:621.365.2

Турковський В.Г.<sup>1</sup>, Турковський О.В.<sup>2</sup>

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМАХ З НЕСТАЦІОНАРНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

*Наведена методика розрахунку квазіперіодичних динамічних режимів багатоелементних нелінійних схем підвищення електромагнітної сумісності, оснований на диференційному гармонічному методі, яка дозволяє визначити дозу коливань напруги з врахуванням низькочастотних складових.*

Установки з нестационарним режимом роботи негативно впливають на електропостачальні системи (ЕПС), створюючи електромагнітні завади. Оскільки електричні мережі не завжди мають достатню потужність для забезпечення належної якості електроенергії в ЕПС використовують різні пристрої, кожен з яких по-своєму впливає на передавання складових нестационарного струму чи інших компонентів коливань від власне споживача до мережі. Для порівняння таких пристроїв за ефективністю та оптимізації їх параметрів необхідно мати зручну для аналізу методику визначення повного спектру електромагнітної завади в умовах певного характеру динамічного навантаження.

В електропостачальних системах з потужним динамічним навантаженням часто має місце понижена якість електроенергії, а саме коливання й несиметрія напруги та спотворення її форми. Це негативно впливає як на мережу, так і на споживачів, а тому актуальною є задача розроблення пристроїв для підвищення якості електроенергії та оптимізації їх параметрів.

Ефективними пристроями зменшення коливань напруги і здійснення симетрування в ЕПС з дуговими сталеплавильними печами та іншими установками з аналогічним режимом роботи є стабілізуювальні пристрої динамічного навантаження, виконані на основі індуктивно-ємнісних перетворювачів [1, 2]. Дослідження ефективності зменшення коливань напруги у таких схемах проводилась, в основному, лише за розмахом зміни напруги [2]; при цьому недостатньо враховувався вплив на флікер змін частотного спектру коливань, обумовлених схемами стабілізуювальних пристроїв.

Для об'єктивної оцінки впливу динамічного навантаження на ЕПС необхідно мати інтегральні характеристики коливань напруги у системах з нестационарним навантаженням, що враховували б частотний спектр коливань, а також нелінійності навантаження й елементів стабілізуювальних схем та були представлені у формі, зручній для проведення аналізу.

Метою статті є представлення основаної на диференційному гармонічному методі методики визначення повного спектру електромагнітної завади, в тому числі й дози коливань напруги, в ЕПС, що містять установки з динамічним квазіперіодичним режимом роботи та нелінійними елементами.

Електромагнітні процеси у схемі електропостачальної системи з стабілізуювальним і пристроями динамічного навантаження описуються матрично-векторним рівнянням, яке у методі контурних координат має вид:

$$\Gamma L \Gamma, \frac{di}{dt} + \Gamma R \Gamma, + \Gamma C^{-1} \Gamma, \int i dt = \Gamma e, \quad (1)$$

<sup>1</sup> НУ "Львівська політехніка", канд. техн. наук, доц.

<sup>2</sup> НУ "Львівська політехніка", зав. лаб.

де  $i$  – багатовимірний вектор-стовпець контурних координат (контурних струмів, потокозчеплень тощо);  $\Gamma$ ,  $\Gamma_i$  – друга матриця інцидентів схеми і транспонована матриця;  $L$ ,  $R$ ,  $C$  – матриці індуктивностей, резистансів та ємностей віток схеми;  $e$  – багатовимірний вектор-стовпець ЕРС віток кола.

У вітках елементів схеми, що описується рівнянням (1), є елементи, що еквівалентують динамічне навантаження та нелінійні елементи. Це навантаження може мати детерміновані чи стохастичні зміни. За умови періодичності еквівалентний резистанс вітки з динамічною зміною  $r_i(t)$  може бути представлений у виді залежності:

$$r_i(t) = r_{mi} + r_{vi} \sin(2\pi f_v t + \varphi), \quad (2)$$

де  $r_{mi}$ ,  $r_{vi}$  – математичне сподівання й амплітуда зміни резистансу  $i$ -ї вітки;  $f_v$  – частота зміни резистансу навантаження,  $f_v = f/b$ ,  $b \in N$ ;  $f$  – частота ЕРС джерела живлення.

Розв'язання системи (1) за умови (2), проведене для окремих варіантів лінійних кіл з використанням функцій Туркіна [3], чи інших методів дослідження параметричних кіл [4] дозволяє представити струм  $j$ -ї вітки у такій формі:

$$i_j = I_{0j} + \sum_{n=-k}^k (I_{cjb\pm n} \cos(b \pm n)2\pi f_v t + I_{sjb\pm n} \sin(b \pm n)2\pi f_v t) \quad (3)$$

де  $I_{0j}$  – постійна складова струму;  $I_{cjb\pm n}$ ,  $I_{sjb\pm n}$  – косинусна і синусна складові струму відповідної частоти.

З рівняння (3) видно, що у спектрі струму вітки є складові з частотами, кратними частоті зміни резистансу навантаження  $b-n, \dots, b-1, b, b+1, \dots, b+k$ . Враховуючи, що при  $b=n$  різниця  $b-n=0$ , даний спектр частот може бути поданий у формі наступного ряду:  $v=0, v=1, \dots, v=b, \dots, v=b+k$ , де  $v$  – порядковий номер гармоніки, причому  $v=1$  відповідає частоті  $f_v$  зміни резистансу навантаження.

Виходячи з такого представлення спектра частот струм вітки (3) може бути записаний у формі ряду:

$$i_j = I_{0j} + \sum_{v=1}^m (I_{c_jv} \cos v 2\pi f_v t + I_{s_jv} \sin v 2\pi f_v t), \quad (4)$$

де  $m$  – порядковий номер останньої з враховуваних гармонік.

Очевидно, що при використанні форми запису струму (4) за основну (нижчу) частоту приймається частота зміни динамічного навантаження; при цьому частота вимушувальних сил є кратною  $b$ .

За струмами віток у формі (4) можуть бути визначені напруги, у тому числі й напруги вузлів, для яких знаходять характеристики коливань напруги

$$u_j = U_{0j} + \sum_{v=1}^m (U_{c_jv} \cos v 2\pi f_v t + U_{s_jv} \sin v 2\pi f_v t). \quad (5)$$

Наявність напруг вузлів у формі (5) дозволяє визначити інтегральну характеристику коливань напруги – дозу коливань напруги

$$\psi = \frac{1}{\Theta} \int_{t-\Theta}^t \sum g_j^2 U_j^2 dt, \quad (6)$$

де  $g_j$  – коефіцієнт приведення дійсних розмахів зміни напруги до еквівалентних;  $\Theta$  – інтервал часу усереднення, що становить 10 хв.

За напругами вузлів у формі (5) можуть бути також визначені симетричні складові координат режиму й коефіцієнт зворотної послідовності, а також вищі гармоніки чи субгармоніки, обумовлені як дією змінного у часі навантаження, так і нелінійністю елементів стабілізуювального пристрою чи навантаження.

Для отримання усталених значень струмів у схемах зі стабілізуювальними пристроями динамічного навантаження у формі (4) використано диференційний гармонійний метод [5], що дозволяє за вихідною системою рівнянь (1) знайти характеристики періодичних процесів електротехнічних пристроїв з нелінійними елементами.

Система (1) може бути представлена у формі:

$$\frac{d\psi}{dt} + v + u_c = e_k, \quad (7)$$

де  $\psi$  – багатовимірний вектор стовпець потокозчеплень;  $v, u_c$  – багатовимірні вектори-стовпці спадів напруг на резистивних та ємнісних елементах;  $e_k$  – багатовимірний вектор-стовпець контурних ЕРС.

Для знаходження періодичного розв'язку апроксимація змінних  $\psi, v, u_c, e_k$  проведена обмеженими тригонометричними рядами виду (4). Після підстановки цих рядів у (7) з врахуванням операцій диференціювання та інтегрування отримана система нелінійних скінчених рівнянь, яка у матрично-векторній формі запису матиме вид:

$$\omega D^* \psi_r^* + V_r^* + U_{cr}^* = E_r^*, \quad (8)$$

де  $A_r^* = \psi_r^*, V_r^*, U_{cr}^*, E_r^*$  – складені вектори амплітуд гармонічних складових;  $D^*$  – складена матриця диференціювання.

Кожен зі складених векторів амплітуд має своїми компонентами прості вектори амплітуд контурних координат. У розгорнутій формі запису складені вектори мають вид:

$$A_r^* = (A_{10}, A_{1c1}, A_{1s1}, \dots, A_{1sm}, A_{20}, A_{2c1}, A_{2s1}, \dots, A_{2sm}, \dots, A_{km}) \quad (9)$$

де  $A_{i0}$  – постійна складова  $i$ -ої контурної координати;  $A_{icv}, A_{isv}$  – косинусна та синусна складова  $v$ -ої гармоніки  $i$ -ої контурної координати;  $k$  – кількість незалежних контурів.

Координати режиму рівняння (8) можуть бути отримані ітераційним методом за наявності відповідного нульового наближення багатовимірного вектора невідомих  $I_{r(0)}^*$  з врахуванням зв'язків між складеними векторами амплітуд  $\psi_r^* = f(I_r^*), V_r^* = f(I_r^*)$ . Ці зв'язки можуть бути встановлені через нелінійні чи динамічні функційні залежності для миттєвих значень координат режиму елементів [5]

$$\psi_e = f(i_e); \quad (10)$$

$$v_e = f(i_e, t), \quad (11)$$

де  $\psi_e, v_e, i_e$  – відповідно потокозчеплення, напруга та струм нелінійного чи динамічного елемента.

За наявності початкового значення вектора амплітуд гармонік  $I_{r(0)}^*$  можуть бути побудовані періодичні функції  $i_c^*$  у формі сіткового відображення часової залежності. Для  $i$ -ї координати вектор амплітуд сіткового відображення знаходиться за допомогою матриці зворотного гармонічного перетворення  $F$  [5]:

$$i_{ie} = F I_{ir}^*. \quad (12)$$

За сітковим відображенням (12), використовуючи функційні залежності (10) і (11), визначаються вектори сіткових відображень  $\psi_{ec}, v_{ec}$ . Ці сіткові відображення є періодичними функціями і можуть бути розкладені в ряд Фур'є, коефіцієнти якого можуть бути знайдені чисельним методом. Формалізоване визначення векторів амплітуд гармонічних складових проводиться за допомогою матриці прямого гармонічного перетворення  $G$  [5].

У результаті проведених перетворень система (8) може бути зведена до наступного нелінійного матрично-векторного алгебраїчного рівняння з динамічною зміною параметрів:

$$Z_r^* \cdot I_r^* = E_r^*, \quad (13)$$

де  $Z_r^* = \omega D^* L_r^* + R_r^* + (\omega D^* C_r^*)^{-1}$  – матриця диференційних гармонічних параметрів схеми.

Елементи багатовимірного вектора ЕРС  $E_r^*$  представлені гармонічними складовими у формі (9). За наявності динамічного навантаження з частотою зміни  $f_v = f/b$  чи для розрахунку субгармонік проводиться перерахунок частоти вимушувальних сил, а також індуктивностей, ємностей елементів та магнітних опорів віток через коефіцієнт  $b$ .

Розв'язання рівняння (13) може бути проведено ітераційним методом. Однак для забезпечення збіжності обчислювального процесу необхідно мати нульове наближення в області притягання кореня. Для його обчислення використаємо метод  $h$ -характеристик [6], як модифікацію методу продовження розв'язку по параметру.

Згідно з методом  $h$ -характеристик домножуємо вектор вимушувальних сил  $E_r^*$  в (8) на скалярний параметр  $h$

$$\omega D^* \Psi_r^* + V_r^* + (\omega DC)^{-1} I_r^* = h E_r^*. \quad (14)$$

При  $h=0$  в (14) вимушувальна сила відсутня й система має тривіальний (нульовий) розв'язок. Якщо ж  $h=1$  розв'язок системи  $I_r^* = I_r^*(h)$  проходить через корінь нелінійної системи рівнянь (14).

Нелінійну залежність  $I_r^*(h)$  можна отримати проінтегрувавши деяке нелінійне векторне диференціальне рівняння, по відношенню до якого ця залежність буде інтегральною. Щоб отримати це нелінійне векторне диференціальне рівняння продиференціюємо (14) по параметру  $h$ :

$$\omega D^* \frac{d\Psi_r^*}{dh} + \frac{dV_r^*}{dh} + (\omega D^* C^*)^{-1} \frac{dI_r^*}{dh} = E_r^* \quad (15)$$

Після проведення диференціювання за правилами для складних функцій рівняння (15) набуває виду:

$$\left( \omega D^* \frac{d\Psi_r^*}{dI_r^*} + \frac{dV_r^*}{dI_r^*} + (\omega D^* C^*)^{-1} \right) \frac{dI_r^*}{dh} = E_r^*, \quad (16)$$

де  $\frac{d\Psi_r^*}{dI_r^*}$ ,  $\frac{dV_r^*}{dI_r^*}$  – матриці диференціальних гармонічних параметрів.

Матриці диференціальних гармонічних параметрів можуть бути представлені через матриці прямого та зворотного гармонічних перетворень та компоненти складених вузлових векторів

$$\frac{d\Psi_r^*}{dI_r^*} = \frac{d\Psi_r^*}{d\Psi_c^*} \cdot \frac{d\Psi_c^*}{di_c^*} \cdot \frac{di_c^*}{dI_r^*} = G^* \frac{d\Psi_c^*}{di_c^*} F^* \quad (17)$$

$$\frac{dV_r^*}{dI_r^*} = \frac{dV_r^*}{dV_c^*} \cdot \frac{dV_c^*}{di_c^*} \cdot \frac{di_c^*}{dI_r^*} = G^* \frac{dV_c^*}{di_c^*} F^* \quad (18)$$

де  $\frac{d\Psi_c^*}{di_c^*}$ ,  $\frac{dV_c^*}{di_c^*}$  – матриці диференціальних вузлових параметрів.

Матриці диференціальних вузлових параметрів визначаються за сітковим вектором  $i_c^*$  з врахуванням залежностей (10) і (11).

Матриці диференціальних гармонічних параметрів (17) і (18) встановлюють взаємозв'язки між окремими гармоніками за малих приростів їх амплітуд. Аналіз чисельних значень цих матриць дозволяє ще на попередніх стадіях розрахунків отримати узагальнені характеристики взаємовпливу окремих складових координат режиму, зокрема, взаємозв'язок основної й вищої гармонік для різної конструкції магнітопроводу електромагнітного реактора. Вказані матриці надають додаткові аналітичні можливості для дослідження схем.

Для визначення початкового наближення інтегрування (15) в обраному діапазоні зміни  $h$  може бути проведено чисельним методом. Разом з тим, за початковим наближенням для довільного  $h$  ітераційним методом може бути визначений точний розв'язок (14), тобто усі складові вектора  $I_r^*$ . Це дозволить у процесі чисельного інтегрування (16) розрахувати залежності для гармонічних складових координат режиму у функції відносної величини ЕРС віток схеми, тобто отримати результат розрахунку у виді функційної залежності від обраної змінної, що є зручною формою для проведення аналізу й оптимізації параметрів схем.

У процесі розв'язання (13) незалежною змінною може виступати не лише відносна ЕРС схеми, а й інша важлива для аналізу координата, наприклад, індукція феромагнітного реактора, ємність стабілізуючої конденсаторної батареї, довжина дуги тощо. За початковим наближенням для певної сукупності параметрів схеми й змінами за відповідною закономірністю незалежної координати результати розрахунку можуть бути отримані не у виді сукупності точок, як при чисельному інтегруванні (1), а у формі функційних залежностей. Сімейство таких залежностей дозволить зробити обґрунтовані висновки щодо поведінки й характеристик схем стабілізувальних пристроїв.

Таким чином диференційний гармонічний метод дозволяє розрахувати періодичні процеси у нелінійних схемах з динамічною зміною параметрів та отримати результат у формі, зручній для проведення аналізу схем не лише за дозою коливань напруги, а й за вищими чи субгармоніками та симетричними складовими, що підвищує якість порівняння й оптимізації схем стабілізуювальних пристроїв.

Для проведення розрахунків розроблено програмне забезпечення у середовищі Delphi, що включає в себе наступні програмні модулі:

- вводу вихідної Інформації та завдань на розрахунок;
- формування матриць і багатовимірних векторів вихідної системи рівнянь;
- формування матриць диференційних гармонічних параметрів статичної та лінійної частин схеми;
- формування матриць диференційних гармонічних параметрів динамічної та нелінійної частин схеми;
- знаходження за методом h-характеристик початкового наближення для нелінійної системи скінчених рівнянь;
- чисельного інтегрування за методом Кутта-Мерсона з інвертуванням координат для проходження особливих точок;
- чисельної ітерації за методом Ньютона;
- формування масивів результуючої інформації, оброблення та графічне представлення результатів.

### **Висновки**

1- Нестационарні квазіперіодичні динамічні режими нелінійних електричних схем можуть бути розраховані за допомогою диференційного гармонічного методу; він дозволяє отримати частотний спектр коливань напруги, вищі та нижчі гармонічні складові координат режиму та представити результат у формі зручних для аналізу функційних залежностей. Крім того метод дозволяє ще на попередніх стадіях розрахунків отримати узагальнені характеристики взаємовпливу окремих складових координат режиму, що підвищує якість аналізу схем.

2. Визначення частотного спектру коливань напруги дає можливість здійснити співставлення схем стабілізуювальних пристроїв нестационарного навантаження та їх варіантів за інтегральною характеристикою коливання напруги — дозою коливань напруги.

### **Перелік посилань**

1. *Милях АМ.* Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей / *А. Н. Милях, И. В. Волков.* - Київ, Наукова думка, 1974.-216с.
2. Ефективна система електропостачання дугових сталеплавильних печей змінного струму / *А.А. Малтовський, М.Й. Олійник, В.Г. Турковський, О.В. Турковський, В.В. Парафейник/І* Матеріали 2-ї Міжнародної конференції з управління використанням енергії. (Львів, 3-6.06.1997), київ 1998.-С. 19-22.
3. Таблицы и формулы функций. В.К. Туркина. — Л.: Ленинградский электротехнический институт связи, 1963. - 144 с.
4. *Гребенников Е.А.* Конструктивные методы анализа нелинейных систем / *Е.А. Гребенников, Ю.А. Рябов.* - М.: Наука, 1979. - 432 с.
5. *Глухивский Л.Й.* Расчет периодических процессов электротехнических устройств (дифференциальный гармонический метод) / *Л.Й. Глухивский.* - Львов\* Высшая школа, 1984. - 164 с.
6. *Фшыц Р.В.,* Математические основы теории электротехнических преобразователей / *Р.В. Фшыц.* - Київ; Наукова думка, 1979, - 208 с.

Стаття надійшла 17.03.2005