

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОШИРЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК  
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

*В статті запропоновано алгоритм розрахунку спектру наявних гармонік у вузлах і вітках живлячої електричної мережі. Алгоритм дозволяє проаналізувати проникнення гармонік струму від їх джерел в розподільні мережі і оцінити їх вплив на електроустановки живлячої мережі.*

*Вступ*

Наявність в системах електропостачання (СЕП) елементів, які мають нелінійну характеристику, зумовлюють спотворення синусоїдної кривої напруг і струмів. Таке відхилення кривих напруг і струмів від синусоїди прийнято досліджувати шляхом аналізу спектру гармонік [1]. Процеси, пов'язані з розрахунком гармонік в СЕП, впливом їх на якість електроенергії і зменшенням цього впливу, на сьогодні достатньо вивчені [1, 2].

З СЕП вищі гармоніки трансформуються в живлячі мережі і впливають на електричне об'єднання, яке віддалене від місця їх генерування [3]. Для компенсації негативного впливу несинусоїдності струмів та напруг необхідно мати повну інформацію щодо їх гармонічного спектру у кожній точці електричної мережі. В даній роботі пропонується метод і алгоритм розрахунку вищих гармонік в окремих елементах живлячих електричних мереж.

*Постановка задачі*

Проблема визначення рівнів гармонік в електричних мережах умовно ділиться на такі частини: виявлення джерела вищих гармонік, дослідження процесу поширення гармонік і міри відповідності їх встановленим нормам, оцінка впливу вищих гармонік на електроприймачі та розробка заходів щодо його зменшення.

В даній роботі алгоритм розрахунку розробляється за допущення, що електрична мережа симетрична і пасивна, тобто до неї може бути застосований принцип суперпозиції, що дозволяє розглядати кожну гармоніку окремо. Відповідно вибирається метод розрахунку струморозподілу в електричних мережах. Серед можливих методів розрахунку усталених режимів для розглядуваної задачі доцільно дослідити метод вузлових напруг з розв'язуванням системи рівнянь методом Гауса [4].

*Моделювання поширення гармонік*

Потоки потужності основної гармоніки і потоки потужності на гармонічних частотах в електричній системі, як це показано на еквівалентній схемі на рис. 1, взаємозв'язані. Генеруюча система електропостачання  $\Gamma$  є джерелом основної синусоїдальної напруги. Вона через опір системи  $R_c + jX_c$  живить навантаження  $R_n + jX_n$  через регульований статичний перетворювач. Потужність системи  $S_s$  передається споживачам через точки спільного приєднання (ТСП). Як правило, більша частина цієї потужності  $S_n$  живить навантаження, а менша  $S_n$  - перетворювач.

На рис. 1, б показані потоки гармонік в еквівалентній схемі. На ній генератор основної гармоніки  $\Gamma$  представлено своїм гармонічним опором. Джерелом гармонік струму є перетворювач, від якого частина потужності  $S_n$ , перетворена в потужність гармонік, повертається в систему  $S_{ce}$  і генератор  $S_{ze}$ . Більша частина потужності гармонік споживається навантаженням  $S_{nz}$ . Потужності  $S_{ce}$  і  $S_{ze}$ , пройшовши ТСП, розподіляються між паралельними елементами електри-

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет, д-р техн. наук. проф.

<sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет, канд. техн. наук. доц.

<sup>3</sup> Вінницький національний технічний університет, студент

чної мережі (лініями, трансформаторами) і викликають в них додаткові втрати та, спотворюючи напругу, погіршують умови роботи споживачів електроенергії в системі.

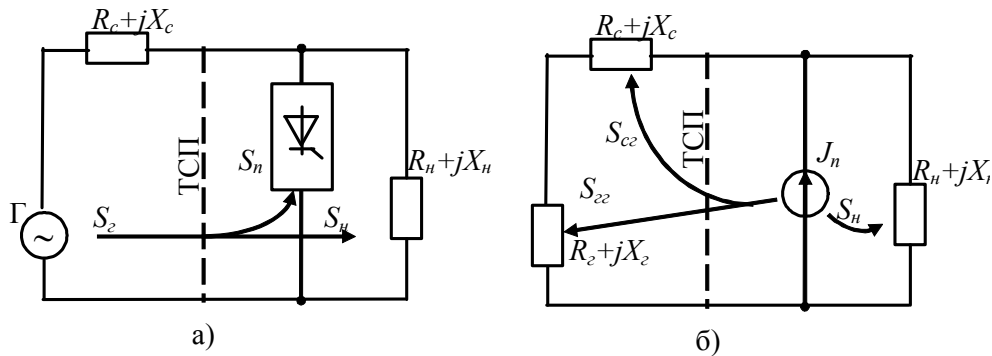


Рис.1 – Потоки потужності в електричній системі з гармоніками

Міра впливу гармонік на режим електричної мережі та споживачів електроенергії оцінюється за допомогою коефіцієнту спотворення синусоїдальної кривої напруги, який визначається за виразом [2]:

$$K_{U_i} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_{(v)i}^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_{(v)i}^2}}{U'_{ном}} \cdot 100 [\%], \quad (1)$$

де  $U_{(v)i}$  – діюче значення напруги  $v$ -ї гармоніки  $i$ -го вимірювання;  $U_{(1)i}$  – напруга прямої послідовності основної частоти,  $i$ -те вимірювання;  $n$  – номер останньої з гармонік, які враховуються.

Значення потоків потужності на гармонічних частотах в елементах електричної мережі визначаються за формулою:

$$S_i^v = 3 \sum_{v=1}^n (\dot{U}_{vi}^{ex} - \dot{U}_{vi}^{enx}) \cdot \dot{I}_{vi}, \quad (2)$$

де  $\dot{U}_{vi}^{ex}, \dot{U}_{vi}^{enx}$  – напруги входу і виходу чотириполосника, яким моделюється  $i$ -й елемент мережі [3];  $\dot{I}_{vi}$  – струм  $v$ -ї гармоніки в  $i$ -му елементі мережі.

Враховуючи (1), (2) та вимоги до моделювання процесу поширення гармонік [3], розроблено методику і алгоритм розрахунку режиму електричних мереж на кожній з гармонік. За основу прийнято алгоритм, викладений в [4]. Структурно-логічна схема адаптованого до гармонічного аналізу алгоритму приведена на рис. 2.

Оскільки навантаження задаються потужностями з врахуванням статичних характеристик, то розрахунок виконується в декілька ітерацій. На внутрішній ітерації методом Гаусса розв'язується система вузлових рівнянь:

$$Y_v \cdot \dot{U}_v = \dot{J}_v, \quad (3)$$

де  $Y_v$  – матриця вузлових провідностей електричної мережі на  $v$ -й гармоніці;  $\dot{U}_v$  – вектор напруг вузлів  $v$ -ї гармоніки відносно базисного вузла;  $\dot{J}_v$  – вектор задаючих струмів вузлів, в який входять і струми джерел гармонік.

На зовнішній ітерації уточнюються потужності в вузлах у відповідності з розрахованими напругами і номером поточної гармоніки, а також уточнюються складові вектора  $\dot{J}_v$ . Результати розрахунку режиму кожної гармоніки передаються в банк даних (БД) для подальшого аналізу.

Після завершення обчислень підсумкові результати передаються в графічну оболонку програми, де розносяться по елементах електричної мережі. Безпосередньо на мнемосхемі відображаються значення коефіцієнтів несинусоїдності напруги в вузлах, а також значення повних струмів і потужностей у вітках мережі. Параметри режиму будь-якої гармоніки, в тому числі й найбільш впливової, відображаються за викликом.

В програмі, в якій реалізовано розглянутий алгоритм, передбачено дослідження процесу обмеження рівня гармонік в системі за допомогою паралельних фільтрів. Оскільки фільтри, як правило, задаються своїми опорами на тій гармоніці, на яку вони настроєні, а розрахунок ведеться в "потужностях", то дані фільтрів перераховуються в потужності кожної гармоніки.



Рис. 2 – Алгоритм дослідження розповсюдження гармонік

За умови, що в настроєному на  $k$ -у гармоніку фільтрі  $kX_L = X_C/k$ , потужності фільтра на  $v$ -й гармоніці визначаються:

$$P_v = \frac{U_v^2 \cdot R}{R^2 + X_C^2 \cdot \gamma^2}, \quad Q_v = \frac{U_v^2 \cdot X_C \cdot \gamma}{R^2 + X_C^2 \cdot \gamma^2},$$

де  $R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$  - відповідно активний, індуктивний та ємний опори фільтра;  $P_v$  - втрати активної потужності в фільтрі;  $Q_v$  - потужність генерації фільтра;  $\gamma = \frac{v^2 - k^2}{k^2 \cdot v}$ .

В результаті розрахунку визначаються потоки потужності в елементах мережі  $S'_{cz}$  і  $S''_{cz}$ , які відрізняються від потоків потужності в мережі, коли в ній відсутні фільтри. Якщо стоїть задача визначення оптимальних місць установки і потужності фільтрів, то формулюється відповідна математична модель і задача розв'язується симплекс-методом [5]. При цьому розглянутий тут алгоритм і програма при моделюванні процесу поширення гармонік в електричній мережі використовуються як окремий програмний модуль.

Практично алгоритм дозволяє аналізувати протікання гармонік струму в мережі одночасно від необмеженої кількості джерел гармонік з будь-яким заданим спектром. Не обмежується також кількість фільтрів. Таким чином, сумарна генерація гармонік струму декількома перетворювачами і фільтрами, під'єднаними до шин електричної мережі, використовується для аналізу проникнення гармонік струму в дану мережу. Розроблена програма може використовуватись в проектній практиці, для оперативного контролю рівня гармонік в живлячих мережах, а також при дослідженні реальних умов електропостачання в точках приєднання споживачів електроенергії та встановленні відповідності їх нормованим.

#### *Висновки*

Для розрахунків і аналізу вищих гармонік, що генеруються в СЕП і поширюються в живлячі мережі, доцільно використовувати алгоритм, в основі якого використовується метод вузлових напруг з розв'язуванням системи лінійних рівнянь методом Гауса та розкладанням струмів на їх активні і реактивні складові. Такий підхід дозволяє виділяти окремі гармоніки зі спектру і досліджувати їх вплив окремо.

#### *Перелік посилань*

1. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / *И.В. Жежеленко., Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко и др.* // Под ред. И.В. Жежеленко.– М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
2. *Шидловский А.К.* Повышение качества энергии в электрических сетях / *А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов.* – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.
3. *Арриллага Дж.* Гармоники в электрических системах / *Дж. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер:* Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
4. Определение оптимальных режимов электрических сетей / *Ю.Н. Астахов, П.Д. Лежнюк, В.И. Нагул, Л.В. Ярных* // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1983. – № 1.– С. 48–59.
5. *Лежнюк П.Д.* Моделирование процессу поширення вищих гармонік в електричних мережах / *П.Д. Лежнюк, Ю.В. Лук'яненко, В.А. Видмиш* // Проблемы создания новых машин и технологий. Научн. труды Кременчугского госуд. политехн. ун-та. – 2000. – №2. – С. 284–286.

Рецензент: М.Й. Бурбело,  
д-р техн. наук, проф., ВНТУ

Стаття надійшла 10.04.2008