



УДК 621.311.1

**PECULIARITIES OF ELECTRICAL NETWORK PARAMETERS
ACCOUNTING WHEN USING MATHEMATICAL MODELS OF CURRENT
CURVE SHAPE DISTORTION SOURCES**

**ОСОБЛИВОСТІ УРАХУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ
ЗАСТОСУВАННІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕНЬ ФОРМ
КРИВИХ СТРУМІВ**

Nesterovych V.V. / Нестерович В.В.

s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-0730-7932

Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Gogolya, 29, 49000

Приазовський державний технічний університет, Дніпро, Гоголя, 29, 49000

Анотація. Режим джерела спотворень форм кривих струмів і напруг частково залежить від параметрів електричної мережі, до якої підключено джерело, а також параметрів її режиму. Метою роботи була оцінка повноти та адекватності урахування цього взаємозв'язку для різних математичних моделей джерел спотворень. На основі проведеного аналізу було виділено математичні моделі джерел спотворень, що найбільш повно враховують вплив параметрів електричної мережі та параметрів її режиму, а також сформульовано напрями подальших досліджень.

Ключові слова: вища гармоніка, електрична мережа, математична модель, джерело спотворень, частотна область, гармонічний аналіз, джерело струму, гармоніка струму, гармоніка напруги, параметри електричної мережі, параметри режиму

Вступ.

Підключення до електричної мережі пристроїв, що мають нелінійні вольт-амперні характеристики, призводить до виникнення спотворень форм кривих струмів та напруг. Прогнозування величин спотворень форм кривих напруг і струмів може виконуватись у різні способи. В даний час найбільшого поширення набули методи розрахунку та моделювання, що засновані на аналізі режиму в частотній області (в області вищих гармонік) [1,2]. Ці методи засновані на розкладанні несинусоїдних кривих струмів і напруг у ряди Фур'є та незалежному аналізі режиму на частоті кожної з гармонік.

Інша група методів передбачає аналіз режиму електромережі в області часу [1,3,4].

Крім цього можна виділити гібридні методи, засновані на аналізі в частотно-часовій області [3,5].



Надалі будуть розглянуті особливості застосування першої групи методів, оскільки вони набули найбільшого поширення на практиці.

Один з найважливіших аспектів моделювання електричної мережі в частотній області пов'язаний з використанням адекватних математичних моделей джерел спотворень.

При цьому можливі такі підходи:

- 1) приймається, що параметри моделі джерела спотворень не залежать від параметрів електричної мережі та параметрів її режиму;
- 2) робиться допущення, що параметри моделі джерела спотворень залежать від параметрів електричної мережі та не залежать від параметрів її режиму;
- 3) враховується залежність параметрів моделі джерела спотворень як від параметрів електричної мережі, так і параметрів її режиму.

Вибір тієї чи іншої математичної моделі джерела може визначатися типом джерела, вимогами до точності розрахунку та насамперед методом розрахунку, що застосовується.

Основний текст.

Серед методів розрахунку спотворень можна виділити наступні [1]:

- 1) прямий метод;
- 2) метод ітеративного гармонічного аналізу;
- 3) метод потоків потужностей гармонік;
- 4) метод, що заснований на використанні матриці частотного зв'язку.

Прямий метод побудовано на застосування рівняння

$$[Y][U] = [I], \quad (1)$$

де $[Y]$ – матриця вузлових провідностей електричної мережі;

$[U]$ - матриця напруг вузлів мережі;

$[I]$ - матриця сумарних струмів джерел спотворень, що підключені до відповідних вузлів.

Зазвичай рівняння (1) формується та вирішується на частоті кожної з гармонік окремо без урахування можливого взаємного зв'язку між режимами на



частотах різних гармонік.

З самого методу випливає, що найбільш простою і очевидною моделлю джерела спотворень є джерело струму, для якого початково задані амплітуда та фаза струму на частоті кожної з гармонік [1,2]. Амплітуда та фаза гармоніки струму джерела може залежати від параметрів джерела та режиму його роботи. При цьому вплив відповідної гармоніки напруги на параметри моделі джерела спотворень не враховуються, як і вплив величини напруги основної частоти. У найпростішому випадку не враховується і фаза гармоніки струму джерела спотворень, лише враховується її амплітуда.

Ця математична модель джерела спотворень набула широкого поширення при оцінних розрахунках рівнів спотворень, коли не потрібна висока точність або відсутні достовірні вихідні дані, а також у багатьох комп'ютерних програмах, що використовуються у промислових умовах.

Аналіз можливостей даної моделі показує, що вона має ряд істотних недоліків:

- 1) неврахування фазних кутів джерел струму може призвести до похибки, викликаної тим, що струми підсумовуватимуться алгебраїчно, а не геометрично;
- 2) модель не враховує вплив опору мережі живлення на величину струму джерела спотворень (на частоті відповідної гармоніки);
- 3) модель не враховує вплив напруги у вузлі електричної мережі, обумовленої іншими джерелами спотворень, на величину струму даного джерела спотворень (на частоті відповідної гармоніки);
- 4) модель не враховує вплив величини напруги основної частоти у вузлі електричної мережі на величину струму джерела спотворень (на частоті відповідної гармоніки);
- 5) без додаткових модифікацій модель не забезпечує врахування імовірнісних характеристик параметрів режиму джерел спотворень, що необхідно при використанні імовірнісного підходу до визначення параметрів електричної мережі;
- 6) модель не враховує вплив інших гармонік напруги на величину даної



гармоніки струму джерела спотворень.

У ряді робіт наголошується, що дана модель не може застосовуватися до дугових печей, а також силових перетворювачів, що працюють у режимі близькому до режиму резонансу струмів [1].

Для врахування впливу параметрів мережі (її вхідного опору) та параметрів режиму (величини відповідної гармоніки напруги, що створюється іншими джерелами) було запропоновано модель джерела спотворень, що складається з джерела струму вищої гармоніки та паралельно включеного внутрішнього опору джерела спотворень. Насамперед таку модель рекомендувалося використовувати для моделювання дугових печей, але вона досить широко використовується і для моделювання інших джерел спотворень [1,3,6,7].

При обґрунтуванні можливості застосування даної моделі вказувалося, що найбільший вплив на величину струму вищої гармоніки джерела спотворень має величина вхідного опору електричної мережі (на частоті вищої гармоніки), а вплив напруги вищої гармоніки в точці підключення джерела спотворень практично не виявляється [1]. Однак справедливність цього твердження для різних видів джерел спотворень вимагає додаткового обґрунтування, оскільки спочатку його було зроблено на основі моделювання процесів у напівпровідникових перетворювачах.

Таким чином можна зробити висновок, що модель джерела живлення у вигляді джерела струму з паралельно підключеним опором:

- 1) частково враховує вплив гармоніки напруги у вузлі електричної мережі, обумовленої іншими джерелами спотворень (на частоті даної гармоніки) та повністю не враховує цей вплив для різних гармонік;
- 2) не враховує вплив величини напруги основної частоти у вузлі електричної мережі на величину струму джерела;
- 3) не забезпечує врахування імовірнісних характеристик параметрів режиму джерел спотворень.

Деяке поширення отримала також модель джерела спотворення, яка включає джерело електрорушійної сили (ЕРС) вищої гармоніки та інколи опір, що



включений з джерелом ЕРС послідовно. Така модель (без внутрішнього опору) найчастіше застосовується у разі представлення фонових рівнів вищих гармонік напруги електричної мережі. Модель з ЕРС та внутрішнім опором може використовуватися для представлення деяких напівпровідникових пристроїв, що містять, наприклад, такі елементи, як запірні тиристори або біполярні транзистори з ізольованим затвором [1].

Поєднання в одній моделі електричної мережі одночасно моделей джерел спотворень з джерелами струмів та джерелами ЕРС вищих гармонік призводить до необхідності модифікації методів розрахунків шляхом розділення вузлів електричної мережі на дві групи: перша з котрих об'єднує вузли, до яких підключені джерела струмів вищих гармонік, а інша включає вузли, до яких приєднані джерела ЕРС [8]. Тоді рівняння (1) перетворюється на

$$\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ik} \\ Y_{ki} & Y_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де U_i – підматриця матриці $[U]$, в яку входять відомі напруги вузлів, до яких підключені джерела ЕРС;

U_k – підматриця матриці $[U]$, в яку входять невідомі напруги вузлів;

I_i – підматриця матриці $[I]$, в яку входять відомі струми джерел струмів;

I_k – підматриця матриці $[I]$, в яку входять невідомі струми;

Y_{ii} , Y_{kk} , Y_{ik} , Y_{ki} - підматриці матриці $[Y]$, де індекс i відповідає вузлам, до яких підключено джерела струмів, а індекс k – вузлам, до яких під'єднані джерела ЕРС.

Вирішивши рівняння (2) можна знайти невідомі струми та напруги.

Метод ітеративного гармонічного аналізу [9] по суті є методом Гаусса — Зейделя. При використанні даного методу джерела спотворень на кожній ітерації моделюються джерелом струму вищої гармоніки, причому враховується залежність цього струму від напруги живлення, з урахуванням як складової основної частоти, так і вищих гармонік. Основним недоліком даного методу є низька швидкість збіжності, що і призводить до суттєвих обмежень практичного застосування цього методу [1].



Моделі джерел спотворень, що використовуються у цьому випадку, обов'язково повинні враховувати вплив напруги живлення на спектр струму джерела спотворень. Ці моделі як правило не забезпечують можливість отримання ймовірнісних оцінок можливих спотворень.

Метод потоків потужностей гармонік також передбачає обов'язкове врахування залежності струму джерела спотворень від величини напруги у точці його підключення [10, 11]. При цьому виконується лінеаризація характеристик нелінійних елементів поблизу робочої точки режиму електричної мережі.

У випадку застосування даного методу джерела спотворень представляються як джерела струму, керовані прикладеною напругою. Загалом таке джерело (з врахуванням проведеної лінеаризації) описується рівнянням [11]:

$$[I_{дж}] = [F][U_{дж}] + [I_d], \quad (3)$$

де $[I_{дж}]$ – матриця поточних значень гармонічних складових струмів джерела;

$[F]$ – матриця, що отримана шляхом лінеаризації функції залежності струму джерела від прикладеної напруги;

$[U_{дж}]$ – матриця поточних значень гармонічних складових напруги у місці підключення джерела;

$[I_d]$ – допоміжна матриця гармонічних складових струму джерела, що відповідає робочій точці режиму, для якої отримані значення елементів матриці $[F]$ та може бути знайдена як

$$[I_d] = [I_{рт}] - [F][U_{рт}], \quad (4)$$

де $[I_{рт}]$ – матриця значень гармонічних складових струмів джерела, що відповідає робочій точці режиму;

$[U_{рт}]$ – матриця значень гармонічних складових напруги у місці підключення джерела, що також отримана для робочої точки режиму.

Режим електричної мережі в цілому може бути описаний за допомогою наступного рівняння у матричній формі [1]:

$$[\Delta I] = [Y_j][\Delta U], \quad (5)$$

де $[\Delta I]$ – матриця відхилень поточних величин гармонічних складових струмів від значень, що відповідають робочій точці;



$[Y_j]$ – об'єднана матриця провідностей, що включає лінійні та нелінійні елементи;

$[\Delta U]$ – матриця відхилень поточних величин гармонічних складових напруг від значень, що відповідають робочій точці.

Останнім часом для побудови моделей джерел спотворень (насамперед напівпровідникових пристроїв) часто використовується матриця частотного зв'язку [6,11-13].

У цьому випадку джерело спотворень може бути представлене за допомогою рівняння [6]:

$$[I_{дж}] = [I_{пт}] + [Y^{(1)}][\Delta U] + [Y^{(2)}][\widehat{\Delta U}], \quad (6)$$

де $[Y^{(1)}]$ – матриця частотного зв'язку прямої послідовності джерела спотворень;

$[Y^{(2)}]$ – матриця частотного зв'язку зворотної послідовності джерела спотворень;

$[\widehat{\Delta U}]$ - комплексно-спряжена матриця відхилень поточних величин гармонічних складових напруг від значень, що відповідають робочій точці.

Залежно від того, як буде представлено матриці $[Y^{(1)}]$ та $[Y^{(2)}]$, можуть бути отримані окремі моделі джерел спотворень [6].

Наприклад, якщо всі елементи цих матриць будуть дорівнювати нулю, то моделлю буде джерело струму без внутрішнього опору (провідності).

Якщо у матриці $[Y^{(1)}]$ ненульовими будуть тільки діагональні елементи, а всі елементи матриці $[Y^{(2)}]$ будуть нульовими, то модель джерела прийме вигляд джерела струму з паралельно підключеним опором. Така модель буде враховувати вплив фонових гармонік напруги але тільки у випадку, якщо частота такої гармоніки буде співпадати з частотою відповідної гармоніки струму джерела спотворень.

Недіагональні елементи матриць $[Y^{(1)}]$ та $[Y^{(2)}]$ показують взаємний зв'язок між компонентами струмів та напруг різних частот. Наприклад, якщо ці елементи в матриці $[Y^{(1)}]$ не будуть дорівнювати нулю, а матриця $[Y^{(2)}]$ не буде враховуватися, то отримана модель буде враховувати взаємний зв'язок між компонентами різних частот та не враховувати несиметрію струмів та напруг. У



цьому випадку рівняння (6) прийме вигляд

$$[I_{дж}] = [I_{рт}] + [Y^{(1)}][\Delta U]. \quad (7)$$

Урахування матриці $[Y^{(2)}]$ дає змогу отримати модель, що буде відповідати несиметричному режиму джерела спотворень.

Аналіз моделей, які побудовані з використанням матриці частотного зв'язку показує, що цей клас моделей є найбільш універсальним. У той же час, до його недоліків можна віднести те, що такі моделі без додаткових модифікацій не дозволяють виконати розрахунки ймовірнісних характеристик величин спотворень з урахуванням їх стохастичного характеру, та практичне застосування таких моделей потребує проведення попередньо досить складних та таких, що мають великий обсяг, експериментальних досліджень. Такі повномасштабні дослідження були проведені тільки для деяких видів джерел спотворень чи мали обмежений характер.

Недоліком переважної більшості проведених у цьому напрямі досліджень було те, що не оцінювалася похибка, що вноситься під час використання тієї чи іншої моделі.

Висновки.

У роботі проведено аналіз моделей джерел спотворення форми кривої напруги з погляду повноти врахування впливу параметрів електричної мережі та її режиму. Показано, що найбільшою мірою врахування цього впливу можливе при використанні моделей з матрицею частотного зв'язку. Вказано, що дані моделі вимагають подальшого експериментального обґрунтування та адаптації для врахування ймовірнісних характеристик спотворень.

Література:

1. Harmonic analysis in frequency and time domain / A. Medina et al. *IEEE transactions on power delivery*. 2013. Vol. 28, no. 3. P. 1813–1821. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2013.2258688>.
2. Mahmoud A., Shultz R. A method for analyzing harmonic distribution in A.C. power systems. *IEEE transactions on power apparatus and systems*. 1982. PAS-101,



no. 6. P. 1815–1824. URL: <https://doi.org/10.1109/tpas.1982.317235>.

3. Semlyen A., Medina A. Computation of the periodic steady state in systems with nonlinear components using a hybrid time and frequency domain methodology. *IEEE transactions on power systems*. 1995. Vol. 10, no. 3. P. 1498–1504. URL: <https://doi.org/10.1109/59.466497>.

4. Segundo-Ramírez J., Medina A. An enhanced process for the fast periodic steady state solution of nonlinear systems by Poincaré map and extrapolation to the limit cycle. *International journal of nonlinear sciences and numerical simulation*. 2010. Vol. 11, no. 8. URL: <https://doi.org/10.1515/ijnsns.2010.11.8.661>.

5. Semlyen A., Shlash M. Principles of modular harmonic power flow methodology. *IEE proceedings - generation, transmission and distribution*. 2000. Vol. 147, no. 1. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20000024>.

6. Analysis of approaches for modeling the low frequency emission of LED lamps / A. J. Collin et al. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 7. P. 1571. URL: <https://doi.org/10.3390/en13071571>.

7. Harmonic distortion in low voltage residential grids caused by LED lamps / J. Hernández et al. *Power quality in the energy transition : 2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*, Naples, 29 May – 1 June 2022. 2022. P. 1–6. URL: <https://doi.org/doi:10.1109/ICHQP53011.2022.9808589>.

8. Medina A., Arrillaga J., Acha E. Sparsity-oriented hybrid formulation of linear multiports and its application to harmonic analysis. *IEEE transactions on power delivery*. 1990. Vol. 5, no. 3. P. 1453–1458. URL: <https://doi.org/10.1109/61.57988>.

9. Dommel H. W., Yan A., Wei S. Harmonics from transformer saturation. *IEEE transactions on power delivery*. 1986. Vol. 1, no. 2. P. 209–215. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwr.1986.4307952>.

10. The Harmonic Domain. A frame of reference for power system harmonic analysis / J. Arrillaga et al. *IEEE transactions on power systems*. 1995. Vol. 10, no. 1. P. 433–440. URL: <https://doi.org/10.1109/59.373968>.

11. Impact of reference conditions on the frequency coupling matrix of a plug-in electric vehicle charger / J. E. Caicedo et al. *2018 18th international conference on*



harmonics and quality of power (ICHQP), Ljubljana, 13–16 May 2018. 2018.

URL: <https://doi.org/10.1109/ichqp.2018.8378898>.

12. A harmonically coupled admittance matrix model for AC/DC converters / Y. Sun et al. *IEEE transactions on power systems*. 2007. Vol. 22, no. 4. P. 1574–1582.

URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2007.907514>.

13. Yahyaie F., Lehn P. W. Using frequency coupling matrix techniques for the analysis of harmonic interactions. *IEEE transactions on power delivery*. 2016. Vol. 31, no. 1. P. 112–121. URL: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2015.2442573>.

Abstract. *Mathematical models of distortion sources are used to estimate possible distortions of the shapes of current and voltage curves. The operating modes of distortion sources may depend on the electric network's parameters and its mode's parameters. This work aimed to estimate the adequacy of displaying this relationship when using previously known mathematical models of distortion sources. For this purpose, such models were classified, and their features were analyzed from the point of view of the completeness of displaying the relationship between the parameters of the electric network mode and the operating mode of the distortion source. Based on the analysis, conclusions were made about the applicability of the models and directions for further research.*

Keywords: *higher harmonic, electrical network, mathematical model, distortion source, frequency domain, harmonic analysis, current source, current harmonic, voltage harmonic, electrical network parameters, mode parameters*

Статтю відправлено: 20.09.2024 г.

© Нестерович В.В.