

Д. А. Гапон, А. О. Зуєв, П. О. Качанов, Б. І. Кубрик

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛА ВИЩИХ ГАРМОНІК У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗІ ЗМІШАНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Анотація. Розглянуто метод визначення джерела вищих гармонік струмів і напруг в електричній мережі за напрямками потужності відповідних складових. **Метою** дослідження є оцінка ефективності методу у електричній мережі, яка містить декілька приймачів електричного навантаження різного характеру включених паралельно. Проведено комп’ютерне моделювання фрагменту електричної мережі та електроприймачів навантажень що працюють паралельно. Досліджено різні комбінації активного, реактивного та нелінійного навантаження в цій мережі. У якості нелінійного навантаження використано схему Ларіонова. За **результатами** дослідження зроблено висновки щодо ефективності використання методу. Так, зокрема, визначено що у випадку паралельної роботи нелінійного та змішаного активно-нелінійного навантаження джерело вищих гармонік визначається некоректно. Зроблено пропозиції щодо шляхів покращення методу та алгоритму визначення джерела вищих гармонік.

Ключові слова: електрична мережа; електромагнітна сумісність; джерело вищих гармонік; реактивне та нелінійне навантаження; схема Ларіонова; комп’ютерне моделювання.

Вступ

Згідно ДСТУ EN 50160:2014 одним із важливих показників якості електричної енергії у системах електропостачання є кількісні показники рівнів вищих гармонійних складових напруги та загальний коефіцієнт гармонійних спотворень. Наявність таких складових призводить до підвищення рівню втрат енергії у передавальній мережі, а також такі складові можуть привести до збоїв у роботі деяких електроприймачів. Саме тому, вищі гармоніки у електричній мережі підлягають обов’язковому моніторингу та контролю за допомогою спеціального обладнання та відповідних інформаційних систем. Для ефективної боротьби з підвищеним рівнем гармонійних спотворень перше за все, необхідно визначити їх походження та джерело. Багато наукових праць вітчизняних та закордонних вчених присвячені саме цій проблематиці [1-7]. Не дивлячись на це, на теперішній час не існує загальноприйнятої ефективної методики визначення джерела вищих гармонік яка могла б задовольнити вимоги сучасних підприємств-споживачів електричної енергії в рамках ринкових відносин. Ця стаття спрямована на визначення основних причин, які не дозволяють ефективно вирішити цю проблему.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Найбільш обговорюваними на даний час є такі підходи до визначення джерела вищих гармонік: використання нейронних мереж, емпіричні, та аналітичні методи та визначення джерела вищих гармонік за напрямками потужності відповідних складових.

Питання використання нейронних мереж для розпізнавання та класифікації збурень у електричній мережі розглянуті у [4, 7]. Недоліком таких методів є залежність результатів від способу та послідовності навчання нейронної мережі. Такі методи не дозволяють гарантовано виключити хибне розпізнавання у будь-якому довільному випадку, особливо за наявності комбінації спотворюючих факторів. Емпіричні, та аналітичні методи розглянуті у [5, 8].

Головним недоліком таких методів є необхідність залучення висококваліфікованого персоналу у кожному окремому випадку, неможливість їх автоматизації та універсалізації.

Визначення джерела вищих гармонік за напрямками потужності відповідних складових розглянуто у [8, 9]. Але у [8] вказано, що метод має певні обмеження при роботі у системі з великою кількістю електроприймачів різного принципу дії, та пропонується використовувати статистичні залежності для їх обходу.

Метою статі є аналіз можливості застосування методу визначення джерела вищих гармонік у складних випадках за допомогою комп’ютерного моделювання. На відміну від методів, розглянутих вище, такий підхід може бути застосований у будь-якому випадку з детермінованим та передбачуваним результатом. Практично, визначення джерела вищих гармонік може бути реалізовано за допомогою автоматичних апаратних засобів, які надають відповідні дані до інформаційних систем що входять до складу системи управління електромережею. Тому цей метод було обрано для подальших досліджень.

Згідно з [10], гармонійні спотворення напруги в системах електропостачання виникають внаслідок протікання струмів відповідних складових у приладах передачі, перетворення та розподілу електричної енергії – повітряних лініях, кабелях, трансформаторах, шинах та ін. Падіння напруги виникає як на активному опорі провідників, так і внаслідок наявності реактивних складових – ємності та індуктивності. Таким чином для адекватного визначення параметрів гармонік струмів та напруги необхідно враховувати параметри схеми електропостачання. В якості останньої було обрано розповсюджену схему підстанції 110/10 кВ з двома трансформаторами потужністю 16МВА (рис.1), яка підключена джерела необмеженої потужності за допомогою повітряних ліній електропередач 110 кВ довжиною 20 км. У звичайному режимі, коли все обладнання включено у роботу, вимикачі QS1 та Q1 відключені, тому, фактично, електропостачання споживачів L1...L4 та

L5...L6 є цілком незалежним та не може впливати одне на інше. Виходячи з цього у подальшому розглядається лише взаємодія електроприймачів споживачів L1 та L2, та гілки електричної мережі W1, T1, B1 (рис.2, а). В якості нелінійного навантаження, що генерує вищі гармонійні складові, використано схему Ларіонова, з активним навантаженням (рис.2б). Така схема є поширеною, не потребує додаткового керування, що дозволяє уникнути додаткових умов моделювання. У той же час отримана нелінійність, є достатньо показовою, а гармонійні спотворення струмів є характерними для більшості нелінійних навантажень.

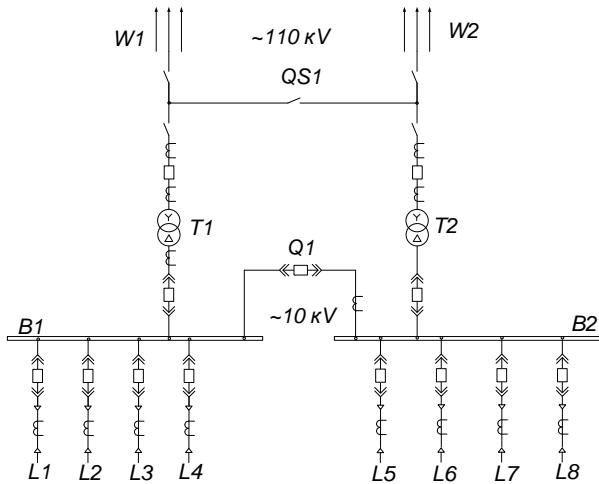


Рис. 1. Схема двохтрансформаторної підстанції (Fig. 1. Scheme of two-transformer substation)

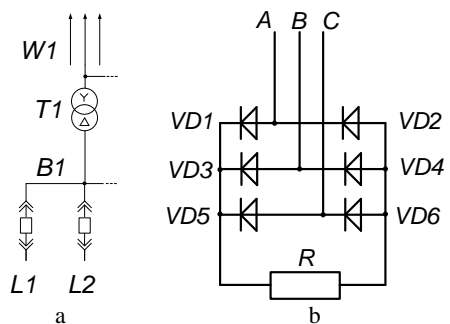


Рис. 2. Виділений фрагмент системи електропостачання споживачів L1 та L2 (а) та елемент нелінійного навантаження (б)

(Fig. 2. Selected fragment of the power supply system of consumers L1 and L2 (a) and the element of nonlinear load (b))

Дослідження та аналіз наведеного методу

В першому випадку модель електропостачання включала два електроприймачі, перший – лінійний, потужністю 5МВт, у вигляді трикутника активних опорів споживача L1 та другий – нелінійний, тієї ж потужності, споживача L2 (рис. 3). Потужність трансформатора, до шин якого підключені навантаження 16МВА. Графіки отриманих в результаті моделювання струмів навантажень та напруги представлені на рис. 4. Для визначення напрямів потужностей гармонійних складових використано розкладання за допомогою ДПФ. Амплітуди гармонік (окрім першої) струмів та напруги показані на рис. 5.

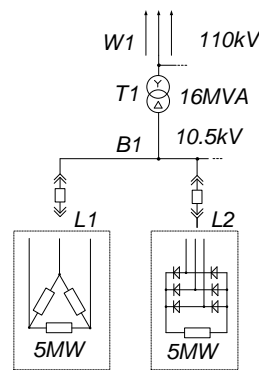


Рис. 3. Паралельна робота лінійного L1 та нелінійного L2 навантаження (Fig. 3. Parallel operation of linear load L1 and nonlinear L2)

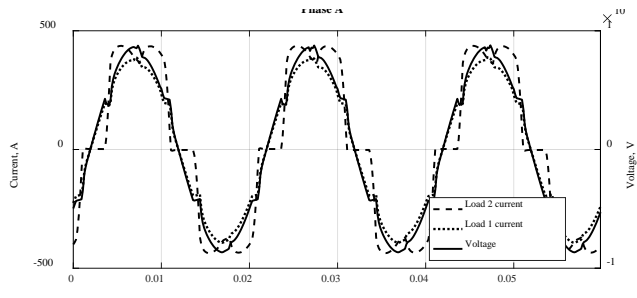


Рис. 4. Струми навантаження та напруга на шинах підстанції (Fig. 4. Load currents and voltages on substation wires)

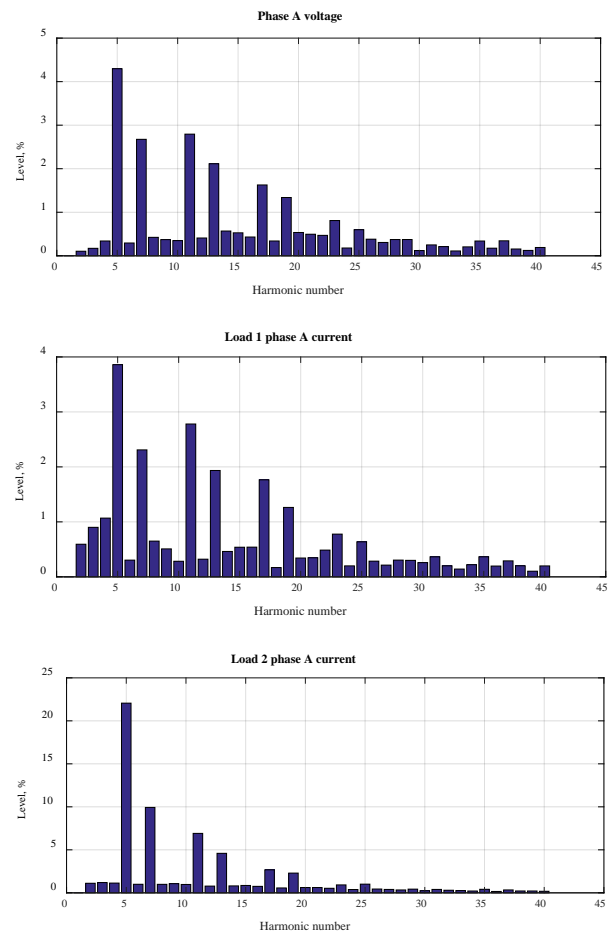


Рис. 5. Гармонійний склад напруги та струмів навантажень L1, L2 (Fig. 5. Harmonic composition of voltages and currents of loads L1, L2)

Рівні гармонійних складових наведено у відносному до першої гармоніки масштабі, при цьому

першу гармоніку із діаграм виключено для більшої інформативності. Як у складі напруги, так і у складах струмів домінують гармоніки з номерами 5,7,11,13,17,19. Це відповідає теоретичним розрахункам та результатам практичних досліджень щодо роботи напівпровідникових перетворювачів у трифазних електричних мережах. Аналіз графіків також

Модуль напруги N -ї гармоніки визначено як

$$|U_N| = \sqrt{(\text{Re}(\dot{U}_N))^2 + (\text{Im}(\dot{U}_N))^2}, \quad (1)$$

де \dot{U}_N – комплекс напруги відповідної гармоніки отриманий за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

Відносну фазу гармоніки напруги розраховано як

$$\varphi_{U,N}^* = \varphi_{U,N} - N \cdot \varphi_{U,1}, \quad (2)$$

де $\varphi_{U,N} = \arctan(\text{Im}(\dot{U}_N)/\text{Re}(\dot{U}_N))$.

Відносний модуль гармоніки напруги приведено до напруги першої (основної) гармоніки

$$|U_N|^* = |U_N|/|U_1|. \quad (3)$$

Значення відносної амплітуди струму N -ї гармоніки отримано аналогічно з таким для напруги:

$$|I_N|^* = |I_N|/|I_1|,$$

$$|I_N| = \sqrt{(\text{Re}(\dot{I}_N))^2 + (\text{Im}(\dot{I}_N))^2}, \quad (4)$$

де \dot{I}_N – комплекс гармоніки отриманий за допомогою ДПФ.

Відносна фаза N -ї гармоніки струму приведено до фази основної гармоніки напруги:

$$\varphi_{I,N}^* = \varphi_{I,N} - N \cdot \varphi_{U,1},$$

$$\varphi_{I,N} = \arctan(\text{Im}(\dot{I}_N)/\text{Re}(\dot{I}_N)). \quad (5)$$

Модуль вектору потужності та фаза обчислюються як:

$$|S_N|^* = \frac{|S_N|}{|S_1|} = \frac{|U_N| \cdot |I_N|}{|U_1| \cdot |I_1|} = |U_N|^* \cdot |I_N|^*,$$

$$\varphi_{S,N} = \varphi_{I,N} - \varphi_{U,N}. \quad (6)$$

Таким чином, згідно методики, вважається що споживач генерує вищу гармонійну складову, якщо знак активної складової комплексу потужності є від'ємним, тобто, в даному випадку, кут зсуву $\varphi_{S,N}$ є більшим ніж 90° , або меншим -90° .

У табл. 1 та 2 наведено числові дані, щодо гармонік навантажень L1 та L2. Аналіз даних у таблиці дозволяє говорити про ефективність визначення споживача L2 як джерела усіх вагомих вищих гармонійних складових, тому що для усіх гармонік окрім основної кут зсуву між напругою та струмом (кут вектору потужності) перевищує 90 градусів. У той же час, для навантаження L1 значення кутів близькі до 0 , що говорить про воно виступає виключно як споживач вищих гармонік.

Таблиця 1 – Характеристики гармонійних складових споживача L1

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	0	1	0	1	0
5	0.0017	3	0.043	-83	0.0386	-80
7	0.0006	0	0.0268	-177	0.0231	-177
11	0.0008	-3	0.0279	-165	0.0278	-168
13	0.0004	-4	0.0211	115	0.0193	111
17	0.0003	1	0.0163	110	0.0176	111
19	0.0002	-7	0.0134	44	0.0126	38

Таблиця 2 – Характеристики гармонійних складових споживача L2

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	-6	1	0	1	-6
5	0.0095	99	0.043	-83	0.2206	15
7	0.0027	103	0.0268	-177	0.0993	-74
11	0.0019	111	0.0279	-165	0.0691	-54
13	0.001	111	0.0211	115	0.0459	-134
17	0.0004	123	0.0163	110	0.0268	-126
19	0.0003	118	0.0134	44	0.023	163

Далі моделювалась паралельна робота змішаного та нелінійного навантаження (рис. 6).

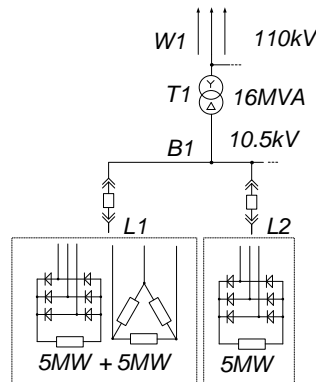


Рис 6. Паралельна робота змішаного L1 та нелінійного L2 навантаження

(Fig 6. Parallel operation of mixed L1 and non-linear L2 load)

Фактично нелінійна частина обох навантажень є однаковою, але навантаження L1 додатково містить таку саму лінійну схему, як і у попередньому випадку. З точки зору фізичних процесів обидва навантаження повинні генерувати струми вищих гармонік у рівних долях. Осцилограми напруги та струмів наведено на рис. 7. На осцилограмах можна побачити, що обидва струми мають спільні характерні нелінійні спотворення, які впливають на форму напруги.

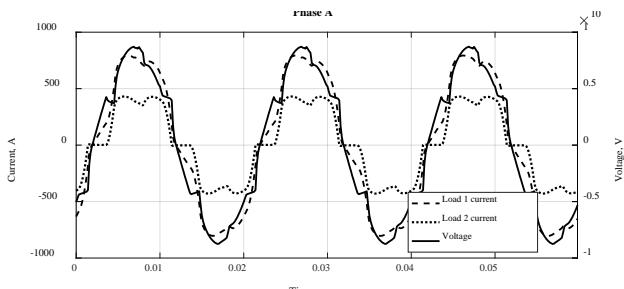


Рис. 7. Осцилограми паралельної роботи навантаження L1 та нелінійного L2 (Fig. 7. Oscillograms of parallel operation of mixed load L1 and nonlinear L2)

На рис.8 можна побачити гармонійний склад напруг та струмів на шинах навантажень. Слід відмітити що двохкратне збільшення потужності нелінійного навантаження викликає приблизно пропорційне збільшення рівню гармонік напруги на шинах підстанції.

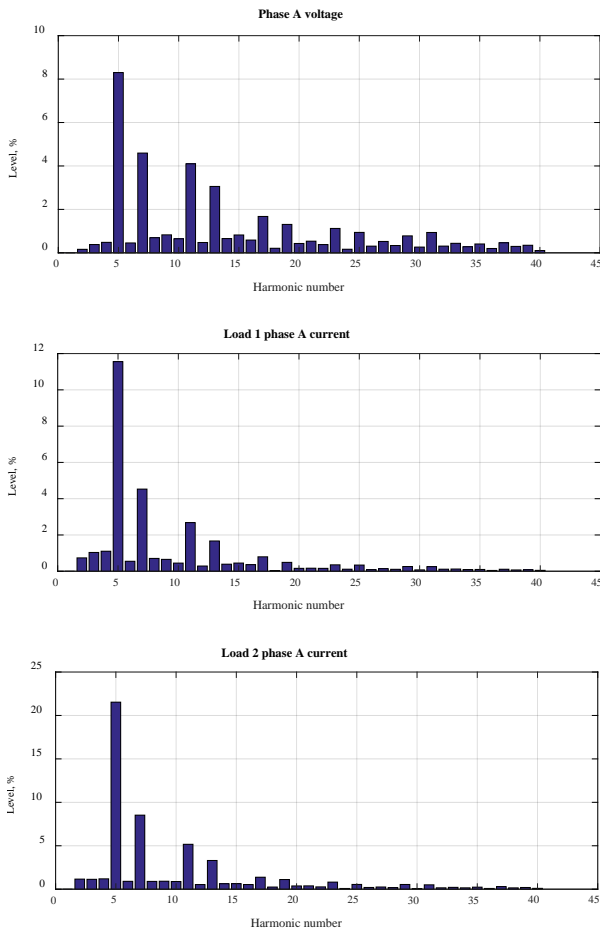


Рис. 8. Гармонійний склад напруги та струмів навантажень L1, L2
(**Fig. 8.** Harmonic composition of voltages and currents of loads L1, L2)

У табл. 3 та 4 наведено відносні параметри гармонік напруги та струмів. Згідно наведених результатів $\varphi_{S,N}$ у табл. 3 для усіх гармонік не перевищує 82 градусів, у той час як для навантаження L2 (табл. 4) він перевищує 100 градусів для усіх гармонік. Тобто з точки зору методики генерація гармонік відбувається споживачем L2, хоча фактично обидва споживача мають ідентичні нелінійні частини навантаження. Таким чином, для змішаного навантаження результати інтерпретуються не коректно.

Таблиця 3 - Характеристики гармонійних складових споживача L1

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	-4	1	0	1	-4
5	0.0096	82	0.083	-107	0.1156	-25
7	0.0021	78	0.0459	155	0.0453	-127
11	0.0011	70	0.041	136	0.0268	-154
13	0.0005	68	0.0306	58	0.0167	126
17	0.0001	66	0.0168	-4	0.008	62

Таблиця 4 - Характеристики гармонійних складових споживача L2

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	-8	1	0	1	-8
5	0.0179	100	0.083	-107	0.2153	-7
7	0.0039	103	0.0459	155	0.0853	-102
11	0.0021	112	0.041	136	0.0517	-111
13	0.001	114	0.0306	58	0.0331	172
17	0.0002	123	0.0168	-4	0.0138	120
19	0.0001	127	0.0131	-63	0.0111	64

В третьому експерименті розглянуто паралельну роботу активно-реактивного та нелінійного навантаження (рис. 9). При цьому параметри реактивної частини підібрані таким чином, що споживана реактивна потужність дорівнює такій що генерується, тобто імітується споживач з встановленим компенсатором реактивної потужності. Осцилограми напруги та струмів наведено на рис. 10. На осцилограмі струму L1 можна побачити коливання на кратній вищій частоті, які були відсутні у попередніх експериментах. Такі коливання є наслідком резонансних явищ у системі електропостачання, і можуть призводити до пошкодження обладнання [3, 5].

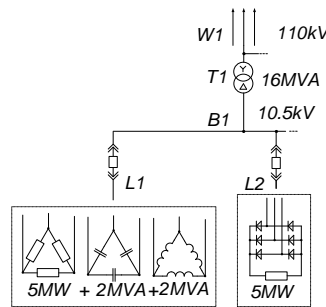


Рис 9. Паралельна робота змішаного L1 та нелінійного L2 навантаження
(**Fig 9.** Parallel operation of mixed L1 and non-linear L2 load)

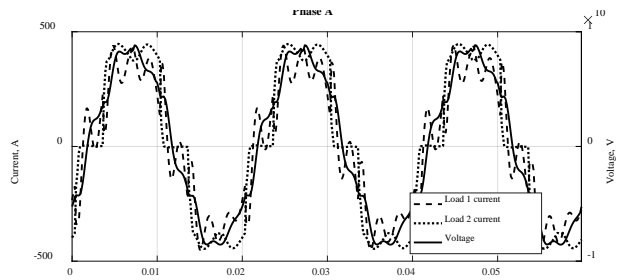


Рис. 10. Осцилограми паралельної роботи активно-реактивного L1 та нелінійного L2 навантаження
(**Fig. 10.** Oscillograms of parallel operation of active-reactive L1 and nonlinear L2 load)

На рис. 11 показано гармонійний склад напруги та струмів. Спостерігається зростання рівнів вищих гармонік у складі напруги, порівняно з випадком 1, хоча потужність та гармонійний склад нелінійного навантаження залишилися незмінними. Також помітне зростання рівнів вищих гармонік струмів для навантаження L1 яке не має нелінійних складових, та за умови відсутності у мережі інших навантажень виглядає як суто активне.

У табл. 5 та 6 наведено дані щодо потужностей та фаз гармонік навантажень. Виходячи із куту зсуву фази вектора потужності споживач один спо-

живає усі гармоніки, окрім 17-ї та 23-ї, а споживач L2 є таким, що генерує гармоніки (окрім 17-ї).

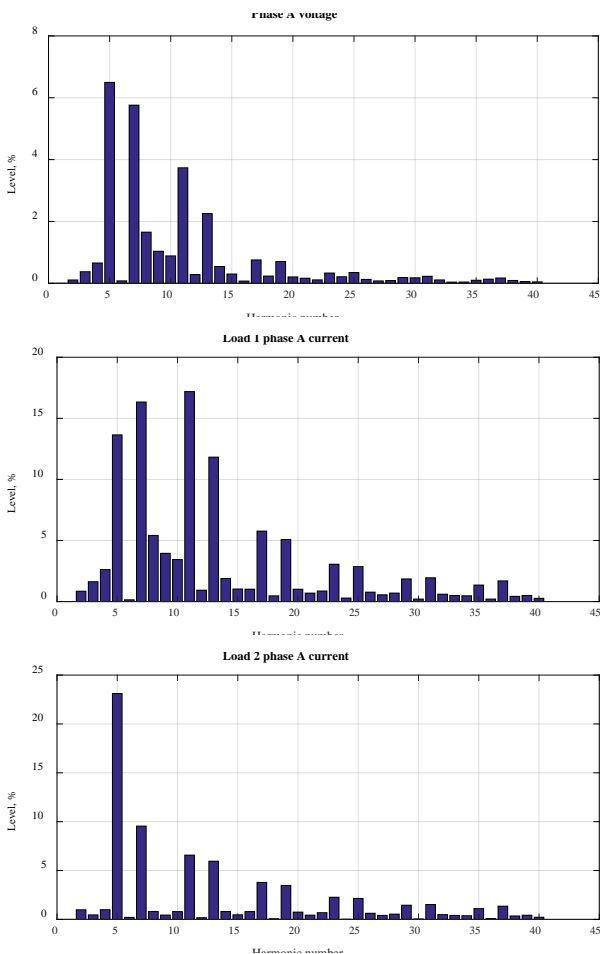


Рис. 11. Гармонійний склад напруги та струмів навантажень L1, L2
(**Fig. 11.** Harmonic composition of voltages and currents of loads L1, L2)

Але навантаження 1 не має нелінійних елементів і, тому, не може виступати у ролі генератора струмів. Зважаючи на малу амплітуду 17 та 23 гармонік напруги такий результат можна пояснити наявністю похибки розрахунків. В цілому ж методика дозволяє коректно виявити джерело вищих гармонійних складових. Слід зауважити, що дана модель демонструє проблему взаємодії ємнісних пристроїв компенсації реактивної потужності та нелінійних електроприймачів.

Згідно [4, 7] така проблема є реальною и не має загальноприйнятого рішення, що підтверджує

актуальність досліджень з моніторингу та усуненню вищих гармонійних складових напруг та струмів у системах електропостачання.

Таблиця 5 - Характеристики гармонійних складових споживача L1

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	-0	1	0	1	-0
4	0.0002	75	0.0066	154	0.0262	-131
5	0.0089	65	0.065	-70	0.1365	-5
7	0.0094	69	0.0576	-153	0.1633	-83
8	0.0009	86	0.0165	164	0.0542	-110
9	0.0004	85	0.0104	52	0.0395	137
10	0.0003	78	0.0089	-19	0.0344	59
11	0.0064	77	0.0374	122	0.1719	-161
13	0.0027	77	0.0225	50	0.1182	127
14	0.0001	71	0.0054	13	0.0189	84
17	0.0004	93	0.0076	61	0.0577	154
19	0.0004	80	0.007	9	0.0508	89
23	0.0001	115	0.0033	10	0.0306	125

Таблиця 6 - Характеристики гармонійних складових споживача L2

N_h	$ S_N ^*$	$\varphi_{S,N}$	$ U_N ^*$	$\varphi_{U,N}^*$	$ I_N ^*$	$\varphi_{I,N}^*$
1	1	-2	1	0	1	-2
5	0.015	103	0.065	-70	0.2311	33
7	0.0055	122	0.0576	-153	0.0955	-31
8	0.0001	103	0.0165	164	0.0081	-93
11	0.0025	-120	0.0374	122	0.0658	1
13	0.0013	-113	0.0225	50	0.0595	-63
17	0.0003	-85	0.0076	61	0.0378	-24
19	0.0002	-103	0.007	9	0.0347	-94

Висновки

1. Визначення джерела вищих гармонік за напрямком активної складової потужності кожної гармоніки є найбільш ефективним та практичним інструментом на сьогоднішній день.

2. В багатьох випадках метод дозволяє коректно детектувати генерацію нелінійних струмів, але у випадку, коли має місце взаємодія змішаних навантажень у межах окремих споживачів, результат може бути хибним, і вся відповідальність покладається на гілку з найбільшою пропорцією нелінійності.

3. Дослідження дозволило простежити походження вищих гармонік напруги у електричних мережах та резонансні явища, як проблему електромагнітної сумісності електроприймачів. Наведений метод потребує подальшого розвитку та удосконалення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCE)

- Xu, Y., Du, Y. & Cheng, S. (2018), "A Method of De-noise and Harmonics Detection in Power System Based on Periodicity Analysis", *MAPAN*, Vol. 33, pp. 169–177, doi: <https://doi.org/10.1007/s12647-017-0248-y>.
- Xu, M., Pan, T. and Chen, J. (2019), "A Harmonic Detection Method for Distributed Generation Connected Grid System Using DWT and HHT", *J. Electr. Eng. Technol.*, Vol. 14, pp. 1495–1503, doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-019-00190-1>.
- Ray, P, Budumuru, G.K. and Mohanty B.K. (2018), "A comprehensive review on soft computing and signal processing techniques in feature extraction and classification of power quality problems", *J Renew Sustain Energy*, Vol. 10(2):025102, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5006772>.
- Uyar, M., Yildirim, S. and Gencoglu, M.T. (2009), "An expert system based on S-transform and neural network for automatic classification of power quality disturbances", *Expert Syst Appl.*, Vol. 36, pp. 5962–5975.

5. Shukula S., Mishra, S., Singh, B., and Kumar, S. (2017), "Implementation of empirical mode decomposition based algorithm for shunt active filter", *IEEE Trans Ind Appl.*, Vol. 53(13): pp. 2392–2400.
6. Filyanin, D. (2018), "Identification of harmonic distortion sources in distribution systems using Discrete Fourier Transform on periods", *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2. С. 110–119.
7. Філянin, Д.В. (2018), "Визначення ступеню участі суб'єктів електричної мережі в розподілі потужності вищих гармонік", *Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*, Вип. 195, С. 61–62.
8. Stevanović, D., Petković, P. (2015), "A single-point method for identification sources of harmonic pollution applicable to standard power meters", *Electr Eng.*, Vol. 97, pp. 165–174, doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-014-0324-z>.
9. Lu C.L. and Huang, P.H. (2013), "Power system stability study with empirical mode decomposition.", *Adv Mater Res.*, Vol. 732–733, pp. 905–908, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.732-733.905>.
10. Yi-kang, H., Dan, S., Wen-ju, W. (2002), "Harmonic detection an AC excited generation system based on in-phase correlation filtering", *J. Zhejiang Univ.-Sci.*, Vol. 3, pp. 65–71., doi: <https://doi.org/10.1007/BF02881845>.
11. Dağ, O., Uçak, C. & Usta, Ö. (2012), "Harmonic source location and meter placement optimization by impedance network approach. *Electr Eng.*, Vol. 94, pp. 1–10, doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-011-0213-7>.

Received (Надійшла) 03.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.01.2022

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Гапон Дмитро Анатолійович – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Dmytro Gapon – Doctor of technical sciences, Associate Professor, head of the department of Power Systems Automation and Cybersecurity, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Харків, Україна;
e-mail: Dmytro.Gapon@khp.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>.

Зуєв Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Andrey Zuev – Candidate of technical sciences, Associate Professor, head of the department of automation and control in technical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Харків, Україна;
e-mail: dakarton@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8206-4304>.

Качанов Петро Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Petro Kachanov – Doctor of technical sciences, Professor, Professor of the department of automation and control in technical systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Харків, Україна;
e-mail: kpa@khp.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0781-0853>.

Кубрик Борис Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Boris Kubryk – Candidate of technical sciences, Associate Professor, Associate Professor of the department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Харків, Україна;
e-mail: Borys.Kubryk@khp.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8327-0350>.

Определение источника высших гармоник в системах электроснабжения со смешанной нагрузкой

Д. А. Гапон, А. А. Зуев, П. А. Качанов, Б. И. Кубрик

Аннотация. У статті розглянуто можливість визначення джерела вищих гармонік струмів і напруг в електричній мережі за напрямками потужності відповідних складових. **Метою** дослідження є оцінка ефективності теоретичних методів та моделювання фрагмента електричної мережі з паралельно працюючих приймачів електричного навантаження. Проведено комп'ютерне моделювання фрагменту електричної мережі та електроприймачів навантажень що працюють паралельно. Досліджено різні комбінації активного, реактивного та нелінійного навантаження в цій мережі. У якості нелінійного навантаження використано схему Ларіонова. За **результатами** дослідження зроблено висновки щодо ефективності використання методу. Так, зокрема, у випадку паралельної роботи нелінійного та змішаного активно-нелінійного навантаження джерело вищих гармонік визначається некоректно. Зроблено пропозиції щодо шляхів покращення методу та алгоритму визначення джерела вищих гармонік.

Ключові слова: електрична мережа; електромагнітна сумісність; джерело вищих гармонік; реактивне та нелінійне навантаження; схема Ларіонова; комп'ютерне моделювання.

Determination of higher harmonics source in mixed-load power supply systems

Dmytro Gapon, Andrey Zuev, Petro Kachanov, Boris Kubryk

Abstract. The article considers the possibility of determining the source of higher harmonics of currents and voltages in the electrical network in the directions of power of the respective components. The research **purpose** is evaluating the effectiveness of theoretical methods, computer modeling of a fragment of the electrical network and electrical load receivers operating in parallel. Different combinations of active, reactive and nonlinear loading are investigated. Larionov's scheme was used as a nonlinear load. According to the **results** of the study, conclusions were made about the effectiveness of the method used. Thus, in particular, in the case of parallel operation of nonlinear and mixed active-nonlinear load, the source of higher harmonics is determined incorrectly. Suggestions for ways to improve the algorithm are made.

Keywords: electrical network; electromagnetic compatibility; source of higher harmonics; reactive and nonlinear loading; Larionov's scheme; DFT.