

ТЕПТЯ ВІРА

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-2792-0160>  
e-mail: [teptyavira@gmail.com](mailto:teptyavira@gmail.com)

ОСТРА НАТАЛІЯ

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-8245-2937>  
e-mail: [natalyaostra@ukr.net](mailto:natalyaostra@ukr.net)

МАЛОГУЛКО ЮЛІЯ

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-6637-7391>  
e-mail: [juliya\\_malogulko@ukr.net](mailto:juliya_malogulko@ukr.net)

СІКОРСЬКА ОЛЕНА

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-7341-9724>  
e-mail: [olenasikorska@ukr.net](mailto:olenasikorska@ukr.net)

## МОДЕЛЮВАННЯ РІВНЯ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

*Метою роботи є висвітлення сучасних засобів моделювання рівня гармонійних спотворень та нормативної документації, що регламентує допустимі рівні гармонійних спотворень в електромережах. Основним методом дослідження є практичне моделювання рівня гармонійних спотворень за допомогою програмного комплексу Schaffner PQS, оцінка отриманих результатів відповідає нормам стандарту IEEE 519-2014. Крім того, для покращення сприйняття інформації пропонується її графічне представлення. Основними результатами дослідження є впровадження нових методів моделювання електромереж та отримання технічних рішень, що відповідають стандарту IEEE 519-2014. Також наведено графічні матеріали щодо впливу гармонійних спотворень на окремі елементи реальних електромереж. Цей матеріал відкриває нові можливості в моделюванні електромереж та оцінці впливу на них нелінійних споживачів. Використання сучасного програмного забезпечення дозволяє істотно скоротити час, витрачений на виконання складних розрахунків. Наявність готових рішень щодо обмеження гармонійних спотворень у програмному забезпеченні спрощує процес створення технічних рішень, що відповідають вимогам стандарту IEEE 519-2014. Застосування наведених у роботі засобів дозволить підвищити якість технічних рішень, істотно підвищити надійність електротехнічних систем, зменшити втрати електроенергії, а також підвищити ефективність роботи як інженерів-конструкторів, так і технічних спеціалістів, які беруть участь в експлуатації.*

*Ключові слова:* якість енергії; гармоніки; гармонічний розрахунок; енергозберігаючі технології; нелінійні споживачі.

TEPTIA VIRA, OSTRA NATALIA, MALOGULKO JULIYA, SIKORSKA OLENA  
Vinnytsia National Technical University

## MODELING THE LEVEL OF HARMONIC DISTURBANCES IN ELECTRICAL NETWORKS

*The aim of the work is to present modern methods of modeling the level of harmonic distortions and regulatory documentation regulating the permissible levels of harmonic distortions in power networks. One of the main obstacles to the spread of solutions for limiting harmonic distortions was the lack of software products available to a wide range of specialists, which would significantly simplify and speed up the production of relevant calculations and technical solutions. The main research method is practical modeling of the level of harmonic distortions using the Schaffner PQS software package. The evaluation of the obtained results is in accordance with the standards of the IEEE 519-2014 standard. In addition, in order to improve the reception of information, its graphical presentation is proposed. The main results of the research are the implementation of new methods of modeling power networks and obtaining technical solutions in accordance with the IEEE 519-2014 standard. There are also graphic materials available illustrating the impact of harmonic distortions on individual elements of real power networks. This material opens up new possibilities in modeling power networks and assessing the impact of nonlinear receivers on these networks. The use of modern software allows for a significant reduction in the time of performing complex calculations. The availability of ready-made solutions for limiting harmonic distortions in software facilitates the process of creating technical solutions that meet the requirements of the IEEE 519-2014 standard. The use of the tools presented in the work will improve the quality of technical solutions, significantly increase the reliability of electrical systems, reduce electrical energy losses, and increase the efficiency of both design engineers and technical specialists involved in operation.*

*Keywords:* power quality; harmony; harmonic calculations; energy-saving technologies; nonlinear consumers.

### Вступ

В останні роки кількість аварій в електромережах неухильно зростає. Ці аварії викликані впливом нелінійних споживачів. Крім того, в таких ситуаціях термін служби електрообладнання, що працює в таких складних умовах, стрімко скорочується. Через це існує усвідомлення того, що необхідно використовувати відповідні засоби, щоб уникнути цих небажаних наслідків. Незважаючи на те, що на цю тему було проведено багато теоретичних досліджень, таких як дослідження вчених Е.Ф. Фуха та Мохаммада А.С. Масума [1], які дають поглиблені знання про основні фізичні процеси, що впливають на якість електричної енергії, ці дослідження не були настільки актуальними, оскільки певним чином стосувалися вузької галузі промисловості, де використовувалися потужні випрямні пристрої. Спеціалізовані наукові підприємства розробляли технічні рішення для таких систем. У сучасний час, коли розподіл нелінійних типів навантажень

набув величезних масштабів, ці роботи набули нового значення. Новітні енергозберігаючі технології на промислових підприємствах, які використовують частотно-регульований привод, окрім позитивного ефекту накопичення енергії, негативно впливають на стан електромережі. Без урахування цього всі позитивні ефекти будуть нівелюватися зниженням терміну служби і передчасним виходом обладнання з ладу.

Світові лідери на ринку електроенергії, такі як Schneider Electric – один з найбільших постачальників перетворювачів частоти, пропонують споживачам певне рішення, яке знижує вплив гармонійних спотворень у мережі до рівня, визначеного спеціально створеним для цієї мети стандартом IEEE 519-2014 [2]. Тобто основним сучасним критерієм, який регламентує вимоги до електромереж щодо допустимого рівня гармонійних спотворень, є відповідність стандарту IEEE 519-2014. Набір рішень, запропонованих компанією Schneider Electric для зменшення рівня гармонійних спотворень, можна знайти в статті [3]. Окремо варто звернути увагу на швейцарську компанію Schaffner Group, яка спеціалізується на виробництві величезного асортименту обладнання, необхідного для зниження рівня гармонійних спотворень. По-перше, ця компанія є постачальником обладнання для світових лідерів індустрії, а по-друге, має великий практичний досвід у цій спеціалізованій галузі. Корисну інформацію про поточні стандарти та проблеми, що викликають гармонійні спотворення в електромережах, можна отримати в літературному джерелі [4].

Однією з головних перешкод на шляху розповсюдження рішень обмеження гармонійних спотворень була відсутність доступних широкому колу спеціалістів програмних продуктів, які б суттєво спростили та прискорили виготовлення відповідних розрахунків і технічних рішень. Також необхідно було консолідувати вимоги різних стандартів для перевірки технічного рішення на відповідність певним стандартам. Зараз, у зв'язку зі стрімким розвитком інформаційних технологій, такий програмний продукт був створений компанією Schaffner. Його можливості представлені у відповідній роботі [5].

Тому основною метою дослідження є практичне ознайомлення з програмним продуктом для моделювання рівня гармонійних спотворень електромережі Schaffner PQS (Моделювання якості електроенергії). Вибір технічних рішень з його використанням та перевірка їх на відповідність стандарту IEEE 519-2014 [2]. Крім того, буде проведено моделювання того, як нелінійні споживачі впливають на звичайні електромережі, якщо не впроваджено рішення для зменшення гармонійних спотворень. Наведено коефіцієнти збільшення розміру поперечного перерізу провідників з урахуванням гармонійних спотворень у мережі. Дані додаються на основі реальних вимірювань і впливу пристроїв компенсації реактивної потужності на рівень гармонійних спотворень в електромережі. Відомості про окремі технічні рішення Schaffner PQS, які були використані в дослідженні [6].

#### Матеріали та методи

Основним методом у цьому дослідженні є моделювання електромереж за допомогою програмного продукту Schaffner PQS компанії Schaffner. Це програмне забезпечення є веб-симулятором якості електроенергії в електромережах. Як веб-додаток, програмне забезпечення Schaffner PQS сильно залежить від інтернет-технологій і використовує один із браузерів за замовчуванням, що встановлені у системі. Тому для використання Schaffner PQS потрібне відповідне підключення до Інтернету. Рекомендується використання широкопasmового підключення до Інтернету. Проте Schaffner PQS також працюватиме на низькошвидкісному підключенні до Інтернету.

Дослідження складається з трьох основних етапів: на першому етапі збирається загальна інформація щодо електромережі, яку потрібно змоделювати, а саме: частота, первинна та вторинна напруга, потужність, коефіцієнт короткого замикання трансформатора, поперечний переріз та довжина кабельної лінії; кількість, потужність і тип кожного навантаження; довжина і переріз кабельних ліній для підключення навантаження; коефіцієнт навантаження кожного споживача; наявність, потужність і тип пристрою компенсації реактивної потужності. На другому етапі за допомогою графічного інтерфейсу моделюється спрощена електрична схема відповідної електромережі, а зібрана інформація вноситься до її відповідних елементів. Після цього проект зберігається і система розраховується.

На третьому етапі аналізуються розрахунки на відповідність рівню гармонійних спотворень стандарту. У цьому дослідженні, зокрема, йдеться про стандарт IEEE 519-2014 [2]. Якщо рівень гармонійних спотворень перевищує встановлені стандарти, необхідно додати відповідні елементи для зменшення рівня гармонійних спотворень з лінійки продуктів Schaffner. Ці компоненти включають: активні фільтри гармонік, пасивні фільтри гармонік, вхідні дроселі для частотних перетворювачів і 18-імпульсні фільтри згладжування. Методом проб і помилок визначається технічне рішення, яке відповідає відповідному стандарту. Щоправда, є загальні рекомендації щодо використання окремих елементів і розробки оптимального рішення з технічної та фінансової сторони. Наприклад, у більшості випадків рекомендується використовувати вхідний дросель частотного перетворювача. Обмеження можуть бути накладені лише в тому випадку, якщо довжина лінії велика. Примітно, що дросель додатково знижує напругу на вході перетворювача. При установці пристрою компенсації реактивної потужності необхідно додати захисні дроселі для конденсаторів. Рекомендується вивчити передовий досвід відомих фахівців, щоб отримати відповідний досвід використання тих чи інших елементів.

Після отримання технічного рішення, яке відповідає стандарту IEEE 519-2014 [2], програма дозволяє скласти повний звіт, в якому розрахункові дані змодельованої електромережі надаються у графічній та табличній формі. Графічна форма значно полегшує сприйняття інформації та дозволяє зробити звіт більш повним та спрощеним для аналізу.

### Результати та їх обговорення

**Коефіцієнт потужності за умов гармонійних спотворень.** Пропонується розглянути практичне завдання, яке зараз стоїть перед широким колом спеціалістів: проектувальниками електромереж та інженерами-експлуататорами. Технічні рішення, виконані застарілими методами (без урахування впливу нелінійних навантажень) та сучасними методами (програми Schaffner PQS), аналізуються та порівнюються з діючими міжнародними стандартами, такими як стандарт IEEE 519-2014 [2]. По-перше, розглядається дуже важливий показник, що характеризує навантаження на змінному струмі – коефіцієнт потужності ( $PF$ ) це відношення активної потужності ( $P$ ) споживача до повної ( $S$ ):

$$PF = P/S \quad (1)$$

У системах, де відсутні нелінійні споживачі, сумарна потужність визначається тільки активним і реактивним ( $Q$ ) складом:

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

У цьому випадку коефіцієнт потужності дорівнює  $\cos\varphi$  або  $DPF$  (фактор зміщення потужності):

$$\cos\varphi = P/S = DPF \quad (3)$$

Графічно це виглядає як зсув кривих напруги і струму. Дуже важливо відзначити, що форми кривих напруги і струму є неспотвореними (чистими) синусоїдами (рис. 1).

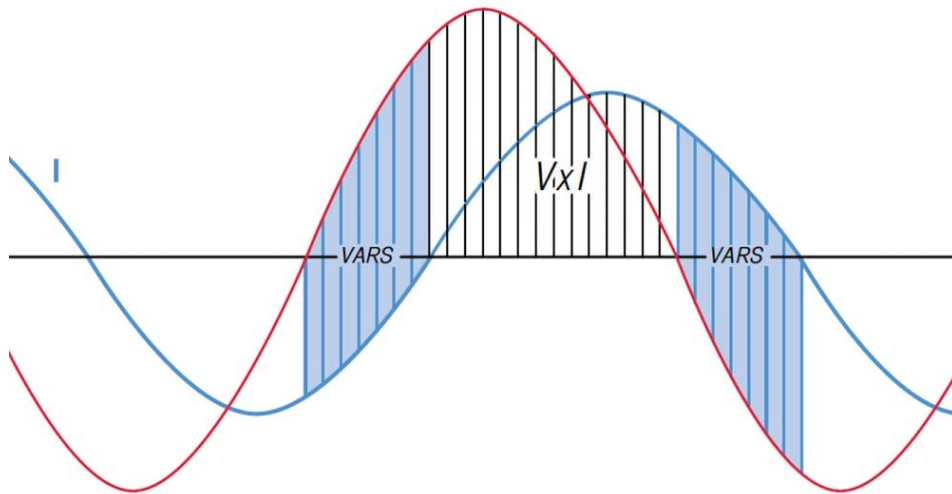


Рис. 1. Коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$  або  $DPF$

Однак наявність гармонійних спотворень призводить до появи іншої складової потужності  $D$ , яка ще більше збільшує повну потужність:

$$Spq = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (4)$$

Рисунок 2 графічно відображає ці співвідношення та спрощує сприйняття для збільшення інформаційного наповнення.

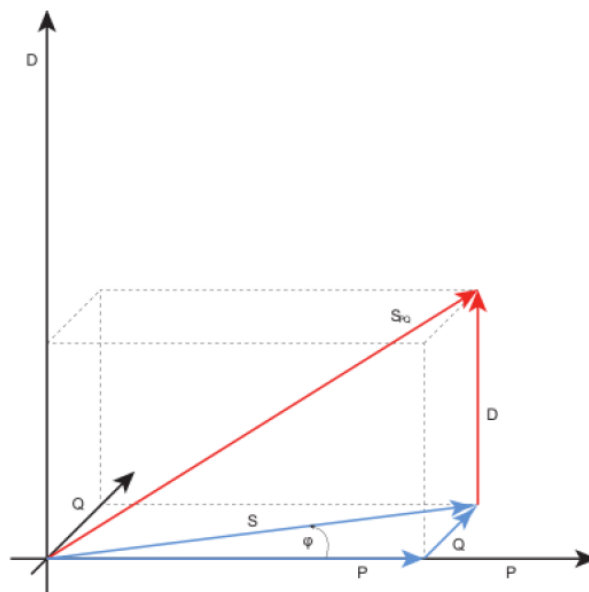


Рис. 2. Потужність за наявності гармонійних спотворень

Окремо пропонується графік, отриманий з реальних вимірювань нелінійного навантаження – перетворювача частоти (ПЧ). На ньому представлені рівні спотворення синусоїди струму і навіть напруги. Це ознаки наявності гармонійних спотворень в електромережі, і в таких випадках необхідно враховувати третю складову повної потужності потужність  $D$  (рисунок 3).

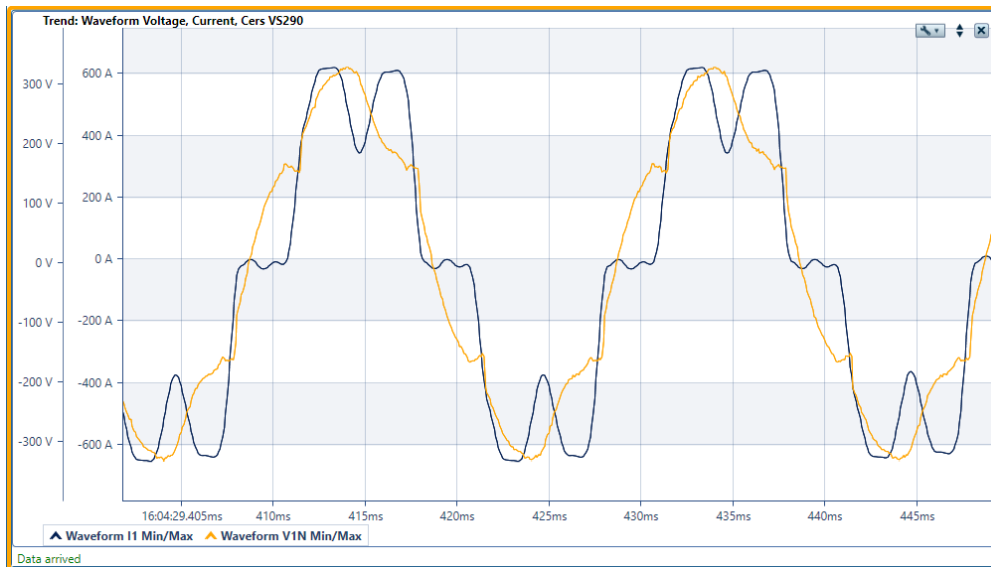


Рис. 3. Форма кривих напруги та струму за умов значного гармонійного спотворення

Більш розширену та аналітичну інформацію та методи визначення коефіцієнта потужності згідно зі стандартом IEEE 1459-2010 можна отримати в роботі [7]. Відповідно до інформації, отриманої щодо поняття коефіцієнта потужності, необхідно точно розуміти різницю між  $\cos\varphi$  і коефіцієнтом потужності. Їх значення збігаються тільки тоді, коли немає спотворень кривих струму і напруги в мережі. Якщо спотворення синусоїд є, то необхідно оперувати поняттям коефіцієнта потужності. На жаль, дуже велика частина фахівців не усвідомлює цю різницю і отримує в результаті невірні розрахунки, відповідно збільшуючи ймовірність використання неправильного технічного рішення, що може призвести до скорочення терміну служби обладнання, його передчасного виходу з ладу, і взагалі неможливість коректної роботи всієї системи.

Є ще один важливий нюанс, який дуже часто не враховують при визначенні  $DPF$  або  $\cos\varphi$ . Залежно від характеристик індуктивного або ємнісного навантаження знак цього параметра повинен змінюватися, для індуктивного він має позитивне значення, а для ємнісного - негативне. Тобто для двигуна, наприклад,  $\cos\varphi = 0.8$ , а для світлодіодного прожектора  $\cos\varphi = -0.9$ . При розрахунку балансу реактивної потужності це слід враховувати, і від'ємні значення реактивної потужності для ємнісного навантаження повинні бути включені в розрахунок загальної реактивної потужності системи. На практиці деякі виробники електрообладнання додають такі позначення: *lag* або *lead* для позначки типу навантаження, а також знак  $\cos\varphi$ . Вони також іноді додають індекс *cap* або *ind*, що позначає ємнісні та індуктивні  $\cos\varphi$ . На рисунку 4 наведені типові графіки для різних типів навантажень.



Рис. 4. Графіки напруги та струму для резистивного, індуктивного та ємнісного навантажень

Років 15-20 тому в електромережах переважали індуктивні споживачі, але останнім часом ситуація змінилася на протилежну.

**Модельовання електромережі за допомогою Schaffner PQS.** Крім того, більш детально розглянуто третю складову сумарних гармонійних спотворень потужності. Фактично, ця концепція додає ще один вимір, вона перетворює всі розрахунки в 3D. Створено модельовання електромережі з головним фактором 3-го виміру в сучасній електромережі – частотно-регульованим приводом (ЧРП) (на рисунку 5 показано як VSD). Величезна кількість виробників пропонують це обладнання та обіцяють істотну економію електроенергії при використанні в деяких сферах застосування. У дослідженні зроблено спробу визначити, що необхідно для отримання енергозбереження при встановленні ЧРП без зменшення терміну служби інших елементів електромережі. Які є методи зменшення гармонійних спотворень і як вони впливають на електромережу? Змодельовано електромережу, в якій встановлено компресор потужністю 290 кВт з частотним приводом. Для проведення розрахунків використовується програма Schaffner PQS. Інструкція щодо доступу до цієї програми та вимоги до технічної складової наведені в попередніх розділах.

Розглядається типова промислова мережа, яка має частоту 50 Гц, трансформатор з напругою на виході 10 кВ, потужністю 20 МВт,  $U_{sc} = 5\%$ , що живить лінію з алюмінію перерізом 120 мм<sup>2</sup>, довжиною 800 м, з трансформатором 10/0,4 кВт, потужністю 1000 кВт з  $U_{sc} = 6\%$ . Трансформатор живить компресор ЧРП потужністю 290 кВт, довжиною лінії 30 м, що виконана з міді і її переріз 370 мм<sup>2</sup>, шафу управління двигуном потужністю 200 кВт з довжиною лінії 30 м, що виконана міді і її переріз 300 мм<sup>2</sup>. Необхідно провести розрахунки мережі на відповідність стандарту IEEE 519-2014 [2] і вибрати пристрій корекції коефіцієнта потужності, який забезпечить  $DPF (cos\phi)$  не менше 0,98.

Після реєстрації особистого кабінету в програмі Schaffner PQS створюється новий проект. За допомогою графічного інтерфейсу програми формується однолінійна діаграма згідно технічного завдання. Після цього вводяться характеристики елементів. При введенні показників VSD додатково вибирається дросель постійного струму 4%. Зазвичай такою опцією з заводу оснащуються потужні пристрої VSD. Однак у будь-якому випадку необхідно уточнювати цю інформацію у постачальника обладнання. У цьому прикладі розглянуто найбільш типові комплекти обладнання. У першому сценарії модельовання на рисунку 5 показано схему без пристрою компенсації реактивної потужності.

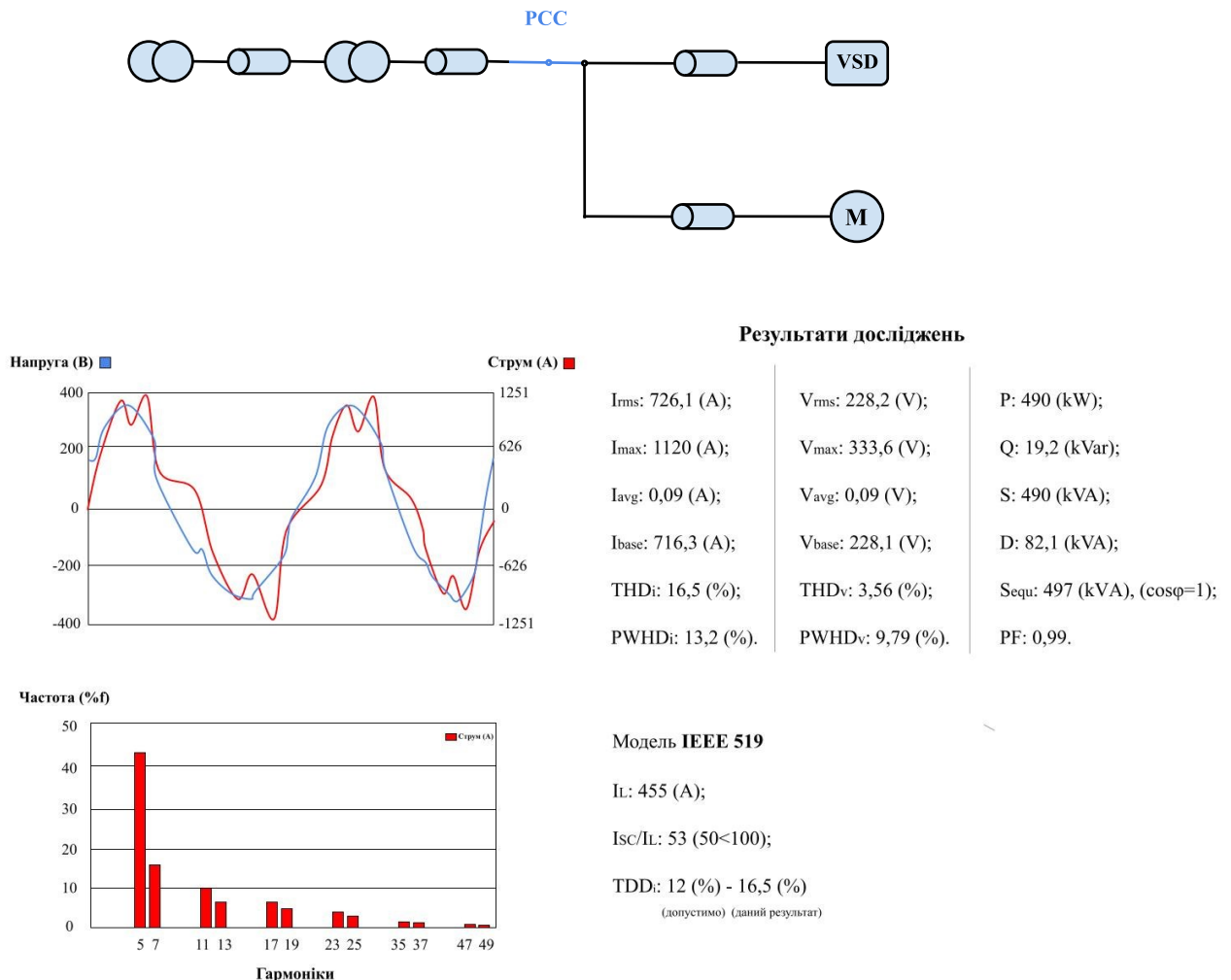
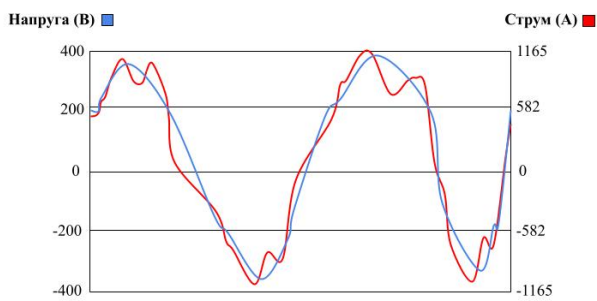
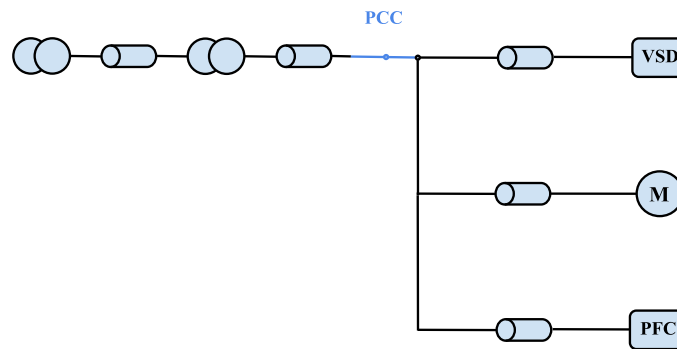


Рис. 5. Сценарій 1 (без пристрою компенсації реактивної потужності)

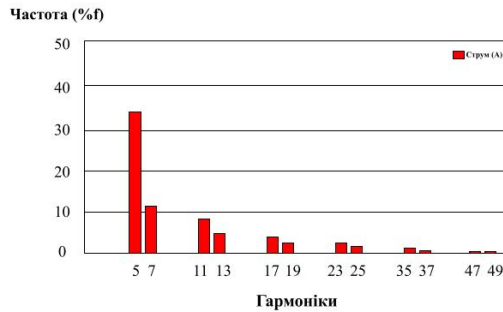
Це необхідно для визначення значення реактивної потужності, яке вимагає система. Зверніть увагу, що параметри розраховані для точка спільного зчеплення, яка позначена PCC. На схемі вона позначена синім кольором. За результатами модельовання встановлено, що параметри системи не відповідають стандарту IEEE

519-2014 [2]. Значення THD<sub>i</sub> (загальне вимога спотворення) струму перевищені на 19,8 % при дозволених 12%, також перевищені значення гармонік струму. Крім того, споживана реактивна потужність становить 188 кВАр. У другому сценарії додається пристрій компенсації реактивної потужності PFC (рис. 6).



**Результати досліджень**

$I_{rms}$ : 726,1 (A);	$V_{rms}$ : 228,2 (V);	P: 490 (kW);
$I_{max}$ : 1120 (A);	$V_{max}$ : 333,6 (V);	Q: 19,2 (kVar);
$I_{avg}$ : 0,09 (A);	$V_{avg}$ : 0 (V);	S: 490 (kVA);
$I_{base}$ : 716,3 (A);	$V_{base}$ : 228,1 (V);	D: 82,1 (kVA);
THD <sub>i</sub> : 16,5 (%);	THD <sub>v</sub> : 3,56 (%);	Seq <sub>u</sub> : 497 (kVA), (cosφ=1);
PWHD <sub>i</sub> : 13,2 (%).	PWHD <sub>v</sub> : 9,79 (%).	PF: 0,99.



**Модель IEEE 519**

$I_L$ : 455 (A);  
 $I_{sc}/I_L$ : 53 (50<100);  
 TDD: 12 (%) - 16,5 (%)  
 (допустимо) (даній результат)

**Рис. 6. Сценарій 2 (з пристроєм компенсації реактивної потужності 200 кВАр, 189 Гц)**

Вибирається загальна стандартна потужність 200 кВАр. Враховуючи, що домінуючою гармонікою є п'ята, частота дроселя конденсатора становить 189 Гц. Це дозволить захистити конденсатори та знизити ймовірність виникнення резонансних явищ у мережі [8]. Отримано наступні результати моделювання. Рівень THD<sub>i</sub> знизився з 19,8% до 16,5%, але все ще залишається вище норми, рівні 5, 7 та інших гармонік струму також знизилися, але також вище норми. Значення реактивної потужності становлять 19,2 кВАр, але це значення має бути від'ємним, виходячи з того, що було додано 200 кВАр емнісного навантаження, з необхідністю 188 кВАр. Слід визнати цей недолік програми. У будь-якому випадку встановлення компенсаційного пристрою знизило рівень гармонійних спотворень, зменшило струм з 780 А до 726 А, тим самим зменшивши навантаження на силовий трансформатор. Компенсаційний пристрій поглинає з системи частину струму на основній частоті та його гармонічні складові. Однак такий ефект спостерігається тільки при правильному виборі параметрів пристрою і використанні дроселів. У третьому сценарії на зменшення гармонійних спотворень впливає встановлення лінійного дроселя (рисунок 7).



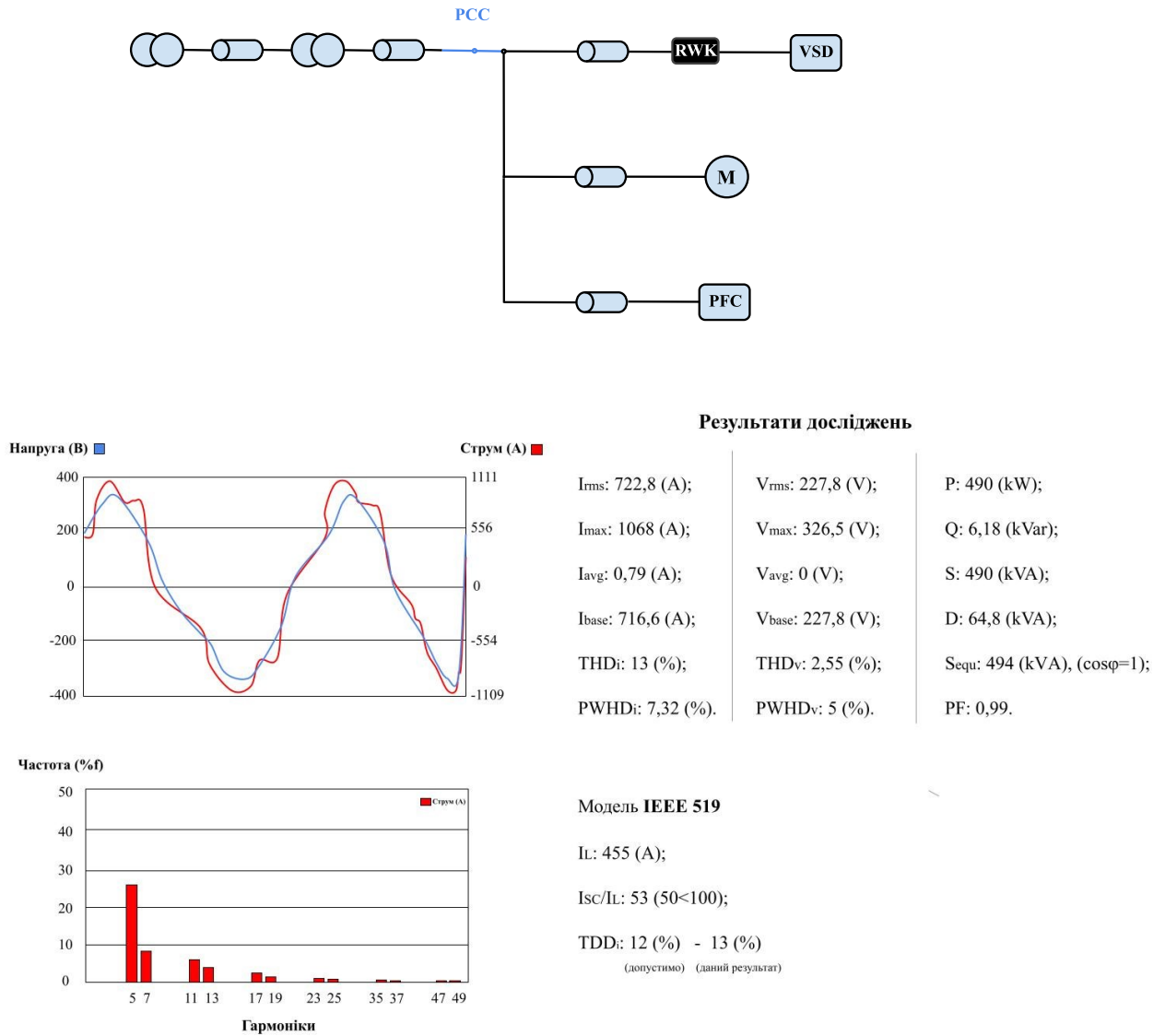


Рис. 7. Сценарій 3 (з додатковим лінійним дроселем)

До лінійки частотного перетворювача додається стандартний лінійний дросель RWK 212-500-s. Після виконання розрахунків отримано наступні дані  $THD_i = 13\%$ , що дуже близько до допустимої межі  $12\%$ . Рівні гармонік також знизилися, але все ще перевищують межі, встановлені стандартом IEEE 519-2014 [2]. Тобто установка лінійного дроселя хоч і знижує рівень гармонік, але не гарантує їх зниження до необхідного рівня. У сценарії 4 розглядається те, як на зменшення гармонійних спотворень впливає встановлення пасивного фільтра замість лінійного дроселя (рис. 8).

Встановлено пасивний фільтр FN3471-315-99. В результаті  $THD_i = 2,52$  при нормі  $12$  і отримані рівні гармонік струму з запасом в межах нормального діапазону. Тобто електромережа з цими елементами відповідає нормам стандарту IEEE 519-2014 [2]. Крім того, надлишкова реактивна потужність зросла до  $47$  кВАр, порівняно зі сценарієм 2 різниця становить  $28$  кВАр. На це вплинула ємнісна складова пасивного фільтра, враховуючи яку, потужність пристрою компенсації реактивної потужності можна зменшити на  $160$  кВАр. Таким чином, щоб відповідати вимогам стандарту IEEE 519-2014, до рішення довелося додати пасивний фільтр. На додаток до зменшення гармонік струму, встановлення PNF (пасивних фільтрів гармонік) також призвело до дуже значного зменшення гармонійних спотворень напруги. Порівняно зі сценарієм 2,  $THD_v$  зменшився з  $3,56\%$  до  $0,86\%$ . Це дуже позитивно позначиться на всіх елементах системи, зменшить втрати, збільшить термін служби обладнання. Після того, як рішення стане відповідним стандарту, програма має можливість зробити розширений звіт цих розрахунків, в ньому дуже детально відображаються всі важливі вузли системи, графіки, дані розрахунків.

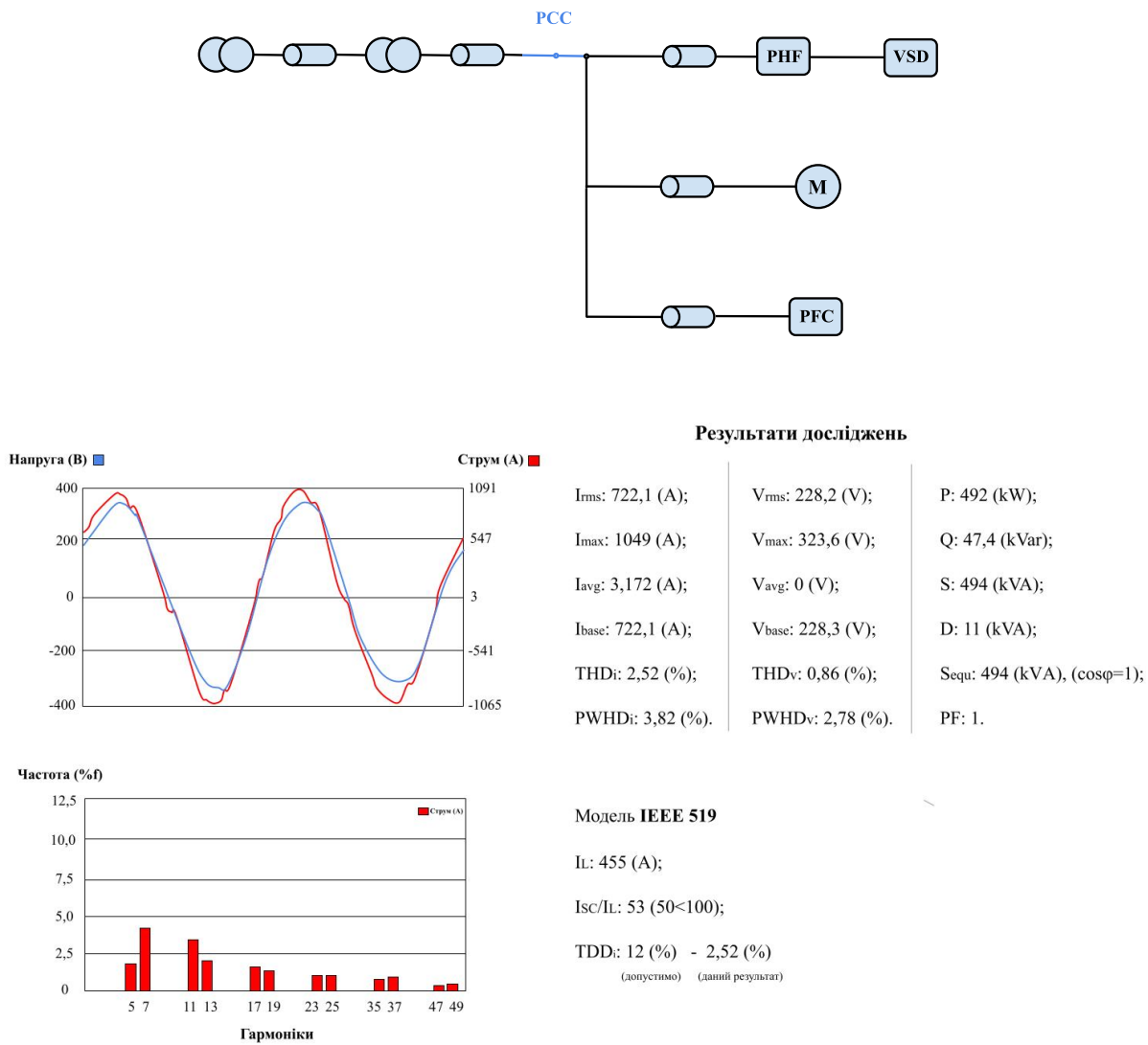


Рис. 8. Сценарій 4 (з додатковим пасивним фільтром)

**Висновки**

Практичне дослідження можливостей програмного забезпечення Schaffner PQS показало, що з'являються нові сучасні методи моделювання електромереж та оцінки впливу на них нелінійних навантажень. Результати моделювання типової схеми для багатьох підприємств показали, що для забезпечення рівня гармонійних спотворень у межах стандарту IEEE 519-2014 необхідно встановити на перетворювач частоти пасивний фільтр. Програмні засоби дозволяють інтуїтивно розраховувати та отримувати необхідні дані та графічні звіти в доступній формі. Дуже корисно, що для кожного елемента системи можна проводити розрахунки, щоб можна було проаналізувати функціональні особливості виробу. Далі більш детально розглядається поняття коефіцієнта потужності та його особливості при наявності гармонійних спотворень. Крім того, вплив гармонійних спотворень на елементи мережі: кабельні лінії, трансформатори. Цей фактор є обов'язковим для врахування при проектуванні електромереж. Якщо в мережі є гармонійні спотворення, деяке обладнання, наприклад пристрої компенсації реактивної потужності, може посилити спотворення. Наведено дані реальних вимірювань під час роботи пристроїв компенсації реактивної потужності, які показують, що зменшення гармонійних спотворень також призводить до істотної економії активної енергії.

Роботи інших авторів, які були розглянуті під час дослідження, свідчать про те, що проблеми гармонійних спотворень в електромережах стають все більш актуальними. Розробляються нові методи та технології для зменшення їх впливу на енергомережу. Спостерігається стрімке зростання фотоелектричних систем, інвертори яких є генераторами гармонійних спотворень. Збільшення кількості та потужності зарядних станцій для електромобілів призводить до нових викликів, з якими доводиться стикатися сучасній науці. Більше того, проблеми гармонійних спотворень присутні практично скрізь, від розетки в квартирі до атомної електростанції.



**Література**

1. Fuchs E.F., Masoum, M.A.S. 2008. Power quality in power systems and electrical machines. Amsterdam: Elsevier.
2. IEEE 519-2014 standard. 2014. <https://www.elsevier.com/locate/elsevier>
3. Harmonic mitigation. 2009. <https://electronicpowersolutions.com/wp-content/uploads/2014/02/Schneider-Harmonic-Mitigation-Solution-Handbook.pdf>.
4. Kamenka, A. 2014. Six tough topics about harmonic distortion and power quality indices in electric power systems. Luterbach: The Schaffner Group.
5. Schaffner power quality simulator user manual. 2016. <https://pqs.schaffner.com/manual.pdf>.
6. Passive Harmonic Filters. 2020. [https://www.schaffner.com/fileadmin/user\\_upload/Media/Downloads/installation-manual-ecosine-evo-rev08-en.pdf](https://www.schaffner.com/fileadmin/user_upload/Media/Downloads/installation-manual-ecosine-evo-rev08-en.pdf).
7. Malengret, M., Gaunt, T. 2020. Active currents, power factor, and apparent power for practical power delivery systems. Cape Town: University of Cape Town.
8. Key components for power factor correction in 50 Hz mains. 2018. <http://surl.li/eyjrv>.
9. Stéphane Azebaze Mboving C., Hanzelka Z. Investigation on the performance efficiency of the shunt hybrid active power filter. Power quality and harmonics management in modern power systems. IntechOpen, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002734>.
10. Czornik J., Haltof M. Wpływ filtrów harmoniczných na poprawę parametrów energii elektrycznej w punkcie przyłączenia. Przegląd elektrotechniczny. 2020. Vol. 96. Iss. 3. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2020.03.11>.
11. Azebaze M. C. S. Investigation on the work efficiency of the LC passive harmonic filter chosen topologies. Electronics. 2021. Vol. 10. Iss. 896. Pp. 1-35. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10080896>.
12. Malogulko J, Teptia V, Ostra N, Sikorska O, Povstianko K. Tools for modeling the level of harmonic distortion in power grids and their impact. Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal. 2023; 26(4):19-44. doi:10.33223/epj/166435.

**References**

1. Fuchs E.F., Masoum, M.A.S. 2008. Power quality in power systems and electrical machines. Amsterdam: Elsevier.
2. IEEE 519-2014 standard. 2014. <https://www.elsevier.com/locate/elsevier>
3. Harmonic mitigation. 2009. <https://electronicpowersolutions.com/wp-content/uploads/2014/02/Schneider-Harmonic-Mitigation-Solution-Handbook.pdf>.
4. Kamenka, A. 2014. Six tough topics about harmonic distortion and power quality indices in electric power systems. Luterbach: The Schaffner Group.
5. Schaffner power quality simulator user manual. 2016. <https://pqs.schaffner.com/manual.pdf>.
6. Passive Harmonic Filters. 2020. [https://www.schaffner.com/fileadmin/user\\_upload/Media/Downloads/installation-manual-ecosine-evo-rev08-en.pdf](https://www.schaffner.com/fileadmin/user_upload/Media/Downloads/installation-manual-ecosine-evo-rev08-en.pdf).
7. Malengret, M., Gaunt, T. 2020. Active currents, power factor, and apparent power for practical power delivery systems. Cape Town: University of Cape Town.
8. Key components for power factor correction in 50 Hz mains. 2018. <http://surl.li/eyjrv>.
9. Stéphane Azebaze Mboving C., Hanzelka Z. Investigation on the performance efficiency of the shunt hybrid active power filter. Power quality and harmonics management in modern power systems. IntechOpen, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002734>.
10. Czornik J., Haltof M. Wpływ filtrów harmoniczných na poprawę parametrów energii elektrycznej w punkcie przyłączenia. Przegląd elektrotechniczny. 2020. Vol. 96. Iss. 3. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2020.03.11>.
11. Azebaze M. C. S. Investigation on the work efficiency of the LC passive harmonic filter chosen topologies. Electronics. 2021. Vol. 10. Iss. 896. Pp. 1-35. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10080896>.
12. Malogulko J, Teptia V, Ostra N, Sikorska O, Povstianko K. Tools for modeling the level of harmonic distortion in power grids and their impact. Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal. 2023; 26(4):19-44. doi:10.33223/epj/166435.