

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/01>**Перетятко Ю.В.**<https://orcid.org/0000-0003-1397-8078>Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Троценко Є.О.**<https://orcid.org/0000-0001-9379-0061>Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Нестерко А.Б.**<https://orcid.org/0000-0001-7488-4214>Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Паращинець А.Р.**<https://orcid.org/0009-0009-3583-2839>Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ФАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ НА ФОРМУВАННЯ ЧАСОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

У роботі досліджено вплив амплітудних і фазових параметрів вищих гармонічних складових струму на геометрію часової кривої в низьковольтних електричних мережах. Актуальність дослідження зумовлена зростанням частки нелінійних навантажень із силовою електронікою, що призводить до формування несинусоїдних режимів та погіршення показників якості електричної енергії. Проаналізовано чинну нормативну базу у сфері оцінювання якості електроенергії, зокрема положення стандартів ДСТУ EN 50160, IEEE 519, IEEE 1459 та IEC 60050-161, і встановлено, що сучасна система нормування ґрунтується переважно на інтегральних та спектральних показниках, які враховують лише амплітудні характеристики гармонічних складових. У межах дослідження виконано чисельне моделювання поетапного спотворення синусоїдальної форми струму гармоніками 3-го, 5-го, 7-го та 9-го порядків за різних значень індивідуального гармонічного спотворення та початкових фаз. Показано, що за фіксованого амплітудного спектра вирішальний вплив на форму часової кривої має фазове співвідношення між гармонічними складовими. Встановлено, що фазове співпадіння максимумів фундаментальної та вищих гармонік зумовлює переважно амплітудну деформацію сигналу, тоді як протифазне накладання призводить до формування просідань, трапецеїдальних і М-подібних форм та появи локальних коливань. Доведено, що за однакових значень коефіцієнта гармонічних спотворень (THD) геометрія часової кривої струму може істотно відрізнятися залежно від фазових характеристик гармонік. Показано можливість взаємної компенсації вищих гармонічних складових при паралельному підключенні нелінійних навантажень із різними фазовими параметрами, що не відображається традиційними інтегральними показниками якості електроенергії. Отримані результати підтверджують обмежену інформативність існуючих нормованих показників щодо опису реальної форми сигналу та обґрунтовують доцільність урахування фазових характеристик гармонічних складових при аналізі несинусоїдних режимів.

Ключові слова: якість електричної енергії; нелінійні навантаження; гармонічні спотворення струму; фазові співвідношення гармонік; геометрія часової залежності; коефіцієнт гармонічних спотворень; індивідуальні гармонічні складові.



Постановка проблеми. У сучасних низьковольтних електричних мережах спостерігається стійка тенденція до зростання частки навантажень із нелінійними вольт-амперними характеристиками. Це зумовлено широким впровадженням силової електроніки, імпульсних джерел живлення, перетворювальної техніки та керування електроприводів у побутовому, комерційному та промисловому секторах. До таких навантажень належать, зокрема, джерела безперебійного живлення, світлодіодні системи освітлення, інверторні кондиціонери, холодильники та інша електронна побутова техніка.

Нелінійний характер споживання електричної енергії цими пристроями може призводити до істотного спотворення форми струму навіть за умови живлення від напруги, близької до синусоїдальної. Унаслідок цього в електричних мережах формуються несинусоїдні режими, що супроводжуються появою вищих гармонічних складових у струмах і напругах. Гармонічні спотворення є одним із чинників, які пов'язують із додатковими втратами електричної енергії, локальними перегрівками електрообладнання, зниженням ресурсу ізоляції та порушенням коректної роботи електропристроїв [1, 2].

Зростання щільності нелінійних навантажень зумовлює необхідність систематичного моніторингу показників якості електричної енергії (Power Quality, PQ), а також підвищує вимоги до забезпечення електромагнітної сумісності елементів електроенергетичних систем.

Якість електричної енергії унормовується для окремої країни або групи країн відповідними стандартами. У межах даної роботи розглянуто національні (ДСТУ), європейські (EN), міжнародні (IEC) та американські (IEEE) нормативні документи. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення встановлені для групи європейських країн стандартом, чинним в Україні як національний – ДСТУ EN 50160:2023 [3]. Вимоги до якості електричної енергії в США визначені стандартом IEEE Std 519-2022 [4]. Терміни та визначення щодо якості електроенергії наведені в міжнародному стандарті, чинному в Україні, – ДСТУ IEC 60050-161 [5], а також у стандарті США – IEEE Std 1459-2025 [6].

Динаміка змін нормативних документів у сфері якості електроенергії свідчить про їх активне оновлення: протягом останніх п'яти років усі зазначені стандарти були переглянуті та перезатверджені. Водночас було скасовано два наці-

ональні стандарти – ДСТУ 3466-96 [7] і ДСТУ 2815-94 [8], які регламентували терміни та визначення в цій галузі, а також американський стандарт IEEE Std 446-1995 (ANSI/IEEE 446) [9], що стосувався питань аварійного та резервного електропостачання.

Чинна нормативна та науково-технічна практика оцінювання якості електричної енергії в умовах несинусоїдних режимів базується переважно на використанні інтегральних показників і спектральному аналізу амплітуд гармонічних складових, що фактично відповідає аналізу амплітудно-частотного спектра електричних величин. При цьому, згідно з європейським стандартом [3], оцінювання обмежується показниками, що характеризують напругу в мережі, тоді як вимоги стандарту [4] поширюються як на напругу, так і на струми.

Інформативність унормованих показників якості зумовлена тим, що у розрахункових виразах для їх визначення використовуються переважно амплітудні параметри гармонічних складових. Фазово-частотний розподіл гармонічного спектру напруги та струму залишається поза увагою нормативного оцінювання, хоча саме він визначає геометрію часових кривих електричних величин.

За однакових амплітудно-частотних розподілів, але різних фазо-частотних, часові криві напруги та струму можуть істотно відрізнятися за формою. Це проявляється у зміні значень і положення точок екстремумів, кількості та характеру точок заломлення в межах кожної чверті періоду, а також у швидкості зміни миттєвих значень сигналу між цими точками. Зазначені геометричні особливості мають визначальне значення, зокрема під час оцінювання процесів електричного старіння твердої ізоляції електротехнічного обладнання та інтенсивності часткових розрядів, які є чутливими до локальних пікових значень напруженості електричного поля.

З огляду на викладене, актуальним є поглиблений аналіз показників якості електричної енергії з позицій їх інформативності щодо геометрії кривих. Окремий інтерес становить вивчення закономірностей спотворення синусоїдальної форми сигналу окремими гармоніками та їх комбінаціями за різних амплітудних та фазо-частотних співвідношень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні науково-прикладні дослідження, присвячені впливу індивідуальних побутових електропристроїв із силовою електронікою, свідчать про наявність тенденції до спотворення синусоїдальної форми струму мережі. У гармонічному

спектрі таких струмів, як правило, домінують непарні вищі гармонічні складові низьких порядків, зокрема 3-я, 5-а, 7-а та 9-а гармоніки [10-13]. Зазначене є характерною ознакою нелінійних навантажень із випрямлячами та імпульсними перетворювачами, що широко застосовуються в сучасній побутовій та офісній техніці.

Традиційно в більшості досліджень оцінювання рівня спотворення струму здійснюється на основі інтегральних показників, зокрема загального коефіцієнта гармонічних спотворень (THD), коефіцієнта індивідуального гармонічного спотворення (IGD), діючого значення (RMS), коефіцієнта спотворення (DF) та сумарного гармонічного спотворення струму відносно номінального навантаження (TDD). Для ряду європейських країн нормативна база у сфері якості електричної енергії та електромагнітної сумісності формувалася протягом другої половини ХХ – початку ХХІ століття та передбачає розмежування вимог до характеристик напруги електропостачання і вимог до споживачів електричної енергії. Зокрема, стандарт [3] встановлює межі для загального коефіцієнта гармонічних спотворень, показників індивідуального гармонічного спотворення та допустимі межі відхилень виключно для напруги електропостачання в точках загального приєднання електричних мереж за нормальних умов експлуатації, без унормування відносного спектрального складу струмів навантажень, тоді як нормативні документи з електромагнітної сумісності більше спрямовані на обмеження емісії гармонічних складових струму окремими електроприймачами у абсолютних значеннях з метою запобігання недопустимому впливу на електричну мережу та суміжне обладнання.

Аналіз низки сучасних публікацій, зокрема [10-13], показує, що останні дослідження якості електроенергії зосереджуються на гармонічних спотвореннях струмів. Ці спотворення часто стають більш вираженими порівняно зі спотвореннями напруги у низьковольтних розподільчих мережах через зростання частки нелінійних споживачів.

Характерною особливістю розглянутих робіт є застосування інтегральних показників якості, зокрема коефіцієнта гармонічних спотворень (THD), а також аналіз амплітудно-частотних спектрів струмів для оцінки впливу нелінійних навантажень.

У роботах «Вплив гармонік струму нелінійних навантажень на якість електроенергії низьковольтної мережі – огляд та тематичне дослідження» [10] і «Вплив гармонік струму нелінійних навантажень на якість електроенергії та втрати в системах розподілу електроенергії» [11] якість електричної енергії оцінюється за показником THD у поєднанні зі спектральним аналізом струмів; при цьому в роботі [11] додатково використано еквівалентну модель Нортон для опису взаємодії нелінійних навантажень із мережею.

Дослідження «Перешкоди, що створюються системами освітлення зі світлодіодними лампами, та зменшення їхнього впливу» [12] зосереджене на впливі світлодіодних джерел світла. Окрім THD, в ньому застосовують коефіцієнт амплітуди струму (CF) та коефіцієнт потужності (PF), а також пропонують метод зменшення гармонічних спотворень шляхом удосконалення структури джерела живлення.

Роботу «Гармонійні спотворення, спричинені нелінійними побутовими навантаженнями: вимірювання та моделювання» [13] присвячено моделюванню сукупності побутових нелінійних навантажень у житловому будинку з використанням комплексного гармонічного аналізу для оцінювання їхнього сумарного впливу на параметри мережі.

Результати останніх науково-практичних досліджень вказують на можливий негативний вплив нелінійних навантажень на якість електроенергії, що може проявлятися у зростанні втрат, спотворенні форм електричних величин через високу частку вищих гармонічних складових у кривих струму та експлуатаційних проблемах обладнання. Водночас більшість досліджень обмежується використанням інтегральних показників та амплітудно-частотних спектрів, тоді як вплив фазових співвідношень між гармонічними складовими, які визначають геометрію часових кривих, залишається недостатньо вивченим.

Постановка завдання. Метою роботи є комбінована оцінка впливу амплітудних та фазових параметрів вищих гармонічних складових струму на форму часової кривої в низьковольтній електричній мережі, а також перевірка гіпотези про обмеженість традиційних спектральних і інтегральних показників якості електроенергії у відображенні такого впливу.

Виклад основного матеріалу. Для комплексної оцінки якості електричної енергії у наукових дослідженнях та інженерній практиці застосовується широкий спектр показників, що характеризують ступінь спотворення синусоїдальних сигналів напруги та струму внаслідок гармонічних складових. При цьому ці показники регламентуються різними стандартами, іноді використовують різну термінологію

та визначення навіть для однакових фізичних явищ, а деякі нормативно затверджені коефіцієнти залишаються маловживаними у практиці.

Відсутність єдиного підходу до формалізації та використання інтегральних і індивідуальних показників якості електроенергії робить доцільним їх детальний порівняльний аналіз. Це допомагає виявити основні нормативні розбіжності, оцінити застосовність показників у сучасній інженерній практиці та визначити можливі напрямки подальших досліджень і стандартизації.

Періодичний електричний сигнал, що містить гармонічні складові, аналітично описується дискретним рядом [14]:

$$f(t) = \sum_{h=1}^{\infty} f_{(h)}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} F_{(h)} \sqrt{2} \cdot \sin(h\omega t + \psi_{(h)}),$$

де $f(t)$ – миттєве значення несинусоїдальних напруги або струму як функції часу; $f_{(h)}(t)$ – миттєве значення гармонічної складової напруги або струму як еквівалентної синусоїди; $F_{(h)}$ – діюче значення гармонічної складової; ω – кутова частота основної гармоніки; $\psi_{(h)}$ – початкова фаза гармонічної складової; h – порядковий номер гармонічної складової.

У нормативній та науково-технічній практиці вплив кожної окремої гармонічної складової напруги або струму оцінюється відношенням діючого значення вищої гармоніки до діючого значення основної гармоніки як

$$\frac{F_{(h)}}{F_{(1)}},$$

де $F_{(1)}, F_{(h)}$ – діючі значення основної (першої) та вищої гармонічної складової h порядку напруги або струму відповідно.

За фізичним змістом таке відношення характеризує відносний вклад окремої гармонічної складової у спотворення синусоїдної форми кривої та згідно ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 [5] вводиться як термін *h*-th Harmonic Ratio. У наукових текстах, зокрема в [11], даний показник використовується з назвою *Individual Harmonic Distortion*.

Контроль гармонічних спотворень здійснюється за стандартами ІЕЕЕ 519-2022 [4] у США та EN 50160:2023 [3] у групі європейських країн. Обидва документи встановлюють граничні значення індивідуальних гармонічних складових напруги $\left(\frac{U_{(h)}}{U_{(1)}}\right)$, при цьому стандарт ІЕЕЕ 519-2022 поширюється також на струми. У стандартах серії ІЕС/EN 61000-3-2 [15], що регламентують електромагнітну сумісність обладнання, допустимі рівні гармонік струму встановлюються в абсолютних значеннях (амперах), а не у відносних величинах приведених до основної гармоніки. При цьому жоден з наведених докумен-

тів не використовує термін *h*-th Harmonic Ratio або *Individual Harmonic Distortion* (IHD).

Одним із базових інтегральних показників оцінювання несинусоїдності напруги та струму є показник, який в міжнародній практиці використовується під англійською назвою *Total Harmonic Distortion* (THD), зокрема у ДСТУ EN 50160:2023 [3], ІЕЕЕ Std 1459-2025 [6] та ІЕС 60050-161:2003 [5]. Згідно з наведеними стандартами, коефіцієнт THD визначається як відношення діючого значення сукупності вищих гармонічних складових напруги (струму) до діючого значення основної (першої) гармоніки і може бути записаний у вигляді

$$THD_f = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} F_{(h)}^2}}{F_{(1)}} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \eta_{(h)}^2},$$

де $F_{(h)}$ – діюче значення h -ї гармонічної складової напруги або струму;

$F_{(1)}$ – діюче значення основної гармоніки напруги або струму;

$\eta_{(h)} = \frac{F_{(h)}}{F_{(1)}}$ – пропонуване умовне позначення індивідуального гармонічного спотворення в рамках даної роботи.

Метрологічна оцінка електричних величин за будь-яких режимів роботи здійснюється через ефективне значення напруги та струму. Поняття ефективного значення змінної електричної величини за математичним змістом відповідає середньоквадратичному (англ. *Root Mean Square*, RMS) і застосовується як до синусоїдних, так і до несинусоїдних періодичних сигналів. Нормативне математичне визначення середньоквадратичного значення несинусоїдної напруги або струму закріплене в ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 [5]. Для інженерного аналізу несинусоїдних режимів RMS використовує амплітудний спектр сигналу. У ряді наукових робіт даний показник вводиться як залежність від коефіцієнта THD [14].

$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T f_{(h)}^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} F_{(h)}^2} = F_{(1)} \sqrt{1 + THD_f^2},$$

де F_{RMS} – ефективне (середньоквадратичне) значення періодичного змінного сигналу напруги або струму.

Частка основної гармонічної складової у повному (несинусоїдному) сигналі у нормативних документах вводиться під різними назвами, проте має ідентичний фізичний зміст і математичне визначення. У ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 [5] аналогічний показник наведено під назвою *Fundamental Factor*, тоді як у ІЕЕЕ Std 1459-2025 [6] для цього ж коефіцієнта використовується тер-

мін Distortion Factor (DF). Незважаючи на різну термінологію, у зазначених стандартах коефіцієнт визначається як відношення діючого значення основної гармоніки до діючого значення періодичного сигналу напруги або струму, тобто

$$DF_f = \frac{F_{(1)}}{F_{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_f^2}}.$$

За фізичним змістом коефіцієнт даний коефіцієнт в інженерній практиці більш відомий як DF та безпосередньо пов'язаний з енергетичним балансом сигналу та використовується в аналізі потужностей за несинусоїдних режимів.

Серед термінологічної бази математичного аналізу та теоретичних основ електротехніки наявна низка неунормованих понять призначених для кількісного опису форми та несинусоїдності напруги й струму, а саме: коефіцієнт гармонік, коефіцієнт форми кривої та коефіцієнт амплітуди кривої. Частина цих коефіцієнтів раніше визначалася нормативними документами, дію яких наразі припинено.

Серед перелічених коефіцієнтів на практиці застосовують коефіцієнт амплітуди (англ. Crest Factor, CF), який визначається як відношення пікового значення напруги або струму до їх діючого (RMS) значення:

$$CF = \frac{|F_{max}|}{F_{RMS}}$$

де F_{max} – максимальне за модулем миттєве значення напруги або струму за період.

Аналіз міжнародних нормативних документів з якості електричної енергії (IEC, EN, IEEE) показує, що CF не належить до основних нормованих показників якості електроенергії, однак використовується як допоміжний індикатор форми сигналу та здатності системи електроживлення відтворювати пікові навантаження.

Гармонічні спотворення струму є найбільш критичними в точці загального приєднання (PCC), де їхній вплив на електричну мережу визначається режимом максимального навантаження споживача. З огляду на це в IEEE Std 519-2022 [4] для оцінювання гармонічних спотворень струму в PCC введено показник загального спотворення попиту (англ. Total Demand Distortion, TDD), який нормується відносно струму максимального попиту, усередненого за типовий інтервал 15–30 хв.

Загальне спотворення попиту визначається виразом

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{(h)}^2}}{I_{load}}$$

де $I_{(h)}$ – діюче значення h-тої гармоніки струму, I_{load} – струм максимального попиту в точці PCC.

Показник TDD використовується в IEEE Std 519-2022 [4] як базовий нормувальний критерій струмових гармонічних спотворень, оскільки він безпосередньо пов'язаний з реальним навантаженням споживача та адекватно відображає його вплив на мережу.

Єдиний показник, що враховує величини початкових фаз між основними гармоніками напруги та струму є коефіцієнт потужності, який дозволяє оцінити частку активної потужності у повній при передачі електроенергії у колах синусоїдного струму та для певних випадків роботи кола може бути розрахований як косинус кута фазового зсуву між синусоїдними напругою та струмом. У нормативній базі США, IEEE Std 1459-2025 [3], введено параметр коефіцієнту зміщення потужності (англ. Displacement Power Factor, DPF), який визначається як косинус кута зсуву фаз між фундаментальними гармонічними складовими напруги і струму:

$$DPF = \cos \Theta,$$

де $\Theta = \psi_{u(1)} - \psi_{i(1)}$ – кут фазового зсуву між основними гармоніками напруги та струму.

Проте розрахунковий вираз такого параметру підкреслює обмеження показника DPF в умовах високого рівня гармонічних спотворень.

Класична теорія та сучасні дослідження [11] підкреслюють важливість врахування фазових зсувів між усіма гармонічними складовими при аналізі активної потужності. Відомі дослідження демонструють, що кути фазового зсуву між основними гармоніками змінюються під впливом кута керування тиристорами [16].

Для оцінки ефективності електроспоживання застосовується поняття істинного коефіцієнта потужності (англ. True Power Factor, TPF) IEEE Std 1459-2025 [3], який враховує не лише фазовий зсув між основними гармоніками, а й вплив гармонічних спотворень струму. Аналітичний вираз для визначення показника TPF має вигляд:

$$TPF = DPF \cdot DF_i = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_i)^2}} \cos \Theta.$$

Проведений аналіз нормативних документів та наукових джерел дозволяє виділити, що комплексна оцінка якості електричної енергії в сучасній нормативній та науково-технічній практиці переважно зводиться до аналізу спектрального складу амплітуд гармонічних складових напруги та струму. При цьому в більшості країн нормування показників якості електроенергії здійснюється головним чином відносно напруги мережі, тоді як показники струму розглядаються в обмеженому нормативному контексті.

Аналіз математичних виразів, що набули широкого застосування для енергетичної та метрологічної оцінки електричних режимів (RMS, Individual Harmonic Distortion, THD, Distortion Factor, Displacement Power Factor, True Power Factor, Total Demand Distortion), демонструє обмеження унормованих показників врахуванням виключно амплітудних величин гармонічних складових. Початкові фази гармонік напруги та струму, а також їх взаємні фазові співвідношення, у зазначених показниках явно не враховуються.

Як наслідок, наведені показники не відображають інформацію про геометрію форми часової залежності електричних величин. Це може обмежувати їх застосування для детального аналізу несинусоїдних режимів, оскільки різні по формі криві можуть мати ідентичні спектральні та інтегральні показники.

Водночас саме форма кривої напруги та струму, зумовлена поєднанням амплітудних і фазових характеристик гармонічних складових, є одним із визначальних чинників інтенсивності часткових розрядів і, відповідно, процесів електричного старіння твердої ізоляції електротехнічного обладнання [17-19].

Методика проведення дослідження щодо впливу початкових фаз гармонічних складових на геометрію кривої струму. Для системного аналізу впливу гармонічних складових на геометрію часової кривої сигналу струму дослідження виконувалося шляхом поетапного спотворення синусоїдальної форми сигналу окремими вищими гармоніками 3-го, 5-го, 7-го та 9-го порядків. Кожна гармонічна складова розглядалася незалежно, без урахування її сумісної дії з іншими гармоніками для встановлення характерних закономірностей індивідуальних впливів кожної гармонічної складової на результуючу форму сигналу.

У всіх розглянутих випадках початкова фаза фундаментальної (першої) гармоніки приймалася рівною нулю. Для кожної вищої гармоніки аналіз проводився для трьох характерних значень початкової фази: 0° , 60° та 180° .

Амплітудний рівень кожної вищої гармонічної складової задано у відносних величинах за допомогою показника індивідуального гармонічного спотворення ($\eta_{(n)}$). Для кожної комбінації порядку гармоніки та її початкової фази розглядалося п'ять характерних рівнів гармонічного спотворення. Перший рівень обрано у відповідності до нормативно допустимих значень індивідуального гармонічного спотворення окремих гармонік прийнятих для напруги мережі [3]: для

3-ї та 7-ї гармонік – $\eta_{(3)} = \eta_{(7)} = 0.05$, для 5-ї гармоніки – $\eta_{(5)} = 0.06$, для 9-ї гармоніки – $\eta_{(9)} = 0.015$. Другий рівень становив $\eta_{2(3)} = \eta_{2(5)} = \eta_{2(7)} = \eta_{2(9)} = 0.08$, що відповідає типовому граничному значенню загального гармонічного спотворення, що використовується у практиці оцінювання якості електроенергії. Для дослідження зміни геометрії часової кривої за умов істотного відхилення від нормативних режимів, додатково аналізуються підвищені рівні гармонічних спотворень, задані значеннями індивідуального гармонічного спотворення на рівнях 0.1, 0.3 та 0.4.

З урахуванням результатів опублікованих у низці робіт, де відзначається, що при підключенні нелінійних навантажень індивідуально чи у певних комбінаціях до однієї з фаз низьковольтної мережі форма напруги, як правило, залишається близькою до синусоїдальної, тоді як форма струму характеризується підвищеним вмістом вищих гармонічних складових. При цьому експериментально фіксується, що фазний струм мережі при паралельному підключенні кількох нелінійних навантажень може мати менший рівень гармонічних спотворень порівняно з випадками індивідуального підключення. Водночас детальний аналіз причин такого ефекту, зокрема ролі фазових співвідношень між гармонічними складовими, у цих дослідженнях ще потребує уваги.

З огляду на це, у даному дослідженні додатково розглядається випадок одночасної дії 3-ї, 5-ї, 7-ї та 9-ї гармонічних складових струму. Аналіз виконано для різних комбінацій початкових фаз зазначених гармонік за умови збереження однакового значення показника загального гармонічного спотворення (THD) результуючих кривих. Такий підхід дозволив відокремити вплив фазових співвідношень між гармонічними складовими на форму часової кривої струму при фіксованому амплітудному спектрі та дати первинне пояснення ефектам, які не відображаються традиційними інтегральними показниками якості електроенергії.

Використання унормованих розрахункових виразів для показників якості електроенергії дозволяють встановити вплив відносного гармонічного спектру від допустимого значення до рівня 80% на взаємоз'язок ефективного значення та THD (рис. 1).

Результати дослідження впливу початкової фази вищих гармонічних складових на геометрію часової кривої струму проаналізовано на основі сімейств часових діаграм, наведених у таблиці 1. Таблиця містить 12 графічних зображень, кожне з яких відображає результуючі криві струму для

фіксованого порядку вищої гармоніки за різних значень її початкової фази та амплітуди.

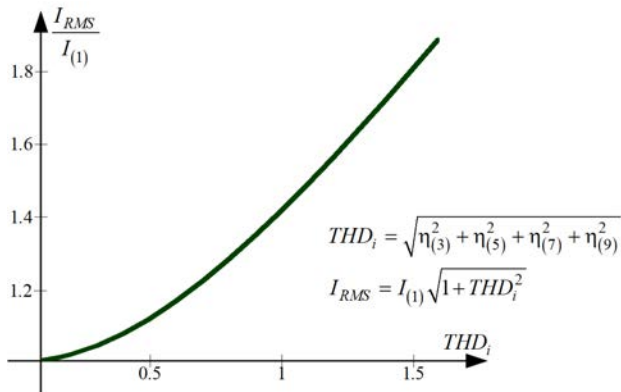


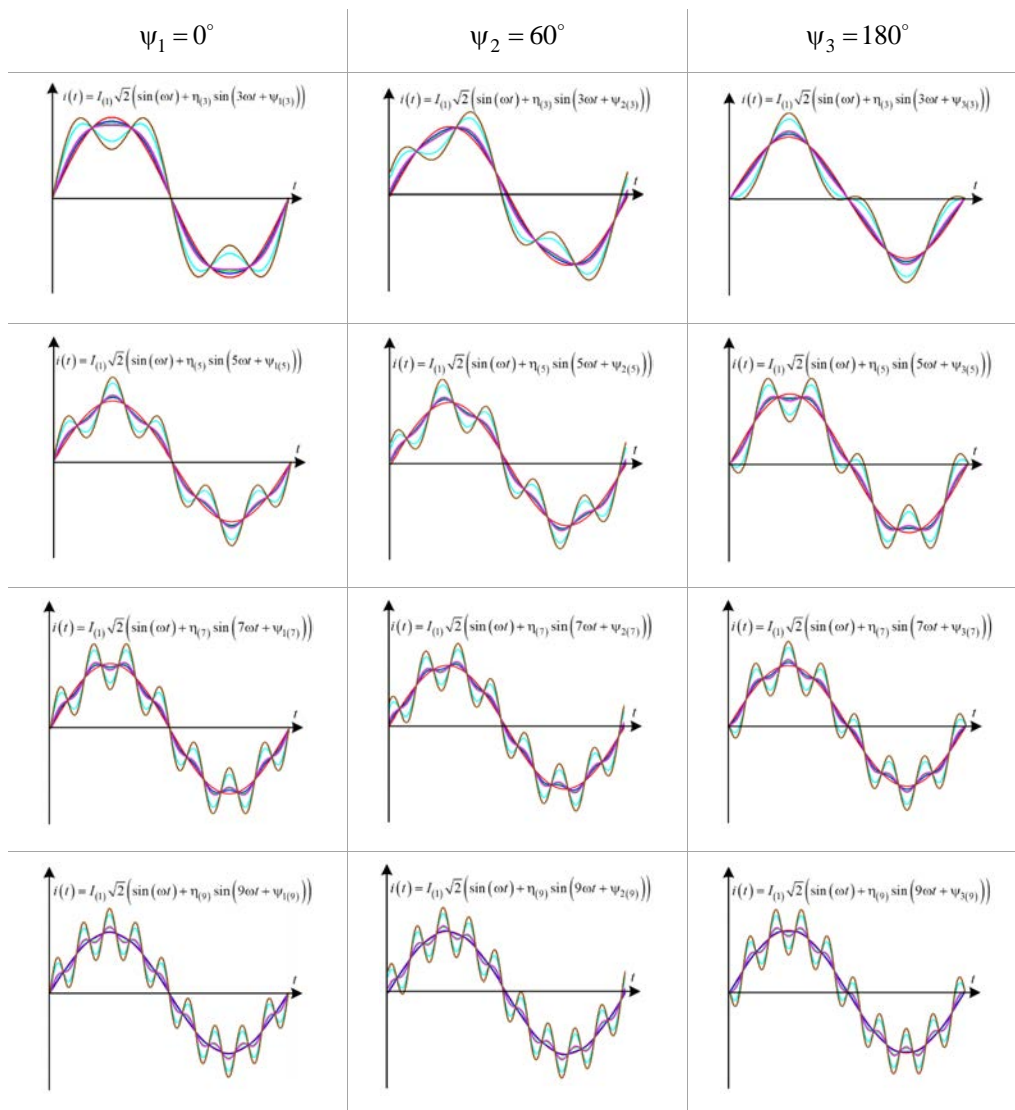
Рис. 1. Вплив індивідуальних гармонік 3-го, 5-го, 7-го та 9-го порядків на взаємозв'язок між ефективним значенням струму та коефіцієнтом гармонічних спотворень (THD)

Часові діаграми у першому ряді таблиці 1 ілюструють зміну форми часової кривої струму при спотворенні синусоїди виключно 3-ю гармонікою для п'яти значень показника індивідуального гармонічного спотворення: 0,05; 0,08; 0,10; 0,30; 0,40. Другий ряд відповідає аналогічному аналізу для 5-ї гармоніки за рівнів індивідуального гармонічного спотворення: 0,06; 0,08; 0,10; 0,30; 0,40. У третьому ряду наведено результати для 7-ї гармоніки при значеннях індивідуального гармонічного спотворення: 0,05; 0,08; 0,10; 0,30; 0,40. Четвертий ряд відображає вплив 9-ї гармоніки за рівнів індивідуального гармонічного спотворення: 0,015; 0,08; 0,10; 0,30; 0,40.

Аналіз отриманих часових діаграм демонструє, що за умов накладання фундаментальної та вищої гармонічних складових, коли їх максимуми миттєвих значень відповідних гармонік

Таблиця 1

Вплив початкової фази індивідуальних гармонічних складових на геометрію струму мереж



збігаються, результуюча крива струму зберігає симетрію відносно осі часу та осі ординат. Такі випадки характерні з кроком чотири порядки: при нульових початкових фазах починаючи з 5-ї гармоніки та при початкових фазах 180° починаючи з 3-ї гармоніки. У таких випадках зі зростанням рівня індивідуального гармонічного спотворення спостерігається деформація кривої на рівні амплітудних значень фундаментальної гармоніки, що проявляється як «витягування». При цьому припускається, що приріст максимального значення спотвореного струму індивідуальною гармонічною складовою можна оцінити як:

$$I_{\max(n)} = I_{(1)} \sqrt{2} \cdot (1 + m\eta_{\text{норм}(h)}),$$

де: $\eta_{\text{норм}(h)}$ – нормативна величина індивідуального гармонічного спотворення відповідної вищої гармоніки; n – будь-яке невід’ємне дійсне число, яке кількісно вказує на рівень відхилення відносної амплітуди вищої гармонічної складової від нормованого значення; $I_{\max(n)}$ – максимальне значення спотвореного струму мережі; $I_{(1)}$ – ефективне значення основної гармоніки струму мережі; $\Delta = 1 + m\eta_{\text{норм}(h)}$ – приріст максимального значення струму за умови, що амплітуди основної та вищої гармонічних складових збігаються.

Для 3-ї гармоніки характерним є формування ділянок локального сплюснення кривої поблизу моментів переходу струму через нуль. Спотворення струму 5-ю, 7-ю та 9-ю гармоніками характеризується появою коливальних відхилень навколо синусоїди фундаментальної гармоніки вздовж усього періоду.

За умов накладання фундаментальної та вищої гармонічної складових, коли додатний

максимум фундаментальної гармоніки збігається з від’ємним максимумом відповідної вищої гармоніки, результуюча крива струму характеризується локальним «просіданням» відносно амплітуди основної гармоніки. Зазначений тип деформації спостерігається з періодичністю, що відповідає зміні порядку гармоніки через чотири, зокрема: для нульових початкових фаз – починаючи з 3-ї гармоніки, а для початкових фаз 180° – починаючи з 5-ї гармоніки. З підвищенням рівня індивідуального гармонічного спотворення деформація кривої струму на рівні амплітуд фундаментальної гармоніки стає більш вираженою. У діапазоні значень індивідуального гармонічного спотворення від нормативно допустимого для відповідного порядку гармоніки до 8 % форма сигналу набуває трапецеїдальної форми. Подальше зростання рівня гармонічного спотворення (понад 8 %) призводить до формування М-подібної геометрії. Крім того, починаючи з 7-ї гармоніки, на результуючій кривій з’являються додаткові проміжні коливання навколо синусоїди фундаментальної частоти. Інтенсивність і кількість таких коливань зростає зі збільшенням порядку гармоніки та рівня індивідуального гармонічного спотворення.

На рис. 2а наведено часові діаграми струму, сформовані одночасним накладанням 3-ї, 5-ї, 7-ї та 9-ї гармонічних складових за різних комбінацій їх початкових фаз. Для всіх трьох випадків амплітуди окремих гармонік є однаковими, що забезпечує однакові значення індивідуальних гармонічних спотворень та загального коефіцієнта гармонічних спотворень, який у всіх випадках становить $\text{THD} = 9,4\%$.

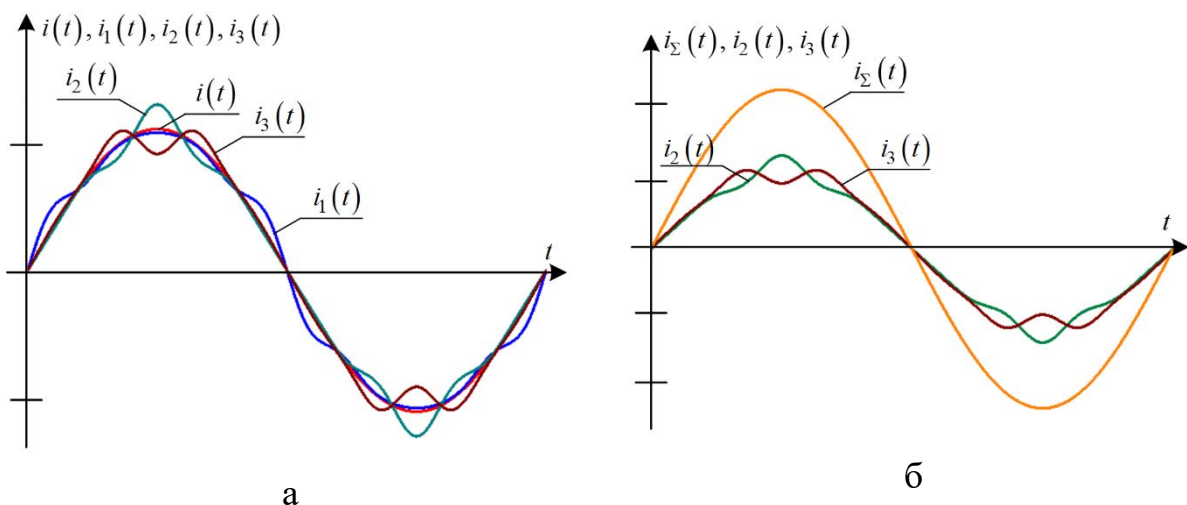


Рис. 2. Часові діаграми струмів спотворених 3-ю, 5-ю, 7-ю та 9-ю гармонічними складовими за різних початкових фаз в координатах фундаментальної синусоїди (а) та часова діаграма результуючого струму в результаті накладання двох спотворених (б)

$$i_1(t) = I_{(1)}\sqrt{2}(\sin(\omega t) + \eta_{(3)}\sin(3\omega t + 0^\circ) + \eta_{(5)}\sin(5\omega t + 0^\circ) + \eta_{(7)}\sin(7\omega t + 0^\circ) + \eta_{(9)}\sin(9\omega t + 0^\circ))$$

$$i_2(t) = I_{(1)}\sqrt{2}(\sin(\omega t) + \eta_{(3)}\sin(3\omega t + 180^\circ) + \eta_{(5)}\sin(5\omega t + 0^\circ) + \eta_{(7)}\sin(7\omega t + 180^\circ) + \eta_{(9)}\sin(9\omega t + 0^\circ))$$

$$i_3(t) = I_{(1)}\sqrt{2}(\sin(\omega t) + \eta_{(3)}\sin(3\omega t + 0^\circ) + \eta_{(5)}\sin(5\omega t + 180^\circ) + \eta_{(7)}\sin(7\omega t + 0^\circ) + \eta_{(9)}\sin(9\omega t + 180^\circ))$$

У першому випадку $i_1(t)$ початкові фази всіх гармонічних складових прийнято за нульові. З геометричної точки зору: у момент досягнення максимуму фундаментальної гармоніки 3-тя та 7-ма гармоніки перебувають у протифазі, тоді як 5-та та 9-та – у фазі з основною складовою. За цих умов результуюча крива струму не демонструє чітко вираженої амплітудної деформації, однак у часовій області з'являються локальні викривлення. Зокрема, в межах кожної чверті періоду спостерігаються ділянки з різною швидкістю зміни миттєвого значення струму, що призводить до ускладнення геометрії часової кривої.

Для другого випадку $i_2(t)$ початкові фази вищих гармонічних складових обрано таким чином, що їх додатні максимуми збігаються з додатним максимумом фундаментальної гармоніки. За цих умов результуюча крива струму $i_2(t)$ зазнає переважно амплітудної деформації, що проявляється у збільшенні пікових значень без формування виражених додаткових коливань відносно синусоїди основної частоти. Форма сигналу при цьому зберігає плавний характер і не демонструє локальних викривлень, типових для окремих індивідуальних гармонічних спотворень.

За третього випадку $i_3(t)$ від'ємні максимуми вищих гармонічних складових збігаються з додатним максимумом фундаментальної гармоніки. Внаслідок цього результуюча крива струму $i_3(t)$ характеризується зменшенням миттєвих значень у зоні максимумів основної складової, що проявляється як симетричне «просідання» форми сигналу. Аналогічно до попереднього випадку, така деформація має переважно амплітудний характер і не супроводжується появою додаткових високо-частотних коливань у часовій області.

Отримані результати наочно показують, що за фіксованого амплітудного спектра та однакового значення THD геометрія часової кривої струму може істотно змінюватися лише внаслідок перерозподілу фазових співвідношень між гармонічними складовими. Це підтверджує обмежену інформативність інтегральних показників гармонічного спотворення щодо опису реальної форми сигналу та підкреслює роль фазових ефектів у формуванні часових кривих електричних величин.

Для моделювання паралельного підключення двох нелінійних навантажень до однієї фази низьковольтної мережі додатково розглянуто сумарну часову криву струму, сформовану як алгебраїчну

суму струмів, що відповідають другому та третьому розглянутим випадкам фазових співвідношень гармонічних складових ($i_2(t) = i_3(t) + i_2(t)$). Кожен із цих струмів характеризується однакою амплітудним спектром та значенням загального гармонічного спотворення THD = 9,4 %, проте відрізняється фазовими співвідношеннями між вищими гармоніками. У результаті сумування зазначених струмів формується крива (рис. 2, б), яка у часовій області практично не відрізняється від ідеальної синусоїди фундаментальної частоти. Це свідчить про майже повну взаємну компенсацію вищих гармонічних складових, незважаючи на те, що кожен із окремих струмів має суттєвий рівень гармонічних спотворень, підтверджений однаковими значеннями показника THD.

Отриманий результат показує, що при паралельному підключенні нелінійних навантажень із різними фазовими характеристиками гармонічних складових сумарні спотворення форми струму в часовій області можуть значно зменшуватися, іноді наближаючись до синусоїдальної форми. При цьому традиційні інтегральні показники якості електроенергії, зокрема THD, не завжди відображають такий ефект, оскільки не враховують фазові співвідношення між гармонічними складовими.

Висновки. Аналіз чинних міжнародних і національних нормативних документів (IEC, EN, IEEE, ДСТУ) показав, що сучасна система оцінювання якості електричної енергії базується переважно на інтегральних та спектральних показниках, які враховують амплітудні характеристики гармонічних складових і не забезпечують явного урахування їх фазових співвідношень.

Встановлено, що поширені показники якості електроенергії (THD, h-th Harmonic Ratio, RMS, DF, TDD, DPF, TPF), незважаючи на нормативну закріпленість і широке практичне застосування, не містять інформації про геометрію часових кривих струму та напруги. У результаті електричні сигнали з істотно різною формою можуть характеризуватися однаковими значеннями цих показників.

Чисельне моделювання впливу окремих вищих гармонічних складових 3-го, 5-го, 7-го та 9-го порядків показало, що за фіксованого амплітудного спектра вирішальним чинником формування геометрії часової кривої струму є початкові фази гармонік відносно фундаментальної складової.

Виявлено, що фазове співпадіння максимумів фундаментальної та вищих гармонічних складових призводить переважно до амплітудної дефор-

мації типу «втягування» без появи локальних коливань, тоді як протифазне накладання гармонік зумовлює формування «просідань», трапецеїдальних та М-подібних форм сигналу. Для гармонік вищих порядків додатково спостерігається поява високочастотних локальних коливань у часовій області.

Встановлено, що за однакових значень THD і незмінного амплітудного спектра геометрія часової кривої струму може значно змінюватися виключно внаслідок перерозподілу фазових співвідношень між гармонічними складовими. Це

вказує на обмежену здатність інтегральних показників гармонічного спотворення повністю описувати реальну форму сигналу.

Показано, що при паралельному підключенні нелінійних навантажень із різними фазовими характеристиками гармонічних складових можливе взаємне часткове компенсування гармонік і наближення сумарного струму до синусоїдальної форми, навіть за значних індивідуальних спотворень кожного навантаження. Цей ефект не завжди відображається традиційними показниками якості електроенергії, зокрема коефіцієнтом THD.

Список літератури:

1. Bhattacharyya S., Myrzik J.M.A., Kling W.L. Consequences of poor power quality – an overview. Proceedings of the 42nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Brighton, UK. 2007. pp. 651-656. DOI: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2007.4469025>.
2. Liu Q., Liu F., Li Y., Wang S. Harmonic modeling and harmonic contribution determination: a case study of industrial power supply system. Electric Power Systems Research. 2023. Vol. 217. Article 109122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109122>
3. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. – Київ : Міністерство економіки України, 2023. – Національний стандарт України ; введено в дію з 01.03.2025.
4. IEEE Std 519-2022. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – New York, NY, USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2022.
5. ДСТУ ІЕС 60050-161:2003. Міжнародний електротехнічний словник (ІЕВ). Частина 161. Якість електричної енергії. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – Національний стандарт України ; введено в дію з 01.01.2004.
6. IEEE Std 1459-2025. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. – New York, NY, USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025.
7. ДСТУ 3466-96. Якість електричної енергії. Терміни та визначення. – Чинний від 01.01.1998. – Київ : Держстандарт України, 1997. – 96 с. – Прийнято 26.11.1996 ; введено в дію з 01.01.1998 ; скасовано з 01.01.2026 згідно з наказом ДП «УкрНДНЦ» від 29.08.2025 № 163.
8. ДСТУ 2815-94. Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення (ІЕС 60050-131:1978, NEQ ; ІЕС 60050-151:1978, NEQ). – Чинний від 01.01.1996. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 51 с. – Прийнято 31.10.1994 ; введено в дію з 01.01.1996 ; скасовано з 01.01.2026 згідно з наказом ДП «УкрНДНЦ» від 29.08.2025 № 163.
9. IEEE Std 446-1995. IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications. – New York: IEEE, 1995.
10. Michalec Ł., Jasiński M., Sikorski T., Leonowicz Z., Jasiński Ł., Suresh V. Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality of a low voltage network – review and case study. Energies. 2021. Vol. 14. Article 3665. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14123665>.
11. Ghorbani M., Mokhtari M.J. Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality and losses in power distribution systems. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2015. Vol. 5. pp. 166-174. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v5i1.pp166-174>
12. Putz Ł., Bednarek K., Nawrowski R. Disturbances generated by lighting systems with LED lamps and the reduction in their impacts. Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Article 4894. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9224894>.
13. Nuñez-Ramírez V., Guerrero-Rodríguez N.F., Batista-Jorge R.O., Mercado-Ravelo R., Ramírez-Rivera F.A., Ferreira J.A., Ramos-Ciprian R.D. Harmonic distortion caused by non-linear household loads: measurement and modelling. Results in Engineering. 2025. Vol. 25. Article 104483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104483>.
14. De La Rosa, F.C. Harmonics, Power Systems and Smart Grids, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015.
15. IEC 61000-3-2:2018. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase). – Geneva, Switzerland : International Electrotechnical Commission, 2018.

16. Peretyatko J., Trotsenko Y., Haiko M., Svyatnenko V. Simulation and analysis of the influence of thyristor conduction time in three-phase controlled rectifiers on harmonic distortions in the power supply network. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*. 2025. No. 1. pp. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324268>.
17. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Y. Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. Vol. 2. No. 1(40). pp. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.126626>.
18. Florkowski M., Florkowska B. Distortion of partial-discharge images caused by high-voltage harmonics. *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*. 2006. Vol. 153. No. 2. pp. 171-180. DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20050008>.
19. Florkowski M., Florkowska B., Zydrón P. Influence of high voltage harmonics on partial discharge patterns modulation. 2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Poznan, Poland. 2014. pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2014.7035403>.

Peretyatko Yu. V., Trotsenko Ye. O., Nesterko A. B., Parashchynets A. R. INFLUENCE OF PHASE PARAMETERS OF HARMONIC COMPONENTS ON THE FORMATION OF TIME DEPENDENCES OF ELECTRICAL QUANTITIES

The paper investigates the influence of the amplitude and phase parameters of higher harmonic current components on the geometry of the time curve in low-voltage electrical networks. The relevance of the study is due to the increase in the share of nonlinear loads with power electronics, which leads to the formation of non-sinusoidal modes and deterioration of electrical energy quality indicators. The current regulatory framework in the field of assessing the quality of electricity has been analyzed, in particular the provisions of the DSTU EN 50160, IEEE 519, IEEE 1459 and IEC 60050-161 standards, and it has been established that the modern standardization system is based mainly on integral and spectral indicators, which take into account only the amplitude characteristics of harmonic components. Within the framework of the study, numerical modeling of the phase distortion of the sinusoidal current shape by harmonics of the 3rd, 5th, 7th and 9th orders was performed for different values of individual harmonic distortion and initial phases. It was shown that for a fixed amplitude spectrum, the phase relationship between the harmonic components has a decisive influence on the shape of the time curve. It has been established that the phase coincidence of the maxima of the fundamental and higher harmonics causes mainly amplitude deformation of the signal, while antiphase superposition leads to the formation of subsidence, trapezoidal and M-shaped shapes, and the appearance of local oscillations. It has been proven that for the same values of the total harmonic distortion (THD), the geometry of the time-current curve can differ significantly depending on the phase characteristics of the harmonics. The possibility of mutual compensation of higher harmonic components when connecting nonlinear loads with different phase parameters in parallel is shown, which is not reflected by traditional integral indicators of electricity quality. The obtained results confirm the limited informativeness of existing normalized indicators in describing the real waveform and justify the feasibility of taking into account the phase characteristics of harmonic components when analyzing non-sinusoidal modes.

Keywords: power quality; nonlinear loads; harmonic current distortion; phase relations of harmonics; geometry of time dependence; harmonic distortion coefficient; individual harmonic components.

Дата першого надходження статті до видання: 27.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026