

**Соломчак О.В.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Соломчак А.О.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## ВИМІРЮВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМІВ І НАПРУГ В ТОЧКАХ СПІЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Зростання енергоємності комунально-побутових споживачів та ущільнення забудови населених пунктів призвело до збільшення навантаження на трансформатори та їх роботу на межі номінальної потужності. Це викликає насичення магнітопроводу та обрізання вершків синусоїди напруги. Одночасно зростає кількість та потужність нелінійних електроприймачів, що спричиняє появу вищих гармонік струмів і напруг в електричних мережах. Аналіз останніх досліджень показує, що проблема несинусоїдальності напруг і струмів залишається актуальною. Математичне моделювання не дає достовірних рішень для групових навантажень трансформаторних підстанцій. Метою роботи є вимірювання та аналіз несинусоїдальності струмів і напруг навантажень трансформаторних підстанцій, дослідження гармонічного складу групових навантажень та їх відповідність міжнародним стандартам. Проведено ряд вимірювань несинусоїдальності струмів і напруг навантажень трансформаторних підстанцій населених пунктів. Досліджено гармонічний склад групових навантажень та їх відповідність міжнародним стандартам. Коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруг THD на шини 0,4 кВ трансформаторної підстанції був в межах норми. За результатами тижневого моніторингу, перевищення граничних значень TDD струму фіксувалися більше 30% часу моніторингу, що не відповідає стандарту IEEE 519-2014. Для моніторингу рівнів вищих гармонік в точках спільного приєднання рекомендовано використовувати сучасні прилади, які дозволяють контролювати THD напруг і TDD струмів з використанням практичних рекомендацій стандартів IEEE 519-2014 та IEEE 1159-2019. Запропоновано заходи з обмеження рівнів вищих гармонік на підстанціях населених пунктів.

**Ключові слова:** гармонічні спотворення, нелінійні навантаження, вимірювання гармонік, моніторинг, якість електроенергії, точка спільного приєднання, спотворення загального споживання, коефіцієнт гармонічних спотворень, міська підстанція.

**Постановка проблеми.** Зростання енергоємності комунально-побутових споживачів, ущільнення забудови міст і сіл спричинило зростання завантаження силових трансформаторів у населених пунктах і їх роботу на межі номінальної потужності. Це спричиняє насичення магнітопроводу і обрізання вершків синусоїди напруги. Одночасно збільшилася кількість і потужність нелінійних електроприймачів в побутовому секторі, що спричинило появу вищих гармонік струмів і напруг в електричних мережах населених пунктів.

Несинусоїдальність характеризується коефіцієнтом і-ої гармонійної складової та коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої. Гармоніки виникають у мережах як наслідок роботи нелінійних навантажень, імпульсних джерел живлення, газорозрядних та світлодіодних ламп, мікрохвильових печей, напівпровідникових регуляторів

обертів електродвигунів, інверторних електроприводів, побутових сонячних електростанцій, тощо.

Відомо, що несинусоїдальність струмів і напруг призводить до таких негативних наслідків як додаткові втрати електроенергії, надмірне завантаження елементів електричної мережі, зменшення пропускної здатності, нагрів електричних машин і апаратів, збільшення активного опору провідника через поверхневий ефект, збільшення втрат в діелектрику ізоляції кабелю, хибні спрацювання пристроїв захисту, резонансні явища, наведення в телекомунікаційних і керуючих мережах, підвищення акустичних шумів в електромагнітному обладнанні. Гармоніки можуть спричинити некоректну роботу автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) побутових електроприймачів, які в якості каналів зв'язку використовують електричні мережі 0,4 кВ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Питання несинусоїдальності є достатньо дослідженими в промисловому секторі. У монографії [1] розглянуті загальні підходи до проблеми якості електричної енергії в тягових мережах, проблематика та нормативно-правове регулювання у сфері якості електричної енергії, результати експериментальних досліджень якості електричної енергії у системах тягового електропостачання постійного та змінного струму, питання обліку електричної енергії при несинусоїдних режимах роботи тягових підстанцій, а також методи і засоби поліпшення якості електричної енергії. Поява вищих гармонік потребує уточнення методів і алгоритмів вимірювання реактивної потужності [2]. В статті проведено аналіз можливостей вимірювання реактивної потужності в асиметричних несинусоїдних режимах трифазних мереж із заземленою нейтраллю за допомогою класичних і миттєвих потужностей. Показано, що при незначній асиметрії режиму можна застосувати будь-яку потужність. Запропоновано для визначення потужності гармонічних спотворень використовувати середньоквадратичні значення різниці потужностей пульсацій та небалансу. Показано, що потужність спотворення, зумовлену наявністю канонічних гармонік, достатньо вимірювати на частоті шостої гармоніки напруги живлення. Запропоновано формули для визначення цієї потужності з використанням миттєвих потужностей. В роботі [3] акцентовано увагу на появі нелінійних електронних навантажень, включаючи розподілені генерації та електромобілі. Автори намагаються оцінити гармонічні спотворення в системах розподілу, викликані різними нелінійними житловими навантаженнями. Експериментально отримані гармонічні спектри декількох побутових приладів, використані для моделювання типової системи розподілу Великобританії за допомогою програми «Електричний аналізатор перехідних процесів» (ETAP). Результати показують високий рівень гармонічних спотворень в точці загального приєднання, в системі розподілу, яка ще більше посилюється при розгляді більш високого рівня навантаження розподільного трансформатора. В [4] досліджено вплив міського залізничного транспорту на електромережі. Спотворення форми синусоїди в системі електроживлення метрополітену спричинено випрямлячем та інвертором блоку живлення постійного струму та інших електронних пристроїв в системі електропостачання тягового транспорту. Ця робота в основному вивчає гармо-

нічні проблеми, спричинені системою електропостачання тягового електротранспорту на основі моделювання за допомогою MATLAB. В [5] теоретично досліджено кумулятивні властивості гармонічного струму великої кількості нелінійних однофазних силових електронних навантажень. Виведена повна аналітична модель для найбільш поширеного типу навантаження. Потім ця модель використовується для дослідження впливу і взаємодії через імпеданс спільного джерела, зміни рівня потужності та зміни параметрів кіл на індивідуальні та кумулятивні струмові гармоніки. Показано неприпустимість арифметичного сумування величин вищих гармонік. Стаття [6] присвячена дослідження вищих гармонік, спричинених побутовими електроприладами. Звернено увагу на недостатнє приділення уваги даному питанню. Ця стаття досліджує необхідність врахування гармонічних спотворень на етапі проектування інженерних проектів електропостачання. Отримані результати свідчать про те, що гармоніки в розподільній мережі можуть накопичуватись, спричиняючи накопичувальний ефект у мережі. Крім того встановлено, що в розподільній мережі, яка містить побутові сонячні фотовольтаїчні системи, може бути зменшена проблема гармонічного впливу. В роботі [7] проведено комп'ютерне моделювання в середовищі DIgSILENT PowerFactory впливу тягових випрямлячів рейкового електротранспорту на спотворення форми струмів і напруг. Показано, що результати математичного моделювання не завжди співпадають з результатами експериментальних вимірів через складність врахування всіх навантажень, а також несинусоїдальність живлячої напруги. В результаті, значення гармонік струму, характерних для випрямляча може змінюватися. Крім того, можуть з'являтися інші гармоніки, які не характерні при синусоїдній нарузі. Дослідженням гармонічних рівнів у різних точках ліній електропередач [8] встановлено, що потужні низьковольтні споживачі створюють рівні гармонік струму, які перевищують порогові межі, визначені стандартом IEEE 519-2014 [9]. Причиною цього є те, що споживачі низької напруги генерують гармоніки безпосередньо в лінії електропередачі, на відміну від споживачів середньої і високої напруги, де більшість гармонік фільтруються на знижувальних трансформаторах споживачів.

Енергосистема повинна визначати допустимі рівні гармонік для потужних низьковольтних електроприймачів, щоб зменшити шкідливий вплив високих рівнів гармонік на розподільчу мережу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як видно з аналізу останніх досліджень і публікацій проблема несинусоїдальності напруг і струмів в електричних мережах населених пунктів стоїть досить гостро, рівень вищих гармонік наростає. Недостатньо дослідженими залишаються групові навантаження трансформаторних підстанцій населених пунктів. Результати математичного моделювання не дають достовірних рішень.

**Постановка завдання.** Метою роботи є експериментальні дослідження несинусоїдальності струмів і напруг навантажень трансформаторних підстанцій населених пунктів в Україні, дослідження гармонічного складу групових навантажень в точках спільного приєднання та їх відповідність міжнародним стандартам.

**Виклад основного матеріалу.** У 2014 році в стандарт IEEE 519 [9] було внесено ряд уточнень порівняно з редакцією 1992 року. Так уточнено поняття точки спільного приєднання (point of common coupling – PCC). Це межа між власником енергосистеми або оператором і користувачем, де PCC зазвичай приймається як точка в енергосистемі, найближча до користувача, де власник системи або оператор можуть запропонувати приєднання іншому користувачеві. Часто для промислових користувачів (тобто виробничих установок), які отримують живлення через абонентський трансформатор, PCC знаходиться на стороні високої напруги трансформатора. Для комерційних користувачів (офіси, торгові центри тощо), що отримують живлення через загальний трансформатор, PCC зазвичай знаходиться на стороні низької напруги трансформатора. В редакції 2014 року [9] чітко визначена спільна відповідальність за контроль гармонік між власниками системи або операторами та користувачами: усі користувачі обмежують свої гармонічні спотворення струмів до розумних значень, визначених справедливим чином, виходячи з частки власності кожного користувача у системі постачання та кожен власник системи або оператор вживає заходів для зниження рівня спотворень синусоїдальності напруги, за необхідності змінюючи характеристики імпедансу системи живлення. Контролюються гармоніки до 50-ї включно. Для моніторингу рівнів гармонік визначено одно і семиденні періоди. Для точок приєднання напругою до 1 кВ збільшено значення граничних показників. Так допустиме значення коефіцієнта гармонічних спотворень (THD) напруги (коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги) збільшено до 8%, а рівень окремих гармонік до 5%. Ці значення повинні бути забезпечені протягом 99% часу доби і 95% часу 7 днів.

Щодо гармонік струмів встановлено 3 межі процентиль:

– протягом тижня 95 процентиль 10 хвилинних вимірювань гармонічних струмів повинні бути менше значень, наведених в табл. 1.

– протягом тижня 99 процентиль 10 хвилинних вимірювань гармонічних струмів не повинні перевищувати 1.5 кратних значень, наведених в табл. 1.

– щоденно 99 процентиль короточасних вимірювань (3 сек) гармонічних струмів не повинні перевищувати 2,0 кратних значень, наведених в табл. 1.

Всі значення повинні бути в процентах від максимального струму споживання  $I_L$ , який визначається в PCC, як середнє значення струмів максимального споживання за 12 попередніх місяців.

Таблиця 1

**Граничні значення спотворень струмів для мереж напругою від 120 В до 69 кВ**

Максимальне гармонічне спотворення струму у відсотках від $I_L$						
Значення індивідуальних гармонік (непарні гармоніки) <sup>a, b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 <sup>c</sup>	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

<sup>a</sup> Парні гармоніки обмежені 25% від верхньої межі непарних гармонік.

<sup>b</sup> Спотворення струму, які призводять до зміння постійного струму не допускаються.

<sup>c</sup> Усе обладнання для виробництва електроенергії обмежено цими значеннями спотворення струму, незалежно від фактичного  $I_{sc}/I_L$ .

$I_{sc}$  = максимальний струм короткого замикання в точці PCC  
 $I_L$  = максимальний струм навантаження (основна гармоніка) в точці PCC за нормальних робочих умов навантаження

Для струму контролюється не THD, а показник спотворення загального споживання (TDD) – це пофазне гармонічне спотворення струму відносно максимального споживання в точці PCC.

TDD характеризує вплив гармонічних спотворень на систему. Наприклад, якщо в мережі високі значення THD, але низьке споживання, вплив гармонічних спотворень на вашу мережу може бути незначним. Однак при максимальному навантаженні і значенні THD рівному TDD, вплив на мережу буде значним. TDD оцінює співвідношення гармонічних струмів між кінцевим споживачем та джерелом живлення.

Авторами статті зроблено свій вклад в дослідження несинусоїдальності побутових елек-

троприймачів [10-12]. Експериментально досліджено рівні вищих гармонік струму та коефіцієнт несинусоїдальності типових побутових електроприймачів: газорозрядних та світлодіодних ламп, мікрохвильової печі, електронної апаратури з імпульсними блоками живлення, електроприладів з колекторними двигунами, обладнаними тиристорними регуляторами, побутових сонячних електростанцій та ін. У багатьох з них рівень вищих гармонік струму перевищує допустимі значення, що спричинено відсутністю в цих приладах фільтрів вищих гармонік і використанню дешевих блоків живлення. При чому на багатьох електронних платах передбачено місця для елементів фільтру, але фактично деталі відсутні.

Враховуючи те, що алгебраїчно сумувати амплітуди вищих гармонік струму є неправильно через різний зсув фаз, рівні вищих гармонік групового навантаження можна встановити тільки експериментальним шляхом.

Для дослідження було вибрано декілька типових міських трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ. Основними електроприймачами на яких є комунально-побутові та офісно-адміністративні споживачі. Моніторинг проводився протягом тижня. Вимірювання здійснювались як на окремих магістральних кабелях (фідерах), так і на вводі низької напруги силового трансформатора ТМ-630/10. Співвідношення струму короткого замикання до максимального струму споживання в РСС становить  $I_{SC}/I_L=12$ . На жаль, через відсутність трансформаторів струму зі сторони 10 кВ силового трансформатора, не вдалось дослідити рівень гармонік струмів і напруг на 10 кВ. Наявні прилади не дозволяли проводити виміри безпосередньо на напрузі 10 кВ.

Моніторинг спектрального складу струмів і напруг протягом доби проводився за допомогою приладу Ресурс-UF2М (рис. 1), який має чотири вимірювальних входи напруги і чотири групи для вимірювання характеристик струмів. Абсолютна похибка при вимірюванні коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струму і напруги THD становить  $\pm(0,05+0,02 \cdot \text{THD}_{\%})$ , а коефіцієнта гармонічних складових  $\pm(0,03+0,02 \cdot K_{(n),\%})$ .

Вимірювання здійснювались щохвилинно протягом 7 діб підряд. 10-ти хвилинні значення розраховувались як середньоквадратична величина вимірювань протягом цього інтервалу.

Форми струмів і напруг для одного з періодів часу показано на рис. 2 і 3.



Рис. 1. Прилад Ресурс-UF2М для моніторингу показників якості електроенергії



Рис. 2. Фазні напруги

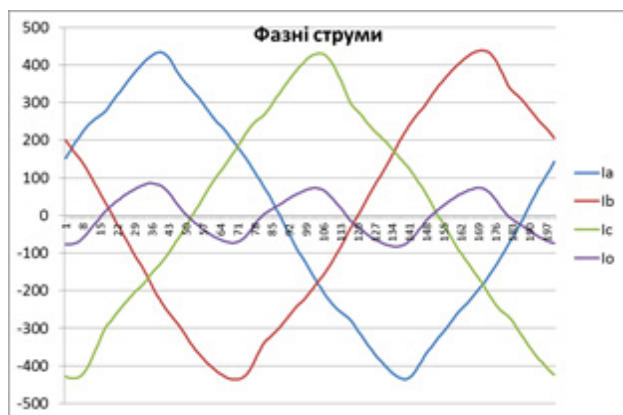


Рис. 3. Фазні струми

На рис. 4 і 5 наведено графіки зміни коефіцієнтів спотворення синусоїдальності THD фазних напруг протягом доби та коефіцієнти гармонічних складових фазної напруги фази А (фази В і С практично аналогічні) – середнє та найбільші короточасні значення.

Як бачимо, на шинах 0,4 кВ ТП – в точці спільного приєднання рівень нелінійних спотворень напруг не перевищував допустимі 8%, а рівень окремих гармонік не перевищив 5%.

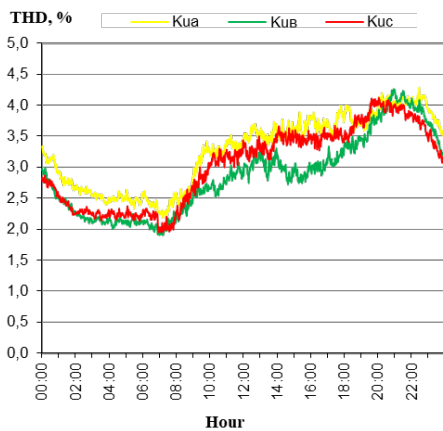


Рис. 4. Добові графіки коефіцієнтів спотворення синусоїдальності фазних напруг THD (%)

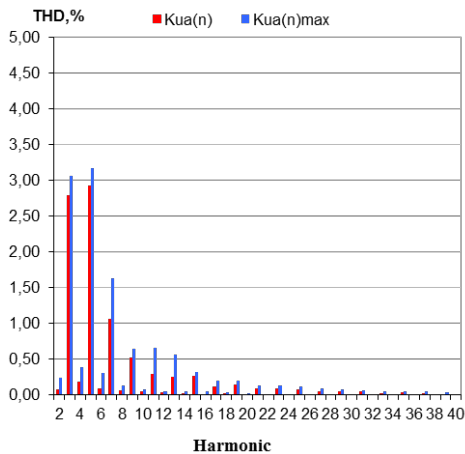


Рис. 5. Коефіцієнти n-их гармонічних складових напруги Ua

Оскільки прилад Ресурс-UF2М вимірює тільки показник THD струмів, значення TDD довелося визначати розрахунковим шляхом за виразом

$$TDD = THD \frac{I_1}{I_L},$$

де  $I_1$  – значення струму першої гармоніки, А;  $I_L$  – максимальний струм споживання в точці РСС, А.

На рис. 6 наведено графіки спотворення загального споживання TDD фазних струмів, а на рис. 7, для порівняння, коефіцієнти спотворення синусоїдальності фазних струмів THD. Як видно вони суттєво різняться.

Згідно [9] протягом доби значення TDD струму не повинно перевищувати двократних значень (10%), наведених в табл. 1 протягом 99% часу. Як видно з рис. 6 граничну межу перевищено у фазі В протягом 4.4% часу доби і незначно у фазі С – 0,1%.

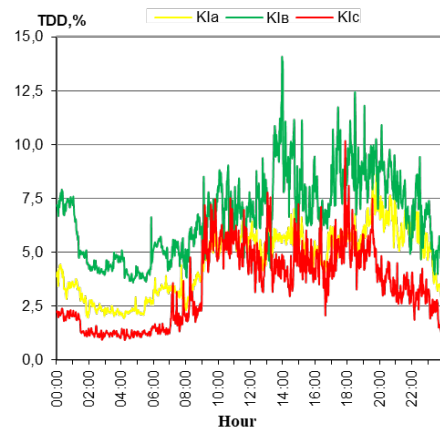


Рис. 6. Добові графіки коефіцієнтів спотворення загального споживання струмів TDD (%)

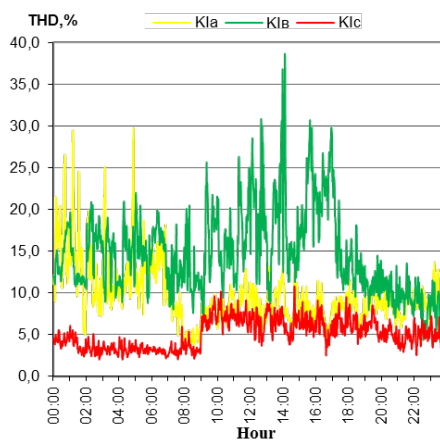


Рис. 7. Добові графіки коефіцієнтів спотворення синусоїдальності фазних струмів THD (%)

Проте результати тижневого моніторингу на основі 10 хвилинних середньоквадратичних значень показали, що TDD струму (рис. 8) всіх трьох фаз перевищує граничне значення 5% у фазі А – 38,9% часу, фазі В – 51,1% і фазі С – 6,9%. Отже у всіх фазах є порушення вимоги стандарту 95% процентиль в межах 5%. В розрізі окремих гармонік протягом тижня перевищення 95 процентиль допустимих значень були зафіксовані для 3 і 5 гармонік фаз А і В (рис. 9).

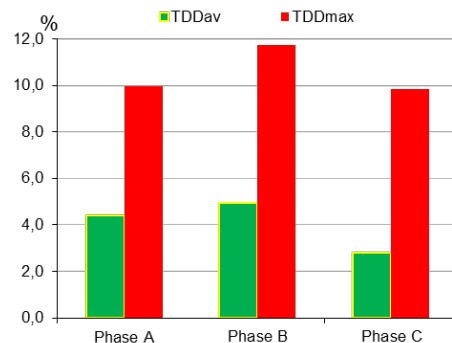


Рис. 8. Середні і максимальні значення TDD струму протягом тижня

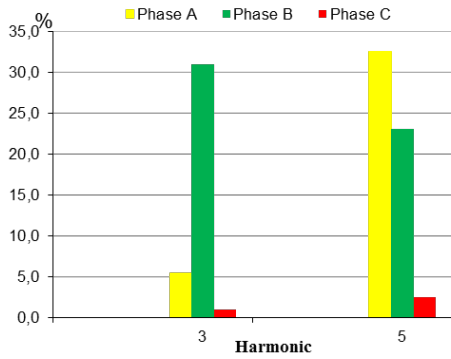


Рис. 9. Відсоток вимірів з перевищенням граничних значень протягом тижня

На рис. 10–12 наведено індивідуальні коефіцієнти гармонік струмів (середні і найбільші значення) відносно максимального струму споживання ІЛ в точці РСС за результатами моніторингу протягом тижня.

Короточасні вимірювання значень окремих гармонік протягом доби не перевищували двократних граничних значень, зазначених в табл. 1.

Більшість фідерних ліній також мали високі струмові нелінійні спотворення понад допустимі межі. Враховуючи, що напруга є практично синусоїдальною існує потреба у обмеженні гармонік струму для низьковольтних електроприймачів та визначені частки, яку вони вносять в загальне спотворення форми струму.

Стандарт IEEE 1159-2019 [13] визначає практичні рекомендації щодо моніторингу електричних характеристик однофазних та багатозфазних систем змінного струму. Він включає описи електромагнітних явищ, що відбуваються в енергосистемах. Ця рекомендована практика представляє визначення номінальних умов та відхилень від цих номінальних умов, які можуть виникати у джерела постачання або завантажувального обладнання або можуть виникати від взаємодії між джерелом та навантаженням. Також у практичних рекомендаціях описано методи вимірювання та застосування, інтерпретації результатів моніторингу.

Для моніторингу вищих гармонік струму рекомендується використовувати інформаційну панель PQ системи енергетичного контролю Power Monitoring System (PME) для кількісної оцінки показань. Для правильного визначення вкладу окремих електроприймачів в сумарне спотворення форми кривої струму і напруги рекомендується встановлювати прилади як на головному вводі ТП, так і на відходячих лініях. Для цього можуть бути використані прилади фірми Schneider Electric (рис. 13).

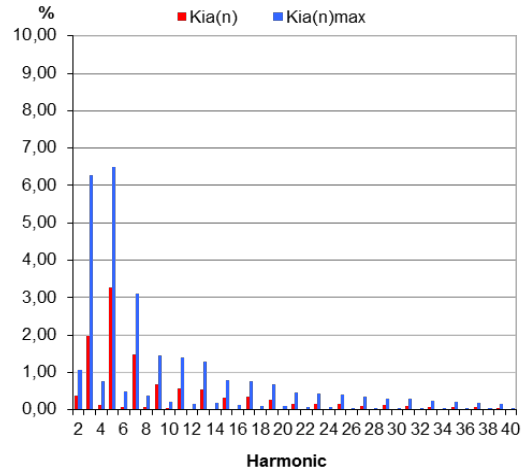


Рис. 10. Коефіцієнти гармонічних складових струму фази А

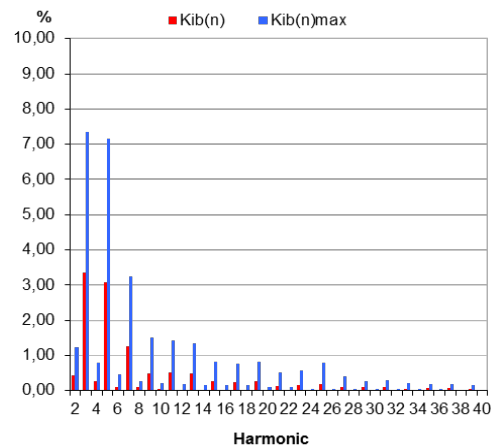


Рис. 11. Коефіцієнти гармонічних складових струму фази В

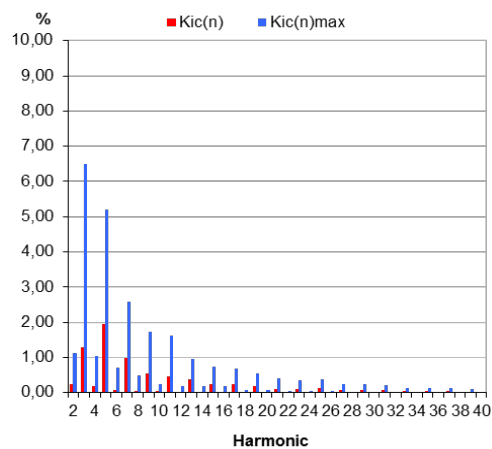


Рис. 12. Коефіцієнти гармонічних складових струму фази С

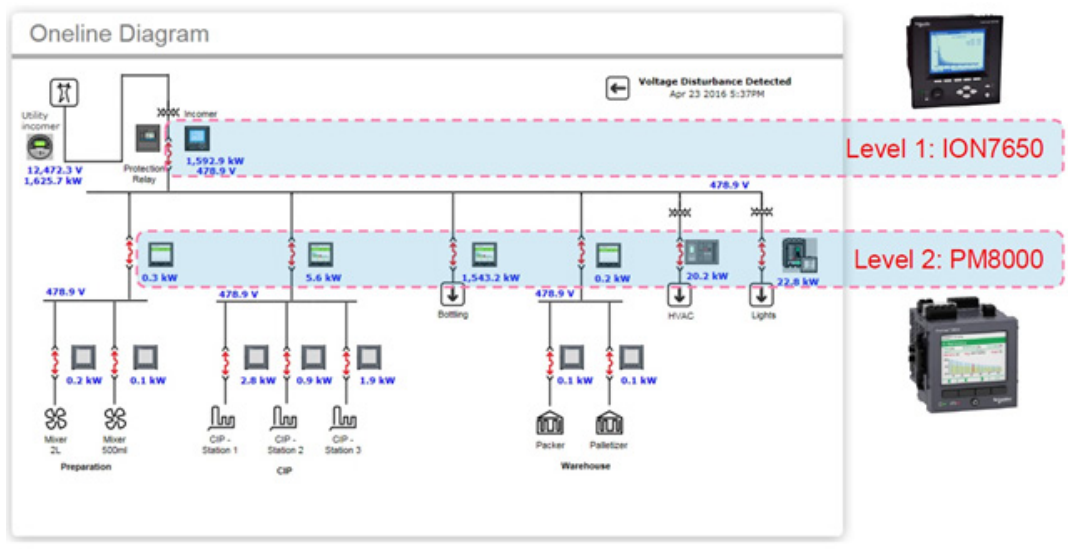


Рис. 13. Рекомендована схема моніторингу вищих гармонік в точках спільного приєднання

Для підвищення якості електроенергії, вкрай важливо, щоб споживачі електроенергії обмежували рівні гармонік струму шляхом установки пасивних, або активних фільтрів гармонік.

В населених пунктах з високим рівнем гармонік доцільно використовувати НМТс трансформатори, або групові активні фільтри вищих гармонік на трансформаторних підстанціях.

**Висновки.** Коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруг THD на шинах 0,4 кВ трансформаторної підстанції не перевищував 8%. Рівень окремих гармонік напруги не перевищував 5%.

В точках спільного приєднання необхідно перейти на контроль спотворення загального споживання струму TDD замість THD.

Для контролю рівнів вищих гармонік в точках спільного приєднання необхідно використовувати стандарт IEEE 519-2014.

Протягом доби значення TDD струму на ввіді 0,4 кВ трансформаторів перевищували двократні граничні величини згідно стандарту IEEE 519-2014 у фазі В протягом 4,4% часу доби і незначно у фазі С – 0,1% при допустимих 1 процентиль.

За результатами тижневого моніторингу, на основі 10 хвилинних середньоквадратичних значень, TDD струму всіх трьох фаз перевищували граничне значення (5%) у фазі А – 38,9% часу, фазі В – 51,1% і фазі С – 6,9%. Отже у всіх фазах є порушення вимоги стандарту – 95% процентиль в межах 5%.

В розрізі окремих гармонік протягом тижня перевищення 95 процентиль допустимих значень були зафіксовані для 3 і 5 гармонік фаз А і В, значення яких сягало 7% максимального струму споживання в точці РСС. Перевищення граничних значень фіксувались більше 30% часу моніторингу. Це не відповідає стандарту IEEE 519-2014.

Для моніторингу рівнів вищих гармонік в точках спільного приєднання необхідно використовувати сучасні прилади, які дозволяють моніторити THD напруг і TDD струмів з використанням практичних рекомендацій стандарту IEEE 1159-2019.

Необхідно контролювати рівні вищих гармонік струму окремих електроприймачів і вживати заходів до стимулювання їх обмеження.

На підстанціях населених пунктів з високим рівнем гармонік струмів доцільно встановлювати НМТс трансформатори та активні фільтри гармонік.

#### Список літератури:

1. Сиченко В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В.Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий. – Дн-вськ: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015. 344 с.
2. Burbelo, M., Pijarski, P., Zavadskiy, V., Koczorowska-Gazda, F., Melnychuk, L., Loboda, Y. Measurement of reactive power under asymmetrical nonsinusoid modes of electric networks with earthed neutral. Proc. SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, 100311X (28 September 2016); <https://doi.org/10.1117/12.2248788>.
3. Farooq, H., Zhou, C., Farrag, M.E. Analyzing the Harmonic Distortion in a Distribution System Caused by the Non-Linear Residential Loads. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 2, no. 1, January 2013: pp. 46–51. doi: 10.12720/sgce.2.1.46-51

4. H. Aoyang, Y. Litao, W. Li, J. Xu, S. Wenhui and B. Yunfan. Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics, 2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS), Harbin, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/EIIS.2017.8298567
5. A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury and M. J. Samoty. An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads. Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, Chicago, IL, USA, 1994, pp. 110-116. doi: 10.1109/TDC.1994.328369
6. Chandran, C., Sunderland, K. & Basu, M. (2018). An analysis of harmonic heating in smart buildings and distribution network implications with increasing non-linear (domestic) load and embedded generation. Renewable Energy, vol. 126, pg. 524-536. doi:10.1016/j.renene.2018.03.081
7. Kowalak, R., Czapp, S., Dobrzynski, K., Klucznik, J., Lubosny Z. Harmonics produced by traction substations – computer modelling and experimental verification. Przegląd Elektrotechniczny 2017, №6, p.13-18. doi:10.15199/48.2017.06.04
8. Ngoo, L., Nderu, J. N., Ndungu, C.M. Analysis of Harmonic order levels at Power Lines to Improve the Power Quality. Sustainable Research and Innovation Proceedings. Vol 5 (2013). <http://ir.jkuat.ac.ke/handle/123456789/2818>
9. IEEE 519-2014 – IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. The IEEE, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. Approved 27 March 2014.
10. Соломчак О.В. Дослідження електрофізичних характеристик дугових газорозрядних ламп / О.В. Соломчак, І.В. Гладь. // *Світлотехніка та електроенергетика*. – 2009. – № 4. – С. 47–52.
11. Соломчак О.В. Реактивна потужність та електромагнітна сумісність світильників з газорозрядними лампами / О. В. Соломчак, І. В. Гладь. // *Промелектро*. – 2011. – № 4-5. – С. 40–43.
12. Соломчак О. В. Електромагнітна сумісність нелінійних побутових електроприладів. / О. В. Соломчак, А. О. Соломчак // *Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів. Збірник наукових праць I Міжнародної науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів.* – Донецьк, 2013. – (ДонНТУ). – С. 42–43.
13. IEEE 1159-2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. The IEEE, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. Approved 13 June 2019.

**Solomchak O.V., Solomchak A.O. MEASUREMENT OF HIGHER HARMONICS OF CURRENTS AND VOLTAGE AT POINTS OF COMMON CONNECTION OF DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS**

*The increase in energy consumption by residential and communal consumers and the densification of urban areas have led to an increase in the load on transformers and their operation at the limit of nominal power. This causes the saturation of the magnetic core and clipping of the voltage sinusoid peaks. Simultaneously, the number and power of nonlinear electrical receivers are increasing, leading to the appearance of higher harmonics of currents and voltages in electrical networks. Analysis of recent studies shows that the problem of nonsinusoidal voltages and currents remains relevant. Mathematical modeling does not provide reliable solutions for the grouped loads of transformer substations. The aim of this work is to measure and analyze the nonsinusoidal currents and voltages of transformer substation loads, study the harmonic composition of grouped loads, and their compliance with international standards. A series of measurements of nonsinusoidal currents and voltages of transformer substation loads in populated areas were conducted. The harmonic composition of grouped loads and their compliance with international standards were studied. The Total Harmonic Distortion (THD) coefficient of the sinusoidal voltage curve on the 0.4 kV busbars of the transformer substation was within the norm. According to the results of weekly monitoring, the exceedance of the TDD current limit values was recorded more than 30% of the monitoring time, which does not comply with the IEEE 519-2014 standard. For monitoring the levels of higher harmonics at points of common coupling, it is recommended to use modern devices that allow controlling voltage THD and current TDD using the practical recommendations of the IEEE 519-2014 and IEEE 1159-2019 standards. Measures to limit the levels of higher harmonics at substations in populated areas have been proposed.*

**Key words:** harmonic distortion, point of common coupling, harmonic monitoring, non-linear loads, harmonic measurements, electric power quality, total harmonic distortion, total demand distortion, urban substation.