

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-3(25)-244-255

УДК 621.311: 621.316.1

Мирослав Сабат¹, Владислав Лисяк², Юрій Шелех³, Вадим Чечель⁴

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: myroslav.b.sabat@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7448-0615>

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8371-6455>

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: Yurii.L.Shelekh@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0283-993X>

⁴здобувач вищої освіти

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: vadym.chechel.mec.2020@lpnu.ua

ВПЛИВ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ НА РОБОТУ ВУЗЛА КОМПЛЕКСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ З КОНДЕНСАТОРНИМИ УСТАНОВКАМИ

Збільшення кількості споживачів електричної енергії в системах електропостачання, до складу яких входять напівпровідникові перетворювачі (НП), зумовлює наявність вищих гармонік напруги (струму) та призводить до збільшення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень як одного з визначальних показників якості електричної енергії. Вищі гармоніки напруги в електропостачальних мережах впливають на роботу систем автоматики, обчислювального обладнання, а також на роботу КУ.

Ключові слова: несинусоїдальність; фільтрокомпенсуючі пристрої; конденсаторні установки; вузол навантаження; електропостачальна мережа; реактивна потужність.

Табл.: 1. Рис.: 20. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Збільшення кількості споживачів електричної енергії у вузлах систем електропостачання, до складу яких входять напівпровідникові перетворювачі (НП), призводить до появи в електропостачальних мережах вищих гармонік напруги (струму) та призводить до збільшення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень, який є одним з визначальних показників якості електричної енергії. Вищі гармоніки напруги в електропостачальних мережах впливають, як на роботу систем автоматики, обчислювального обладнання, а також на роботу конденсаторних установок (КУ), так і на їх довговічність, та надійність. Дослідження впливу несинусоїдальності в електричних мережах на КУ є актуальною темою та дозволить оцінити умови роботи КУ з метою їх покращення

Постановка проблеми. Для виявлення негативного впливу вищих гармонік напруги на роботу КУ у вузлі комплексного навантаження необхідно дослідити значення основних показників режиму роботи за різного значення коефіцієнта несинусоїдальності напруги. Визначити вплив елементів вузла комплексного навантаження на гармонічний склад та коефіцієнт несинусоїдальності. Також необхідно розглянути основні методи та засоби захисту КУ від впливу вищих гармонік та ефект від їх застосування у вузлах комплексного навантаження з КУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За нормативними документами України, які регламентують якість електричної енергії [4; 5; 6], допускається несинусоїдальність.

Для електропостачальних мереж напругою 0,4 кВ у випадку нормальної роботи допускається 95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, впродовж тижневого періоду [7]. Середньоквадратичні значення напруги не повинні перевищувати наведених у табл. 1.

Таблиця 1

Допустимі середньоквадратичні значення напруги кожної гармоніки

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
не кратні 3		кратні 3		відносна амплітуда, %	порядок гармоніки
відносна амплітуда, %	порядок гармоніки	відносна амплітуда, %	порядок гармоніки		
6,0	5	5,0	3	2,0	2
5,0	7	1,5	9	1,0	4
3,5	11	1,5	15	0,5	6...24
3,0	13	0,5	21	-	-
2,0	17	-	-	-	-
1,5	19	-	-	-	-
1,5	23	-	-	-	-
1,5	25	-	-	-	-

Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКГС) напруги електропостачання, враховуючи всі гармоніки до 40-ї включно повинен бути меншим чи рівним 8 % [7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У переважній більшості досліджень показники якості електричної енергії розглядаються стосовно споживача, а не елементів вузла навантаження чи електропостачальної мережі. Вплив несинусоїдальності на роботу КУ, а також вплив складу вузла комплексного навантаження на коефіцієнт несинусоїдальності досліджено недостатньо.

Метою статті є аналіз впливу несинусоїдальності напруги на роботу елементів комплексного вузла навантаження та на вузол в цілому, виявлення негативного впливу вищих гармонік напруги на роботу КУ у вузлі навантаження та дослідження основних показників режиму роботи вузла навантаження за різного значення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень.

Виклад основного матеріалу. Для якісної оцінки впливу вищих гармонік на роботу КУ запропоновано порівняння параметрів режиму роботи КУ у вузлі навантаження за умов наявності та відсутності джерела вищих гармонік. Для проведення дослідів запропонована фізична модель, схема якої зображена на рис. 1.

Джерелом вищих гармонік слугує випростувач. Величину гармонік можна регулювати, змінюючи активний опір в колі постійного струму випростувача. Для оцінки впливу індуктивності у колі навантаження послідовно з активним опором увімкнений дросель. У схемі передбачений ключ, за допомогою якого можна шунтувати дросель.

Для управління ступенями регульованої КБ у схемі задіяний регулятор реактивної потужності від компанії “Schneider Electric” – “Varlogic NR6”.

Схема підключення пристрою передбачає підведення до нього лінійної напруги будь-яких двох фаз, і підключення трансформатора струму з номінальним вторинним струмом 5 А у третю (незалежну) фазу (друга схема, якщо амплітуда фазної напруги не більше 200 В). У нашому випадку живлення подається автоматичним вимикачем АВ-5 з фаз А і В. У фазі С встановлений трансформатор струму 40/5 А. З фази А живлення подається на загальний контакт ”С” регулятора. З кожного виходу регулятора напруга поступає на початок котушки відповідного контактора. Кінці в свою чергу з’єднані між собою і підключені до нульового провідника. Таким чином забезпечується коло протікання струму для всіх контакторів.

Перша та друга ступені малопотужні, тому підключені до шин через звичайні контактори. Усі інші ступені, а саме 2, 3 та 4 під’єднанні через спеціалізовані контактори, які оснащені блоком резисторів. Після подачі сигналу на увімкнення в такому контакторі включається послідовно спершу блок резисторів на час одного періоду, а тоді вже замикається контактна група. Таким чином досягається обмеження струмів у момент увімкнення, а вже наслідком – менш виразні явища комутації, такі як дуга чи іскріння. Також

послідовно з третьою КБ ввімкнений дросель потужністю 50 кВАР. Даний дросель служить для захисту конденсаторної батареї від впливу вищих гармонік, тобто слугує певним фільтром. Регулятор реактивної потужності визначає дійсний $\cos \varphi$ мережі та порівнює його з заданим. Відповідно до налаштованої програми підбирає ступені компенсації.

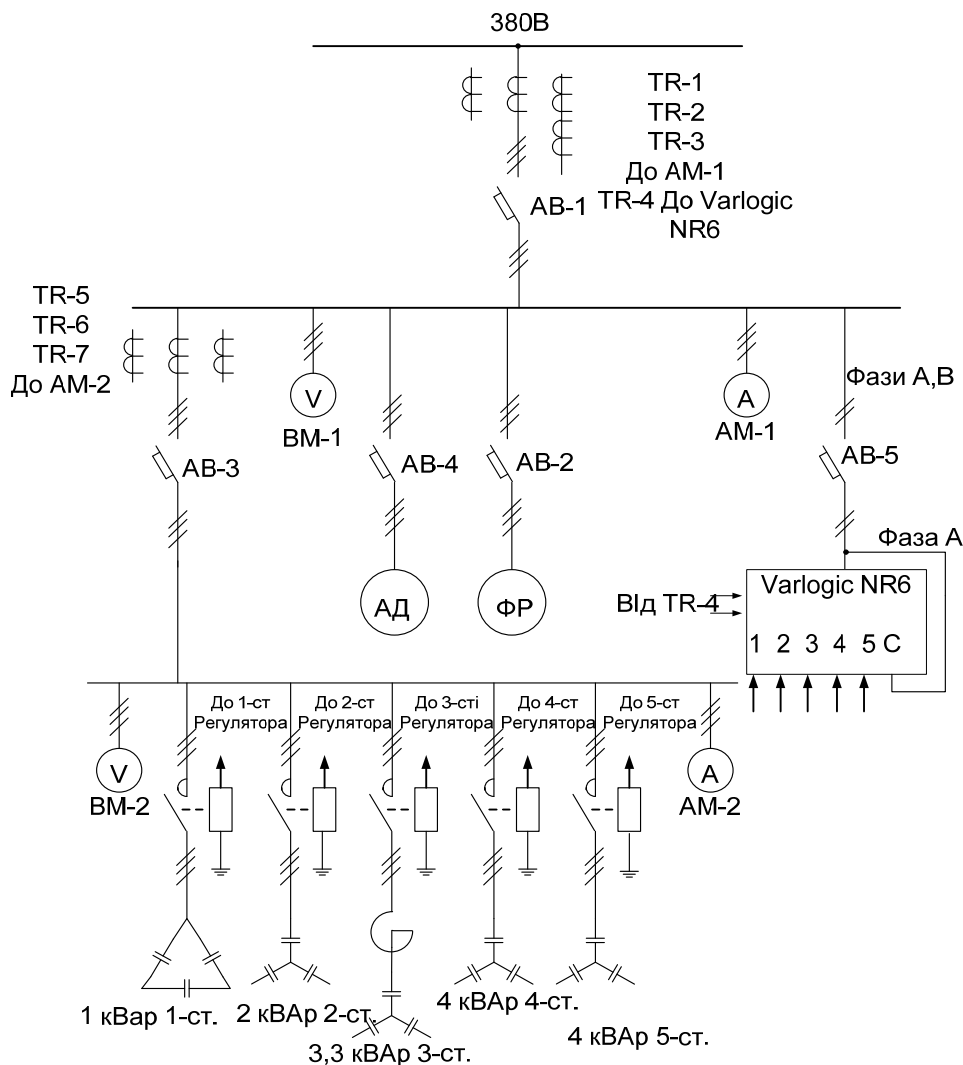


Рис. 1. Схема для зняття дослідних характеристик K_U

Для створення моделі вузла навантаження обраний найбільш поширений тип навантаження – асинхронний двигун з індуктивно-активним характером. Асинхронний двигун в даному вузлі комутується за допомогою автоматичного вимикача (AB-4). Оскільки потужність двигуна не є великою, паралельно йому ввімкнутий фазорегулятор.

У цій схемі вторинна обмотка фазорегулятора закорочена, що дає індуктивний характер навантаження. Мінімальне значення встановленого індуктивного навантаження становить 5 кВАР. Тобто, можливі варіанти навантаження: увімкнення лише одного АД потужністю 1,5 кВт, увімкнення тільки ФР, потужністю в межах від 5 до 17 кВАР, або ж їх паралельна робота.

Для реєстрації сигналів та зняття осцилограм та гістограм було використано систему реєстрації та аналізу аварійних ситуацій електроенергетичних об'єктів "альтра-1" однією з функцій якої є: аналізу координат усталених режимів та аварійних процесів визначення максимальних значень, визначення зміни в часі діючих значень, симетричних складових, гармонічного складу координат режимів, визначення віддалі до місця пошкодження на лініях електропередач, синтезу координат режимів тощо.

Основні характеристики та схеми підключення наведені в інструкції до цієї системи. У роботі система підключалась до системи шин.

Результати досліджень. Розглянемо та проведемо аналіз деяких режимів роботи досліджуваного вузла навантаження з конденсаторною батареєю та без конденсаторної батареї (рис. 2 та 3).

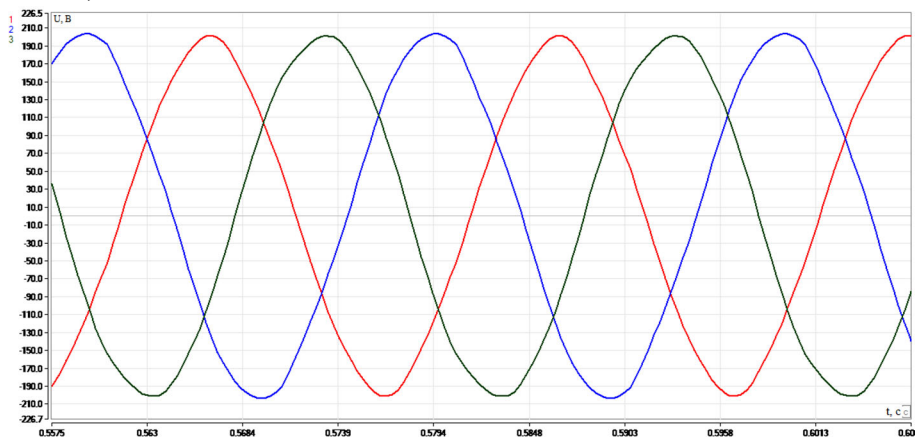


Рис. 2. Осцилограми напруги при увімкненому активно-індуктивному навантаженні

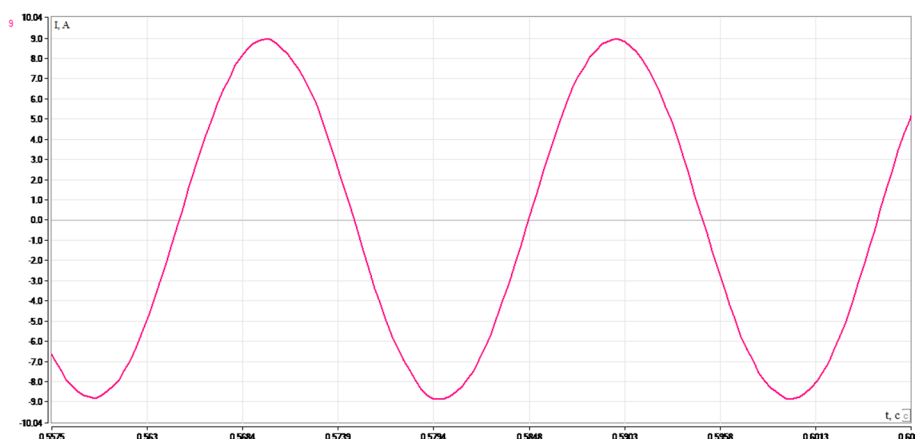


Рис. 3. Осцилограма струму активно-індуктивного навантаження

Як видно із поданих вище осцилограм, це нормальний режим роботи мережі без конденсаторної батареї та джерела вищих гармонік. Після увімкнення випростувача на осцилограмах напруги та струму (рис. 4 і 5) спостерігається викривлення синусоїдності напруги.

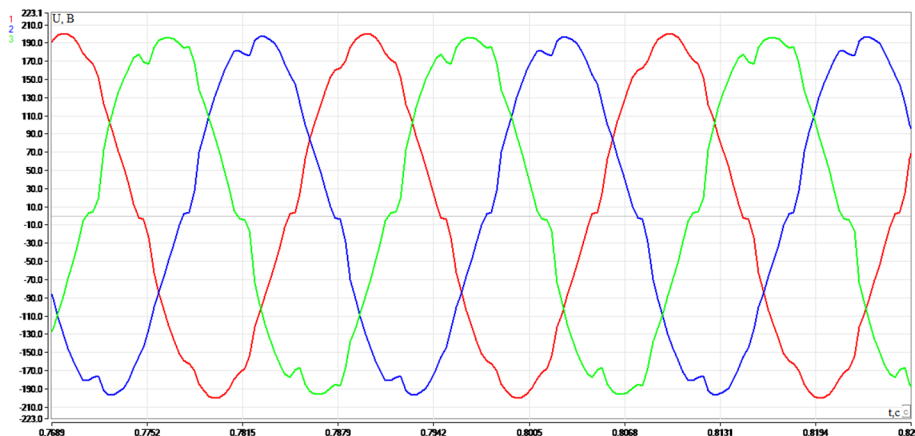


Рис. 4. Криві фазних напруг при увімкненому активно-індуктивному навантаженні та випростувачі (струм у колі випростувача 0,9 А+ дросель у колі пост. струму)

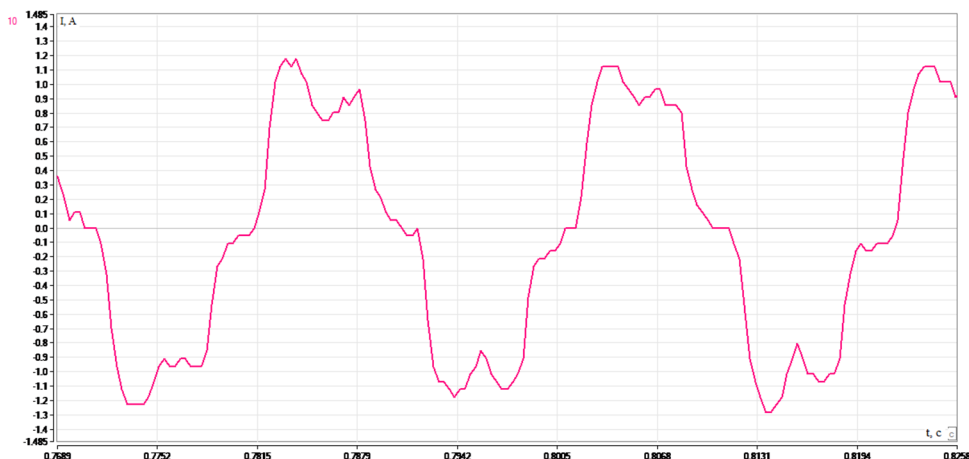


Рис. 5. Струм у колі випростувача

Порівняємо цей режим з таким же, за додатково увімкненої конденсаторної батареї (рис. 6 і 7).

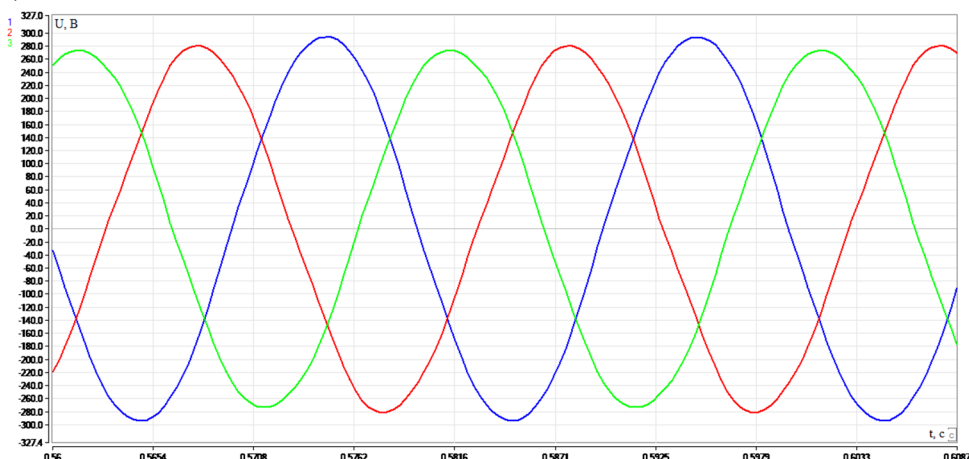


Рис. 6. Криві напруг при увімкненому активно-індуктивному навантаженні, випростувачі та КБ (струм в колі випростувача 1,26 А+ дросель у колі пост. струму)

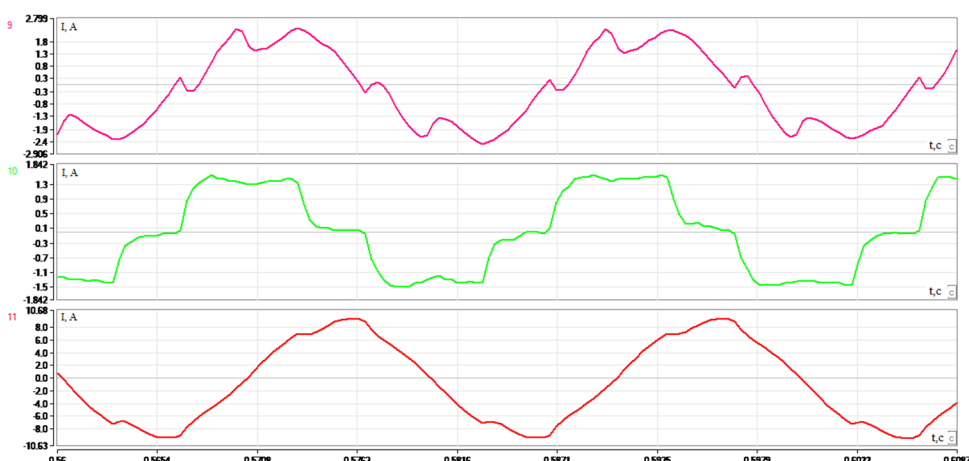


Рис. 7. Криві струму у схемі з активно-індуктивним навантаженням, випростувачем та КБ (рожевий - загальний струм вузла, зелений – струм випростувача, червоний – струм КБ)

Збільшуємо струм в колі випростувача, тим самим підіймаємо рівень вищих гармонік у мережі та проводимо аналогічні дослідження (рис. 8 та 9).

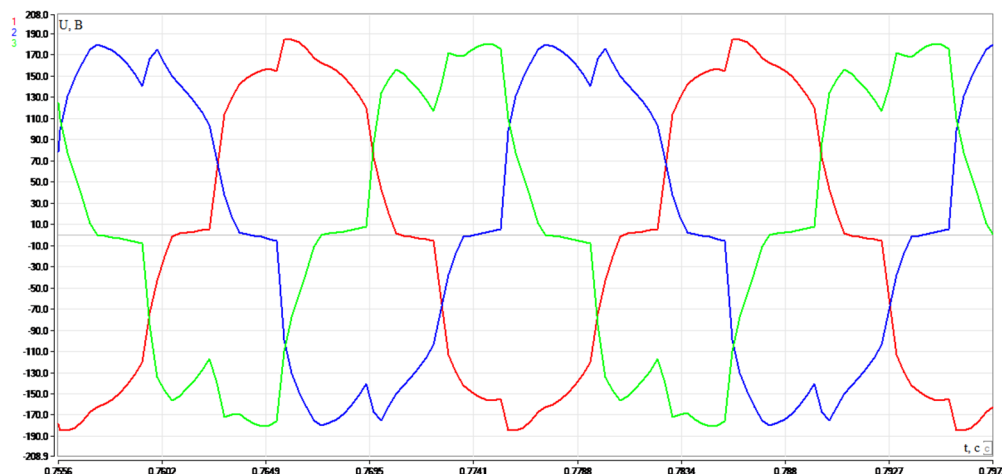


Рис. 8. Криві напруг при ввімкненому індуктивному навантаженні та випростувачі (струм у колі випростувача 4.53 А+ без дроселя у колі пост. струму)

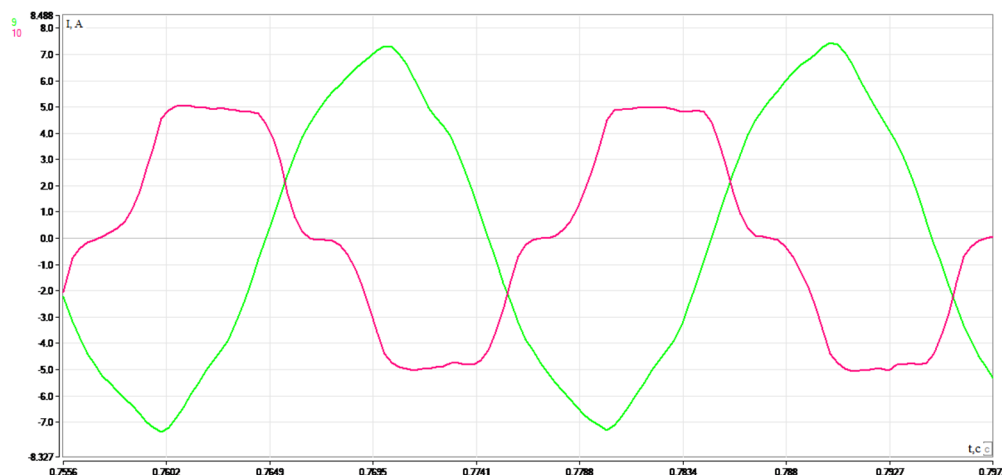


Рис. 9. Криві струму (зелений – струм в активно індуктивному навантаженні, рожевий – струм у колі випростувача)

Такий режим спотворює криві напруги, несинусоїдальність складає близько 10 % (рис. 10).

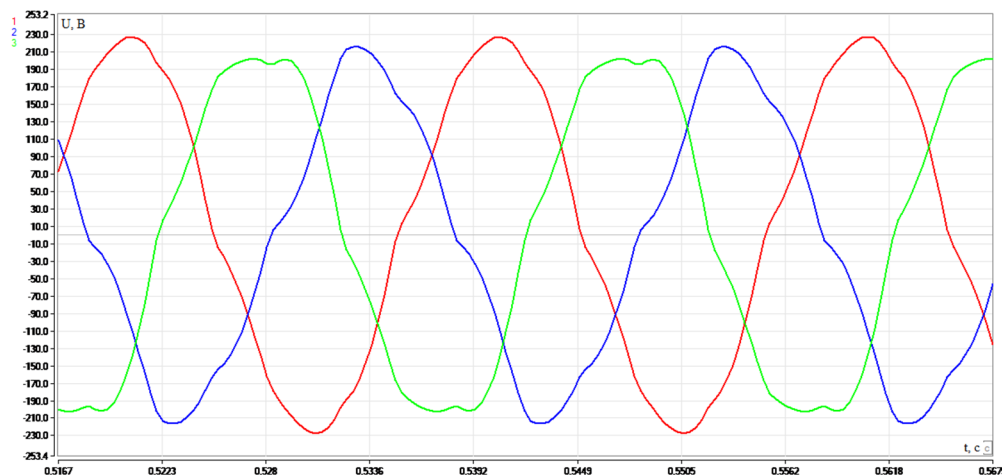


Рис. 10. Криві напруг при ввімкненому індуктивному навантаженні, випростувачі та КБ (струм в колі випростувача 5.7 А+ дросель у колі пост. струму)

З представлених вище кривих напруг та струмів робимо висновок, що наявність у мережі конденсаторних установок позитивно впливає на форму кривої напруги (рис. 10), але значно погіршує синусоїдність кривої струму (рис. 11) конденсаторної установки, що негативно впливає на їх роботу, та зменшує термін їх експлуатації.

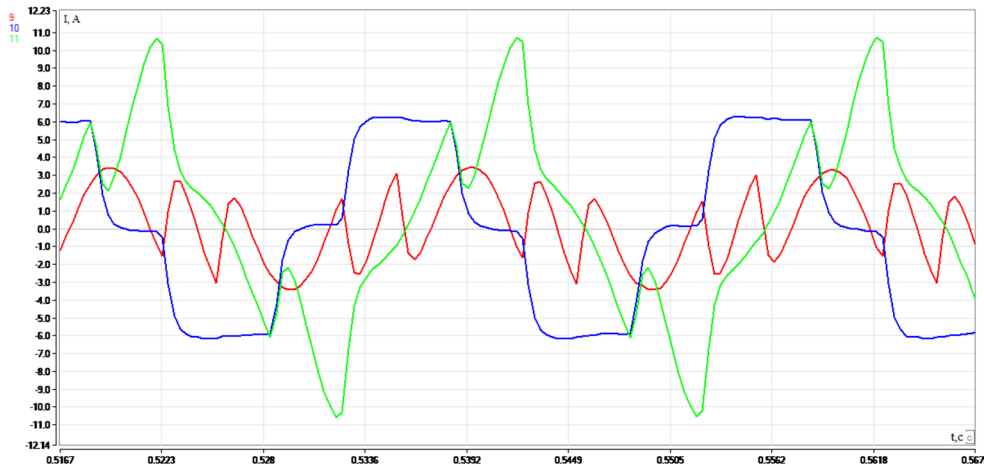


Рис. 11. Криві струму (червоний – загальний струм вузла, синій – струм випростувача, зелений – струм КБ)

На основі вимірів побудовані такі графіки залежностей:

а) сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКГС) та величини гармонік від струму у колі випростувача без КБ (дросель у колі постійного струму ввімкнений) (рис. 12):

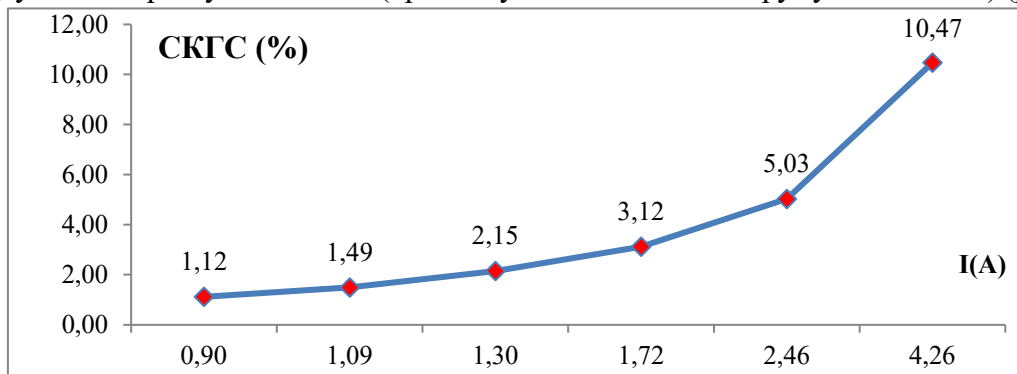


Рис. 12. Залежність рівня вищих гармонік від струму в колі випростувача (без КБ, дросель ввімкнений)

б) сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКГС) та величини гармонік від струму у колі випростувача без КБ (дросель у колі постійного струму вимкнений) (рис. 13):

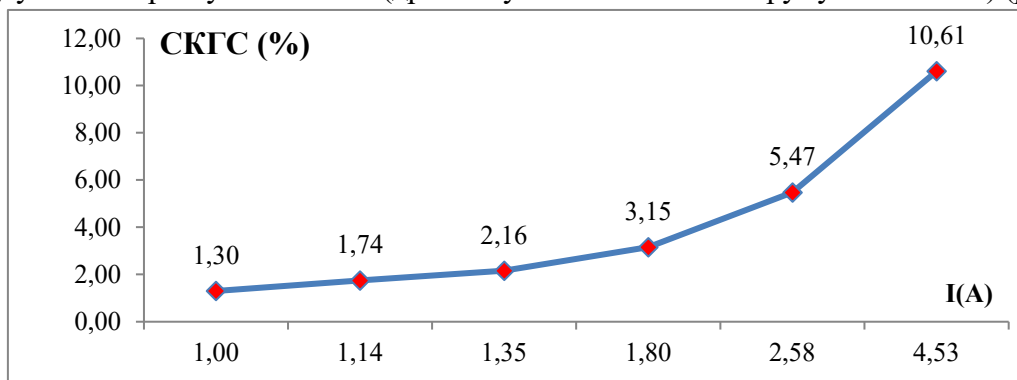


Рис. 13. Залежність рівня вищих гармонік від струму в колі випростувача (без КБ, дросель вимкнений)

в) сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКГС) та величини гармонік від струму у колі випростувача з КБ (дросель у колі постійного струму ввімкнений) (рис. 14):

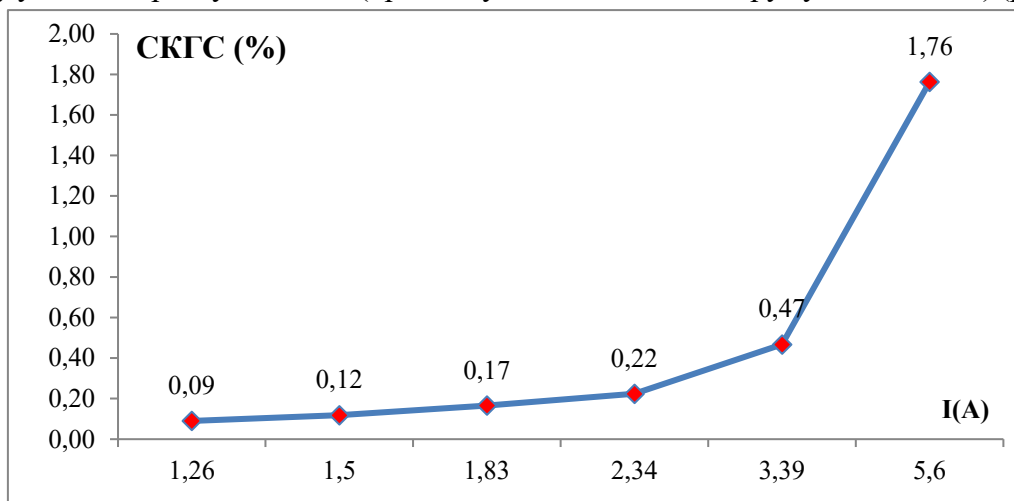


Рис. 14. Залежність рівня вищих гармонік від струму в колі випростувача (з КБ, дросель ввімкнений)

г) сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКГС) та величини гармонік від струму в колі випростувача з КБ (дросель у колі постійного струму вимкнений) (рис. 15):

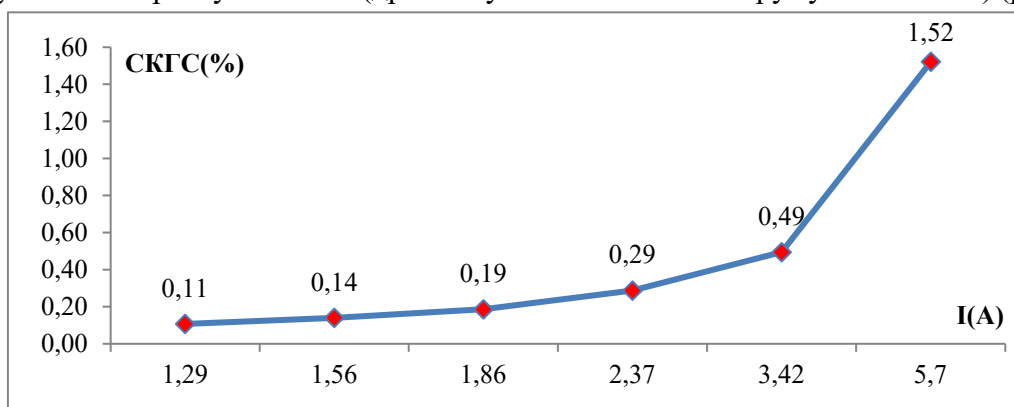


Рис. 15. Залежність рівня вищих гармонік від струму в колі випростувача (з КБ, дросель вимкнений)

З вищенаведених залежностей випливає, що індуктивність у колі постійного струму мінімально, але все ж зменшує рівень гармонік, що генеруються у трифазну мережу випростувачем.

Способи зменшення гармонік. Зменшення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень можна досягнути кількома способами. Одним із таких способів є побудова раціональної системи електропостачання споживачів, таким чином, щоб коефіцієнт гармонічних спотворень знаходився в допустимих межах, чи застосування схем нелінійних навантажень. Ще одним зі способів є запобігання генеруванню складових напруги i -тих гармонік, окремими споживачами. Але не завжди такі заходи є дієві чи можливими для впровадження. У випадку, коли неможливо зменшити гармоніки конструктивними засобами, застосовують пристрій, здатний запобігати їх розповсюдженню в електроенергетичній системі, а саме – фільтр вищих гармонік.

Для дослідження роботи фільтра вищих гармонік були зібрані схеми, що зображенні на рис. 16.

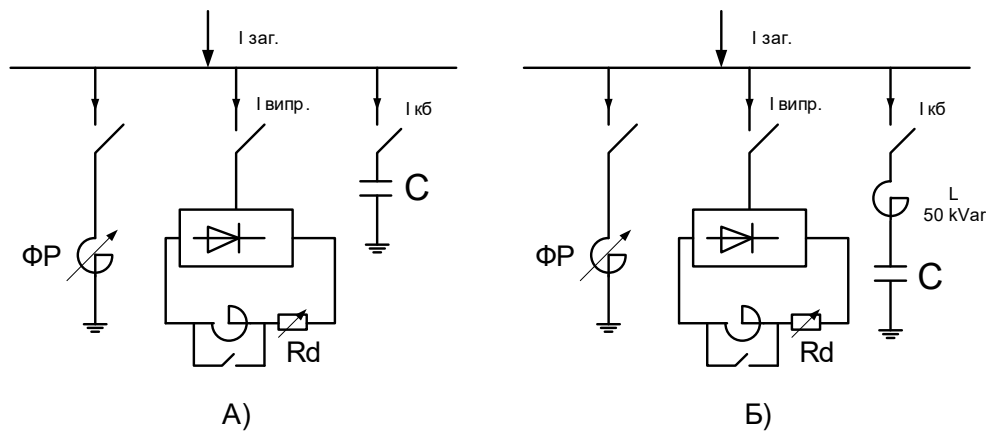


Рис. 16. Схеми для зняття дослідних характеристик впливу вищих гармонік на конденсаторну установку:

а – не захищена фільтрами; б – захищена фільтрами

Розраховуємо частоту, яку фільтруватиме дросель у схемі Б. Конденсаторна батарея з'єднана у трикутник, ємність конденсаторів у фазі рівна 48 мікрофарад. Отже:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 * 3.14 * 50 * 48 * 10^{-6}} = 22,1 \text{ Ом}, \quad (1)$$

де π – математична константа, яка дорівнює 3,14;

f – стандарт частоти, який дорівнює 50 Гц;

C – ємність конденсаторів.

Індуктивність трифазного дроселя згідно його паспорту становить 0,76 мГн. Індуктивний опір становить:

$$X_L = 2\pi f L = 2 * 3,14 * 50 * 0,76 * 10^{-3} = 0,23 \text{ Ом}, \quad (2)$$

де π – математична константа, яка дорівнює 3,14;

f – стандарт частоти, який дорівнює 50 Гц;

L – індуктивність трифазного дроселя.

Знайдемо частоту на яку буде налаштований фільтр.

$$f = \sqrt{\frac{f_{\text{мережі}}^2}{X_L/X_c}} = \sqrt{\frac{50^2}{\frac{0,23}{22,1}}} = 490,3 \text{ Гц}, \quad (3)$$

де X_L – індуктивний опір;

X_c – частота, яку фільтруватиме дросель у схемі Б;

$f_{\text{мережі}}$ – частота мережі.

Отже, фільтр налаштований на фільтрацію 10 гармоніки і вище.

Знімаємо характеристики установки без фільтруючого дроселя (рис. 17 і 18).

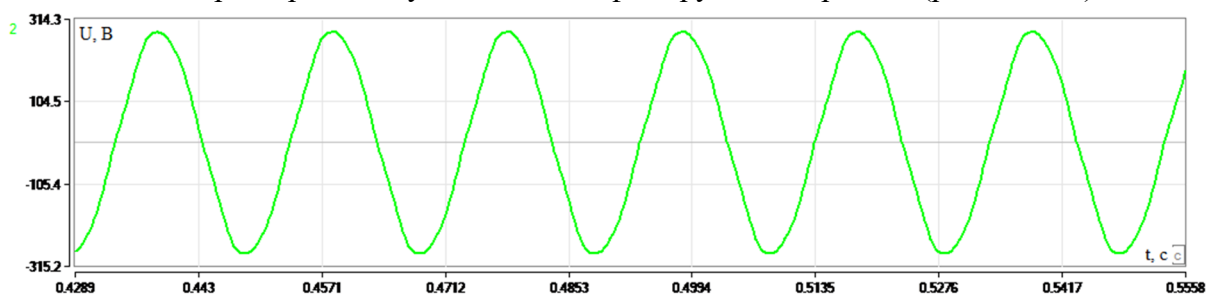


Рис. 17. Графік синусоїди у вузлі навантаження (конденсаторна батарея без фільтра)

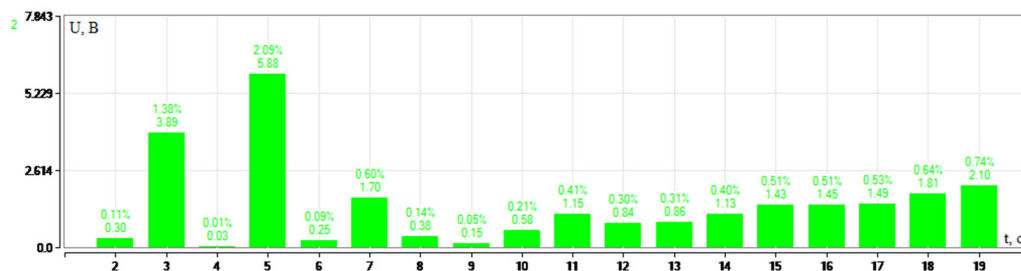


Рис. 18. Гістограма гармонік напруги (конденсаторна батарея без фільтра)

Знімаємо характеристики установки з фільтруючим дроселем (рис. 19, 20).

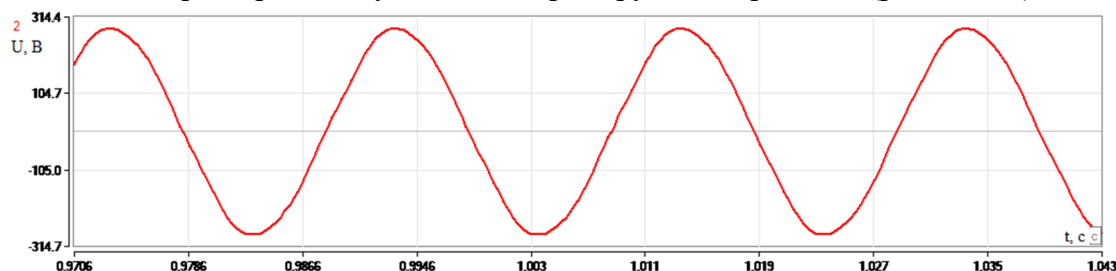


Рис. 19. Графік синусоїди у вузлі навантаження (конденсаторна батарея з фільтром)

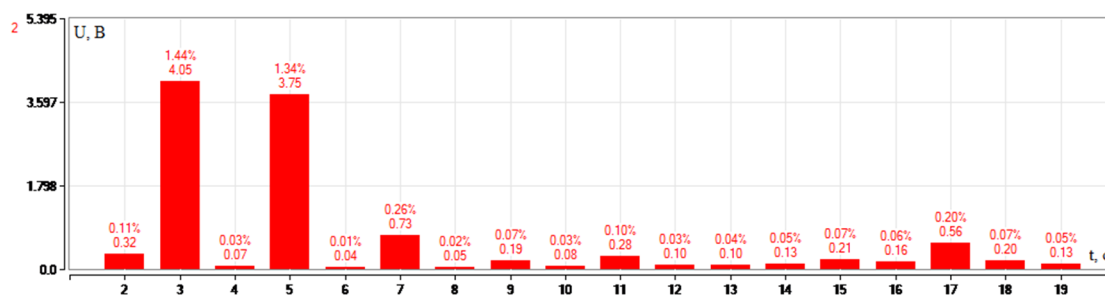


Рис. 20. Гістограма гармонік напруги (конденсаторна батарея з фільтром)

Як видно з гістограм гармонік напруги, фільтр виконує свої функції – 10-а гармоніка зменшилась у сім разів, 11-а – у чотири рази, 13-а – майже у дев’ять разів.

Висновки. 1. Наявність у мережі конденсаторних установок позитивно впливає на форму кривої напруги, але значно погіршує синусоїдність кривої струму конденсаторної установки, що, у свою чергу, негативно впливає на їхню роботу конденсаторної установки, та зменшує термін їх експлуатації.

2. Наявність індуктивності в колі постійного струму мінімально, але все ж зменшує рівень гармонік що генеруються у трифазну мережу випростувачем.

3. Використання фільтрів у вузлах із конденсаторними батареями значно зменшує гармоніки у вузлах навантаження, покращує якість електричної енергії та підвищує термін експлуатації конденсаторних батарей.

Список використаних джерел

1. Стогній Б. С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44-50.
2. Жаркін А. Ф. Гібридні фільтрокомпенсуючі перетворювачі для трифазних систем з нелінійними та змінними навантаженнями / А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, Д. О. Малахатка // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 48-52.
3. Стратегія мінімізації небажаних складових миттєвої потужності із застосуванням різних топологій паралельних активних фільтрів / В. М. Михальський, В. М. Соколов, В. В. Чопик, І. А. Шаповал // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 1. – С. 41-51.

4. Кодекс систем розподілу : Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310.
5. Електрична енергія. Норми якості електричної енергії у системах електропостачання загального призначення: ГОСТ 13109-97. – [Введ.01.01.2000]. – К.: Вир-во стандартів, 1998; Держстанд. України, с доп. і попр., 1999. – 31 с.
6. Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання : Постанова № 375 від 12.06.2018.
7. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). – [Чинний з 1.10.2014]. – К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.

References

1. Stohnii, B.S., Kyrylenko, O.V., Denysiuk, S.P. (2010). Intelektualni elektrychni merezhi elektroenerhetychnykh system ta yikhnie tekhnolohichne zabezpechennia [Smart electrical grids of power systems and their technological support]. *Tekhnichna Elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, (6), 44-50.
2. Zharkin, A.F., Novskiy, D.O., Malakhatka, D.O. (2015). Hibrydni filtrokompensuiuchi peretvoriuvachi dlia tryfaznykh system z nelineinymy ta zminnymy navantazhenniamy [Hybrid filter-compensating converters for the three-phase systems with nonlinear and variable loads]. *Tekhnichna Elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, (4), 48-52.
3. Mykhalskyi, V.M., Sobolev, V.M., Chopyk, V.V., Shapoval, I.A. (2014). Stratehiia minimizatsii nebazhanykh skladovykh myttievoi potuzhnosti iz zastosuvanniam riznykh topolohii paralelnykh aktyvnykh filtriv [The minimization strategy of undesirable instantaneous power components with different topologies of shunt active filter]. *Tekhnichna Elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, (1), 41-51
4. Kodeks system rozpodilu [Distribution Systems Code], Decree NKREKP № 310 (14.03.2018).
5. Elektrychna enerhiia. Normy yakosti elektrychnoi enerhii u systemakh elektropostachannia zahalnoho pryznachennia [Electric energy. Quality standards of electric energy in general purpose power supply systems] (HOST 13109-97). Vyr-vo standartiv.
6. Pro zatverdzhennia Poriadku zabezpechennia standartiv yakosti elektropostachannia ta nadannia kompensatsii spozhyvacham za yikh nedotrymannia [About the statement of the Order of maintenance of standards of quality of power supply and granting of compensations to consumers for their non-observance], Decree № 375 (12.06.2018).
7. Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrychnykh merezhakh zahalnoi pryznachenosti [Characteristics of power supply voltage in general purpose electrical networks]: DSTU EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). Derzhstandart Ukrainy.

Отримано 05.06.2021

UDC 621.311: 621.316.1

Myroslav Sabat¹, Vladyslav Lysiak², Yurii Shelekh³, Vadym Chechel⁴

¹PhD in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Power Engineering and Control Systems Department
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: myroslav.b.sabat@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7448-0615>

²PhD in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Power Engineering and Control Systems Department
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8371-6455>

³PhD in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Power Engineering and Control Systems Department
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: Yurii.L.Shelekh@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0283-993X>

⁴Student of Power Engineering and Control Systems Department

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: vadym.chechel.mee.2020@lpnu.ua

INFLUENCE OF NON-SINUSOIDAL VOLTAGE ON THE WORK OF COMPLEX LOAD WITH CAPACITOR INSTALLATIONS

Today, power supply system complex load nodes include a large number of consumers with different nature of load, different characteristics, etc., which increases the number of negative effects on the node, on the quality of electricity and on each individual consumer.

An important element of such nodes of the power supply system are compensating installations of reactive power. The reliability of the entire network, the quality of electricity and power loss in the network depend on their reliable operation. The operation of such compensating installations is influenced by the operating conditions and electrical receivers of the network in which the compensating installations operate. In particular, the non-sinusoidal mains voltage has a significant impact on the operation of the compensating installations.

The increase in the number of electricity consumers in power supply systems, which include semiconductor converters, causes higher voltage harmonics (of the current) and leads to an increase in the coefficient of non-sinusoid (coefficient of curvature of the sinusoid of the voltage curve) as one of the determinants of the quality of electricity. Higher voltage harmonics in power supply networks affect the operation of automation systems, computer equipment, as well as the operation of compensating installations. The main method of improving the sinusoidal voltage in networks is the use of filter-compensating devices, the use of which requires a detailed study of network characteristics, determining the composition of existing harmonics and analysis of the possibility of new ones.

The study of the influence of non-sinusoidality in electrical networks on compensating installations is a topical issue and will allow to assess the working conditions of compensating installations in order to improve them.

Keywords: *non-sinusoidality; filter-compensating devices; condenser installations; complex load node; power supply system; reactive power.*

Table: 1. Fig.: 20. References: 7.