

ВИЩІ ГАРМОНІКИ В СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Уваров О. В.¹, Савченко П. І.²¹Вовчанський технікум механізації сільського господарства Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка,²Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

В роботі проведено аналіз дії вищих гармонік в сучасних системах електроживлення і запропоновано можливі засоби вирішення проблеми спотворень напруги та струму в електричних мережах.

Постановка проблеми. Рівень складності устаткування у сфері комп'ютерних технологій постійно підвищується.

Тому системи забезпечення якості електропостачання (наприклад, Джерела Безперебійного Живлення, UPS) мають бути розроблені так, щоб вони були здатні впоратися з широким спектром проблем, починаючи від провалів, коливань, викидів напруги, високочастотних шумів, імпульсних перешкод і закінчуючи забезпеченням електроживленням при повній відсутності напруги промислової мережі.

Одну з таких проблем представляють спотворення форми напруги, викликані гармонійними складовими струму, споживаного нелінійним навантаженням. Велика частина комп'ютерного і офісного устаткування є нелінійним електричним навантаженням, що створює спотворення в живлячій мережі.

Сумарний ефект цих навантажень виражається в спотворенні напруги, яка впливає на інше устаткування, що одержує електроживлення від того ж джерела. Це може викликати перегрівання і розсинхронізацію в інших пристроях, збої в комунікаціях і мережах передачі даних, ушкодження апаратури і інші небажані ефекти.

Міра спотворень може бути визначена коефіцієнтом спотворення синусоїдності K_i - відношенням діючого значення вищих гармонійних до діючого значення основної (першої) гармоніки [1] і коефіцієнтом амплітуди (крест-фактором) навантаження H_o - відношенням пікового значення споживаного струму до його діючого значення.

Ефекти, що викликається вищими гармоніками, напруги і струму. Останні можуть бути розділені на ефекти миттєвого і тривалого виникнення.

Проблеми миттєвого виникнення включають: спотворення форми живлячої напруги; падіння напруги в розподільній мережі; ефект гармонік, кратних трьом (у трифазних мережах); резонансні явища на частотах вищих гармонік; наведення в телекомунікаційних мережах; підвищений акустичний шум в електромагнітному устаткуванні; вібрація в електромашиних системах.

Проблеми тривалого виникнення включають: нагрівання і додаткові втрати в трансформаторах і електричних машинах; нагрів конденсаторів; нагрів кабелів розподільної мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянемо детальніше за причину виникнення вказаних ефектів і можливі шляхи і засоби їх рішення.

Форма напруги живлення. Підвищене значення коефіцієнта амплітуди вказує на те, що є великий пік споживаного струму за половину періоду мережевої частоти. Чим вище пікове значення струму і менше його тривалість за напівперіод напруги мережі, тим більше його спотворення.

Коефіцієнт амплітуди струму цього навантаження змінюється залежно від характеру джерела електроживлення, тоді як здатність самого джерела до забезпечення навантажень з великим коефіцієнтом амплітуди визначається його повним внутрішнім опором і його здатністю забезпечувати пікові значення споживаного від нього струму.

Для багатьох пристроїв, що виконують функції джерел електроживлення, така здатність може бути досягнута тільки шляхом завищення номінальних параметрів цього устаткування.

Зокрема, в сучасних генераторних установках змінного струму надперехідний реактивний опір складає приблизно 15%, що виробляє досить несприятливу дію на форму напруги, якщо не використовуються спеціальні обмотки або потужність генератора не буде вибрана свідомо завищеною.

Сучасні джерела безперебійного живлення (UPS) здатні контролювати форму напруги на кожному напівперіоді синусоїди. Нині в переважній більшості систем безперебійного живлення практично будь-якої потужності використовуються інвертори на біполярних транзисторах з ізолюваним затвором (IGBT) при високочастотному широко-імпульсному методі їх управління. Такі системи мають здатність живлення навантажень з високими коефіцієнтами амплітуди струму (3 і вище) за рахунок перемикачів на високій частоті і коригуванні форми напруги на кожному напівперіоді. Ця здатність віддавати струм з високими піковими значеннями може призводити до того, що форма напруги на виході UPS з подвійним перетворенням енергії помітно краще, ніж у промислової мережі на вході системи.

Падіння напруги в розподільній мережі. Більшість UPS здатна живити навантаження з високим значенням коефіцієнта амплітуди, причому коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги не перевищує 3-6 %. Проте це рівень спотворень напруги, що отримується при вимірах на вихідних клеммах самих UPS, але не в місцях підключення навантаження. Слід враховувати, що форма струму із-за високого процентного вмісту вищих гармонік сильно відрізнятиметься від синусоїдної.

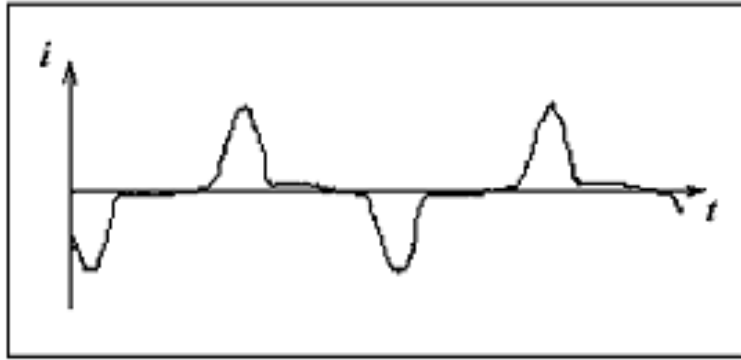


Рисунок 1 – Форма струму однофазного випрямляча

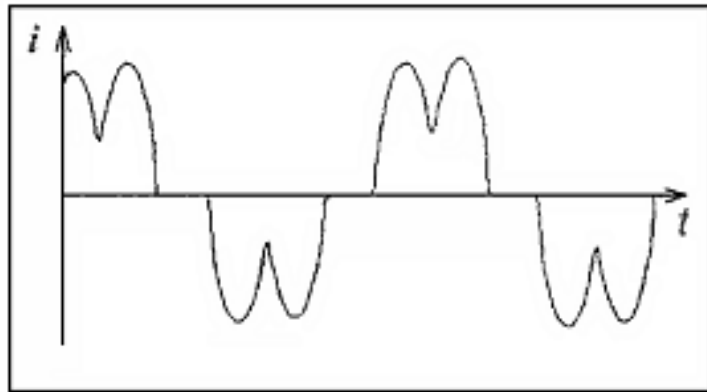
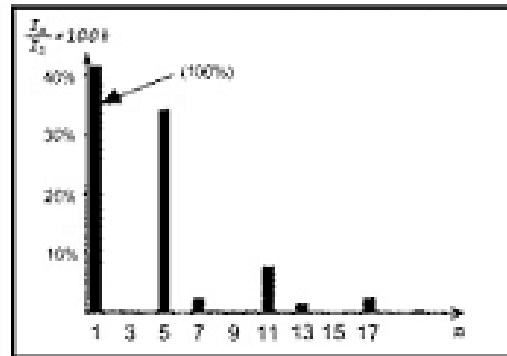
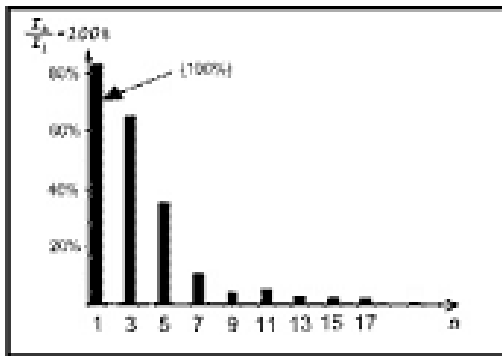


Рисунок 2 – Форма струму трифазного випрямляча



а)

б)

Рисунок 3 – Спектри вхідних струмів випрямлячів : а) однофазного, б) трифазного

Форми струмів для однофазного (рис. 1) і трифазного (рис. 2) випрямлячів характеризуються певним відсотковим вмістом непарних височастотних гармонік (табл. 1).[3] Відповідні спектри таких струмів приведені на рис. 3. Повний опір розподільної мережі має значною мірою індуктивний характер. Тому при дуже високому вмісті гармонік струмів відповідне падіння напруги на кабелях і проводах стає набагато вище гранично допустимих значень [1], і в типових розподільних системах з кабельними трасами завдовжки більше 100 метрів може відбуватися сильне спо-

творення напруги по навантаженню. Прикладом таких спотворень може служити графіки струму і напруги на вході однофазного випрямляча залежно від величини відносної реактивної складової опору вхідного фідера або внутрішнього опору джерела живлення випрямляча (рис. 4) [4].

Ефект гармонік кратній третій. Вищі гармоніки струму кратні трьом (тобто 3, 9, 15, 21 і т. д.), визначають високе значення коефіцієнта амплітуди і генеровані однофазними навантаженнями, мають специфічну результуючу дію в трифазних системах.

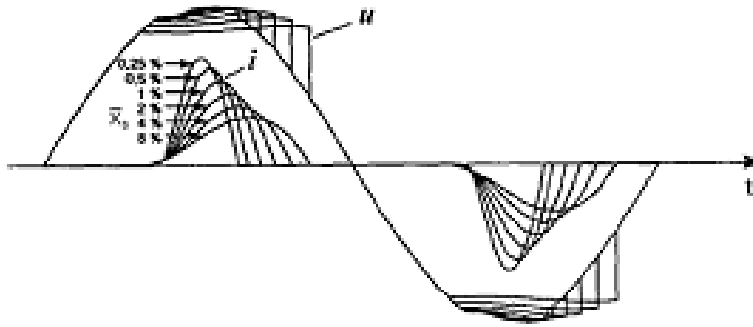


Рисунок 4 – Форми напруги і струму на вході без трансформаторного однофазного випрямляча залежно від відносної реактивної складової опору вхідного фідера

Таблиця 1 – Спектральний склад струму на вході UPS (приклад - при 100% навантаженні для UPS без вхідного фільтру і коректора коефіцієнта потужності)

№ гармоніки	Однофазний UPS, $I_n/I_1(\%)$	Трифазний UPS, $I_n/I_1(\%)$
1	100	100
3	65,7	-
5	37,7	33
7	12,7	2,7
9	4,4	-
11	5,3	7,3
13	2,5	1,6
15	1,9	-
17	1,8	2,6

У збалансованій (симетричною) трифазній системі гармонійні (синусоїдні) струми в усіх трьох фазах зрушені на 120 градусів по відношенню один до одного, і в результаті сума струмів в нейтральному провіднику дорівнює нулю.

Отже, не виникає і падіння напруги на провіднику нейтралі в кабелі. Це твердження залишається справедливим для більшості гармонік. Проте деякі з них мають напрям обертання вектора струму в ту ж сторону, що і основна гармоніка (перша, "фундаментальна", тобто 50 Гц), тобто вони мають пряму послідовність. Інші ж обертаються у зворотному напрямі і мають зворотну послідовність. Це не відноситься до гармонік, кратних третьої:

$$n = 3(2k + 1), \text{ де } k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

У трифазних колах вони зрушені на 360 градусів один до одного, співпадають по фазі і утворюють нульову послідовність. Непарні гармоніки, кратні третьою, підсумовуються в провіднику нейтралі (рис. 5). В результаті, з урахуванням того, що вони складають велику частку в діючому значенні фазних струмів, загальний струм в нейтралі може перевищувати фазні струми.

$$I_n = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} \quad (2)$$

Так, наприклад, при фазних струмах рівних 37 А, струм нейтралі складає 55 А при частоті, рівній 150 Гц. [2].

Неправильно спроектовані чотирипровідні кабелі трифазних мереж можуть перегріватися аж до займання, підтверджуючи тим самим необхідність збільшення перерізу провідників нейтралі трифазних кабелів мережі електроживлення комп'ютерного устаткування.

Гармоніки, кратні третьої, призводять до падінь напруги як в нейтралі, так і у фазних провідниках, викликаючи спотворення форми напруги на інших навантаженнях, підключених до цієї мережі.

Окрім вказаного вище, в міжфазній напрузі трифазної мережі будуть відсутні гармоніки, кратні трьом, у зв'язку з чим співвідношення між фазним і між фазному напруги при несинусоїдних струму стає менше, ніж $\sqrt{3}$.

Резонансні явища на частотах вищих гармонік.

За наявності вищих гармонік в електричних колах із зосередженими і розподіленими параметрами, якими можуть бути представлені блоки, вузли і розподільні мережі системи електроживлення, виникає небезпека появи резонансних явищ.

При виникненні резонансного або близького до нього режиму на якій-небудь вищій гармоніці струму або напруги ця складова виявляється більше, ніж амплітудне значення першої гармоніки струму (напруги) на тих же ділянках кола. Це негативним чином може відбитися на працездатності окремих елементів і вузлів системи.

Наведення в телекомунікаційних мережах.

Коли телекомунікаційні проходять поблизу силових мереж, по яких протікають струми вищих гармонік, в перших можуть наводитися перешкоди і спотворення інформаційного сигналу.

Величина спотворення залежатиме від частоти вищих гармонік, довжини паралельних ділянок мереж і відстані між ними.

Акустичний шум.

У трансформаторах, дроселях і інших електромагнітних елементах вищі гармоніки струму, створюючи електродинамічні зусилля, викликають додаткові акустичні шуми.

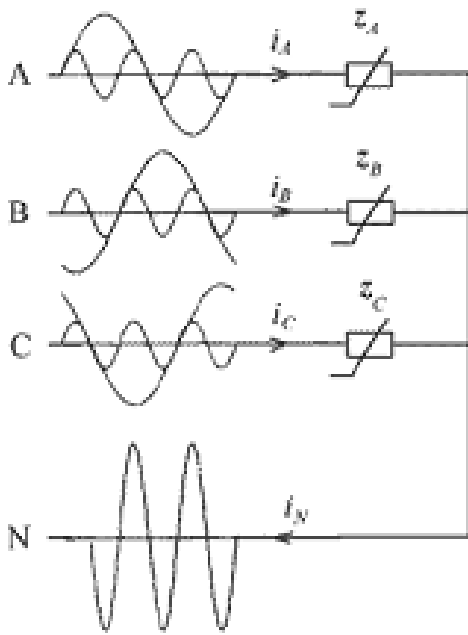


Рисунок 5 – Процес формування струму нейтралі при нелінійному навантаженні

Вібрація в електромашинних системах.

Наявність вищих гармонік в напрузі живлення індукційних електродвигунів є причиною виникнення в магнітному потоці складових на частотах вищих гармонік, які у свою чергу будуть наводити гармоніки ЕРС і, як наслідок цього, в обмотках ротора з'являються вищі гармоніки струму. Ці гармоніки взаємодіють з основним магнітним потоком, створюючи додаткові механічні моменти на валу електричної машини. В результаті створюються гармонійні пульсації моменту, що обертає, на валу двигуна. У екстремальних випадках може виникнути вібрація на резонансній частоті маси, що обертається, ротора, що призводить до накопичення втоми металу і можливого розриву валу ротора електродвигуна [5].

Нагрівачи і додаткові втрати в трансформаторах і електричних машинах.

Додаткові втрати, що викликають перегрівання трансформаторів за наявності вищих гармонік, виникають через скін-ефект в міді обмотки (збільшення активного опору обмотки із збільшенням частоти), а також збільшення втрат на гістерезис і вихрові струми в магнітопроводі трансформатора. У електричних машинах, окрім аналогічних втрат в статорі (втрати в міді і магнітопроводі), через значну різницю в швидкостях обертаючихся магнітних полів, створюються вищими гармоніками, і швидкістю обертання ротора виникають додаткові втрати в демпферних обмотках ротора і магнітопроводі електричної машини [6].

Нагрів конденсаторів.

Додаткові втрати за наявності вищих гармонік в конденсаторах обумовлені збільшенням "кута втрат" в діелектрику і зростанням діючого значення струму конденсатора. Виникаюче перегрівання в конденсаторі може призводити до пробію діелектрика. Окрім цього, конденсатори чутливі до перевантажень, що викликається присутністю вищих гармонік напруги.

Нагрів кабелів розподільної мережі.

Додаткові втрати в кабелях силової мережі, температури провідників, що призводять до підвищення, за наявності вищих гармонік струму викликаються наступними основними причинами: збільшенням діючого значення негармонійного струму; збільшенням активного опору провідника із-за скін-ефекту; збільшенням втрат в діелектрику ізоляції кабелю.

Мета дослідження. На основі аналізу дії вищих гармонік в сучасних пристроях електроживлення запропонувати можливі засоби вирішення проблеми спотворень напруги та струму в електромережах.

Основні матеріали дослідження. Можливі засоби вирішення поставленої мети. Різні методи можуть використовуватися, щоб спробувати ослабити вплив проблем, що викликаються вищими гармоніками струму при навантаженнях з високим значенням коефіцієнта амплітуди.

Забезпечення симетричного режиму роботи трифазної системи.

В першу чергу необхідно добитися, наскільки це можливо, збалансованості навантажень по фазах. При цьому забезпечується мінімальний струм в провіднику нейтралі і мінімальний зміст гармонік у вихідній напрузі джерел безперебійного живлення. Відповідні схеми контролю і управління в UPS підтримуватимуть номінальне діюче значення вихідної напруги, в той же самий час прагнучи забезпечити його синусоїдну форму. Не завжди можливо одночасно виконати обидві ці функції. У загальному випадку незбалансоване навантаження впливає на напругу, викликаючи його спотворення. Хоча воно і відносно мало за величиною, але так само додається до загальних спотворень в кабелі. Зазвичай переважають ті спотворення напруги, які з генеровані в розподільній мережі. Одним з раціональних способів симетрування однофазних навантажень в трифазній мережі є використання UPS з подвійним перетворенням енергії при трифазному вході і однофазному виході (3ф /1ф). В цьому випадку розвантажується нейтраль, оскільки вона не бере участь в роботі трифазного випрямляча на вході UPS, що знаходиться в нормальному режимі перетворення напруги. Проте цей ефект пропадає при переході UPS на режим "Bypass".

Включення в систему розділового трансформатора з обмотками "трикутник-зірка".

Цей метод використовувався на практиці, але не завжди з успіхом [7]. Передбачалося, що в цьому випадку трансформатор не пропускає гармоніки, кратні третьою, і що відсутність провідника нейтралі на стороні первинної обмотки виключає падіння напруги на нейтралі. Але таке твердження виявилось правильним лише частково. Збалансовані гармоніки, кратні третьою, наводять відповідні магнітні потоки в стержнях сердечника трансформатора і, якщо вони рівні за величиною і співпадають по фазі, то напруга, наведена в первинній обмотці, компенсуватиметься. Окрім цього будь-який трансформатор має індуктивність розсіяння, яка додається до існуючого повному вхідному опору розподільної мережі. Це може робити ефект зменшення коефіцієнта амплітуди струму навантаження і сумарного значення коефіцієнта спотворень синусоїдності струму. Спотворення напруги збільшу-

ється, а максимальне значення напруги постійного струму для живлення інвертора UPS знижується.

Використання фільтрів пригнічення гармонік.

Третя гармоніка є домінуючою по своїй найбільш несприятливій дії в однофазних колах. Включення в схему фільтру, який має низький повний опір на частоті цієї гармоніки, знижує генеровану нелінійним навантаженням напругу. Застосування таких фільтрів у разі систем безперебійного живлення найуспішніше для компенсації ефекту незбалансованих навантажень, які мають тенденцію генерувати високі рівні гармонік. Фільтри можуть бути встановлені як усередині UPS, так і розташовані на вихідному кінці кабелю (тобто на стороні навантаження). Тоді струми третьої гармоніки циркулюють між навантаженням і фільтром, частково знижуючи сумарний струм в провіднику нейтралі. Проте таке підключення не дає остаточного рішення проблеми, якщо на виході UPS підключені розподілені навантаження. Встановлений таким чином фільтр захищає тільки частину навантаження, до якого він безпосередньо підключений. Тому схема підключення має бути такою, щоб фільтр захищав усе навантаження, а не тільки її частину. Це може викликати утруднення за вартістю устаткування і необхідної займаної площі при розтавлянні додаткових пристроїв в декількох ділянках розподільної мережі на різних поверхах будівлі. Особливе значення мають фільтри, що встановлюються на вході UPS. Шестиполуперіодні (шестипульсні) випрямлячі, вживані в трифазних UPS, створюють високий рівень п'ятої гармоніки струму в живлячій мережі. Для зниження гармонійного складу споживаного струму і підвищення коефіцієнта потужності системи у фазні дроселі включають індуктивні опори (дроселі). Підвищенням ефективності пригнічення вищих гармонік струму є включення вхідного фільтру UPS, налаштованого на п'яту гармоніку.

Застосування дванадцяти напівперіодного випрямляча в UPS.

Для зниження величини коефіцієнта спотворення синусоїдності вхідного струму трифазних UPS до рівня менше 10% використовують 12-полуперіодні (12-пульсний) випрямлячі.

Зниження повного опору розподільної мережі.

Це один з ефективних методів зниження нелінійних спотворень. Кабелі і збірні шини мають повний опір, який прямо пов'язаний з довжиною ліній. Збільшення перерізу кабелів (проводів) знижує активний опір розподільної мережі, але не знижує її індуктивність. Максимальний ефективний переріз жил кабелів (проводів) складає приблизно 95 кв. мм [7].

З подальшим збільшенням перерізу кабелів їх індуктивність залишається відносно постійною. Очевидно, що ефективнішим буде використання паралельно сполучених кабелів (проводів). При нагоді використання децентралізованої системи безперебійного живлення слід розглянути розподіл усього устаткування (тобто пристроїв, що входять до складу навантаження, що захищається), що інсталується, на секції, кожна з яких живитиме від окремого джерела безперебійного живлення (UPS).

Висновки. Слід пам'ятати про те, що під час профілактичних, ремонтних і тому подібних робіт

системи безперебійного живлення повинні і можуть бути перемкнуті в режим обходу (Bypass). При цьому можливе зростання рівня спотворень, оскільки нелінійне навантаження безпосередньо буде підключено до первинного джерела змінної напруги (генератор, трансформатор підстанції і тому подібне). Форма напруги мережевого електроживлення часто буває спотворена через інші навантаження, що не відносяться до критичних, але що мають характеристики, подібні комп'ютерному і офісному устаткуванню. Спотворення форми напруги електроживлення, генеровані іншим устаткуванням, додаються до спотворень від комп'ютерного навантаження, яке було перемкнуте на живлення безпосередньо від мережі (на час профілактики або ремонту UPS), створюючи, таким чином, вищі рівні спотворень.

Список використаних джерел

1. Качество электрической энергии. Термины и определения: ГОСТ 23875 – 88. – М.: Издательство стандартов, 1988. – С.5 – (Издание официальное).
2. Капустин В. М. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть / В. М. Капустин, А. А. Лопухин // Современные технологии автоматизации. – СТА, 1997. – №2. – С.104-108.
3. Dugan R. C. Electrical Power Systems Quality. / R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, H. W. Beaty – McGraw-Hill, 1996. – 265 с.
4. Fiorina J. N. Inverters and Harmonics / J. N. Fiorina // Cahier Technique Merlin Gerin, no 159. – 19 с.
5. Yacamini R. Power System Harmonics / R. Yacamini // Part 3 – Problems caused by distorted supplies. – Power Engineering Journal, Oct., 1995. – С.233-238.
6. Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment // Cahier Technique Schneider Electric, no 152. – 25 с.
7. Forrester W. Networking in Harmony / W. Forrester // Electrical Contractor, Nov. / Dec., 1996, стр. 38-39.

Аннотация

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Уваров А. В., Савченко П. И.

Проведен анализ действия высших гармоник в современных системах электропитания и предложены возможные средства решения проблемы искажения напряжения и тока в электрических сетях.

Abstract

HIGHER HARMONICS IN MODERN POWER-SUPPLY SYSTEMS

A. Uvarov, P. Savchenko

The effect of higher harmonics in modern power systems has been analyzed and possible solutions were offered to prevent distortion of voltage and electric current in power networks.