

УДК 621.311

Ю.С. Олійник

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## АНАЛІЗ СПЕКТРУ ВИЩИХ ГАРМОНІК В СИСТЕМІ «ВИПРЯМЛЮВАЧ – ІНВЕРТОР»

*Рассмотрены высшие гармоники в системе «выпрямитель-инвертор», появление которых оказывает негативное влияние на качество электрической энергии. Анализ исследования режимов ВГ содержит следующие основные вопросы: нормирование режимов, регламентация отношений между потребителями и сетью, техника измерения, анализ режимов по результатам измерений, исследования свойств режимов нагрузок и сети, моделирование и расчет, нормализация режимов, влияние на электрооборудование. В современное время все чаще различные организации проводят исследования состояния электроснабжения сооружений. В любом здании содержится большое количество компьютерной техники, которая содержит высокие гармоники. Быстрый рост количества компьютерной техники создает проблему для ученых, которую необходимо решать. Расчет несимметричных и несинусоидальных режимов играет важную роль. Важность таких расчетов и исследований обуславливается необходимостью обеспечить качество электрической энергии не только при эксплуатации СЭС, но и при ее проектировании.*

**Ключові слова:** вищі гармоніки, надійність систем електропостачання, якість електроенергії, система «випрямляч – інвертор», гармонійні складові.

### Вступ

**Постановка проблеми і аналіз публікацій.** Якість електроенергії – це сукупність властивостей, які визначають дію на електрообладнання, прилади та апарати, яка в свою чергу оцінюється показниками якості електроенергії. Ці показники характеризують рівні електромагнітних перешкод в системі електропостачання по частоті, діючому значенні напруги, формі його кривої, симетрії та імпульсам напруги [9].

Якість електричної енергії є складовою електромагнітної сумісності, яка характеризує електромагнітне середовище. Погіршення якості електроенергії, інакше кажучи, збільшення рівня електромагнітної сумісності в системі електропостачання обумовлено технологічним процесам виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії [9].

Актуальність даної тематики щодо аналізу спектру вищих гармонійних у системі «випрямляч-інвертор» пов'язана з проблемою якості електроенергії в системах електропостачання промислових підприємств протягом достатньо тривалого часу залишається однією з найважливіших проблем, яка визначає надійність та ефективність електропостачання споживачів. Ця проблема має декілька складових, однією з яких є проблема гармонійних складових (вищі гармоніки). Джерелами ВГ є промислові споживачі з нелінійними вольт-амперними характеристиками, а також окремі прилади, які мають широке використання у багатьох сферах життєдіяльності сучасної людини, які однак різко погіршують якість електричної енергії [9].

ВГ в залежності від їх характеру, інтенсивності та тривалості негативно впливають на роботу систем автоматики та телемеханіки, знижують економі-

чність та надійність роботи електричних мереж, зменшують термін експлуатації електрообладнання та призводять до багатьох інших негативних наслідків [1 – 4].

Вагомий внесок у вивчення режимів ВГ, розробку методик вимірювання, розрахунку та нормалізації внесли вітчизняні та зарубіжні вчені: Жежеленко І.В., Железко Ю.С., Зикін Ф.А., Карташев І.І., Кордюков Е.І., Кузнецов В.Г., Курбацкий В.Г., Липський А.М., Тимофеев Д.В., Тонкаль В.Е., Трофимов Г.Г., Федоров В.К., Черепанов В.В., Шидловський А.К. та ін.

Проте основними роботами в сфері аналізу несинусоїдальних режимів систем електропостачання промислових підприємств (СЕР ПП) є праці Жежеленка І.В. В його працях показаний найбільш повний спектр питань, які пов'язані з режимами ВГ для мереж промислових підприємств [9].

Існує багато різноманітних методів, які дозволяють знизити амплітуду вищих гармонік в системах електропостачання, однак пошук раціонального методу та способу підвищення якості електроенергії як з технічної, так і з економічної точки зору залишається вирішеним не в повному обсязі.

Питання, які пов'язані з розробкою заходів, які направлені на підвищення ефективності функціонування фільтро-компенсуючих установок, залишаються досить актуальними [4, 6].

Дослідження режимів ВГ містить наступні основні питання: нормування режимів, регламентація відносин між споживачами та мережею, техніка вимірювання, аналіз режимів за результатами вимірювань, дослідження властивостей режимів навантажень та мережі, моделювання та розрахунок, нормалізація режимів, вплив на електрообладнання [9].

Зв'язки між електричними мережами загально-го призначення та споживачами в напрямку забезпечення форми кривої наруги регламентуються наступними нормативними документами:

- ДСТ 13109-97 – визначає допустимі величини коефіцієнтів спотворення синусоїди та коефіцієнти гармонік наруги та порядок їх вимірювання [5];

- методичні вказівки з контролю та аналізу якості електричної енергії в мережах загального призначення – визначає порядок проведення вимірювань якості електричної енергії та обробки вимірювань;

- правила приєднання споживачів до мереж загального призначення за умови впливу на якість – визначає допустимі рівні спотворень, що вносяться до величин  $K_y$  та  $K_{\text{min}}$  споживачами з нелінійним навантаженням;

- правила використання знижок та надбавок за якість електроенергії – визначає порядок вимірювання фактичних вкладів нелінійних навантажень та порівняння їх з допустимим значенням.

Діючі нормативні документи розроблені на основі властивостей режимів ВГ в мережах промислових підприємств. Нормативні документи базуються на принципі безкоштовного використання споживачами з нелінійним навантаженням властивостей мережі приймати струми ВГ. У зв'язку з ростом потужностей нелінійних навантажень збільшилася наруги ВГ та з'явилася необхідність у розробці мереж з врахуванням режимів ВГ і відповідно у перегляді правил.

За даними деяких експериментальних досліджень, які проводяться у нашій країні та за кордоном, було встановлено, що рівні ВГ частіше перевищують встановлені допустимі значення та пропорційно зростають через збільшення кількості потужних споживачів, які генерують ці ВГ [4, 6, 7].

У зв'язку зі збільшенням потужностей споживачів з нелінійним навантаженням, які є причиною спотворення кривої наруги (перетворювальні установки, електротяга, душові печі) та широкому розповсюдженні електронних систем автоматичного управління, які є досить чутливими до спотворень в мережі, увага видатних вчених у багатьох країнах було приділено проблемам ВГ у нарузі електричних мереж. В міжнародних організаціях МЕК та СІГРЕ було створено:

- технічний комітет №77 «Електромагнітна сумісність обладнання, присоединенного к общей электрической сети» – МЕК;

- робоча група 5 «Несимметрия, несинусоидальность и колебания напряжения» исследовательского комитета №36 – СІГРЕ.

Дана робоча група здійснила опитування спеціалістів багатьох країн з приводу важливості та гост-

рої необхідності першочергового розглядання явищ саме у сфері електромагнітної сумісності. Більшість з них вважало, що проблема ВГ є найбільш важливою [9].

**Метою статті** є аналіз вищих гармонік, їх негативний вплив на якість електроенергії та дослідження таких питань, як нормування режимів, регламентація відносин між споживачами та мережею, техніка вимірювання, аналіз режимів за результатами вимірювань, дослідження впливу ВГ на електрообладнання.

## Основний матеріал

В роботах авторів Аррилага Д., Бредлі Д., Боджера П., Жежеленка І.В., Тимофєєва Д.В. розглядаються основні властивості розповсюдження ВГ в мережах високої наруги, які виявляються шляхом аналізу та вимірювань та розрахунків. Як показано у роботах [1-4, 6-8] режими ВГ досить складні та різноманітні. Тому виникає необхідність вивчення властивостей режимів ВГ за допомогою спеціальних розрахунків с метою виявлення впливу складу ВГ на мережі високої наруги [9].

Питання моделювання електричних мереж розглянуті в роботах авторів Широкова Н.Г., Самородова Г.І., А Жежеленка І.В., Левиуша А.І., Данциса Я.Б., Кучумова Л.А., Вилєсова Д.В., Глинтерника С.Р. Важливим елементом моделювання є визначення параметрів моделей по результатах вимірювань режимів. До мереж високої наруги підключені нелінійні навантаження великої потужності. Для проведення розрахунків ВГ в мережах ВН необхідно знання фактичних величин спотворення, які вносяться кожним навантаженням [1 – 7].

Питання нормалізації режимів ВГ розглянуті в роботах авторів Войтова О.Н., Смирнова С.С., Зака Л. Нормалізація, на думку цих авторів, досягається за рахунок зниження наруги ВГ у вузлах приєднання крупних нелінійних навантажень. Досить протяжні ПЛЕП можуть призводити до значного збільшення рівнів ВГ [1, 6 – 8]. Нормалізація ВГ у вузлах підключення нелінійних навантажень недостатньо для забезпечення допустимих величин ВГ у всіх вузлах.

Проблема вищих гармонік розглядається в роботі автора Плотнікова М.П. та на його думку обумовлена, в свою чергу, прогресом в галузі силової перетворювальної техніки, яка призвела до появи в промисловому електропостачанні потужних вентильних перетворювачів, електродугових сталелитейних печей, зварювальних установок та інших пристроїв з нелінійними вольт амперними характеристиками. Розробкою проблеми вищих гармонік займається безліч спеціалістів в Україні, Росії та за кордоном. Питання, які пов'язані з підвищенням якості електроенергії та, як приклад, зі зниженням рівнів вищих гармонік є дуже актуальними у наш час [1].

В сучасний час всі частіше різноманітні організації проводять дослідження стану електропостачання споруд. В спорудах міститься велика кількість комп'ютерної техніки, яка містить вищі гармоніки. Це дещо нова проблема, але стрімке зростання комп'ютерної техніки створює проблему для вечних, яку необхідно розв'язувати [1 – 4].

Вищі гармонійні складові призводять до негативних наслідків:

- робота обладнання погіршується, внаслідок чого скорочується строк його роботи;
- виникають додаткові втрати в трансформаторах;
- можливо перегрів та руйнування кабельної лінії;
- спотворюється синусоїдальність напруги, що живить [6].

В даний час найбільш відомі два підходи до розрахунку ВГ в електричних мережах. Один з них заснований на розв'язанні системи нелінійних диференціальних рівнянь, яка описує електромагнітні процеси в вентильних перетворювачах. На основі цього рішення визначаються криві струму та напруги. В даний час теорія ланцюгів містить велику кількість аналітичних та неаналітичних методів розрахунку ланцюгів з вентилями. Розроблено велику кількість методів чисельного рішення нелінійних диференціальних рівнянь таких, як методи Тейлора, Ейлера, рунне та Адамса.

Інший підхід до розрахунку ВГ і напруги в ланцюгах з управляємим випрямлювачами передбачає, що вентильні перетворювачі заміщуються точками струму або ЕДС ВГ. Цей принцип дозволяє розрахувати спектральний склад струмів та напруг до послідовного та незалежного розрахунку їх діючих значень [7, 8].

Розрахунок несиметричних та несинусоїдальних режимів відіграє важливу роль. Важливість таких розрахунків та досліджень обумовлюється необхідністю забезпечити якість електричної енергії не лише при експлуатації СЕП, але й при її проектуванні.

Втрати електроенергії в електричних мережах систем електропостачання – це один з найважливіших показників економічності їх роботи. При оцінці втрат електроенергії в системах електропостачання також виникає проблема врахування вищих гармонійних складових струму і напруги. Сучасне навантаження характеризується великою кількістю нелінійних споживачів, які генерують ВГ та є причиною спотворення мережі. При цьому ускладнюється робота електрообладнання, створюються додаткові втрати електроенергії в елементах мережі.

У даному випадку необхідно правильно розраховувати втрати електроенергії в мережі. Проблема нормування таких втрат є наразі дуже актуальною.

Для того, щоб правильно визначити та нормувати втрати електроенергії у таких мережах необхідно вірно розраховувати їх гармонійний склад. Гармонійне врахування ВГ однією із складових проблеми розрахунку загальних втрат електроенергії в електричних мережах [1, 4, 8].

Для розрахунку втрат потужності від гармонік в електричних мережах систем електропостачання прийнято використання методики струмів, що задаються, коли раніше визначаються гармоніки струму на вході у перетворювач. Визначаються вони, виходячи з умови живлення перетворювача синусоїдальної напруги. Якщо розглядати випрямляч, то при цьому приймають за основу той факт, що випрямлений струм є повністю згладженим. При цьому не враховуються наступні обставини [9].

По-перше, при роботі перетворювачів у мережах низької напруги, коли точки підключення розташовані по системі електропостачання, наруга їх живлення не відрізняється від синусоїдальної, оскільки самі перетворювачі вносять ВГ в мережу. Причому спотворення живлячої напруги розрізняється по точках підключення [4, 6, 7, 8].

По-друге, при незалежному визначенні ВГ не приймається до уваги фазовий зсув напруг живлення, неврахування якого обумовлює похибку у розрахунках.

По-третє, зміна характеру навантаження потребує додаткового розрахунку вихідних струмів завантаження ВГ, причому неясно, на якому етапі струм можна вважати повністю згладженим, а на якому – не можна так вважати.

При цьому практично відсутні математично обґрунтовані схеми заміщення перетворювачів сумісно з навантаженням при їх динамічних режимах роботи, які могли бути використані при розрахунку гармонійних складових струму і напруги. Схеми заміщення системи електропостачання відносно гармонійних складових включають всі елементи системи електропостачання, за виключенням власно перетворювачів, які вводяться до цих схем струмами, що задаються [4, 6].

Інтенсифікація використання вентильних перетворювачів у всіх сферах економіки країни викликає необхідність технічного регулювання в галузі забезпечення встановлених показників якості електроенергії, які нормовані відповідними регламентуючими документами, у складі рівня ВГ [9].

Найбільш широким джерелом похибок, які впливають на якість електроенергії, є силові вентильні (напівпровідникові) перетворювачі. На промислових підприємствах є найбільш потужні джерела ВГ. Ці вентильні перетворювачі алюмінієвих комбінатів, заводи чорної металургії, тягових підстанцій залізничного та міського електротранспорту, метрополітену.

В мережах 0,4 кВ підключені суттєво менш потужні перетворювачі технологічних установок та побутових електроприладів, але у кількісному співвідношенні їх на декілька порядків більше, ніж у системах електропостачання більш високої напруги. Отже, має актуальність контроль за якістю електроенергії в мережах всіх рівні номінальної напруги та використання вже на стадії проектування технічних заходів щодо обмеження рівня ВГ у випадку використання пристроїв, які спотворюють синусоїдальну криву напруги, що живить. Разом з цим при розробці електротехнічних комплексів та систем на базі перетворювальної техніки недостатньо опрацьовані питання їх наступної роботи у системах електропостачання у відношенні дії на показники якості електроенергії мережі, що живить, як індивідуально, так і при сумісній роботі декількох установок. Якщо врахувати, що в мережах 0,4 кВ таких джерел ВГ може працювати одночасно від декількох десятків до декількох тисяч, які підключені до одного центру живлення, то питання правильного розрахунку складу ВГ в системі електропостачання при наявності будь-якої кількості перетворювачів та оцінці ступеню дії кожного джерела ВГ на якість електричної енергії є досить край необхідними [9].

Авторитетом, який не піддається сумнівам, у галузі дослідження режимів систем електропостачання при наявності джерел ВГ є І.В. Жежеленко. Сучасні економічні факти обумовлюють необхідність більш детального вивчення особливостей процесу передачі та розподілу електроенергії на ВГ та оцінці участі у формуванні показників якості електричної енергії всіх електроприймачів, що приєднані до загальної мережі [1-4, 6-8].

В електроенергетиці мають місце ринкові відносини, що призводить до обов'язкового дотримання показників якості електроенергії: з однієї сторони, за рахунок однієї сертифікації електроенергії, а з іншого боку – за рахунок рознесення частки відповідальності між поставщиками електроенергії та її споживачами за погіршення якості електроенергії. Ця задача не має законодавчого та технічного розв'язання, та економічного обґрунтування.

Одним з традиційних способів зниження несинусоїдальності кривих струму та напруги є використання пасивних фільтрів. Пасивні фільтри – це LC-ланцюги, які настроєні на резонанс на частоті вищих гармонік. Головною перевагою пасивних фільтрів є низька вартість. Однак, наявність ряду серйозних недоліків таких, як низька добротність, технологічний розброс параметрів реакторів та конденсаторів фільтру, можливість виникнення небезпечних резонансних явищ та негативний вплив на перехідні процеси в системі електропостачання при установці фільтрів призвели до значного скорочення та обмеження використання пасивних фільтрів.

З розвитком електроніки з'явилася можливість створення активних фільтрів вищих гармонік. Активний фільтр, який має у своїй основі чотирьох квадратний перетворювач на повністю управляємим силових напівпровідникових приладах, забезпечує високу ефективність фільтрації вищих гармонік. Однак, широке використання активних фільтрів обмежує їх висока вартість, яка пов'язана з встановленою потужністю. У зв'язку з цим, найбільш перспективним напрямком є розробка силових управляємим фільтрів, які представляють собою комбінацію пасивного фільтру та активного елементу (регулятора) на базі малопотужного активного фільтру. Практика використання показує, що є необхідність фільтрації однієї або декількох вищих гармонійних складових системи електропостачання. Силовий управляемий фільтр не має недоліків пасивного фільтру, та дозволяє вирішити задачу зниження рівнів вищих гармонік при суттєво меншій вартості пристрою у порівнянні з активним фільтром [4, 6].

Особливо важним спектром, який не враховується у багатьох розробках, є функціонування силового управляемого фільтру у перехідних режимах роботи СЕП, наприклад, при підключенні або відключенні споживачів. В результаті, не дивлячись на ефективну фільтрацію на частоті настроювання у встановленому (статичному) режимах СЕП, регулятор негативно впливає на перехідний процес у СЕП. Це пов'язано з протиріччю вимог до регулятора у статичних та динамічних режимах роботи систем електропостачання.

Таким чином, необхідна корекція параметрів системи управління активного елементу у динамічних режимах, при цьому повністю знешкоджує недоліки пасивного фільтру у статичних режимах роботи СЕП.

Причиною перевищення допустимих значень напруги ВГ відповідності до «Правил використання знижок» може бути споживач або мережа. Діючі правила містять наступну інформацію: причиною порушення якості електроенергії може бути споживач, якщо його фактична складова величин  $K_y$  та  $K_{n(n)}$  перевищує допустимі значення. Ця величина визначається результатами порівняння цих величин при споживачі, який спочатку відключений, а потім – підключений до мережі. Зроблені раніше опрацювання вимірювань режимів ВГ в мережах високої напруги свідчать про те, що зміни визначених коефіцієнтів  $K_y$  та  $K_{n(n)}$  при підключенні нелінійних навантажень не відповідають правилам [3, 4].

Нормативно-технічна документація, яка сформульована з врахуванням властивостей несинусоїдальних режимів в промислових електричних мережах, не враховує властивості несинусоїдальних режимів в електричних мережах високої напруги з продовженими лініями електропередач (ЛЕП). В

промислових мережах опір мережі визначається опором трансформаторів, що живляться. Нелінійні навантаження розташовані близько один від одного, фази напруг основної гармоніки для різних нелінійних навантажень близькі. В мережах з продовженими ЛЕП опір у вузлі мережі у значній мірі залежить від опорів ЛЕП. Нелінійні навантаження віддалені один від іншого на великі відстані, фази напруг у вузлах підключення дуже розрізняються, в коефіцієнтах розподілення струмів в мережах з продовженими лініями з'являється хвильовий ефект [1, 2, 3]. Визначення причини спотворення напруги у вузла мережі з продовженими ЛЕП важко, оскільки підключення нелінійного споживача може зменшити рівні напруги ВГ у вузлі та поліпшити якість електричної енергії на відміну від промислових мереж. Тому необхідно вивчення властивостей режимів ВГ в мережах високої напруги з метою врахування їх у нормативних документах.

Питання техніки вимірювання режимів ВГ та аналізу відповідності режимів ВГ нормативним вимогам детально розглянуті у [3, 4, 7]. Для вимірювання якості електричної енергії наразі використовуються вимірювальні комплекси "Омск", ППКЭ-50, ЭРИС-КЭ та інші. Вимірювальні комплекси дозволяють дослідити із заданим інтервалом часу режими навантажень та параметри показників якості електричної енергії, у тому числі ВГ та створювати архіви таких вимірювань. Використання вимірювальних комплексів створило умови для статичного аналізу режимів ВГ мережі і струмів нелінійних навантажень. У повному обсязі особливості несинусоїдальних режимів в мережах високої напруги з продовженими ЛЕП виявилися після появи вимірювально-розрахункового комплексу «Омськ». Комплекс дозволив протягом доби здійснювати вимірювання параметрів несинусоїдальних режимів – струмів та напруг ВГ, зберегти, а потім опрацювати вимірювальну інформацію. По результатах вимірювань, які проводилися з 1994 року, було встановлено наступні факти:

- рівні напруги ВГ швидко та у значній мірі змінюються, наприклад, протягом 10 хвилин вони можуть змінитися за величиною більше ніж у 3 рази;
- у фазах мережі рівні напруг ВГ значно відрізняються між собою;
- при комутаціях в схемі і змінах режиму на основній частоті рівні напруг ВГ можуть змінюватися на досить значну величину;
- високі рині напруг ВГ можуть виникати у вузлах мережі, які віддалені від місць комутації на великі відстані;
- спотворення, які вносяться одно типовими нелінійними навантаженнями в мережу, можуть у значній мірі відрізнятися один від іншого;

З врахуванням використання вимірювальних комплексів для вимірювання режимів ВГ заявилася

можливість визначення статистичних параметрів режимів ВГ мережі і навантажень з метою використання при розрахунках.

Причиною несинусоїдальних режимів в електричних мережах є нелінійні споживачі з нелінійною вольт-амперною характеристикою. До мереж високої напруги підключено ватаго таких споживачів, у тому числі великої потужності: тягові підстанції залізниці, алюмінієві заводи, металургійні виробництва та інші. Споживання електричної енергії нелінійними споживачами супроводжується спотворенням форм кривих струмів та напруг, що призводить до погіршення якості електричної енергії.

Збільшені рівні напруг ВГ є причиною багатьох негативних наслідків: збільшення втрат електричної енергії, пошкодження та зменшення тривалості роботи обладнання, порушення роботи систем управління, автоматики, захисту, неправильна робота лічильників електроенергії та інше.

Необхідною умовою успішної роботи системи загального електропостачання є забезпечення якості електричної енергії (ЯЕ) у вузлах підключення споживачів. Питання забезпечення відносяться до проблеми електромагнітної сумісності електричної мережі та споживачів, що до неї підключені. Показники ЯЕ регламентуються ДСТ 13109-97 [1]. До показників ЯЕ входять коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_n$  та коефіцієнти гармонійних складових напруги  $K_{n(n)}$ . Для цих величин нормуються нормально допустимі значення і гранично допустимі значення. Нормально допустимі та гранично допустимі значення величини  $K_n$  для мереж загального призначення наведені у табл. 1.1 [5]. Нормально допустимі значення для  $K_{n(n)}$  наведені у табл. 1.2. Гранично допустимі значення величин  $K_{n(n)}$  перевищують нормально допустимі значення у 1,5 раз.

Всі країни на певному етапі концентрації комп'ютерної техніки стикаються з нею і вимушені кардинально міняти технічні регламенти експлуатації, норми проектування, розробляти відповідну базу стандартів. У випадках, коли потужність нелінійних електроспоживачів не перевищує 10—15 %, будь-яких особливостей в експлуатації системи електропостачання, як правило, не виникає. При перевищенні вказаної межі слід чекати появи різних проблем в експлуатації і наслідків, причини яких не є очевидними. У будівлях, що мають долю нелінійного навантаження понад 25%, окремі проблеми можуть виявитися відразу [5].

Вищі гармонійні складові в струмах нелінійних електроспоживачів приводить до негативних, а інколи і катастрофічних наслідкам.

1. Можливий перегрів і руйнування нульових робочих провідників кабельних ліній унаслідок їх перевантаження струмами третьої гармоніки. Це відбувається тоді, коли струми в нульових робочих

провідниках значно перевершують струми фазних провідників, а захист від струмових перевантажень в ланцюгах нульових провідників не передбачений (п.1.3.10 ПУЕ). Відзначимо також прискорене старіння ізоляції при підвищенні робочої  $t_0$  струмопровідних провідників. Нульовий робочий провідник не захищений від перегріву автоматичними вимикачами або запобіжниками (п.3.1.17 ПУЕ). «Старі» системи електропостачання проектувалися лише під лінійне навантаження, тобто споживаний електроприймачами струм містив лише основну гармоніку (50 Гц). Отже, струм в нульовому робочому провіднику не міг перевершувати струм в найбільш навантаженої фазі, тобто захист на фазних провідниках одночасно захищав від перегріву і нульовий робочий провідник. Крім того, в процесі експлуатації нерівномірність розподілу струмів по фазах має бути не більше 10% (п.6.6. табл.6 Застосування 1, ПЕ-ЕП). Тому при визначенні тривало допустимих струмів за умовами нагріву дротів і кабелів, нульовий робочий провідник чотирьохпровідної системи трифазного струму заземлюючи і нульові захисні провідники не враховуються (п.3.1.10 ПУЕ), оскільки струм в цих провідниках за наявності лінійних електроспоживачів істотно менше струмів у фазних провідниках. В разі нелінійних електроспоживачів струми в нульових робочих провідниках перевищують фазні (гранично — в 1,73 разу, коли ширина імпульсу струму дорівнює 60 електричним градусам). Тому значення тривало допустимих струмів в разі нелінійних електроспоживачів мають бути понижені. На корпусах електрообладнання, підключеного до нульового дроту, може виникати напруга, що робить при дотику дратівливий вплив на людину. Проте у випадках використання протяжних ліній малого перетину може виникати небезпечна (більше 50 В) напруга дотику на корпусах електроприймачів в системі TN—С, коли функції нульового захисного і нульового робітника провідників [2].

При системі TN—S подібний ефект теоретично може виникнути при протіканні по нульовому захисному провідникові струму значної величини (при короткому замиканні).

Струми в нульових робочих провідниках можуть бути більшими, ніж струми у фазних провідниках. Це пояснюється тим, що при симетричному навантаженні фазні струми основної частоти і всі вищі гармоніки, за винятком вищих гармонік порядку, кратного трьом, утворюють системи прямої і зворотної послідовностей і дають в сумі нуль. Гармоніки ж порядку, кратного трьом, утворюють систему нульової послідовності, тобто мають у будь-який момент часу однакові значення і фази. Тому струм в нейтральному дроті дорівнює потрійній сумі струмів вищих гармонік, кратних трьом. Таким чином, при несинусоїдальному симетричному навантаженні струм в нульовому робочому провіднику буде рівний:

нтаженні струм в нульовому робочому провіднику буде рівний:

$$I_{\Pi} = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots},$$

де  $I_3, I_9, I_{15}$  — значення відповідних гармонік струму, що діють. При лінійному, навіть найпотужнішому навантаженні струм в нульовому робочому провіднику буде менший, ніж максимальний струм у фазних провідниках. Зовсім інша ситуація за наявності нелінійних навантажень, в цьому випадку струм в нульовому робочому провіднику може перевищувати струм у фазі більш ніж в 1,5 разу.

## Висновки

1. В умовах несинусоїдальності струму погіршуються умови роботи батарей конденсаторів. Батареї конденсаторів призначені для компенсації реактивної потужності навантаження, тобто для підвищення коефіцієнта потужності електроустановки будівлі. Проте в умовах несинусоїдальності струму батареї конденсаторів одночасно є елементами, що абсорбують гармоніки зі всієї мережі, оскільки опір конденсатора обернено пропорційно до частоти  $f$ :

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot k \cdot f_0 \cdot C}$$

де  $f_0$  — основна частота, Гц;

$k$  — порядок гармоніки;

$C$  — ємність конденсаторів.

Батареї конденсаторів змінюють нормальну дорогу гармонік струму від нелінійного споживача до джерела живлення, замикаючи частину цього струму через себе. Оскільки опори елементів мережі мають індуктивний характер, то при вживанні установок компенсації реактивної потужності і наявності нелінійних електроспоживачів з'являється вірогідність прояву резонансних явищ (як по струму, так і по напрузі) на окремих елементах системи електропостачання.

2. Скорочення терміну служби електроустановки із-за інтенсифікації теплового і електричного старіння ізоляції. У конденсаторах втрати енергії пропорційні частоті

$$\Delta P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

тому несинусоїдальний струм приводить до їх додаткового нагріву. У електричних машинах струми нульової послідовності створюють додаткове підмагнічування стали, що приводить до погіршення їх характеристик і додаткового нагріву сердечників (статори асинхронних двигунів, магнітопроводи трансформаторів). Суть електричного старіння — у виникненні так званих часткових розрядів, які поширюються лише на частину ізоляційного проміжку, наприклад часткові розряди в газових включеннях. Часткові розряди пов'язані з розсіянням енергії, наслідком якого є електрична, механічна і хімічна

дії на навколишній діелектрик. В результаті розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, що приводить до скорочення терміну служби [1 – 4].

3. Необгрунтоване спрацьовування запобіжників і автоматичних вимикачів унаслідок додаткового нагріву внутрішніх елементів захисних пристроїв. Цей процес обумовлений протіканням несинусоїдальних струмів, і, отже, дією поверхневого ефекту і ефекту близькості. У практиці зустрічалися випадки необгрунтованих спрацьовувань вибраних відповідно до вимог ПУЕ автоматичних вимикачів, що захищають лінії живлення комп'ютерного устаткування (при навантаженні, складовій 80 – 85% уставки теплового розчеплювача автоматичного вимикача).

4. Прискорене старіння ізоляції дротів і кабелів. Старіння ізоляції провідників і кабелів обумовлене протіканням несинусоїдального струму, що приводить до підвищеного нагріву зовнішньої поверхні жил кабелю унаслідок поверхневого ефекту і ефекту близькості.

5. Перешкоди в мережах телекомунікацій можуть виникати там, де силові кабелі і кабелі телекомунікацій розташовані відносно близько. Унаслідок протікання в силових кабелях височастотних гармонік струму, в кабелях телекомунікацій можуть наводитися перешкоди. Магнітні поля вищих гармонік прямої і зворотної послідовності частково компенсують один одного, тому найбільше впливи на телекомунікації надають гармоніки, кратні трьом. Чим вище порядок гармоніки, тим більше рівень перешкод, наведених ними в телекомунікаційних кабелях [1 – 4, 6 – 8].

## Список литературы

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 154 с.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
3. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Эквивалентирование линий с распределенными параметрами при распределении высших гармоник / И.В. Жежеленко // Энергетика (Изв. вузов и энергетических объединений СНГ). 1993. – С.19-22.
4. Жежеленко И.В. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Семенов. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173 с.
5. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: 1997. – 60 с.
6. Зак Л. Статистическое оценивание / Л. Зак. Пер. с нем. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
7. Плотников М.П. Подход к расчету высших гармоник и системное прогнозирование в электроэнергетике / М.П. Плотников // Материалы между. заочной НПК «Наука и техника в современном мире» 5 окт. 2011 г. – С. 17-22.
8. Аррилага Д. Гармоники в электрических системах / Д. Аррилага, Д. Брэдли, П.Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
9. Олійник Ю.С. Аналіз дослідження спектру вищих гармонік у системі «випрямлювач – інвертор» / Ю.С. Олійник // Матеріали ІХ НПК. – Прага, 2013. – С. 47-51.

Надійшла до редколегії 26.03.2015

Рецензент д-р техн. наук, проф. Г.І. Канюк, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

## АНАЛИЗ СПЕКТРА ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СИСТЕМЕ «ВЫПРЯМИТЕЛЬ – ИНВЕРТОР»

Ю.С. Олейник

Розглянуто вищі гармоніки в системі «випрямляч-інвертор», поява яких робить негативний вплив на якість електричної енергії. Аналіз дослідження режимів ВГ містить наступні основні питання: нормування режимів, регламентація відносин між споживачами та мережею, техніка вимірювання, аналіз режимів за результатами вимірювань, дослідження властивостей режимів навантажень та мережі, моделювання та розрахунок, нормалізація режимів, вплив на електрообладнання. В сучасній час всі частіше різноманітні організації проводять дослідження стану електропостачання споруд. В спорудах міститься велика кількість комп'ютерної техніки, яка містить вищі гармоніки. Швидке зростання кількості комп'ютерної техніки створює проблему для вчених, яку необхідно розв'язувати. Розрахунок несиметричних та несинусоїдальних режимів відіграє важливу роль. Важливість таких розрахунків та досліджень обумовлюється необхідністю забезпечити якість електричної енергії не лише при експлуатації СЕП, але й при її проектуванні.

**Ключевые слова:** высшие гармоники, надежность систем электроснабжения, качество электроэнергии, система «выпрямитель-инвертор», гармонические составляющие.

## SPECTRAL ANALYSIS OF HIGHER HARMONICS IN THE "STRAIGHTENERS - INVERTER"

Yu.S. Oliynik

Considered higher harmonics in the "rectifier-inverter", whose appearance has a negative impact on the quality of electricity. Analysis study modes VG contains the following main issues: rationing regimes, regulation of relations between users and network equipment measurement modes analysis for measurements, study the properties modes loads and network modeling and calculation, normalization modes, effects on electrical equipment. In modern times increasingly diverse organizations conduct research of power structures. In plants contains a large amount of computer equipment that contains higher harmonics. Proliferation of computer technology creates a problem for scientists that need to be addressed. Calculation of asymmetric and non-sinusoidal modes is important. Vista impor these calculations and research driven by the need to ensure the quality of electricity not only in the operation of EPS, but in its design.

**Keywords** harmonics, power system reliability, quality electricity system "rectifier-inverter" harmonic components.