

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лекційних занять з дисципліни

"Електромагнітна сумісність та якість електричної енергії"  
*частина 1*

*(для здобувачів другого магістерського рівня вищої освіти  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»)  
(Електронне видання)*

ЗАТВЕРДЖЕНО

на засіданні кафедри  
електричної інженерії

Протокол № 12 от 20.12.2022р.

Київ – 2022

УДК 621.313.

Методичні вказівки до лекційних занять з дисципліни " Електромагнітна сумісність та якість електричної енергії ". (для здобувачів другого магістерського рівня вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка») (Електронне видання) / Уклад.: Н.М. Філімоненко – Київ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2022. – 34 с.

Методичні вказівки призначені для здобувачів вищої освіти денної та заочної форм навчання, які вивчають дисципліну " Електромагнітна сумісність та якість електричної енергії ". Методичні вказівки містять теми за якими проводять лекції такими розділами: 1. Основні показники якості електроенергії; 2. Відхилення напруги і частоти; 3. Коливання напруги; 4. Несинусоїдальність напруги.

Методичні матеріали розраховані на студентів вищих навчальних закладів.

Укладачі

Н. М. Філімоненко, к.т.н., доц.

Рецензент

О. С. Кроль, д.т.н., проф.

# ЛЕКЦІЯ 1

## ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1. Загальні положення
2. Основні показники якості електроенергії (ПЯЕ)
3. Допоміжні показники якості електроенергії (ПЯЕ)
4. Вимоги до показників якості

### 1.1. Загальні положення

Предмет вивчення: Електромагнітна сумісність (ЕМС) об'єднує такі електромагнітні явища, як радіоперешкоди, що впливають на мережі, перенапруги, паразитні зв'язки, фон промислової частоти, вплив заземлення та ін. Згідно стандарту УОЕ 0870 ЕМС визначається як спроможність технічних засобів функціонувати із заданою якістю в даній електромагнітній обстановці і не створювати неприпустимих електромагнітних завад іншим технічним пристроям.

Під терміном «якість електроенергії» розуміється відповідність основних параметрів енергосистеми встановленим нормам виробництва, передачі і розподілу електроенергії [1, 7].

### 1.2. Основні показники якості електроенергії (ПЯЕ)

Стандартом встановлюються наступні показники якості електроенергії (ПКЕ):

- усталене відхилення напруги  $dU_y$  ;
- розмах зміни напруги  $dU_f$ ;

- доза флікера  $P_t$ ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги  $K_u$ ;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги  $K_u$  ;
- коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю  $K_{2u}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю  $K_{0u}$ ;
- відхилення частоти  $\Delta f$ ;
- тривалість провалу напруги  $\Delta t_n$ ;
- імпульсна напруга  $U_{\text{імп}}$ ;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги  $K_{\text{пер}U}$ .

Кількісна характеристика якості електроенергії виражається відхиленнями напруги і частоти, розмахом коливань напруги і частоти, коефіцієнтом несинусоїдальності форми кривої напруги, коефіцієнтом несиметрії напруги основної частоти.

Відхилення частоти – різниця, усереднена за 10 хвилин між фактичним значенням основної частоти і номінальним її значенням. Відхилення частоти від номінального значення в нормальному режимі роботи допускається в межах  $\pm 0,1$  Гц. Короткочасні відхилення можуть досягати  $\pm 0,2$  Гц.

Коливання частоти – різниця між найбільшим і найменшим значеннями основної частоти в процесі досить швидкої зміни параметрів режиму, коли швидкість зміни частоти не менше  $0,2$  Гц в секунду. Коливання частоти не повинні перевищувати  $0,2$  Гц понад допустимі відхилень  $0,1$  Гц:

Коливання напруги оцінюється наступними показниками:

1) Розмахом зміни напруги  $dU$  (див. Рисунок 1.1), тобто різницею між найбільшим і найменшим діючими значеннями напруги в процесі досить швидкої зміни параметрів режиму, коли швидкість зміни напруги не менше  $1\%$  в секунду.

2) Частотою змін напруги (1 / с, 1 / хв., 1 / г.).

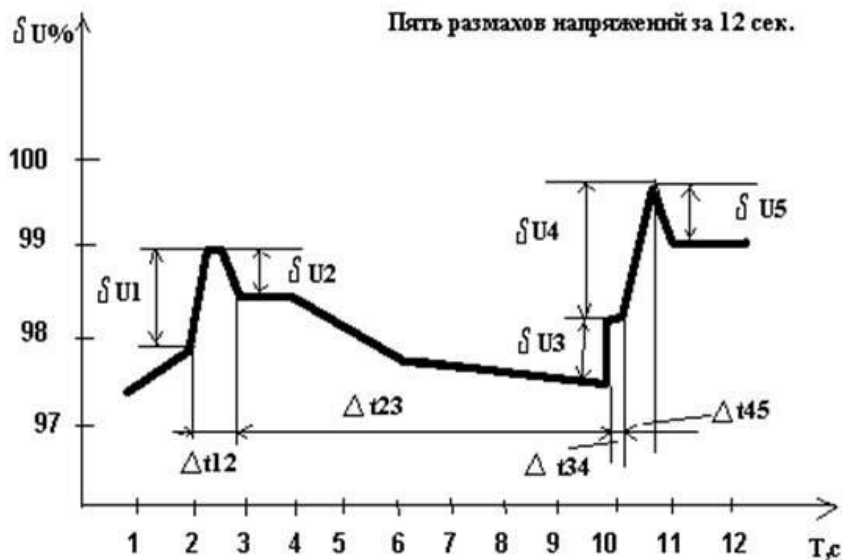


Рисунок 1.1 – Розмах зміни напруги

3) Інтервал між наступними один за одним змін напруги.

Несинусоїдальність напруги мережі характеризується коефіцієнтом несинусоїдальності (спотворення) кривої напруги.

Під несиметрією напруг розуміють нерівність фазних або лінійних напруг за амплітудою і кутах зсуву між ними.

Фізичний сенс і нормування значення показників якості електроенергії, згідно з ГОСТ 13 109-97.

Нормування значень показників якості електроенергії відноситься до числа головних питань проблеми якості електроенергії. Систему показників якості електроенергії утворюють кількісні характеристики повільних (відхилення) і швидких (коливання) вимірювань діючого значення напруги, його форми і симетрії в трифазній системі, а також змін частоти. Принципи нормування показників якості електроенергії по напрузі ґрунтуються на техніко-економічні передумови та полягають у наступному:

а) показників якості електроенергії по напрузі мають енергетичний сенс, тобто характеризують потужність (енергію) спотворення кривої напруги, ступінь негативного впливу енергії спотворення на електрообладнання і технологічні процеси порівнюються із значенням показників якості електроенергії;

б) гранично допустимі значення показників якості електроенергії вибираються з техніко-економічних міркувань;

в) показники якості електроенергії нормуються протягом певного інтервалу часу із заданою ймовірністю для отримання достовірних і порівнянних значень;

г) допустимі значення показників якості електроенергії вказуються на затискачах ЕП в вузлах електромереж.

У більшості країн СНД прийнятий стандарт ГОСТ 13109-97 «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення», в якому в якості допустимих значень показників якості електроенергії прийняті, в основному, рівні електромагнітної сумісності в СЕС, наведені в публікаціях МЕК в якості рекомендацій для складання національних стандартів.

Відповідно до стандарту ГОСТ 13109-97, систему ПКЕ при живленні від електромереж трифазного струму утворюють відхилення напруги, розмах змін напруги (амплітуда КН), інтенсивність (доза) флікера, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої лінійної (фазної) напруги, коефіцієнт  $n$ -ої ВГ, коефіцієнт зворотної та нульової послідовності напруги, імпульс напруги, коефіцієнт тимчасової перенапруги, відхилення частоти.

Стандартом ГОСТ встановлено 2 види норм на якості електроенергії – нормативно допустимі і гранично допустимі величини. Оцінка відповідності показникам якості електроенергії вимогам стандарту проводиться протягом розрахункового часу, рівного 24 год.

### 1.3. Допоміжні показники якості електроенергії

При визначенні значень деяких ПКЕ стандартом вводяться такі допоміжні параметри електричної енергії:

- частота повторень змін напруги  $FdU_t$ ;
- інтервал між змінами напруги  $\Delta t_i, i + 1$ ;
- глибина провалу напруги  $dU_g$ ;
- частота появи провалів напруги  $F_{п}$ ;
- тривалість імпульсу за рівнем 0,5 його амплітуди  $\Delta t_{imp0,5}$ ;
- тривалість тимчасової перенапруги  $\Delta t_{пер U}$ ;

### 1.4. Вимоги до якості електроенергії

Відповідно до стандарту протягом не менше 95% часу кожної доби фазна напруга має перебувати в діапазоні 209-231 В (відхилення 5%), частота в межах 49.8-50.2 Гц, а коефіцієнт несинусоїдальності не повинен перевищувати 5%.

Решта 5 або менше відсотків часу кожної доби напруга може змінюватися від 198 до 242 В (відхилення 10%), частота від 49,6 до 50,4 Гц, а коефіцієнт несинусоїдальності повинен бути не більше 10%. Допускаються також більш серйозних змін частоти: від 49,5 Гц до 51 Гц, але загальна тривалість таких змін не повинна перевищувати 90 годин за рік.

Аваріями електропостачання називаються ситуації, коли показники якості електроенергії короткочасно виходять за встановлені межі. Частота може відхилитися на 5 Гц від номінального значення. Напруга може знижуватися до нуля. Надалі показники якості повинні відновлюватися.

## ЛЕКЦІЯ 2

### ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ І ЧАСТОТИ

1. Відхилення напруги
2. Вплив відхилення напруги на роботу електрообладнання
3. Способи зниження відхилення напруги
4. Відхилення частоти
5. Вплив відхилення частоти на роботу електрообладнання
6. Способи зниження відхилення частоти

Зміст лекції: відхилення напруги, вплив відхилення напруги на роботу електрообладнання, способи зниження відхилення напруги.

Мета лекції: вивчити основні формули, розрахунку відхилення напруги і способи зниження відхилення напруги.

#### 2.1. Відхилення напруги

Відхилення напруги - відміну фактичної напруги в усталеному режимі роботи системи електропостачання від його номінального значення [7, 8].

Відхилення напруги в тій чи іншій точці мережі відбувається під впливом зміни навантаження відповідно до її графіку.

Відхилення напруги від номінальних значень відбуваються через добові, сезонні і технологічні зміни електричного навантаження споживачів; зміни потужності компенсуючих пристроїв; регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистем; зміни схеми і параметрів електричних мереж.

Відхилення напруги визначається різницею між чинним  $U$  і номінальним значеннями напруги  $U_{ном}$ , В [4,8]:

$$\delta U = U - U_{ном}$$

або, %

$$\delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%$$

Усталене відхилення напруги  $dU_y$  рівне, %:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%$$

де  $U_y$  – усталене (діюче) значення напруги за інтервал усереднення.

В електричних мережах однофазного струму діюче значення напруги визначається як значення напруги основної частоти  $U_{(1)}$  без урахування вищих гармонійних складових напруги, а в електричних мережах трифазного струму як діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти  $U_1$  (1).

Стандартом нормуються відхилення напруги на виводах приймачів електричної енергії. Нормально допустимі і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги дорівнюють відповідно  $\pm 5$  і  $\pm 10\%$  від номінального значення напруги і в точках загального приєднання споживачів електричної енергії повинні бути встановлені в договорах енергопостачання для годин мінімуму і максимуму навантажень в енергосистемі з урахуванням необхідності виконання норм стандарту на висновках приймачів електричної енергії відповідно до нормативних документів.

## 2.2. Вплив відхилення напруги на роботу електрообладнання

### *Освітлення.*

Знижується термін служби ламп освітлення. При підвищенні напруги на 10% термін служби ламп розжарювання знижується в 4 рази. При зниженні напруги на 10% знижується світловий потік ламп розжарювання на 40% і люмінесцентних ламп на 15%. При величині зниження напруги більш ніж на 10% люмінесцентні лампи мерехтять, а при зниженні більш ніж на 20% просто не загоряються.

### *Електропривід.*

При зниженні напруги на затискачах асинхронного електродвигуна на 15% момент знижується на 25%. Двигун може не запуститися або зупинитися. При зниженні напруги збільшується споживаний від мережі струм, що тягне розігрів обмоток і зниження терміну служби двигуна. При тривалій роботі на зниженому на 10% напрузі термін служби електродвигуна знижується вдвічі. При підвищенні напруги на 1% збільшується споживана двигуном реактивна потужність на 3 ... 7%. Знижується ефективність роботи приводу і мережі.

### *Електронна апаратура і комп'ютери.*

При зниженні напруги можуть виникати збої в роботі, що призводять до втрати даних. Нерідкі відмови блоків живлення внаслідок підвищеного струму споживання при зниженій напрузі і їх перегріву при підвищеному. У сучасній електронній техніці часто встановлюють спеціальні блоки, що відключають пристрій при відхиленні напруги для запобігання його виходу з ладу. Тому багато пристроїв втрачають працездатність при відхиленні напруги від норми.

### *Технологічні установки.*

При зниженні напруги суттєво погіршується технологічний процес, збільшується його тривалість. Отже, збільшується собівартість виробництва. При підвищенні напруги знижується термін служби обладнання, підвищується ймовірність аварій. При значних відхиленнях напруги відбувається зрив технологічного процесу.

### **2.3. Способи зниження відхилення напруги**

Знизити відхилення напруги можна двома способами: зниженням втрат напруги і регулюванням напруги.

Зниження втрат напруги досягається:

- вибором перетину провідників ліній електропередач за умовами втрат напруги;

- застосуванням поздовжньої ємнісної компенсації реактивного опору лінії. Однак це небезпечно підвищенням струмів короткого замикання при  $X \rightarrow 0$ ;

- компенсацією реактивної потужності для зниження її передачі енергії по високовольтних електромережах, за допомогою конденсаторних установок і синхронних електродвигунів, що працюють в режимі перезбудження.

Крім зниження втрат напруги, компенсація реактивної потужності є ефективним заходом енергозбереження, що забезпечує зниження втрат електроенергії в електричних мережах.

Регулювання напруги  $U$ :

- в центрі живлення регулювання напруги здійснюється за допомогою трансформаторів, оснащених пристроєм автоматичного регулювання коефіцієнта трансформації в залежності від величини

навантаження – регулювання під навантаженням (РПН). Такими пристроями оснащені ~ 10% трансформаторів. Діапазон регулювання  $\pm 16\%$  з дискретністю 1,78%;

- напруга може регулюватися на проміжних трансформаторних підстанціях за допомогою трансформаторів, оснащених пристроєм перемикачів відпаєк на обмотках з різними коефіцієнтами трансформації - перемикачів без збудження (ПБЗ), тобто з відключенням від мережі. Діапазон регулювання  $\pm 5\%$  з дискретністю 2,5%.

Відповідальність за підтримання напруги в межах, встановлених ГОСТ 13109-97, покладається на енергопостачальну організацію.

ГОСТ 13109-97 встановлює допустимі значення усталеного відхилення напруги на затискачах електроприймачів. А межі зміни напруги в точці приєднання споживача повинні розраховуватися з урахуванням падіння напруги від цієї точки до електроприймача і вказуватися в договорі енергопостачання.

## 2.4. Відхилення частоти

Відхилення частоти – різниця між дійсним і номінальним значеннями частоти, Гц [4, 8]:

$$\Delta f = f - f_{\text{ном}}$$

або, %

$$\Delta f = \frac{f - f_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}} \cdot 100\%.$$

Стандартом встановлюються нормально і гранично допустимі значення відхилення частоти, рівні  $\pm 0,2$  Гц і  $\pm 0,4$  Гц відповідно.

Зниження частоти відбувається при дефіциті потужності працюючих в системі електростанцій.

Для усунення цих явищ необхідно ремонтувати або модернізувати існуючі та будувати нові електростанції. А поки їх немає, активно застосовується радикальний захід – автоматичне частотне розвантаження (АЧР), тобто відключення частини споживачів при зниженні частоти. Це ще називають віяловими відключеннями.

Для споживача важливо знати, в яку чергу відключать його обладнання від мережі, при такому розвитку подій (вказується при укладенні договору електропостачання) аргументовано вимагати зміни черговості або мати власні резервні генеруючі потужності.

Підвищення частоти відбувається при різкому скиданні навантаження в системі електропостачання – ситуація аварійна і дію ГОСТ 13109-97 на неї не поширюється, а в сталому режимі роботи мережі така подія вельми рідкісне.

Жорсткі вимоги стандарту до відхилень частоти напруги живлення обумовлені значним впливом частоти на режими роботи електрообладнання, хід технологічних процесів виробництва і, як наслідок, техніко-економічні показники роботи промислових підприємств.

Електромагнітна складова збитку обумовлена збільшенням втрат активної потужності в електричних мережах і зростанням споживання активної та реактивної потужностей. Відомо, що зниження частоти на 1% збільшує втрати в електричних мережах на 2%.

Технологічна складова збитків спричинені в основному недовипуску промисловими підприємствами своєї продукції і вартістю додаткового часу роботи підприємства для виконання завдання. Згідно з експертними

оцінками, значення технологічного збитку на порядок вище електромагнітного.

Аналіз роботи підприємств з безперервним циклом виробництва показав, що більшість основних технологічних ліній обладнано механізмами з постійним і вентиляторним моментами опорів, а їх приводами служать асинхронні двигуни. Частота обертання роторів двигунів пропорційна зміні частоти мережі, а продуктивність технологічних ліній залежить від частоти обертання двигуна.

## **2.5. Вплив відхилення частоти на роботу електрообладнання**

Ступінь впливу частоти на продуктивність ряду механізмів може бути виражена через споживану ними активну потужність:

$$P = af^n,$$

де  $a$  – коефіцієнт пропорційності, що залежить від типу механізму;

$f$  – частота мережі;

$n$  – показник ступеня.

Залежно від значень показника ступеня  $n$ , ЕП можна розбити на наступні групи:

1) механізми з постійним моментом опору - поршневі насоси, компресори, металорізальні верстати тощо; для них  $n = 1$ ;

2) механізми з вентиляторним моментом опору - відцентрові насоси, вентилятори, димососи тощо; для них  $n = 3$ ; на ТЕС, КЕС, АЕС зазвичай це двигуни насосів живильної води, циркуляційних насосів, димових вентиляторів, маслонасосів тощо;

3) механізми, для яких  $n = 3,5 - 4$  – відцентрові насоси, що працюють з великим статичним напором (протитиском), наприклад, живильні насоси котелень.

ЕП 2-ї та 3-ї груп, найбільш схильних до впливу частоти, мають регулювальні можливості, завдяки яким споживана ними потужність з мережі залишається практично незмінною.

Найбільш чутливі до зниження частоти двигуни власних потреб електростанцій. Зниження частоти призводить до зменшення їх продуктивності, що супроводжується зниженням потужності генераторів і подальшим дефіцитом активної потужності і зниженням частоти (має місце лавина частоти).

Такі ЕП як лампи розжарювання, печі опору, дугові електричні печі на зміну частоти практично не реагують.

Відхилення частоти негативно впливають на роботу електронної техніки: відхилення частоти більш  $+0,1$  Гц призводить до зміни яскравості і геометричних фонових спотворень телевізійного зображення, зміни частоти від  $49,9$  до  $49,5$  Гц тягне за собою майже чотириразове збільшення допустимого розмаху телевізійного сигналу до фонові завади. Зміна частоти до  $49,5$  Гц потребує суттєвого посилення вимог до відношення сигнал / фонові перешкода у всіх ланках телевізійного тракту - від обладнання апаратно-студійного комплексу до телевізійного приймача, виконання яких пов'язане зі значними матеріальними витратами.

Крім цього, знижена частота в електричній мережі впливає і на термін служби обладнання, що містить елементи із сталлю (електродвигуни, трансформатори, реактори зі сталевим магнітопроводом), за рахунок збільшення струму намагнічування в таких апаратах і додаткового нагріву сталевих сердечників.

## **2.6. Способи зниження відхилення частоти**

Для запобігання загальносистемних аварій, викликаних зниженням частоти, передбачаються спеціальні пристрої автоматичного частотного

розвантаження (АЧР), що відключають частину менш відповідальних споживачів. Після ліквідації дефіциту потужності, наприклад, після включення резервних джерел, спеціальні пристрої частотного автоматичного повторного включення (ЧАПВ) включають відключених споживачів і нормальна робота системи відновлюється.

Підтримка нормальної частоти, що відповідає вимогам стандарту, є технічною, а не науковою задачею, основний шлях вирішення якої - введення генеруючих потужностей з метою створення резервів потужності в мережах енергопостачальних організацій.

## ЛЕКЦІЯ 3

### КОЛИВАННЯ НАПРУГИ

1. Коливання напруги
2. Вплив коливання напруги на роботу електрообладнання
3. Основні параметри коливань напруги
4. Способи зниження коливання напруги

Зміст лекції: коливання напруги, вплив коливання напруги на роботу електрообладнання, способи зниження коливання напруги.

Мета лекції: вивчити основні формули розрахунку коливання напруги і способи зниження коливання напруги.

#### **3.1. Коливання напруги**

Коливання напруги - швидкі зміни діючого значення напруги, що відбуваються зі швидкістю 1-2% в секунду і більше. Коливання напруги амплітудою (розмахом зміни напруги), частотою і інтервалами між наступними один за одним змінами напруги.

Причина виникнення коливання напруги – електроприймачі з швидкозмінними режимами роботи.

#### **3.2. Вплив коливання напруги на роботу електрообладнання**

Коливання напруги діють на: збільшення втрат в мережі; стомлення зору, зниження продуктивності, травматизм; зниження терміну служби

електронної апаратури; вихід з ладу конденсаторних батарей; нестійка робота систем збудження синхронних генераторів і двигунів; вібрації апаратури; можливі відпадання контакторів.

При роботі ЕП з різкозмінним ударним навантаженням в електромережі виникають різкі поштовхи споживаної потужності. Це викликає зміни напруги мережі, розмахи яких можуть досягти великих значень. Ці явища мають місце при роботі прокатних електродвигунів, дугових електропечей, зварювальних машин і т.д. Зазначені обставини вкрай несприятливо позначаються на роботі всіх ЕП, підключених до цієї мережі, в тому числі і ЕП, що викликають ці зміни.

Так, наприклад, якщо час зварювання у контактних машин в межах від 0,02 до 0,4 с, то коливання напруги навіть малої тривалості позначаються на якості зварювання.

При коливаннях напруги, в результаті яких напруга знижується більш ніж на 15% нижче номінального, можливе відключення магнітних пускачів, які працюють електродвигунів.

На підприємствах з істотною синхронною навантаженням коливання напруги можуть призводити до випадання приводу із синхронізму і розладу технологічного процесу.

Колівання напруги негативно позначається на роботі освітлювальних приймачів. Вони призводять до миготіння ламп, які при перевищенні порога дратівливості можуть відобразитися на тривалому сприйнятті людей.

Колівання напруги, що мають місце при роботі великих синхронних двигунів з різкозмінним навантаженням, визначаються з урахуванням перехідних процесів, тому що при цьому потужність, споживана ЕД, значно відрізняється від потужності встановленого режиму.

### 3.3. Основні параметри коливань напруги

У відповідних точках системи коливання напруги, що викликається змінами (стрибками) активного навантаження на DP і реактивного навантаження на DQ, може бути орієнтовно визначено по формулі [4, 8]:

$$\delta U = \frac{\Delta P R \pm \Delta Q X}{S_K Z} = \frac{\Delta P \frac{R}{X} \pm \Delta Q}{S_K \frac{Z}{X}}$$

де  $\delta U$  – втрата напруги, н. о.

$\Delta P$ ,  $\Delta Q$  – зміни (накиди) активної і реактивної трифазної потужності ЕП, (МВт і МВАр);

$R$ ,  $X$  – активний і реактивний опір на фазу (див. табл.. 4.1), Ом;

$Z$  – повний опір, Ом;

$S_K$  – потужність К.З. в точці, в якій перевіряється коливання напруги, МВА.

Таблиця 4.1 - Значення опорів елементів мережі

Елемент мережі	Співвідношення між активними та індуктивними опорами елементів мережі r/x
Повітряні лінії 110,220 кВ	0,125,0,5
Кабельні лінії 6,10 кВ	1,25,5
Струмопроводи 6,10 кВ	0,04,0,11
Трансформатори 2,5,6,3	0,06,0,143
Трансформатори 63,500 МВА	0,02,0,05
Реактори РБА 6,10 кВ до 1000 А	0,02,0,067
Паротурбінні генератори 12,60 МВт	0,012,0,02
Паротурбінні генератори 100,500 МВт	0,0075,0,01
Підстанції в розподільчих мережах	0,067 і вище

Активний опір всіх елементів мережі, крім кабелів, значно менше індуктивного. Але в заводських мережах великих підприємств при

широкому впровадженні струмопроводів 6,10 кВ і глибоких вводів 110,220 кВ. Вони стають малопротяжними, і їх частка різко знижується. Тому вони не мають великого впливу на результуюче значення відносини  $r / x$  в цілому по підприємству. Це дозволить спрощено розрахувати коливання напруги при різкозмінних ударних навантаженнях.

Виходячи з вищенаведених співвідношень  $r / x$  при розрахунках коливання напруги, в середньому можна прийняти, що лежить вона в межах 0,1, 0,03. При цьому відношення  $z / x$  виходить приблизно рівним 1. З урахуванням цих припущень:

$$\delta U = \frac{(0,1 \div 0,03) \Delta P \pm \Delta Q}{S_x}.$$

З огляду на мале відношення  $r / x$  елементів мережі, активним опором взагалі можна знехтувати. Тоді коливання напруги можна визначити за ще більш простою формулою:

$$\delta U = \pm \frac{\Delta Q}{S_k}.$$

На основі викладеного, можна зробити висновок про те, що при заданих набросах  $\Delta P$  і  $\Delta Q$  значення коливань визначається потужністю К.З. живильної мережі і, чим остання вище – тим менші коливання.

Другим істотним джерелом коливань напруги є дугові сталеплавильні печі (ДСП). При роботі ДСП мають місце часті відключення, число яких досягають 10 і більше протягом одного плавки. Найбільш важкі умови виходять в період розплавлення металу і на початку окислення. При цьому виникають експлуатаційні поштовхи струму. Значення струму при поштовху залежить від місткості печі, параметрів пічного трансформатора, повного опору короткої мережі.

При спільному живленні ДСП і так званого «спокійного» загальноцехового навантаження розмах зміни напруги  $\Delta U$  на шинах вторинної напруги 6,10 кВ знижувального трансформатора ДПП можна з достатньою для практичних цілей точністю визначити за формулою:

$$\delta U = \frac{S_T}{S_X} \cdot 100\%.$$

Таким чином, значення розмахів зміни напруги в основному визначається потужністю К.З. живильної мережі.

Коливання напруги викликаються різкою зміною навантаження на даній ділянці електричної мережі, наприклад, включенням асинхронного двигуна з великою кратністю пускового струму, технологічними установками з швидкозмінним режимом роботи, що супроводжуються поштовхами активної і реактивної потужності, такими, як привід реверсивних прокатних станів, дугові сталеплавильні печі, зварювальні апарати тощо.

Коливання напруги характеризуються двома показниками:

- розмахом зміни напруги  $dU_t$ ;
- дозою флікера  $P_t$ .

Розмах зміни напруги  $dU_t$  обчислюють за формулою, %:

$$\delta U_t = \frac{(U_i - U_{i+1})}{U_{ном}} \cdot 100\%,$$

де  $U_i$ ,  $U_{i+1}$  – значення наступних один за іншим екстремумів (або екстремуму по горизонталі) обвідної середньоквадратичних значень напруги, відповідно до малюнку 3.1.

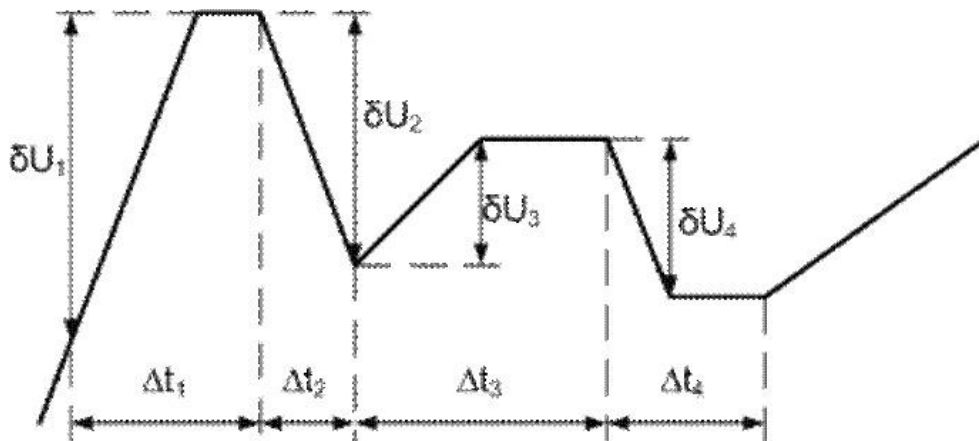


Рисунок 3.1 - Коливання напруги

Частота повторення змін напруги  $F_{\delta U_t}$ , (1 / с, 1 / хв) визначається за виразом

$$F_{\delta U_t} = \frac{m}{T},$$

де  $m$  – число змін напруги за час  $T$ ;

$T$  – інтервал часу вимірювання, що дорівнює 10 хв.

Якщо дві зміни напруги відбуваються з інтервалом менше 30 мс, то їх розглядають як одну.

Інтервал часу між змінами напруги дорівнює:

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i,i+1} - t_i.$$

Оцінка допустимості розмахів зміни напруги (коливань напруги) здійснюється за допомогою кривих залежності допустимих розмахів коливань від частоти повторень змін напруги або інтервалу часу між подальшими змінами напруги.

КЕ в точці загального приєднання при періодичних коливаннях напруги, що мають форму меандру (прямокутну) (див. Рис. 3.2), вважають

відповідним вимогам стандарту, якщо виміряне значення розмаху змін напруги не перевищує значень, що визначаються за кривими рис. 3.2 для відповідної частоти повторення змін напруги  $FdU_t$ , або інтервалу між змінами напруги  $Dt_{i,i+1}$ .

Гранично допустиме значення суми усталеного відхилення напруги  $\delta U_y$  і розмаху змін напруги  $\delta U_t$  в точках приєднання до електричних мереж напругою 0,38 кВ одно  $\pm 10\%$  від номінальної напруги.

Доза флікера – це міра сприйнятливості людини до впливу коливань світлового потоку, викликаних коливаннями напруги в мережі живлення, за встановлений проміжок часу.

Стандартом встановлюються короткочасна ( $P_{st}$ ) і тривала дози флікера ( $P_{Lt}$ ) (короткочасну визначають на інтервалі часу спостереження, що дорівнює 10 хв., тривалу на інтервалі – 2 год.). Вихідними даними для розрахунку є рівні флікера, вимірювані за допомогою флікер-метра приладу, в якому моделюється крива чутливості (амплітудно-частотна характеристика) органу зору людини. В даний час в Російській Федерації почалася розробка флікер-метрів для контролю коливань напруги.

КЕ по дозі флікера відповідає вимогам стандарту, якщо короткочасна і тривала дози флікера, визначені шляхом вимірювання протягом 24 год. або розрахунку, не перевищують гранично допустимих значень: для короткочасної дози флікера – 1,38 і для тривалої – 1,0 (при коливаннях напруги з формою, що відрізняється від меандру).

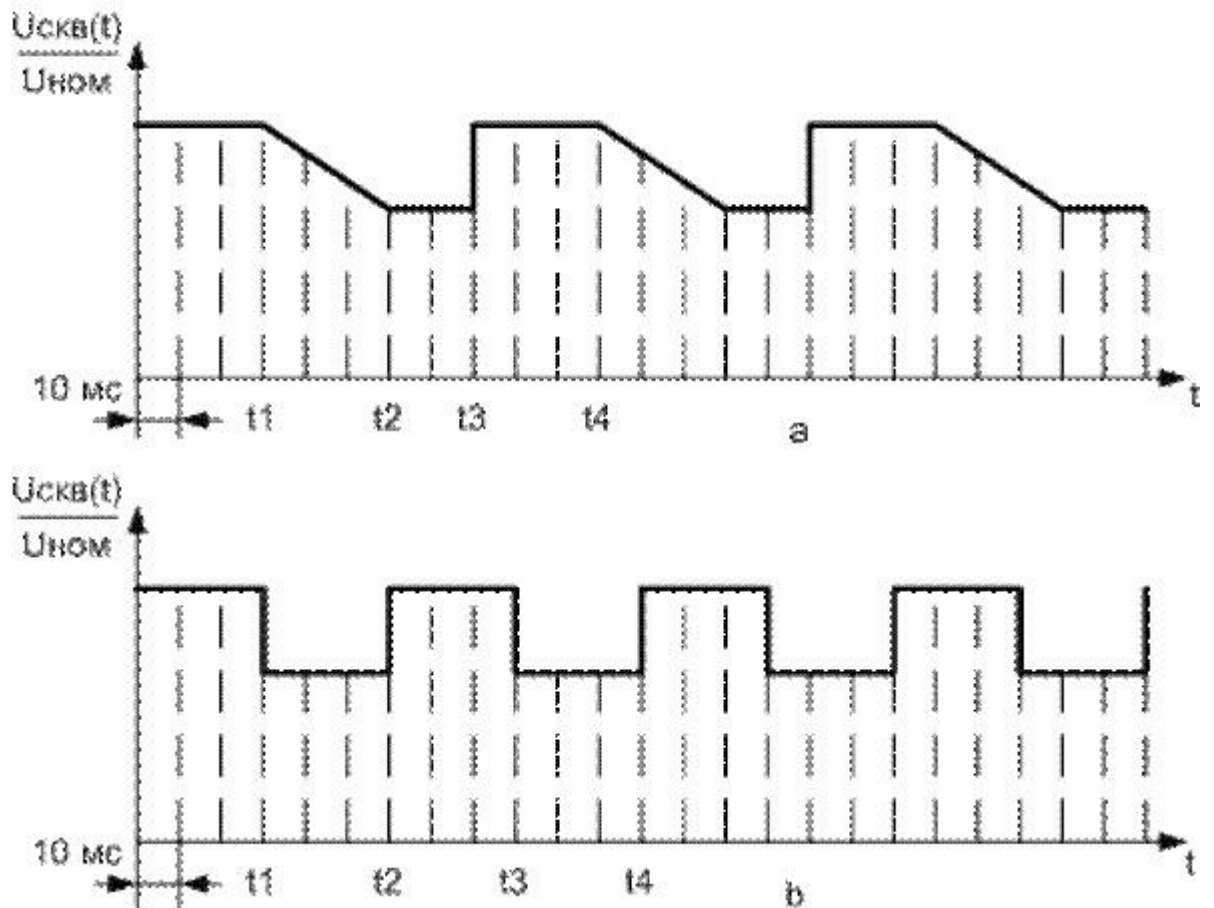


Рисунок 3.2 - Коливання напруги довільної форми (а) і мають форму меандру (б)

Гранично допустиме значення для короткочасної дози флікера в точках загального приєднання споживачів електроенергії, які мають лампами розжарювання в приміщеннях, де потрібна значна зорова напруга, так само 1,0, а для тривалої – 0,74, при коливаннях напруги з формою, що відрізняється від меандру.

### 3.4. Заходи щодо зниження коливань напруги

1) Застосування обладнання з поліпшеними характеристиками. Застосування електродвигунів зі зниженим пусковим струмом і поліпшеним  $\cos \varphi$  при пуску.

1) Застосування обладнання з поліпшеними характеристиками. Застосування електродвигунів зі зниженим пусковим струмом і поліпшеним  $\cos \varphi$  при пуску.

2) Підключення до потужної системи електропостачання.

3) Рознесення живлення зі спокійним і різкозмінним навантаженням на різні трансформатори або секції збірних шин.

4) Зниження опору живильного ділянки мережі.

На практиці не обґрунтовано, але активно застосовують останні два заходи.

## ЛЕКЦІЯ 4

### НЕСИНУСОЇДАЛЬНІСТЬ НАПРУГИ

1. Характеристика несинусоїдальності напруги
2. Вплив несинусоїдальності напруги на роботу електрообладнання
3. Заходи щодо зниження несинусоїдальності напруги

Зміст лекції: несинусоїдальність напруги, вплив несинусоїдальності напруги на роботу електрообладнання.

Мета лекції: вивчити основні формули розрахунку несинусоїдальності напруги.

#### 4.1. Характеристика несинусоїдальності напруги

Несинусоїдальність напруги – спотворення синусоїдальної форми кривої напруги (див. Рисунок 4.1). Несинусоїдальність напруги характеризується значенням коефіцієнта спотворення кривої,%, і коефіцієнтом  $n$ -ої гармонійної складової напруги,% .

Причина виникнення несинусоїдальності напруги – це силове обладнання з тиристорним керуванням, люмінесцентні лампи, зварювальні установки, перетворювачі частоти, імпульсні перетворювачі напруги.

Джерелами спотворень є синхронні генератори електростанцій, силові трансформатори, що працюють при підвищених значеннях магнітної індукції в осерді (при підвищеній напрузі на їх висновках), перетворюючі пристрої змінного струму в постійний і ЕП з нелінійними вольт - амперних характеристиками (або нелінійні навантаження).

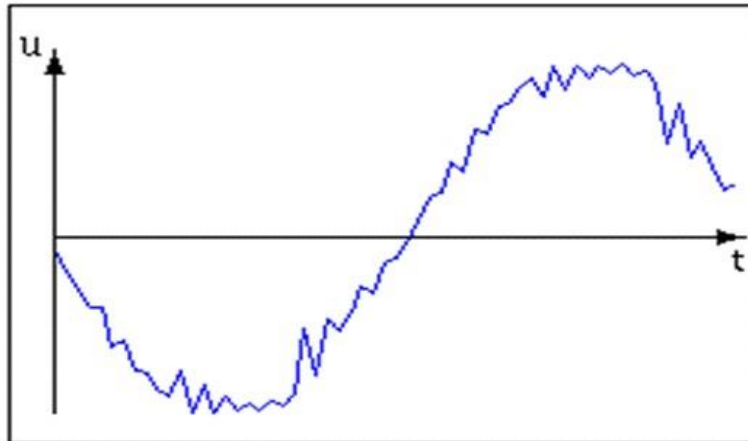


Рисунок 4.1 – Несинусоїдальність напруги

Спотворення, створювані синхронними генераторами і силовими трансформаторами, малі і не роблять істотного впливу на систему електропостачання і на роботу ЕП. Головною причиною спотворень є вентильні перетворювачі, електродуги сталеплавильні та руднотермічні печі, установки дугового і контактного зварювання, перетворювачі частоти, індукційні печі, ряд електронних технічних засобів (телевізійні приймачі, ПЕОМ), газорозрядні лампи тощо. Електронні приймачі електроенергії та газорозрядні лампи створюють при своїй роботі невисокий рівень гармонійних спотворень на виході, але загальна кількість таких ЕП велике.

Несинусоїдальність впливає на зростання втрат в електричних машинах, вібрації; порушення роботи автоматики захисту; збільшення похибок вимірювальної апаратури; відключення чутливих ЕПУ.

ЕП з нелінійної вольт амперною характеристикою споживають струм, форма кривої якого відрізняється від синусоїдальної. А протікання такого струму за елементами електромережі створює на них падіння напруги, відмінне від синусоїдального, це є причиною спотворення синусоїдальної форми кривої напруги.

Наприклад, напівпровідникові перетворювачі споживають струм трапецієподібної форми, образно кажучи – вихоплюють з синусоїди шматочки прямокутної форми, 35% електроенергії перетворюється та споживається на постійній напрузі.

Джерелами несинусоїдальності напруги є статичні перетворювачі, дугові сталеплавильні та індукційні печі, трансформатори, СД, зварювальні установки, газорозрядні освітлювальні прилади, офісна та побутова техніка і так далі.

Строго кажучи, всі споживачі мають нелінійну вольтамперну характеристику, крім ламп розжарювання, та й ті заборонені.

Несинусоїдальність напруги характеризується наступними показниками:

- коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги;
- коефіцієнтом n-ої гармонійної складової напруги.

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$  визначається за виразом, %:

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100\%$$

де  $U_{(n)}$  – діюче значення n-ої гармонійної складової напруги, В;

n – порядок гармонійної складової напруги;

N – порядок останньої з врахованих гармонійних складових напруги, стандартом встановлюється  $N = 40$ ;

$U_{(1)}$  – діюче значення напруги основної частоти, В.

Допускається  $K_U$  визначати за виразом, %:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{ном}} \cdot 100\%,$$

де  $U_{ном}$  – номінальна напруга мережі, В.

Коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги дорівнює, %:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100\%.$$

Допускається  $K_{U(n)}$  обчислювати за виразом, %:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(ном)}} \cdot 100\%.$$

Для обчислення необхідно визначити рівень напруги окремих гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням.

Фазна напруга гармоніки в розрахунковій точці мережі знаходять з виразу:

$$U_{(n)} = \frac{I_{(n)} n U_{КП} U_{ном}}{S_k},$$

де  $I_{(n)}$  – діюче значення фазного струму n-ої гармоніки;

$U_{КП}$  – напруга нелінійного навантаження (якщо розрахункова точка збігається з точкою приєднання нелінійного навантаження, то  $U_{КП} = U_{ном}$ );

$U_{ном}$  – номінальна напруга мережі;

$S_k$  – потужність короткого замикання в точці приєднання нелінійного навантаження.

Для розрахунку  $U_{(n)}$  необхідно попередньо визначити струм відповідної гармоніки, який залежить не тільки від електричних параметрів, але і від виду нелінійного навантаження.

Нормально допустимі і гранично допустимі значення  $K_U$  в точці загального приєднання до електричних мереж з різним номінальним напругою наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги

Нормально допустимі значення при $U_{ном}$ , кВ	Гранично допустимі значення при $U_{ном}$ , кВ						
0,38	6-20		110-330	0,38	6-20		110-330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

#### 4.2. Вплив несинусоїдальності напруги на роботу електрообладнання

- фронти несинусоїдальної напруги впливають на ізоляцію КЛ електропередач – частішають однофазні короткі замикання на землю. Аналогічно кабелю пробиваються конденсатори;

- в електричних машинах, включаючи трансформатори, зростають сумарні втрати. Так, при коефіцієнті спотворення синусоїдальної форми кривої напруги  $K_U = 10\%$  – сумарні втрати в мережах підприємств, великих промислових центрів, мережах електрифікованої залізничної транспорту можуть досягати 10-15%;

- зростає недооблік ЕЕ, внаслідок гальмуючого впливу на індукційні лічильники гармонік зворотній послідовності;

- неправильно спрацьовують пристрої управління і захисту;

- виходять з ладу комп'ютери.

Функцію, що описує несинусоїдальну криву напруги, можна розкласти в ряд Фур'є синусоїдальних (гармонічних) складових, з частотою

в  $n$ -разів перевищують частоту мережі електропостачання – частоту першої гармоніки ( $f_n = 1 = 50\text{Гц}$ ,  $f_n = 2 = 100\text{Гц}$ ,  $f_n = 3 = 150\text{Гц}$ ).

У зв'язку з різними особливостями генерації, поширення по мережах і впливу на роботу обладнання, розрізняють парні і непарні гармонійні складові, а також складові прямої послідовності (1, 4, 7 ...), зворотній послідовності (2, 5, 8 ...) і нульової послідовності (гармоніки кратні трьом).

З підвищенням частоти (номера гармонійної складової) амплітуда гармоніки знижується.

ГОСТ 13109-97 вимагає оцінювати весь ряд гармонійних складових від 2-ї до 40-ї включно.

#### **4.3. Заходи щодо зниження несинусоїдальності напруги**

- аналогічно заходам по зниженню коливань напруги;
- застосування обладнання з поліпшеними характеристиками;
- перетворювачі з високою пульсністю;
- підключення до потужної системі електропостачання;
- живлення нелінійного навантаження від окремих трансформаторів або секцій шин;
- зниження опору живильного ділянки мережі;
- застосування фільтро-компенсуючих пристроїв (див. Рис. 4.2).

L-C ланцюжок, включена в мережу, утворює коливальний контур, реактивний опір якого для струмів певної частоти дорівнює нулю. Підбором величин L і C фільтр налаштовується на частоту гармоніки струму і замикає її, не пропускаючи в мережу. Набір таких контурів, спеціально налаштованих на генеруються даної нелінійним навантаженням вищі гармоніки струму, і утворює фільтро-компенсуючий пристрій

(ФКУ), який не пропускає в мережу гармоніки струму і компенсує протікання реактивної потужності по мережі.

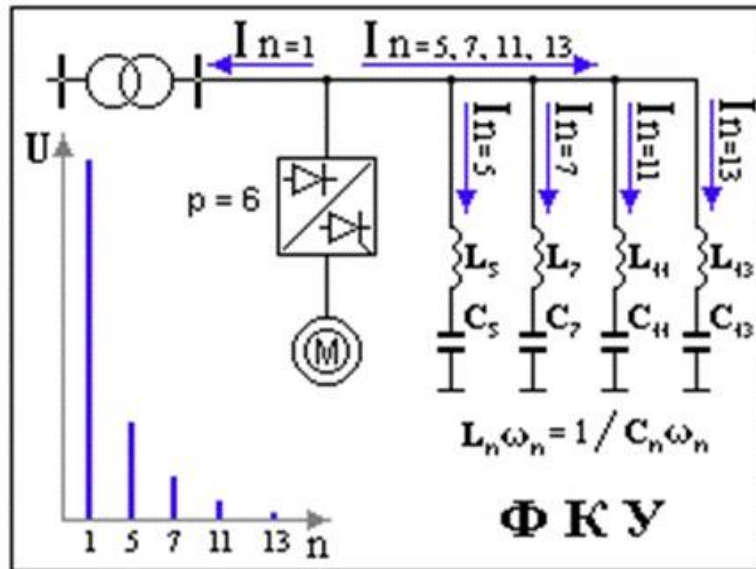


Рисунок 4.2 – Застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв

#### 4.4. Вплив несинусоїдальності напруги на роботу електрообладнання

- фронти несинусоїдальної напруги впливають на ізоляцію КЛ електропередач – частішають однофазні короткі замикання на землю. Аналогічно кабелю пробиваються конденсатори;

- в електричних машинах, включаючи трансформатори, зростають сумарні втрати. Так, при коефіцієнті спотворення синусоїдальної форми кривої напруги  $K_U = 10\%$  – сумарні втрати в мережах підприємств, великих промислових центрів, мережах електрифікованої залізничної транспорту можуть досягати 10-15%;

- зростає недооблік ЕЕ, внаслідок гальмуючого впливу на індукційні лічильники гармонік зворотній послідовності;

- неправильно спрацьовують пристрої управління і захисту;

- виходять з ладу комп'ютери.

Функцію, що описує несинусоїдальну криву напруги, можна розкласти в ряд Фур'є синусоїдальних (гармонічних) складових, з частотою в  $n$ -разів перевищують частоту мережі електропостачання – частоту першої гармоніки ( $f_n = 1 = 50\text{Гц}$ ,  $f_n = 2 = 100\text{Гц}$ ,  $f_n = 3 = 150\text{Гц}$ ).

У зв'язку з різними особливостями генерації, поширення по мережах і впливу на роботу обладнання, розрізняють парні і непарні гармонійні складові, а також складові прямої послідовності (1, 4, 7 ...), зворотній послідовності (2, 5, 8 ...) і нульової послідовності (гармоніки, що кратна 3).

З підвищенням частоти (номера гармонійної складової) амплітуда гармоніки знижується.

ГОСТ 13109-97 вимагає оцінювати весь ряд гармонійних складових від 2-ї до 40-ї включно.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Півняк Г. Г., Шидловський А. К., Кігель Г. А., Рибалко А. Я., Хованська О. І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
2. ДСТУ EN 61000-3-2:2015 Електромагнітна сумісність. Частина 3 – Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше ніж 16 А на фазу) (EN 61000-3-2:2014, IDT).
3. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. (На заміну ДСТУ EN50160:2010).
4. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution system. A Power Quality Standard (ISBN: 978-0-5807-4103-6): BS EN 50160:2010. – [Dated 31 August 2010]. – London, UK: European standard, 2010. – 38 p
5. Електромагнітна сумісність споживачів / І. В. Жежеленко, А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк. – М.: Маш-е, 2012. – 350 с.
6. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / І. В. Жежеленко, А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, Ю. Л. Саєнко. – Д.: Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.
7. Расчеты показателей электромагнитной совместимости: Учебное пособие / Г. Г. Пивняк, И. В. Жежеленко, Ю. А. Папаика – Д.: Національний гірничий університет, 2014. – 114 с.
8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник для электротехнич., энергетич., приборостроит. спец. вузов, Л. А. Бессонов. – [8-е изд., перераб. и доп.]. – Высш. шк., 1986. – 263 с.

