

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Шевелюк Олександр Олександрович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування варіанту оцінки втрат потужності пов'язаних з
несиметрією та несинусоїдальністю фазних навантажень
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

Шевелюк О. О.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Журавльов Валерій Пилипович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.ф-м.н., професор кафедри вищої

та прикладної математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Шевелюк О. О. Обґрунтування варіанту оцінки втрат потужності пов'язаних з несиметрією та несинусоїдальністю фазних навантажень. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Метою кваліфікаційної роботи є огляд основних способів оцінки додаткових втрат потужності в базисних елементах систем електроспоживання та електропостачання, обумовлених наявністю несиметрії струмів та напруг.

Практична значимість роботи полягає в визначенні оцінки втрат потужності, що виникають в основних компонентах електропостачальних систем за наявності несиметрії струмів і напруг.

Ключові слова: несиметрія, несинусоїдальність, втрати потужності.

ABSTRACT

Shevelyuk O.O. Justification of the option for estimating power losses associated with asymmetry and non-sinusoidal phase loads. Qualifying work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

The purpose of the qualification work is to review the main methods of estimating additional power losses in the basic elements of power consumption and power supply systems due to the presence of asymmetry of currents and voltages.

The practical significance of the work consists in determining the assessment of power losses that occur in the main components of power supply systems in the presence of asymmetry of currents and voltages.

Key words: asymmetry, nonsinusoidal, power losses.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 НЕСИММЕТРІЇ І НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	6
1.1 Причини виникнення несиметрії і несинусоїдальності напруг	6
1.2. Вплив несиметрії та несинусоїдальності напруги на роботу споживачів	8
1.2.1. Вплив відхилень напруги	8
1.2.2. Вплив несиметрії напруги	15
1.2.3. Вплив несинусоїдності напруги	18
Висновки по розділу 1	23
РОЗДІЛ 2 ОЦІНКА ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ, ЗВ'ЯЗАНИХ З НЕСИМЕТРІЄЮ І НЕСИНУСОЇДНІСТЮ ФАЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	24
2.1 Аналіз існуючих методів розрахунку втрат активної потужності у кабельній розподільній мережі 0.4 кВ	24
2.2 Розрахунку втрат активної потужності в електричних машинах	33
2.3 Розрахунку втрат активної потужності в трансформаторах	36
Висновки по розділу 2	39
РОЗДІЛ 3. СПОСОБИ ТА МЕТОДИ МІНІМІЗАЦІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК	40
Висновки по розділу 3	44
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

ВСТУП

У сучасних умовах одним із показників розвитку електроенергетики є якість електричної енергії, що зумовлює нормальне функціонування електрообладнання, приладів та апаратів [1]. До того ж, останнім часом з'являється все більше електричних приладів та споживачів, які висувають підвищені вимоги до якості електричної енергії [2–4].

Зниження якості електроенергії призводить до різних негативних наслідків [5]. Серед яких слід виділити:

- зниження ефективності процесів виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії внаслідок додаткових втрат;
- створення додаткових втрат електроенергії в основних елементах систем електропостачання;
- прискорене старіння ізоляції електроустаткування;
- хибна робота пристроїв релейного захисту та автоматики;
- функціональні порушення, пов'язані з відмовими, скороченням терміну служби, виходом з ладу обладнання, браком продукції та аваріями;
- збільшення похибки електровимірювальних приладів;

Як відомо, причиною погіршує значення показників якості електричної енергії що призводить до зростання втрат та елементах систем розподілу та споживання електричної енергії є наявність режимів тривалої несиметрії струмів та напруг [1 – 4, 6].

Зважаючи на важливість реалізації питання про зниження до 2030 року загальної величини втрат електроенергії при її передачі електричними мережами до рівня 8,8 % [6], актуальною залишається завдання оцінки втрат потужності, що виникають в основних компонентах електропостачальних систем за наявності несиметрії струмів і напруг.

Тому **основним завданням** кваліфікаційної роботи: на підставі даних аналізу показників якості електричної енергії, відомості про величину даних втрат можна зробити вибір та реалізувати необхідні заходи (організаційні, технічні) щодо оптимізації режимів енергоспоживання.

Відповідно **метою роботи** являється огляд основних способів оцінки додаткових втрат потужності в базисних елементах систем електроспоживання та електропостачання, обумовлених наявністю несиметрії струмів та напруг.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань застосовувалися методи системного аналізу, теоретичної електротехніки, математичного моделювання електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Шевелюк О. О., Журавльов В. П. ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ І НЕСИНУСІЙНІСТІ ФАЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 72-73.

Шевелюк О. О., Журавльов В. П. РОЗРАХУНОК ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ ЗВ'ЯЗАНИХ З НЕСИМЕТРІЄЮ І НЕСИНУСОЇДАЛЬНІСТЮ ФАЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 72-73.

Шевелюк О. О. ВПЛИВ ВІДХИЛЕНЬ НАПРУГИ НА РОБОТУ СПОЖИВАЧІВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 72-73.

РОЗДІЛ 1

НЕСИММЕТРІЇ І НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1 Причини виникнення несиметрії і несинусоїдальності напруг

Відповідно до ДСТУ 3466-96, винуватцями погіршення якості електричної енергії можуть бути як електроспоживачі, так і живильна енергосистема. Тривалість провалу напруги, імпульсна напруга, коефіцієнт тимчасового перенапруження, відхилення частоти обумовлюються режимами роботи енергетичної системи [1, 2]. Відхилення напруги залежать як від рівня напруги, що подається енергосистемою, і від роботи окремих електроприймачів [4, 22]. Несиметрія та несинусоїдність напруги обумовлені роботою окремих електроприймачів на підприємствах [5, 22,].

Несиметричні режими в трифазних системах електропостачання можуть бути обумовлені неоднаковим навантаженням по фазах, нерівністю фазних параметрів ліній, а також неповнофазною роботою обладнання, викликані відключенням однієї або двох фаз [24].

Причиною виникнення несиметрії напруг є споживачі електроенергії, симетричне багатofазне виконання яких неможливе або недоцільне з технікоекономічних міркувань. Це індукційні та дугові електричні печі, тягові навантаження електрифікованого транспорту на змінному струмі, однофазні електротермічні установки та електрозварювальні агрегати, освітлювальні установки, спеціальні однофазні навантаження, побутові однофазні електроприлади [4,5,6,9].

Істотний вплив на якість напруги надає несиметрія навантаження за фазами.

Як відомо, у сільських електричних мережах напругою 380/220 В питому вага однофазних навантажень значна. В основному це освітлювально-побутові прилади та двигуни малої потужності. При проектуванні та будівництві сільських низьковольтних електричних мереж прагнуть

однофазне навантаження рівномірно розподілити по фазах. Однак це не завжди вдається повністю виконати. Крім того, в процесі експлуатації повинно проводитися вирівнювання навантажень вимірювань фазних струмів. Так як при цьому вимірюються миттєві значення струмів, таке вирівнювання є малоефективним. До того ж виконання таких робіт є скрутним [6] і не дає потрібного результату [7, 13]. Але навіть у випадках, коли вдається розподілити навантаження по фазам однаково, необхідно пам'ятати, кожен споживач може бути включений чи відключений залежно від випадкових обставин. Тому навантаження кожної з фаз у часі змінюватиметься незалежно від навантаження інших фаз, тобто кількість і потужність споживачів, включених в окремі фази в кожний конкретний момент часу, будуть не однаковими. Внаслідок цього у сільських електричних мережах низької напруги існує несиметрія навантажень, що викликає значну несиметрію напруги, про що свідчать літературні джерела [7-11, 13].

Несиметрія вхідної напруги трансформатора, як і його навантажувальних струмів, призводить до появи несиметрії та невірноваженості його вихідних напруг, обумовлених складовими, відповідно, зворотної та нульової послідовності [15]. Особливо чутливі до несиметрії навантажень трансформатори зі схемою з'єднання обмоток «зірка-зірка-нуль», які мають великий опір нульової послідовності, що викликає виникнення невірноваженої системи їхньої вихідної напруги [7,15].

Причиною спотворення синусоїдальності кривої напруги у системах електропостачання споживачів є струми найвищих гармонік. Вони протікають елементами системи і призводять до появи вищих гармонік напруги [15,17]. Значення останніх залежить від величин струмів вищих гармонік і від частотних показників елементів мережі. Вищі гармоніки напруги накладаються на синусоїду напруги основної частоти та спотворюють її форму.

Джерелами струмів вищих гармонік є елементи електричних мереж з

нелінійними та вольтамперними характеристиками. Це напівпровідникові перетворювачі частоти, установки однофазного і трифазного електрозварювання, вентильні перетворювачі, електродугові печі, електричні машини, силові трансформатори, вітроенергетичні установки, газорозрядні лампи, персональні ЕОМ, файл-сервери, монітори, лазерні принтери, копіювальна техніка, факси, газорозрядні лампи, кондиціонери, телевізори, відеомагнітофони, НВЧ-печі та інші пристрої, виконані на базі напівпровідникових елементів [6]. Так, вентильні перетворювачі є джерелами канонічних вищих гармонік (5; 7; 11; 13-й), рівні яких (по відношенню до 1-ї гармоніки) обернено пропорційні номеру [20]. Перетворювачі частоти є джерелами не лише вищих гармонік, а й так званих інтергармонік, частоти яких між частотами канонічних вищих гармонік [25]. При роботі зварювального пристрою з'являються вищі гармоніки та інтергармоніки з амплітудами, що досягають 20% основної гармоніки струму [19]. ЕОМ та газорозрядні лампи (люмінесцентні та дугові ртутні) є джерелами вищих гармонік порядку $n = 3, 5, 7$; асинхронні двигуни - гармонік порядку $n = 3, 5, 7, 11$; однофазні випрямлячі - гармонік порядку $n = 3, 5, 7, 9, 11$; трифазні випрямлячі - гармонік порядку $n = 5, 7, 11$ [12].

1.2. Вплив несиметрії та несинусоїдальності напруги на роботу споживачів

Відхилення показників якості електроенергії від установлених норм негативно позначаються на роботі електрообладнання як енергопостачальних організацій, так та споживачів електроенергії. Вони можуть призвести до заподіяння значних збитків у промисловості, сільськогосподарському виробництві, у побуті. Розглянемо вплив якості електроенергії на найпоширеніші види споживачів, якими є електродвигуни, установки електричного освітлення, вентильні перетворювачі, електрозварювальні та електротермічні установки.

1.2.1. Вплив відхилень напруги

Асинхронні електродвигуни. Найбільш поширені приймачами

електроенергії як у промисловості, так та сільському господарстві є асинхронні електродвигуни. Відхилення напруги від номінального істотно впливає на їх роботу. Так, при зміні напруги змінюється механічна характеристика електродвигуна (залежність його моменту, що обертає M від ковзання s або частоти обертання) (рис. 1.1). У зв'язку з тим, що крутний момент двигуна пропорційний квадрату напруги на його виводах, при зниженні напруги зменшуються крутний момент і частота обертання ротора двигуна, оскільки збільшується його ковзання. Зниження частоти обертання залежить від закону зміни моменту опору M_c (на рис 1.1 M_c прийнятий постійним) і завантаження двигуна. Залежність частоти обертання ротора двигуна від напруги можна виразити [18] таким чином:

$$n = n_c \left(1 - k_3 \frac{U_{ном}^2}{U^2} \cdot S_{ном} \right), \quad (1.1)$$

де n – синхронна частота обертання;

k_3 – коефіцієнт завантаження двигуна;

$U_{ном}$, $S_{ном}$ – номінальні значення напруги і ковзання відповідно.

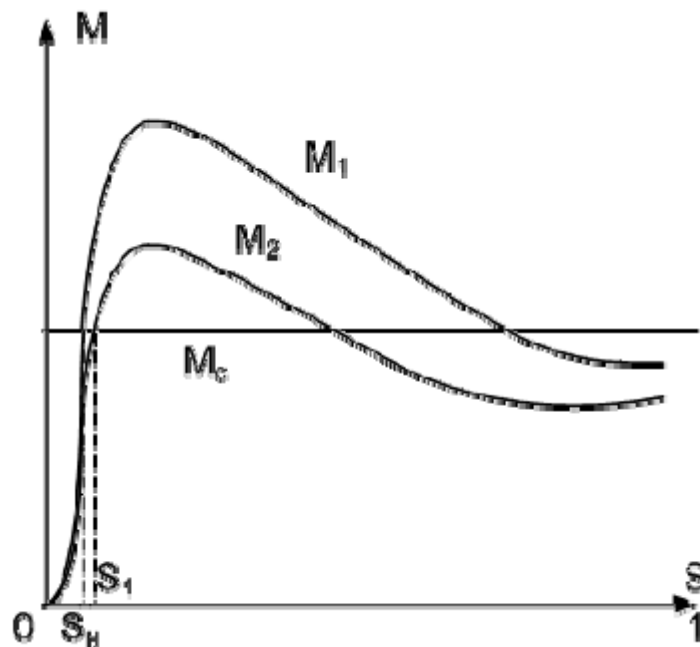


Рисунок 1.1. Механічна характеристика двигуна при номінальній (M_1) і пониженій (M_2) напругах

З формули (1.1) слідує, що при малих завантаженнях двигуна частота

обертання ротора буде більшою за номінальну частоту обертання (при номінальному навантаженні двигуна). У цих випадках зниження напруги не призводять до зменшення продуктивності технологічного обладнання, оскільки зниження частоти обертання двигунів нижче за номінальну не відбувається.

При роботі електродвигунів з повним навантаженням пониження напруги призводить до зменшення частоти обертання. Якщо продуктивність механізмів залежить від частоти обертання двигуна, то на виводах таких двигунів необхідно підтримувати напругу не нижче за номінальну. При значному зниженні напруги на виводах двигунів, що працюють з повним навантаженням, момент опору механізму може перевищити момент, що обертає, що призведе до його зупинки. У таких випадках, щоб уникнути пошкоджень, двигун необхідно відключити від мережі.

Зниження напруги в мережі впливає на умови пуску асинхронних електродвигунів, оскільки пусковий момент залежить від квадрата напруги. При значному зниженні напруги двигун може не запуститись.

Від значення напруги на виводах електродвигуна залежить величина споживаної ним активної та реактивної потужності. У разі зниження напруги на затискачах двигуна реактивна потужність намагнічування зменшується (на 2–3 % при зниженні напруги на 1 %), при тій же потужності, що споживається, збільшується струм двигуна, що викликає перегрів ізоляції [18].

Якщо двигун працює при зниженій напрузі тривалий час, то при цьому відбувається прискорене зношування ізоляції, що призводить до зниження терміну служби двигуна.

Приблизно термін служби ізоляції T можна визначити за формулою [18]

$$T = \frac{T_{\text{ном}}}{R}, \quad (1.2)$$

де $T_{\text{ном}}$ – термін служби ізоляції двигуна при номінальній напрузі та номінальному навантаженні;

R – коефіцієнт, що залежить від значення та знаку відхилення напруги, а також коефіцієнт завантаження двигуна. Визначається за такою формулою [18]

$$R = (47\delta U^2 - 7,55\delta U + 1)k_3^2 \text{ при } -0,2 \leq \delta U_y \leq 0;$$

$$R = k_3^2 \text{ при } -0,2 \geq \delta U_y \geq 0.$$

Тому з погляду нагріву двигуни більш небезпечні в межах, де розглядаються, негативні відхилення напруги. Зниження напруги призводить також до помітного зростання реактивної потужності, що втрачається в реактивних опорах розсіювання ліній, трансформаторів та асинхронних двигунів.

Робота електродвигунів при підвищеній напрузі призводить до збільшення споживаної ними реактивної потужності. При цьому із зменшенням коефіцієнта завантаження двигуна питоме споживання реактивної потужності зростає. У середньому на кожен відсоток підвищення напруги споживана реактивна потужність збільшується на 3 % і більше (в основному за рахунок збільшення струму холостого ходу двигуна), що, у свою черга, призводить до збільшення втрат активної потужності у елементах електричної мережі[14].

Лампи розжарювання. Лампи розжарювання характеризуються номінальними параметрами: споживана потужність $P_{ном}$ (Вт), світловий потік $F_{ном}$ (лм), світлова віддача $H_{ном}$ (лм/Вт), термін служби $T_{ном}$ (год). Ці показники значною мірою залежать від напруги на виводах ламп розжарювання. При відхиленнях напруги на 10 % ці характеристики можна описати наближено наступними емпіричними формулами [18]:

$$P_{e.o.} = \frac{P}{P_{ном}} = \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^{1,53}; \quad (1.3)$$

$$F_{e.o.} = \frac{F}{F_{ном}} = \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^{3,67}; \quad (1.4)$$

$$T_{\text{г.о.}} = \frac{T}{T_{\text{ном}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^{-14,8}; \quad (1.5)$$

$$H_{\text{г.о.}} = \frac{H}{H_{\text{ном}}} = \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^{2,14}. \quad (1.6)$$

На рис. 1.2 наведено залежність номінальних параметрів ламп розжарювання від напруги. Як випливає з графіка, при зниженні напруги значно падає світловий потік. При зміні напруги вище від номінального світловий потік зростає. Зростає також потужність лампи та світлова віддача, але різко знижується термін служби лампи. При цьому має місце перевитрата електроенергії.

Якщо прийняти всі ці величини при номінальній напрузі за 100%, то при відхиленні напруги на $\pm 1\%$ [8]:

- потужність лампи зміниться на $\pm 1,5\%$;
- світловий потік - на $\pm 3,5\%$;
- світлова віддача - на $\pm 1,8\%$;
- термін служби - на $\pm 13\%$.

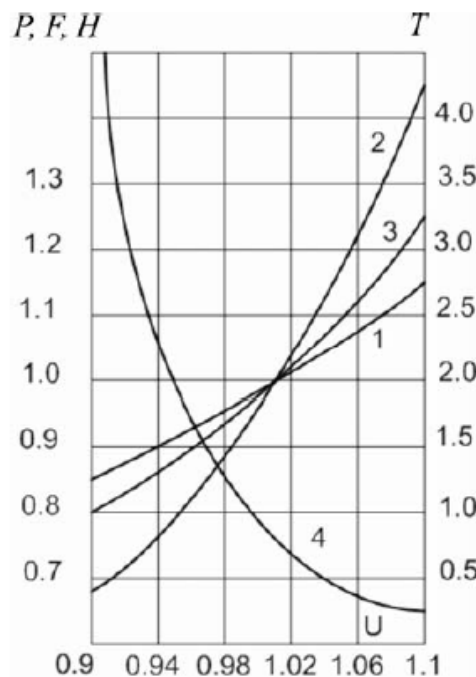


Рисунок 1.2. Залежність характеристик ламп розжарювання від напруги: 1 – споживана потужність; 2 – світловий потік; 3 – світлова

віддача; 4 – термін служби

Так, при напрузі 105 % номінального термін служби скорочується майже 3 рази і становить 350 год замість 1000 год.

При напрузі 95% номінального світлового потоку лампи становить 82,5%.

Зміни напруги призводять до відповідних змін світлового потоку та освітленості, що зрештою впливає на продуктивність праці та стомлюваність людини. Це видно з таких даних [20]:

– освітленість, %: 30 60 100 200 300 600

– продуктивність праці, %: 85 95 100 105 107 109

За 100% освітленості умовно прийнята освітленість 50 лк.

Люмінесцентні лампи. Люмінесцентні лампи менш чутливі до відхилень напруги. При підвищенні напруги споживана потужність і світловий потік збільшуються, а при зниженні – зменшуються, але не настільки, як у ламп розжарювання.

При відхиленні напруги в межах $\pm 1\%$ світловий потік змінюється на $\pm 1\%$, світлова віддача – лише на $\pm 0,5\%$ [8].

Однак при напрузі 93-94% номінального лампа не загоряється, а при напрузі 106-107% номінального перегрівається допоміжна апаратура.

При зниженій напрузі умови запалювання люмінесцентних ламп погіршуються, тому термін їх служби, що визначається розпиленням оксидного покриття електродів, скорочується як при негативних, так і при позитивних відхиленнях напруги.

При відхиленнях напруги на 10% термін служби люмінесцентних ламп у середньому знижується на 20-25%. Істотним недоліком люмінесцентних ламп є споживання ними реактивної потужності, яка зростає зі збільшенням напруги, що їх живить [18].

Ультрафіолетові лампи (еритемні та бактерицидні).

Лампи не запалюються при зниженні напруги на 10% від номінального і більше.

При підвищенні напруги еритемний і бактерицидний потоки ростуть, при

зменшенні – зменшуються.

У межах зміни напруги $\pm 10\%$ його номінального значення світловий потік змінюється приблизно на 2% на кожен відсоток зміни напруги.

Термін служби ламп при номінальній напрузі складає 800-1000 год. При підвищенні напруги термін служби різко скорочується.

Побутова техніка. Відхилення напруги негативно впливають на якість роботи та термін служби побутової електронної техніки (радіоприймачі, телевізори, апарати телефонно-телеграфного зв'язку, комп'ютерна техніка).

Зниження напруги погіршує зображення, підвищення напруги скорочує термін служби деталей телевізорів.

Якщо при підвищенні напруги ланцюгів розжарення електронних ламп температура катода збільшується на 3 %, це призводить до зниження приблизно в 2 рази терміну служби емітуючої поверхні [26].

Нагрівальні побутові прилади (плитки, праски) мало реагують зміну напруги. Однак необхідно враховувати, що їхня потужність змінюється прямо пропорційно квадрату зміни напруги. Наприклад, при напрузі 90 % номінального електрична праска потужністю 400 Вт розвиває потужність 324 Вт.

Вентильні перетворювачі. Вентильні перетворювачі автоматично шляхом фазового керування регулюють постійний струм. У разі підвищення напруги в мережі кут регулювання автоматично збільшується. При зниженні напруги зменшується. Підвищення напруги на 1% призводить до збільшення споживання реактивної потужності перетворювачем приблизно на 1,0-1,4%, що знижує коефіцієнт потужності. У той же час інші показники вентильних перетворювачів з підвищенням напруги покращуються, і тому вигідно підвищувати напругу на їх виводах у межах допустимих значень [7].

Електричні печі. Електричні печі чутливі до відхилень напруги. Так, при зниженні напруги електродугових печей на 7% відбувається подовження процесу плавлення сталі в 15 рази. Підвищення напруги на 5% і вище призводить до перевитрати електроенергії.

Відхилення напруги негативно впливають на роботу електрозварювальних машин. Наприклад, машини точкового зварювання за зміни напруги на 15 % виробляють повністю браковану продукцію [12].

1.2.2. Вплив несиметрії напруги

Несиметрія навантажень викликає несиметрію напруги. Одні однофазні електроприймачі можуть опинитися під підвищеною напругою, інші під зниженим. На виводах трифазних електроприймачів з'являється несиметрична систем напруг. Відхилення напруги у електроприймачів перевантаженої фази можуть перевищити нормально допустимі значення, у той час як відхилення напруги у електроприймачів інших фаз будуть перебувати в межах, що нормуються. При несиметричному режимі роботи мережі суттєво погіршуються умови роботи як самих електроприймачів, так і всіх елементів мережі, знижується надійність роботи електрообладнання та системи електропостачання загалом.

Несиметрія напруг негативно впливає на роботу всіх елементів електричної системи, викликаючи додаткові втрати активної потужності, знижуючи термін служби електроустаткування та економічні показники його роботи [15,17,20].

Розглянемо вплив несиметрії напруг працювати найбільш поширених споживачів.

Асинхронні електродвигуни. При несиметричному режимі особливий вплив на роботу асинхронних електродвигунів надає напруга зворотної послідовності. Опір зворотної послідовності електродвигунів приблизно дорівнює опору загальмованого двигуна і, отже, в 5-8 разів менше опору прямої послідовності. Тому навіть невелика несиметрія напруг викликає значні струми зворотної послідовності. Струми зворотної послідовності накладаються на струми прямої послідовності, створюють протидіючий момент, що обертає, і викликають додатковий нагрівання статора і ротора (особливо масивних частин ротора), а це призводить до прискореного старіння ізоляції електродвигуна, зниження його номінальної потужності

[20]. Термін служби повністю завантаженого асинхронного електродвигуна, що працює при несиметрії напруги 4%, скорочується в 2 рази. При несиметрії напруги 5 % його потужність зменшується на 5–10 % [16].

Синхронні машини. При несиметрії напруг мережі з появою струмів зворотної послідовності в синхронних машинах виникають додаткові втрати активної потужності, відбувається нагрівання статора і ротора, можуть виникнути також небезпечні вібрації в результаті появи знакозмінних крутних моментів і тангенціальних сил, що пульсують з подвійною частотою мережі. При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, особливо за недостатньої міцності та наявності дефектів зварних з'єднань. При несиметрії струмів, що не перевищує 30%, небезпечні перенапруги в елементах конструкцій зазвичай не виникають [16].

Відповідно до Правил технічної експлуатації (ПТЕ) електричних мереж та станцій тривала робота генераторів та синхронних компенсаторів при нерівних струмах фаз допускається, якщо різниця струмів вбирається у 10 % номінального струму статора для турбогенераторів і 20 % – для гідрогенераторов. При цьому струми у фазах не повинні перевищувати номінальних значень. Якщо ці умови не виконуються, необхідно вживати спеціальних заходів щодо зменшення несиметрії.

Електричні мережі. За наявності в мережі несиметрії напруги по проводах ліній електропередачі протікатимуть струми зворотної та нульової послідовності. Це призводить до збільшення сумарних струмів в окремих фазах мережі, і в результаті – до збільшення втрат активної потужності, що може бути неприпустимим щодо нагрівання. Струми нульової послідовності протікають постійно через заземлювачі. При цьому додатково висушується та збільшується опір заземлювальних пристроїв. Це негативно впливає на роботу релейного захисту, низькочастотних установок зв'язку та пристроїв залізничного блокування.

Одним із елементів мережі є трансформатори. При подачі на трансформатор несиметричної напруги під дією складових зворотної та

нульової послідовності відбувається несиметрія вихідної напруги [69]. Несиметрія напруги викликає значне скорочення терміну служби трансформаторів внаслідок перегріву його ізоляції. У разі вибору граничного завантаження трансформатора з умови рівності струму номінальному найбільш завантаженої фази його пропускна здатність у несиметричному режимі роботи зменшується на 42% потужності однофазного еквівалентного навантаження [24].

Конденсаторні установки. Конденсаторні установки при несиметрії напруги нерівномірно завантажуються реактивною потужністю по фазах. Це унеможлиблює повне використання їх встановленої потужності. Крім того, конденсаторні установки в цьому випадку посилюють вже існуючу несиметрію, так як видача реактивної потужності в мережу у фазі з найменшою напругою буде меншою, ніж в інших фазах [23].

Однофазні електроприймачі. Несиметрія напруг суттєво впливає і на однофазні споживачі. Наприклад, лампи розжарювання, підключені до фази з вищою напругою, мають більший світловий потік, але значно менший термін служби порівняно з лампами, підключеними до фази з меншою напругою. Несиметрія напруг ускладнює роботу релейного захисту, веде до помилок під час роботи лічильників електроенергії і т.д..

Несиметрія напруг погіршує роботу перетворювальних пристроїв. Так, якщо при симетричній напрузі струми у всіх вентилях випрямляча однакові за значенням і часом протікання, то при несиметричному режимі окремі його вентиля виявляються недовантаженими, що призводить до зниження потужності випрямляча. Крім того, в цьому випадку в кривих змінної та випрямленої напруги з'являються неканонічні гармоніки та пов'язані з ними небажані резонансні режими [26]. Можлива також поява субгармонік [26].

В умовах несиметрії напруг значною мірою втрачає свою ефективність багатофазне випрямлення з метою зменшення пульсацій випрямленого струму, оскільки амплітуда гармонік подвійної частоти виявляється пропорційною значенню напруги зворотної послідовності.

Несиметричні режими призводять до появи додаткових відхилень освітлювальних і телевізійних приймачів, які дуже чутливі до зміни режиму напруг [23, 26].

Несиметричні режими негативно впливають на роботу інверторів, зменшують стійкість систем і міжсистемних зв'язків, призводять до помилок при підрахунку електроенергії [18]. Так, у разі амплітудно-фазової несиметрії напруги та струмів похибка вимірювань у індукційних лічильників може досягати 33 % [23].

1.2.3. Вплив несинусоїдності напруги

Споживачі з нелінійними вольтамперними характеристиками, підключені до мережі із синусоїдальною напругою, споживають несинусоїдальні струми. Ці струми, проходячи елементами мережі, створюють падіння напруги в опорах цих елементів і, накладаючись на основну синусоїду напруги, призводять до спотворень форми кривої напруги. У зв'язку з цим споживачі з нелінійною вольтамперною характеристикою називають джерелами найвищих гармонік.

Найбільш серйозні порушення якості електроенергії в електричній мережі мають місце при роботі потужних керованих вентильних перетворювачів, електродугових сталеплавильних та рудотермічних печей, установок дугового та контактного зварювання газорозрядних ламп, трансформаторів.

Вентильні перетворювачі залежно від схеми випрямлення генерують у мережу гармоніки струму: при 6-фазній схемі – до 19-го порядку; за 12-фазної схеми – до 25-го порядку включно [15,19].

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги у мережах з електродуговими сталеплавильними та рудотермічними печами визначається в основному 2, 3, 4, 5, 7-й гармоніками.

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги установок дугового та контактного зварювання визначається в основному 5, 7, 11, 13-й

гармоніками.

Струм 3-ї гармоніки газорозрядних ламп становить 10 % струму 1-ї гармоніки, 5-ї гармоніки – 3%. Ці струми збігаються по фазі у відповідних лінійних проводах мережі і, складаючись у нульовому проводі мережі 380/220, обумовлюють струм у ньому, майже рівний струму у фазному проводі. Решту гармоніків для газорозрядних ламп можна знехтувати [17].

Вищі гармоніки струму і напруги викликають додаткові втрати активної потужності у всіх елементах системи електропостачання: лініях електропередачі, трансформаторах, електричних машинах, статичних конденсаторах, оскільки опори цих елементів залежать від частоти.

Гармоніки струму в лініях електропередач призводять до додаткових втрат електроенергії та напруги, що погіршують характеристики ізоляції кабелів [17, 18]. Додаткові втрати в кабелях викликаються збільшенням діючого значення негармонічного струму, збільшенням активного опору провідника через поверхневий ефект, збільшення втрат в діелектриці ізоляції кабелю. Вони призводять до підвищення температури провідників та прискореного старіння ізоляції. Явище нагрівання поверхневого шару провідника мізерно при частоті 50 Гц, але вже стає значним при частоті 350 Гц (7-я гармоніка) і вище [17]. Активний і ємнісний опір, що збільшується в міру зростання частоти, призводить до падіння і ще більшого спотворення напруги. Струми витоку силового кабелю, що працює при рівні гармонік у кривій напругі 6,0–8,5 %, виявилися через 2,5 роки експлуатації на 36 % більше, а через 3,5 року – на 43 % більше у порівнянні з кабелем, який працював при синусоїдальній напрузі [23]. При значних складових вищих гармонік у кабельних мережах частіше виникають короткі однофазні замикання. При цьому знижується ефективність роботи дугогасних апаратів. Навіть при резонансному їх налаштуванні однофазні короткі замикання часто переходять у двофазні та трифазні (внаслідок пропалювання кабелю), тому що через місце ушкодження протікають великі струми вищих гармонік і ушкодження не самоліквідується. Вищі гармоніки призводять до підвищення

аварійності у кабельних мережах, збільшенню числа необхідних ремонтів та збільшенню витрат на експлуатацію. Дослідження показали, що при рівні гармонік 5-10% амортизаційні відрахування та вартість поточних ремонтів кабельних ліній зростають на 15-20%, а при рівні гармонік 10-25% - на 30% і більше [20].

Вищі гармоніки викликають у трансформаторах додаткові втрати на гістерезис та вихрові струми в магнітопроводі, а також додаткові втрати в обмотках, зумовлені збільшенням активного опору обмотки зі зростанням частоти струму [6]. Крім того, високочастотні гармоніки є причиною появи вихрових струмів в обмотках трансформатора, що також спричиняє додаткові втрати потужності. Додаткові втрати викликають додаткове нагрівання та зменшення терміну служби трансформатора. При навантаженнях, близьких до максимального, додаткові втрати можуть призвести до виходу трансформатора з ладу внаслідок перегріву та прогару ізоляції обмоток [25]. У трансформаторах, дроселях та інших електромагнітних елементах вищі гармоніки струму, створюючи електродинамічні зусилля, викликають додаткові акустичні шуми [16].

Дослідження кривої струму намагнічування трансформаторів, включених у мережу синусоїдальної напруги, показали, що при тристрижневому осердю та з'єднаннях обмоток «зірка-зірка-нуль» і «трикутник-зірка-нуль» в електричній мережі є всі непарні гармоніки, у тому числі гармоніки, кратні трьом. Гармоніки, кратні трьом, обумовлені несиметрією струмів, що намагнічують, по фазах.

Струми намагнічування утворюють системи струмів прямої та зворотної послідовності, які за абсолютною величиною однакові для гармонік, кратних трьом. Для інших непарних гармонік струми зворотної послідовності складають близько 0,25 струмів прямої послідовності. Якщо на введення трансформаторів подається несинусоїдальна напруга, виникають додаткові складові вищих гармонік струму.

У цілому нині несинусоїдальні режими мають ті ж недоліки, що й

несиметричні.

Якщо конденсатори, що встановлюються для компенсації реактивної потужності, працюють при напрузі з підвищеною частотою їхній опір зменшується. Тому, за наявності в напрузі мережі живлення вищих гармонік, опір конденсаторів на цих гармоніках виявляється значно нижчим, ніж на частоті 50 Гц, через що в конденсаторах, призначених для компенсації реактивної потужності, навіть невелика напруга вищих гармонік можуть викликати значні струми гармонік. На підприємствах з великою питомою вагою нелінійних навантажень батареї конденсаторів працюють незадовільно: вони відключаються захистом від перевантаження струмом або за короткий термін виходять з ладу через спучування банок (або прискореного старіння ізоляції) [17].

Вищі гармоніки викликають у синхронних та асинхронних двигунах паразитні поля та електромагнітні моменти, що погіршують їх механічні характеристики та ККД.

Внаслідок незворотних фізико-хімічних процесів, що протікають під впливом полів вищих гармонік, а також підвищеного нагріву струмопровідних частин спостерігається прискорене старіння ізоляції електричних машин, трансформаторів, кабелів; відбувається погіршення коефіцієнта потужності електроприймачів; порушується робота пристроїв автоматики, телемеханіки, комп'ютерної техніки та інших пристроїв із елементами електроніки; виникають похибки вимірів індукційних лічильників електроенергії, порушується робота самих вентильних перетворювачів [6].

Наявність вищих гармонік несприятливо позначається на роботі як електрообладнання споживачів, а й електронних пристроїв у самих енергосистемах.

Слід зазначити, що у умовах роботи споживачів електроенергії несинусоїдність напруги проявляється спільно з діями інших факторів, що впливають, і тому слід розглядати всю сукупність факторів.

Наявність вищих гармонік у напрузі живлення асинхронних електродвигунів є причиною виникнення вищих гармонік струму та складових вищих гармонік у магнітному потоці, які наводять гармоніки ЕРС і, як наслідок цього, в обмотках ротора з'являються вищі гармоніки струму [11]. Ці гармоніки взаємодіють з основним магнітним потоком, створюючи додаткові механічні моменти на валу електричної машини (наприклад, 5-я гармоніка створює магнітне поле, що обертається протилежно магнітному полю 1-ї гармоніки, а 7-я - не синхронно обертається) [11]. В результаті створюються гармонійні пульсації крутного моменту на валу двигуна, які викликають підвищені навантаження та знос підшипників. В екстремальних випадках може виникнути вібрація на резонансній частоті оберткової маси ротора, що призводить до накопичення втоми металу та можливого розриву валу ротора електродвигуна [16]. Вищі гармоніки викликають перегрів асинхронних електродвигунів, зумовлений додатковими втратами внаслідок ефекту збільшення активного опору обмоток зі зростанням частоти струму та підвищенням втрат на гістерезис та вихрові струми у магнітопроводі [4]. Крім того, через значну різницю у швидкостях оберткових магнітних полів, створюваних вищими гармоніками, та швидкістю обертання ротора виникають додаткові втрати у демпферних обмотках ротора [16]. Всі ці додаткові втрати призводять до підвищення загальної температури машини та до місцевих перегрівів, найбільш ймовірних у роторі. [16,23]. Це спричиняє зниження терміну служби ізоляції машин.

Вищі гармоніки струму та напруги погіршують умови комутації машин постійного струму, порушують рівномірність обертання ротора синхронного двигуна.

Вищі гармоніки напруги та струму ускладнюють компенсацію реактивної потужності за допомогою батарей конденсаторів, оскільки можуть спостерігатися резонансні явища на частотах вищих гармонік, що призводить до виходу з ладу конденсаторів. Наявність найвищих гармонік знижує термін

служби конденсаторів. Це з додатковим нагріванням ізоляції під час протікання струмів вищих гармонік і прискоренням під впливом підвищеної частоти фізико-хімічних процесів у діелектриках, що зумовлюють її старіння [26]. З усіх видів електрообладнання конденсатори є найчутливішими до дії вищих гармонік.

Вищі гармоніки несприятливо впливають працювати пристроїв контролю, автоматики, телемеханіки, зв'язку. При несинусоїдальних режимах облік електроенергії пов'язаний зі значними похибками, які залежать від вимірювальної системи лічильника, частотної характеристики, місця установки. Індукційні лічильники мають негативні частотні похибки, що викликає недооблік витрати електроенергії [23]. Електронні та цифрові лічильники мають позитивну частотну похибку, тому в мережах із нелінійними навантаженнями має місце переоблік електроенергії [23]. Спостерігаються збої у роботі та вихід з ладу комп'ютерного обладнання. Коли телекомунікаційні чи керуючі мережі проходять поблизу силових мереж, якими протікають струми вищих гармонік, у яких можуть наводитися перешкоди та спотворення інформаційного сигналу [4].

Вищі гармоніки викликають хибне спрацювання запобіжників та автоматичних вимикачів через їх внутрішнього додаткового нагріву за рахунок явищ поверхневого ефекту та ефекту близькості [12].

Вищі гармоніки напруги та струму можуть викликати спотворення зображення та зміну яскравості телевізорів [8].

У світильниках із газорозрядними лампами, укомплектованими баластними пристроями, що містять конденсатори, при певних умовах може виникнути резонанс, що призводить до виходу ламп з ладу [8].

Висновки по першому питанню

Наявність вищих гармонік несприятливо позначається на роботі як електрообладнання споживачів, а й електронних пристроїв у самих енергосистемах.

РОЗДІЛ 2

ОЦІНКА ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ, ЗВ'ЯЗАНИХ З НЕСИМЕТРІЄЮ І НЕСИНУСОЇДНІСТЮ ФАЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Існує безліч методів розрахунку втрат активної потужності в електричних мережах, пов'язаних з несинусоїдністю та несиметрією фазних струмів. Однак всі вони дозволяють розрахувати втрати активної потужності тільки в електричній мережі з лінійним несиметричним або нелінійним симетричним навантаженням окремо.

Для оцінки втрат потужності, пов'язаних з несиметрією та несинусоїдністю фазних навантажень були розглянуті існуючі методи розрахунку та запропоновано новий метод, що враховує як вплив несиметрії, так і несинусоїдності навантаження.

2.1 Аналіз існуючих методів розрахунку втрат активної потужності у кабельній розподільній мережі 0.4 кВ

У методі, представлений у [24], пропонується оцінити втрати потужності за виразом:

$$\Delta P_{\Sigma v} = 3 \sum_{v=1}^n I_v^2 \cdot R_l \cdot k_{lv} , \quad (2.1)$$

де v – номер гармоніки;

I_v - струм v -тої гармонійної складової;

R_l - довжина ділянки мережі;

$k_{lv} = 0,47\sqrt{v}$ - коефіцієнт зміни активного опору струмопровідних частин на v -тій гармоніці.

З виразу 2.1 випливає, що даний метод застосовний тільки до симетричних

мережам з нелінійним навантаженням та для кабелів усіх можливих перерізів, причому втрати при цьому в нульовому робочому провіднику не враховуються.

В основі іншого методу лежить вираз (2.2).

$$\Delta P_{\Sigma v} = 3r_0 l \sum_{v=1}^n I_v^2 \cdot (k_{lv} + k_{ov}) , \quad (2.2)$$

де $k_{lv} = 0.021\sqrt{f}$ - коефіцієнт, що враховує вплив поверхневого ефекту;

$k_{ov} = \frac{1,18 + k_{lv}}{0,27 + k_{lv}} \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2$ - коефіцієнт, що враховує ефект близькості

провідників у лінії електропередачі;

r_0 - питомий опір провідника постійного струму (з урахуванням температури), Ом/м;

l - довжина ділянки ланцюга, м;

f - частота v -тої гармоніки, Гц;

d - діаметр жили провідника, мм;

a - відстань між центрами жил, мм.

Формула (2.2) як і (2.1) варта для розрахунку симетричних нелінійних ланцюгів. Однак у цих формулах, крім гармонік, також враховується переріз провідника та розташування струмопровідних жил однієї щодо одної.

У таблиці 2.1 для прикладу наведені кількісні порівняння які підвищують коефіцієнти для кожної з гармонік за першою та другою методиками розрахунку для перерізу кабелю 16 та 35 мм².

З таблиці 2.1 випливає, що при розрахунку за різними методами, коефіцієнти приймають різні значення, і необхідно визначитися з вибором або розробити новий метод, відповідальний вимогам точності (наприклад, згідно вимогам ДСТУ EN 62053-22:2018 «Засоби вимірювання електричної енергії змінного струму. Спеціальні вимоги. Частина 22. Лічильники активної енергії статичні (класи точності 0,2 S та 0,5 S) (EN 62053-22:2003; A1:2017, IDT; IEC 62053-22:2003; A1:2016, IDT)», похибка вимірювання енергії не повинна перевищувати 2 % і 3 % для лічильників класів точності 1 та 2 відповідно) [4].

Таблиця 2.1 - Підвищуючі коефіцієнти для різних методів розрахунку

Номер гармоніки		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Метод 1		0,66	0,81	0,94	1,05	1,15	1,24	1,33	1,41	1,49
Метод 2	35	1,27	1,26	1,25	1,25	1,26	1,26	1,27	1,28	1,29
	16	1,43	1,41	1,4	1,39	1,39	1,39	1,4	1,4	1,41
Номер гармоніки		11	12	13	14	15	16	17	18	19
Метод 1		1,56	1,63	1,69	1,76	1,82	1,88	1,94	1,99	2,05
Метод 2	35	1,3	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,38
	16	1,42	1,43	1,43	1,44	1,45	1,46	1,47	1,48	1,49
Номер гармоніки		20	21	22	23	24	25	26	27	28
Метод 1		2,1	2,15	2,2	2,25	2,3	2,35	2,4	2,44	2,49
Метод 2	35	1,39	1,4	1,41	1,42	1,43	1,44	1,45	1,46	1,47
	16	1,5	1,51	1,52	1,52	1,53	1,54	1,55	1,56	1,57
Номер гармоніки		29	30	31	32	33	34	35	36	37
Метод 1		2,53	2,57	2,62	2,66	2,7	2,74	2,78	2,82	2,86
Метод 2	35	1,48	1,49	1,5	1,51	1,52	1,53	1,54	1,55	1,55
	16	1,58	1,59	1,6	1,61	1,62	1,63	1,63	1,64	1,65
Номер гармоніки		38	39	40						
Метод 1		2,9	2,94	2,97						
Метод 2	35	1,56	1,57	1,58						
	16	1,66	1,67	1,68						

$$\Delta P_i = k_{ui} \cdot I_{ei}^2 \cdot r_{ei} \cdot k_{di} , \quad (2.3)$$

де k_{ui} – коефіцієнт, що враховує кількість фаз схеми на ділянці мережі;

I_{ei} - ефективний струм на ділянці мережі (діюче значення струму);

r_{ei} - активний опір ділянки мережі;

$k_{\text{Ді}}$ - коефіцієнт, що враховує додаткові втрати від нерівномірності навантаження фаз;

$$k_{\text{Ді}} = N^2 \left(1 + 1,5 \frac{r_{\text{HT}}}{r_{\phi}} \right) - 1,5 \frac{r_{\text{HT}}}{r_{\phi}}, \quad (2.4)$$

де r_{HT} , r_{ϕ} - опору нульового робочого та фазного провідника;

$$N^2 = 3 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{(I_A + I_B + I_C)^2} - \text{коефіцієнт нерівномірності.}$$

Вираз (2.3) дозволяє розрахувати додаткові втрати у нульовому робочому провіднику. Однак визначаються вони тільки чинним значенням струму нульового робочого провідника і не враховують можливу зміну опору нульового робочого провідника частоти гармонійних струмів.

У роботі запропоновано новий метод розрахунку, що враховує вплив як несиметрії, так і несинусоїдності на втрати активної потужності в низьковольтних трифазних мережах з нульовим робочим провідником, а саме:

1. Втрати у фазах

Втрати активної потужності у фазі А:

$$\Delta P_A = r_{\text{оф}} \cdot l_A \cdot \sum_{\nu=2}^n I_{\text{VA}}^2 \cdot (k_{\text{Пv}} + k_{\text{бvф}}), \quad (2.5)$$

де $k_{\text{Пv}} = 0,021\sqrt{f}$ - коефіцієнт, що враховує вплив поверхневого ефекту;

$$k_{\text{бvф}} = \frac{1,18 + k_{\text{Пv}}}{0,27 + k_{\text{Пv}}} \left(\frac{d_{\phi}}{a} \right)^2 - \text{коефіцієнт, що враховує ефект близькості фазних}$$

провідників у лінії електропередачі;

$r_{\text{оф}}$ - питомий опір фазного провідника постійного струму (з обліком температури), Ом/м;

l_A - довжина ділянки ланцюга фази А, м;

f - частота ν -тої гармоніки, Гц;

d_{ϕ} - діаметр жили фазного провідника, мм;

a - середня відстань між центрами жил, мм;

I_A - струм ν -тої гармоніки фази А.

Для визначення середньої відстані між центрами жил у чотирижильному кабелі на рисунку 2.1 наведено можливі відстані між центрами жил [106].

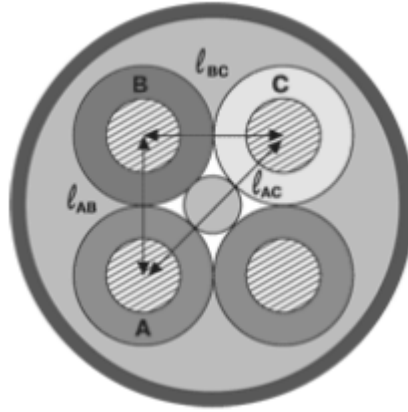


Рисунок 2.1 – Схема чотирижильного кабелю

Тоді $a = \sqrt[6]{l_{AB} \cdot l_{AC} \cdot l_{BC} \cdot l_{A0} \cdot l_{B0} \cdot l_{C0}}$,

де $l_{AB}, l_{BC}, l_{AC}, l_{A0}, l_{B0}, l_{C0}$ - відстань між відповідними жилами кабелю.

Втрати активної потужності у фазі В:

$$\Delta P_B = r_{of} \cdot l_B \cdot \sum_{\nu=2}^n I_{\nu B}^2 \cdot (k_{\Pi\nu} + k_{\delta\nu\phi}), \quad (2.7)$$

де l_B - довжина ділянки ланцюга фази В, м;

В $I_{\nu B}$ - струм ν -тої гармоніки фази В.

Втрати активної потужності у фазі С:

$$\Delta P_C = r_{of} \cdot l_C \cdot \sum_{\nu=2}^n I_{\nu C}^2 \cdot (k_{\Pi\nu} + k_{\delta\nu\phi}), \quad (2.8)$$

де l_C - довжина ділянки ланцюга фази С, м;

С $I_{\nu C}$ - струм ν -тої гармоніки фази С.

Втрати активної потужності в нульовому робочому провіднику:

$$\Delta P_0 = r_{on} \cdot l_0 \cdot \sum_{\nu=2}^n I_{\nu 0}^2 \cdot (k_{\Pi\nu} + k_{\delta\nu\phi}), \quad (2.9)$$

$k_{\delta\nu 0} = \frac{1,18 + k_{\Pi\nu}}{0,27 + k_{\Pi\nu}} \left(\frac{d_0}{a} \right)^2$ - коефіцієнт, що враховує ефект близькості фазних

провідників у лінії електропередачі;

r_0 - питомий опір нульового робочого провідника постійному струму (з урахуванням температури) Ом/м;

l_0 - довжина ділянки ланцюга нульового робочого провідника, м;

d_0 – діаметр жили нульового робочого провідника, мм;

I_{v0} - струм v -тої гармоніки нульового робочого провідника.

Тоді сумарні втрати активної потужності у трифазній мережі з нелінійним та несиметричним навантаженням можна визначити за виразом:

$$\Delta P_{\Sigma v} = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C + \Delta P_0. \quad (3.10)$$

Для прикладу оцінка втрат від несиметрії до трифазної

чотирипровідна мережа проводилася за умови сталості потужності навантаження, значення коефіцієнта потужності 0.8 для ділянки ланцюга довжиною 100 м з перерізом мідного кабелю 35 мм².

Розрахунок проводився за умови симетричної мережі з фіксованим нелінійним навантаженням. Після чого навантаження змінює свій характер – стає більш несиметричним.

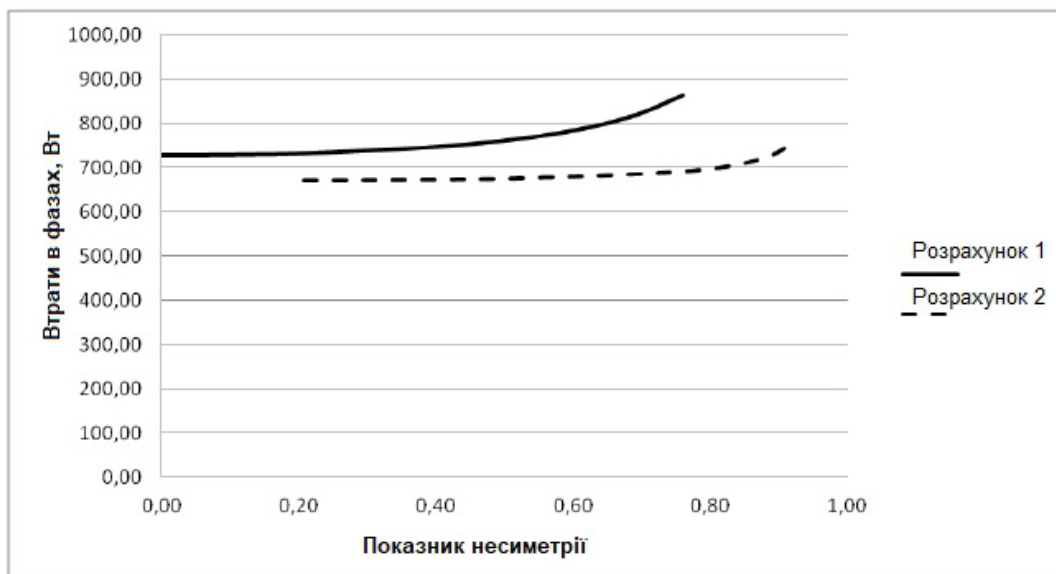


Рисунок 2.2 – Залежність втрат у фазних проводах від показника несиметрії

Розрахунок 1 проводився за умови значної частки струмів гармонік, кратних 3, у складі фазних струмів (28%).

Розрахунок 2 проводився при 5-15% частці струмів гармонік, кратних 3, у складі фазних струмів залежно від фази.

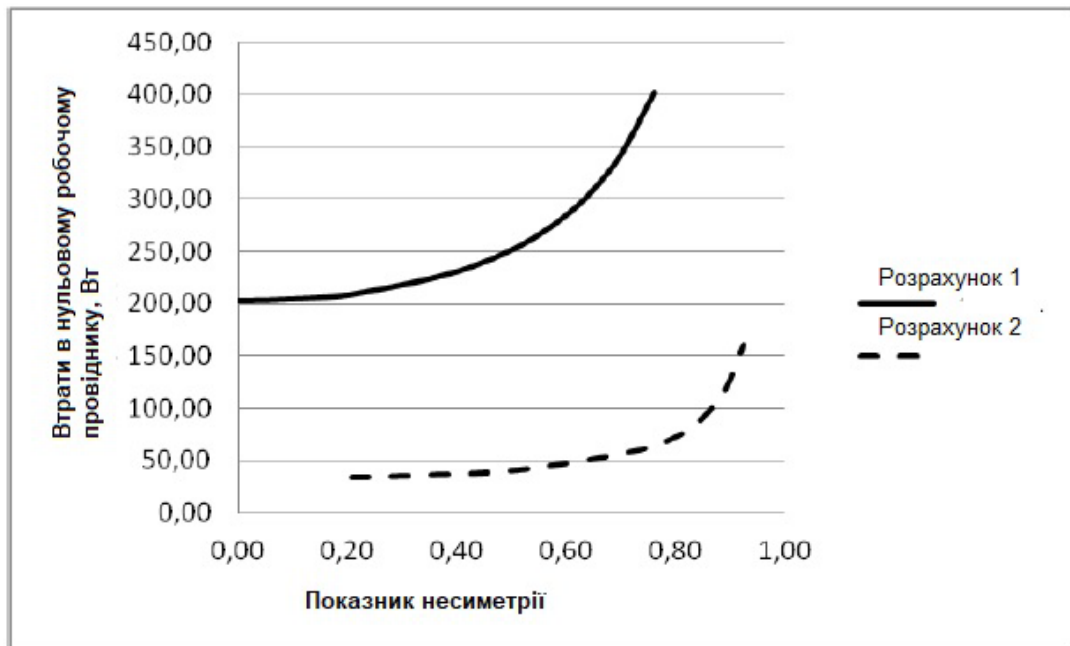


Рисунок 2.3 – Залежність втрат у нульовому робочому провіднику від показника несиметрії

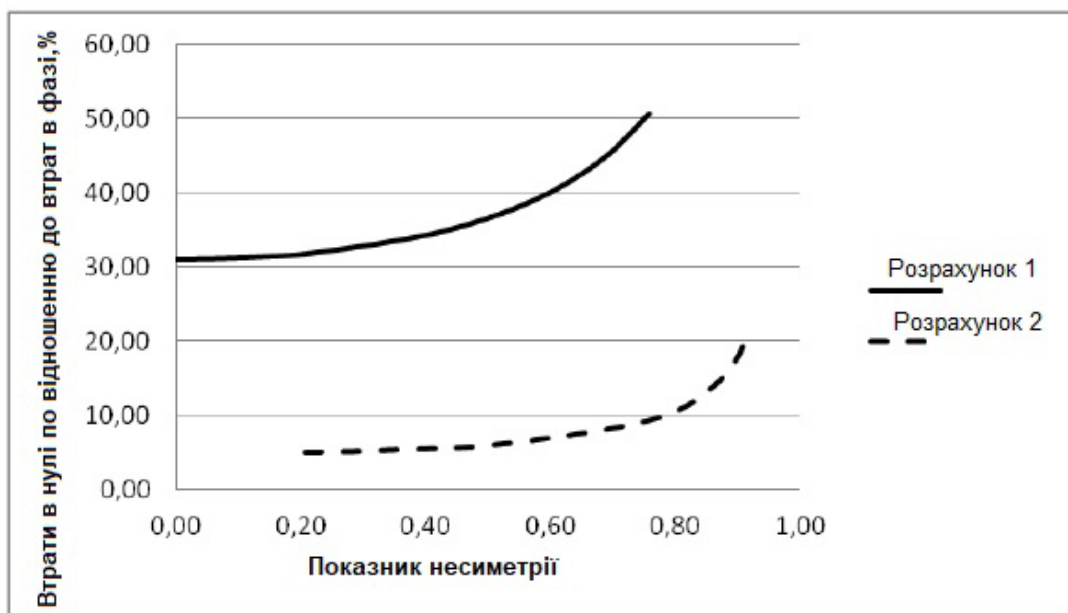


Рисунок 2.4 – Залежність відношення втрат у нульовому робочому провіднику до втрат у фазах від показника несиметрії

Для прикладу оцінки втрат від несинусоїдності трифазної чотирипровідної мережі проводилася за умови сталості потужності

навантаження, значення коефіцієнта потужності 0.8 для ділянки ланцюга довжиною 100 м з перерізом мідного кабелю 35 мм².

Розрахунок проводився за умови зміни нелінійної складової навантаження мережі з фіксованим несиметричним навантаженням.

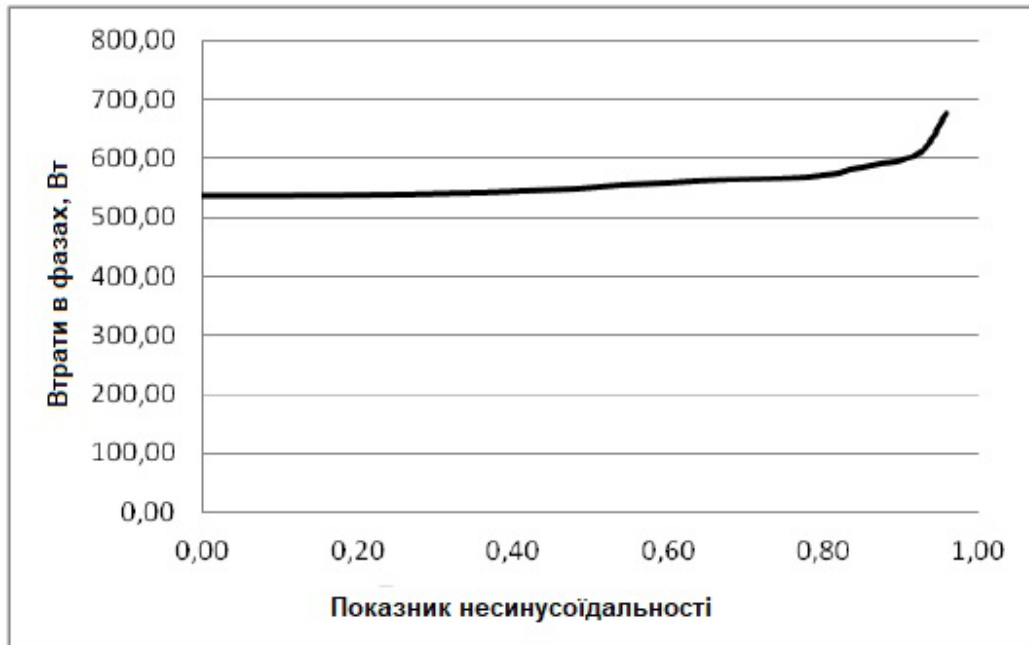
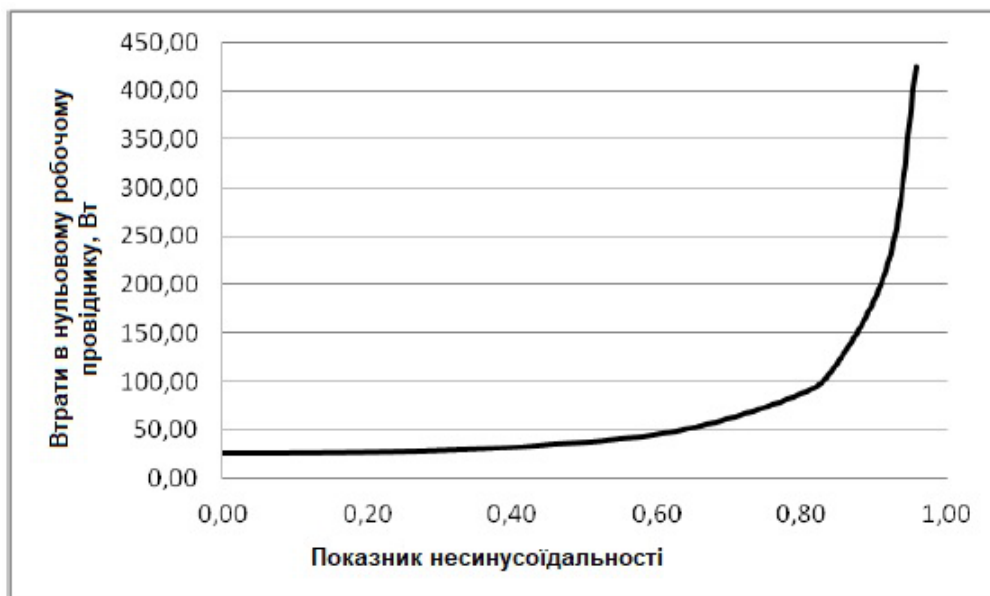


Рисунок 2.5 – Залежність втрат у фазних проводах від показника несинусоїдальності



З аналізу кривих на рисунках 2.5 і 2.6 випливає, що зі збільшенням частки струмів третьої гармоніки у складі фазних струмів втрати збільшилися лише на 26%, тоді як втрати в нульовому робочому провіднику зросли практично в 15 разів, що пояснюється різким зростанням струмів гармонік, кратних трьом, у нульовому робочому провіднику.

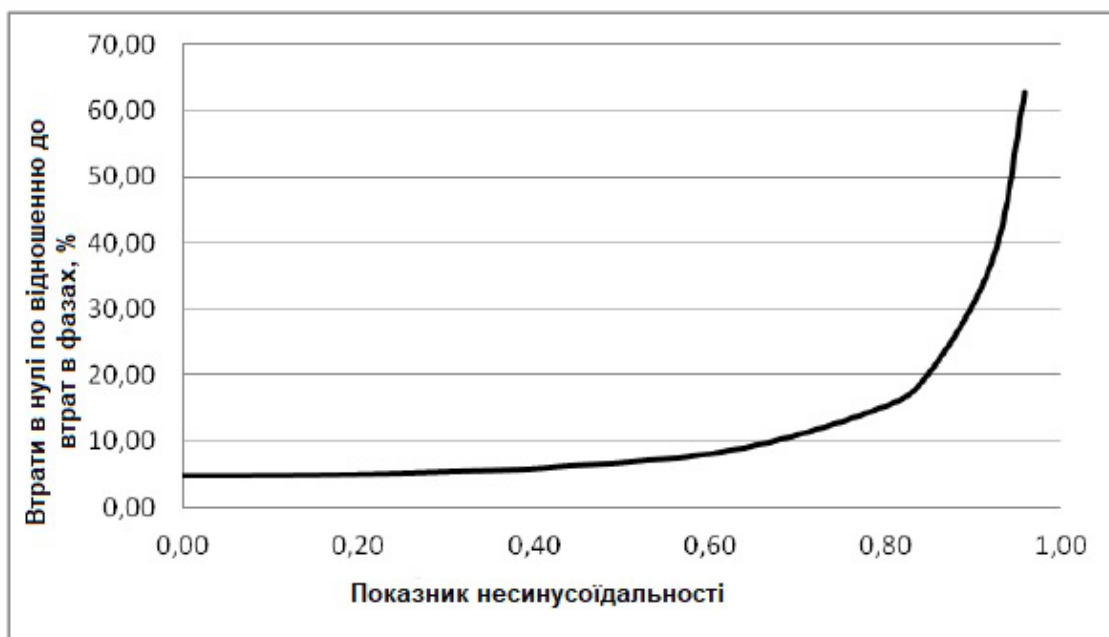


Рисунок 2.7 – Залежність відношення втрат у нульовому робочому провіднику до втрат у фазах від показника несинусоїдальності

З аналізу кривих рисунку 2.7 можна дійти невтішного висновку у тому, що необхідно враховувати втрати потужності в нульовому робочому провіднику, оскільки можуть досягати значень втрат у кожній з фаз окремо і перевищувати їх.

Метод розрахунку втрат активної потужності в провідниках полягає в тому, що крім втрат активної потужності на основній гармоніці враховуються також і підвищують коефіцієнти втрат на вищих гармоніках як фазних, так і в нульовому робочому провіднику.

Порівнюючи розроблений метод оцінки втрат з методом, що враховує лише несиметрію фазних струмів, можна дійти невтішного висновку у тому, що характер зростання сумарних втрат у мережі зі збільшенням частки несиметрії обох методів розрахунку однаковий.

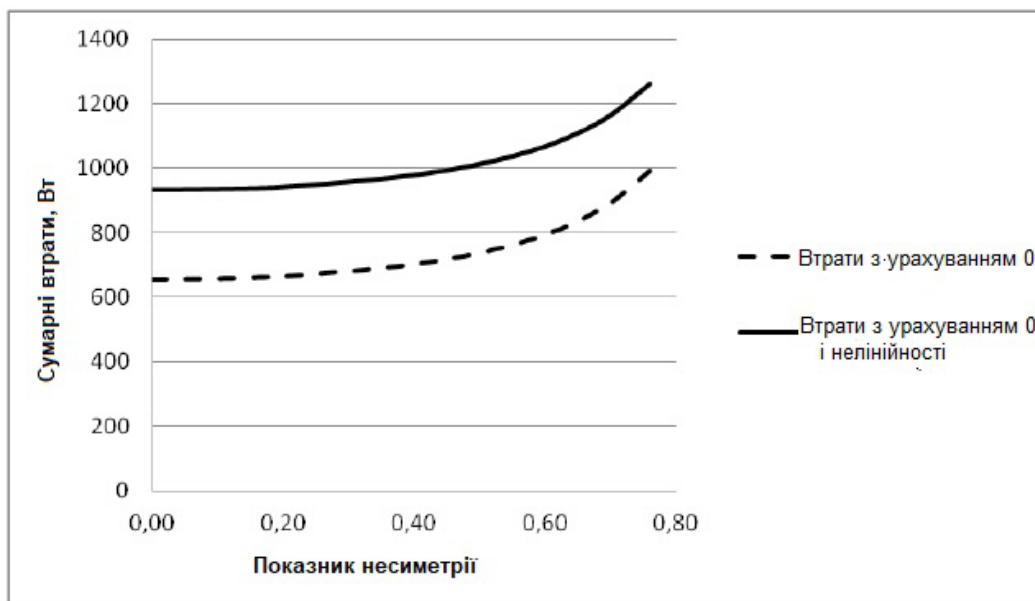


Рисунок 2.8 - Залежність сумарних втрат на ділянці мережі від показника несиметрії

Однак запропонований метод розрахунку також враховує і складову нелінійності, яка вносить додаткову постійну складову та в сумарні втрати активної потужності в мережі, що раніше ніким не враховувалося.

2.2 Розрахунку втрат активної потужності в електричних машинах

Додаткові втрати в електричних машинах поділяються на основні та додаткові [16].

Основні втрати обумовлені основними електромагнітними і механічними процесами, що відбуваються в машині. До цих втрат відносяться втрати в міді обмоток та в активній сталі від основного потоку потужності, а також механічні втрати.

Розглянемо спочатку режим несиметрії живильної напруги синхронних машин. При цьому нехтуємо втратами у статорі від несиметрії напруги, оскільки вони незначні порівняно з втратами у роторній обмотці. Додаткові втрати активної потужності в роторі синхронної машини, обумовлені перебігом струму зворотної послідовності, згідно з [16], обчислюються за формулою

$$\Delta P_{\text{несим}} = \frac{2(r_2 - r_{cm})}{z_{2cm}^2 \cdot \cos \varphi} \cdot \varepsilon_u^2, \quad (2.11)$$

де ε_u^2 - коефіцієнт несиметрії напруги, рівний відношенню напруги зворотної послідовності до номінальної;

r_2 і r_{cm} - відповідно активний опір зворотної послідовності та активний опір якоря синхронної машини;

z_{2cm} - модуль опору зворотної послідовності у відносних одиницях.

Метод визначення додаткових втрат від вищих гармонік $\Delta P_{\Sigma v}$ по кривих, на яких представлені відносини втрат ΔP_{dv} при напрузі, що дорівнює 1% напруги основної частоти, до сумарних номінальних втрат $\Delta P_{ном}$, досить простий у використанні [7]. малі, і ними можна знехтувати. Це справедливо для тих систем, у яких амплітуда напруги вищих гармонік зменшується при збільшенні порядку вищих гармонік. Однак за наявності в системі потужних джерел струму вищих гармонік або резонансних умов на гармоніках вищого порядку (аж до 40-ї) можуть спостерігатися дуже великі значення гармонік напруги з порядком вище 13 [13].

Інший метод, запропонований у [13], дозволяє оцінити додаткові втрати в синхронних двигунах від вищих гармонік $\Delta P_{\Sigma v}$

$$\Delta P_{\Sigma v} = \sum_{v=2}^n \Delta P_{M(v)} + \sum_{v=2}^n \Delta P_{cm(v)} + \sum_{v=2}^n \Delta P_{m(v)}, \quad (2.12)$$

де $\sum_{v=2}^n \Delta P_{M(v)}$ - додаткові втрати в міді;

$\sum_{v=2}^n \Delta P_{cm(v)}$ - додаткові втрати в сталі;

$\sum_{v=2}^n \Delta P_{m(v)}$ - потужність, що йде на подолання гальмівного моменту.

Додаткові втрати у міді визначаються як [13]

$$\sum_{v=2}^n \Delta P_{M(v)} = I_{\Pi}^2 \cdot \Delta P_{\kappa} \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right) \frac{\sqrt{v} + k' \sqrt{v \pm 1}}{v^2}, \quad (2.13)$$

де I_{Π} - кратність пускового струму при номінальній напрузі основної частоти;

ΔP_{κ} - втрати короткого замикання;

U_v - діючі значення v -ї гармоніки;

$k' = \frac{R'_{2e}}{R_1}$ - відношення еквівалентного опору ротора до опору статора.

Знак «+» у підкореному вираженні відповідає симетричним складникам гармонік, що обертається проти обертання поля основної гармоніки, знак «-» - симетричним складовим гармонік, що створюють поля, обертання яких збігається з обертанням поля основної гармоніки.

Додаткові втрати сталі визначаються [13]

$$\sum_{v=2}^n \Delta P_{ст(v)} = \Delta P_{ст.ном} \sum \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \frac{1}{v^{0,7}}, \quad (2.14)$$

де $\Delta P_{ст.ном}$ - номінальні втрати в сталі двигуна при номінальній напрузі.

Потужність для подолання гальмівного моменту [13]:

$$\sum_{v=2}^n \Delta P_{m(v)} = \Delta P_{ном} \sum \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \frac{M_{\Pi}}{M_{ном}} \frac{1}{v^2 \cdot \sqrt{v \pm 1}}, \quad (2.15)$$

де M_{Π} та $M_{ном}$ — пусковий та номінальний моменти синхронного двигуна.

Додаткові втрати для асинхронних двигунів, зумовлені несинусоїдальністю і несиметрією напруги живлення визначаються з виразу [13, 16]:

$$\Delta P = I_{\Pi}^2 \cdot \Delta P_{м1.ном} \left(2,41 \varepsilon_u^2 + \sum_{v=2}^n \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \left(\frac{\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}}{v^2} \right) \right), \quad (2.16)$$

де $\Delta P_{м1.ном}$ - втрати в міді статора при номінальному струмі основної частоти; знак «+» під знаком кореня відповідає симетричним складникам

гармонік, що створює поля обертання, зустрічні поля основної гармоніки, а знак "-" - попутні.

Застосування цієї формули для розрахунку додаткових результуючих втрат активної потужності в системах електропостачання з великою кількістю АД утруднено [13]. У зв'язку з цим доцільно отримати простіший вираз для таких розрахунків. Коефіцієнт k_{AD} , що враховує параметри АД визначається за виразом [16]

$$k_{AD} = \frac{\Delta P_{M1.ном} I_{II}^2}{P_{ном}}, \quad (2.17)$$

де $P_{ном}$ - номінальна активна потужність двигуна.

Відомо [16], що втрати у міді і струм у статорі АД перебувають за виразами

$$\Delta P_{M1.ном} = m_1 I_1^2 R_1, \quad (2.18)$$

$$I_1 = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U_{ном}}, \quad (2.19)$$

де m_1 -число фаз; R_1 - активний опір статорної обмотки, на основній частоті Ом; η - ККД двигуна; $\cos \varphi$ - номінальний коефіцієнт потужності.

З урахуванням (2.18) і (2.19) вираз (2.17) набуде вигляду

$$k_{AD} = \frac{r_1 \cdot I_{II}^2}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (2.20)$$

де r_1 - активний опір статора, на основній частоті, в.о.

Використовуючи (2.16) і (2.20), отримуємо вираз для розрахунку додаткових втрат від несиметрії та несинусоїдності в асинхронних двигунах

$$\Delta P = k_{AD} \cdot P_{ном} \left(2,41 \varepsilon_u^2 + \sum_{v=2}^n \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \left(\frac{\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}}{v^2} \right) \right). \quad (2.21)$$

2.3 Розрахунку втрат активної потужності в трансформаторах

Додаткові втрати активної потужності в силових трансформаторах у несиметричному режимі можна визначити за такою формулою [11]:

$$\Delta P_{несим} = \varepsilon_u^2 \left(\Delta P_{x.x.} + \frac{\Delta P_{к.з.}}{u_{к.з.}^2} \right). \quad (2.22)$$

Втрати активної потужності від струмів вищих гармонік у трансформаторах виражаються найпростішою формулою [7]

$$\Delta P_{\Sigma v} = 3 \sum_{v=2}^n I_v^2 \cdot R_{\kappa 1} \cdot k_{vm}, \quad (2.23)$$

де I_v - струм v -ї гармоніки, гармоніки, що проходить через трансформатор;

$R_{\kappa 1}$ - опір короткого замикання трансформатора на основній частоті;

k_{vm} -коефіцієнт враховує збільшення опору короткого замикання для вищих гармонік внаслідок впливу поверхневого ефекту та ефекту близькості. Для силових трансформаторів можна прийняти $k_{5m}=2,1$; $k_{7m}=2,5$; $k_{11m}=3,2$; $k_{13m}=3,7$ [15].

Втрати на частотах гармонік вище 13-ї дуже малі, і їх можна знехтувати [7]. Не завжди амплітуда напруги вищих гармонік зменшується зі збільшенням порядку вищих гармонік, у системах із потужними джерелами струму вищих гармонік чи з резонансними умовами на гармоніках вищого порядку (аж до 40-ї) можуть спостерігатися дуже великі значення гармонік напруги з порядком вище 13-го [13]. Зважаючи на наявність недоліків методики [7], зумовлених застосуванням коефіцієнтів k_{vm} , що не дозволяють врахувати весь ряд гармонік, для розрахунку додаткових втрат від вищих гармонік у силових трансформаторах скористаємося іншою методикою, запропонованою в [11].

Додаткові втрати у трансформаторах від протікання струмів вищих гармонік можна висловити як суми втрат х.х. та к.з. [11]. Приймаємо, що опір ланцюга взаємної індукції схеми заміщення трансформатора для струмів вищих гармонік постійно, і дорівнює значенням на основній гармоніці [15]. Тоді додаткові втрати х.х., обумовлені вищими гармоніками, можна визначити за виразом:

$$\Delta P_{x.x.v} = \Delta P_{x.x.} \sum \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2. \quad (2.24)$$

З огляду на те, що активний опір к.з. на v -ій гармоніці може бути представлено $r_{\kappa.3.v} \approx 0.47\sqrt{v} \cdot r_{\kappa.3.}$, а відношення $z_{\kappa.3.v}/z_{\kappa.3.} \approx x_{\kappa.3.v}/x_{\kappa.3.}$ [14],

додаткові втрати к.з., спричинені несинусоїдністю напруги, подаються в вигляді [13]

$$\Delta P_{\kappa.з. \nu} = 0,607 \cdot \frac{\Delta P_{\kappa.з.}}{u_{\kappa.з.}^2} \sum_{\nu=2}^n \left(\frac{U_{\nu}}{U_{ном}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\nu \cdot \sqrt{\nu}}. \quad (2.25)$$

Крім основних втрат, у трансформаторах мають місце додаткові втрати, зумовлені вихровими струмами. Величина цих втрат в обмотках трансформатора зростає пропорційно квадрату номера гармоніки [13]

$$\Delta P_{\text{дод} \nu} = \nu^2 \cdot 0,05 \Delta P_{\kappa.з. \nu}. \quad (2.26)$$

Таким чином, сумарні додаткові втрати, зумовлені несинусоїдальним режимом роботи трансформатора, визначаються у вигляді

$$\Delta P_{\Sigma \nu} = \Delta P_{\text{х.х.}} \cdot \sum_{\nu=2}^n \left(\frac{U_{\nu}}{U_{ном}} \right)^2 + 0,607 \cdot \frac{\Delta P_{\kappa.з.}}{u_{\kappa.з.}^2} \sum_{\nu=2}^n \frac{1 + 0,05 \nu^2}{\nu \cdot \sqrt{\nu}} \cdot \left(\frac{U_{\nu}}{U_{ном}} \right)^2. \quad (2.27)$$

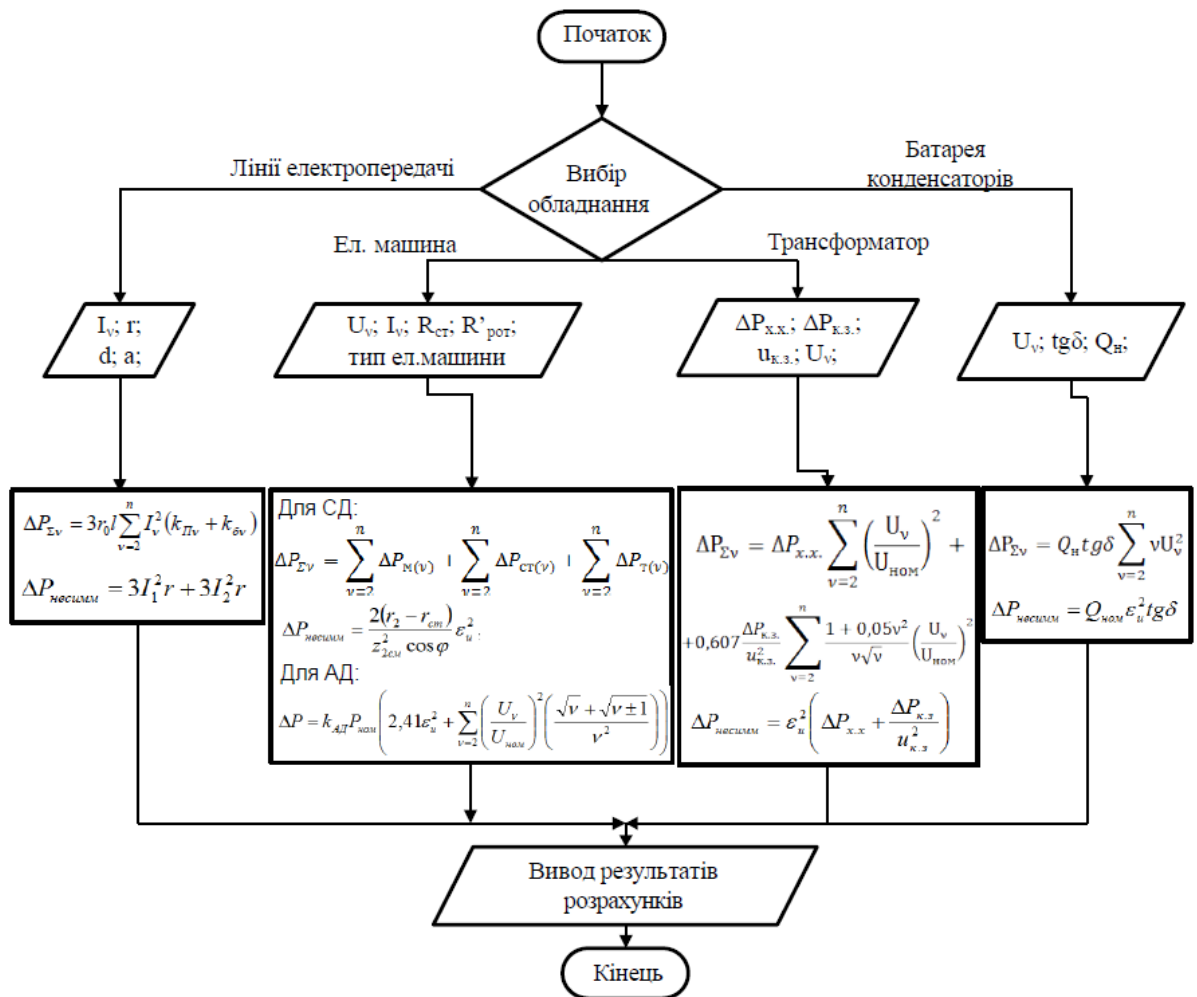


Рисунок 2.9. Алгоритм визначення додаткових втрат потужності в основних елементах системи електропостачання

Проведений аналіз методик розрахунку додаткових втрат, обумовлених несиметрією і несинусоїдністю напруги живлення і наведені формули (2.11)-(2.26) лягли в основу розробки алгоритму (рис. 2.9).

Висновки по другому розділу

Проведений аналіз методик розрахунку додаткових втрат, обумовлених несиметрією і несинусоїдністю напруги живлення дозволили розробити алгоритм визначення додаткових втрат потужності в основних елементах системи електропостачання.

РОЗДІЛ 3

СПОСОБИ ТА МЕТОДИ МІНІМІЗАЦІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК

З метою зниження рівня вищих гармонік необхідно знати умови експлуатації та технічні характеристики розподільної системи, а також гармонійний склад струмів та напруг електричних навантажень, їх споживану потужність та місце підключення в системі електропостачання.

Знизити рівні вищих гармонік можна шляхом реконструкції електричної мережі або застосуванням спеціальних коригувальних пристроїв.

При реконструкції електричної мережі можна виділити нелінійні навантаження та приєднати їх до окремої секції шин, підключеної до однієї з обмоток багатообмотувального трансформатора або реактора [16], можна розосередити нелінійні навантаження на вузлах системи з підключенням паралельно до них електродвигунів [16]. Рівні вищих гармонік знижують шляхом застосування послідовного і паралельного включення багатofазних вентильних установок з різними схемами з'єднання обмоток випрямних трансформаторів. Цим досягається збільшення числа пульсацій випрямленої напруги [16]. У складних перетворювальних пристроях використовують спеціальні закони управління, які забезпечують придушення однієї чи кількох гармонік мережного струму на частотах, у яких можливі резонансні явища [11].

Якщо перераховані вище заходи не забезпечують необхідного ефекту, тоді застосовуються спеціальні коригувальні пристрої [12,19]: лінійні дроселі, пасивні та активні фільтри вищих гармонік, розділові трансформатори та спеціальні магнітні синтезатори.

Послідовне включення до мережі лінійних дроселів, що мають мале значення індуктивного опору на основній частоті та значні величини опорів для вищих гармонік, призводить до їх зниження [19].

Послідовне включення до мережі лінійних дроселів у ряді випадків не забезпечує бажаного ефекту. Тоді доцільно використовувати пасивні

резонансні LC-фільтри, налаштовані на певну гармоніку. Такі фільтри широко застосовуються у системах із джерелами безперебійного живлення (UPS). Так, підключення фільтра на вході шестипівперіодного випрямляча за номінального навантаження UPS забезпечує зниження коефіцієнта спотворення синусоїдальності струму до величини 8–10 % [19].

Фільтри складаються з індуктивності та ємності, налаштованих на певну гармоніку. До недоліків силових резонансних фільтрів відноситься складність вибору номінальних параметрів фільтрової конденсаторної батареї та реактора, які повинні забезпечувати норми припустимого навантаження цих елементів в умовах, коли через них протікають не тільки струми основної частоти, а й струми вищих гармонік [16, 17]. Зниження рівнів гармонік за допомогою резонансних фільтрів вимагає великих витрат, оскільки для забезпечення ефективності цього заходу необхідна установка фільтрів вищих гармонік, починаючи з найменшої канонічної гармоніки. Неправильне включення фільтрів вищих гармонік призводить до резонансних явищ, що спричиняє аварії в системах електропостачання. Вихід із ладу фільтра нижчого порядку призводить до аварії на резонансних фільтрах вищого порядку [16, 17].

Вищі гармоніки використовують активні фільтри. Вони побудовані на модулях IGBT (біполярний транзистор із ізолюваним затвором) [10,12]. Це багатофункціональні пристрої, що дозволяють компенсувати реактивну потужність електромереж, відновити симетрію напруг та струмів трифазної системи. Активні фільтри гармонік підключаються паралельно до навантаження. Принцип їх дії заснований на аналізі гармонік струму нелінійного навантаження та генеруванні в розподільчу мережу таких самих гармонік струму, але з протилежною фазою. При цьому вищі гармонічні складові струму нейтралізуються в точці підключення фільтра, не поширюються в мережу і не спотворюють напруги первинного джерела енергії, що забезпечує лише основну гармоніку струму навантаження. На відміну від резонансних фільтрів, активні фільтри пригнічують всі основні

складові струмів мереж у певному діапазоні частот, у тому числі неканонічні і низькочастотні складові.

Для систем із потужними нелінійними електроприймачами силові активні фільтри можуть бути виконані багатотактними, багаторівневими, каскадними [7,9,11]. Багатотактний активний фільтр містить багатообмотувальний трансформатор, кілька транзисторних мостових випрямних мостів, включених паралельно і працюючих спільно із загальною конденсаторною батареєю, блок управління транзисторами та трифазний RC-ланцюг, підключений до електромережі. Він забезпечує фільтрацію вищих гармонійних складових струмів у діапазоні частот до 2000 Гц та вище [12]. Багаторівневий фільтр складається з транзисторного моста, підключеного до електромережі через фазні дроселі, блоки керування та RC-ланцюги. За рахунок багаторівневого виконання транзисторного перетворювача в ньому менше динамічних втрат енергії в напівпровідникових елементах, але на частотах широтно-імпульсної модуляції і вище активний фільтр є генератором гармонік. Каскадний фільтр містить напівпровідниковий перетворювач, в кожній фазі якого кілька однофазних низьковольтних перетворювачів з'єднані послідовно, утворюючи високовольтний перетворювач, який може бути підключений безпосередньо до електромережі. Недоліком всіх типів активних фільтрів і те, що у частотах широтно-імпульсної модуляції і вище активний фільтр є генератором гармонійних складових і їх придушення потрібне використання RC-ланцюга [12].

Для підвищення якості напруги застосовуються також спеціальні пристрої, що синтезують свою вихідну напругу, так звані «магнітні синтезатори». Вони підключаються послідовно з нелінійним навантаженням та забезпечують захист від провалів та викидів напруги, імпульсних та високочастотних перешкод, наявності вищих гармонік, що викликають спотворення синусоїдальності форми напруги [7,11]. Магнітний синтезатор включає блок лінійних дроселів, блок гальванічної розв'язки, блок

імпульсних трансформаторів, блоконденсаторів, фільтри 2-ї і 3-ї гармонік, трансформатор зі спеціальною схемою з'єднання обмоток. Вихідна напруга магнітного синтезатора на кожному напівперіоді основної частоти генерується шляхом поєднання шести прямокутних імпульсів від зв'язаних між собою трансформаторів з насиченням. Ця напруга надходить на навантаження через фільтри, налаштовані на 2-ю та 3-ю гармоніки, і спеціальний трансформатор, що забезпечує коефіцієнт спотворення синусоїдальності вихідної напруги не вище 4% незалежно від ступеня спотворення напруги на вході магнітного синтезатора [7, 12]. Коефіцієнт спотворення струму на вході магнітного синтезатора не перевищує 8 %, незалежно від спотворення струму навантаження [12]. Однак цей пристрій досить складний і дорогий.

У розподільчих мережах деяких економічно розвинених країн світу для зменшення вищих гармонік застосовуються так звані "активні кондиціонери гармонік" (АКГ). Вони є різновидом активних фільтрів [14]. АКГ може бути встановлений у будь-якій точці розподільної мережі з метою компенсації вищих гармонік від одного або кількох нелінійних навантажень. Недоліком активного кондиціонера гармонік є те, що він компенсує гармоніки не вище 25 [14].

При виборі способів та засобів зниження несиметрії та несинусоїдності напруги в електроустановках сільськогосподарського призначення необхідно враховувати специфічні особливості електропостачання сільського господарства. Енергоозброєність праці у сільськогосподарському виробництві значно нижча, ніж у промисловості. Структура організації сільськогосподарського виробництва, необхідність обробки великих площ та невисока щільність населення визначають порівняно малу щільність електричних навантажень. Для електропостачання сільськогосподарських споживачів доводиться передавати відносно невеликі потужності великі відстані. В результаті розподільні мережі мають значну довжину, що несприятливо впливає на показники якості та надійності електропостачання.

Електроспоживання має яскраво виражений сезонний характер. Значна частина електрообладнання сільському господарстві експлуатується за умов агресивної довкілля.

Часто електротехнічні служби сільськогосподарських організацій не укомплектовані достатньою кількістю кваліфікованого персоналу, що негативно впливає на якість експлуатації електрообладнання та термін його служби. У таких умовах для підвищення якості напруги найбільш доцільним є застосування відносно недорогих, простих і надійних за конструктивним виконанням пристроїв, що не вимагають особливих умов експлуатації і не висувають занадто високих вимог до кваліфікації обслуговуючого персоналу. У зв'язку з цим розглянуті заходи щодо поліпшення якості напруги не знайшли широкого застосування в сільському господарстві.

Висновки по третьому розділу

Для електропостачання сільськогосподарських споживачів доводиться передавати відносно невеликі потужності великі відстані. В результаті розподільні мережі мають значну довжину, що несприятливо впливає на показники якості та надійності електропостачання. Електроспоживання має яскраво виражений сезонний характер. Значна частина електрообладнання сільському господарстві експлуатується за умов агресивної довкілля.

ВИСНОВКИ

В даний час в Україні є велике кількість промислових та сільськогосподарських підприємств, які виробляють продукцію на промисловій основі. Відбувається всебічна автоматизація та комплексна механізація виробничих процесів. Зростає енергоозброєність сільськогосподарського виробництва, а разом із нею і енергоспоживання.

Зі зростанням виробничого навантаження зростає і комунально-побутове навантаження.

Одночасно зі швидким зростанням споживання електричної енергії підвищуються вимоги до надійності електропостачання споживачів, і дедалі гостріше порушується питання підвищення її якості, оскільки від якості електричної енергії залежить і якість виробленої продукції.

Якість електричної енергії характеризується рядом показників, за яких споживачі можуть нормально працювати.

У даній роботі наведено показники та норми якості електричної енергії в електричних мережах систем електропостачання загального призначення змінного трифазного та однофазного струму частотою 50 Гц відповідно до зазначеного стандарту. Надано інформацію ряду авторів про вплив якості електричної енергії на роботу споживачів. У стислому вигляді викладені відомі способи підвищення якості електричної енергії.

Відмічено, що наявність вищих гармонік несприятливо позначається на роботі як електрообладнання споживачів, а й електронних пристроїв у самих енергосистемах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Постанова 12.06.2018 № 375 «Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання». /Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг
2. ДСТУ 3466-96 Якість електроенергії. Терміни та визначення.
3. ДСТУ 2843-94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення.
4. ДСТУ 2815-94 Електричні та магнітні кола та пристрої.
5. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). — К.: Держстандарт України, 2014. — 27 с.
6. Дідур В. А. Сучасна енергетика: стан, проблеми, перспективи розвитку /В. А. Дідур, О. В. Лисенко, С. В. Адамова // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / ТДАТУ. — Мелітополь, 2016. — Вип. 16, т. 2. — С. 113-119.
7. В. І. Сенько, К. В. Трубіцин, В. І. Чибеліс Силова перетворювальна техніка// НТТУ «КПІ» імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО/ Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського,- 2022-340 с.
8. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка" та "Електротехніка": У 4-х т. Т.1. Елементна база електронних пристроїв / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М., Сенько Л.І., Ясінський В.В. — К.: ТОВ "Видавництво"Обереги", 2000.— 300с.
9. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Промислова електроніка. Напівпровідникові перетворювачі змінної напруги у постійну: Навчальний посібник. — Київ: Ліра-К, 2021. — 342 с.

10. Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Островерхов М.Я., М.С. Махмуд АльСуод. Програмна реалізація методів розрахунку та аналізу електричних кіл: Навчальний посібник. – Київ: Ліра-К, 2021. – 462 с.

11. Електроніка та мікросхемотехніка [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка"/ А.А. Щерба, К.К. Побєдаш, В.А. Святненко: – Київ: НТУУ "КПІ", 2013. — 360 с. Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/3569>.

12. Побєдаш К.К., Святненко В.А. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії [Електронний ресурс]: навчальний посібник/ Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, – 2017. – 244 с. Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19823>.

13. Руденко В.С. та ін. Промислова електроніка: Підручник / В.С. Руденко В.Я. Ромашко, В.В. Трифонюк.— Київ, Либідь, 1993, – 432 с

14.Маліновський А.А., Хохулін Б.К. Основи електропостачання: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005. – 324 с.

15. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств: підручник / Шестеренко В.Є. — Вінниця: Нова Книга, 2011. — 656 с

16. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Квітка О.С. Дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Вип.7, т.1. Мелітополь: ТДАТУ, 2017. С. 126 – 134.

17. Буртний Д. І. ВПЛИВ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ// НТУ «Дніпровська політехніка»

18. Адамова С. В. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА РОБОТУ СТРУМОПРИЙМАЧІВ// Таврійський державний агротехнологічний університет. Науковий вісник ТДАТУ Вип. 8, том 2

19. Конспект лекцій з дисципліни "Електропостачання промислових підприємств" для студентів напряму 6.050701 – електротехніка і електротехнології, 6.050702 - електромеханіка / Укладачі Є.Д.Хмельницький, О.О.Крупник — Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2016, 126 с.(Частина 2)

20. Мірошник Ю.В., студент, Казанський С.В ЯКІСТЬ НАДАННЯ ПОСЛУГ З ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ: ОСНОВНІ ТЕРМІНОЛОГІЧНІ ВИЗНАЧЕННЯ ТА НОРМАТИВНА БАЗА/ КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем

21. N 978-966-622-453-1. 2. Постанова Національної комісії регулювання електроенергетики України від 17.02.2011 р. № 232 «Про затвердження форм звітності № 17-НКРЕ (квартальна) «Звіт щодо показників надійності електропостачання» та № 18-НКРЕ (квартальна) «Звіт щодо показників комерційної якості надання послуг» та інструкцій щодо їх заповнення». Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 21.03.2011 р. за № 374/19112.

22. Кирик В.В., Рибка О.О., Аналіз стану та технічної відповідності електричних мереж ОЕС України вимогам ENTSO-E Гідроенергетика України, 3—4/2021, ISSN 18129277

23. Приватне Акціонерне Товариство «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НЕК «Укренерго»). (n.d.). План розвитку системи передачі на 2021-2030 роки, схвалений постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 57 від 20.01.2021. Retrieved from <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/plan-rozvytku-oesukrayiny>

24. Кирик В.В. Електричні мережі та системи: підручник /В. В. Кирик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 324 с. ISBN 978-966-990-031-9

25. Кирик В.В. Розподільні електричні мережі напругою 20 кВ та ефективність їх роботи / В.В.Кирик, Б.В. Циганенко, О.С. Яндульський.-К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018.-228с. ISBN 978-966-622-910-9

26. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ДИНАМИКА ПОТЕРЬ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ/Ф. П.
Шкрабец, П. Ю. Красовский; Ин-во образ. и науки Украины. Нац. гор. ун-
ст – Д:НГУ, 2005 – 152.