

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

Врахування схеми мережі під час оцінювання рівня якості електричної енергії

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕС-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні станції»,
Перебора М. Р. MP

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ЕСС
Комар В. О.

«06» 06 2025 р.

Рецензент: К.Т.Н. доц. доц. каф. ЕЕМСК
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

Микола МОЦНОРІЗ
«02» 06 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.

«06» 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – Електричні станції

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«20» 03 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Перебора Михайло Романович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Врахування схеми мережі під час оцінювання рівня якості електричної енергії»

Керівник роботи д.т.н., проф., зав. каф. ЕСС Комар В. О.
затверджена наказом вищого навчального закладу № 97 від 20.03.2025р

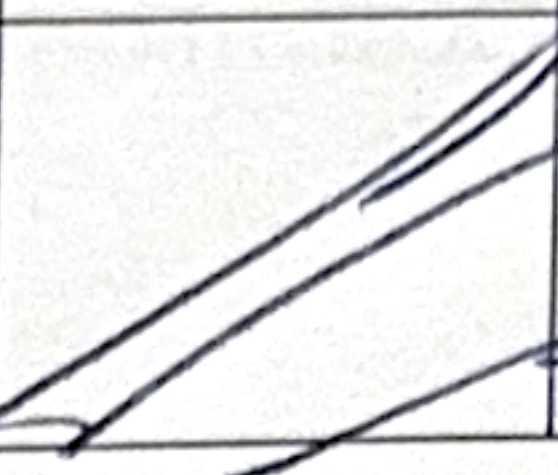
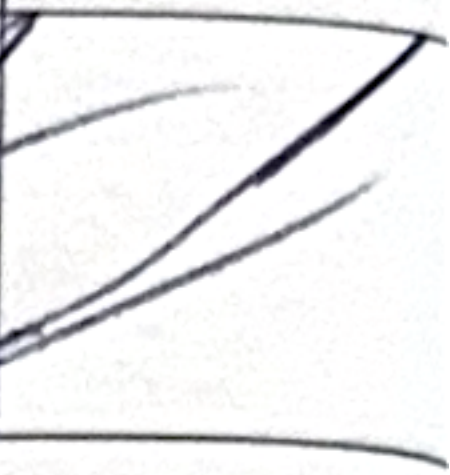
2. Термін подання студентом роботи 03 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи: 1. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папаїка Ю. А. Енергетична ефективність систем електропостачання : монографія. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. 148 с. 2. СОУ НЕК 03.120.4-14:2021. Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах. Київ : НЕК «Укренерго», 2021. 316 с. 3. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електроенергії в системах розподілу загального користування. – [Чинний від 2015-01-01]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 35 с.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Додавання завад. 2. Частотні характеристики системи електропостачання. 3. Резонанс напруг і струмів у СЕП. 4. Розподіл струмів і напруг при несиметричних режимах. 5. Вплив ЯЕ на витрати електроенергії. 6. Вплив несинусоїдальності напруг і струмів на приладах обліку. 7. Вплив системи заземлення мережі напругою до 1000 В. 8. Розрахунок припустимого внеску споживача по ПЯЕ. 9. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

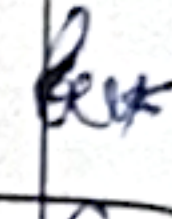
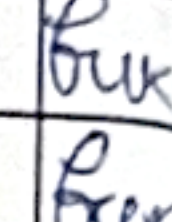
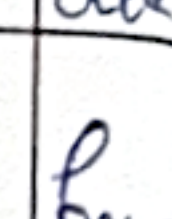
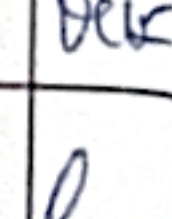
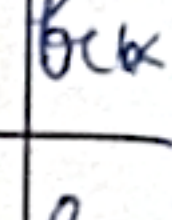
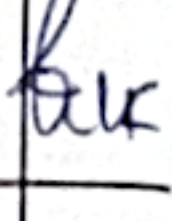
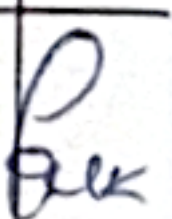
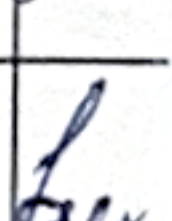
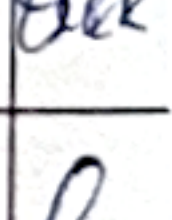
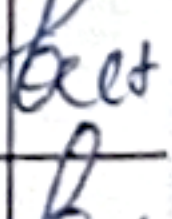
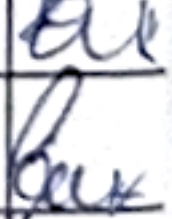
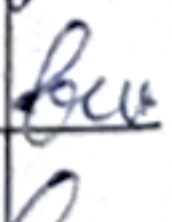
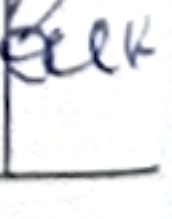
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Титулка. 2. Вступ. 3. Амплітудно-частотні характеристики СЕП при резонансі струмів. 4. Напрямок активних потужностей у системі при спотворюючому навантаженні. 5. Класифікація приладів обліку електроенергії. 6. Основні системи заземлення мережі напругою до 1000 В. 7. Висновки. 8. Дякую за увагу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Комар В. О., д.т.н., проф., зав. кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д. пед. н., професор, зав. каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Пр мі
		початок	кінець	
1	Формування та затвердження завдання БКР	20.03.2025	24.03.2025	
2	Вступ. Огляд літературних джерел	25.03.2025	29.03.2025	
3	Додавання завад (розділ 1 БКР)	30.03.2025	03.04.2025	
4	Частотні характеристики системи електропостачання (розділ 2 БКР)	04.04.2025	08.04.2025	
5	Резонанс напруг і струмів у СЕП (розділ 3 БКР)	09.04.2025	13.04.2025	
6	Розподіл струмів і напруг при несиметричних режимах (розділ 4 БКР)	14.04.2025	18.04.2025	
7	Вплив ЯЕ на витрати електроенергії (розділ 5 БКР)	19.04.2025	23.04.2025	
8	Вплив несинусоїдальності напруг і струмів на приладах обліку (розділ 6 БКР)	24.04.2025	28.04.2025	
9	Вплив системи заземлення мережі напругою до 1000 В (розділ 7 БКР)	29.04.2025	03.05.2025	
10	Розрахунок припустимого внеску споживача по ПЯЕ (розділ 8 БКР)	04.05.2025	08.05.2025	
11	Охорона праці (розділ 9 БКР)	09.05.2025	13.05.2025	
12	Формування висновків по роботі	14.05.2025	18.05.2025	
13	Оформлення пояснювальної записки	19.05.2025	23.05.2025	
14	Виконання графічної частини та оформлення презентації	24.05.2025	29.05.2025	

Студент

(підпис)

М. Р. Перебор

Керівник роботи

(підпис)

В. О. Комар

АНОТАЦІЯ

Перебора Михайло Романович «Врахування схеми мережі під час оцінювання рівня якості електричної енергії». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. – 2025. – 75 с. Бібліогр.: 26. Рис. : 13. Табл. :14.

У роботі досліджено вплив схеми електричної мережі на показники якості електричної енергії в точках загального приєднання. Розглянуто роль частотних характеристик, режимів несиметрії, гармонічних спотворень, резонансів та заземлення в процесі формування параметрів ПЯЕ. Досліджено механізми додавання електромагнітних завад у мережах з нелінійними, імпульсними й несиметричними навантаженнями. Показано, що ігнорування схеми мережі при оцінці ПЯЕ призводить до помилкових висновків щодо стану електропостачання, зростання втрат енергії та зниження точності обліку. Запропоновано методику визначення припустимого внеску споживача у викривлення ПЯЕ з урахуванням параметрів схеми, що дозволяє підвищити точність технічного нагляду, енергоефективність і електромагнітну сумісність.

Ключові слова: якість електроенергії, електрична мережа, гармонічні складові, резонанс напруг, несиметрія напруг, втрати.

ABSTRACT

Perebora Mykhailo Romanovych. “Taking into account network schemes when assessing the level of quality of electric energy”. Bachelor’s qualification work. – Vinnytsia: VNTU. – 2025. – 75 p. Bibliography: 26. Fig. : 13. Tab. :14.

The thesis investigates the impact of electrical network topology on power quality indicators at points of common coupling. It examines the role of frequency characteristics, voltage unbalance, harmonic distortions, resonance phenomena, and grounding schemes in the formation of power quality parameters. The study analyzes the mechanisms of electromagnetic disturbance aggregation in networks with nonlinear, impulsive, and unbalanced loads. It is shown that disregarding network topology in power quality evaluation leads to incorrect conclusions about the state of power supply, increased energy losses, and reduced metering accuracy. A methodology is proposed for assessing the allowable contribution of a consumer to power quality distortion, considering network parameters, which enhances technical monitoring accuracy, energy efficiency, and electromagnetic compatibility.

Keywords: power quality, electrical network, harmonics, voltage resonance, voltage unbalance, energy losses.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ВСТУП	5
1 ДОДАВАННЯ ЗАВАД.....	7
2 ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	12
3 РЕЗОНАНС НАПРУГ І СТРУМІВ У СЕП	15
4 РОЗПОДІЛ СТРУМІВ І НАПРУГ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМАХ.....	19
5 ВПЛИВ ЯЕ НА ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	26
7 ВПЛИВ СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ ДО 1000 В.....	37
8 РОЗРАХУНОК ПРИПУСТИМОГО ВНЕСКУ СПОЖИВАЧА ПО ПЯЕ	42
9 ОХОРОНА ПРАЦІ	53
9.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту	53
9.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	53
9.1.2 Електробезпека	56
9.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	57
9.2.1 Мікроклімат	57
9.2.2 Склад повітря робочої зони	58
9.2.3 Виробниче освітлення	59
9.2.4 Виробничий шум	60
9.2.5 Виробнича вібрація	61
9.3 Пожежна безпека.....	61
ВИСНОВКИ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67
ДОДАТКИ	70
Додаток А. Протокол перевірки навчальної (кваліфікаційної) роботи	71
Додаток Б	72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВЕС – вітрова електрична станція

ВН – висока напруга

ДРП – джерела реактивної потужності

ЕМС – електромагнітна сумісність

ЕЕС – електроенергетична система

ЕП – електроприймач

ЛЕП – лінії електропередач

НН – низька напруга

ПЛ – повітряні лінії

ПЯЕ – показники якості електроенергії

СЕП – система електропостачання

СЕС – сонячна електрична станція

СН – середня напруга

ТЗП – точка загального приєднання

ЯЕ – якість електроенергії

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку енергетики, що супроводжується широким впровадженням електронних пристроїв, частотних перетворювачів, засобів автоматизації та розосередженої генерації, забезпечення належного рівня якості електричної енергії стає критично важливим [1]. Одним з ключових факторів, який визначає рівень ПЯЕ, є топологія мережі, включаючи конфігурацію, заземлення, частотні характеристики та режим роботи елементів електропостачання. Ігнорування особливостей схеми мережі призводить до недостовірної оцінки ПЯЕ [2], виникнення резонансів, несиметричних режимів, надлишкових втрат і помилок у комерційному обліку. Саме тому тема врахування схеми мережі при оцінюванні якості електроенергії є актуальною, особливо в контексті гармонізації із державними вимогами та підвищення надійності енергосистем.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є обґрунтування необхідності врахування схеми та параметрів електричних мереж при оцінці показників якості електроенергії та розробка підходів до кількісного визначення впливу окремих елементів схеми на ПЯЕ.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі задачі:

- проаналізувати механізми формування електромагнітних завад у точках загального приєднання;
- дослідити частотні характеристики елементів електропостачання та вплив резонансів на ПЯЕ;
- оцінити наслідки несиметричних режимів для якості електроенергії;
- визначити вплив погіршення ПЯЕ на технічні втрати та точність обліку;
- проаналізувати вплив типу системи заземлення на параметри ПЯЕ;
- запропонувати методику оцінки допустимого внеску споживача у викривлення ПЯЕ.

Об'єкт дослідження – електрична мережа.

Предмет дослідження – оцінювання рівня якості електричної енергії.

Методи дослідження. У роботі застосовані сучасні методи оцінювання рівня якості електричної енергії.

Наукова новизна. У роботі обґрунтовано необхідність врахування схеми електричної мережі при аналізі ПЯЕ. Запропоновано методика оцінки впливу топології, заземлення, характеру навантажень та частотної поведінки елементів на формування параметрів якості в точці загального приєднання. Також уточнено критерії електромагнітної сумісності між споживачем і мережею з урахуванням динамічних процесів.

Практична цінність. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні, реконструкції та аналізі систем електропостачання для оцінки ПЯЕ, розробки технічних умов на приєднання споживачів, впровадження заходів із підвищення енергоефективності, а також у навчальному процесі підготовки фахівців енергетичного профілю.

1 ДОДАВАННЯ ЗАВАД

У сучасних електроенергетичних системах дедалі гострішою стає потреба у точній оцінці впливу споживачів на показники якості електричної енергії [1]. Це обумовлено низкою чинників, серед яких: широке використання нелінійних навантажень (частотні перетворювачі, імпульсні джерела живлення, сонячні та вітрові електростанції), зростання частки розосередженої генерації, а також посилення вимог до ПЯЕ, що регламентуються стандартом ДСТУ EN 50160:2014 [3]. В умовах, коли до однієї точки приєднання підключено кілька джерел спотворень, їхній вплив не є лінійним і залежить від схеми мережі, частотних характеристик її елементів та типу навантажень. Ігнорування цих взаємодій може призвести до перевищення припустимого рівнів ПЯЕ, порушення роботи автоматизованих систем управління, некоректної роботи облікових пристроїв або навіть до аварійних ситуацій. Саме тому вивчення процесів додавання завад має ключове значення для визначення припустимого внеску кожного споживача, забезпечення коректної роботи системи електропостачання [4], вибору ефективних засобів фільтрації та підвищення загальної надійності енергетичної інфраструктури.

Усі види електромагнітних завад, які виникають у системі електропостачання, є наслідком функціонування електрообладнання споживачів [1]. Їхній сумарний вплив формує загальний рівень спотворень у точці загального приєднання (ТЗП). Саме в даній точці контролюється відповідність ПЯЕ до нормативів. Згідно з ДСТУ EN 50160:2014, встановлюються вимоги до сумарного рівня завад, а не до внеску окремого споживача. Тому при проектуванні, моделюванні або аналізі якості електроенергії виникає потреба розрахунково оцінити, як саме додаються завади від різних джерел у межах одного вузла мережі.

Типовим прикладом ТЗП є шини трансформаторної підстанції, до яких приєднуються декілька навантажень (рис. 1.1). Кожне з них – потенційне джерело викривлень напруги і струму. Показники якості, такі як коефіцієнти

гармонік, несиметрії чи флікера, формуються підсумовуванням впливів усіх споживачів.

Показники якості електроенергії типу K_U , $K_{U(n)}$, K_{2U} , K_{0U} [3] відображають вплив електроприймачів споживача на якість енергії у відповідному вузлі електричної мережі. Значення ПЯЕ в i -му вузлі визначається струмами спотворень I_j , які утворюються споживачами в різних вузлах системи. У результаті, викривлення напруги в точці i (U_i) обчислюється як векторна сума спадів напруги ΔU_i , що виникають внаслідок проходження цих струмів через власні (Z_{ii}) та взаємні (Z_{ij}) опори, пов'язані з i -м вузлом. Таким чином, відповідно до рис. 2.1:

$$\Delta U_i = I_i Z_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k I_j Z_{ij} . \quad (1.1)$$

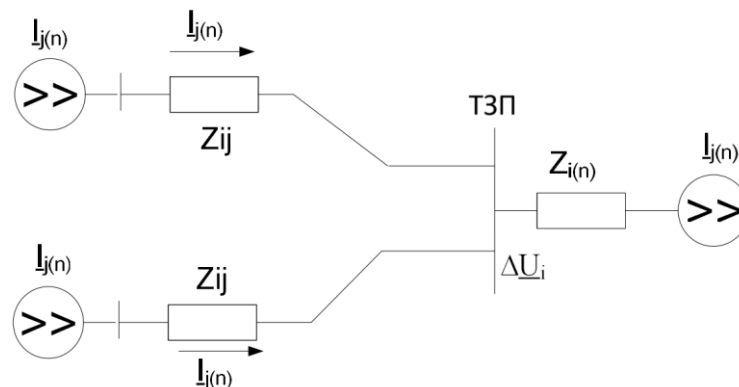


Рисунок 1.1 – Додавання вищих гармонік струму n -го порядку в СЕП із декількома джерелами

Перший член цього виразу відповідає за спотворення напруги, спричинене джерелами несинусоїдальності та несиметрії, які надходять від 1-го джерела. Другий член відображає сумарний внесок викривлень того самого типу, що надходять в i -й вузол від джерел, розташованих у j -х вузлах мережі. При цьому важливо враховувати, що один і той самий елемент системи

електропостачання має різні опори Z_{ii} , Z_{ij} які змінюються залежно від струмів гармонік n -го порядку, а також струмів зворотної та нульової послідовностей.

Рівняння (1.1) представляє собою векторну суму, де кожен доданок змінюється випадково: модуль може набувати значень у діапазоні від 0 до 1, а фаза рівною в межах від 0 до 2π . У деяких окремих випадках така сума може бути також арифметичною.

Під час вимірювання показників якості електроенергії на вхід вимірювального пристрою подається сумарний сигнал напруги або струму, і фіксується його діюче значення [1]. У разі виконання проектних розрахунків чи при визначенні припустимого внеску джерела завад, коли вплив декількох джерел оцінюється аналітично, замість векторного підсумовування застосовують "зважене" піднесення до ступеня з використанням коефіцієнта α .

Прийнявши α як показник, що описує характер додавання, можна загальну формулу сумарного викривлення певного типу подати у наступному вигляді:

$$\Pi_{\Sigma} = \sqrt[\alpha]{\sum_{j=1}^k \Pi_j^{\alpha}}. \quad (1.2)$$

де k – число джерел викривлення.

Тоді вектори несиметрії напруги по зворотній і нульовій послідовності, що розподіляються випадковим чином, додаються у квадратурі так, що [2]:

$$K_{2U} = \sqrt{\sum_{j=1}^k K_{2Uj}^2}; \quad K_{0U} = \sqrt{\sum_{j=1}^k K_{0Uj}^2}. \quad (1.3)$$

Коливання напруги, що створюють флікери, не є векторними величинами. Їхній вплив нормується як накопичувані впливи енергії світлового потоку. Тому вплив джерел коливань напруг додаються арифметично.

Механізм додавання вищих гармонік, генерованих перетворювачами, установлений на основі експериментальних досліджень залежно від порядку гармоніки [1]:

– для 3, 5, 7-ї гармонік – арифметично, тобто так, що для кривої напруги, що містить 3, 5 і 7-ю гармоніки, $K_{U\Sigma}$ рівний (при $a=1$):

$$K_{U\Sigma} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^k K_{(3)j}\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^k K_{(5)j}\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^k K_{(7)j}\right)^2}. \quad (1.4)$$

– для 11-ї і 13-ї гармонік у ступені 1,4 ($a = 1,4$):

$$K_{U\Sigma} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^k K_{(11)j}^{1.4}\right)^{\frac{2}{1.4}} + \left(\sum_{j=1}^k K_{(13)j}^{1/4}\right)^{\frac{2}{1.4}}}. \quad (1.5)$$

– для інших гармонік у другому ступені ($a = 2$):

$$K_{U\Sigma} = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} \sum_{j=1}^k K_{(n)j}^2}. \quad (1.6)$$

Показник ступеня a , що визначає спосіб додавання гармонік, які створюються перетворювачами в різних точках системи електропостачання, на практиці приймається як "зважене" значення. Воно залежить від пульсності самих перетворювачів і враховує тенденцію до зменшення амплітуди гармонік зі зростанням їх порядку. Зокрема, для 6-пульсних перетворювачів, які формують непарні гармоніки, починаючи з п'ятої, використовують значення $a = 1,3$. Для 12-пульсних, що генерують непарні гармоніки з 11 включно, приймається $a = 1,6$.

У випадку інших типів нелінійних навантажень – таких як дугові печі, зварювальні агрегати та інше обладнання, значення показника ступеня беруть

рівним $a = 2$. Відповідно, для споживачів із комбінованим складом електроприймачів:

$$\alpha = 1,3 \cdot d_6 + 1,6 \cdot d_{12} + 2 \cdot d_{np} . \quad (1.7)$$

де d_{np} , d_6 , d_{12} – відповідно частки потужності 6- і 12-пульсних перетворювачів і інших джерел вищих гармонік.

Усі ці методики додавання завад необхідні для точного оцінювання припустимого внеску споживача в погіршення якості електроенергії. Без урахування цих ефектів складно забезпечити відповідність стандарту ДСТУ EN 50160:2014 [3], що критично важливо як при розробці проєктів, так і при експлуатації СЕП у промислових умовах.

Висновки по розділу 1.

У цьому розділі проаналізовано механізми формування сумарного рівня електромагнітних завад у точках загального приєднання споживачів, що є ключовим чинником при оцінці якості електроенергії. Показано, що для коректної інтерпретації впливу кожного джерела необхідно враховувати як фізичні характеристики навантажень, так і топологію мережі, а сам процес додавання завад залежить від типу спотворень і характеру їх взаємодії. Врахування цих аспектів дозволяє обґрунтовано оцінити відповідність ПЯЕ нормативам ДСТУ EN 50160:2014, а також запобігти перевищенню припустимих меж при проектуванні та експлуатації систем електропостачання.

2 ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Система електропостачання охоплює повний комплекс електротехнічного обладнання, необхідного для реалізації процесів генерації, транспортування, розподілу та споживання електроенергії [4,5]. Під час розрахунку її режимів вона моделюється за допомогою схеми заміщення, де основні елементи описуються відповідними параметрами. Кожен тип обладнання може бути зведений до еквівалентної комбінації індуктивності L , ємності C та активного опору R , значення яких залежать виключно від конструктивних характеристик конкретного пристрою.

У розрахунках ustalених режимів СЕП, до яких відносяться й розрахунки несинусоїдності напруги й струму, у схемах заміщення СЕП зазначені параметри представляють відповідно до $X_L = \omega L$ індуктивним, $X_C = 1/(\omega C)$ ємнісним і активним R опорами. При частоті напруги (струму) у мережі $f = 50$ Гц кутова частота $\omega = 314$. На частотах вищих гармонік напруги (струму) $\omega_{(n)} = n\omega$, де n – ціле число, що відображає порядок гармоніки, тобто її кратність стосовно основної гармоніки.

Основна (перша) гармоніка може незначно змінювати свою частоту в межах, установлених нормативами, зокрема [3]. Внаслідок цього частоти вищих гармонік також змінюються, хоча їхній порядок (тобто кратність до основної частоти) залишається незмінним. У системі електропостачання можуть виникати й гармоніки, які не є кратними основній. Проте загальноприйнято вважати, що їхній внесок є незначним як за амплітудою, так і за енергією у порівнянні з кратними гармоніками, порядки яких визначаються як $n=2,3,4,\dots,40$. Саме ці кратні гармоніки враховуються під час оцінювання ступеня несинусоїдальності напруги або струму.

У такий спосіб параметри схеми заміщення елементів СЕП на вищих гармоніках представляються як $X_{L(n)} = n\omega L$, $X_{C(n)} = 1/(n\omega C)$, $R_{(n)} = R\sqrt{n}$ [6]. Залежність модулів цих опорів від частоти називається амплітудночастотною характеристикою (АЧХ). Амплітудно-частотні характеристики стосовно тієї

або іншої точки СЕП в еквівалентній схемі заміщення, утвореної в результаті послідовно-паралельного згортання елементів СЕП, різні.

Амплітудно-частотну характеристику звичайно зображують графічно або у вигляді спектральної залежності $X_{L(n)} = \varphi(n)$, $X_{C(n)} = \varphi(n)$, $R_{(n)} = \varphi(n)$, або у вигляді годографа зміни, що відображає, значень $X_{(n)}$ двох $R_{(n)}$ параметрів і на частотах гармонік досліджуваного спектра. На рис. 3.1, а) показана АЧХ, розрахована щодо одного з вузлів складної системи в режимах її найбільшого, середнього й найменшого навантаження, а на рис. 3.1, б) та ж АЧХ представлена у вигляді годографа. При вимірах АЧХ одержують як відношення $Z_{вх} = \varphi(n) = U_{(n)}/I_{(n)}$ з урахуванням активного опору $R(n)$ [6]. Як видно з рисунка, резонансні умови можуть виникати на частотах різних гармонік.

У частотному діапазоні система електропостачання поводить себе не лише як провідник, але і як фільтр. Компоненти мережі мають резонансні властивості, через які окремі частоти можуть посилюватися. Такі явища критично важливі при аналізі гармонічного складу напруги й струму в точках приєднання. Особливо це актуально для мереж з великою кількістю конденсаторних батарей або компенсаційних пристроїв, які можуть викликати паралельні або послідовні резонанси [1].

Крім того, нові технології енергетики, зокрема відновлювані джерела (ВДЕ) на основі інверторів, значно впливають на частотну поведінку системи. Вони генерують не лише класичні гармоніки, а й високочастотні імпульсні спотворення, що вимагає врахування частотних характеристик не лише у низькочастотному, а й у мегагерцовому діапазоні. Для таких аналізів використовуються частотні моделі елементів мережі в середовищах типу MATLAB/Simulink або PowerFactory.

Висновки по розділу 2.

Частотні характеристики системи електропостачання визначають здатність мережі реагувати на сигнали різних частот і мають вирішальне значення при оцінці впливу споживачів на якість електроенергії. Вони

дозволяють правильно моделювати додавання гармонік, оцінювати небезпеку резонансів і враховувати вплив нелінійних навантажень. Урахування цих характеристик дає змогу обґрунтовано проєктувати СЕП, мінімізувати вплив завад та забезпечити дотримання нормативів якості електроенергії відповідно до ДСТУ EN 50160:2014.

3 РЕЗОНАНС НАПРУГ І СТРУМІВ У СЕП

У сучасних умовах роботи енергосистем, коли в мережі активно використовуються фільтри гармонік, компенсуючі пристрої, сонячні інвертори та частотні перетворювачі, ймовірність виникнення резонансних режимів суттєво зростає. Ці режими здатні маскувати або підсилювати гармоніки, викликаючи непередбачувані відмови у роботі обладнання. Особливо це стосується об'єктів із великою кількістю конденсаторних установок, де існує ризик випадкового співпадіння частоти гармоніки з резонансною частотою контуру [1].

Відсутність обліку резонансних явищ під час проєктування або експлуатації систем може призвести до:

- вибухів силових конденсаторів,
- відмов захистів через хибні спрацьовування,
- локального перегріву кабелів та шин,
- зниження ресурсу обладнання.

Таким чином, врахування умов виникнення резонансів є необхідною умовою для забезпечення електромагнітної сумісності [1], стійкої роботи СЕП та відповідності показників якості електроенергії до стандартів, зокрема [3].

Вхідний опір X_{Σ} , якщо прийняти, що активний опір $R_{(n)}$ малий, еквівалентної схеми заміщення СЕП, отриманої в результаті згортання її елементів, залежить не тільки від частоти $\omega_{(n)} = n\omega$, але й від схеми їх з'єднання. Істотний вплив на цей опір виявляє ємність конденсаторів у СЕП, а також ємнісна провідність повітряних і кабельних ліній, які з індуктивними елементами утворюють паралельне або послідовне з'єднання (рис. 3.1).

Зміна характеру вхідного опору залежно від частоти наведене в табл. 3.1, де весь спектр досліджуваних гармонік розділений на три області, коли їх частота $n < n_{рез}$, $n = n_{рез}$, $n > n_{рез}$. У кожній із цих областей вхідний опір X_{Σ} має або індуктивний характер, або ємнісний. Границею між цими областями є $n = n_{рез}$, коли $X_{L(n)} = X_{C(n)}$ й вхідний опір стає рівним або нескінченності

(резонанс струмів) при паралельному з'єднанні $X_{L(n)}$ й $X_{C(n)}$, або нулю (резонанс напруг) при їхньому послідовному з'єднанні. На рис. 3.1 показані АЧХ для кожного із цих випадків, а на рис. 3.2 – векторні діаграми.

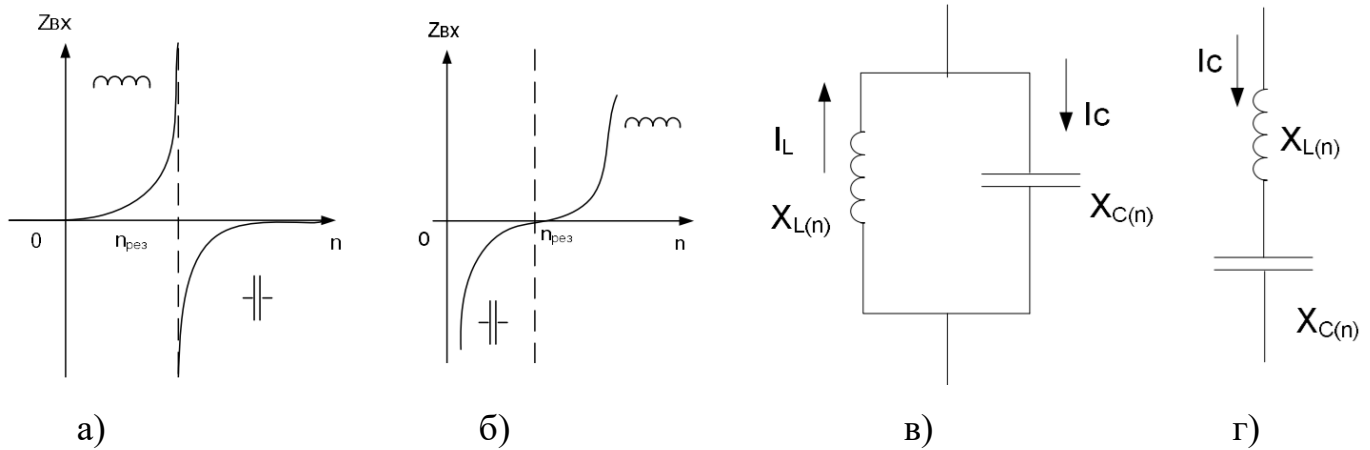


Рисунок 3.1 – Амплітудно-частотні характеристики СЕП при резонансі струмів (а) і напруг (б) і відповідні їм схеми заміщення при резонансі струмів (в) і резонансі напруг (г)

Таблиця 3.1 – Вхідний опір X_{Σ} паралельного й послідовного ланцюгів утвореної опорами $X_{L(n)}$ та $X_{C(n)}$

Паралельного з'єднання	Послідовне з'єднання
При $n = n_{\text{рез}}$ (резонанс струмів)	При $n = n_{\text{рез}}$ (резонанс напруг)
$X_{L(n)} = X_{C(n)}$	$X_{L(n)} = X_{C(n)}$
$I_{\Sigma} = I_{L(n)} - I_{C(n)} = 0$	$I_{\Sigma} = 0$
$X_{\Sigma} = U/I = \infty$	$I_{\Sigma} = U/I = \infty$
При $n > n_{\text{рез}}$; $\omega = \omega_{\text{рез}}$	При $n > n_{\text{рез}}$; $\omega = \omega_{\text{рез}}$
$X_{L(n)} > X_{C(n)}$	$X_{L(n)} > X_{C(n)}$
$I_{L(n)} < I_{C(n)}$	$U_{L(n)} > U_{C(n)}$
$X_{\Sigma} = U/I_{\Sigma}$ - ємнісний опір	X_{Σ} - індуктивний опір
При $n < n_{\text{рез}}$; $\omega = \omega_{\text{рез}}$	При $n < n_{\text{рез}}$; $\omega = \omega_{\text{рез}}$
$X_{L(n)} < X_{C(n)}$	$X_{L(n)} < X_{C(n)}$
$I_{L(n)} < I_{C(n)}$	$U_{L(n)} > U_{C(n)}$
$X_{\Sigma} = U/I_{\Sigma}$ - індуктивний опір	X_{Σ} - ємнісний опір
Примітка: $X_{\Sigma} = jX_L(-jX_C)/jX_L-jX_C = X_L X_C/j(X_L-X_C) = -j(X_L X_C/X_L-X_C)$	Примітка: $X_{\Sigma} = jX_L-jX_C = \pm j(X_L- X_C)$

З векторних діаграм видно, яку небезпеку являють собою схеми, при яких можливі резонанси на частотах п близьких до $\omega_{\text{рез}}$. Зокрема, при резонансі струмів, викликаному напругою частотою рівної або близькій резонансній частоті, у вітках паралельного резонансного контуру виникають надструми, значення яких обмежено тільки активним опором цього контуру. При цьому вхідний опір $X_{\Sigma} = U/I \rightarrow \infty$.

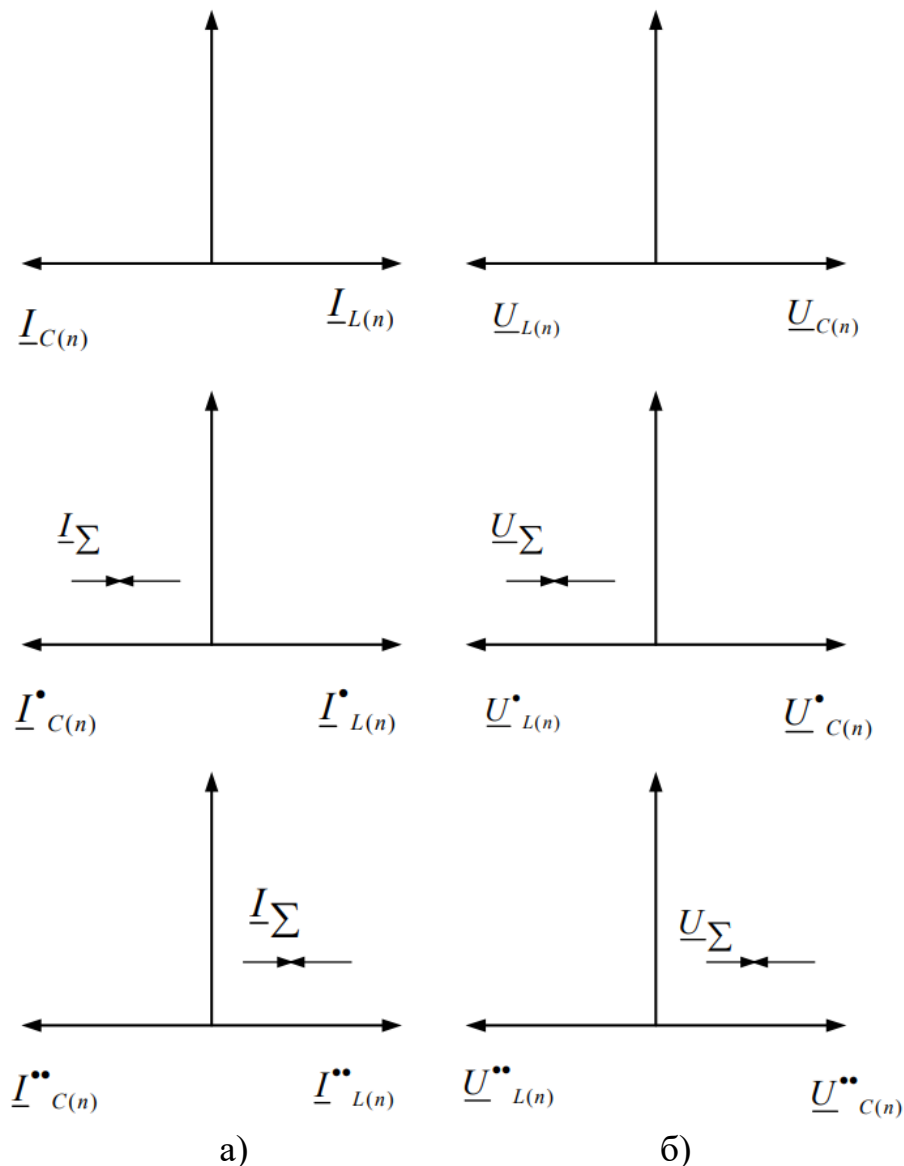


Рисунок 3.2 – Векторні діаграми паралельної (а) і послідовної (б) ланцюгів, утворених опорами $X_{L(n)}$ й $X_{C(n)}$

$I_{\Sigma} = I_{L(n)} - I_{C(n)} = 0$. У разі виникнення резонансу напруг ситуація має зворотний характер. Коли струм проходить через послідовний контур і його

частота наближається або дорівнює резонансній, на індуктивному та ємнісному елементах такого кола виникають значні перенапруги. Вхідний опір такого контуру $X_{\Sigma} \rightarrow 0$ а вхідний струм $I_{\Sigma} = I_{L(n)} - I_{C(n)} = \infty$. Цей принцип широко застосовується у фільтрокомпенсуючих пристроях, параметри яких підбираються так, щоб забезпечити мінімальний повний опір на заданій частоті конкретної гармоніки, що генерується тим чи іншим електроприймачем. Таким чином, створюються умови ефективного поглинання певної гармоніки струму. У випадку довгих повітряних ліній електропередачі високої напруги, які у схемах заміщення подаються з урахуванням розподілених параметрів, резонанс може виникати на різних частотах, що залежить від довжини цих ліній.

У нормально працюючій системі електропостачання, де резонансні умови відсутні, амплітуда гармонічних складових напруги, як правило, зменшується із віддаленням від джерела спотворень. Проте при наявності резонансного режиму можлива зворотна ситуація: рівень несинусоїдальності напруги у віддалених точках мережі може бути навіть вищим, ніж поблизу джерела нелінійного навантаження. У мережах класу 110 кВ і вище поширення вищих гармонік часто супроводжується хвильовими явищами, що здатні суттєво підвищити рівень спотворень як напруги, так і струму. Такі випадки були зафіксовані в окремих регіонах енергосистем Сибіру та Далекого Сходу.

Висновки по розділу 3.

У результаті аналізу резонансних явищ у мережах електропостачання встановлено, що частотна поведінка вхідного опору та конфігурація з'єднань реактивних елементів визначають умови виникнення резонансів струму або напруги, що можуть призвести до небезпечних наслідків – перенапруг, надструмів, відмови обладнання. Зокрема, в мережах високої напруги з довгими лініями передачі, резонанс може виникати на різних частотах і спричиняти накопичення гармонік на значній відстані від джерела. Це підкреслює критичну важливість врахування резонансних умов при проектуванні СЕП для запобігання аномаліям, підвищення надійності та дотримання нормативів якості електроенергії.

4 РОЗПОДІЛ СТРУМІВ І НАПРУГ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМАХ

Актуальність вивчення розподілу струмів і напруг при несиметричних режимах зумовлена зростаючою кількістю нелінійних, однофазних і фазно-небалансованих навантажень у сучасних системах електропостачання, що призводить до порушення симетрії напруг і струмів, зміщення нейтралі, перевантаження окремих фаз та зниження якості електроенергії. Несиметричні режими можуть спричиняти аварійні ситуації, неправильну роботу релейного захисту та скорочення ресурсу обладнання, тому їх своєчасний аналіз і компенсація є критично важливими для забезпечення надійності, безпеки та стабільної роботи електроенергетичних систем [1].

Несиметричні режими в електричних мережах виникають унаслідок пошкоджень однієї або кількох фаз, нерівномірного навантаження, обриву нульового проводу або несиметричної конфігурації ліній [1]. У трифазних системах подібні стани викликають нерівномірний розподіл струмів, спотворення напруги та зсув нейтралі, що негативно впливає на стабільність роботи електрообладнання. Особливо критичним є обрив нульового провідника у мережах з асиметричним фазним навантаженням – у цьому випадку фази можуть працювати під напругою, яка суттєво відрізняється від номінальної, що здатне призвести до перегріву чи пошкодження споживачів.

Класичним інструментом аналізу несиметричних режимів є метод симетричних складових [7], який дозволяє розділити будь-який трифазний несиметричний процес на три незалежні системи: пряму, зворотну та нульову послідовності. Це значно спрощує аналіз і дозволяє точно розрахувати струми та напруги в кожній фазі. У практиці, однак, за відсутності обертових машин або складних елементів можна застосовувати спрощені методики, як показано в розділі – зокрема, для мереж 0,4 кВ з глухозаземленою або ізольованою нейтраллю [7].

Під час вибору методів і засобів компенсації струмів зворотної та нульової послідовностей, як правило, застосовують розрахунок за методом

симетричних складових і аналізують параметри несиметричного режиму на основі вимірювань. У випадках, коли система електропостачання не містить обертових електричних машин, несиметрію можна визначити за спрощеною методикою без побудови схем заміщення для прямих, зворотних і нульових послідовностей [1]. Розглянемо застосування цього підходу для чотирьохпровідних мереж з нульовим провідником (типова система напругою 0,4 кВ), а також для систем з ізольованою нейтраллю.

Чотирьохпровідні мережі з нульовим проводом. Нехай опір джерела дорівнює нулю, його напруги $\underline{U}_A \neq \underline{U}_B \neq \underline{U}_C$ несиметричні й комплексні провідності навантаження рівні $Y_A = Y_B = Y_C$. Знайдемо напруги $\underline{U}_{A01}$, $\underline{U}_{B01}$, $\underline{U}_{C01}$ й струми $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$ у фазах навантаження, а також напруга зсуву нейтралі $\underline{U}_N$ (рис. 4.1).

Напруга $\underline{U}_N = \underline{U}_{0-01}$ в загальному випадку дорівнює:

$$\underline{U}_N = \frac{Y_A \underline{U}_A + Y_B \underline{U}_B + Y_C \underline{U}_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N}. \quad (4.1)$$

При цьому можливі два випадки: $Y_N = \infty$ коли нейтралі джерела й навантаження з'єднані нульовим проводом, і $Y_N = 0$, коли нульовий провід відсутній.

У першому випадку, мабуть, $U_N = 0$ і напруги на фазах навантаження несиметричні й дорівнюють напрузі джерела, або $\underline{U}_{A-01} = \underline{U}_A$, $\underline{U}_{B-01} = \underline{U}_B$, $\underline{U}_{C-01} = \underline{U}_C$. При цьому струми у фазах навантаження також несиметричні:

$$\underline{I}_A = Y_A \underline{U}_A; \quad \underline{I}_B = Y_B \underline{U}_B; \quad \underline{I}_C = Y_C \underline{U}_C; \quad \underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (4.2)$$

У випадку, коли джерело живлення має несиметричну напругу, навіть за умови симетричного навантаження фазні струми стають несиметричними, а струм у нульовому провіднику дорівнює алгебраїчній сумі фазних струмів, що також можна подати як утричі збільшений струм нульової послідовності.

У другому випадку (обрив нульового проводу) $U_N \neq 0$, а $I_N = 0$. Тому:

$$\underline{U}_{A-01} = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_{B-01} = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_{C-01} = \underline{U}_C - \underline{U}_N. \quad (4.3)$$

Напруги на фазах навантаження не рівні відповідним до фазних напруг джерела. Напруга між нульовими точками джерела й навантаження (напруга зсуву нейтралі) дорівнює:

$$\underline{U}_{0-01} = \underline{U}_N = \frac{Y_A \underline{U}_A + Y_B \underline{U}_B + Y_C \underline{U}_C}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (4.4)$$

Струми у фазах навантаження:

$$\underline{I}_A = Y_A (\underline{U}_A - \underline{U}_N); \quad \underline{I}_B = Y_B (\underline{U}_B - \underline{U}_N); \quad \underline{I}_C = Y_C (\underline{U}_C - \underline{U}_N); \quad \underline{I}_N = 0. \quad (4.5)$$

Тому що було прийнято, що $Y_A = Y_B = Y_C$, та з (4.5) випливає, що напруга зсуву нейтралі $\underline{U}_N = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)$ дорівнює напрузі нульової послідовності.

При несиметричній напрузі джерела, симетричному навантаженню й обриві нульового проводу струми у фазах навантаження несиметричні, струм у нульовому проводі дорівнює нулю, а напруга зсуву нейтралі дорівнює напрузі нульової послідовності

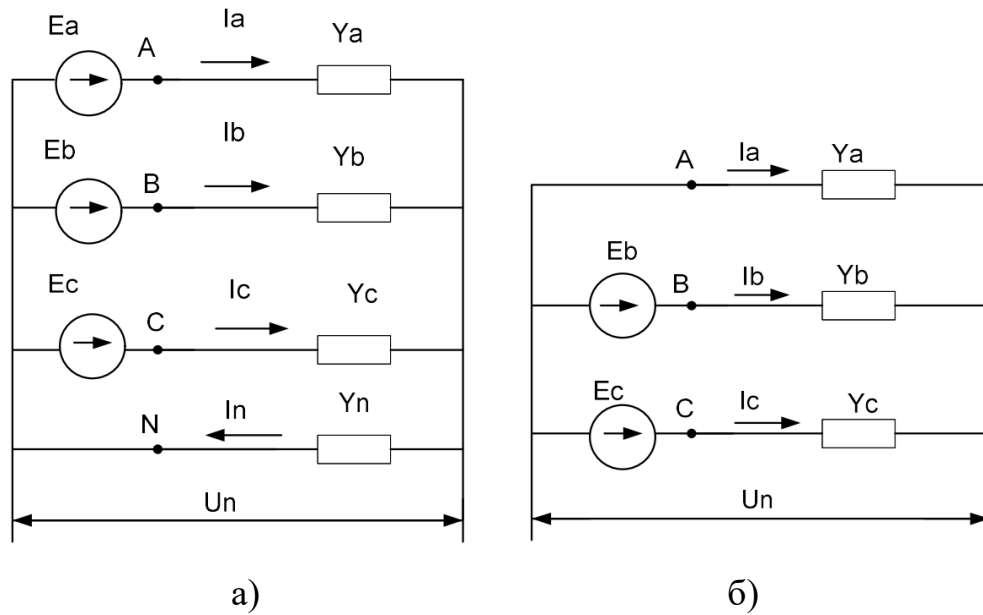


Рисунок 4.1 – а) Схема чотирьохпроводної СЕП із нульовим проводом;
 б) Схема трьохпроводної СЕП без нульового проводу

Струм зворотної послідовності I_2 рівний $I_3 = \frac{1}{3}(I_A + a^2 I_B + a I_C)$.

Трьохпроводні мережі з ізольованою нейтраллю. Для таких мереж сума міжфазних напруг завжди, у тому числі й при $\underline{U}_{AB} \neq \underline{U}_{BC} \neq \underline{U}_{CA}$ дорівнює нулю: $\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0$. Тому, зберігаючи початкову схему, але без нульового проводу, фазні напруги в ній можна замінити міжфазними. Нехай $\underline{E}_B = \underline{U}_{AB}$, $\underline{E}_C = \underline{U}_{CA}$. Тоді розрахункова схема прийме вид, показаний на рис. 4.1.

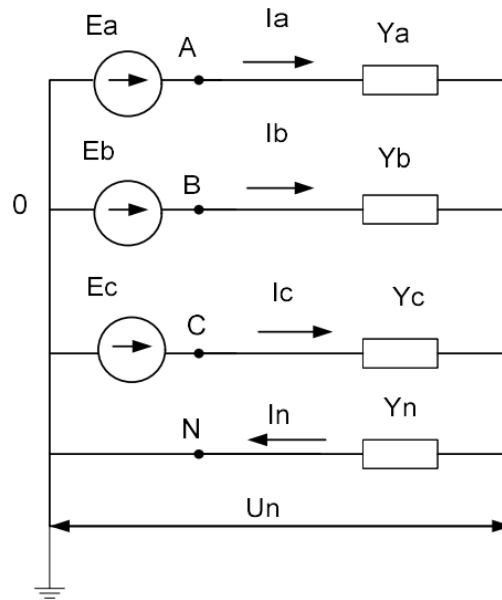


Рисунок 4.2 – Схема чотирьохпровідної СЕП із глухозаземленою нейтраллю

У цьому випадку при несиметричному навантаженні $Y_A \neq Y_B \neq Y_C$ напруга між точками 0 і 0₁ рівно $\underline{U}_N$.

$$\underline{U}_{0-01} = \underline{U}_N = \frac{Y_B \underline{E}_B + Y_C \underline{E}_C}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (4.6)$$

Струми у фазах навантаження становлять:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= -\underline{U}_N Y_A; \quad \underline{I}_B = Y_B (\underline{E}_B - \underline{U}_N) = Y_B (\underline{U}_{AB} - \underline{U}_N); \quad \underline{I}_C = Y_C (\underline{E}_C - \underline{U}_N); \\ \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C &= 0. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Напруги на фазах навантаження несиметричні:

$$\underline{U}_{A-01} = \underline{I}_A / Y_A = -\underline{U}_N; \quad \underline{U}_{B-01} = \underline{I}_B / Y_B = \underline{U}_{AB} - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_{C-01} = \underline{I}_C / Y_C = \underline{U}_{CA} - \underline{U}_N. \quad (4.8)$$

При симетричній $Y_A = Y_B = Y_C$ і однорідному навантаженню, як впливає з (4.6), при $\underline{U}_{AB} \neq \underline{U}_{BC} \neq \underline{U}_{CA}$:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{CA}}{3} = -\frac{\underline{U}_{BC}}{3}. \quad (4.9)$$

При симетричній напрузі джерела $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{BC} = \underline{U}_{CA}$ напруга $\underline{U}_N$ між точками 0 і 0₁ слід визначати через фазні напруги $\underline{E}_A = \underline{E}_B = \underline{E}_C$ (рис. 4.2). Тоді можна записати:

$$\underline{U}_N = \frac{Y_A \underline{E}_A + Y_B \underline{E}_B + Y_C \underline{E}_C}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (4.10)$$

Враховуємо, що $\underline{E}_B = a^2 \cdot \underline{E}_A$ та $\underline{E}_C = a \cdot \underline{E}_A$, звідсти:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{E}_A (Y_A + a^2 Y_B + a Y_C)}{Y_A + Y_B + Y_C}. \quad (4.11)$$

Тоді при $Y_A = Y_B = Y_C$ напруга на нейтральному проводі рівною:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{E}_A}{3} (1 + a^2 + a) = 0. \quad (4.12)$$

Напруги на фазах навантаження дорівнюють фазним напругам джерела.

У сучасних умовах, коли зростає частка нелінійних і фазно-нестабільних навантажень (зарядні пристрої, ІТ-обладнання, інверторні джерела), зростає і ризик частих короточасних несиметричних режимів. Це вимагає не тільки ретельних розрахунків, але й постійного моніторингу фазних струмів та напруг, особливо в розподільних мережах. Застосування цифрових реле, АСКОЕ та систем керування з компенсацією несиметрії є ефективним шляхом покращення якості електропостачання.

Висновки по розділу 4.

Несиметричні режими в СЕП мають суттєвий вплив на якість електроенергії та роботу електрообладнання. Їх виникнення супроводжується нерівномірним розподілом струмів і напруг у фазах, а також появою струмів зворотної та нульової послідовностей, які вимагають компенсації. Для аналізу таких режимів використовують як класичні методи симетричних складових, так і спрощені розрахункові підходи, залежно від типу мережі. Забезпечення надійного функціонування систем в умовах несиметрії можливе лише за умови правильного вибору способів компенсації та застосування сучасних засобів моніторингу та регулювання.

5 ВПЛИВ ЯЕ НА ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У сучасних електроенергетичних системах, де зростає частка нелінійних, несиметричних та нестабільних навантажень, питання впливу якості електроенергії на втрати стає надзвичайно важливим [1]. Відхилення напруги, частоти, поява гармонік та фазної несиметрії не лише погіршують технічний стан обладнання, але й спричиняють зростання як технічних, так і комерційних втрат. З огляду на розвиток відновлюваних джерел енергії, електрифікацію транспорту й посилення вимог до енергоефективності, необхідність точного аналізу та врахування додаткових втрат, спричинених погіршенням якості електроенергії, є критичною для забезпечення надійної та економічно доцільної роботи електричних мереж.

Показники якості електроенергії, зокрема коливання напруги та частоти, несинусоїдальність, а також несиметрія фазних напруг і струмів, мають безпосередній вплив на величину втрат активної потужності та електроенергії в електричних мережах [1].

Для обчислення звітних втрат електроенергії (ΔW) враховують сукупність технічних, технологічних і комерційних втрат. Ці втрати визначають як різницю між обсягом електроенергії, що надійшла в мережу ($W_{o.c}$), та кількістю енергії, яку споживачі отримали й оплатили ($W_{o.p}$).

До технічних втрат ΔW_T відносяться витрати на власні потреби підстанцій ($W_{вп}$), а також втрати, пов'язані з неточностями вимірювального обладнання ($W_{вим}$). У сукупності вони формують технологічні втрати, які зумовлені особливостями процесу транспортування електроенергії та функціонуванням системи обліку. Комерційні втрати (ΔW_k) розраховуються за формулою:

$$\Delta W_k = \Delta W - \Delta W_T - \Delta W_{вп} - W_{вим} \quad (5.1)$$

І включають у себе вплив суб'єктивних чинників – крадіжки, часткову або повну несплату за спожиту електроенергію, а також інші недообліковані обсяги.

У складі технологічних втрат можна умовно виділити додаткові компоненти, що виникають внаслідок відхилення режимів роботи електрообладнання та засобів вимірювання від їхніх номінальних або нормативно визначених значень. Однією з основних причин таких відхилень є погіршення якості електроенергії (ЯЕ). Воно не лише впливає на технологічні, а й спричиняє додаткові комерційні втрати. Йдеться про обсяг електроенергії, параметри якої не відповідають вимогам стандартів або умовам договору з енергопостачальною організацією, тому споживач має право її не оплачувати. Проте наразі така частина втрат, як правило, не враховується при розрахунках за електроенергію.

Щоб краще зрозуміти механізм формування додаткових технологічних втрат у режимах із викривленням форми сигналу та несиметрією фаз, необхідно проаналізувати енергетичний баланс у мережі. На рис. 5.1 подано спрощену структурну схему системи електропостачання, що включає як лінійне (неспотворююче), так і нелінійне (спотворююче) навантаження. Останнє, споживаючи енергію на основній (фундаментальній) частоті прямої послідовності, частково перетворює її на енергію спотворень – тобто генерує гармонійні складові, струми зворотної та нульової послідовностей, які повертаються у мережу. Це явище призводить до додаткових втрат потужності в елементах системи.

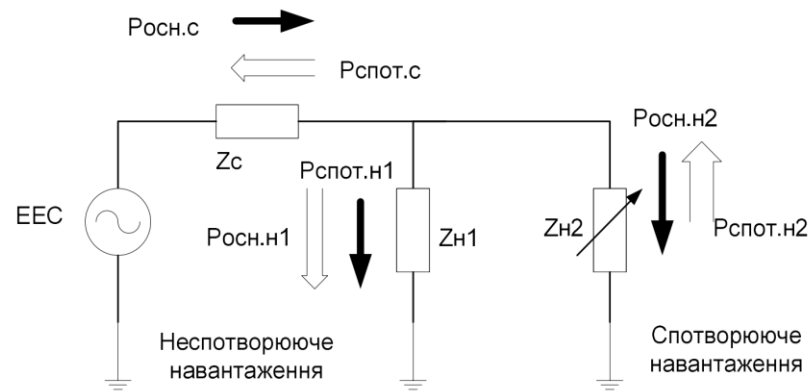


Рисунок 5.1 – Напрямок активних потужностей у системі при спотворюючому навантаженні

Z_c , $Z_{н1}$, $Z_{н2}$ – опір відповідно енергосистем, що неспотворюючого і спотворюючого навантаження; $P_{осн.с}$, $P_{осн.н1}$, $P_{осн.н2}$ – активні потужності на основній частоті прямої послідовності відповідно енергосистеми, неспотворюючого і спотворюючого навантаження; $P_{спот}$, $P_{спот.н1}$, $P_{спот.н2}$ – активні потужності спотворень, обумовлені режимами роботи спотворюючого навантаження.

Складові потужності визначаються за струмами і напругами вищих гармонік і симетричних складових:

– для чотирьохпроводних мереж (фазні струми й напруги):

$$P_1 = \sqrt{3}U_1I_1\cos\varphi_1; \quad P_2 = 3U_2I_2\cos\varphi_2; \quad P_0 = 3U_0I_0\cos\varphi_0; \quad P_{n\Sigma} = \sum_{ABC} \sum_{n=2} U_n I_n \cos\varphi_n. \quad (5.2)$$

– для трьохпроводних мереж (лінійні струми й напруги):

$$P_1 = \sqrt{3}U_1I_1\cos\varphi_1; \quad P_2 = \sqrt{3}U_2I_2\cos\varphi_2; \quad P_{n\Sigma} = \sum_{n=2} \sqrt{3}U_n I_n \cos\varphi_n. \quad (5.3)$$

Розрахунки й аналіз втрат проводяться на відповідній частоті гармоніки або послідовності симетричної складової. Активна складова потужності

характеризує необоротні перетворення електричної енергії в інші види енергії й при несинусоїдних і несиметричних струмах і напругах у трифазній системі рівна:

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_{n\Sigma} + P_2 + P_0. \quad (5.4)$$

Прийнявши, що енергія вищих гармонік і зворотної (нульової) послідовності практично не робить корисної роботи, для довільного електроприймача або фрагмента електричної системи додаткові втрати потужності потрібно розглядати як суму потужностей спотворень:

$$\Delta P_{\text{доп}} = P_{n\Sigma} + P_2 + P_0. \quad (5.5)$$

Навантажувальні втрати активної потужності ΔP_H в елементі мережі з опором r залежать від напруги U :

$$\Delta P_H = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} r. \quad (5.6)$$

де P і Q – активна й реактивна потужність [1].

Втрати холостого ходу ΔP_x в елементі можна визначити $\Delta P_x \approx U_n^2 g$.

де U_n – напруга на елементі (лінії, компенсувальні пристрої і т.п.) або на стороні вищої напруги трансформатора; g – провідність елемента.

Як випливає з (5.5) – (5.6) для зниження навантажувальних втрат необхідно підвищувати напругу, а для зниження втрат холостого ходу – знижувати напругу.

Оптимальні рівні напруг, які забезпечують мінімальні втрати в електроенергетичній системі, залежать від конфігурації мережі та режимів її функціонування на всіх рівнях напруги. У мережах із класом напруги 110 кВ і вище основні втрати під навантаженням можуть бути співмірними з втратами

холостого ходу та кліматичними втратами. Водночас у мережах середньої напруги (6–35 кВ) переважають втрати саме холостого ходу та вплив погодних умов.

Коли напруга в мережі залишається близькою до синусоїдальної форми (коефіцієнт спотворення $K_U < 5 \%$), додаткові технічні втрати є незначними. Проте при підвищенні рівня гармонічних спотворень до 7–15 % внесок втрат від вищих гармонік може сягати 10–12 % від загальних втрат потужності. У мережах, що живлять об'єкти електрифікованого залізничного транспорту, ці втрати можуть досягати 10–15 % у порівнянні з втратами на основній частоті. Найбільший вплив гармонік на втрати проявляється в умовах резонансу, коли окремі частоти підсилюються характеристиками елементів системи.

Крім того, несиметрія напруги також сприяє зростанню втрат у всіх елементах мережі. Це зумовлено появою струмів зворотної та нульової послідовностей, які додатково навантажують систему. Наприклад, при рівні несиметрії $K_{2U} = 2 \%$ додаткові втрати в обмотках асинхронного двигуна становлять близько 8 % від основних втрат прямої послідовності. При зростанні $K_{2U} = 5 \%$ ці втрати можуть досягати 50 % основних. Отже, при оцінюванні ефективності передачі та розподілу електроенергії в умовах погіршеної якості необхідно враховувати додаткові втрати, що виникають внаслідок гармонік і несиметрії напруги.

Висновки по розділу 5.

В результаті аналізу впливу якості електроенергії на виникнення додаткових втрат встановлено, що погіршення якості електроенергії суттєво впливає на зростання втрат у системах електропостачання. Гармонічні спотворення та несиметрія напруги викликають появу додаткових струмів, які циркулюють у мережі та спричиняють втрати активної потужності, що не перетворюється на корисну роботу. Особливо це помітно в умовах резонансних режимів або в мережах, що живлять складні навантаження, наприклад, тягові підстанції. Для зменшення таких втрат необхідно забезпечити відповідність

напруги нормативним параметрам, знизити рівень спотворень і несиметрії, а також правильно вибирати режими роботи та структуру мережі. Врахування додаткових втрат у розрахунках ефективності та приєднання нових навантажень дозволяє підвищити загальну енергоефективність системи.

6 ВПЛИВ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГ І СТРУМІВ НА ПРИЛАДАХ ОБЛІКУ

У сучасних електроенергетичних мережах зростає частка нелінійних споживачів, які створюють гармонічні спотворення напруги та струму. Це суттєво впливає на точність комерційного обліку електроенергії, особливо у випадках застосування індукційних та деяких типів електронних лічильників [5]. Несинусоїдальність викликає систематичні похибки в показах обліку: споживачі, які створюють спотворення, недоплачують, тоді як ті, хто отримує неякісну електроенергію – переплачують. Така ситуація призводить до економічних втрат у масштабах енергосистеми, знижує прозорість розрахунків і викликає потребу у впровадженні більш точних, мікропроцесорних приладів обліку [7]. Тому дослідження впливу несинусоїдальності на точність енергетичного обліку є надзвичайно актуальним як з технічної, так і з економічної точки зору.

Сучасні прилади для обліку електроенергії можна умовно поділити за типом елементної бази, на якій вони побудовані, а також за принципом вимірювання, що використовується для фіксації спожитої енергії. На рисунку 6.1 представлена узагальнена класифікація таких приладів. Ступінь впливу параметрів якості електроенергії (ЯЕ) на роботу облікових пристроїв залежить від конкретного типу та класу точності приладу.

Як уже зазначалося, у разі обліку активної потужності споживача з нелінійним навантаженням ($P_{\text{нл}}$) в електричній мережі виникають два протилежно спрямовані потоки потужності, що ускладнює точність вимірювання.

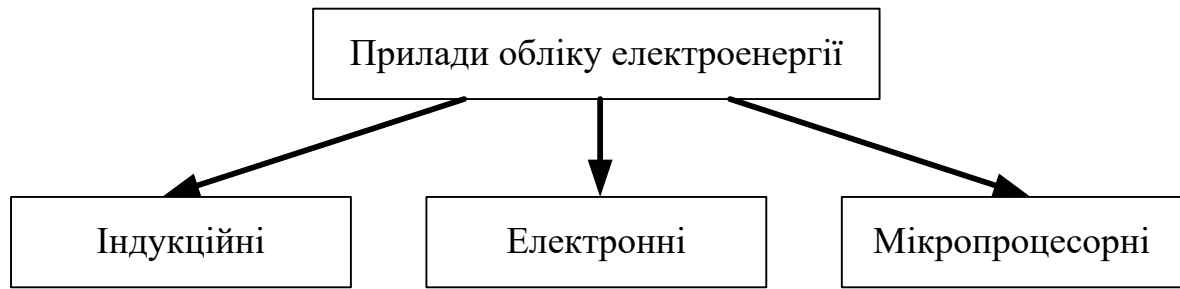


Рисунок 6.1 – Класифікація приладів обліку електроенергії

Потужність, споживана з мережі P_1 , і потужність вищих гармонік $\sum P_{(n)}$.

Нелінійне навантаження потужністю $P_{нл}$ є джерелом вищих гармонік, тому:

$$P_{нл} = P_1 - \sum_2^n P_n. \quad (6.1)$$

Лінійне навантаження при несинусоїдальній напрузі можна визначити:

$$P_{л} = P_1 - \sum_2^n P_n. \quad (6.2)$$

Частотна характеристика похибки індукційного лічильника на частоті n -й гармоніки апроксимується виразу $\gamma_n = \alpha[\exp(\beta n) - 1]$, де $\alpha = 1,28$ і $\beta = 1,19$ (рис. 6.2) [11].

Згідно з відповідною характеристикою та виразом (6.1), у разі обліку електроенергії, яку споживає нелінійне навантаження, спостерігається певне завищення обліку (переоблік). У свою чергу, для лінійних навантажень, що працюють при несинусоїдальній напрузі, згідно з виразом (6.2), має місце заниження показів (недооблік). Це означає, що при використанні індукційних лічильників у точці комерційного обліку споживач із спотворюючим навантаженням фактично оплачує не лише свою спожиту енергію, а й погіршення якості електроенергії у мережі. Водночас у масштабах всієї

енергосистеми баланс між переобліками та недообліками, як правило, не досягається.

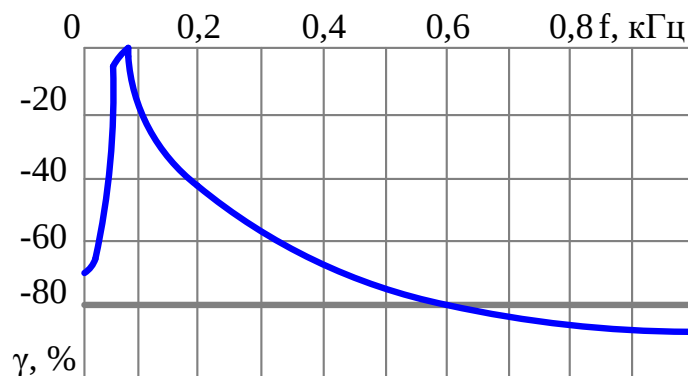


Рисунок 6.2 – Частотна характеристика індукційного лічильника

Електронні й мікропроцесорні прилади обліку, на відміну від індукційних, ураховують напрямок потужностей вищих гармонік у точці обліку. І приводяться результати випробувань електронних і цифрових приладів обліку. Випробовувалися лічильники різних типів: Альфа А1Т-3-00С1-Т, Євроальфаеа05 11 АТзРЗз3, ЦЕ568055В, СЕтза-01-01, СТЕ-560, «Меркурій-2002», СЕБ-2А.00.2, СЕБ-2А.05.2. До симетричних сигналів струмів і напруг основної частоти додавалися сигнали струмів і напруг п'ятої й сьомий гармонік при різних комбінаціях амплітуд і фаз. Зміни амплітуди й фаз вищих гармонік проявлялися в зміні знаків їх потужностей.

Згідно з рисунком 6.2 та формулами (6.1) і (6.2), знак активної потужності певної гармоніки у точці вимірювання може свідчити про розташування головного джерела спотворень у системі. Спираючись на це положення, в роботі [10] експериментально встановлено, що покази електронних і цифрових лічильників у колі з навантаженням, яке генерує гармоніки, виявляються нижчими за фактично спожиту енергію на основній частоті – саме на величину, що дорівнює сумі енергії вищих гармонік. І навпаки: якщо до джерела напруги з несинусоїдальними характеристиками підключити лінійне навантаження, прилади фіксують завищене споживання – через додаткову енергію гармонічних спотворень, що надходить із системи живлення. Таким чином,

споживач, який є джерелом гармонік, фактично оплачує менше, ніж спожив енергії, а той, хто отримує неякісну електроенергію, – переплачує.

У результаті, при функціонуванні обліку в умовах несинусоїдального режиму, виникають суттєві похибки. За оцінками, вони можуть сягати 5–6 %. Проте, за даними багатьох вимірювань показників якості електроенергії та складових потужності в системах напругою від 0,4 до 500 кВ, де присутні нелінійні навантаження, встановлено: у більшості випадків активна потужність вищих гармонік у точках комерційного обліку не перевищує 0,5 % потужності основної частоти.

Для прикладу, на підприємстві з живленням 10 кВ, де спостерігались значення $K_U = 7\text{--}16\%$ і $K_I = 2,5\text{--}8,5\%$ (домінували 11-та і 13-та гармоніки), сумарна активна потужність вищих гармонік $P_{\Sigma n}$ становила лише 0,017–0,22 % від основної. Проте при потужності кожного вводу 40–60 МВт і використанні сучасних цифрових лічильників класу точності 0,2, навіть така незначна частка спотвореної енергії може призвести до щорічних недоотримань енергопостачальною компанією на мільйони гривень.

Рішенням цієї проблеми є впровадження мікропроцесорних лічильників нового покоління, які здатні окремо враховувати енергію основної частоти та вищих гармонік. На українському ринку такі пристрої вже доступні, і їх використання дозволяє суттєво підвищити точність розрахунків за електроенергію в умовах спотворень.

Слід враховувати, що похибки приладів обліку в умовах несинусоїдальності не є постійними й можуть змінюватися залежно від спектру гармонік, співвідношення активної та реактивної потужності, а також фазового зсуву між напругою і струмом кожної гармоніки. Наприклад, одна й та сама амплітуда п'ятої гармоніки може по-різному впливати на похибку залежно від того, в якій фазі вона перебуває відносно основної частоти. Це ускладнює прогнозування точності обліку та робить важливою попередню гармонійну оцінку приєднань нових навантажень.

Крім того, деякі сучасні прилади обліку, хоча й побудовані на цифровій елементній базі, не завжди підтримують точне розділення енергії за гармоніками. Тобто не всі "цифрові лічильники" однаково ефективні при роботі в умовах спотвореної напруги. Тільки спеціалізовані багатофункціональні облікові пристрої з розширеним спектральним аналізом можуть забезпечити коректний розрахунок енергії з урахуванням гармонічного складу. Це важливо при реалізації принципу «оплата тільки за корисну енергію», де оплата має здійснюватися лише за енергію на основній частоті, а енергія гармонік – або не тарифікується, або відображається окремо.

Висновки по розділу 6.

У результаті аналізу впливу несинусоїдальності напруг і струмів на прилади обліку встановлено, що спотворення форми сигналу суттєво впливають на точність комерційного обліку електроенергії. Індукційні лічильники можуть як занижувати, так і завищувати покази залежно від характеру навантаження, що призводить до фінансових втрат або несправедливого розподілу витрат між споживачами. Навіть незначна частка енергії вищих гармонік може спричинити суттєві недоотримання коштів енергопостачальними організаціями при живленні потужних споживачів. Використання сучасних мікропроцесорних лічильників, здатних окремо враховувати енергію основної частоти та гармонік, є ефективним рішенням для підвищення точності обліку в умовах спотвореного електричного середовища.

7 ВПЛИВ СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ ДО 1000 В

У сучасних мережах електропостачання напругою до 1000 В система заземлення є не лише засобом електробезпеки, а й фактором, що впливає на ПЯЕ у точках загального приєднання [3]. Даний вплив стає помітний в умовах використання нелінійних навантажень, імпульсних джерел живлення, частотних перетворювачів та автоматизованих систем керування. Неправильний вибір або реалізація системи заземлення може призвести до несиметрії напруг, зсуву нейтралі, появи вищих гармонік, імпульсних перешкод, а також некоректної роботи чутливого обладнання.

Найпоширенішими системами заземлення в мережах низької напруги є TN-C, TN-S, TN-C-S, TT та IT. У системі TN-C (рис. 7.1), де нульовий і захисний провідник об'єднані в PEN, накопичення гармонічних струмів, особливо кратних третій гармоніці, може призводити до викривлення напруги, флуктуацій потенціалу нейтралі та збоїв у роботі електроніки. У разі порушення контакту PEN-провідника можливий зсув нейтралі, що створює небезпечну несиметрію фазних напруг і перевищення допустимих рівнів K_{2U} та K_U [3].

Системи TN-S та TN-C-S, завдяки розділенню захисного та робочого нульових провідників, мають покращені умови для електромагнітної сумісності та знижують імовірність появи потенціалів на оболонках обладнання. Проте у випадках поганого контакту з контуром заземлення може спостерігатися зростання напруги відносно землі, що негативно впливає на якість електроенергії.

У системах IT, де нейтраль ізольована від землі, номінальні умови роботи характеризуються високою симетрією та низьким рівнем струмів витоку. Однак при виникненні однофазного замикання на землю напруга на неушкоджених фазах зростає до рівня міжфазної, що може призвести до перенапруг, порушення ізоляції та появи імпульсних перешкод. Водночас відсутність

каналів витоку гармонік у землю сприяє їх накопиченню, що підвищує ризик резонансних явищ у ТЗП.

У системах ТТ якість електроенергії значною мірою залежить від опору заземлювального пристрою. Якщо цей опір великий, то імпульсні перенапруги не розсіюються ефективно, а повертаються в мережу, погіршуючи ПЯЕ. Також збільшується напруга зсуву нейтралі, що створює умови для несиметричних режимів, особливо в однофазних приєднаннях.

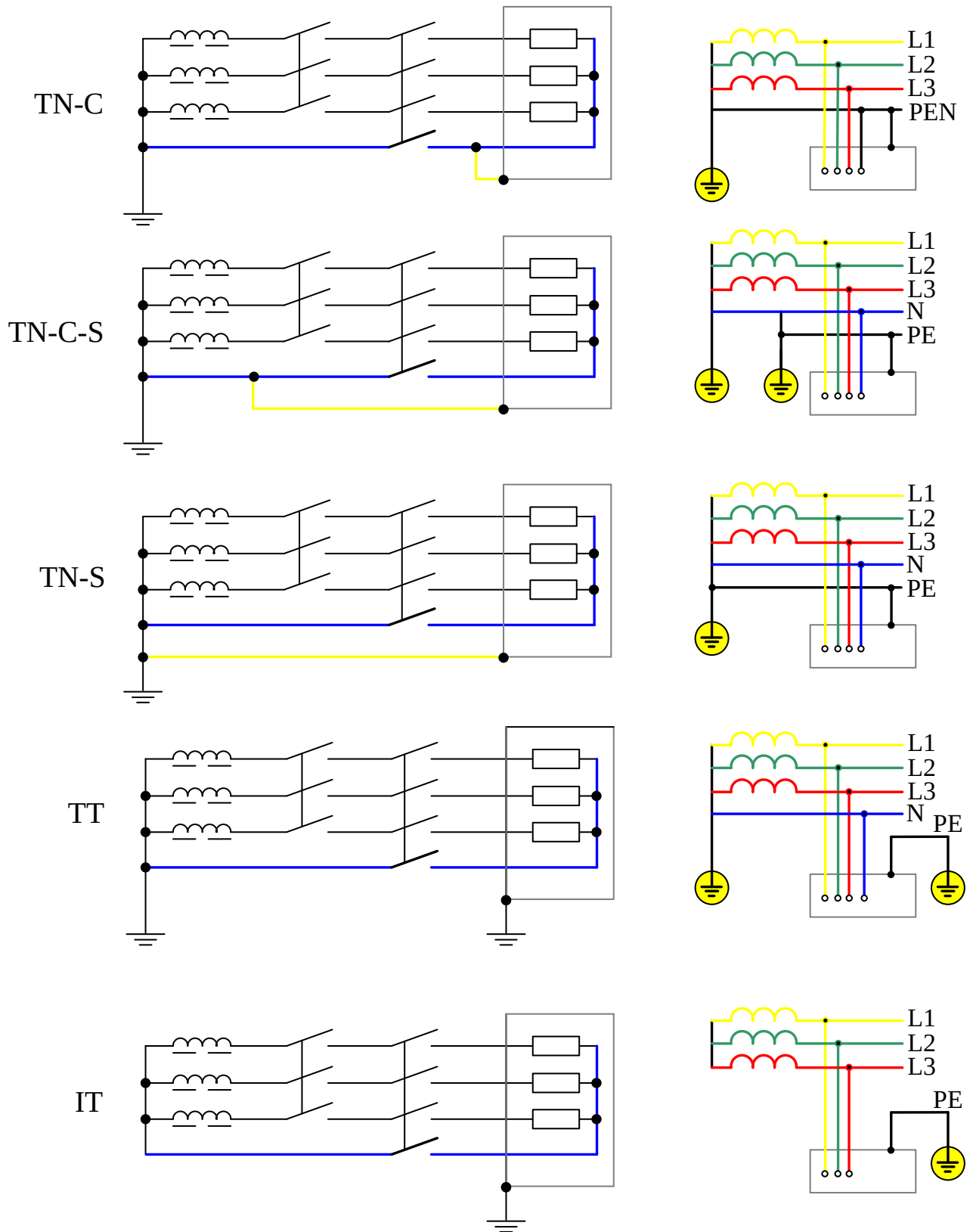


Рисунок 7.1 – Основні системи заземлення мережі напругою до 1000 В

Важливо також враховувати вплив типу заземлення на розповсюдження струмів нульової послідовності. У глухозаземлених системах ці струми мають

замикання через нейтраль трансформатора, тоді як у ізольованих вони обмежені ємнісними струмами витоку. Це впливає на формування напруги в ТЗП, особливо при комбінованому або динамічному навантаженні.

В таблиці 7.1 представлено порівняльний аналіз систем заземлення та їх вплив на якість електроенергії в мережі їх застосування.

Таблиця 7.1 – Аналіз впливу заземлення на ПЯЕ

	Характеристика	TN-C	TN-S	TN-C-S	TT	IT
1	Коротка характеристика	Нульовий і захисний провідник об'єднані в один PEN-провідник	Окремі нульовий (N) і захисний (PE) провідники по всій довжині мережі	Комбінована система: PEN у вводі, розділення на N і PE у розподільчому	Нейтраль джерела заземлена, а корпуси споживачів — окремо	Нейтраль джерела ізольована або заземлена через опір/індуктивність
2	Особливості	Проста у реалізації, застаріла, не рекомендується для нових мереж	Найбезпечніша і стабільна система для користувачів	Поширена в Україні, компроміс між TN-C та TN-S	Незалежне заземлення споживача, чутливе до опору заземлювача	Забезпечує роботу при однофазному замиканні на землю
3	Переваги	Низька вартість, мінімальна кількість провідників	Висока надійність, ефективний захист, мінімальні електромагнітні завади	Помірна вартість, прийнятний рівень захисту	Зменшення впливу системних порушень на користувача	Безперервність живлення, мінімальні аварійні відключення
4	Недоліки	Поганий захист при обриві PEN, високий ризик перенапруги на корпусах	Вища вартість у порівнянні з TN-C, потребує більшої кількості провідників	Можливість циркуляції струмів у PE та N, проблеми при неправильному	Необхідність ПЗВ, поганий контроль над струмами витоку	Складна схема контролю ізоляції, потребує спеціального обслуговування
5	Вплив на якість електроенергії в ТЗП	Підвищений рівень несиметрії напруг, високий ризик перешкод через струми у PEN	Забезпечує найкращі показники ПЯЕ, мінімум несиметрії та	Краще за TN-C, але може виникати несиметрія та потенційне перенапруження	Можливі імпульсні перенапруги, нестабільність рівня потенціалу в ТЗП	Можливе накопичення гармонік, зниження ПЯЕ при тривалих
6	Типові області застосування	Старі житлові будинки, тимчасові споруди	Нові житлові комплекси, офіси, лікарні	Реконструкція мереж, багатоповерхові будинки	Сільське господарство, дачі, автономні об'єкти	Медустанови, гірничі виробки, серверні кімнати

Визначення величини, на яку система заземлення мережі напругою до 1000 В впливає на спотворення якості електроенергії (ЯЕ), є складним завданням, що залежить від багатьох факторів: типу системи заземлення, характеру навантаження, параметрів мережі, симетрії та наявності гармонік. Прямого універсального коефіцієнта чи формули не існує, однак існують розрахункові підходи та індикатори, що дозволяють кількісно оцінити вплив.

Система заземлення впливає на ЯЕ через:

- напругу зсуву нейтралі (при несиметрії фазних навантажень);
- струми нульової послідовності, що можуть циркулювати в мережі;
- наявність вищих гармонік у заземлювальному провіднику або на шинах нульової фази;
- імпульсні перешкоди, які виникають при комутації або пробоях.

Отже, при проектуванні, реконструкції або аналізі систем електропостачання до 1000 В необхідно враховувати тип системи заземлення як фактор, що прямо впливає на показники якості електроенергії. А саме таким показникам, як: забезпечення симетрії напруг, мінімізації струмів нульової та зворотної послідовностей, а також уникненню умов для виникнення резонансів. Доцільно обрана й технічно реалізована система заземлення є суттєвим фактором для підтримки нормативного рівня ПЯЕ в розподільних мережах низької напруги.

Висновки по розділу 7.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що тип системи заземлення мережі напругою до 1000 В впливає на показники якості електроенергії в мережі їх приєднання. Заземлення може впливати на рівень симетрії напруг, зсув нейтралі, розповсюдження гармонік та імпульсних перешкод, а також умови протікання струмів нульової послідовності. Системи типу TN-C найбільш чутливі до викривлень напруги та струмів через об'єднаний PEN-провідник, тоді як TN-S і TT за належного виконання забезпечують кращу електромагнітну сумісність. ІТ-системи мають високу стабільність при нормальній роботі, але підвищену чутливість до аварій. Отже, правильний вибір і реалізація системи заземлення впливає на забезпечення нормативного рівня ПЯЕ відповідно до вимог ДСТУ EN 50160:2014.

8 РОЗРАХУНОК ПРИПУСТИМОГО ВНЕСКУ СПОЖИВАЧА ПО ПЯЕ

Актуальність теми розрахунку припустимого внеску споживача в показники якості електроенергії зумовлена зростанням кількості нелінійних і чутливих до якості живлення електроприймачів, а також жорсткістю вимог до електромагнітної сумісності в сучасних системах електропостачання. Недостатній контроль за внеском окремих споживачів у рівень гармонік, несиметрії або флікерів може призвести до порушення нормативів у точках загального приєднання, аварійного відключення обладнання, хибного спрацювання автоматики та втрати достовірності обліку електроенергії [6]. Саме тому визначення і нормативне обмеження припустимого впливу кожного споживача є критично важливим для забезпечення стабільної та надійної роботи мережі, технічного обґрунтування приєднань і укладання договорів між сторонами енергетичного ринку.

Під час аналізу взаємодії між конкретним споживачем і енергопостачальною компанією у контексті визначення межі балансової відповідальності (точки контролю), систему електропостачання доцільно розглядати як дві окремі підсистеми. При цьому інші споживачі умовно вважаються частиною енергопостачального боку. Відповідно до чинних рекомендацій, припустимий внесок кожної з підсистем у показники якості електроенергії (ПЯЕ) у точці приєднання визначається за наступним розрахунком:

$$ПВ = C_n (d_n d_{ПЯЕ})^{1/\alpha}. \quad (8.1)$$

де C_n – нормоване значення ПЯЕ для споживача розглянутої мережі;

d_n – відношення дозволеної потужності споживача до пропускної здатності мережі в точці контролю;

$d_{\text{ПЯЕ}}$ – частка нормованого значення ПЯЕ, розглянута як сумарний внесок споживачів, що живляться від розглянутої точки, інша частина вважається припустимим внеском енергопостачальної організації;

a – показник ступеня, що характеризує порядок додавання векторів викривлення, чисельні значення якого наведено в табл. 8.1.

При розрахунку ПВ у коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності приймають $d_{\text{ПЯЕ}}=1$.

При розрахунку ПВ у коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності, коефіцієнт викривлення синусоїдності кривої напруги й коефіцієнт n -ї гармонічної складової напруги значення $d_{\text{ПЯЕ}}$ визначають за формулою:

$$d_{\text{ПЯЕ}} = \frac{1}{1 + \frac{S_{\text{кН}}}{S_{\text{кВ}}}}. \quad (8.2)$$

де $S_{\text{кН}}$ – потужність трифазного короткого замикання в точці контролю;

$S_{\text{кВ}}$ – те ж, у точці приєднання розглянутої мережі до мережі високої напруги.

Таблиця 8.1 – Значення показника ступеня a

Показник якості електроенергії	Значення a
Коефіцієнти несиметрії напруг по зворотній і нульовій послідовності	2
Коефіцієнти несиметрії напруг по зворотній і нульовій послідовності	
$n = 3, 5, 7$	1
$n = 9, 11, 13$	1,4
$n > 13$ (непарне)	2
$n = \text{парне}$	2
Коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги, створюваної іншими ЕП (не перетворювачами) при будь-якому n	2
Коефіцієнт викривлення синусоїдності кривої напруги, створюваний гармоніками:	
6-пульсних перетворювачів і тиристорних регуляторів напруги	1,3
12-пульсних перетворювачів	1,6
інших ЕП	2
Доза флікера	1

Пропускну здатність електричної мережі, від якої здійснюється живлення споживача з шин центру живлення енергопостачальної організації, приймають за такими умовами:

- якщо споживач підключений до однострансформаторної підстанції, то використовується номінальна потужність трансформатора, встановленого в центрі живлення;

- для двотрансформаторної підстанції з увімкненим міжсекційним вимикачем пропускну здатність приймають на рівні 70% від сумарної номінальної потужності;

- якщо споживач живиться від однієї секції підстанції з вимкненим міжсекційним вимикачем, беруть 70% номінальної потужності одного

трансформатора, а при живленні від обох секцій – розрахунок проводиться окремо для кожної секції з урахуванням навантаження, яке на неї припадає.

У випадку трьохобмоткового трансформатора розрахунок здійснюється окремо для шин середньої та низької напруги, з урахуванням припустимого навантаження на кожній з них. Якщо точка оцінювання якості електроенергії розташована на шинах високої напруги підстанції, що належить споживачеві, то за основу беруть пропускну здатність тієї мережі, до якої ця підстанція підключена. При живленні від шин генераторної напруги пропускна здатність визначається як сумарна встановлена потужність генераторів, що використовуються для місцевих навантажень. У разі, якщо встановлена генераторна потужність менша за сумарне навантаження споживачів, до уваги береться також потужність трансформаторів, які з'єднують електростанцію з енергосистемою.

Для складніших схем живлення значення пропускної здатності мережі визначається енергопостачальною організацією, яка має надати споживачу обґрунтовані дані. Показник ступеня α відображає принцип комбінування гармонічних викривлень для електроприймачів одного типу. Якщо джерела гармонік мають різну природу, при розрахунку припустимого внеску (ПВ) у загальний коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги необхідно враховувати усереднене значення показника α , що обчислюється за спеціальним виразом:

$$\alpha = 1,3 \cdot d_6 + 1,6 \cdot d_{12} + 2 \cdot d_{\Pi}. \quad (8.3)$$

Для коефіцієнта гармонічної складової n -го порядку показник α визначають за формулою:

$$\alpha = \alpha_n \cdot (d_6 + d_{12}) + 2 \cdot d_{\Pi}. \quad (8.4)$$

де d_6 , d_{12} і d_{Π} – частки навантаження 6- і 12-пульсних перетворювачів і інших спотворюючих електроприймачів у сумарному навантаженні ($d_6 + d_{12} + d_{\Pi} = 1$);

a_{Π} – значення a , що відповідає електроприймачів розглянутій гармонічній складовій, створюваної перетворювачами.

При відсутності даних про структуру ЕП вищі гармоніки, що генеруються, приймають:

– під час обчислення припустимого внеску (ПВ) у загальний коефіцієнт спотворення синусоїдальної форми напруги зазвичай використовують значення показника ступеня $a=1,3$;

– якщо ж розрахунок стосується окремої n -ї гармонічної складової, то значення a обирають відповідно до характеристик гармоніки, яку створюють конкретні перетворювальні пристрої.

Параметри якості електроенергії, що передається між енергопостачальними організаціями через міжсистемні або міжмережеві з'єднання, регламентуються положеннями, зафіксованими в договірних угодах між сторонами. Фактична якість електроенергії в точці продажу визначається сукупним впливом навантажень та електрообладнання, що належать обом сторонам. Для кожної зі сторін встановлюються припустимі рівні внеску в значення гармонічних складових напруги, загальний коефіцієнт викривлення синусоїдальності та показник несиметрії по зворотній послідовності, які визначаються відповідною розрахунковою формулою:

$$\text{ПВ} = \Pi_{\text{H}} d_{\text{ПЯЕ}}^{1/\alpha}. \quad (8.5)$$

де $d_{\text{ПЯЕ}}$ – частка ГПСУ, яка виноситься на розглянуту сторону (при відсутності даних для її визначення приймають $d_{\text{ПЯЕ}} = 0,5$).

Для споживачів, відношення дозволеної потужності яких до пропускної здатності мережі в точці приєднання $d_{\text{ПЯЕ}} \leq 0,2$, припустимий внесок

рекомендується виражати у вигляді припустимого значення струму (потужності) викривлення, що відповідає розглянутому ПЯЕ [3].

Приклад розрахунку припустимого внеску по ПЯЕ.

Для розрахунку вимог до ЯЕ, що включаються в договір енергопостачання, визначити припустимий внесок для кожного споживача (ПВС) і припустимий внесок зовнішньої системи електропостачання ПВС у точці загального приєднання (рис. 8.1).

Вихідні дані:

$$S_T = 16000 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{KH} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А} \text{ – потужність КЗ на шинах 10 кВ};$$

$$S_{KB} = 2500 \text{ МВ} \cdot \text{А} \text{ – потужність КЗ на шинах 110 кВ}.$$

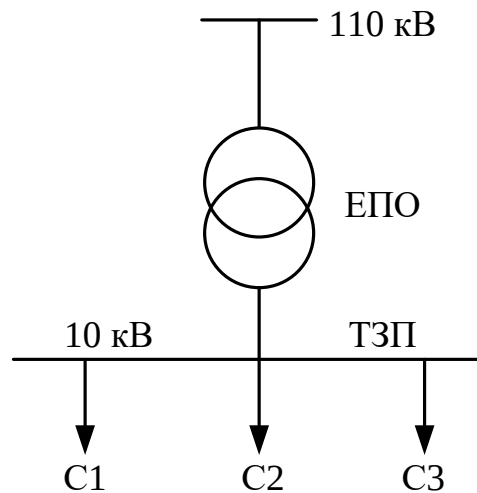


Рисунок 8.1 – Схема приєднання споживачів C1, C2, C3 у ТЗП

На рис. 8.1 ЕПО – енергопостачальна організація.

Таблиця 8.2 – Значення ПЯЕ для мережі $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$

ПЯЕ	Нормально припустиме, %	Гранично припустиме, %
$K_{U(5)}$	4	6
$K_{U(11)}$	2	3
K_U	5	8
K_{2U}	2	4

Заявлені потужності споживачів за договором (максимум навантаження):

$$S_{П1}=2500 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{П2}=3500 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{П3}=6000 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Оцінку припустимого внеску необхідно провести для таких ПЯЕ:

$K_{U(5)}$ і K_U для С1 (тягова ПС має 6-пульсні перетворювачі);

$K_{U(11)}$ і K_U для С2 (комплексне навантаження);

K_{2U} і K_U для С3 (комплексне навантаження).

Розв'язок.

1. Визначимо значення $d_{ПЯЕ}$ на шинах 10 кВ як частку нормованого значення ПЯЕ, розглянуту в якості сумарного припустимого внеску, створюваного всіма споживачами:

$$d_{ПЯЕ} = \frac{1}{1 + \frac{S_{кН}}{S_{кВ}}} = \frac{1}{1 + \frac{100}{2500}} = \frac{1}{1,04} = 0,962.$$

При цьому частка енергопостачальної організації $d_{ПЯЕЕПО}=1-0,962=0,038$.

2. Визначимо відносини дозволеної потужності кожного споживача до пропускної здатності мережі в точці контролю:

$$d_{C1} = \frac{S_{C1}}{S_T} = \frac{2500}{16000} = 0,156;$$

$$d_{C2} = \frac{3500}{16000} = 0,219;$$

$$d_{C3} = \frac{6000}{16000} = 0,375.$$

Визначимо припустимі внески.

Для споживача С1 . Для тягової підстанції значення показника ступені а (див. табл. 8.2) становлять: для $K_{U(5)}$ $a = 1$, для K_U $a = 1,3$. У такий спосіб можна визначити ПВС:

– за коефіцієнтом 5-ї гармоніки напруги:

$$\text{ПВС}_{\text{норм}} = \Pi_{\text{норм}} (d_{\text{П1}} d_{\text{ПЯЕ}})^{1/\alpha} = 4 \cdot (0,156 \cdot 0,96)^{1/1} = 0,599 \% ;$$

$$\text{ПВС}_{\text{гран}} = \Pi_{\text{гран}} (d_{\text{П1}} d_{\text{ПЯЕ}})^{1/\alpha} = 6 \cdot (0,156 \cdot 0,96)^{1/1} = 0,899 \% .$$

– за коефіцієнтом викривлення синусоїдності форми кривої напруги:

$$\text{ПВС}_{\text{норм}} = 5 \cdot (0,156 \cdot 0,96)^{1/1,3} = 1,161 \% ;$$

$$\text{ПВС}_{\text{гран}} = 8 \cdot 0,232 = 1,856 \% .$$

Для споживача С2:

– за коефіцієнтом 11-ї гармоніки напруги:

$$\text{ПВС}_{\text{норм}} = 2 \cdot (0,219 \cdot 0,96)^{1/2} = 0,917 \% ;$$

$$\text{ПВС}_{\text{гран}} = 3 \cdot 0,459 = 1,3787 \% .$$

– за коефіцієнтом викривлення синусоїдності форми кривої напруги:

$$\text{ПВС}_{\text{норм}} = 5 \cdot (0,219 \cdot 0,96)^{1/2} = 2,293 \% ;$$

$$\text{ПВС}_{\text{гран}} = 8 \cdot 0,459 = 3,67 \% .$$

Для споживача С3:

– за коефіцієнтом несиметрії напруги за зворотною послідовністю:

$$\text{ПВС}_{\text{норм}} = 2 \cdot (0,375 \cdot 0,96)^{1/2} = 1,2 \%;$$

$$\text{ПВС}_{\text{гран}} = 4 \cdot (0,375 \cdot 0,96)^{1/2} = 2,4 \%.$$

– за коефіцієнтом викривлення синусоїдності форми кривої напруги:

$$\text{ПВС}_{\text{норм}} = 5 \cdot (0,375 \cdot 0,96)^{1/2} = 3 \%;$$

$$\text{ПВС}_{\text{гран}} = 8 \cdot 0,6 = 4,8 \%.$$

Визначимо сумарний внесок споживачів:

– за коефіцієнтом викривлення синусоїдності форми кривої напруги:

$$\text{ПВС}_{\Sigma} = \left[(\text{ПВС}_1)^{\alpha} + (\text{ПВС}_2)^{\alpha} + (\text{ПВС}_3)^{\alpha} \right]^{1/\alpha}. \quad (8.6)$$

Показник ступеня α визначимо, виходячи з того, що на шинах 10 кВ підключене змішане навантаження. Тоді:

$$\alpha = 1,3d_6 + 1,6d_{12} + 2d_{\text{пр}}; \quad (8.7)$$

$$d_6 = \frac{S_{C1}}{\sum S_C} = \frac{2500}{2500 + 3500 + 6000} = 0,21; \quad (8.8)$$

$$d_{\text{пр}} = \frac{S_{C3} + S_{C2}}{\sum S_C} = \frac{3500 + 6000}{2500 + 3500 + 6000} = 0,79; \quad (8.9)$$

$$\alpha = 1,3 \cdot 0,21 + 1,6 \cdot 0 + 2 \cdot 0,79 = 1,853.$$

Таким чином, сумарний внесок споживачів у коефіцієнт викривлення синусоїдності кривої напруги:

$$\text{ПВС}_{\Sigma\text{норм}} = \left[1,16^{1,853} + 2,29^{1,853} + 3^{1,853} \right]^{1/1,853} = 4,09 \%.$$

не перевищує нормально припустимого рівня ПЯЕ на шинах 10 кВ $K_U = 8\%$. У цьому випадку:

$$ПВС_{\Sigma_{\text{гран}}} = \left[1,856^{1,853} + 3,67^{1,853} + 4,8^{1,853} \right]^{1/1,853} = 6,56 \, \%.$$

Дане значення не перевищує гранично припустимого рівня ПЯЕ на шинах 10 кВ $K_U = 8\%$.

Отже, нормально й гранично припустимий внесок усіх споживачів на шинах 10 кВ не перевищує нормативних значень, установлених ДСТУ EN 50160:2014.

Якщо не враховувати, що в точці загального приєднання підключене змішане навантаження, то сумарний нормально припустимий внесок усіх споживачів по K_U можна визначити:

$$ПВС_{\Sigma} = П \left[d_{\text{ПЯЕ}} (d_{C1} + d_{C2} + d_{C3}) \right]^{\frac{1}{\alpha}} = 5 \left[0,96 \cdot (0,156 + 0,219 + 0,375) \right]^{\frac{1}{2}} = 4,2 \, \%. \quad (8.10)$$

Визначимо нормально припустимий внесок ЕПО по K_U :

$$ПВС_{\text{ЕПО}} = \left[C_{\text{норм}}^{\alpha} - (ППВ_{\Sigma})^{\alpha} \right]^{\frac{1}{\alpha}} = \left[5^{1,85} - 4,09^{1,85} \right]^{0,54} = 2,65 \, \%. \quad (8.11)$$

У практиці розрахунку припустимого внеску важливу роль відіграє також динамічний характер навантаження. Навантаження окремих споживачів протягом доби або технологічного циклу може істотно змінюватися, що впливає на генерацію вищих гармонік, несиметрію фаз або флікери. Тому розрахунок ДВ доцільно проводити не лише для максимальних значень потужності, а й для характерних режимів роботи – пікових, мінімальних та аварійних. Це дозволяє точніше передбачити вплив споживача на якість

електроенергії в точці загального приєднання й уникнути порушення нормативів при зміні умов експлуатації.

Крім того, важливим етапом є перевірка виконання умов електромагнітної сумісності (ЕМС), з урахуванням не лише одного споживача, а всієї групи, підключеної до відповідної ділянки мережі. У деяких випадках, особливо при високій концентрації перетворювальних пристроїв (частотні приводи, тиристорні регулятори тощо), сумарний вплив може перевищити припустимі межі навіть при дотриманні нормативів кожним споживачем окремо. Тому розрахунки ПВ мають бути невід'ємною частиною технічного обґрунтування приєднання нових потужностей, реконструкції мережі або оновлення договірних умов з енергопостачальною організацією.

Висновки по розділу 8.

У результаті проведених розрахунків і аналізу встановлено, що визначення припустимого внеску споживача в показники якості електроенергії є важливим інструментом забезпечення електромагнітної сумісності в системі електропостачання. Запропоновані методики дозволяють оцінити припустимий рівень впливу окремих споживачів на напругу в точці загального приєднання з урахуванням типу навантаження, потужності трансформаторів, параметрів мережі та джерел гармонік. Розрахунки показали, що за умови дотримання нормативів (наприклад, ДСТУ EN 50160:2014) сумарний внесок споживачів не перевищує граничних меж по основних показниках якості, таких як викривлення синусоїдності та гармонічні складові. Це підтверджує ефективність розглянутої методики для обґрунтованого включення вимог до якості електроенергії в договори енергопостачання та подальшого технічного контролю за станом мережі.

9 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі розроблені заходи з охорони праці під час монтажу пристроїв РЗАіТ для оцінювання рівня якості електричної енергії. На електротехнічний оперативно-ремонтний персонал, який здійснює монтаж та обслуговування обладнання РЗАіТ, впливають такі шкідливі виробничі фактори [11, 12]:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

9.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

9.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Живлення переносного інструменту та обладнання, яке використовується в процесі монтажних робіт, та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Під час влаштування системи РЗАіТ та обліку спожитої/виробленої електроенергії для забезпечення робіт, що їх провадять в колах вимірювальних приладів і пристроїв релейного захисту, всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги слід постійно заземлювати [13]. За необхідності розриву кола струму вимірювальних приладів і реле кола вторинної обмотки трансформатора струму попередньо закорочується на спеціально призначених для цього затискачах.

Розривати кола, підключені до вторинної обмотки трансформатора струму, забороняється. За необхідності розриву цих кіл вони мають бути попередньо замкнуті перемичкою, встановленою до передбачуваного місця розриву (рахуючи від трансформатора струму). Під час встановлення перемички слід застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками.

Під час роботи на трансформаторах струму або в колах, підключених до їх вторинних обмоток, слід виконувати такі заходи безпеки: зажими вторинних обмоток до закінчення монтажу кіл, що до них підключаються, мають бути замкнені накоротко. Після приєднання змонтованих кіл до трансформатора струму закоротку слід переносити на найближчу збірку затискачів і знімати тільки після повного закінчення монтажу та перевірки правильності приєднання змонтованих кіл; під час перевірки полярності до подавання імпульсів струму в первинну обмотку прилади слід приєднувати до затискачів вторинної обмотки. Забороняється використовувати шини первинних обмоток як струмовідні під час монтажних та зварювальних робіт.

Робота в колах пристроїв релейного захисту, електроавтоматики і телемеханіки (РЗАіТ) проводиться за виконавчими схемами. Під час робіт в пристроях РЗАіТ слід користуватися слюсарно-монтажним інструментом з ізолювальними рукоятками.

Під час перевірки кіл вимірювання, сигналізації, керування і захисту за необхідності в приміщенні електроустановок напругою понад 1000 В дозволяється залишатися одному члену бригади за умовами роботи (наприклад, регулювання вимикачів, перевірка ізоляції); працівник, який перебуває окремо

від керівника робіт, повинен мати групу III. Під час робіт в колах трансформаторів напруги з подачею напруги від стороннього джерела знімаються запобіжники з боку вищої і нижчої напруги, а також відключаються автомати від вторинних обмоток.

За необхідності проведення будь-яких робіт в колах чи на апаратурі РЗАіТ за умови ввімкненого основного обладнання слід вжити додаткових заходів щодо запобігання його випадковому відключенню. Забороняється на панелях або поблизу місця розміщення релейної апаратури провадити роботи, які викликають сильний струс релейної апаратури, що може спричинити до помилкових дій реле.

Перемикання, вмикання і вимикання вимикачів, роз'єднувачів та іншої комутаційної апаратури, пускання і зупинення агрегатів, регулювання режиму їх роботи, необхідні під час налагодження або перевірки пристроїв РЗАіТ, провадять тільки оперативні працівники.

В електроустановках споживачів підготовку робочих місць і допуск до робіт з електролічильниками, за показами яких здійснюються розрахунки за спожиту електроенергію, виконують працівники електропостачальної організації.

Встановлення і зняття електролічильників та інших вимірювальних приладів, підключених до вимірювальних трансформаторів, повинні провадити за нарядом зі зняттям напруги два працівники, один з яких повинен мати групу IV, а другий — групу III. За наявності в колах електролічильників контактів (блоків), що дозволяють працювати без розмикання кіл, підключених до вторинних обмоток трансформатора струму, ці роботи можна виконувати за розпорядженням, не знімаючи напруги зі схеми електролічильника. За відсутності вказаних контактів напругу і струм в колах електролічильника слід відключити.

Приєднання вимірювальних приладів, встановлення і зняття електролічильників, підключених до вимірювальних трансформаторів, за наявності випробувальних блоків або спеціальних затискачів, що дають змогу

безпечно закорочувати кола струму, виконуються без зняття навантаження і напруги. Встановлення і зняття електролічильників безпосереднього ввімкнення допускається проводити за розпорядженням одному працівнику з групою III. Встановлення і зняття електролічильників, а також приєднання вимірювальних приладів виконуються зі зняттям напруги.

В разі розміщення однофазних електролічильників безпосереднього ввімкнення в приміщеннях без підвищеної небезпеки відносно ураження людей електричним струмом, роботи з електролічильниками можуть виконуватися одноособово – без зняття напруги, але з відключенням навантаження.

9.1.2 Електробезпека

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [14, 15]:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізолювані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх

пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

9.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

9.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [16] встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення. Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні наведено в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [17]: температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні допустимих параметрів мікроклімату не повинна перевищувати 2°C; якщо температура поверхонь вище або нижче допустимої температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м; для забезпечення нормованих значень швидкості руху повітря проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

9.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [16]. Нормовані параметри забруднення повітря в робочій зоні наведено в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимальна разова	Середньодобова	
Оксид вуглецю		20	4
Пил нетоксичний	4	4	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця [17]. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів з очищення забруднених поверхонь. Потрібно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (менша зернистість), тим вище небезпека. Низька вологість збільшує потенційну небезпеку, це повинне прийматися в увагу під час прибирання. Планувати прибирання потрібно на

час, коли устаткування вимкнене, зокрема в другу половину дня п'ятниці або на вихідні.

9.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт в процесі виконання робіт – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Допустимі рівні виробничого освітлення наведені в таблиці 9.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп [E27 LED 15W NW A60 "SG"](#). Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 9.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий середній великий	світлий середній темний	400	200	4	2,4

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

9.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки». Нормовані параметри виробничого шуму в робочій зоні наведено в таблиці 9.4.

Таблиця 9.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні. Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі; для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

9.2.5 Виробнича вібрація

На нашому підприємстві присутня вібрація типу – За. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання. Нормовані параметри виробничої вібрації в робочій зоні наведено в таблиці 9.9.

Таблиця 9.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	$\frac{1,3^*}{108}$	$\frac{0,45}{99}$	$\frac{0,22}{93}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	-	-	$\frac{2,8}{115}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$

*В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с•10⁻², в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи; зміна конструктивних елементів машин; застосування ЗІЗ, а саме рукавиці, вкладиші та прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

9.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [21, 22]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [13], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [24].

Приміщення, де здійснюються встановлення обладнання СЕС, за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини

і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилю і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами II-III (місця за межами приміщень, де зберігаються тверді горючі речовини).

Будівля характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 9.6.

Таблиця 9.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхові (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 9.7.

Таблиця 9.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 9.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 9.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 9.8 (знаменник).

Таблиця 9.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

В приміщеннях п/ст, де встановлене обладнання РЗАіТ для контролю якості, встановлено 5 порошкових вогнегасників ВП-5(8).

ВИСНОВКИ

Дана бакалаврська робота була присвячена темі врахування схеми мережі під час оцінювання рівня якості електричної енергії. В умовах зростаючої кількості нелінійних, несиметричних та імпульсних навантажень, а також широкого використання автоматизованих систем, питання забезпечення належного рівня ПЯЕ набуває особливої актуальності. В ході проведеного дослідження було отримано такі теоретичні та практичні результати:

1. Проаналізовано механізми формування сумарного рівня електромагнітних завад у точках загального приєднання. Показано, що процес додавання викривлень залежить від характеру джерел, частотних властивостей мережі та взаємного впливу навантажень. Використання розглянутої методики дозволяє точніше визначати ПЯЕ.

2. Досліджено частотні характеристики елементів системи електропостачання. Встановлено, що зміна опорів у залежності від гармоніки визначає поведінку мережі у частотному діапазоні. Такі характеристики є ключовими для прогнозування резонансів та розробки фільтрокомпенсуючих засобів.

3. Встановлено, що явища резонансу в СЕП можуть призводити до локального зростання рівня гармонік і перенапруг. Частотна поведінка мережі, наявність ємнісних елементів та конфігурація з'єднань суттєво впливають на ПЯЕ, особливо у високовольтних мережах з довгими лініями передачі або в умовах фільтрації гармонік.

4. Проведено аналіз режимів роботи мереж при несиметрії фаз. Доведено, що несиметричне навантаження, обрив нейтралі чи пошкодження фаз викликають зсув нейтралі, появу струмів нульової та зворотної послідовностей, що призводить до зниження якості електроенергії та потребує спеціальних заходів компенсації.

5. Встановлено прямий зв'язок між погіршенням якості електроенергії та збільшенням втрат у системі. Додаткові технічні втрати через гармоніки та

несиметрію можуть досягати 10–15% від основних втрат, особливо в умовах резонансів і великої кількості нелінійних споживачів. Урахування цих втрат необхідне при плануванні та модернізації СЕП.

6. Досліджено вплив несинусоїдальності напруг і струмів на точність приладів обліку. Показано, що класичні індукційні лічильники не забезпечують достовірного обліку в умовах спотворень, тоді як сучасні цифрові прилади мають розширені функції спектрального аналізу, що дозволяє проводити справедливий і точний комерційний розрахунок.

7. Проаналізовано вплив системи заземлення мережі напругою до 1000 В на якість електроенергії. Показано, що системи TN-C є найбільш чутливими до викривлень через об'єднання PEN-провідника, тоді як TN-S, TT і IT забезпечують кращу стабільність ПЯЕ за умови правильного монтажу. Заземлення істотно впливає на симетрію напруг, зсув нейтралі, поширення гармонік і рівень імпульсних завад у точках загального приєднання.

8. Запропоновано методику розрахунку припустимого внеску споживача в спотворення якості електроенергії в точці приєднання. Розрахунки показали, що дотримання допустимих меж за параметрами K_U , K_{2U} , гармоніками та флікером забезпечує електромагнітну сумісність і стабільну роботу СЕП. Методика враховує тип джерел спотворень, топологію мережі та ступінь їх взаємодії.

9. В розділі охорона праці розглянуто небезпечні фактори які діють на персонал який обслуговує електричні мережі в точках загального приєднання.

Загалом у роботі обґрунтовано, що без комплексного врахування схеми мережі – її заземлення, топології, частотної поведінки та характеру навантажень – неможливо об'єктивно оцінити вплив конкретного споживача на ПЯЕ. Тільки системний підхід дозволяє забезпечити нормативну якість електроенергії, технічну безпеку, довговічність обладнання та енергоефективність мережі. Тема роботи є актуальною в умовах зростаючої складності електроенергетичних систем та появи нових викликів, пов'язаних із цифровізацією, електрифікацією транспорту, розосередженою генерацією та

підвищеними вимогами до ПЯЕ. Отримані в роботі результати можуть бути використані для вдосконалення процедур проектування, експлуатації та технічного обґрунтування приєднань нових споживачів, зокрема в умовах промислових, транспортних і житлово-комунальних електромереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папаїка Ю. А. Енергетична ефективність систем електропостачання : монографія. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. 148 с.
2. СОУ НЕК 03.120.4-14:2021. Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах. Київ : НЕК «Укренерго», 2021. 316 с.
3. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електроенергії в системах розподілу загального користування. – [Чинний від 2015-01-01]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 35 с.
4. СОУ-Н.ЕЕ 40.1-00100227-101:2014. Норми технологічного проектування енергетичних систем та електричних мереж 35 кВ та вище. – Київ : Мінпаливенерго України, 2014. – 92 с.
5. Кулик В. В., Тептя В. В., Бурикін О. Б., Сікорська О. В. Типові рішення при проектуванні електричних мереж напругою 110–330 кВ: навч. посіб. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 110 с.
6. Малогулко, Ю. В., Бурикін, О. Б., Кацадзе, Т. Л., & Нетребський, В. В. (2022). Електричні системи і мережі. Частина 3 : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс]. Вінниця: ВНТУ. 172 с.
7. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). – Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017, 617 с.
8. СОБУ МЕВ ЕЕ 40.1-00100227-1:2016. Побудова та експлуатація електричних мереж. Технічна політика. – Київ : Міненерговугілля України, 2016. – 84 с.
9. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: підручник. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 540 с.

10. ГКД 34.35.108-2004 "Керівні вказівки з протиаварійної автоматики енергосистем. Інструкція".

11. ДСНіП. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу : наказ МОЗ України № 248 від 08.04.2014.

12. ДСТУ-Н Б А 3.2-1:2007. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

13. ДНАОП 1.1.10-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

14. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 109 с.

15. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01). Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

16. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

17. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – К. : Мінрегіонбуд України, 2013. – 149 с.

18. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885.

19. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

20. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

21. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. – К. : МВС України, 2014. – 47 с.

22. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

23. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.

24. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

25. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

26. Наказ Міністерства внутрішніх справ України. Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТКИ

Додаток А.

Протокол перевірки навчальної (кваліфікаційної) роботи

Назва роботи: «Врахування схеми мережі під час оцінювання рівня якості електричної енергії»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (зазначити))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем
(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

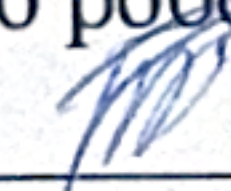
Керівник: д.т.н., професор кафедри ЕСС Комар В. О.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності	
StrikePlagiarism	
Оригінальність	98,7
Загальна схожість	1,3

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

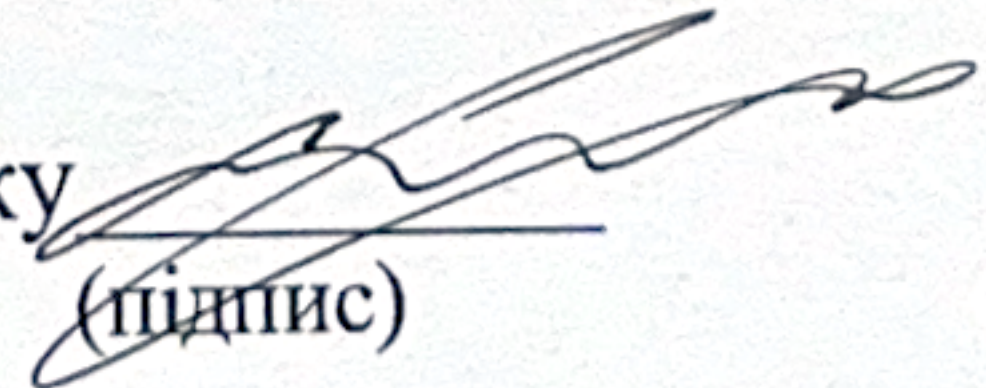
Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

Автор 
(підпис)

Перебора М. Р.
(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Вишневський С. Я
(прізвище, ініціали)

Експерт _____
(за потреби) (підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Додаток Б

ІЛЮСТРАЦІЙНА ЧАСТИНА

«Врахування схеми мережі під час оцінювання рівня якості електричної енергії»



Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

1

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:
«Врахування схеми мережі під час оцінювання рівня
якості електричної енергії»

Керівник роботи: д.т.н., проф. каф. ЕСС

Комар В. О.

Виконав: студент групи ЕС-216

Перебора М. Р.

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку енергетики, що супроводжується широким впровадженням електронних пристроїв, частотних перетворювачів, засобів автоматизації та розосередженої генерації, забезпечення належного рівня якості електричної енергії стає критично важливим [1]. Одним з ключових факторів, який визначає рівень ПЯЕ, є топологія мережі, включаючи конфігурацію, заземлення, частотні характеристики та режим роботи елементів електропостачання. Ігнорування особливостей схеми мережі призводить до недостовірної оцінки ПЯЕ [2], виникнення резонансів, несиметричних режимів, надлишкових втрат і помилок у комерційному обліку. Саме тому тема врахування схеми мережі при оцінюванні якості електроенергії є актуальною, особливо в контексті гармонізації із державними вимогами та підвищення надійності енергосистем.

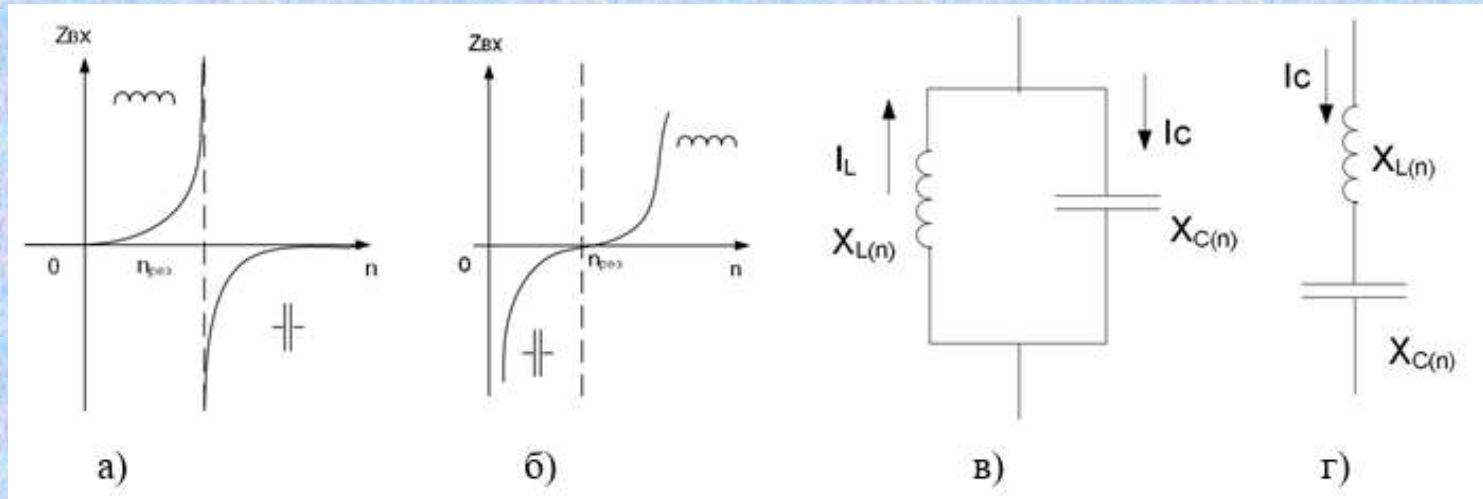
Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є обґрунтування необхідності врахування схеми та параметрів електричних мереж при оцінці показників якості електроенергії та розробка підходів до кількісного визначення впливу окремих елементів схеми на ПЯЕ.

Амплітудно-частотні характеристики СЕП при резонансі струмів

3

Відсутність обліку резонансних явищ під час проєктування або експлуатації систем може призвести до:

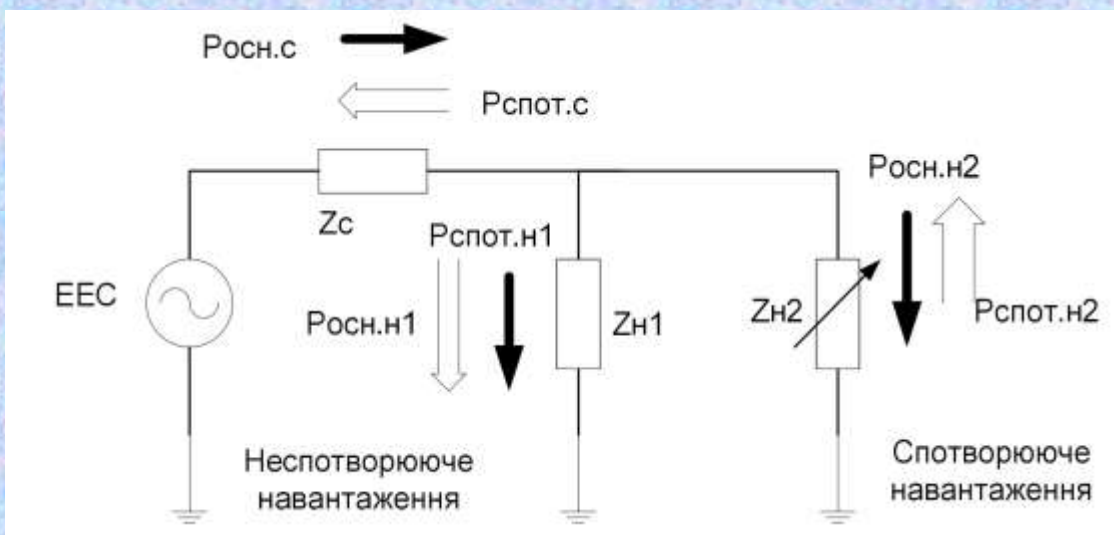
- вибухів силових конденсаторів,
- відмов захистів через хибні спрацьовування,
- локального перегріву кабелів та шин,
- зниження ресурсу обладнання.



(а) і напруг (б) і відповідні їм схеми заміщення при резонансі струмів (в) і резонансі напруг (г)

Напрямок активних потужностей у системі при спотворюючому навантаженні

4



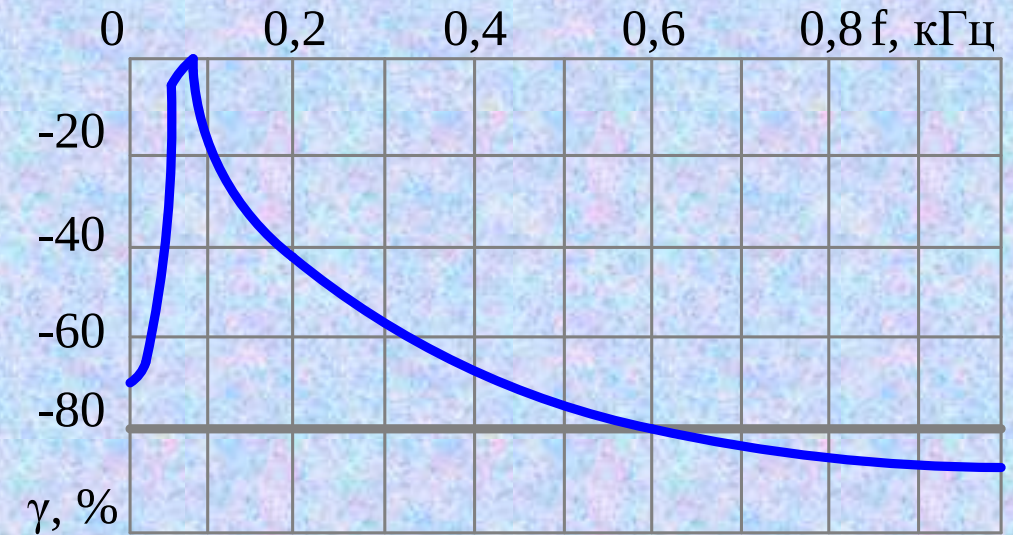
Z_c , $Z_{н1}$, $Z_{н2}$ – опір відповідно енергосистем, що неспотворюючого і спотворюючого навантаження; $P_{осн.с}$, $P_{осн.н1}$, $P_{осн.н2}$ – активні потужності на основній частоті прямої послідовності відповідно енергосистеми, неспотворюючого і спотворюючого навантаження; $P_{спот.с}$, $P_{спот.н1}$, $P_{спот.н2}$ – активні потужності спотворень, обумовлені режимами роботи спотворюючого навантаження.

Класифікація приладів обліку електроенергії

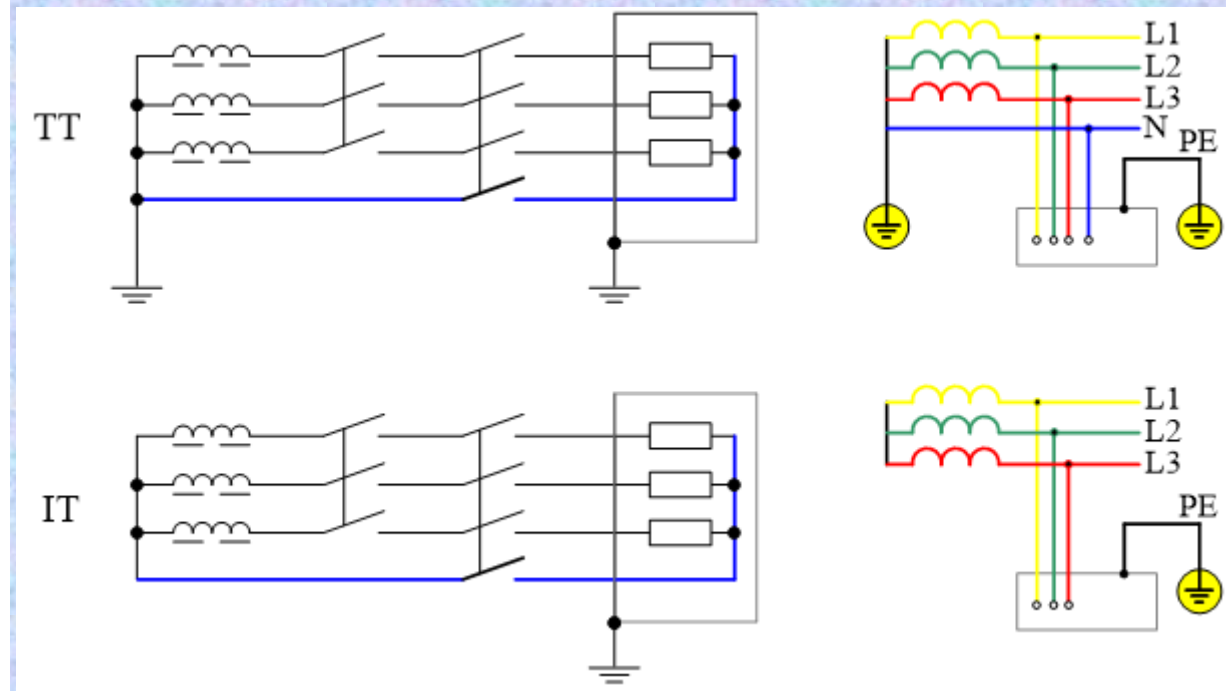
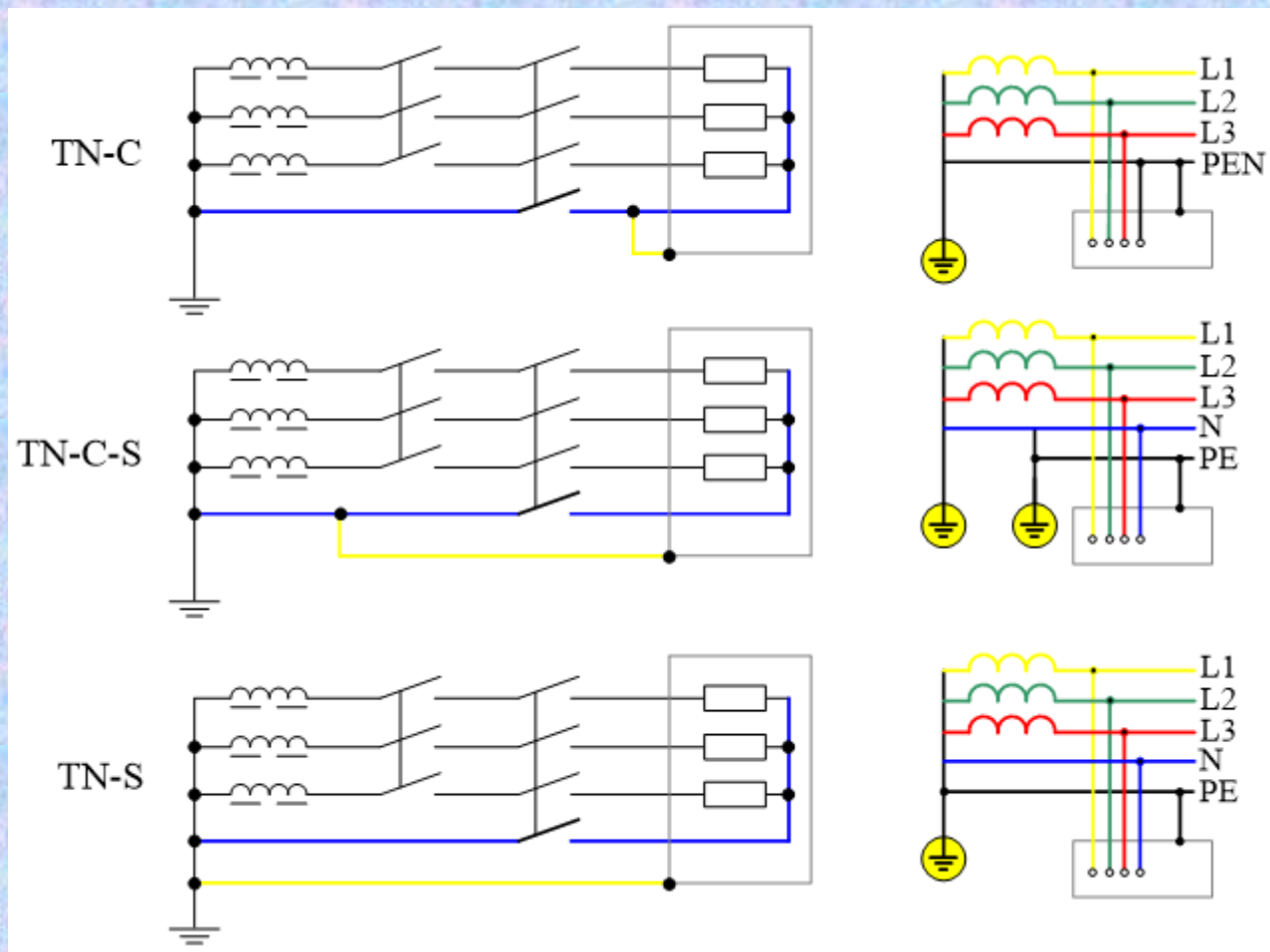
У сучасних електроенергетичних мережах зростає частка нелінійних споживачів, які створюють гармонічні спотворення напруги та струму. Це суттєво впливає на точність комерційного обліку електроенергії, особливо у випадках застосування індукційних та деяких типів електронних лічильників [5]. Несинусоїдальність викликає систематичні похибки в показах обліку: споживачі, які створюють спотворення, недоплачують, тоді як ті, хто отримує неякісну електроенергію – переплачують. Така ситуація призводить до економічних втрат у масштабах енергосистеми, знижує прозорість розрахунків і викликає потребу у впровадженні більш точних, мікропроцесорних приладів обліку.



Електронні й мікропроцесорні прилади обліку, на відміну від індукційних, ураховують напрямок потужностей вищих гармонік у точці обліку.



Частотна характеристика індукційного лічильника



Бакалаврська робота присвячена врахуванню схеми мережі при оцінюванні рівня якості електричної енергії (ПЯЕ) в умовах зростання нелінійних, несиметричних та імпульсних навантажень і автоматизації систем. Дослідження дало такі результати:

1. Проаналізовано механізми формування електромагнітних завад у точках приєднання. Показано залежність викривлень від джерел, частотних властивостей мережі та взаємодії навантажень, що підвищує точність оцінки ПЯЕ.
2. Досліджено частотні характеристики елементів системи електропостачання (СЕП). Зміна опорів залежно від гармонік впливає на поведінку мережі, що важливо для прогнозування резонансів і розробки фільтрів.
3. Встановлено, що резонанси в СЕП спричиняють зростання гармонік і перенапруг, особливо у високовольтних мережах із довгими лініями чи фільтрацією.
4. Виявлено, що несиметрія фаз через нерівномірне навантаження чи пошкодження викликає зсув нейтралі та появу струмів нульової/зворотної послідовностей, погіршуючи ПЯЕ.
5. Доведено зв'язок між погіршенням ПЯЕ та втратами в СЕП (до 10–15% від основних втрат через гармоніки та несиметрію), що вимагає врахування при модернізації.
6. Показано, що несинусоїдальність напруг і струмів знижує точність індукційних лічильників, тоді як цифрові прилади забезпечують точний облік завдяки спектральному аналізу.
7. Досліджено вплив систем заземлення (напругою до 1000 В) на ПЯЕ. Система TN-C є чутливою до викривлень, а TN-S, TT, IT – стабільніші за правильного монтажу.
8. Запропоновано методику розрахунку внеску споживача у спотворення ПЯЕ, яка забезпечує електромагнітну сумісність і стабільність СЕП.
9. У розділі охорони праці розглянуто небезпечні фактори для персоналу, який обслуговує електромережі.

Дякую за увагу!